

Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel

Herausgeber:

Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung

Fachgebiet Verkehrstechnik

Anja Ober-Sundermeier

**Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognoze an
Engpässen auf Autobahnen unter besonderer
Berücksichtigung von Arbeitsstellen**

Kasseler Dissertation

ISBN Nr.: 3-89958-034-6

Schriftenreihe Verkehr

Heft 15 - Mai 2003

Herausgeber:

Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung

Fachgebiet Verkehrstechnik

Universität Kassel

34109 Kassel

© 2003, kassel university press GmbH, Kassel

www.upress.uni-kassel.de

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Vorwort

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognoze an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer. Für die Erstellung einer Stauprognoze sind im Wesentlichen drei Modellierungsschritte erforderlich: die Ermittlung der zu erwartenden Verkehrsnachfrage, die Schätzung der Kapazität des betreffenden Streckenelements sowie die Modellierung des Verkehrsablaufs bzw. der Stauentwicklung am Engpass unter Nutzung der beiden erstgenannten Eingangsgrößen. Der erste, eher theoretisch ausgelegte Teil der Arbeit analysiert bekannte Methoden und Ansätze zur Beschreibung der Verkehrsnachfrage sowie der Kapazität des Engpasses bei unterschiedlichen Randbedingungen. Der zweite Teil befasst sich mit einer umgangreichen Erfassung von Verkehrsablaufdaten an Arbeitsstellen und ihrer Aufbereitung. Wesentliche Ergebnisse sind ein durch empirische Daten und Plausibilitätsüberlegungen begründetes Verfahren zur Schätzung der Kapazität sowie ein Verfahren zur Berechnung von zu erwartenden Staumaßen (Länge, Dauer, Zeitverlust) bei vorgegebenem Zufluss (Verkehrsnachfrage).

Die Anwendung eines im Rahmen der Arbeit entwickelten EDV-Programms auf unterschiedliche Kombinationen von latenter Nachfrage und Verkehrsführung an der Arbeitsstelle führt bei starken Überlastungen zunächst zu unrealistisch hohen Staumaßen. Offenbar weichen zahlreiche über die aktuelle Verkehrssituation informierte Kraftfahrer räumlich, eventuell auch zeitlich aus. Dieser erhebliche Verlagerungseffekt wird durch plausible Korrekturen der Zuflussverkehrsstärke berücksichtigt, müsste aber in weiterführenden Untersuchungen differenzierter analysiert werden.

Frau Dr.-Ing. Anja Ober-Sundermeier hat die Arbeit während ihrer Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Verkehrstechnik der Universität Kassel als Dissertation erstellt. Wesentliche Teile entstanden im Rahmen eines Forschungsauftrages der Bundesanstalt für Straßenwesen, der für die Finanzierung, die Bereitstellung von Material und wertvolle Fachgespräche zu danken ist.

Mein besonderer Dank gilt den Kollegen, die im Promotionsverfahren als Zweitgutachter oder weitere Prüfer mitgewirkt haben: Herrn Prof. Dr.-Ing. Ressel (Universität Stuttgart), Herrn Prof. Dr.-Ing. Köhler und Herrn Prof. Dr.-Ing. Racky.

Kassel, im Juli 2003

Prof. Dr.-Ing. Heinz Zackor
(Fachgebiet Verkehrstechnik)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Verkehrstechnik der Universität Kassel. Sie wurde durch Fördermittel der Bundesanstalt für Straßenwesen ermöglicht.

Mein herzlicher Dank gilt zunächst Herrn Professor Dr.-Ing. Heinz Zackor, der durch seine stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion hervorragende Rahmenbedingungen für die Projektbearbeitung geschaffen hat. Danken möchte ich ebenso Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfram Ressel für die Übernahme des Korreferats.

Wertvolle Denkanstöße ergaben sich zusätzlich bei den vielfältigen Diskussionen im Kollegenkreis. Hervorzuheben ist hier besonders Herr Dipl.-Ing. Joachim Otto, der durch seine Programmierarbeit einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Praxisrelevanz dieser Arbeit geleistet hat.

Anja Ober-Sundermeier

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Aktueller Stand der Wissenschaft und Praxis	4
1.3 Methodische Vorgehensweise.....	10
2. Ermittlung der Verkehrsnachfrage	13
2.1 Prognosezeitraum	13
2.2 Langzeitprognose.....	13
2.2.1 Abschnittsübergreifende typisierte Ganglinien aus der bundesweiten Auswertung der Dauerzählstellen	13
2.2.2 Abschnittsbezogene typisierte Ganglinien aus länderspezifischen Auswertungen.....	16
2.2.3 Verwendung von historischen Ganglinien aus bestehenden Datenbanken..	18
2.2.4 Berücksichtigung stochastischer Schwankungen.....	18
2.2.5 Fazit	20
2.3 Kurzfristige Prognose unter Berücksichtigung aktueller Messwerte.....	21
3. Ansätze zur Ermittlung der Kapazität eines Engpasses	23
3.1 Definition der Kapazität eines Engpasses	23
3.2 Grundkapazität bei idealen Randbedingungen (freie Strecke).....	25
3.3 Kapazitätsbeeinflusende Faktoren	26
3.4 Querschnittsgestaltung.....	28
3.4.1 Grundlagen der Verkehrsführung im Bereich von Arbeitsstellen	28
3.4.2 Berücksichtigung der Verkehrsführung bei der Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen.....	31
3.4.3 Berücksichtigung von Fahrstreifenreduktionen auf der freien Strecke.....	34
3.5 Verkehrszusammensetzung und Längsneigung	35
3.5.1 Vorbemerkung	35
3.5.2 Berücksichtigung des Schwerverkehrs in Verbindung mit Längsneigungen im Bereich von Arbeitsstellen.....	36
3.5.3 Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils in Verbindung mit Längs- neigungen auf der freien Strecke	40

3.6 Zusammensetzung des Fahrerkollektivs	42
3.7 Umfeldbedingungen	43
3.8 Unfälle und Nothalte.....	44
3.8.1 Einfluss von Unfällen und Nothalten auf die Kapazität	44
3.8.2 Mitbenutzung von Seitenstreifen für den fließenden Verkehr	46
3.9 Knotenpunkte.....	46
3.9 Fazit	48
4. Modelle zur Nachbildung der Stauentwicklung.....	51
4.1 Vorbemerkung.....	51
4.2 Stochastische Warteschlangenmodelle	53
4.3 Deterministisches Warteschlangenmodell	55
4.4 Fundamentaldiagramm und Theorie der Dichtestoßwellen.....	58
4.5 Die Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs.....	64
4.6 Fazit	66
5. Empirische Untersuchungen des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen	71
5.1 Vorbemerkung.....	71
5.2 Auswertung vorhandener Staudaten für verschiedene Autobahnabschnitte	71
5.2.1 Automatisch erfasste Verkehrsdaten im Bereich von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer im hessischen Autobahnnetz.....	71
5.2.2 Automatisch erfasste Verkehrsdaten im Bereich von Arbeitsstellen kürzerer Dauer im Autobahnnetz von Nordrhein-Westfalen	74
5.2.3 Auswertung der Daten von umsetzbaren Stauwarnanlagen.....	77
5.3 Ergänzende Erhebungen.....	85
5.3.1 Messmethodik	85
5.3.2 Auswahl geeigneter Messstrecken	86
5.3.3 Auswertung der Messungen	88
6. Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Schätzung der Kapazität eines Arbeitsstellenengpasses	95
6.1 Vergleich der eigenen Datenbasis mit den vorhandenen Verfahren	95
6.1.1 Vorbemerkung	95
6.1.2 Arbeitsstellen längerer Dauer.....	96
6.1.3 Arbeitsstellen kürzerer Dauer.....	98
6.1.4 Zusammenfassung	101

6.2 Modifizierung der vorhandenen Verfahren an Hand der gewonnenen Datenbasis	101
6.2.1 Grundsätzlicher Aufbau des neuen Verfahrens.....	101
6.2.2 Einfluss der Verkehrsführung.....	102
6.2.3 Einfluss der Zusammensetzung des Fahrerkollektivs	103
6.2.4 Einfluss der Umfeldbedingungen	104
6.2.5 Einfluss des Schwerverkehrs und der Längsneigung.....	104
6.2.6 Knotenpunkte	106
6.2.7 Verknüpfung der Faktoren	107
6.3 Überprüfung des neuen Verfahrens an Hand der Datenbasis	108
7. Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis	113
7.1 Vorbemerkung.....	113
7.2 SAB - ein Software-Tool zur Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen von Arbeitsstellen	113
7.2.1 Aufbau und Funktionsweise des Programms SAB.....	113
7.2.2 Anbindung von Datenbanken.....	117
7.3 Quantifizierung jährlicher staubedingter Reisezeitverluste an Arbeitstellen längerer Dauer im Bundesautobahnnetz	117
7.3.1 Vorbemerkung	117
7.3.2 Datengrundlage	118
7.3.3 Berechnungsergebnisse	120
7.3.4 Fazit	125
8. Zusammenfassung	127

Literaturverzeichnis

Anlagen

1. Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Straßennetz in Deutschland hat eine Gesamtlänge von etwa 640.000 km [ELSNER, 2001]. Nur etwa 11.700 km dieser Straßen, also etwa 1,8%, sind als Autobahnen ausgebaut. Trotzdem werden auf ihnen über 30% der Fahrleistung des gesamten deutschen Straßennetzes (inner- und außerorts) abgewickelt [BMVBW, 2001]. Während der Ausbau des Autobahnnetzes auf wenige Maßnahmen zum Fahrstreifenausbau und zum Lückenschluss beschränkt bleibt, ist in den nächsten Jahren mit einer weiteren deutlichen Zunahme der Fahrleistungen - insbesondere im Güterverkehr - zu rechnen. Schon heute fallen jedoch durch staubedingte Verlustzeiten im Straßenverkehr volkswirtschaftliche Kosten in Milliardenhöhe an. Diese Verlustzeiten entstehen zum Teil - insbesondere in Ballungsräumen - durch eine generelle Überlastung des vorhandenen Straßennetzes, wobei die genaue Stauursache hier im Einzelfall schwer zu identifizieren ist. Einen weit entscheidenderen Anteil bewirken jedoch dauerhafte und temporäre Engpasssituationen durch eine zusätzliche Reduzierung der ohnehin begrenzten Kapazität von Streckenabschnitten. Die Entwicklung eines Verfahrens zur Modellierung des Verkehrsablaufs an Engpässen und damit die Quantifizierung der dort auftretenden Zeitverluste ist das Ziel der vorliegenden Arbeit.

Als Engpass auf einer Straße lässt sich der Punkt oder der Streckenabschnitt definieren, an dem die Kapazität (d.i. die maximal mögliche Anzahl von Fahrzeugen, die einen Querschnitt in einem bestimmten Zeitintervall passieren können) gegenüber dem stromaufwärts gelegenen Abschnitt reduziert wird. Engpässe auf Autobahnen können unterschiedliche Ursachen haben:

- bauliche Ursachen
 - temporäre Fahrstreifeneinengungen, -reduktionen und -überleitungen im Bereich von Arbeitsstellen
 - reguläre, dauerhafte Fahrstreifenreduktionen oder sonstige Änderungen im Querschnitt
 - schlechte Fahrbahnoberflächen (Längs- und Querunebenheiten)
 - nicht-fahrdynamische Trassierung (hohe Längsneigungen, kleine Kurvenradien)
- umfeldbedingte Ursachen
 - widrige Witterungsbedingungen (Regen, Schnee, Glätte, Nebel)
 - äußere Randbedingungen, die die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer von der eigentlichen Fahraufgabe ablenken (z.B. landschaftliche oder bauliche Attraktionen im Umfeld des Autobahnstreckenabschnittes)

- verkehrliche Ursachen
 - hoch belastete Autobahnknotenpunkte, an denen vermehrte Ein- und Ausfädelungsvorgänge den Verkehrsablauf auf den durchgehenden Fahrstreifen stören
 - Unfälle und sonstige Nothalte
- betriebliche Ursachen
 - Mautstationen
 - Grenzübergänge
 - Überlastung von Tank- und Rastanlagen mit Rückstau auf die durchgehende Fahrbahn

Mittels einiger Anhaltswerte lässt sich die Bedeutung der Engpasssituationen im gesamten Verkehrsablauf verdeutlichen:

Laut einer Statistik der koordinierten Baustellenplanung im Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, in der alle Arbeitsstellen¹ eines Jahres mit einer Dauer über 14 Tagen erfasst sind, werden in der Bundesrepublik Deutschland jährlich zwischen 580 und 750 dieser Arbeitsstellen längerer Dauer² zur Erneuerung oder Verbreiterung von Fahrbahnen sowie zur Erhaltung von Brücken eingerichtet [BMVBW, 2002]. In Abhängigkeit von der Dauer und der räumlichen Ausdehnung dieser Arbeitsstellen sind damit durchschnittlich vier bis sechs Prozent des Bundesautobahnnetzes durch Dauerbaustellen eingeschränkt. Die Anzahl der Arbeitsstellen (längerer Dauer) mit einer Dauer zwischen 2 und 13 Tagen wird nicht zentral registriert, sie liegt jedoch nach Umfragen bei den zuständigen Verkehrsbehörden bei etwa 600-700 pro Jahr. Einen weitaus stärkeren Einfluss auf den Verkehrsablauf eines Autobahnstreckenabschnittes haben jedoch die bislang qualitativ und quantitativ kaum erfassten Arbeitsstellen kürzerer Dauer³ (Tagesbaustellen). Im Gegensatz zu den Dauerbaustellen sind diese Arbeitsstellen aufgrund der einfachen Ausstattung in vielen Fällen mit der Sperrung eines oder mehrerer Fahrstreifen verbunden. Ihre Häufigkeit lässt sich nach Umfragen - bezogen auf das gesamte Bundesgebiet - auf jährlich etwa 70.000-80.000 beziffern (ausschließlich Sperrungen auf der Fahrbahn).

Einen wichtigen Anteil an den Überlastungssituationen im Autobahnnetz haben weiterhin Unfälle und - falls das betroffene Fahrzeug den Seitenstreifen bzw. die Nothaltebuchte nicht

¹ Der Begriff „Arbeitsstelle“ wird in den Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) [BMV, 1995] als allgemeiner Begriff verwendet. Viele Literaturquellen enthalten jedoch statt dessen den üblicheren Begriff „Baustelle“. Im Rahmen dieser Arbeit werden beide Begriffe gleichwertig behandelt.

² Laut RSA [BMV, 1995] werden Arbeitsstellen längerer Dauer (Dauerbaustellen) definiert als Arbeitsstellen, die mindestens einen Kalendertag durchgehend und ortsfest aufrecht erhalten werden. Die in der Statistik des BMVBW erfassten Arbeitsstellen decken demnach nur einen Teil aller Arbeitsstellen längerer Dauer ab.

³ Laut Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) [BMV, 1995] werden Arbeitsstellen kürzerer Dauer definiert als Arbeitsstellen, die nur über eine begrenzte Stundenzahl, in der Regel während der Tagesschelligkeit eines Kalendertages bestehen, auch wenn die Arbeiten an den folgenden Tagen fortgesetzt werden.

mehr erreichen kann - Nothalte. Laut Angaben des statistischen Bundesamtes⁴ ereigneten sich im Jahr 2001 etwa 179.000 Unfälle auf deutschen Autobahnen. Davon sind etwa 26.000 Unfälle mit einem Personenschaden verbunden gewesen. Die verbleibende Anzahl von Unfällen mit Sachschaden (153.000) ist im Mittel als weniger gesichert anzunehmen, da insbesondere bei leichten Sachschäden davon auszugehen ist, dass nicht alle Unfälle polizeilich registriert wurden. Die tatsächliche Unfallzahl liegt demnach noch höher.

Auch die Bedeutung von infrastrukturbedingten, dauerhaften Engpässen zum Beispiel in Form von Strecken mit starker Längsneigung lässt sich an einigen überschlägigen Werten darstellen: Der Anteil des Autobahnnetzes, dessen Längsneigung den Wert +2% überschreitet bzw. -2% unterschreitet, beträgt etwa 8%. Extreme Längsneigungen, d.h. größer 5% treten an etwa 60 km also knapp 0,5% des gesamten Netzes auf.

Abhängig von den baulichen Randbedingungen (Verkehrsführung im Arbeitsstellenbereich, Gradienten, Anordnung der Fahrstreifenreduktion), den Umfeldbedingungen, dem Schwerverkehrsanteil und der Zusammensetzung des Fahrerkollektivs reduziert ein Engpass die Kapazität des betroffenen Autobahnabschnitts. Übersteigt die Verkehrsnachfrage diese Kapazität, entsteht vor dem Engpass ein Stau. Dieser verursacht für alle betroffenen Fahrzeuge erhöhte Unfallrisiken, Reisezeitverluste, Komforteinbußen, einen erhöhten Kraftstoffverbrauch und dadurch zusätzliche Abgasemissionen (Abb. 1-1).

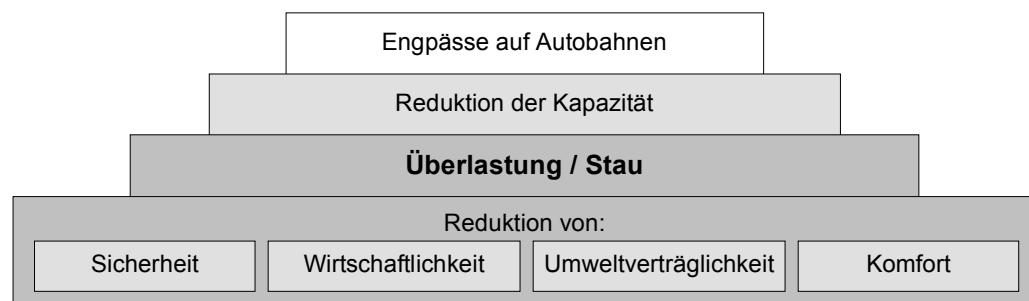


Abb. 1-1: Problemstellung

Die Information über die stauerzeugende Wirkung eines Engpasses kann in unterschiedlichen Aktionsebenen genutzt werden. Diese reichen von der strategischen Planung (z.B. Querschnitterweiterungen) über die operative Planung (z.B. Arbeitsstellen) bis hin zur aktuellen Information der Verkehrsteilnehmer. Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf den Arbeitsstellen, da durch entsprechende Planungs- und Informationsmaßnahmen die Stauwirkung und damit auch die für den Verkehrsteilnehmer anfallenden Reisezeitverluste direkt beeinflusst werden können. In der Bauplanungsphase kann die Stauwirkung einer geplanten Arbeitsstelle durch eine geeignete Wahl der Verkehrsführung unter Beachtung der Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA) [BMV,1995] und durch die Auswahl eines Zeitraumes zur Baudurchführung mit eher geringerer Verkehrsbelastung entspre-

⁴ Grundlage dieser Statistik bilden die polizeilich erfassten Unfälle.

chend klein gehalten werden. Insbesondere für Arbeitsstellen kürzerer Dauer, die sowohl auf freier Strecke als auch innerhalb einer Dauerbaustelle notwendig sein können, hat die zeitliche Planung der Baudurchführung einen entscheidenden Einfluss auf die Stauwirkung der Baustelle. Bei Dauerbaustellen ist dagegen eher die gewählte Verkehrsführung ausschlaggebend für ihre Stauwirkung. Eine z.B. über Fernsehen, Rundfunk, Tageszeitungen und das Internet verbreitete Stauprognose für Autobahnbaustellen kann von Fahrzeugführern für ihre Reiseplanung genutzt werden. Sie können somit auf voraussichtlich staufreie Zeitbereiche oder auf Alternativrouten ausweichen. Außerdem können Stauprognosen für Autobahnbaustellen als zusätzliche Eingangsdaten für Verkehrsleitsysteme verwendet werden.

Voraussetzung für eine sinnvolle Planung von Maßnahmen ist jedoch eine umfassende Kenntnis der tatsächlichen Verkehrsabläufe und damit die Fähigkeit, volkswirtschaftlich relevante Wirkungen quantifizieren zu können. In der hier vorliegenden Arbeit soll daher die Entstehung von Staus auf Autobahnen sowie der damit verbundenen Verlustzeiten für die Verkehrsteilnehmer analysiert werden. Die Untersuchung beschränkt sich dabei aufgrund der Komplexität des Themas auf Überlastungen, die durch unterschiedliche Engpasssituationen entstehen. Aufgrund ihrer herausragenden Bedeutung liegt ein besonderes Augenmerk auf der detaillierten Analyse des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen auf Autobahnen; die Problematik der Engpasssituationen an Steigungsstrecken, im Bereich von Fahrstreifenreduktionen und Autobahnknotenpunkten sowie bei Unfällen wird lediglich qualitativ behandelt.

Ziel der Untersuchung es ist, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die verkehrlichen Wirkungen von Engpässen unter Berücksichtigung aller relevanten Randbedingungen ermittelt werden können. Um den unterschiedlichen Aktionsebenen von der Planung bis zur Verkehrsbeeinflussung Rechnung zu tragen, werden verschiedene Zeithorizonte und damit einhergehend unterschiedliche Qualitäten der verfügbaren Eingangsdaten berücksichtigt, wobei das Hauptaugenmerk auf der Planung und in diesem Zusammenhang auch auf der Bewertung von Maßnahmen, d.h. der Modellierung ohne Einbezug aktueller Daten, liegt. Der Entwicklung eines Modells zur Schätzung der reduzierten Kapazität von Arbeitsstellenengpässen als Eingangsgröße für die Stauprognose kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

1.2 Aktueller Stand der Wissenschaft und Praxis

Bedingt durch das verstärkte Auftreten von Überlastungen im Straßennetz sowie eine wachsende Sensibilität in der Öffentlichkeit wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Anstrengungen unternommen, durch gezielte Planungs- und Informationsmaßnahmen - insbesondere im Bereich von Arbeitsstellen auf Autobahnen - Verbesserungen im Verkehrsablauf zu erreichen. Die nachfolgende Darstellung wissenschaftlicher Arbeiten, Richtlinien und Praxisbeispiele erhebt daher keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit, vielmehr soll an dieser Stelle ein Überblick über den Stand der Praxis und die zugrunde liegenden Verfahren geben werden. Eine ausführliche Analyse der relevanten Literaturquellen - auch im Hinblick auf Engpasssituationen an Steigungen, Fahrstreifenreduktionen und Unfallstellen - erfolgt in den nächsten Abschnitten.

RESSEL, 1994

RESSEL befasst sich in seiner Untersuchung „Modellierung des Verkehrsablaufs im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen“ mit der Entstehung, Entwicklung und Auflösung von Stausituationen an Autobahnbaustellen [RESSEL, 1994]. Zur Quantifizierung seiner Modellansätze wurden umfangreiche empirische Untersuchungen in Form von linien- und querschnittsbezogenen Messungen an verschiedenen Arbeitsstellen durchgeführt. Aufbauend auf diesen Messungen ermittelt er Kapazitätswerte für verschiedene Verkehrsführungen in Abhängigkeit vom Güterverkehrsanteil (siehe Kap. 3).

Anschließend entwickelt RESSEL in seiner Arbeit zwei verschiedene Modellansätze zur Nachbildung der Stauentwicklung. Bei dem ersten Ansatz handelt es sich um ein stochastisches Warteschlangenmodell, das den zufälligen Charakter des Verkehrsablaufs auf der Basis betaverteilter Zeitlückenverteilungen mit Hilfe der Simulationstechnik beschreibt. Für die praktische Anwendung schlägt RESSEL ein zweites Modell - ein deterministisches Warteschlangenmodell - vor, das ebenfalls die Berechnung von Warteschlangen und Zeitverlusten zulässt. Zusätzlich dazu können unter Zuhilfenahme von Diagrammen und Nomogrammen wegbezogene Rückstaulängen und der aus dem Stau resultierende Kraftstoffmehrverbrauch ermittelt werden (siehe hierzu auch Kap. 4).

Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP 96)

Mit der Zielsetzung, die Koordinierung und Planung von Arbeitsstellen mit einer Dauer über 14 Tagen - vor allem während der Ferienreisezeit - zu verbessern, wurden 1996 vom Bundesministerium für Verkehr die Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP) [BMV, 1996] eingeführt.

Ein wichtiger Aspekt der RBAP ist ein vereinfachtes Verfahren zur Schätzung der verkehrlichen Auswirkungen von Baustellen. Die Verkehrsnachfrage q wird hierbei mit Hilfe typisierter Ganglinien, der Ergebnisse der Straßenverkehrszählungen und der jährlichen Auswertungen der Dauerzählstellen für eine maßgebende Spitzentunde ermittelt. Durch die Umrechnung von Kraftfahrzeugen in Pkw-Einheiten mittels längsneigungsabhängiger Faktoren wird der Schwerverkehrsanteil einbezogen. Die Berechnung der Leistungsfähigkeit L (Kapazität⁵) der Arbeitsstelle erfolgt unter Berücksichtigung der Verkehrsführung in der Arbeitsstelle (Überleitung und/oder Reduktion von Fahrstreifen), der Breite der Fahrstreifen und des Anteils der ortskundigen Fahrer [KELLERMANN, 1997]. Die verkehrlichen Auswirkungen werden anschließend durch die Gegenüberstellung der Verkehrsnachfrage in der Spitzentunde an einem Werktag und an einem Spitzentag mit der Kapazität im Baustellenbereich überschlägig ermittelt. In Abhängigkeit des Ausmaßes des berechneten Überhangs S_{diff} beinhalten die RBAP eine Übersicht über einzuleitende Maßnahmen zur Staureduktion (Verkehrsinformation, Ver-

⁵ Der früher gebräuchliche Begriff der (querschnittsbezogenen) Leistungsfähigkeit wird durch den Begriff Kapazität ersetzt. Lediglich bei der Verwendung von Zitaten wird der Begriff „Leistungsfähigkeit“ beibehalten.

lagerung der Arbeiten in verkehrsärmere Zeiten, Bauzeitverkürzung, Umleitungsempfehlungen).

Die Analyse der verkehrlichen Wirkungen ist von den einzelnen Bundesländern für jede Arbeitsstelle mit einer Dauer über 14 Tagen durchzuführen. Die Ergebnisse werden anschließend an das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen weitergeleitet und einer abschließenden Überprüfung hinsichtlich einer bundesweiten Koordinierung unterzogen.

STÖCKERT, 2001

Mit dem Ziel, die Planung, Durchführung und Sicherung von Tagesbaustellen - also Arbeitsstellen kürzerer Dauer - zu optimieren, wurde am Fachgebiet Straßenwesen der TU Darmstadt eine Untersuchung durchgeführt, bei der diese Arbeitsstellen einer volkswirtschaftlichen Bewertung unterzogen wurden [STÖCKERT, 2001]. Darauf aufbauend erfolgte die Entwicklung von Leitstrategien, mit deren Hilfe Verkehrssicherheit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit trotz steigendem Verkehrsaufkommen erhalten bzw. nach Möglichkeit verbessert werden sollen. Die Grundlage der Bewertung bildet ein Verfahren zur Schätzung der Kapazität der Arbeitsstellenengpässe in Anlehnung an die RBAP 96 [BMV, 1996]. Die sich anschließende Ermittlung der arbeitsstellenbedingten Zeitverluste erfolgt mit Hilfe eines deterministischen Warteschlangenmodells in Anlehnung an das von RESSEL entwickelte Verfahren [RESSEL, 1994].

Stauprognoseverfahren der einzelnen Bundesländer

Zusätzlich zu den nach den RBAP vorgesehenen Abschätzungen der verkehrlichen Auswirkungen werden in einigen Bundesländern eigene Stauprognosen für Arbeitsstellen auf Autobahnen angefertigt. So erstellen der Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen, das Hessische Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen (HLSV), die Autobahndirektionen in Bayern sowie das Autobahnamt Rheinland-Pfalz Stauprognosen für die Baustellen in ihrem Autobahnnetz, die unter anderem auch über das Internet verbreitet werden. Weiterhin hat das Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Technologie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen umfangreiche Untersuchungen in Auftrag gegeben, die sich mit der Simulation und Prognose des Verkehrsablaufs auf Autobahnen unter Berücksichtigung von Tages- und Dauerbaustellen befassen. Die diesen Stauprognosen zugrunde liegenden Verfahren sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Nordrhein-Westfalen

Das in Nordrhein-Westfalen verwendete Verfahren zur Stauprognose an Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurde ursprünglich 1989 im Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) entwickelt und eingesetzt. Seit 2001 wird das gesamte nordrhein-westfälische Autobahnnetz abgedeckt. Zu diesem Zweck übermitteln die einzelnen Autobahnmeistereien die für den nächsten Tag geplanten Tagesbaustellen an die zuständige Niederlassung des Landesbe-

triebs Straßenbau, in der die eigentliche Stauprognose durchgeführt wird. Die Informationen über staugefährdete Arbeitsstellen werden anschließend an mehrere Fernseh- und Radiosender sowie regionale Tageszeitungen weitergeleitet und sind über eine entsprechende Internetseite auch direkt zugänglich (Abb. 1-2).

			alle	1	3	4	40	44	45	46	52	516
BAB	Fahrtichtung von / nach	Abschnitt von / nach		von	bis	mögliche Wartezeit						
1	Bremen Köln	AS Ascheberg (79) AS Hamm-Bockum/Werne (80)		08:30	14:00	bis 10 Min.						Tagesbaustelle
1	Saarbrücken Dortmund	AS Remscheid (95) AS Wuppertal-Langerfeld (93)		06:30	17:00	bis 20 Min.						Tagesbaustelle
1	Saarbrücken Dortmund	AS Burscheid (97) AS Wermelskirchen (98)		07:00	17:00	bis 20 Min.						Tagesbaustelle
1	Dortmund Saarbrücken	AS Burscheid (97) AK Kreuz Leverkusen (98)		09:00	15:00	bis 10 Min.						Tagesbaustelle
1	Dortmund Saarbrücken	AS Köln-Niehl (100) AK Kreuz Köln-Nord (101)		10:00	14:00	bis 10 Min.						Tagesbaustelle
1	Saarbrücken	AK Kreuz Köln-Nord (101)		10:00	14:00	bis 10 Min.						Fahrbahnmarkierung

Abb. 1-2: Beispiel für die über Internet veröffentlichte Stauprognose an Arbeitsstellen kürzerer Dauer
[www.strassen.nrw.de; Stand August 2002]

Die Stauprognose umfasst für jede Baustelle, an der ein Stau erwartet wird, die folgenden Angaben:

- **Baustellenlage:**
Der betroffene Autobahnabschnitt wird durch die Autobahnnummer, die betroffene Fahrtichtung und die ihn begrenzenden Anschlussstellen beschrieben.
- **Baustellendauer:**
Unter der Bezeichnung Baustellendauer wird der Zeitraum mit möglichem baustellenbedingten Stau angegeben.
- **Mögliche Wartezeit:**
Die mögliche Wartezeit im Falle eines Staus wird in vier Stufen (bis 10 min; bis 20 min; bis 30 min; über 30 min) angegeben.

Die Prognosen werden ausschließlich bei Verkehrsführungen mit Fahrstreifenreduktion durchgeführt. Dabei geht man von der Annahme aus, dass ohne Reduktion von Fahrstreifen keine wesentliche Senkung der Kapazität stattfindet. Aus diesem Grund liegt das Hauptaugenmerk bei der Anfertigung von Stauprognosen auf den Tagesbaustellen. Bei ihnen wird im Regelfall eine Spur kurzfristig ersatzlos gesperrt bzw. nur teilweise durch die Mitbenutzung des Seitenstreifens ausgeglichen. Arbeitsstellen längerer Dauer weisen dagegen in der Regel keine Fahrstreifenreduktionen auf, so dass man beim Landesbetrieb Straßenbau von keiner nennenswerten Reduzierung der Kapazität ausgeht.

Die Ermittlung der zu erwartenden Staulänge bzw. der Verlustzeit an einer Arbeitsstelle erfolgte anfänglich durch die Gegenüberstellung der Ganglinie der Verkehrsnachfrage und der Kapazität im Arbeitsstellengebiet (deterministisches Warteschlangenmodell, vgl. Kap. 4). Die notwendigen Angaben zur Kapazität im Engstellengebiet wurde aus einschlägigen Literaturangaben entnommen und später durch eigene Messungen optimiert [AUGUST et al., 1991]. Dabei fand die Art der Verkehrsführung Berücksichtigung, nicht jedoch der Schwer-

verkehrsanteil, da dieser nach den Erfahrungen des LWL in den betrachteten Fällen immer zwischen 10 und 16% lag. Zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage griff man auf die typisierten Ganglinien nach HEIDEMANN/WIMBER [HEIDEMANN et al., 1982] und die Daten der Dauerzählstellen sowie die Straßenverkehrszählungen zurück. Auf diese Weise wurden für jeden Streckenabschnitt Nachfrageganglinien ermittelt.

Anhand der grafischen Gegenüberstellung der Ganglinien der zu erwartenden Verkehrsnachfrage und der Kapazität im Baustellenbereich wurde die räumliche und zeitliche Stauentwicklung prognostiziert. Die möglichen Wartezeiten ergaben sich aus der Umrechnung von Staulängen vor Baustellen in Fahrzeiten im Stau unter Zugrundelegung der plausiblen Annahme, dass die mittlere Reisegeschwindigkeit im Stau etwa 12 bis 15 km/h beträgt.

In einer weiteren Phase wurden Beobachtungen und Messungen an Baustellen, für die Prognosen aufgestellt worden waren, durchgeführt. Dabei registrierte man den Zeitpunkt des Staubeginns, die zugehörigen Zu- und Abflussmengen sowie Staulängen. Beim Vergleich der gemessenen und der prognostizierten Werte zeigte sich, dass die Staus selten länger als 10 bis 15 km wurden, was nach Ansicht des LWL auf den hohen Anteil ortskundiger Fahrer zurückzuführen ist (Nutzung von Ausweichrouten). Bei der Überprüfung der Kapazitätswerte ergaben sich sehr große Differenzen. In Ballungsräumen (Stadtautobahnen) wurden Werte über 2000 Kfz/h pro Fahrstreifen gemessen, während im ländlichen Raum bereits bei 1200-1600 Kfz/h pro Fahrstreifen die Grenzen der Kapazität erreicht wurden. Zusätzlich zu den eigenen Messungen erfolgte eine kontinuierliche Rückkopplung durch den Vergleich von prognostizierten Staus mit Meldungen des Verkehrsfunks. Auf diese Weise wurde und wird in Nordrhein-Westfalen eine umfassende Wissensbasis geschaffen.

In jüngster Zeit erfolgt die Schätzung der Reisezeitverluste nur noch durch einen Vergleich mit anderen Arbeitsstellen. Durch die Zuordnung zu Baustellenabschnitten mit ähnlicher Charakteristik sowie das Einbringen von „Expertenwissen“ - also im täglichen Umgang mit Staubildungen erlangter Erfahrung - werden die zu erwartenden Verlustzeiten *direkt* abgeschätzt. Nach eigenen Angaben erreicht der Landesbetrieb Straßenbau bei seinen Stauprognosen eine Trefferquote von 80 %. Dennoch ergeben sich bei der Umsetzung und praktischen Anwendung des Verfahrens im Sinne einer Stauvermeidung Probleme:

- Es zeigt sich eine mangelnde Akzeptanz des Informationsangebots durch die Verkehrsteilnehmer trotz Verbreitung der Stauprognosen über regionale Tageszeitungen, Radiosender und Internet. Ursachen könnten zum einen in der fehlenden Kenntnis der Verkehrsteilnehmer über das Informationsangebot und zum anderen - vor allem im Berufsverkehr - im Fehlen von zeitlichen und räumlichen Alternativen zum Umfahren des Staus liegen.
- Durch die zunehmende Entzerrung der Arbeitszeiten weist die Verkehrsbelastung auf vielen Streckenabschnitten keine ausgeprägten Berufsverkehrsspitzen mehr auf. Aus diesem Grund erweist sich eine Verlegung der Baustellen in verkehrsschwache Zeiten als sehr schwierig. Eine mögliche Lösung dieses Problems wäre die Unterbrechung der Baustellen bei massiver Staubildung; eine vertragliche Regelung mit Bauunternehmen wird geprüft.

- Selbst in den Nachtstunden ist eine Staubildung bei Fahrstreifenreduktion nicht auszuschließen.
- Die Mitbenutzung des Seitenstreifens als Mittel zur Erhöhung der Kapazität bei Tagesbaustellen erweist sich als sehr erfolgreich, kann aber nicht immer eingesetzt werden. Wenn der Seitenstreifen nicht ausreichend tragfähig ist oder wenn sich die Baustelle im Bereich von Anschlussstellen befindet, ist eine Nutzung nicht möglich.

Derzeit ist man in Nordrhein-Westfalen mit der Entwicklung eines umfassenden Staumanagements mit Hilfe der Telematik beschäftigt. Im Rahmen dieses Staumanagements soll die fast flächendeckend vorhandene Verkehrsdatenerfassung vervollständigt werden, so dass zwischen jeweils zwei benachbarten Anschlussstellen mindestens eine Verkehrsdatenerfassung erfolgt. Außerdem ist im Rahmen des Staumanagements eine über das vorhandene Wechselwegweisungssystem hinausgehende Alternativroutensteuerung vorgesehen.

Hessen

Seit 1997 bietet die Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung im Internet Informationen über Baustellen auf hessischen Autobahnen an. Das Informationsangebot umfasst sowohl die Lage der einzelnen Baustellen (Tages- und Dauerbaustellen) als auch Angaben über zu erwartende Staulängen und Verlustzeiten mit Angabe des Zeitraums. In den Autobahnmeistereien werden dazu die Informationen zu den einzelnen Baustellen online in das System eingegeben. Dies beinhaltet die Verkehrsführung, also die Anzahl und die Lage der noch zur Verfügung stehenden Fahrstreifen, und die Dauer der Baustelle. Diese Daten werden über das bundeseigene Kommunikationsnetz zur Verkehrszentrale in Rödelheim übertragen. Dort läuft eine Computersimulation, die eine Verkehrsprognose für die einzelnen Strecken erstellt. Die Datenbasis für das Simulationsmodell liefern die Streckenstationen, an denen die Verkehrsdaten kontinuierlich erfasst werden. Somit können Verkehrsstärkeganglinien für den betreffenden Zeitraum prognostiziert werden. Für das Jahr 2003 ist die Einführung eines überarbeiteten Baustellenmanagementsystems geplant, dass nicht mehr nur ausschließlich zur Generierung von Baustelleninformationen, sondern auch zur Planung der Arbeitsstellen in den Autobahnmeistereien genutzt werden kann. Grundlage für die Modellierung der Kapazität der Arbeitsstellen wird dann ein Verfahren sein, das im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung und Eichung von Verfahren zur Abschätzung von Staudauer und Staulänge infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen“ [BECKMANN et al., 2001] entwickelt wurde. Dieses Forschungsvorhaben bildet ebenfalls die Basis dieser Arbeit.

Bayern

Im Rahmen des Projektes Bayerninfo wurde in den Jahren 1995 bis 2000 ein überregionales Verkehrsinformationssystems, bestehend aus einer landesweiten Verkehrsinformationszentrale und zwei Informationszentralen für die Großräume München und Nürnberg erstellt. Diese Zentralen übernehmen die Aufgabe der dynamischen Verkehrsanalyse und -prognose und liefern unter anderem für alle Autobahnstreckenabschnitte aktuelle Verkehrslageberichte

und Verkehrsprognosen für die nächsten 14 Tage. Bei der Verkehrsprognose wird der Einfluss von Tages- und Dauerbaustellen berücksichtigt, indem die Kapazität des betroffenen Streckenabschnitts den jeweiligen Baustellenführungen angepasst wird. Bei der Abschätzung der Baustellenkapazität werden Werte zugrunde gelegt, die von RESSEL in einer Untersuchung im Auftrag der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern ermittelt wurden [RESSEL, 1996] (siehe auch Kapitel 3). Die Prognose der Verkehrsnachfrage auf den Autobahnen erfolgt durch die Aufbereitung von Daten aus Dauerzählstellen unter Berücksichtigung von besonderen Einflüssen (z.B. Feiertagen) und anschließender Übertragung auf die einzelnen Streckenabschnitte (siehe auch Kapitel 2). Die somit erstellte Prognose der Verkehrszustände wird über das Internet veröffentlicht. Dabei werden die Verkehrszustände in drei Gruppen eingeteilt:

- normaler Verkehr
- dichter Verkehr
- Staugefahr

Streckenabschnitte, in denen Baustellen liegen, sind zusätzlich gekennzeichnet.

Rheinland-Pfalz

Im Frühjahr 2000 wurde in Rheinland-Pfalz ein Baustellen-Koordinationssystem eingeführt. Seit diesem Zeitpunkt werden alle Informationen über Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer in einer Zentrale gesammelt und aufbereitet. Derzeit wird die Stauprognose für die entsprechenden Arbeitsstellen noch manuell durchgeführt. Es ist jedoch angedacht, eine automatische Auswertung, vergleichbar mit dem System in Hessen (siehe oben), einzuführen.

Fazit

Anhand der Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten wird deutlich, dass insbesondere im Bereich der Arbeitsstellen als Engpässe auf Autobahnen bereits verschiedene Initiativen zur Verbesserung der Planung und Koordinierung eingeleitet wurden. Dennoch besteht nach wie vor Forschungsbedarf, vor allem hinsichtlich des Verkehrsablaufs an Tagessbaustellen, die aufgrund der mit ihnen verbundenen Fahrstreifensperrungen einen starken Einfluss auf die Kapazität ausüben. Weiterhin soll versucht werden, das an den einzelnen Stellen erworbene und eben auch nur dort vorhandene Expertenwissen in ein allgemein gültiges Modell zu überführen, das robust und dennoch flexibel auf verschiedene äußere Randbedingungen reagiert.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Die Zuverlässigkeit einer Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen ist neben der Wahl eines geeigneten Modells zur *Nachbildung der Stauentwicklung* in entscheidendem Maß von der zutreffenden Beschreibung der Eingangsgrößen abhängig. Zu den Eingangsgrößen zäh-

len zum einen der *Zufluss* (Verkehrsnachfrage) und zum anderen die *Kapazität* des Engpasses (Abb. 1-3). Da diese drei Teilbereiche jeweils eine grundsätzlich eigenständige Problematik darstellen, sollen sie in den folgenden Kapiteln getrennt voneinander analysiert werden.

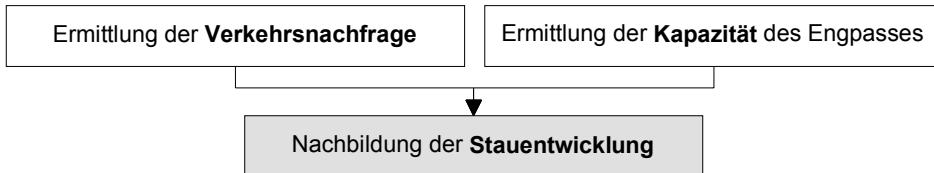


Abb. 1-3: Vorgehensweise bei der Erstellung einer Stauprognose

Ermittlung der Verkehrsnachfrage

Die Ermittlung des Zuflusses in Form von Nachfrageganglinien kann je nach Anwendungsbereich sowohl durch eine Kurzzeit- als auch durch eine Langzeitprognose erfolgen. Die Unterschiede zwischen beiden Formen liegen sowohl in der Aktualität der verwendeten Eingangsdaten als auch - daraus folgend - im Grad der Detaillierung (Bezugszeitintervalle). In Kapitel 2 werden daher auf der Basis einer ausführlichen Analyse vorhandener Verfahren und Modelle die Grundlagen, Anwendungsbereiche und Einsatzgrenzen der Verkehrsnachfragemodellierung vor unterschiedlichen Zeithorizonten analysiert.

Ermittlung der Kapazität eines Engpasses

Die Kapazität eines Engpasses hängt von einer Vielzahl verschiedener Faktoren ab, deren Einfluss bis zu diesem Zeitpunkt nur ansatzweise geklärt werden konnte. Mit den Grundlagen der Schätzung der Kapazität eines Engpasses befasst sich das Kapitel 3. Dabei werden sowohl Untersuchungen zur Kapazität von Autobahnstreckenabschnitten im Allgemeinen als auch von Engpässen (Arbeitsstellen, Steigungsstrecken, Fahrstreifenreduktionen, Unfallstellen) im Speziellen behandelt.

Nachbildung der Stauentwicklung

Der Verlauf des Staus ergibt sich ganz allgemein aus der Differenz zwischen Verkehrsnachfrage und Kapazität. Gekennzeichnet ist der Stau durch seine zeitliche und räumliche Entwicklung sowie durch die Zeitverluste, die beim Durchfahren des Staus entstehen. Zur Stauaufbildung stehen verschiedene Modelle zur Verfügung, auf die das Kapitel 4 genauer eingehet. Anhand der Anforderungen, die sich hinsichtlich Robustheit und Genauigkeit ergeben, wird anschließend ein geeignetes Modell für die vorliegende Aufgabenstellung ausgewählt.

Entwicklung eines Stauprognoseverfahrens an Arbeitsstellen

Aufgrund des eingangs genannten Schwerpunkts der vorliegenden Arbeit befasst sich das Kapitel 5 mit der Erfassung und Analyse von Verkehrsdaten im Bereich von Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer. Zur Schaffung einer Datenbasis sollen sowohl vorhandene Untersuchungen und Staudaten von Autobahnabschnitten als auch ergänzende Erhebungen herangezogen werden. Ziel dieses Arbeitspunktes ist es, einen weiteren Aufschluss über den Einfluss bestimmter Randbedingungen, vor allem hinsichtlich der Verkehrszusammensetzung, der Streckencharakteristik, des Fahrerkollektivs sowie der Umfeldbedingungen zu erhalten.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Auswertung wird in Kapitel 6 ein neues Verfahren zur Ermittlung bzw. Schätzung der Kapazität eines Arbeitsstellenengpasses entwickelt und beschrieben.

In Kapitel 7 erfolgt die Umsetzung der Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen in ein Gesamtkonzept zur Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens zur Ermittlung der verkehrlichen Auswirkungen von Arbeitsstellen auf Autobahnen. Das Verfahren wird abschließend anhand der Modellierung der Arbeitsstellen eines gesamten Bezugsjahres überprüft und validiert.

2. Ermittlung der Verkehrsnachfrage

2.1 Prognosezeitraum

Hinsichtlich des Prognosezeitraums ist bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage zwischen zwei verschiedenen Zeithorizonten zu unterscheiden:

Mittel- bis langfristige Prognose (ohne Einbezug aktueller Daten)

Zur Erstellung von mittel- bis langfristigen Prognosen werden ausschließlich historische Daten herangezogen. Die Prognose der Verkehrsnachfrage erfolgt auf der Basis der Daten der jüngsten Straßenverkehrszählung und Auswertung der Dauerzählstellen bzw. durch Ganglinien, die innerhalb weiterer Erhebungen erstellt wurden. Aufgrund der relativen Ungenauigkeit der Eingangsdaten ist ein Bezugsintervall von einer vollen Stunde bei der Erstellung der Prognose als hinreichend genau anzusehen. Kurzfristige Spitzen in der Verkehrsnachfrage können in diesem Fall durch das Modell nicht abgebildet werden. Unberücksichtigt bleiben weiterhin aktuelle Informationen, z.B. über die Witterung. Eine Prognose über diesen Zeitraum ist zum Beispiel im Rahmen der Bauablaufplanung von Arbeitsstellen und zur generellen Information der Verkehrsteilnehmer von Bedeutung.

Kurzfristige Prognose (unter Nutzung aktueller Daten)

Durch die Berücksichtigung aktueller Verkehrs- und Umfelddaten ist es möglich, eine auf der Basis historischer Daten erstellte Verkehrsnachfrageprognose zu korrigieren. Die aktuellen Daten, die beispielsweise im Bereich von Verkehrsbeeinflussungsanlagen, aber auch an anderen automatischen Zählstellen gewonnen werden, stehen in einer wesentlich höheren Genauigkeit und in sehr kleinen Zeitintervallen zur Verfügung, so dass auch das der Stauprognose zu Grunde liegende Bezugsintervall kleiner gewählt werden kann. Die Parameter des Prognosealgorithmen können der aktuellen Situation angepasst werden, so dass sich die Prognosegenauigkeit erhöht und ein Einsatz des Verfahrens bei der Verkehrsbeeinflussung, insbesondere der Alternativroutensteuerung, möglich ist.

2.2 Langzeitprognose

2.2.1 Abschnittsübergreifende typisierte Ganglinien aus der bundesweiten Auswertung der Dauerzählstellen

Abschnittsübergreifende Ganglinientypen repräsentieren Gruppen von Straßenabschnitten mit einer für bestimmte Zeitbereiche (Tag, Woche, Jahr) ähnlichen zeitlichen Verteilung der

dargestellten Verkehrskenngröße. Über die Zuordnung eines Straßenabschnitts zu einem Ganglinientyp wird die Verkehrsstruktur am betreffenden Abschnitt in generalisierter Form dargestellt [PINKOF SKY, 2002].

Ganglinientypen nach HEIDEMANN und WIMBER

Die Verteilung des Verkehrs innerhalb einer Periode (Jahr, Woche, Tag) kann durch Ganglinientypen beschrieben werden. Erstmals wurde das Verfahren der Typisierung von Verkehrsstärkeganglinien mittels der Clusteranalyse 1982 von HEIDEMANN und WIMBER durchgeführt [HEIDEMANN et al., 1982]. Die periodischen Schwankungen der Streckenbelastung wurden dabei - basierend auf Verkehrsdaten des Normalzeitbereichs⁶ - für das gesamte Bundesautobahnnetz auf drei verschiedenen Ebenen dargestellt. Die untere Ebene lässt sich durch die Tagesganglinien der stündlichen Verkehrsstärken beschreiben. Dabei wird zwischen den Tagesgruppen:

- Montag
- Dienstag bis Donnerstag
- Freitag
- Samstag
- Sonn- und Feiertage

unterschieden, denen jeweils sechs Ganglinientypen (Ausnahme Samstag mit vier Typen) mit unterschiedlichen charakteristischen Verläufen (z.B. Lage und Ausprägung der Spitzenstunden) zugeordnet sind. Die mittlere Ebene bilden die sechs Wochenganglinientypen der täglichen Verkehrsstärken, die obere Ebene die sechs Jahresganglinientypen der wöchentlichen Verkehrsstärken.

Ganglinientypen nach PINKOF SKY

Da sich durch die Veränderung der Charakteristik der Verkehrsnachfrage in den letzten Jahren immer weniger Dauerzählstellen im deutschen Autobahnnetz einem der von HEIDEMANN und WIMBER entwickelten Ganglinientypen zuordnen ließen, wurden im Jahr 2001 von PINKOF SKY neue Ganglinientypen veröffentlicht, die auf der Analyse der Daten aus dem Normalzeitbereich der Jahre 1997 und 1998 beruhen und die mit den Daten der Jahre 1999 und 2000 validiert wurden. Im Unterschied zu den alten Ganglinientypen differenziert PINKOF SKY die einzelnen Tagesganglinien einer Tagesgruppe nach der genauen zeitlichen Lage der Spitzenstunde (siehe Abb. 2-1). Auf diese Weise splittet sich ein Tagesganglinientyp in bis zu elf weitere Typen auf. Die Wochenganglinien entsprechen - abgesehen von leichten Veränderungen der Anteilswerte - den Ganglinientypen von HEIDEMANN/WIMBER. Jahresgangli-

⁶ Der Normalzeitbereich (NZB) umfasst die von Schulferien, Feiertagen und extremen Witterungsverhältnissen unbeeinflussten Tage. Der NZB besteht je Bezugsjahr aus etwa 50 Tagen verteilt auf ca. vier zusammenhängende Zeitintervalle.

nientypen zur Abbildung der saisonalen Schwankungen der Verkehrsnachfrage sind ebenfalls vorgesehen, sie waren zum Zeitpunkt der Recherche⁷ jedoch noch nicht verfügbar.

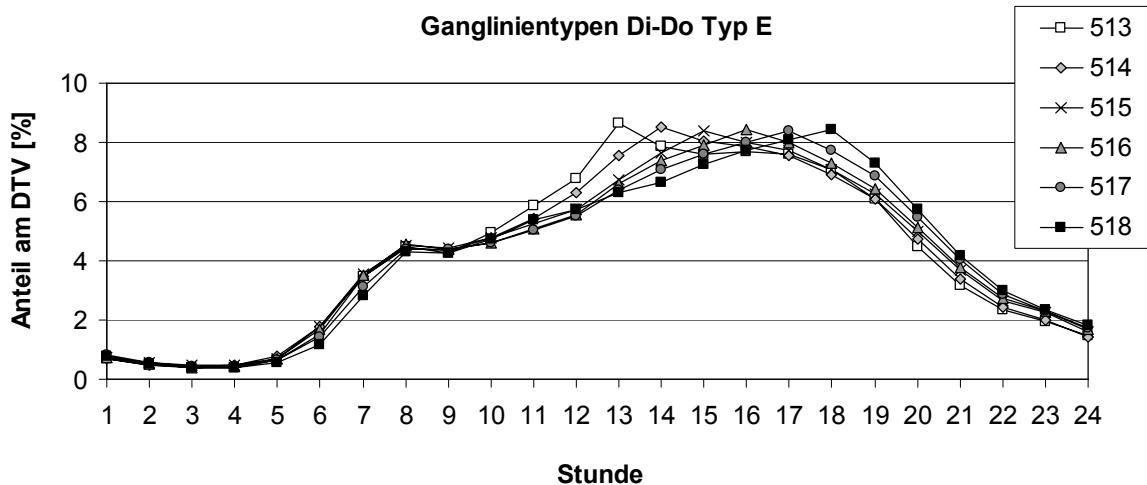


Abb. 2-1: Beispiel für die Differenzierung des Ganglinientyps E der Tagesgruppe Dienstag - Donnerstag nach unterschiedlichen Spitzenstunden (zwischen 13 und 18 Uhr)

Das Verfahren der abschnittsübergreifenden typisierten Ganglinien findet bei der Aufbereitung der Messdaten aus den Straßenverkehrszählungen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Auswertung der Dauerzählstellen Anwendung. Mit Hilfe der dort aufgeführten Zuordnung der Streckenabschnitte zu Ganglinientypen und der Angabe des DTV-Wertes (durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge) ist es möglich, Verkehrsstärkeganglinien für jeden Tag des Jahres zu berechnen. Unberücksichtigt bleiben in diesem Fall jedoch Faktoren wie z.B. Ferienreisewochenenden und Großveranstaltungen, die einen starken Einfluss auf die Verkehrsnachfrage haben.

Modellierung des Schwerverkehrsanteils

Die starken Schwankungen der Verkehrsnachfrage innerhalb eines Tages, die den Verlauf der Ganglinientypen prägen, werden im Wesentlichen von Pkw verursacht. In mehreren Untersuchungen [BRESSLER, 1997; Datenanalysen an der Universität Kassel, 2000] zeigte sich, dass die absolute Anzahl von Schwerverkehrsfahrzeugen über den Tag hinweg (außerhalb der Nachtstunden) dagegen annähernd konstant bleibt und somit der SV-Anteil in den Spitzenstunden deutlich niedriger ist als in den schwach belasteten Zeiten. Diesem Umstand kann bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage mit Hilfe typisierter Ganglinien dadurch Rechnung getragen werden, dass der Schwerverkehr - unabhängig von den Pkw - als über bestimmte Zeitbereiche des Tages hinweg konstante Größe behandelt wird.

⁷ Stand Januar 2003

Ein relativ einfacher Ansatz fand beispielsweise im Rahmen des von der BASt geförderten Projektes „Quantifizierung jährlicher, staubedingter Reisezeitverluste an Arbeitsstellen auf Autobahnen“ [OBER-SUNDERMEIER et al., 2003] Anwendung. Dazu wird ausgehend vom mittleren Schwerverkehrsanteil in einem ersten Schritt die absolute Anzahl der SV-Fahrzeuge eines Tages ermittelt. Da davon auszugehen ist, dass das Güterverkehrsaufkommen am Wochenende weitaus niedriger liegt als an Werktagen⁸, müssen basierend auf dem mittleren Schwerverkehrsanteil zwei neue Werte erzeugt werden:

- Der Schwerverkehrsanteil am Wochenende (Samstag/Sonntag) $SVA_{Sa,So}$ liegt aufgrund von Ausnahmegenehmigungen für den Güterverkehr, Busreiseverkehr etc. etwa bei 5% des Kfz-Verkehrs.
- Der Schwerverkehrsanteil werktags (Montag - Freitag) SVA_{Mo-Fr} ergibt sich anschließend aus dem mittleren Schwerverkehrsanteil SVA_{Mittel} sowie dem Anteil am Wochenende zu:

$$SVA_{Mo-Fr} = \frac{7 \cdot SVA_{Mittel} - 2 \cdot SVA_{Sa,So}}{5} \quad \text{Gl. 2-1}$$

Aus den somit festgelegten Schwerverkehrsanteilen lässt sich in Kombination mit dem tagesbezogenen DTV-Wert (aus Wochenganglinie) eine Gesamtmenge an Schwerverkehrs-fahrzeugen pro Tag ermitteln. Die Disaggregierung in Stundenintervalle kann anschließend unter Berücksichtigung des geschätzten Verhältnisses von $q_{Lkw}(\text{Nacht})$ zu $q_{Lkw}(\text{Tag})$ erfolgen. Dabei ist zu gewährleisten, dass die berechnete Lkw-Nachfrage in den Nachtstunden nicht die durch die Ganglinie modellierte Gesamtverkehrsnachfrage übersteigt.

2.2.2 Abschnittsbezogene typisierte Ganglinien aus länderspezifischen Auswertungen

Zusätzlich zur bundesweiten Typisierung von Verkehrsstärkeganglinien sind in einigen Bundesländern eigene Auswertungen zur Entwicklung von abschnittsbezogenen Ganglinientypen durchgeführt worden. Abschnittsbezogene Ganglinientypen repräsentieren Gruppen von Zeiteinheiten (gewisse Tage) mit einer bzgl. der dargestellten Verkehrskenngröße homogenen Verkehrsstruktur (z.B. Urlaubswerktage, „regnerische“ Montage, Werktag mit Sonderereignis). Sie sind als Grundlage für Prognoseverfahren zur verkehrstechnischen Anwendung in mehreren Verkehrsrechnerzentralen im Einsatz. [PINKOF SKY, 2002]

Im Unterschied zu den abschnittsübergreifenden Ganglinientypen (s.o.) gilt ein abschnittsbezogener Ganglinientyp ausschließlich für einen bestimmten Streckenabschnitt und ist daher nicht auf andere Abschnitte übertragbar. Stellvertretend sollen im Folgenden die Initiativen der Bundesländer Bayern und Hessen kurz beschrieben werden.

⁸ Grundsätzlich gilt das Fahrverbot für Lkw ausschließlich an Sonn- und Feiertagen von 0 bis 22 Uhr. Da jedoch auch an Samstagen ein gegenüber den Werktagen deutlich reduzierter Schwerverkehrsanteil beobachtet werden kann, wurde in der zitierten Untersuchung in Absprache mit dem Auftraggeber das gesamte Wochenende als einheitlicher Zeitbereich betrachtet.

Ganglinienerstellung im Bundesland Bayern

Im Rahmen des Projektes BAYERNINFO entwickelte das Ingenieurbüro HEUSCH/BOESEFELDT für das Bundesland Bayern Ganglinien der stündlichen Verkehrsmengen. Dazu wurden jedem Streckenabschnitt an Hand der Auswertung von Dauerzählstellen und Straßenverkehrszählungen Tagesganglinien der Verkehrsstärken zugewiesen (in Abhängigkeit vom Wochentag, unter Berücksichtigung von saisonalen Schwankungen und Feiertagseinflüssen). Bei der Erstellung der Verkehrsstärkenprognose wurden nacheinander folgende Schritte durchgeführt [HEUSCH/BOESEFELDT, 1996]:

- 1) Vergleich der richtungsbezogenen täglichen Verkehrsmengen (Relativwerte in Bezug auf den DTV-Wert des jeweiligen Jahres) und der Tagesganglinien der automatischen Zählstellen aus den vergangenen Jahren mit der jeweiligen Kalenderkonstellation und Bestimmung von Abhängigkeiten
- 2) Anwendung der ermittelten Abhängigkeiten zwischen Verkehrsstärke und Kalender auf das zu prognostizierende Jahr und Berechnung der relativen täglichen Prognoseverkehrsstärken je Dauerzählstelle und Fahrtrichtung
- 3) Zuordnung dieser Relativwerte zu den Streckenabschnitten der Autobahnen und Berechnung der absoluten Prognoseverkehrsstärken durch Multiplikation mit dem DTV-Wert des Abschnitts

Die Prognose der stündlichen Verkehrsmengen für jede Dauerzählstelle erfolgte in zwei Stufen:

- 1) Prognose der täglichen Kfz- und Lkw-Verkehrsmengen je Fahrtrichtung für alle Kalendertage des Jahres
- 2) Bildung (relativer) Tagesganglinientypen je Fahrtrichtung und Fahrzeugart sowie Zuordnung eines Typs zu jedem Tag des Jahres zur Ermittlung der stündlichen Verkehrsmengen

Zur Vervollständigung und Verwaltung der Prognosedaten für die stündlichen Verkehrsmengen wurden von HEUSCH/BOESEFELDT sowohl eine Verkehrsdatei als auch eine Streckenkennwertdatei eingerichtet. Die Verkehrsdatei enthält alle Streckenabschnitte zwischen zwei Anschlussstellen oder Knotenpunkten. Jedem Streckenabschnitt sind Kenngrößen zugeordnet, die die Lage im Netz und die durchschnittlichen täglichen Verkehrsmengen (getrennt nach Verkehrsarten) beschreiben. Die Streckenkennwertdatei enthält richtungsbezogene Angaben über die Charakteristik des Streckenabschnittes. Dazu zählen die Länge des Abschnittes, die Anzahl der Fahrstreifen, das Vorhandensein von Stand- und Zusatzfahrstreifen und die Längsneigungsklasse.

Referenzganglinien des Bundeslandes Hessen

Zur Verbesserung der Prognose der Verkehrsnachfrage führte das Land Hessen über ein Bezugsjahr hinweg eine Analyse sämtlicher Erfassungsquerschnitte auf hessischen Autobahnabschnitten durch. Zu diesem Zweck wurden die automatisch erfassten Ganglinien - nach Wochentagen sortiert - zusammen gefasst. Um Störungen im Verkehrsablauf aus der

Ganglinientypisierung auszuschließen, blieben Ganglinien, die extrem vom Mittelwert abweichen (Grenzwert: 10%), unberücksichtigt. Aus allen anderen Ganglinien wurde anschließend eine mittlere Referenzganglinie erstellt. Saisonale Einflüsse blieben dabei bislang unberücksichtigt. Aktuelle Bestrebungen gehen jedoch in die Richtung, Ereigniskalender aufzustellen, mit deren Hilfe auch Ferienreiseverkehre sowie andere Sonderereignisse abgebildet werden können.

2.2.3 Verwendung von historischen Ganglinien aus bestehenden Datenbanken

Eine weitere Möglichkeit zur Prognose der Verkehrsnachfrage auf einem bestimmten Streckenabschnitt ist die Verwendung von in Datenbanken (Verkehrsrechnerzentralen) archivierten historischen Ganglinien. Dieses Verfahren wird beispielsweise im Rahmen der Stauprognoze an Autobahnbaustellen beim Landesbetrieb Straßenbau des Landes Nordrhein-Westfalen angewendet. Aufgrund der relativ hohen Ausstattungsrate des Autobahnnetzes mit Erfassungseinrichtungen liegen dort für nahezu jeden Streckenabschnitt archivierte Ganglinien der Verkehrsstärke der letzten Tage und Wochen vor. Bei der Erstellung der Stauprognoze wird dann beispielsweise auf die Ganglinie desselben Wochentages der vorangegangenen Woche zurückgegriffen. Dies setzt natürlich voraus, dass außergewöhnliche externe Einflüsse, wie z.B. Feiertage, Ferien und Großveranstaltungen, ausgeschlossen werden können.

2.2.4 Berücksichtigung stochastischer Schwankungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die verschiedenen Möglichkeiten der Verkehrsnachfrageprognose auf der Basis historischer Daten beschrieben. In Abhängigkeit vom eingesetzten Aufwand können mit den vorhandenen Modellen mehr oder weniger differenzierte Ganglinien erstellt werden. Da bei der Bildung der typisierten Ganglinien Verkehrsstärkewerte unterschiedlicher Tage oder sogar unterschiedlicher Zählstellen zusammengefasst werden, repräsentiert der resultierende Ganglinientyp letztendlich jedoch nur einen Mittelwert aus einer heterogenen Grundgesamtheit. Dieser Erwartungswert ist nicht in der Lage, stochastische Schwankungen abzubilden.

Bei der Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen eines Engpasses hat die Verwendung des Mittelwertes unter Umständen zur Folge, dass die tatsächliche Staubildung systematisch unterschätzt wird. Deutlich wird diese Tatsache, wenn man z.B. den Fall betrachtet, dass die aufgrund der typisierten Ganglinie ermittelte Verkehrsstärke während des kritischen Zeitbereichs eines Tages nur unwesentlich unter der Kapazität des Engpasses liegt. Bei ausschließlicher Verwendung dieses Wertes würde sich bei einer Berechnung über einen längeren Zeitraum (z.B. einen Monat) hinweg nie ein Stau ergeben. Geht man jedoch davon aus, dass die Verkehrsnachfrage stochastischen Schwankungen unterliegt, so können die tatsächlichen Werte sowohl über als auch unter dem Mittelwert liegen. In diesem Fall würde die gleiche Berechnung zu dem Resultat führen, dass vor dem Engpass an einigen Tagen ein

Stau auftritt. Es ist davon auszugehen, dass diese Variante der Realität wesentlich näher kommt.

Um die systematische Unterschätzung der Staubbildung abzumindern, sollte daher bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage auf der Basis von historischen Ganglinien eine zusätzliche stochastische Komponente eingeführt werden.

Stochastische Schwankungen der stündlichen Erwartungswerte

Im Rahmen einer Untersuchung, die im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen mit dem Ziel der Quantifizierung jährlicher Reisezeitverluste an Arbeitsstellen auf Autobahnen erfolgte, wurde ein Modell zur Berücksichtigung der stochastischen Schwankungen der stündlichen Erwartungswerte der Verkehrsnachfrage entwickelt [OBER-SUNDERMEIER et. al., 2002]. Die Grundlage dieses Verfahrens bildet die Verkehrsstärkeganglinie, die aus den historischen Daten ermittelt wird und die die mittleren Erwartungswerte $q_0(i)$ für jede Stunde des Tages darstellt. Zur Modellierung der endgültigen Verkehrsstärkeganglinie eines speziellen Tages werden die einzelnen Stundenwerte $q_0(i)$ mit Hilfe einer Normalverteilung um den jeweiligen Erwartungswert $q_0(i)$ gestreut. Die Eigenschaften der Normalverteilung werden durch den Variationskoeffizienten V festgelegt:

$$V = \frac{\sigma}{\mu} \quad \text{Gl. 2-2}$$

mit: V Variationskoeffizient
 σ Standardabweichung
 μ Mittelwert (hier: Erwartungswert der stündlichen Verkehrsmenge)

Da zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung (2002) keine einschlägigen Untersuchungen zur Größe dieses Variationskoeffizienten vorlagen, wurde im Rahmen einer Erstversorgung Werte zwischen 0,05 und 0,10 angesetzt, d.h. die Standardabweichung beträgt 5-10% vom jeweiligen Erwartungswert der Verkehrsmenge pro Stunde. Zur Vermeidung von unplausiblen Verkehrsstärkewerten, wurde zusätzlich ein oberer und unterer Grenzwert bei $\mu \pm 0,5\mu$ eingeführt. In Abb. 2-2 ist beispielhaft das Ergebnis einer derartigen Modellierung für einen Autobahnabschnitt dargestellt.

Berücksichtigung von „Risikoganglinien“ im Baustellenmanagementsystem Hessen

Das Beratungsunternehmen MOMATEC entwickelte im Rahmen der Vorbereitung des Baustellenmanagementsystems in Hessen eine alternative Methode zur Berücksichtigung von Verkehrsnachfrageschwankungen, die sogenannten Risikoganglinien. Als Grundlage für die Ermittlung dieser Risikoganglinien dienen Referenzganglinien, die auf einer Fusion von Verkehrsnachfragedaten über einen längeren Zeitraum (über ein Jahr) hinweg beruhen. Die Referenzganglinien liegen für jeden Wochentag als mittlerer Erwartungswert vor (siehe Abschnitt 2.2.2). Der Ansatz zur Bildung der Risikoganglinien besteht nun darin, in Abhängigkeit vom Wochentag sowie von der Uhrzeit, jedoch unabhängig vom konkreten Detektor mittels Korrekturfaktoren aus der Referenzganglinie 70%- bzw. 90%-Quantile zu approximieren.

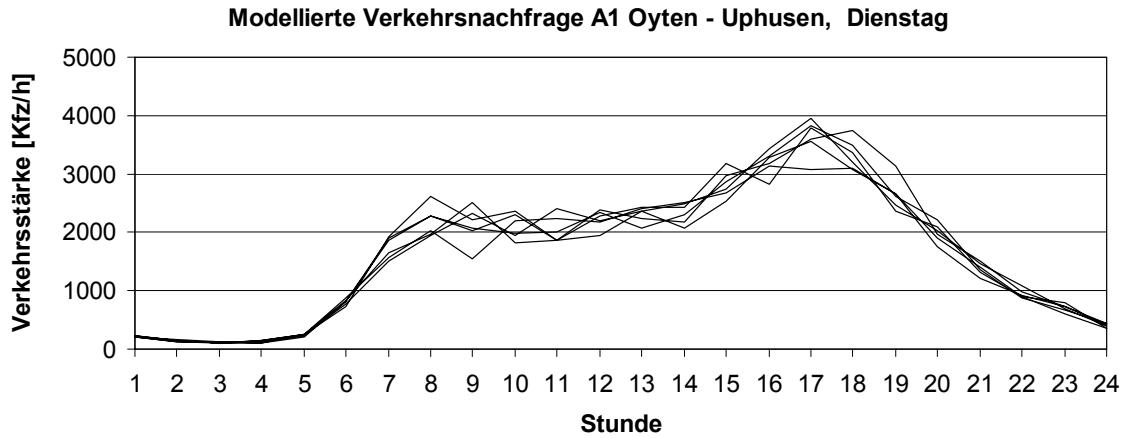


Abb. 2-2: Beispiel für die Modellierung der Verkehrsnachfrage auf der Basis der typisierten Ganglinien nach PINKOF SKY (Ganglinientyp G -708) mit stochastischer Angleichung bei $V=0,05$ [OBER-SUNDERMEIER et al., 2002]

Diese Korrekturfaktoren wurden anhand von 20 repräsentativen Detektoren in vorab durchgeführten Analysen in Form von mittleren Standardabweichungen und daraus resultierenden Variationskoeffizienten für die Verkehrsnachfrage, differenziert nach Wochentagen und Tageszeitbereichen, ermittelt. Grundlage der Auswertungen bildeten die Rohdaten der Jahre 1999 und 2000, wobei Anspruch auf ein möglichst breites Spektrum (Fahrstreifenanzahl, Richtung, Lage im Netz) bestand. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Tab. 2-1 dargestellt. Mit Hilfe der ermittelten Variationskoeffizienten können nun Ganglinien mit erhöhter Verkehrsnachfrage, d.h. die 70%- bzw. 90%-Quantile der Referenzganglinien bestimmt werden, so dass das Risiko von Staubildungen besser abgeschätzt werden kann.

Zeit	Montag	Mittwoch*	Freitag	Wochenende
0h - 5h	0,17	0,12	0,16	0,25
6h - 9h	0,23	0,12	0,20	0,26
10h - 15h	0,11	0,09	0,13	0,14
16h - 19h	0,14	0,11	0,16	0,14
20h - 24h	0,17	0,16	0,20	0,18

* repräsentativ für die Gruppe Dienstag bis Donnerstag

Tab. 2-1: Variationskoeffizienten der Verkehrsnachfrage differenziert nach Wochentag und Zeitabschnitten [MOMATEC, 2002]

2.2.5 Fazit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Verfahren zur Prognose von Nachfrageganglinien der Verkehrsstärke auf Autobahnstreckenabschnitten vorgestellt. Dabei zeigte sich,

dass Verfahren, die auf der Auswertung von historischen Ganglinien beruhen, trotz des relativ hohen Aufwandes bei der Datenaufbereitung große Ungenauigkeiten aufweisen können. Eine Überprüfung der Prognoseverkehrsstärken, die von HEUSCH/BOESEFELDT für die Streckenabschnitte in Bayern ermittelt wurden, an Hand von tatsächlichen Tagesganglinien ergab beispielsweise in einigen Fällen Abweichungen von 50% und mehr für einzelne Stundenwerte⁹. Differenzen sind auf Grund des stochastischen Anteils in der Verkehrsnachfrage zwar unvermeidbar, eine weitgehend zutreffende Prognose des Verkehrsablaufs im Baustellenbereich, so wie sie in dieser Arbeit angestrebt wird, ist auf der Basis dieser Daten jedoch nur eingeschränkt möglich. Der stochastische Einfluss bewirkt zudem, dass das Verkehrsaufkommen auch innerhalb eines Stundenintervalls nicht konstant ist. Daher können selbst bei richtig geschätzten Stundenwerten innerhalb des Intervalls kurzfristige Spitzen auftreten, die erheblich über dem Mittelwert liegen. Somit kann der Verkehrsablauf in den instabilen Bereich übergehen, obwohl die (prinzipiell) richtig prognostizierte Verkehrsstärke für das betreffende Stundenintervall einen stabilen Verkehrsablauf vermuten lässt.

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Verfahren gehen alle von der Annahme aus, dass der Verkehrsablauf nicht durch äußere Einflüsse, vor allem durch verkehrliche Störfälle, beeinflusst wird. Dementsprechend bleibt ein wichtiger Einflussfaktor, nämlich die Verlagerung von Verkehrsströmen aufgrund von Verkehrsinformationen (Radio, Verkehrsbeeinflussungsanlagen) bei bestehenden Überlastungen, unberücksichtigt. Ansätze zur Lösung dieser Problematik im Rahmen von mittel- bis langfristigen Prognosen werden in Kapitel 7 dargestellt.

2.3 Kurzfristige Prognose unter Berücksichtigung aktueller Messwerte

Für die Prognose der Verkehrsstärke auf Autobahnen für kurze Zeithorizonte existieren bereits verschiedene Verfahren, die vorrangig im Rahmen der Steuerung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen eingesetzt werden. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen:

- Querschnittsprognosen
 - Einfache Trendprognosen (linear, degressiv, progressiv, periodisch)
 - Prognosen mit gleitender Korrektur
 - Prognosen mit Annäherung an einen Erwartungswert mit zunehmender Zeit [ZACKOR, 1976; RÖHR et al., 1996]
 - Data-Matching-Verfahren
- Streckenprognosen [z.B. nach DOORMANN, 1973; CREMER, 1976 ; MURA, 1976, KRAUSE, 1988]
- Netzprognosen (Matrixschätzverfahren)

⁹ Die Überprüfung der Verkehrsstärken wurde von der Autobahndirektion Südbayern für zwei Monate im Bereich München an einer Verkehrsbeeinflussungsanlage durchgeführt.

Auf die einzelnen Modelle soll in diesem Zusammenhang nicht näher eingegangen werden. Voraussetzung für all diese Verfahren ist jedoch ein Erfassungssystem, das kontinuierlich die für das entsprechende Prognosemodell benötigten Eingangsdaten, z.B. Querschnittsdaten oder Quelle-Ziel-Beziehungen, erfasst.

Festzuhalten bleibt, dass mit Hilfe der verschiedenen Verfahren anhand von aktuellen Daten eines oder mehrerer Messquerschnitte Prognosewerte für die Verkehrstärke auf einem bestimmten Streckenabschnitt ermittelt werden. Aufgrund des aktuellen Datenbezugs können hierbei auch unvorhergesehene Ereignisse, die zu einer Veränderung der Verkehrsnachfrage führen, berücksichtigt werden, so dass die Genauigkeit wesentlich höher liegt als bei den mittel- bis langfristigen Prognosen. Die in Abschnitt 2.2.5 beschriebene Problematik der Verlagerungseffekte infolge von bestehenden Überlastungen im Netz mildert sich dementsprechend.

Aufgrund der notwendigen zeitlichen Nähe zum Prognosehorizont sind die Verfahren der Kurzfristprognose jedoch nur in begrenztem Umfang, vor allem im Rahmen der Verkehrsbeeinflussung, einsetzbar. Planerisch ausgelegte Maßnahmen bedürfen dagegen einer langfristigeren Vorhersage der zu erwartenden Verkehrsnachfrage. Insofern kommt den mittel- bis langfristigen Prognosen, insbesondere im Zusammenhang mit der Stauprognose an Engpassen, trotz ihres geringeren Detaillierungsgrades sowie ihrer Genauigkeitsdefizite, eine große Bedeutung zu.

3. Ansätze zur Ermittlung der Kapazität eines Engpasses

3.1 Definition der Kapazität eines Engpasses

Die Kapazität eines Fahrbahnquerschnittes definiert die größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann [FGSV, 2000]. Der Wert der Kapazität ist jedoch abhängig vom gewählten Bezugsintervall (Mengen- oder Zeitintervall). Das bedeutet: je größer das gewählte Bezugsintervall ist, desto niedriger ist die zugehörige Kapazität. SACHSE ermittelte zum Beispiel in seiner Untersuchung für ein- bzw. zweistufige Richtungsfahrbahnen von Bundesstraßen bei einem Vergleich von 5-min-Intervallen und 60-min-Intervallen einen Faktor von 1,2 zur Berücksichtigung von zeitweise auftretenden erhöhten Verkehrsstärken, die innerhalb des 60-min-Intervalls nicht abgebildet werden [SACHSE, 1992]. Die folgenden Abschnitte behandeln die Problematik der Bestimmung der Kapazität eines Engpasses unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen. Falls nicht anders angegeben, ist bei der Angabe von Kapazitätswerten ein Bezugsintervall von einer Stunde zugrunde gelegt.

Der Verkehrsablauf ist beim Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich stark durch stochastische Einflüsse geprägt, so dass bei einer sehr hohen Verkehrsstärke und der damit verbundenen Dichte bei gleichzeitig hohem Geschwindigkeitsniveau bereits eine singuläre Störung des Verkehrsablaufs, z.B. ein Bremsvorgang bei der Einfahrt in den Baustellenbereich, zum Zusammenbruch des Verkehrs führen kann. In einigen Untersuchungen an Baustellenengpässen wurde festgestellt, dass bei gerade noch stabilem Verkehrsfluss, d.h. hohem Geschwindigkeitsniveau, eine größere Verkehrsmenge abgeführt werden kann als bei bereits eingetretenem Rückstau im Annäherungsbereich der Baustelle [z.B. RESSEL, 1994; LENZ et al., 1970]. Der Übergang vom stabilen zum instabilen Verkehrsfluss ist in diesem Fall durch einen Sprung im Fundamentaldiagramm (Capacity Drop) gekennzeichnet (siehe Abb. 3-1).

Dieses Phänomen beobachteten z.B. auch KERNER und REHBORN bei der Analyse der Daten verschiedener Dauerzählstellen auf der freien Strecke [KERNER et al., 1998]. Sie beziffern das Verhältnis von maximaler Verkehrsstärke bei „freiem Verkehr“ zur Verkehrsstärke aus dem Stau heraus mit $q_{\max(\text{free})}/q_{\text{out}} = 1,5$ (Capacity Drop = 33%). Einschränkend muss jedoch hier angemerkt werden, dass die Bestimmung dieses Faktors auf der Verwendung von Verkehrsdaten in 1-min-Intervallen beruht. Die starke Differenz resultiert hier - zumindest zum Teil - aus den unterschiedlich starken Streuungen der Messwerte bei gerade noch fließendem Verkehr bzw. bei Verkehr aus dem Stau heraus. Im amerikanischen HCM (Highway Capacity Manual) [TRB, 2000] wird der Sprung dagegen lediglich in einer Größenordnung von 5% angegeben, PONZLET beziffert ihn auf etwa 10% (1-min-Intervalle) mit sinkender Tendenz bei steigender Intervallgröße [PONZLET, 1996b].

In einem 2000 von Wu entwickelten makroskopischen Modellansatz ist der Übergangsbe- reich vom fließenden zum zähfließenden Verkehr ebenfalls durch ein Capacity Drop gekenn- zeichnet [WU, 2000]. Bei der Anwendung seines Modells auf reale Daten zeigt sich deutlich, dass die Höhe des Sprungs entscheidend vom gewählten Bezugsintervall abhängig ist. Während bei 1-min-Messdaten deutliche Sprünge von der Verkehrsstärke im fließenden Verkehr zur Verkehrsstärke im zähfließenden Verkehr zu erkennen sind, reduzieren sich diese Abweichungen bei der Darstellung in 1-h-Intervallen deutlich bzw. entfallen zum Teil vollständig.

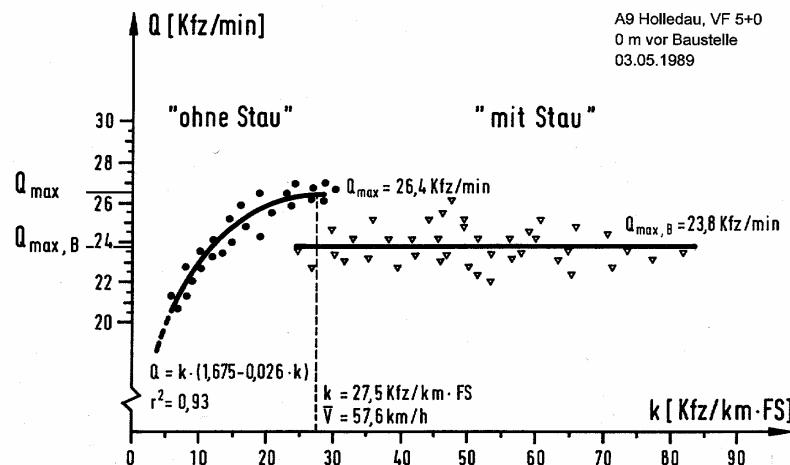


Abb. 3-1: Fundamentalsdiagramm unmittelbar vor einem Baustellenengpass mit den Teilkurven „ohne Stau“ und „mit Stau“ [RESSEL, 1994]

In anderen Untersuchungen an Arbeitsstellen [z.B. STÖCKERT et al., 2001; MAZE et al., 2000] sowie in den eigenen Messungen und Auswertungen von automatisch erfassten Daten im Vorfeld von Arbeitsstellen konnte das Capacity-Drop-Phänomen nicht festgestellt werden. Zwar wiesen einige wenige Fundamentalsdiagramme einen Sprung beim Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich auf. Dieser wurde jedoch durch eine Aggregation der Verkehrsdaten zu größeren Zeitintervallen aufgehoben. Ein Grund für die schwache Ausprägung des Kapazitätssprungs im Bereich von Arbeitsstellen liegt unter Umständen darin, dass der Verkehrsablauf und damit die Kapazität im Bereich der Arbeitsstelle bedingt durch den Geschwindigkeitstrichter im Vorfeld der Arbeitsstellen sowie durch die generell erhöhte Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer nicht signifikant durch den Verkehrszustand vor dem Engpass (mit oder ohne Stau) beeinflusst werden.

Da die Frage nach dem Ausmaß des Capacity Drop im Bereich von Engpässen auf Autobahnen anhand der vorliegenden Untersuchungen nicht hinreichend geklärt werden kann, bezeichnet im Folgenden der Begriff der für die praktische und modellhafte Betrachtung maßgebenden Kapazität eines Engpasses C_E diejenige Verkehrsstärke, die bei bestehender Überlastung des Systems durch den Engpass abgeführt wird.

3.2 Grundkapazität bei idealen Randbedingungen (freie Strecke)

Um die Angaben zu verschiedenen Kapazitätsreduktionen an Engpässen besser beurteilen zu können, ist in einem ersten Schritt zu untersuchen, welche Kapazitäten auf der freien Strecke und unter idealen Randbedingungen, d.h. ohne Längsneigung, ohne den Einfluss von Knotenpunkten und bei trockenen, hellen Umfeldbedingungen, erreicht werden können. In der Literatur findet man in diesem Zusammenhang verschiedene Angaben:

Tab. 3-1 enthält die Werte, die im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001) [FGSV, 2001] für die maximal abführbare Verkehrsstärke auf Autobahnen angegeben werden. Eine Unterscheidung erfolgt hier nach der Lage im Netz (innerhalb / außerhalb von Ballungsräumen), der vorgegebenen Geschwindigkeit sowie nach dem Lkw-Anteil. Deutlich wird, dass eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 100 km/h oder 80 km/h eine Erhöhung der Kapazität bewirkt. Dies entspricht dem in Deutschland anerkannten Prinzip der Harmonisierung des Verkehrsablaufs, das auch im Rahmen der Verkehrsbeeinflussung angewendet wird. In Ausnahmefällen können die in Tab. 3-1 angegebenen Werte überschritten werden. Dies ist insbesondere an dauerhaft hoch belasteten Autobahnabschnitten, z.B. im Rhein-Main- oder Ruhr-Gebiet zu beobachten.

Lage im Netz	Zweistreifige Richtungsfahrbahn			dreistreifige Richtungsfahrbahn		
	Lkw-Anteil [%]			Lkw-Anteil [%]		
	0	10	20	0	10	20
innerhalb von Ballungsräumen	4000	3800	3600	5700	5400	5100
außerhalb von Ballungsräumen	3600	3500	3400	5400	5100	4800
T100 / T80 / Tunnel	4100	3900	3700	5800	5500	5200

Tab. 3-1: Kapazitäten [Kfz/h] auf Autobahnstrecken mit Längsneigungen < 2 % [FGSV, 2001]

Einen anderen Ansatz verfolgt das amerikanische Highway Capacity Manual (HCM 2000) [TRB, 2000], in dem die Grundkapazität fahrstreifenbezogen angegeben wird, und zwar unter vollständig idealen Randbedingungen, d.h. bei reinem Pkw- und reinem Berufsverkehr (routiniertes Fahrerkollektiv). Unter der Voraussetzung einer freien Geschwindigkeit von 120 km/h ergibt sich dort eine Kapazität (Level of Service E) von 2400 Pkw-E/h pro Fahrstreifen. Entgegen dem deutschen Ansatz reduziert sich diese Kapazität bei sinkenden freien Geschwindigkeiten. Bei FFS („Free Flow Speed“) von 90 km/h beträgt die Kapazität daher nur noch 2250 Pkw-E/h pro Fahrstreifen, liegt jedoch immer noch über den deutschen Werten. Eine Übertragbarkeit dieser Werte auf deutsche Verhältnisse ist auch insofern fragwürdig, als dass in den USA im Gegensatz zu Deutschland kein Rechts-Überholverbot besteht und insofern von einer gleichmäßigeren Auslastung der Fahrstreifen auszugehen ist.

3.3 Kapazitätsbeeinflussende Faktoren

Der Verkehrsablauf unterliegt grundsätzlich vielfältigen Einflussfaktoren. Das Gesamtsystem der wechselseitigen Beziehungen besteht aus den Bereichen *Streckencharakteristik*, *Verkehr* und *Umfeld*, die den makroskopischen Rahmen des Verkehrssystems festlegen, und den Bereichen *Fahrzeug* und *Fahrzeugführer*, die die Eigenschaften der einzelnen Elemente des Systems repräsentieren. In Anlehnung an die in Kapitel 1 genannten Ursachen von Engpässen können die den Verkehrsablauf beeinflussenden Faktoren wie folgt gegliedert werden:

- Streckencharakteristik:
 - Querschnittsgestaltung (Anzahl und Lage der Fahrstreifen; bei Arbeitsstellen: Ausbildung der Überleitungsbereiche, Breite der verbleibenden Fahrstreifen, Mitbenutzung des Seitenstreifens; bei Unfällen und Nothalten: Anzahl und Lage der vorübergehend gesperrten Fahrstreifen)
 - Trassierung (Längsneigung, Kurvigkeit)
 - Knotenpunkte (Anschlussstellen, Autobahndreiecke und -kreuze)
- Umfeldbedingte Faktoren
 - Witterung (Regen, Schnee, Nebel, Wind, Glätte)
 - Helligkeit
- Verkehrsabhängige Faktoren
 - Verkehrszusammensetzung (Anteile des Pkw- und des Schwerverkehrs)
- Fahrzeugführerabhängige Faktoren
 - Fahrereigenschaften (Fahrkönnen, Sicherheitsbewusstsein, physische und psychische Belastbarkeit, Reaktionsvermögen, Seh- und Schätzvermögen, körperliche Verfassung, Schaulustigkeit)
 - Fahrtzweck (Ortskenntnis, Fahrweise, Wunschgeschwindigkeit)
- Fahrzeugabhängige Faktoren
 - Fahrzeugtyp (Abmessungen)
 - Fahreigenschaften (Beschleunigungs- und Bremsvermögen, Straßenlage)

Während die drei erstgenannten Gruppen von Randbedingungen zumindest qualitativ gut eingeschätzt werden können, bereitet die Beschreibung der fahrzeug- und fahrzeugführer-abhängigen Faktoren aufgrund der in diesem Detaillierungsgrad fehlenden Informationen große Schwierigkeiten. Zur Beurteilung können hier lediglich Sekundärmerkmale herangezogen werden, wie z.B. die Lage im Netz als Kriterium für den Anteil der Berufspendler und damit einhergehend der Ortskundigkeit.

Bei der Auswertung der Literatur am Beispiel der Kapazität von Arbeitsstellenengpässen zeigt sich dann auch - nicht zuletzt in Anbetracht der Fülle von zu beachtenden Einflüssen - eine große Spannweite der ermittelten Kapazitätswerte. Tab. 3-2 und Tab. 3-3 enthalten zur Verdeutlichung eine Zusammenstellung von Literaturangaben zu diesem Thema.

Bei den deutschen Literaturquellen wurde zusätzlich noch einmal nach Dauer- bzw. Tagesbaustellen unterschieden, wobei die Zusammenstellung der Kapazitätswerte stark vereinfacht ist, da im weiteren Verlauf dieses Kapitels auf die einzelnen Untersuchungen detaillierter eingegangen wird.

Es zeigt sich, dass das Hauptaugenmerk bisheriger Untersuchungen auf den Arbeitsstellen längerer Dauer lag. Dies ist sicher nicht in der vermeintlich geringeren Stauanfälligkeit von Tagesbaustellen begründet, vielmehr erweisen sich diese Arbeitsstellen aufgrund ihrer einfacheren Ausstattung häufig als kritischer als Arbeitsstellen längerer Dauer. Die notwendigen empirischen Untersuchungen bei kurzfristigen Baustellen gestalten sich jedoch erheblich schwieriger, da die Entscheidung über die Durchführung einer solchen Bau- oder Erhaltungsmaßnahme im Regelfall sehr kurzfristig getroffen werden muss.

Die in dieser Übersicht auftretenden, zum Teil gravierenden Differenzen der Kapazitätswerte lassen die Frage auftreten, ob bzw. wie sich die eingangs genannten Einflussfaktoren wertmäßig in die Ermittlung der Kapazität einbeziehen lassen.

Literaturquelle	Grenzwerte in Kfz/h		Bemerkungen
	einspurig	zweispurig	
Dauerbaustellen			
RESSEL (1996)	915-1460	2075-3210	differenziert nach Verkehrsführung, GV-Anteil und Längsneigung
RBAP (1996)	1400-1830 in Pkw-E/h	2800-3660 in Pkw-E/h	differenziert nach Verkehrsführung und dem Anteil Ortsunkundiger
RSA (1995)	1500	3000	durchschn. Lkw-Anteil, geringe Längsneigung
BRILON et al.(1994)		3350	Lkw-Anteil 5-10%
RESSEL (1994)	1175-1460	2380-2920	diff. nach Verkehrsführung und GV-Anteil
BAST (1992)		2800	ohne Stau
KAYSER et al. (1991)	1100 - 1500	2400 - 3000	abhängig von SV-Anteil und Längsneigung
HEIDEMANN et al. (1990)		3000	Verkehrsführung 3+1 und 4+0
SCHMUCK et al. (1984)	1400	2400 - 2900	differenziert nach Verkehrsführung
BOLTE et al. (1984)		2160 - 2325	differenziert nach Verkehrsführung; nach HCM 1965
HOFFMANN et al. (1981)		3000-3200	VF 3+1; Stadtautobahn
LENZ et al. (1970)	1200		bei Stau vor dem Engpass
Tagesbaustellen			
STÖCKERT et al. (1999)	1500 - 1750 in Pkw-E/h	2300 - 3500 in Pkw-E/h	differenziert nach Verkehrsführung
AUGUST et al. (1991)	1200 - 2000		ländliche Gebiete - Ballungszentren

Tab. 3-2: Zusammenstellung von Richtwerten für die Kapazität von Baustellenengpässen aus verschiedenen deutschen Literaturquellen

Literaturquelle	Grenzwerte in Kfz/h		Bemerkungen
	einspurig	zweispurig	
TRB (HCM 2000) (USA)	1550	1860	Arbeitsstellen ohne FS-Überleitung
MAZE et al. (2000) (USA)	1400-1600 in Pkw-E/h		bei Abbau von 2 auf 1 Fahrstreifen
RUTISHÄUSER et al. (1994) (CH)	1600		bei Abbau von 2 auf 1 Fahrstreifen
OECD (1990)	1540 - 1650		VF 2+0 bei SV 15% (GB)
	1540		VF 2+1 bei SV 15% (GB)
		3280	VF 3+2 bei SV 15% (GB)
		2980	VF 5+0 bei SV 15% (GB)
	1340		VF 2+1 in USA [TRB, 1994]
		2980	VF 3+2 in USA [TRB, 1994]
	1100		VF 2+1 in D und CH
		2400	VF 3+2 in D und CH
		2650	VF 5+0 in D und CH
PAPENDRECHT et al.(1988) (NL)	1330		Verkehrsführung 2+1 bei Dichte < 20 Kfz/km
MORALES (1987) (USA)	1300	2700	bei Reduktion eines Fahrstreifens
MATHEWS (1984) (GB)	1480-1650	2970-3270	verschiedene VF (15% SV)

Tab. 3-3: Zusammenstellung von Richtwerten für die Kapazität von Baustellenengpässen aus verschiedenen ausländischen Literaturquellen

In einigen der oben genannten Arbeiten wurden diese Zusammenhänge näher untersucht. Die Ergebnisse dieser Analysen - erweitert durch Literaturquellen, die sich mit weiteren Formen von Engpasssituationen befassen - werden in den folgenden Abschnitten zusammengefasst.

3.4 Querschnittsgestaltung

3.4.1 Grundlagen der Verkehrsführung im Bereich von Arbeitsstellen

Arten der Verkehrsführung

Bezüglich der Gestaltung von Sicherheitsmaßnahmen wird in den RSA [BMV,1995] unterschieden zwischen:

- Arbeitsstellen längerer Dauer (Dauerbaustellen)
Darunter fallen alle Arbeitsstellen, die mindestens einen Kalendertag durchgehend und ortsfest aufrechterhalten werden.

- Arbeitsstellen kürzerer Dauer (Tagesbaustellen)

Darunter sind alle Arbeitsstellen zu verstehen, die nur über eine begrenzte Stundenanzahl (in der Regel bei Tageshelligkeit) bestehen, auch wenn die Arbeiten am nächsten Tag fortgesetzt werden. Hierzu zählen:

- Kurzzeitig stationär eingerichtete Baustellen (z.B. Reparaturen an Schutzplanken, Beschilderungsarbeiten)
- Bewegliche Arbeitsstellen (z.B. Markierungsarbeiten, Grasschnitt)
- Vermessungsarbeiten

Grundsätzlich können die unterschiedlichen Verkehrsführungen für Arbeitsstellen längerer Dauer in vier verschiedene Gruppen aufgeteilt werden [RESSEL, 1994]:

- Verkehrsführung ohne Überleitung des Verkehrs auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn und ohne Fahrstreifenreduktion, jedoch mit Einengung der Fahrstreifenbreite (z.B. VF 2n+2)
- Verkehrsführung ohne Überleitung, aber mit Fahrstreifenreduktion und -einengung (z.B. VF 3n+2)
- Verkehrsführung mit Überleitung auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn und Fahrstreifeneinengung, aber ohne Reduktion eines oder mehrerer Fahrstreifen (z.B. VF 4s+0)
- Verkehrsführung mit Überleitung, mit Fahrstreifenreduktion und -einengung (z.B. VF 5s+0)

Eine Übersicht über die verschiedenen Verkehrsführungen an Arbeitsstellen längerer Dauer gibt Abb. 3-2.

Verkehrsführungen für Richtungsfahrbahnen mit									
zwei Fahrstreifen					drei Fahrstreifen				
2n+2		↓	↓	↑		↓	↓	↑	
2n+1		↓	↓	↑		↓	↓	↑	
2n+2s		↓	↓		↑	↓	↓	↑	
3s+1		↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	
4s+0		↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	
2+0		↓	↑			↓	↓	↑	
3s+0		↓	↓	↑		↓	↓	↑	

Die Zusätze „n“ und „s“ sind mit der RSA 95 neu eingeführt worden.

„n“: Die Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn werden nicht durch die Baustellenverkehrsführung in Anspruch genommen.

„s“: Der Verkehr wird unter Mitbenutzung des Seitenstreifens geführt.

Abb. 3-2: Darstellung der Verkehrsführungen für Autobahnbaustellen längerer Dauer

Bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer (Tagesbaustellen) erfolgt in der Regel die Reduzierung eines oder zweier Richtungsfahrstreifen (evtl. auch nur des Seitenstreifens) ohne eine wesentliche Einengung der verbliebenen Fahrstreifen (bis maximal 3,25 m) und ohne Überleitung auf die Gegenfahrbahn (siehe Abb. 3-3). Im Falle einer Sperrung des linken Fahrstreifens besteht grundsätzlich die Möglichkeit der Seitenstreifenmitbenutzung. Probleme ergeben sich hier aber in Bereichen mit dichter Anschlussstellenfolge.

An Tagesbaustellen kann im Gegensatz zu den Dauerbaustellen in den meisten Fällen aufgrund der erforderlichen Beweglichkeit und wegen des Aufwandes nur mit wenigen Elementen vorgewarnt werden.

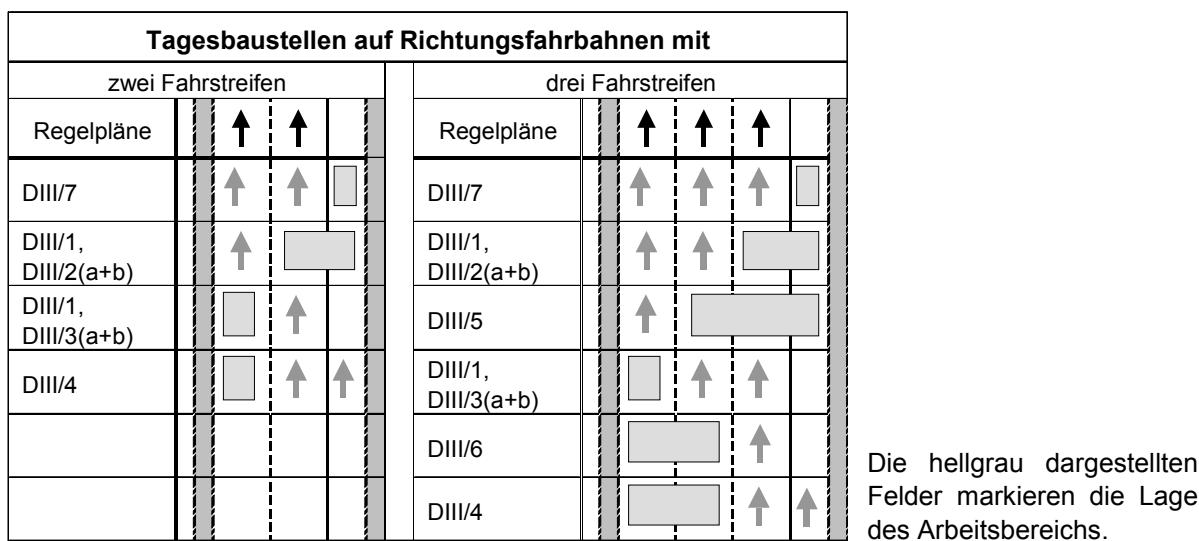


Abb. 3-3: Darstellung aller Verkehrsführungen für Autobahnbaustellen kürzerer Dauer

Fahrstreifenbreiten

Zusätzlich sind in den RSA Mindestbreiten für die Behelfsfahrstreifen in Abhängigkeit von der Baustellenlänge festgelegt (siehe Tab. 3-4). Demnach beträgt die Mindestfahrstreifenbreite 2,50 m bei Beschränkung der Fahrzeugsbreite auf bis zu 2 m (Z 264 StVO) und der Baustellenlänge auf 6 km. Mit steigender Baustellenlänge erhöht sich die erforderliche Fahrstreifenbreite auf 3,25 m. Bleibt die Fahrzeugsbreite unbeschränkt, darf eine Fahrstreifenbreite von 3,25 m nur im Ausnahmefall (z.B. im Bereich von Fertigern) unterschritten werden.

Zulässige Höchstgeschwindigkeiten im Baustellenbereich

Grundsätzlich gilt sowohl im eigentlichen Baustellenbereich als auch in den Verschwenkungsbereichen, den Einziehungsbereichen und den Überleitungen auf gegenüberliegende Richtungsfahrbahnen eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h.

Fahrzeugbreite	Länge der Arbeitsstelle		
	< 6 km	6 - 9 km	> 9 km
Beschränkung auf bis zu 2 m (Z 264 StVO)	2,50 m (3,25 m) ¹⁾	3,00 m (3,25 m) ¹⁾	3,25 m
unbeschränkt	3,25 m (3,00 m) ^{2) 3)}		

- 1) Bei einer Verkehrsführung mit nur einem Behelfsfahrstreifen für eine Fahrtrichtung auf der Gegenfahrbahn; ggf. muss vorher ausgebaut oder verbreitert werden
- 2) Durch einen entsprechenden vorherigen Fahrbahnabau bzw. eine Verbreiterung ist eine Behelfsfahrstreifenbreite von 3,25 m anzustreben
- 3) Im Bereich von Fertigern darf die Fahrstreifenbreite zur Erhöhung der Sicherheit der in der Arbeitsstelle Tätigen vorübergehend und auf einer geringen Streckenlänge auf dieses Maß eingeengt werden

Tab. 3-4: Mindestbreite von Behelfsfahrstreifen in Abhängigkeit von der Länge der Arbeitsstelle [BMV, 1995]

Hiermit wurde durch die RSA 95 eine wesentliche Änderung gegenüber früheren Festlegungen (RSA 80/86) vorgenommen. Dort war im Überleitungsbereich eine Geschwindigkeit von 60 km/h vorgesehen. Durch die Anordnung der Regelgeschwindigkeit auch im kritischen Überleitungsbereich und der daraus folgenden Vermeidung von zusätzlichen Bremsvorgängen soll ein kontinuierlicher Verkehrsfluss bei der Einfahrt in die Baustelle erreicht werden. Dies setzt selbstverständlich eine regelgerechte bauliche Ausbildung und Verkehrsführung der betreffenden Bereiche voraus.

3.4.2 Berücksichtigung der Verkehrsführung bei der Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellen

Die in Abschnitt 3.1 definierte Kapazität eines Engpasses wird in erster Linie durch die Anzahl der Fahrstreifen bestimmt. Faktoren wie die Fahrstreifenbreite, die Überleitung auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn und somit das Vorhandensein von Gegenverkehr sind ebenfalls von Bedeutung. Im Folgenden werden die wesentlichen Literaturquellen zu dieser Thematik analysiert.

RBAP 1996

Auf das Verfahren, das in den Richtlinien für die Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP '96 [BMV, 1996]) enthalten ist, wurde bereits in Abschnitt 1.2 kurz eingegangen. Die Abschätzung der Kapazität eines Baustellenengpasses erfolgt dort ausgehend von einer Grundkapazität von 1830 Pkw-E/h/FS durch die Verwendung von Reduktionsfaktoren, die den Einfluss der Fahrstreifenbreite, der Verkehrsführung (Reduktion, Überleitung von Fahrstreifen) und der Ortskundigkeit des Fahrerkollektivs (siehe auch Abschnitt 3.6) beschreiben. Tab. 3-5 enthält eine Übersicht über das Verfahren.

	Reduktionsfaktor	Kapazität pro Fahrstreifen	
		$b_{FS,Lkw} \geq 3,25m$ oder $b_{FS,Pkw} \geq 2,75m$	$b_{FS,Lkw} < 3,25m$ oder $b_{FS,Pkw} < 2,75m$
Grundwerte der Kapazität in Abhängigkeit von der Fahrstreifenbreite	1,0	1830 Pkw-E/h/FS	1720 Pkw-E/h/FS
Reduzierung der Kapazität durch:			
ÜL oder RFS	0,95	1740	1630
ÜL und RFS	0,95 · 0,95	1650	1550
OU	0,9	1640	1550
OU und ÜL / OU und RFS	0,9 · 0,95	1560	1470
OU und ÜL und RFS	0,9 · 0,95 · 0,95	1480	1400

ÜL: Überleitung auf die Gegenfahrbahn
 RFS: Reduktion der Anzahl der Fahrstreifen vor der Baustelle
 OU: Ortsunkundige, d.h. der geschätzte Anteil des berufsbedingten Verkehrs liegt unter 50%

Tab. 3-5: Richtwerte für die Ermittlung der Kapazität eines Fahrstreifens an Baustellenengpässen [BMV, 1996]

RESSEL, 1994

Auf der Basis von umfangreichen empirischen Untersuchungen in Form von linien- und querschnittsbezogenen Messungen an Baustellen mit unterschiedlichen Verkehrsführungen und Güterverkehrsanteilen (GVA) bestimmt RESSEL durchschnittliche Bruttozeitlücken für die vier verschiedenen Fahrzeugkombinationen (Pkw-Pkw, Pkw-GV, GV-GV, GV-Pkw) [RESSEL, 1994]. Diese dienen als Grundlage für die Ermittlung der Kapazität von Baustellenengpässen in Abhängigkeit vom Güterverkehrsanteil (siehe Tab. 3-6).

STÖCKERT, 2001

Im Rahmen der Untersuchung „Auswirkungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufs“ behandelt STÖCKERT zum einen das Problem der Kapazität von Baustellenengpässen, zum anderen entwickelt er ein Verfahren zur Ermittlung arbeitsstellenbedingter Zeitverluste. Grundlage für die Ermittlung der Kapazität der verschiedenen Baustellenverkehrsführungen sind zum einen die Ergebnisse einer Literaturanalyse (in erster Linie die Richtlinien für die Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP 96) [BMV, 1996], siehe oben) und zum anderen Daten, die aus eigenen Messungen gewonnen und mit Hilfe des einteiligen k-v-Modells nach VAN AERDE [VAN AERDE, 1995] aufbereitet wurden.

	Maximale Verkehrsstärke des Baustellenengpasses [Kfz/h]			
Güterverkehrsanteil	0%	10%	20%	30%
zweistreifige Richtungsfahrbahn				
VF 2+1	1460	1320	1245	1175
VF 3+1	2920	2780	2635	2495
VF 4+0	2830	2670	2520	2380
dreistreifige Richtungsfahrbahn				
VF 3+2	3190	3035	2875	2725
VF 5+0	2880	2725	2565	2410

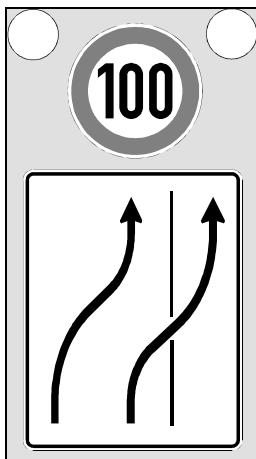
Tab. 3-6: Kapazitätswerte für verschiedene Verkehrsführungsarten in Abhängigkeit vom Güterverkehrsanteil (arbeitsstellenzugewandte Richtung) [RESSEL, 1994]

Das Verfahren zur Bestimmung der Kapazität geht - wie auch das Modell in den RBAP - von einer Grundleistungsfähigkeit von 1830 Pkw-E/h/FS aus. Die Anpassung der Werte an die jeweiligen Merkmale der Verkehrsführung erfolgt mit Hilfe von Korrekturfaktoren (siehe Tab. 3-7).

Fahrstreifenreduzierung rechts (langsame Fahrzeuge wechseln auf schnelleren Fahrstreifen)	0,90
Fahrstreifenreduzierung links (schnelle Fahrzeuge wechseln auf langsameren Fahrstreifen)	0,95
Verschwenkung von Fahrstreifen	0,95
Verschwenkung von Fahrstreifen auf den Seitenstreifen	0,50

Tab. 3-7: Korrekturfaktoren zur Berechnung der Kapazität eines Baustellenengpasses bei Tagesbaustellen (Grundleistungsfähigkeit 1830 Pkw-E/h) [STÖCKERT et al., 1999]

Kritisch zu betrachten ist der sehr hohe Reduktionsfaktor, der bei der Überleitung des Hauptfahrstreifens auf den Seitenstreifen angesetzt wird. Da derartige Verkehrsführungen erst seit einigen Jahren zur Absicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer genutzt werden, existieren nur wenige Untersuchungen über den Verkehrsablauf in diesen Bereichen. Die vorhandenen Arbeiten befassen sich im Wesentlichen mit der Verbesserung der Akzeptanz der geänderten Verkehrsführung durch Variation der Hinweistafeln im Vorfeld der Baustelle [z.B. SCHULTE, 1992] (siehe Abb. 3-4). Dabei zeigt sich, dass im Bereich schwacher Verkehrsstärken der Seitenstreifen wesentlich schlechter genutzt wird als bei hoher Auslastung. Häufig ist auch zu beobachten, dass bei Kolonnenfahrt das Ausschwenken eines einzelnen Fahrzeuges durch das Nachfahren anderer Fahrzeuge zu einer dauerhaften Nutzung des Seitenstreifens führt. Dies lässt darauf schließen, dass bei vielen Verkehrsteilnehmern immer noch eine Unsicherheit über die korrekte Befolgung der Beschilderung besteht.



Um eine Entscheidung über die Eignung verschiedener Verkehrsführungslösungen zur Aufnahme als generelle Lösung in die RSA treffen zu können, wurden 1991 in einer mehrwöchigen Untersuchung im Auftrag der BASt vier unterschiedliche Varianten in Feldversuchen getestet. Letztendlich wurde die nebenstehende Variante als Regellösung in die RSA 95 aufgenommen.

Abb. 3-4: Hinweisschild bei einer Verkehrsführung an einer Tagesbaustelle mit Überleitung des Hauptfahrstreifens auf den Seitenstreifen

3.4.3 Berücksichtigung von Fahrstreifenreduktionen auf der freien Strecke

Neben den temporären Fahrstreifenreduktionen in Arbeitsstellenbereichen treten auch dauerhafte Fahrstreifenreduktionen im Autobahnnetz auf. Diese bewirken - ähnlich wie an Arbeitsstellen einen Anstieg der Fahrstreifenwechsel, eine Häufung von Brems- und Beschleunigungsmanövern und damit eine gegenüber einer durchgehenden Fahrbahn (mit reduzierter Fahrstreifenanzahl) abgeminderte Kapazität.

In seiner Untersuchung zum „Verkehrsablauf an Fahrstreifenreduktionen“ befasst sich ENGELMANN mit der Analyse von Autobahnabschnitten, an denen - ohne Vorhandensein einer Arbeitsstelle - Fahrstreifen reduziert werden [ENGELMANN, 2002]. Er differenziert dabei nach Fahrstreifenreduktionen im Bereich von Knotenpunkten sowie solchen auf der freien Strecke. Auf der Basis von Messungen an insgesamt 20 Untersuchungsstellen (freie Strecke: 13; Knotenpunkte: 7) werden Reduktionsfaktoren ermittelt, die den Einfluss dieser Fahrstreifenreduktionen auf die Kapazität des Streckenabschnitts abbilden sollen. Die Ergebnisse der Untersuchung lauten unter anderem folgendermaßen:

- An Fahrstreifenreduktionen von drei auf zwei Fahrstreifen auf der freien Strecke tritt im Mittel eine zusätzliche Kapazitätsreduktion um 15% auf.
- Für die Bestimmung der Kapazität im Bereich von Knotenpunkten ist häufig nicht die Fahrstreifenreduktion hinter der Ausfahrt, sondern vielmehr die Verflechtung mit den Verkehrsströmen in der Einfahrt maßgebend. Daher konnte für diesen Fall kein Reduktionsfaktor bestimmt werden.

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf die Verhältnisse im Bereich von Arbeitsstellen wird vom Autor aufgrund der grundsätzlich verschiedenen Charakteristik des Verkehrsablaufs (Geschwindigkeitstrichter, Arbeitsstellenabsicherung) nicht gesehen.

3.5 Verkehrszusammensetzung und Längsneigung

3.5.1 Vorbemerkung

Neben der Verkehrsführung hat die Verkehrszusammensetzung, also der Güter- oder Schwerverkehrsanteil Einfluss auf die Kapazität C_E . Fahrzeuge, die diesen Fahrzeuggruppen zugeordnet werden, weisen zum einen eine erheblich größere Länge auf als Personenkraftwagen, zum anderen ist ihr Leistungsgewicht, also das Verhältnis von Gewicht des Fahrzeugs zu Motorstärke (kW) deutlich ungünstiger als bei Pkw. Dieses höhere Leistungsgewicht bewirkt insbesondere an Strecken mit großer Längsneigung einen starken Abfall der Geschwindigkeit bzw. - bei Anfahrt aus dem Stand bei Stau - eine geringe Beschleunigung. Verbunden mit einem hohen Verkehrsaufkommen und damit eingeschränkten Überholmöglichkeiten führt dieser Geschwindigkeitsabfall zur Behinderung der anderen Verkehrsteilnehmer und somit zur Reduktion der Kapazität des Streckenabschnittes. Dieser Einfluss wird mit zunehmender Länge des Steigungsabschnittes größer.

Die Trennung der Begriffe Güterverkehr (GV) und Schwerverkehr (SV) gestaltet sich - insbesondere in der praktischen Durchsetzung - relativ schwierig. In den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE '91) [FGSV, 1991(b)] setzt sich die Fahrzeuggruppe Güterverkehr aus den Fahrzeugarten Lkw (Lastkraftwagen, Lieferfahrzeuge mit Zwillingsbereifung der Hinterachse), Lz (Lastzug, Sattelzug) und Sfz (Sonderfahrzeuge) zusammen. In den in regelmäßigen Abständen durchgeführten Straßenverkehrszählungen der Bundesanstalt für Straßenwesen [z.B. BAST, 1995] werden die Fahrzeuggruppen GV und SV folgendermaßen unterschieden:

- GV: Lieferfahrzeuge und Lkw mit und ohne Anhänger, Sattelkraftfahrzeuge, Spezial- und landwirtschaftliche Fahrzeuge
- SV: Busse, Lkw über 3,5 t mit und ohne Anhänger, Sattelkraftfahrzeuge, Spezial- und landwirtschaftliche Fahrzeuge

Die in den Straßenverkehrszählungen aufgeführten Daten werden in der Regel manuell erfasst, so dass die Klassifizierung per Augenschein stattfindet. Erfolgt die Datenerfassung dagegen wie bei der Jahresauswertung der Dauerzählstellen mit automatischen Zählstellen, bereitet die Zuordnung zu den beiden Fahrzeuggruppen in der Regel Schwierigkeiten. Ältere Zähleinrichtungen berücksichtigen als Abgrenzungskriterium lediglich die Fahrzeugglänge, daher werden neben den Fahrzeugen des Schwerverkehrs häufig auch Pkw mit Anhänger erfasst. Bei den neuen Zählgeräten ist mit 5+1 oder 8+1 Fahrzeugarten¹⁰ eine genaue Klassifizierung möglich.

¹⁰ In den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS) [BMV, 1997(b)] werden die Klassifizierungen in Fahrzeugklassen für Langzeitzählstellen festgelegt. Man unterscheidet in 5+1 bzw. 8+1 Fahrzeugklassen (verschiedene Pkw-, Motorrad- und Lkw-Klassen). „+1“ bedeutet dabei die Fahrzeugklasse, in der alle nicht klassifizierbaren Fahrzeuge zusammengefasst werden.

Um trotzdem die Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, wird auch bei diesen neuen Geräten lediglich eine grobe Unterteilung in die Fahrzeuggruppen Pkw und Lkw vorgenommen, wobei zur Gruppe „Lkw“ die Fahrzeugarten Lkw mit zulässigem Gesamtgewicht größer 3,5 t ohne und mit Anhänger sowie Sattelkraftfahrzeuge (sofern diese getrennt von den Lkw mit Anhänger erfasst werden) zählen.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Klassifizierung der Fahrzeugarten je nach Erfassungsart differiert. Diese Tatsache sollte bei der quantitativen Beschreibung des Einflusses der Fahrzeugzusammensetzung berücksichtigt werden. Insbesondere die Frage, in welcher Form der Anteil der Pkw mit (Wohn-)Anhängern bei der Klassifizierung nach Fahrzeugarten berücksichtigt wird, ist bei der Bestimmung der Kapazität eines Baustellenengpasses während der Urlaubsverkehrszeit von großer Bedeutung. Um im weiteren Verlauf des Berichtes eine einheitliche Definition der Fahrzeugzusammensetzung zu gewährleisten, wird fortan der Begriff Schwerverkehr (SV) benutzt. In dieser Fahrzeuggruppe sind dann - abweichend von der ursprünglichen Definition - alle Fahrzeuge zusammengefasst, die aufgrund ihrer Fahreigenschaften (Gewicht, Größe, Motorisierung) einen reduzierenden Einfluss auf die Kapazität eines Streckenabschnittes ausüben. Dazu zählen sowohl Lkw, Busse und sonstige Schwerfahrzeuge als auch Wohnmobile und Pkw mit Wohnanhängern. Lediglich bei der Verwendung von Zitaten werden die dort angegebenen Größen zur Beschreibung der Verkehrszusammensetzung beibehalten.

3.5.2 Berücksichtigung des Schwerverkehrs in Verbindung mit Längsneigungen im Bereich von Arbeitsstellen

RBAP 1996

Neben den unter Abschnitt 3.4.2 erläuterten Reduktionsfaktoren für die Kapazität des Arbeitsstellenengpasses berücksichtigt das Verfahren in den RBAP außerdem den Anteil des Schwerverkehrs sowie das Ausmaß der Längsneigung. Diese beiden Einflüsse werden jedoch (in Kombination) auf der Verkehrsnachfrageseite durch Verwendung von Pkw-Äquivalenzwerten geltend gemacht. Die angesetzten Faktoren entsprechen den Werten, die auch im Highway Capacity Manual (HCM) 1994 [TRB, 1994]¹¹ zur Berechnung der Kapazität eines Autobahnstreckenabschnittes benutzt wurden (siehe Tab. 3-8, obere Zeile).

Kategorie	eben	hügelig	bergig
Längsneigung	< 2 %	2 - 4 %	> 4 %
RBAP [BMV, 1996]	1,5	3	6
STÖCKERT [STÖCKERT, 2001]	1,5	-0,0625 v_{BSFZ} + 5,6875	

Tab. 3-8: Äquivalenzwerte zur Umrechnung des Schwerverkehrs in Pkw-E/h

¹¹ Das HCM 94 wurde zwischenzeitlich durch das HCM 2000 ersetzt. Die Pkw-Äquivalenzwerte wurden in der neueren Fassung überarbeitet (siehe auch Tab. 3-10).

STÖCKERT, 2001

Der Einfluss der Längsneigung und des Schwerverkehrsanteils wird bei STÖCKERT durch die Umrechnung der Fahrzeuge des Schwerverkehrs in Pkw-Einheiten mit einem Geländefaktor ebenfalls in Anlehnung an das Verfahren in den RBAP bzw. im HCM berücksichtigt (siehe Tab. 3-8). Im Unterschied zu den beiden genannten Verfahren steigt hier der Geländefaktor ab einer Längsneigung von 2 % linear an, wobei durch die Verwendung der Geschwindigkeit des Bemessungsschwerfahrzeugs v_{BSFZ} nach RAS-Q [FGSV, 1996] in der Berechnungsformel berücksichtigt werden soll, dass kurze Steigungsabschnitte einen geringeren Einfluss auf die Kapazität eines Streckenabschnittes haben.

RESSEL, 1996

Wie bereits in Abschnitt 1.4.2 beschrieben, wurden von RESSEL auf der Basis von empirisch ermittelten Zeitlückenverteilungen Kapazitätswerte für verschiedene Baustellenverkehrsführungen mit unterschiedlichen Güterverkehrsanteilen (GVA) ermittelt. In einer weiterführenden Untersuchung im Auftrag der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern beschreibt er zusätzlich den Einfluss der Längsneigung in Verbindung mit dem Güterverkehrsanteil in Form von differenzierten Kapazitätsangaben (siehe Tab. 3-9).

Bei näherer Analyse dieser Werte zeigt sich, dass der Einfluss des Güterverkehrs unabhängig von der Längsneigung jedoch abhängig von der Verkehrsführung ist. Die Kapazitätsabminderung erfolgt pauschal, d.h. auch bei reinem Pkw-Verkehr (siehe hierzu auch Verfahren nach HBS, Seite 40). Berechnet man stellvertretend Äquivalenzwerte, ergibt sich an Verkehrsführungen mit einem Behelfsfahrstreifen ein maximaler Äquivalenzwert von 1,8 und an zwei Behelfsfahrstreifen ein Wert um 1,6 (jeweils für einen GV-Anteil von 30%). Zusätzlich ist der Trend zu beobachten, dass die Äquivalenzwerte bei geringeren GV-Anteilen etwas niedriger sind. Der letztgenannte Aspekt widerspricht den eingangs angestellten und in einigen anderen Literaturquellen aufgegriffenen Überlegungen.

Steigung	0% - 2%				2% - 4%				4% - 6%				> 6%			
GV-Anteil	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
zweistufige Richtungsfahrbahn																
2n+2s	3210	3060	2900	2745	3170	3020	2865	2710	3100	2955	2800	2650	2800	2670	2530	2395
2n+1	1460	1320	1245	1174	1440	1305	1230	1160	1390	1255	1185	1120	1195	1080	1020	960
3s+1	2920	2780	2635	2495	2885	2780	2745	2465	2820	2685	2545	2410	2545	2425	2300	2175
4s+0	2830	2670	2520	2380	2795	2635	2490	2350	2730	2580	2430	2300	2470	2330	2200	2075
2+0	1385	1255	1180	1120	1370	1240	1165	1120	1315	1195	1120	1065	1130	1025	965	915
3s+0	1385	1255	1180	1120	1370	1240	1165	1120	1315	1195	1120	1065	1130	1025	965	915
dreistufige Richtungsfahrbahn																
3n+2	3190	3035	2875	2725	3150	2990	2840	2690	3080	2930	2780	2635	2780	2645	2505	2375
4+0	3190	3035	2875	2725	3150	2990	2840	2690	3080	2930	2780	2635	2780	2645	2505	2375
5s+0	2880	2725	2565	2410	2845	2690	2535	2380	2780	2635	2480	2330	2510	2375	2235	2100

Tab. 3-9: Kapazitätswerte für verschiedene Verkehrsführungen in Abhängigkeit vom Güterverkehrsanteil und der Längsneigung (baustellenzugewandte Richtungsfahrbahn) [RESSEL, 1996]

HCM 2000

Zusätzlich zu den Kapazitätswerten, die für verschiedene Verkehrsführungen (Dauerbaustellen) angegeben werden (siehe Tab. 3-3), bietet das Highway Capacity Manual (HCM 2000) ein Verfahren, mit dem die Kapazität einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen ermittelt werden kann [TRB, 2000]. Die Grundkapazität einer solchen Arbeitsstelle (nach der hier verwendeten Definition entspricht dies dem Level of Service (LOS) E) wird im HCM auf 1600 pc/h/ln (Pkw-E/h/FS) für ideale Bedingungen, d.h. bei reinem Pkw-Verkehr und ebener Strecke, bei normaler Arbeitsintensität und ohne Beeinflussung von Autobahnknotenpunkten festgelegt. Unter nicht idealen Bedingungen wird die maximal zulässige Verkehrsstärke unter Zuhilfenahme von Korrekturfaktoren berechnet:

$$c_a = (1600 + I - R) \cdot f_{HV} \cdot N \quad \text{Gl. 3-1}$$

Mit:	c_a	angepasste Kapazität des Hauptstroms	[Kfz/h/FS]
	I	Anpassung an die Arbeitsintensität innerhalb der Arbeitsstelle (siehe hierzu Abschnitt 3.7)	[Kfz/h/FS]
	R	Anpassung an Rampenverkehrsstärken bei Knotenpunkten im Arbeitsstellenbereich (siehe hierzu Abschnitt 3.9)	[Kfz/h/FS]
	N	Anzahl der Fahrstreifen je Richtung	[-]
	f_{HV}	Faktor zu Berücksichtigung des Einflusses des Schwer- und Freizeitverkehrs und der Längsneigung (siehe Tab. 3-10 und Tab. 3-11)	[-]

Die Pkw-Äquivalenzwerte, die in Tab. 3-10 zur Umrechnung des Schwerverkehrs und der Freizeitfahrzeuge angegeben sind, bilden die Realität nur sehr grob nach. Die im Baustellenbereich erreichbare Geschwindigkeit eines Schwerverkehrsfahrzeugs ist sowohl von der Längsneigung als auch von der Länge des Steigungsabschnittes abhängig. Die Auswirkung dieser im Vergleich zu den Pkw niedrigeren Geschwindigkeit auf die Kapazität der Baustelle wird wiederum vom gesamten Schwerverkehrsanteil beeinflusst. Ein großer SV-Anteil hat zur Folge, dass Schwerverkehrskolonnen entstehen, in denen aufgrund des gleichmäßig niedrigen Geschwindigkeitsniveaus relativ kleine Zeitlücken auftreten. Bei kleinen SV-Anteilen ist dagegen die Fahrzeugfolge Pkw-Lkw häufiger anzutreffen, so dass die Geschwindigkeitsdifferenzen zu großen Zeitlücken und damit zu stärkeren Kapazitätseinbußen führen.

Kategorie		eben	hügelig	bergig
Lkw und Bus	E_T	1,5	2,5	4,5
Freizeitfahrzeuge	E_R	1,2	2,0	4,0

Tab. 3-10: Längsneigungsabhängige Äquivalenzwerte E_T (Lkw) und E_R (Freizeitfahrzeuge) zur Umrechnung des Schwerverkehrs und der Freizeitfahrzeuge in Pkw-Einheiten [TRB, 2000]

Dieser Tatsache wird im HCM 2000 durch eine weitere sehr differenzierte Angabe von Pkw-Äquivalenzwerten zur Umrechnung von Schwerverkehrs- (und Freizeit-) -fahrzeugen in Pkw-

Einheiten Rechnung getragen. Dabei wird zwischen Steigungs- und Gefälleabschnitten unterschieden. Tab. 3-11 zeigt beispielhaft die Äquivalenzwerte für Schwerverkehrsfahrzeuge an Steigungsstrecken.

Steigung [%]	Länge [km]	Anteil Lkw und Busse [%]								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	alle	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
$\geq 2 - 3$	0,0 - 0,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	>0,4 - 0,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	>0,8 - 1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	>1,2 - 1,6	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	>1,6 - 2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	>2,4	3,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$\geq 3 - 4$	0,0 - 0,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	>0,4 - 0,8	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5
	>0,8 - 1,2	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	>1,2 - 1,6	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
	>1,6 - 2,4	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
	>2,4	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5
$\geq 4 - 5$	0,0 - 0,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	>0,4 - 0,8	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	>0,8 - 1,2	3,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	>1,2 - 1,6	4,0	3,5	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	>1,6	5,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	3,0
$\geq 5 - 6$	0,0 - 0,4	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	>0,4 - 0,5	4,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	>0,5 - 0,8	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
	>0,8 - 1,2	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	>1,2 - 1,6	5,5	5,0	4,5	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
	>1,6	6,0	5,0	5,0	4,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
>6	0,0 - 0,4	4,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0
	>0,4 - 0,5	4,5	4,0	3,5	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,5
	>0,5 - 0,8	5,0	4,5	4,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5
	>0,8 - 1,2	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5	3,0	3,0	3,0
	>1,2 - 1,6	6,0	5,5	5,0	5,0	4,5	4,0	3,5	3,5	3,5
	>1,6	7,0	6,0	5,5	5,5	5,0	4,5	4,0	4,0	4,0

Tab. 3-11: HCM-Äquivalenzwerte E_T zur Umrechnung von Lkw und Bussen in Pkw-Einheiten unter Berücksichtigung von Längsneigungen, Streckenlänge und Lkw/Bus-Anteil [TRB, 2000]

Bei einem Vergleich der Werte mit den Angaben aus der früheren HCM Version (1994) zeigt sich, dass die aktuellen Äquivalenzwerte insgesamt deutlich niedriger eingestuft werden. Dies entspricht den im Rahmen dieser Arbeit durchgeföhrten Erhebungen aus den Jahren 1998-2001, deren Ergebnisse in Kapitel 5 dargestellt sind¹².

Die Umrechnung der Äquivalenzwerte E_T (Lkw) bzw. E_R (Freizeitfahrzeuge) in den Faktor f_{HV} erfolgt mit der Gleichung:

¹² Anmerkungen zu dieser Thematik finden sich ebenfalls in der Arbeit „Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen“ [BECKMANN ET AL., 2001], die als Grundlage für die vorliegende Untersuchung diente.

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad \text{Gl. 3-2}$$

- Mit: E_T, E_R Längsneigungsabhängige Faktoren zur Umrechnung von Schwerverkehrs- bzw. Freizeitfahrzeugen in Pkw-Einheiten [-]
- P_T, P_R Anteil der Schwerverkehrs- bzw. der Freizeitfahrzeuge am Gesamtverkehr [-]
- f_{HV} Faktor zu Berücksichtigung des Einflusses des Schwer- bzw. Freizeitverkehrs und der Längsneigung [-]

3.5.3 Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils in Verbindung mit Längsneigungen auf der freien Strecke

HBS 2001

Im 2001 veröffentlichten Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV, 2001] wird die Längsneigung ebenfalls als ein wichtiges Kriterium bei der Ermittlung der Kapazität eines Streckenabschnitts betrachtet. Die Berücksichtigung von Steigungsstrecken erfolgt jedoch nicht explizit über Äquivalenzwerte, vielmehr werden in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil pro Steigungsklasse Kapazitäten angegeben (Tab. 3-12 und Tab. 3-13).

Berechnet man zum Vergleich dennoch Äquivalenzwerte anhand der vorgegebenen Kapazitäten, zeigt sich, dass diese - unabhängig von der Längsneigung und vom Schwerverkehrsanteil - immer zwischen 1,2 und 1,5 liegen. Die niedrigsten Werte treten bei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen außerhalb von Ballungsräumen auf. Der Einfluss der Längsneigung wird demnach über einen vom SV-Anteil völlig unabhängigen Reduktionsfaktor abgebildet, der etwa folgende Größenordnung besitzt:

- 3% Steigung $\Rightarrow f = 0,93$
- 4% Steigung $\Rightarrow f = 0,82$
- 5% Steigung $\Rightarrow f = 0,74$

Längsneigung	Kapazität [Kfz/h]					
	außerhalb von Ballungsräumen			innerhalb von Ballungsräumen		
	SV-Anteil			SV-Anteil		
	0%	10%	20%	0%	10%	20%
$\leq 2\%$	5400	5100	4800	5700	5400	5100
3%	5000	4750	4450	5300	5000	4700
4%	4450	4200	3950	4700	4450	4200
5%	4000	3750	3550	4250	4000	3750

Tab. 3-12: Kapazitäten auf dreistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbegrenzung
[FGSV, 2001]

Längsneigung	Kapazität [Kfz/h]					
	außerhalb von Ballungsräumen			innerhalb von Ballungsräumen		
	SV-Anteil			SV-Anteil		
	0%	10%	20%	0%	10%	20%
≤ 2%	3600	3500	3400	4000	3800	3600
3%	3350	3250	3150	3750	3550	3350
4%	2950	2850	2800	3350	3150	2950
5%	2650	2600	2500	3050	2850	2650

Tab. 3-13: Kapazitäten auf zweistreifigen Richtungsfahrbahnen ohne Geschwindigkeitsbegrenzung
[FGSV, 2001]

BREßLER, 2001

Grundlage für die Angaben im HBS 2001 sind die Ergebnisse einer Forschungsarbeit, die an der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt wurde. In ihrer Dissertation zum Thema „Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf an Steigungsstrecken - Kriterien für Zusatzfahrstreifen“ untersucht BREßLER den Einfluss von Steigungsstrecken auf die Geschwindigkeit der Pkw und Lkw. Mit Hilfe eines Simulationsmodells, das anhand der Ergebnisse eigener Erhebungen sowie Auswertungen von automatisch erfassten Daten an Steigungs- und Gefällestreichen geeicht wurde, werden Daten für verschiedene Kombinationen von Randbedingungen (Schwerverkehrsanteil, Längsneigung und Länge des Längsneigungsabschnitts) erzeugt. Basierend auf den somit erzeugten Punktwolken und unter Verwendung eines bereichsweise linearen, zweiteiligen Verkehrsichte-Geschwindigkeits-Modells erzeugt Breßler anschließend k-v-Diagramme anhand derer mittels einer Varianzanalyse der Einfluss der einzelnen Parameter analysiert wird. Für den Bereich des teilgebundenen und gebundenen Verkehrs ergibt sich ein Modell der Form:

$$v_{\text{Pkw}}(k) = v_0 + a_{\text{Lkw}} + b_{\text{Steigung}} \cdot c_{\text{Länge}} + d \cdot k \quad \text{Gl. 3-3}$$

Mit:	v_{Pkw}	mittlere Pkw-Reisegeschwindigkeit	[km/h]
	v_0	Geschwindigkeit des freien Verkehrs	[km/h]
	a_{Lkw}	Faktor zur Beschreibung des Einflusses des Lkw-Anteils	[km/h]
	b_{Steigung}	Faktor zur Beschreibung des Einflusses der Steigung	[km/h]
	$c_{\text{Länge}}$	Anteil der Abminderung für eine Strecke der Länge L an der max. Abminderung für eine Strecke derselben Längsneigung	[·]
	k	Verkehrsichte	[Fz/km]
	d	Koeffizient zur Beschreibung des Einflusses von k	[km ² /(Fz·h)]

Anhand der Gleichung 3-3 wird deutlich, dass in diesem Modellansatz der Einfluss des Schwerverkehrs unabhängig von der Steigung behandelt wird. Ein Zusammenhang wird

lediglich zwischen der Steigung und der Länge des Steigungsabschnitts ($c_{\text{Länge}} = \text{Kovariate}$) hergestellt.

Die Kapazitäten der Streckenabschnitte mit Steigungen werden anschließend basierend auf den Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Beziehungen, die sich aus den Verkehrsdichte-Geschwindigkeits-Beziehungen ergeben, ermittelt. Da die Scheitelpunkte dieser Kurven bei Längsneigungen unter 5% über den durch Simulation berechneten Werten liegen, erfolgt in diesen Fällen eine Kappung der Kurve an der Stellen, an der sie den durch Simulationsdaten gesicherten Bereich überschreiten.

Die von BREßLER ermittelten Kapazitätswerte (ohne Darstellung) beruhen auf der Auswertung von 5-min-Intervallen. Eine direkte Übernahme in das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (Bezugsintervall 1h) war daher nicht möglich. Anstelle dessen wurden von PONZLET [PONZLET, 1996] erstellte k-v-Diagramme für ebene Strecken mit dem von Breßler hergeleiteten Verfahren zur Berücksichtigung von Steigungsstrecken überarbeitet.

Anhand der Ausführungen in diesem Kapitel wird deutlich, dass zur Berücksichtigung der Längsneigung und des Schwerverkehrsanteil zwei vollkommen unterschiedliche Ansätze existieren. In Anbetracht der eingangs des Kapitels angestellten Überlegungen zur Rolle des Schwerverkehrs an Steigungen erscheint die Verknüpfung des Schwerverkehrs mit der Längsneigung nach wie vor sinnvoll, obwohl die Analysen von Breßler davon abweichende Ergebnisse liefern. Diese Differenzen liegen möglicherweise in der relativ geringen Datenbasis der Untersuchung begründet. Das Simulationsmodell konnte somit lediglich anhand eines kleinen Ausschnitts der möglichen Verkehrszustände geeicht werden.

3.6 Zusammensetzung des Fahrerkollektivs

Eine wichtige Rolle bei der Schätzung der Kapazität eines Baustellenengpasses spielt weiterhin die Zusammensetzung des Fahrerkollektivs. Faktoren, die die persönlichen Fahrereigenschaften, also Sicherheitsbewusstsein, Fahrkönnen etc., betreffen, sind in der Regel schlecht abschätzbar. Der Fahrtzweck und - in Zusammenhang damit - die Ortskenntnis und die Fahrweise lassen sich dagegen zumindest überschlägig ermitteln. Als Anhaltswerte können hier die Anteile des Berufs- bzw. Freizeitverkehrs sowie die Lage des Streckenabschnittes im Netz (überregionale Verbindung - Ballungsraum) dienen.

Ansätze hierzu bietet beispielsweise das HCM 2000 [TRB, 2000], in dem die Kapazität einer freien Strecke durch den Faktor f_p (Population) reduziert werden kann. Je nach Anteil des Berufsverkehrs liegt dieser Faktor zwischen 0,85 und 1,0.

In den Richtlinien für die Baubetriebsplanung auf Autobahnen (RBAP 1996) wird dieser Faktor - bezogen auf die Kapazität von Arbeitsstellen - auf 0,9 geschätzt (siehe Tab. 3-5).

Das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001) [FGSV, 2001] sieht bei der Bestimmung der Kapazität der freien Strecke ebenfalls die Berücksichtigung der Lage des betrachteten Streckenabschnitts vor. Hier wird jedoch kein expliziter Faktor ausgewiesen, vielmehr enthält das HBS Kapazitätswerte in Abhängigkeit von der Lage im Netz, vom Schwerverkehrsanteil sowie von der Längsneigung (siehe Tab. 3-12 und Tab. 3-13). Berechnet man dennoch Reduktionsfaktoren anhand der Kapazitätswerte bei ansonsten gleichen Randbedingungen, ergeben sich Werte zwischen 0,87 (Steigung 5%, SV-Anteil 0%) und 0,95 (Steigung 0%, SV-Anteil 0%).

3.7 Umfeldbedingungen

Zu den umfeldbedingten Faktoren, deren Einfluss auf die Kapazität eines Engpasses ebenfalls beachtet werden muss, gehören die Witterung, die Helligkeit und damit verbunden die Sichtverhältnisse im betreffenden Streckenabschnitt. Im weiteren Sinn zählen dazu jedoch auch Randbedingungen, die einen Einfluss auf die Konzentration der Verkehrsteilnehmer haben. Dies betrifft insbesondere die Schaulustigkeit einzelner oder mehrerer Verkehrsteilnehmer bei Unfällen oder Nothalten, aber auch die Ablenkung die (hin und wieder) durch eine besonders interessante Aktivität in Baustellen hervorgerufen werden kann.

PONZLET, 1996

In dem Forschungsbericht „Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten“ beschreibt PONZLET die Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Einflüssen auf das Geschwindigkeitsverhalten und damit auch auf die Kapazität auf Autobahnen [PONZLET, 1996a]. Die Basis der Auswertung bilden Messdaten von 15 Dauerzählstellen über einen Zeitraum von drei Jahren. Dabei handelt es sich um 10 vierspurige und 5 sechsspurige Messquerschnitte sowohl in Ballungsräumen als auch an großräumigen Verbindungsstrecken. Die Messquerschnitte weisen bis auf zwei Ausnahmen geringe Längsneigungen und Kurvigkeiten auf. Mit den Daten der Dauerzählstellen werden die Auswirkungen der zeitlich veränderlichen Faktoren auf die Geschwindigkeit und die Leistungsfähigkeit an Hand unterschiedlicher Verkehrsflussmodelle untersucht. Dabei ergaben sich folgende Zusammenhänge:

- Einfluss der Dunkelheit: Reduzierung der maximalen Verkehrsstärke um 10%
- Einfluss von Regen bei Helligkeit: Reduzierung der maximalen Verkehrsstärke um 15%
- Einfluss von Regen bei Dunkelheit: Reduzierung der maximalen Verkehrsstärke um 30%
- Einfluss des Wochentags: am Wochenende geringere maximale Verkehrsstärken als in der Woche

Angaben zu anderen Witterungszuständen, wie z.B. Nebel oder Schneefall werden nicht explizit gemacht. Wie bereits einleitend beschrieben, beziehen sich die ermittelten Zusammenhänge auf freie Autobahnabschnitte (zum Teil mit Tempolimit). Eine direkte Übertragung der Ergebnisse z.B. auf die Zustände an Autobahnarbeitsstellen ist daher nicht möglich. Insbesondere der Einfluss von Dunkelheit und/oder Regen ist bei Arbeitsstellen in starkem

Maß von der Qualität der Einrichtung und der damit verbundenen optischen Führung abhängig.

HCM 2000

Die in Abschnitt 3.5.2 beschriebene Gleichung 3-1 beinhaltet zur Anpassung der Arbeitsstellenkapazität an die in der Arbeitsstelle vorhandene Arbeitsintensität den Korrekturwert I [Kfz/h/FS]. Der Begriff Arbeitsintensität steht dabei repräsentativ für die Anzahl der Arbeiter im Arbeitsstellenbereich, für die Anzahl und Größe des eingesetzten Maschinen und Geräte und für die Nähe der durchgeführten Arbeiten zu den verkehrlich genutzten Fahrstreifen [TRB, 2000]. Ein weiterer Aspekt, der unter dem Faktor I zusammengefasst wird, ist die Berücksichtigung von außergewöhnlichen Arbeitstypen. Die Verbindung zwischen all diesen Randbedingungen besteht darin, dass sie einen nennenswerten Einfluss auf die Konzentration der Verkehrsteilnehmer haben, so dass bei hoher Arbeitsintensität und damit verbundener Ablenkung der Fahrer eine Reduktion der Kapazität zu erwarten ist.

Die Größe des Parameters I wird im HCM nur sehr vage angegeben. Anders als die übrigen verwendeten Faktoren und Korrekturwerte kann jedoch der Wert I bei sehr geringer Arbeitsaktivität auch eine Anhebung der Kapazität bewirken. Seine Spannweite reicht von -10% bis +10% bezogen auf die Grundkapazität von 1600 Pkw-E/h/FS, wobei der Grundwert eine durchschnittlich „intensiv“ betriebene Arbeitsstelle repräsentiert.

3.8 Unfälle und Nothalte

3.8.1 Einfluss von Unfällen und Nothalten auf die Kapazität

HCM 2000

Das amerikanische Highway Capacity Manual beinhaltet ebenfalls Angaben zu Kapazitätsreduktionen aufgrund von Unfällen und fahrzeugbedingten Nothalten (Pannen). Tab. 3-14 enthält Angaben zur verfügbaren Restkapazität für unterschiedliche Randbedingungen (die Originaltabelle enthält Werte für Richtungsfahrbahnen mit bis zu acht Fahrstreifen). Auffällig ist die Höhe der Kapazitätsreduktion, die weit über das Ausmaß einer reinen Fahrstreifensperrung hinausgeht.

Im HCM wird diese Tatsache durch die Schaulust der Verkehrsteilnehmer erklärt, die dazu führt, dass die Fahrer langsam auf die Unfallstelle zufahren, um sie zu beobachten, und anschließend nur verzögert auf die Möglichkeit zur Beschleunigung reagieren. Dieser „Rubbernecking“-Faktor wird auch für eine Reduktion der Kapazität auf der entgegengesetzten Richtungsfahrbahn verantwortlich gemacht, wobei das Ausmaß der Reduktion stark von der Schwere der Störung auf der Gegenfahrbahn abhängt (zwischen 5% bei einem Einzelfahrzeug-Unfall und 25% bei einem Unfall mit mehreren beteiligten Fahrzeugen).

FS pro Richtung	Nothalte auf Seitenstreifen	Unfall auf Seitenstreifen	ein FS blockiert	zwei FS blockiert	drei FS blockiert
2	0,95	0,81	0,35	0,00	-
3	0,99	0,83	0,49	0,17	0,00
4	0,99	0,85	0,58	0,25	0,13
5	0,99	0,87	0,65	0,40	0,20
...

Tab. 3-14: Anteil der verfügbaren Kapazität von Autobahnabschnitten bei Störfällen (Unfälle/Nothalte) [TRB, 2000]

BRILON/ZURLINDEN, 2002

BRILON und ZURLINDEN entwickeln in ihrer Untersuchung „Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen“ ein neues Verfahren für die Modellierung der Kapazität von Straßenabschnitten, dass von einem stochastischen Ansatz ausgeht [BRILON et al., 2002]. Bestandteil dieser Arbeit ist auch ein Modell zur Bestimmung der Restkapazität bei Unfällen und Nothalten, dass zum Teil auf dem amerikanischen HCM 2000 sowie Untersuchungen von BRILON/LEMKE aus dem Jahr 1997 basiert [BRILON et al., 1997]. In dem Modell wird davon ausgegangen, dass der Fahrbahnquerschnitt bei einem Unfall zunächst komplett gesperrt ist. Die Sperrzeit wird bei einer Störfalldauer von bis zu 20 Minuten mit 5 Minuten und in allen anderen Fällen mit 10 Minuten angesetzt. Im Anschluss an die Vollsperrung folgt ein Zeitbereich, in dem die Kapazität der Fahrbahn durch die in Tab. 3-15 dargestellten Faktoren berechnet werden kann. Dabei wird davon ausgegangen, dass die verunfallten Fahrzeuge die Fahrbahn weitestgehend räumen, so dass bei Vorhandensein eines Seitenstreifens kaum noch Kapazitätseinbußen auftreten. Bei Fahrbahnen ohne Seitenstreifen bleibt ein Fahrstreifen blockiert (vgl. auch HCM 2000, Tab. 3-14).

Die im Vergleich zu den Unfällen höheren Restkapazitäten bei Fahrbahnen ohne Seitenstreifen resultieren aus der Annahme, dass nur ein geringer Teil aller Nothalte tatsächlich verkehrsbehindernd wirkt, da viele Fahrzeuge rechtzeitig Nohaltbuchten erreichen können (siehe hierzu auch Abschnitt 3.8.2).

	Unfall	Nohalt
zweistreifig ohne Seitenstreifen	0,35	0,86
dreistreifig ohne Seitenstreifen	0,49	0,92
zweistreifig mit Seitenstreifen	0,95	0,95
dreistreifig mit Seitenstreifen	0,99	0,99

Tab. 3-15: Anteile der Störfallkapazität am ursprünglichen Wert [BRILON et al., 2002]

3.8.2 Problematik der Nutzung von Seitenstreifen für den fließenden Verkehr

Die Problematik der Nutzung von Seitenstreifen für den fließenden Verkehr ist in den letzten Jahren aufgrund steigender Kapazitätsengpässe in der Fachwelt zunehmend diskutiert worden [MATTHEIS, 2002, LEMKE et al., 2001]]. Grundsätzlich bewirkt diese Methode der Umnutzung von Fahrbahnflächen keinen Engpass, sondern vielmehr eine Erweiterung der ursprünglich vorhandenen Kapazität. Demgegenüber steht jedoch eine höhere Sensibilität des Verkehrsablaufs hinsichtlich Störungen durch fahrzeugbedingte Nothalte und Unfälle, da die Möglichkeit zur Räumung der Fahrbahn nur an bestimmten Stellen (Nothaltebuchten) besteht. BÄUMER untersucht diesen Aspekt in seiner Arbeit „Einsatzkriterien für Nothaltemöglichkeiten an ein- und zweibahnigen Straßen“ [BÄUMER, 2002]. Er entwickelt darin ein Verfahren zur Bestimmung des Anteils verkehrsbehindernder Nohalte, d.h. derjenigen Fahrzeuge, die auf Straßenabschnitten ohne Seitenstreifen im Fall eines Nohalts nicht mehr eine entsprechende Nothaltemöglichkeit erreichen können:

$$VB = 5,6 + 0,018 \cdot D + 1,97 \cdot s \quad \text{Gl. 3-4}$$

- Mit: VB Anteil verkehrsbehindernder Nohalte an allen Pannen [%]
 D Abstand zwischen den Nothaltebuchten [m]
 s Gradientenneigung (positiv bei Steigung, negativ bei Gefälle) [%]

Die Gesamtpannenraten auf Autobahnen, die BÄUMER in seiner Arbeit ebenfalls untersucht, sind in Tab. 3-16 dargestellt. Die durchschnittliche Blockierdauer beträgt für Pkw 23 Minuten, für Lkw 63 Minuten. Die Restkapazität bei Blockierung eines Fahrstreifens durch ein Fahrzeug entspricht den Werten aus dem HCM 2000 (vgl. Tab. 3-14).

Straßentyp	Pannenrate [$P/10^6 \text{ Fz} \cdot \text{km}$]	
	Pkw	Lkw
außerhalb von Ballungsräumen	4,1	1,6
innerhalb von Ballungsräumen	5,3	2,4

Tab. 3-16: Grundpannenrate auf Autobahnen [BÄUMER, 2002]

3.9 Knotenpunkte

In verschiedenen Untersuchungen [KERNER, 1998; ZACKOR et al., 2001; u.a.] wurde festgestellt, dass für den Verkehrsablauf an Knotenpunkten im Übergang zwischen zwei Streckenabschnitten nicht nur die Kapazität des stromabwärtigen Streckenabschnitts maßgebend ist, sondern ebenfalls die Kapazität des eigentlichen Knotenpunktes. Dazu zählen der Ausfahrbereich, der Verflechtungsbereich sowie der Einfahrbereich. Auf die Problematik des Ausfahr- sowie des Verflechtungsbereichs soll an dieser Stelle nicht vertiefend eingegangen werden, da davon auszugehen ist, dass diese Elemente des Knotenpunkts im Regelfall keine Restriktionen für den Verkehrsablauf darstellen. Maßgebend für die Kapazität ist im

Wesentlichen der Einfahrbereich, in dem sich der Verkehrsstrom der durchgehenden Hauptfahrbahn mit dem der Einfahrt verflechten muss.

HBS 2001

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) wird die Kapazität von Einfahrbereichen¹³ als variabler Wert in Abhängigkeit von den Größen

- Verkehrsstärke auf der durchgehenden Hauptfahrbahn (stromaufwärts der Einfahrt)
- Verkehrsstärke in der Einfahrt
- Anzahl Fahrstreifen auf der Richtungsfahrbahn
- Einfahrttyp

angegeben [FGSV, 2000]. Dabei geht man grundsätzlich davon aus, dass mit steigender Verkehrsstärke in der Einfahrt, d.h. mit steigender Anzahl von Verflechtungsvorgängen, die Kapazität des Einfahrbereiches sinkt (siehe Abb. 3-5).

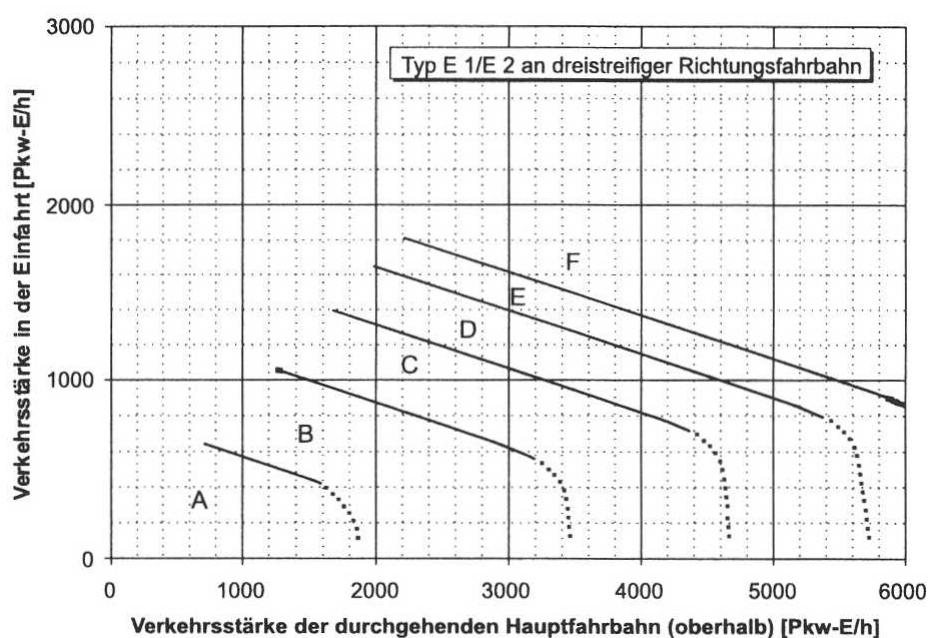


Abb. 3-5: Beispiel für die Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs für den Einfädelungsvorgang an Abhängigkeit von der Verkehrsstärke auf der durchgehenden Hauptfahrbahn und der Verkehrsstärke der Einfahrt für die Einfahrttypen E1 und E2 an dreistreifigen Richtungsfahrbahnen [FGSV, 2001]

¹³ Der Wert der Kapazität wird an dieser Stelle mit der Qualitätsstufe E des HBS gleichgesetzt. Diese Qualitätsstufe ist gekennzeichnet durch einen sehr hohen Auslastungsgrad (die Kapazität wird erreicht), durch geringe oder kurzfristige Zunahmen der Verkehrsstärken kann es zu Staubildung oder auch zum Stillstand des Verkehrs kommen. Oberhalb des betrachteten Bereichs treten Störungen im Verkehrsablauf in der durchgehenden Fahrbahn auf [FGSV, 2001].

Diese Werte sind bislang jedoch noch nicht umfassend durch entsprechende Daten gesichert. Neuere Untersuchungen zu dieser Thematik werden beispielsweise an der Universität Hannover durchgeführt, Ergebnisse waren jedoch bis zum Abschluss dieser Arbeit¹⁴ noch nicht verfügbar. Die Kapazität des stromabwärtigen, freien Streckenabschnittes (vgl. Abschnitt 3.2) gilt als zusätzlicher Grenzwert.

HCM 2000

Auch im Highway Capacity Manual [TRB, 2000] wird der Einfluss von Knotenpunkten auf den Verkehrsablauf behandelt. Für den Einfahrbereich eines Knotenpunktes definiert das HCM ähnlich wie das HBS zwei maßgebende Kapazitäten, die Kapazität des stromabwärtigen freien Streckenabschnitts (vgl. Abschnitt 3.2) sowie die Kapazität des Einfahrbereiches.

Der Einfahrbereich beinhaltet lediglich den Haupt- und den ersten Überholfahrstreifen (auf der Länge des Beschleunigungsstreifens), so dass für den Nachweis der Verkehrsqualität zuerst die maßgebende Verkehrsstärke auf diesen zwei Fahrstreifen v_{R12} zu ermitteln ist. Diese setzt sich aus der Einfahrverkehrsstärke v_R sowie der auf den zwei Fahrstreifen zufließenden Verkehrsstärke v_{12} zusammen. Bei mehr als zwei Fahrstreifen auf der durchgehenden Hauptfahrbahn enthält das HCM die entsprechenden Gleichungen für die Schätzung der Verkehrsstärke v_{12} . Die Kapazität des Einfahrbereichs beträgt unabhängig von der Stärke des einfahrenden Stromes 4600 Pkw-E/h.

Auch für den speziellen Anwendungsfall von Arbeitsstellen (kürzerer Dauer) bietet das HCM ein einfaches Verfahren zur Berücksichtigung von Rampenverkehrsstärken an. Das in Abschnitt 3.5.2 bereits beschriebene Verfahren (Gleichung 3-1) enthält den Betrag R [Pkw-E/h], der diejenige Verkehrsstärke bezeichnet, die an einem Knotenpunkt direkt in den Arbeitsstellenbereich einfährt. Gemeint ist dabei der Bereich vom Beginn der Fahrstreifeneinengung bis 150 m stromabwärts der vollständigen Fahrstreifensperrung. Der Betrag R kann bis zu einer Höhe von maximal der Hälfte der Kapazität eines Fahrstreifens im Arbeitsstellenbereich angesetzt werden.

3.10 Fazit

Wie bereits eingangs beschrieben, liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Behandlung von Engpasssituationen aufgrund von Arbeitsstellen auf Autobahnen. Dennoch kann dieser Komplex nicht losgelöst von anderen Randbedingungen behandelt werden. Dazu zählen zum Beispiel der Einfluss der Gradientenneigung, die Berücksichtigung von Unfällen und Nothalten und die Besonderheiten des Verkehrsablaufs an Autobahnknotenpunkten. Jeder dieser Faktoren stellt für sich genommen bereits einen verkehrlichen Engpass dar, in

¹⁴ Stand Januar 2003

Kombination mit der veränderten Verkehrsführung in Arbeitsstellen verstärkt sich dieser Effekt.

Zur quantitativen Bewertung vieler dieser Einflüsse existieren verschiedene Ansätze, die mehr oder weniger empirisch gesichert sind. Weitere Faktoren, die in Abschnitt 3.3 ebenfalls aufgeführt sind, vor allem fahrer- und fahrzeugspezifische Randbedingungen, sind aufgrund der Schwierigkeiten bei der Erfassung dieser Kriterien weniger erforscht worden.

Von besonderer Bedeutung für die Problematik der Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer sind die Untersuchungen von RESSEL [RESSEL, 1996] und STÖCKERT [STÖCKERT, 2001] sowie die Verfahren zur Schätzung der Kapazität, die in den Richtlinien für die Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP 96) [BMV, 1996] und im Highway Capacity Manual (HCM) [TRB, 2000] vorgeschlagen werden. Weitere Einflussgrößen, wie z.B. die Verflechtungsvorgänge im Bereich von Knotenpunkten, werden im deutschen Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV, 2001] behandelt.

Mit Hilfe von zusätzlichen Erhebungen und Auswertungen von automatisch erfassten Verkehrsdaten sollen die in diesem Kapitel untersuchten Ansätze an späterer Stelle überprüft werden. Zielsetzung ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Kapazität eines Arbeitsstellenengpasses, dass in der Lage ist, alle relevanten Randbedingungen, d.h. sowohl den primären Einfluss der Verkehrsführung im Baustellenbereich (Fahrstreifenanzahl und -breite, Überleitung auf die Gegenfahrbahn) als auch die Zusammensetzung des Fahrerkollektivs (Ortskundigkeit), die Umfeldbedingungen und den Einfluss des Schwerverkehrsanteils in Verbindung mit der Längsneigung im Baustellenbereich zu berücksichtigen.

4. Modelle zur Nachbildung der Stauentwicklung

4.1 Vorbemerkung

Stauungen im Straßenverkehr sind Störungen im Verkehrsablauf, die in der Regel dann auftreten, wenn die Verkehrsbelastung (Zufluss) die Kapazität einer Verkehrsanlage überschreitet. Eine quantitative Festsetzung von allgemeingültigen Staukriterien - maximale Verkehrs-dichte, maximale Verkehrsstärke oder minimale Geschwindigkeit - gestaltet sich als ausgesprochen schwierig. Der Arbeitskreis „Pulk- und Staubildung“ der FGSV empfahl daher 1980 aus verkehrstechnischer Sicht eine qualitative Definition des Verkehrsstaus auf Richtungs-fahrbahnen und unterschied drei Stufen [BREITENSTEIN et al., 1980]:

- Von Stau im engeren Sinne wird gesprochen, wenn in einem Verkehrsstrom mehrere Fahrzeuge hintereinander verkehrsbedingt zum Halt kommen.
- Unter Einbeziehung der Zeit-Weg-Ebene ergibt sich ein Stau im weiteren Sinne, wenn die mittlere Geschwindigkeit im gestauten Streckenabschnitt unter 30 km/h fällt.
- Der Stau im weitesten Sinne definiert den instabilen Verkehrsfluss, bei dem sich Stop-and-Go-Verkehr einstellt und die mittlere Geschwindigkeit infolge der hohen Verkehrs-dichte deutlich unter derjenigen Geschwindigkeit liegt, bei der die größtmögliche Verkehrsstärke Q_{\max} abgeführt werden kann.

Daraus abgeleitet und bezogen auf den Verkehrsablauf an Autobahnbaustellen definiert RESSEL den Begriff „Verkehrsstau“ als: „...Verkehrssituation, in der - aufgrund des eingeengten Fahrbahnquerschnittes - die reduzierte Leistungsfähigkeit des Baustellenengpasses ge-ringer als die gegenwärtig nachgefragte Verkehrsmenge ist und dadurch die Gesamtheit der Fahrzeuge im Annäherungsbereich der Baustelle und über einen längeren Zeitraum in ihrer freien Geschwindigkeitswahl derart beeinträchtigt wird, dass mehrere Fahrzeuge hintereinander wiederholt anhalten müssen.“ [RESSEL, 1994]. Allgemeiner betrachtet, kann diese letzte Definition durch folgende Merkmale erweitert werden:

- Der Verkehrsfluss befindet sich im instabilen Bereich (siehe Fundamentaldiagramm).
- Das Geschwindigkeitsniveau ist niedrig (zum Teil Stop-and-Go-Verkehr), was zu einer Erhöhung der Reisezeiten führt.
- Es treten starke Schwankungen der Geschwindigkeitsdifferenzen auf (inhomogenes Ge-schwindigkeitsverhalten).
- Es ist ein hohes Maß an Brems- und Beschleunigungsvorgängen feststellbar.
- Singuläre Störungen werden im Gegensatz zum stabilen Verkehrsablauf nicht gedämpft, sondern verstärkt und führen zu lokalen Zusammenbrüchen des Verkehrsablaufs.
- Gegenüber dem stabilen Bereich ist die Kapazität reduziert.

RESSEL zerlegt den schematischen Geschwindigkeitsverlauf im Bereich von Arbeitsstellen¹⁵ bei Staubildung in folgende Bereiche (siehe auch Abb. 4-1):

- Zeitbereich 1 beschreibt die *freie Strecke*, auf der sich ein stationärer Verkehrsfluss mit einer mittleren Geschwindigkeit einstellt.
- Zeitbereich 2 definiert die *Staustrecke*, die in Abhängigkeit von der Differenz aus zufließender und durch den Engpass abfließender Verkehrsstärke sowie in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte im Stau über eine variable Abschnittslänge verfügt.
- Zeitbereich 3 steht für die eigentliche *Baustrecke* mit gebundenem Verkehrsfluss und einer konstanten Geschwindigkeit, die der zulässigen Höchstgeschwindigkeit innerhalb des Engpasses entspricht.
- Zeitbereich 4 beschreibt die *freie Strecke* stromabwärts mit der mittleren Wunschgeschwindigkeit bzw. der der Verkehrsstärke entsprechenden Geschwindigkeit.

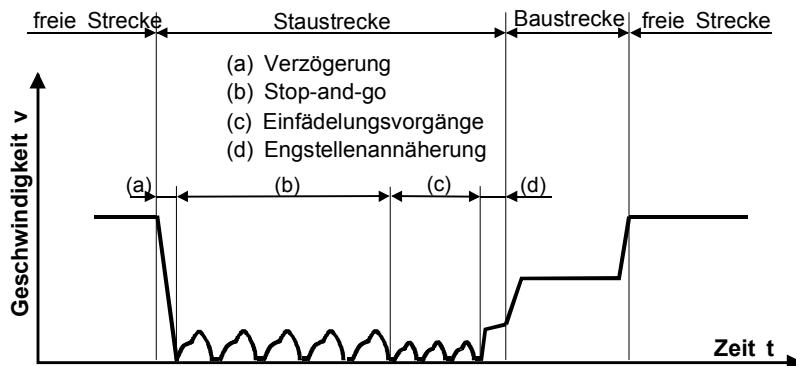


Abb. 4-1: Zeitbereiche eines Verkehrsstaus an einer Autobahnbaustelle [nach RESSEL, 1994]

Zur Beschreibung des Verkehrsablaufs auf Straßen sind in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Modelle entwickelt worden. Man unterscheidet dabei grundsätzlich zwischen den mikroskopischen und den makroskopischen Modellen. Mesoskopische Modelle als Mischform der beiden erstgenannten seien der Vollständigkeit halber an dieser Stelle ebenfalls genannt, werden jedoch im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Mikroskopische Modelle

Die mikroskopischen Modelle beschreiben das Fahrverhalten eines Einzelfahrzeuges im Fahrzeugstrom unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit anderen Fahrzeugen. Der Ansatz der Modelle beruht auf der Tatsache, dass der Kraftfahrer sein Verhalten von dem Verhalten des ihm unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeugs abhängig macht, indem er durch

¹⁵ Die vorliegende Einteilung kann ebenso auf Engpasssituationen durch dauerhafte Fahrstreifenreduktionen sowie Steigungsstrecken übertragen werden.

Brems- und Beschleunigungsvorgänge zu jedem Zeitpunkt einen notwendigen Sicherheitsabstand einzuhalten versucht. Die Beschleunigung ist dabei näherungsweise proportional zur Geschwindigkeitsdifferenz und umgekehrt proportional zum Abstand zu dem vorausfahrenden Fahrzeug.

Zu den mikroskopischen Modellen zählen sowohl die klassischen Fahrzeugfolgmodelle [z.B. GAZIS et al., 1961] als auch deren Erweiterung, die psycho-physischen Abstandsmodelle, die davon ausgehen, dass der Fahrer Geschwindigkeitsdifferenzen in Abhängigkeit vom Abstand erst ab gewissen Schwellenwerten wahrnehmen kann [MICHAELS, 1963; TODOSIEV, 1963; WIEDEMANN, 1974]. Aber auch neuere Ansätze, wie z.B. Fuzzy-Logic-basierte Fahrzeugfolgmodelle [REKERSBRINK, 1994] sowie die mikroskopische Verkehrssimulation mit Zellulärautomaten [SCHRECKENBERG et al., 1998] zählen zu dieser Gruppe.

Mikroskopische Verkehrsablaufmodelle bieten aufgrund der vielfältigen Parameter und der damit vorhandenen Eichungsmöglichkeiten sehr gute Voraussetzungen für die Anpassung an spezielle Randbedingungen auf einem Streckenabschnitt. In Anbetracht der gegebenen Aufgabenstellung, nämlich der Prognose von Verkehrszuständen an Autobahnengpässen vor dem hauptsächlichen Hintergrund der Planung und Bewertung von Maßnahmen, erscheinen die Modelle auf Grund ihres hohen Detaillierungsgrades jedoch nicht angemessen. Allein die Qualität der Prognose der Verkehrsnachfrage - insbesondere bei einem Prognosehorizont, der den Einbezug aktueller Verkehrsdaten nicht mehr zulässt (vgl. Kapitel 2) - lässt die Modellierung des Verkehrsablaufs auf Fahrzeugebene fragwürdig erscheinen. Eine geeignete Einsatzmöglichkeit wäre hier im Rahmen der Verkehrsbeeinflussung zu sehen, so dass die systemspezifischen Vorteile dieser Modelle - vor allem ihre hohe Flexibilität - voll zur Geltung kämen.

Makroskopische Modelle

Im Gegensatz zu den mikroskopischen Modellen bilden makroskopische Modelle den Verkehrsablauf nicht auf fahrzeugfeiner Ebene, sondern mit Hilfe von kollektiven Variablen (Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Geschwindigkeit) ab, die für einen bestimmten Verkehrszustand das mittlere Verhalten der gesamten Fahrzeuggruppe beschreiben. Unter dem Oberbegriff der makroskopischen Modelle werden zahlreiche unterschiedliche Ansätze zusammengefasst, von denen einige im Folgenden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die gegebene Aufgabenstellung bewertet werden sollen.

4.2 Stochastische Warteschlangenmodelle

Grundlagen der stochastischen Warteschlangentheorie

Wartesysteme werden in der Warteschlangentheorie in die Komponenten Ankunftsprozess, Warteschlange und Bedienungs- (Service-, Abfluss-)System zerlegt. Der *Ankunftsprozess* charakterisiert modellmäßig die Anzahl und die statistische Verteilung der Fahrzeugankünfte.

Die *Warteschlange* ist definiert als Anzahl der Fahrzeuge, die auf Bedienung warten (hier: Einfahrt in den Engpass). Das *Bedienungssystem* wird charakterisiert durch die Anzahl der Bedienungsstellen und deren Struktur (Parallel- bzw. Reihenschaltung). Die Bedienungsstellen sind gekennzeichnet durch die Aufenthaltszeit der Fahrzeuge im Bedienungssystem, die sogenannte Servicezeit, und deren Wahrscheinlichkeitsverteilung. Als Ergebnis einer Warteschlangenberechnung nach diesem Prinzip erhält man sowohl Wartezeiten der einzelnen Fahrzeuge als auch die Anzahl der wartenden Fahrzeuge in der Schlange. Um einen Aussage über die jeweiligen Rückstaulängen zu erhalten, muss die Anzahl der wartenden Fahrzeuge durch die Verkehrsdichte dividiert werden. Der Wert der Verkehrsdichte muss unabhängig von der Warteschlangenberechnung geschätzt oder aus empirischen Untersuchungen übernommen werden.

Nach dem Klassifikationsschema von KENDALL werden die Warteschlangensysteme allgemein in der Form $A/B/m$ gekennzeichnet. Dabei definiert A die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Fahrzeugankünfte und B die der Bedienungszeiten; m ist die Anzahl der parallelgeschalteten Servicestellen. Dabei wird uneingeschränkter Warteraum und FIFO (first in first out) - Auswahl unterstellt [KELLER, 1987].

Modell nach RESSEL

Ein stochastisches Warteschlangenmodell zur Modellierung der Staumentwicklung wird beispielsweise von RESSEL in seiner Untersuchung zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit von Autobahnbaustellen angewendet [RESSEL, 1994]. Dabei wird der Ankunftsprozess durch eine Zeitlückenfunktion beschrieben, die an empirisch ermittelten Zeitlückenverteilungen über eine Parameterschätzung geeicht wurde. Die Bruttozeitlückenwerte t_B sind nach der Beta-Funktion $F(y)$ verteilt:

$$F(y) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \cdot \Gamma(\beta)} \cdot \int_0^y t^{\alpha-1} \cdot (1-t)^{\beta-1} dt \quad \text{mit} \quad y = \frac{(t - t_{B,u})}{(t_{B,o} - t_{B,u})} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Mit: α, β Parameter der Betaverteilung

t Zeit [s]

$t_{B,o}, t_{B,u}$ größte und kleinste Bruttozeitlücke [s]

Die ankommenen Fahrzeuge werden auf die Fahrstreifen, die in der Baustelle erhalten bleiben, aufgeteilt und anschließend in die Warteschlange eingereiht, wobei der zur Verfügung stehende Stauraum theoretisch unendlich lang ist. An den Bedienstationen, die die Schnittstelle zwischen freier Strecke und Baustellenengpass bilden, werden die wartenden Fahrzeuge nach der natürlichen Auswahlordnung „first in first out“ (FIFO) abgefertigt und auf die Baustrecke entlassen.

Auf der Grundlage dieses Modells entwickelte RESSEL ein Simulationsprogramm, mit dem die Einfahrtszeiten in den Stau sowie die Ausfahrtszeiten der gleichen Fahrzeuge aus dem Stau berechnet und in Form eines Fahrplans in einer Zeitliste abgespeichert werden. Mit

Hilfe des Eintritts- und Austrittszeitpunktes jedes Fahrzeugs können anschließend die Anzahl der Fahrzeuge in der Warteschlange und die Wartezeiten berechnet werden. Die Rückstaulängen werden durch die Multiplikation der Anzahl der Fahrzeuge im Stau zu einem bestimmten Zeitpunkt mit der Verkehrsdichte berechnet. Der Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte, Verkehrsleitung im Baustellenbereich und Güterverkehrsanteil wurde dazu von RESSEL in verschiedenen Messungen untersucht (siehe Abb. 4-2).

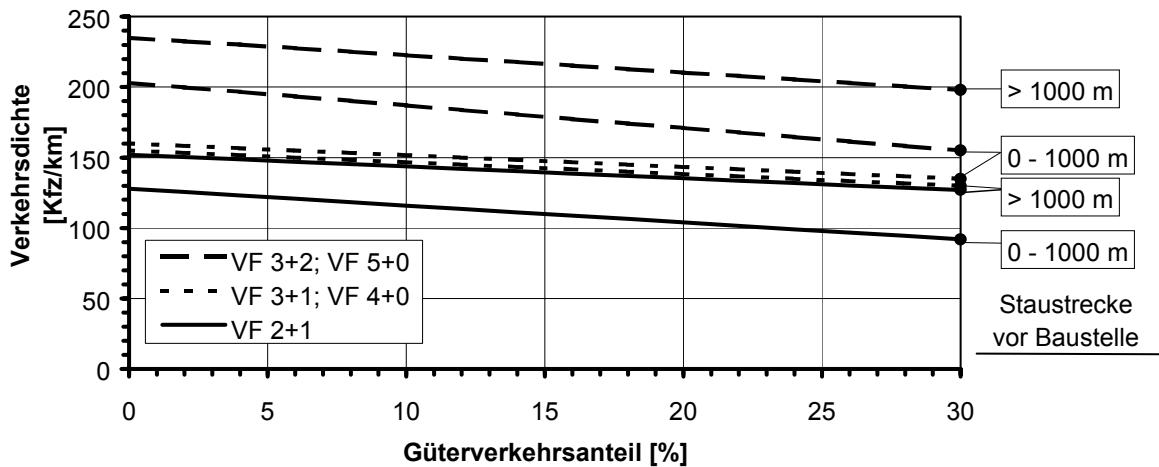


Abb. 4-2: Mittlere Verkehrsdichte im Stau in Abhängigkeit vom Güterverkehrsanteil (Angaben beziehen sich auf die gesamte Richtungsfahrbahn im Vorfeld der Arbeitstelle) [RESSEL, 1994]

Bewertung

Stochastische Warteschlangenmodelle bieten den Vorteil, dass bei ansonsten relativ einfachen Modellvoraussetzungen das stochastische Verhalten der Verkehrsnachfrage und der Kapazität gut abgebildet werden kann. Wie jedoch bereits einleitend bei den mikroskopischen Modellen angemerkt, ist das Hauptaugenmerk dieser Untersuchung auf die Planung und Bewertung von Maßnahmen an Engpässen ausgerichtet, d.h. das Ergebnis einer durchgeführten Stauprognose für bestimmte Randbedingungen soll ein aussagekräftiger und stabiler Wert sein. Diese Stabilität wird bei einem stochastischen Modell, wie es beispielsweise von RESSEL angewendet wurde, nur durch die Durchführung mehrerer Simulationsläufe erreicht. Das Modell erscheint daher nur bedingt für einen Einsatz bei der vorliegenden Problemstellung geeignet.

4.3 Deterministisches Warteschlangenmodell

Modellbeschreibung

Im Gegensatz zu den stochastischen Warteschlangenmodellen werden bei den deterministischen Warteschlangenmodellen konstante Verkehrszustände für definierte Zeiträume ange-

nommen, so dass wegen der Vernachlässigung des stochastischen Charakters des Verkehrsablaufs Stauungen erst auftreten, wenn die Zuflussrate $q(t)$ [Fz/Zeit] größer als die Servicerate $s(t)$ (Kapazität eines Streckenabschnittes) ist. Durch die zeitliche und räumliche Diskretisierung des gestauten Verkehrsablaufs lässt sich die Staumentwicklung in einem einfachen mathematischen Modell abbilden. Um die Grundlagen der Berechnung zu veranschaulichen, beziehen sich die folgenden Darstellungen und Berechnungen vereinfachend auf volle Stundenintervalle. In Abb. 4-3 sind dazu beispielhaft die deterministischen Annahmen eines stündlichen Zuflusses und Abflusses (Kapazität des Engpasses) als Summenlinien aufgetragen. Grundsätzlich kann dieses Modell jedoch auch auf jedes andere Bezugszeitintervall angewendet werden.

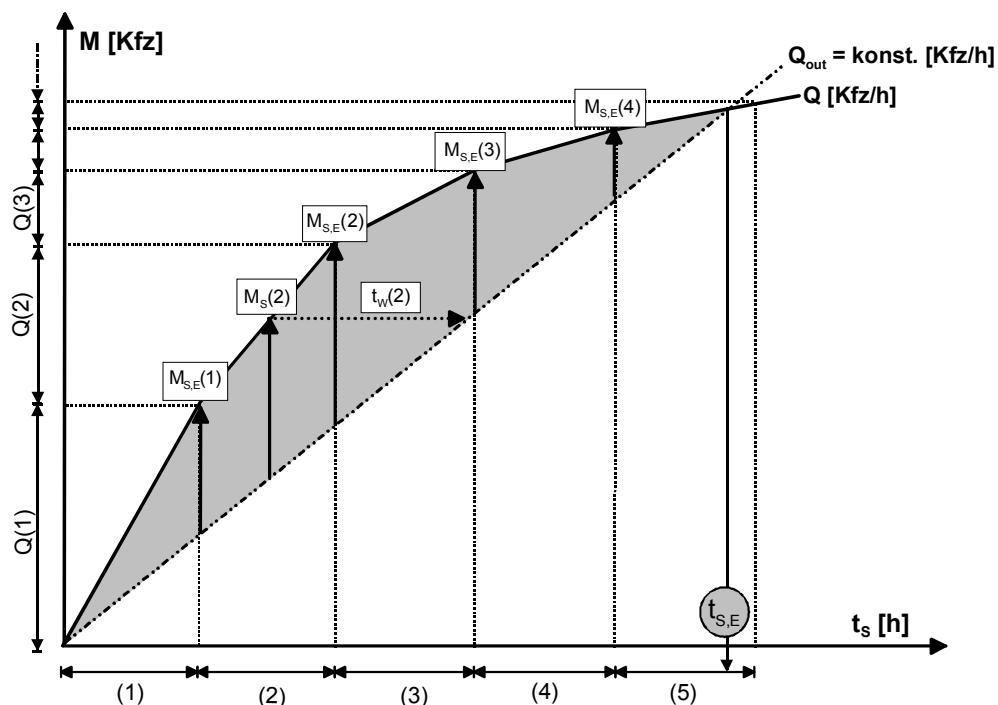


Abb. 4-3: Deterministisches Wartemodell zur Bestimmung von Rückstaulängen

Die Warteschlange am Ende einer Stunde $M_{S,E}(T_S)$ berechnet sich zunächst zu:

$$M_{S,E}(T_S) = M_{S,E}(T_{S-1}) + (q(T_S) - C_B) = \sum_{S=1}^n (q(T_S) - C_B) \quad \text{Gl. 4-2}$$

- Mit: $M_{S,E}$ Warteschlange am Ende einer Stunde [Kfz]
 q nachgefragte Verkehrsstärke [Kfz/h]
 C_B Verkehrsstärke im Abfluss (Kapazität des Engpasses) [Kfz/h]
 T_S, T_{S-1} (volle) Staustunde

Dementsprechend ergibt sich die mittlere Warteschlange \bar{M}_S einer Stunde zu:

$$\bar{M}_S(T_S) = M_{S,E}(T_{S-1}) + \frac{1}{2}(q(T_S) - C_B) \quad \text{Gl. 4-3}$$

Diese Gleichung gilt für den Fall, dass der Stau während der gesamten Staustunde auftritt. Wird der Stau innerhalb der Stunde aufgelöst, berechnet sich die mittlere Warteschlange folgendermaßen:

$$\bar{M}_S(T_{S,E}) = M_{S,E}(T_{S,E-1}) \cdot \frac{t_{S,E}}{2} = \frac{M_{S,E}(T_{S,E-1})^2}{|q(T_{S,E}) - C_B| \cdot 2} \quad \text{Gl. 4-4}$$

- Mit: \bar{M}_S mittlere Warteschlange der Kraftfahrzeuge [Kfz]
 $T_{S,E}$ Stunde, in der der Stau aufgelöst wird
 $t_{S,E}$ Zeitpunkt des Stauendes

Basierend auf der mittleren Anzahl der vor dem Engpass wartenden Fahrzeuge kann nun die Wartezeit am Ende einer Staustunde und die mittlere Wartezeit pro Fahrzeug für die jeweilige Staustunde berechnet werden:

$$t_w(T_S) = \frac{M_{S,E}(T_S)}{C_B} \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$\bar{t}_w(T_S) = \frac{\bar{M}_S(T_S)}{C_B} \quad \text{Gl. 4-6}$$

- Mit: t_w Wartezeit pro Fahrzeug am Ende einer Staustunde
 \bar{t}_w mittlere Wartezeit pro Fahrzeug

Weiterhin ergibt sich die Gesamtwartezeit aller vom Stau betroffenen Fahrzeuge aus der Summe der mittleren Warteschlangen über die gesamte Staudauer zu:

$$T_w = \sum_{\Sigma t_S} \bar{M}_S = \sum_{\Sigma t_S} (\bar{t}_w \cdot q) \quad \text{Gl. 4-7}$$

- Mit: T_w Gesamtwartezeit aller Kraftfahrzeuge im Stau [Kfz-h]
 Σt_S Staudauer [h]

Um weiterhin Aussagen über die wegbezogenen mittleren und maximalen Rückstaulängen in den jeweiligen Staustunden treffen zu können, werden die Fahrzeugschlangen je Stunde durch der Verkehrsdichte im Stau dividiert. Die Verkehrsdichte im Stau ist eine Größe, die sich nicht aus dem hier beschriebenen Verfahren ableiten lässt, so dass daher Erfahrungswerte herangezogen werden müssen (siehe z.B. Abb. 4-2).

$$\bar{L}_S(T_S) = \frac{\bar{M}_S(T_S)}{k} \quad \text{Gl. 4-8}$$

$$\bar{L}_{max}(T_S) = \frac{M_{S,A}(T_{S+1})}{k} \quad \text{Gl. 4-9}$$

Mit:	\bar{L}_s	mittlere Rückstaulänge	[km]
	L_{\max}	maximale Rückstaulänge	[km]
	k	Verkehrsdichte im Stau	[Kfz/km]

Bewertung

Das deterministische Warteschlangenmodell erweist sich im Hinblick auf eine praktische Anwendung als sehr einfach und übersichtlich [RESSEL, 1994]. Mittels weniger Rechenschritte kann das Ausmaß einer Überlastung an einem Engpass in Form von Zeitverlusten geschätzt werden. Verwendet man als zusätzlichen Parameter die Verkehrsdichte im Stau, können indirekt auch Rückschlüsse auf die Staulänge gezogen werden. Insgesamt erscheint das Modell für eine Anwendung im vorliegenden Kontext gut geeignet.

4.4 Fundamentaldiagramm und Theorie der Dichtestoßwellen

Grundlagen

Bei diesen makroskopischen Modellen wird der Verkehrsablauf mit Hilfe der kollektiven Variablen Verkehrsstärke q , Verkehrsdichte k und mittlere momentane Geschwindigkeit v abgebildet. Der Zusammenhang zwischen diesen Größen wird im Allgemeinen im *Fundamentaldiagramm* (siehe Abb. 4-4) dargestellt. Dabei gilt die *Zustandsgleichung*:

$$q = v \cdot k \quad \text{Gl. 4-10}$$

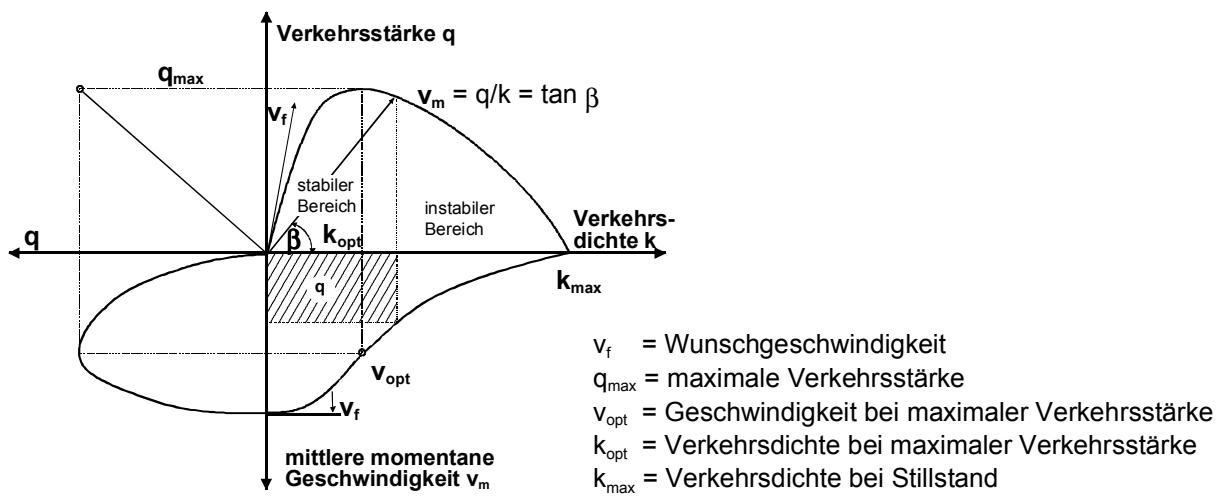


Abb. 4-4: Klassisches Fundamentaldiagramm

Jeder Punkt im Fundamentaldiagramm repräsentiert einen bestimmten Verkehrszustand auf einem Streckenabschnitt. Bei freier Wahl von k und v wären alle Verkehrszustände möglich. Es besteht jedoch (wie bereits bei den mikroskopischen Modellen festgestellt) eine sto-

chastische Abhängigkeit zwischen Verkehrsdichte und Geschwindigkeit $v=v(k)$. Modellansätze, die die Abhängigkeit zwischen Verkehrsdichte und Geschwindigkeit beschreiben, müssen gewisse Randbedingungen einhalten:

- $q = 0$ für $k = 0$
- $v = v_f$ für $k \rightarrow 0$

Die zugehörige Geschwindigkeit bei einer gegen Null tendierenden Dichte entspricht der Wunschgeschwindigkeit. Eine Ausnahme bildet der Fall einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf dem betrachteten Streckenabschnitt. In diesem Fall richtet sich die Geschwindigkeit auch bei niedrigen Dichten im Grundsatz nach der vorgeschriebenen Geschwindigkeit, wobei die Befolgung sowohl von der Einstellung der Verkehrsteilnehmer als auch vom Ausmaß der Überwachung abhängt.

- $q = 0$ für $k = k_{\max}$

Bei Erreichen der maximalen Verkehrsdichte kommt der Verkehr zum Erliegen.

- $v = 0$ für $k = k_{\max}$

In der Literatur sind zahlreiche Untersuchungen zur Bestimmung der Zusammenhänge $v=v(k)$ angeführt. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Bestimmung von k_{\max} sowie der Verkehrsparameter im Übergangsbereich vom stabilen zum instabilen Bereich zu.

Der einfachste Ansatz geht von einem linearen Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte und der Geschwindigkeit aus [GREENSHIELDS, 1935]. Das q - v -Diagramm nimmt dabei eine parabolische Form an. Differenzierte Modelle unterscheiden, abgeleitet aus empirischen Untersuchungen, nach Dichtebereichen (Zweibereichsmodelle) und werden somit dem tatsächlichen Verkehrsablauf gerechter (z.B. [WU, 2000; PONZLET, 1996; ZACKOR et al., 1980; MAY et al., 1968]). Bei diesen Ansätzen weist die Modelfunktion im k - v -Diagramm beim Übergang vom stabilen in den instabilen Bereich einen Knick oder einen Sprung auf. Einen anderen Ansatz wählt z.B. VAN AERDE, der den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Geschwindigkeit durch eine einteilige Funktion darstellt, die im Gegensatz zu GREENSHIELDS nicht linear sondern in einer inversen S-Form verläuft und damit auch den Bereich hoher Verkehrsdichten gut abbildet [VAN AERDE, 1995].

Trotz unterschiedlicher mathematischer Ansätze besitzen alle erwähnten Modelle eine gemeinsame Eigenschaft: Sie stellen den Verkehrsablauf auf einem in sich homogenen Streckenabschnitt dar. Bezogen auf die vorliegende Problematik der Stauprognose an Engpässen bedeutet dies, dass die resultierenden Fundamentaldiagramme entweder die Charakteristik des Streckenabschnitts vor dem Engpass oder innerhalb des Engpasses repräsentieren.

Theorie der Dichtestoßwellen nach LIGHTHILL/WITHAM

Tritt innerhalb eines Streckenabschnittes ein Stau auf, kann man nicht mehr von einem statioren Verkehrsfluss ausgehen. LIGHTHILL und WITHAM übertrugen dazu die Kontinuumstheorie (Betrachtung der Bewegungen als kontinuierliches Fließgeschehen) auf den

Verkehrsfluss und entwickelten die Kontinuitätsgleichung des Verkehrs [Lighthill et al., 1955]. Sie entspricht der aus der Physik bekannten allgemeinen Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial k(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad \text{Gl. 4-11}$$

Durch die Verbindung der Kontinuitätsgleichung mit dem spezifischen Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte $q = q(k)$ ergibt sich ein Modell, mit dem Veränderungen der (als Mittelwerte behandelten) Größen q und k in der Raum-Zeit-Dimension analysiert werden können. Insbesondere die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Störungen im Verkehrsfluss sind Gegenstand dieser Theorie. Es lassen sich damit Konturlinien oder - nach Lighthill/Witham - kinematische Wellen von Übergängen zwischen zwei Dichtebereichen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit c berechnen. Der Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit v und Wellengeschwindigkeit c lautet:

$$c = v + k \frac{dv}{dk} \quad \text{Gl. 4-12}$$

Da die Fahrzeuggeschwindigkeit mit zunehmender Dichte abnimmt, gilt grundsätzlich $c < v$. Das bedeutet, dass die Wellen relativ zum Fahrzeugstrom stromaufwärts wandern. Wird $q > q_{\max}$, wird c negativ und die Wellen breiten sich auch in Bezug auf einen festen Querschnitt stromaufwärts aus. Läuft eine Welle geringer Dichte und daraus folgend hoher Geschwindigkeit auf eine Welle mit hoher Dichte und niedrigerer Geschwindigkeit auf, ergeben sich an deren Schnittpunkt Diskontinuitäten. Nach der Kontinuumstheorie wandern diese mit der Geschwindigkeit u im Fahrzeugstrom mit. Kennzeichnen q_1 und k_1 den Zustand vor der Stoßwelle und q_2 und k_2 die Situation dahinter, so ist $q_1 \cdot u \cdot k_1$ die Rate der herausfahrenden Fahrzeuge und $q_2 \cdot u \cdot k_2$ die Ankunftsrate an der Stoßwelle. Die Stoßwellengeschwindigkeit ergibt sich dann zu:

$$u = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \quad \text{Gl. 4-13}$$

Übertragen auf das Fundamentaldiagramm entspricht dies einer Sekante an der q - k -Kurve mit der Neigung u .

Modellierung der Stauentwicklung an einem Engpass nach ZACKOR

Der Zusammenhang nach Gleichung 4-13 liegt auch einem von ZACKOR entwickelten Modell zur Nachbildung der Stauentwicklung an einem Engpass zu Grunde [ZACKOR, 1976] (siehe Abb. 4-5). Grundsätzlich ist wegen des stochastischen Charakters des Verkehrsflusses jeder Zustand des stabilen Verkehrsflusses mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit für einen Übergang in den instabilen Bereich behaftet. Diese Stauanfälligkeit nimmt mit steigender Dichte zu. In dem hier beschriebenen Ansatz wird jedoch vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Staubildung erst eintritt, wenn die mittlere zufließende Verkehrsstärke die Kapazi-

tät eines Streckenabschnittes überschreitet - es handelt sich somit um eine deterministische Betrachtungsweise.

Der Zustand Stau ist im Modell dadurch gekennzeichnet, dass die Kapazität des Engpasses zwar geringer als die des stromaufwärts liegenden Streckenabschnittes ist, aber in jedem Fall voll ausgenutzt wird. Die Verkehrsstärke im Stau entspricht somit der reduzierten Kapazität des Engpasses. Innerhalb des Staus herrscht ein instabiler Verkehrsfluss, gekennzeichnet durch kurzfristige Schwankungen zwischen stehender Kolonne und Stauauflösung. Im Mittel ist dieser Stau durch eine hohe Verkehrsdichte k_{Stau} und eine geringe Geschwindigkeit v_{Stau} charakterisiert, wobei Streuungen dieser beiden Größen vernachlässigt werden. Dies führt dazu, dass der Zustand Stau in diesem Modell als einzelner Punkt im Fundamentaldiagramm abgebildet wird (siehe Abb. 4-5).

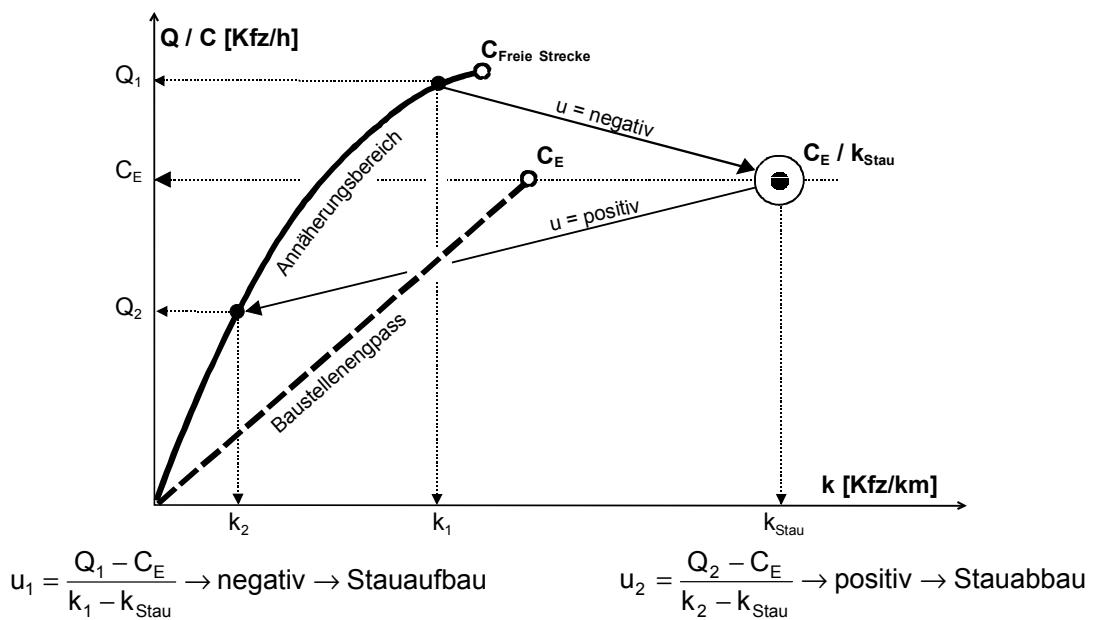


Abb. 4-5: Stoßwellengeschwindigkeit zwischen benachbarten Verkehrszuständen im Fundamentaldiagramm [nach ZACKOR, 1976]

Um also den Verkehrsablauf und damit auch die Staumbildung an einem Engpass nachbilden zu können, ist das makroskopische Modell in zwei Teilbereiche aufzuteilen:

Der erste (stabile) Bereich beschreibt den Verkehrsablauf auf dem dem Engpass bzw. - bei vorhandenem Stau - dem Stauende vorgelagerten Streckenabschnitt mit:

- v_f Wunschgeschwindigkeit (Geschwindigkeit bei Verkehrsstärke gegen Null)
- C_F Kapazität des freien Streckenabschnittes
- v_{opt} Geschwindigkeit bei maximaler Verkehrsstärke

Zur Modellierung dieses stabilen Teilbereichs können verschiedene mathematische Modelle herangezogen werden. In Abb. 4-6 sind beispielhaft verschiedene Ansätze für die Modellierung zweistreifiger Richtungsfahrbahnen mit und ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen

dargestellt. Die Kurven aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) basieren dabei auf einer von BRILON und PONZLET entwickelten Funktion [BRILON et al., 1995]:

$$v(q) = \frac{v_0}{1 + \frac{v_0}{L_0 \cdot (C_0 - q)}} \quad \text{Gl. 4-14}$$

Mit: $v(q)$ Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke [km/h]

q Verkehrsstärke [Kfz/h]

v_0, L_0, C_0 Modellparameter (siehe HBS 2001) [FGSV, 2001]

Beim Vergleich der Kurvenverläufe zeigt sich deutlich, dass der einfache Modellansatz eines linearen k-v-Zusammenhangs für den stabilen Bereich des Verkehrsablaufs annähernd die selben Ergebnisse liefert wie die Funktion aus dem HBS 2001.

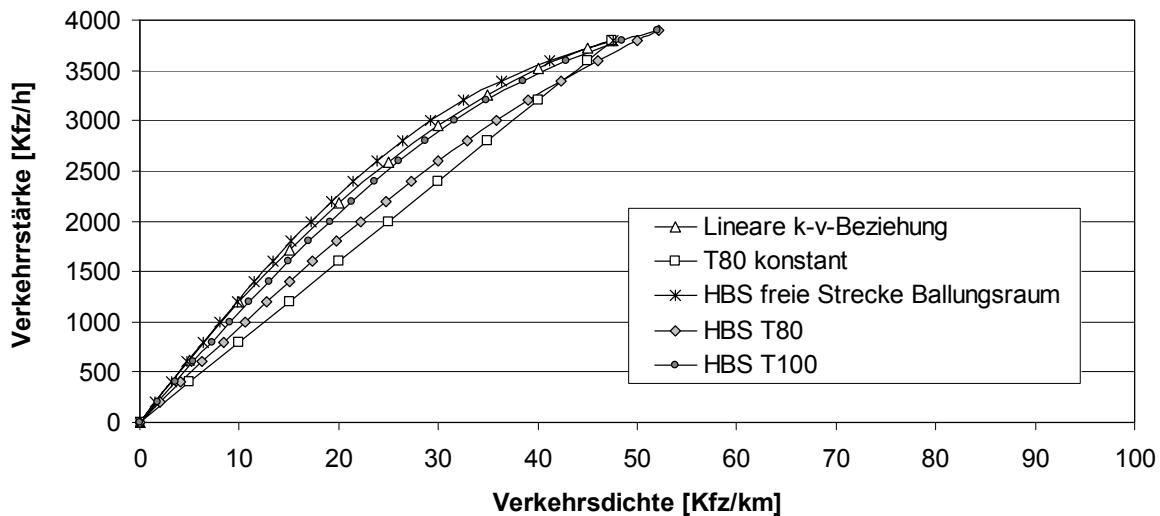


Abb. 4-6: Vergleich verschiedener makroskopischer Modellansätze für eine zweistufige Richtungsfahrbahn im stabilen Bereich ($k \leq k_{\text{opt}}$) mit und ohne Geschwindigkeitsbegrenzung

Die Übereinstimmung betrifft dabei nicht nur den Fall der freien Strecke ohne Tempolimit, sondern ebenfalls den Kurvenverlauf bei einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h. Abweichungen ergeben sich bei den Funktionen mit einem Tempolimit von 80 km/h, wobei der Ansatz einer konstanten (von der Verkehrsdichte unabhängigen) Geschwindigkeit die deutlichste Differenz aufweist.

Der zweite (instabile) Bereich des Fundamentaldiagramms beschreibt den Verkehrsablauf bei Stau vor dem Engpass mit:

C_E Kapazität des Engpasses

k_{Stau} durchschnittliche Dichte im Stau vor dem Engpass

v_{Stau} durchschnittliche Geschwindigkeit im Stau

Die Kenngrößen, die den Staubereich beschreiben, müssen entsprechend der vorgegebenen Streckencharakteristik, der Verkehrszusammensetzung und der sonstigen Randbedingungen angesetzt werden. Abgeleitet aus der Stoßwellengeschwindigkeit $u = \Delta q / \Delta k$ ergibt sich dann die Staulänge L_S zum Zeitpunkt t_i (siehe hierzu auch Abb. 4-7):

$$L_S(t_i) = -\frac{\Delta q(t_i)}{\Delta k(t_i)} \cdot (t_i - t_{i-1}) + L_S(t_{i-1}) = -\frac{q(t_i) - C_E}{k(t_i) - k_{Stau}} \cdot (t_i - t_{i-1}) + L_S(t_{i-1}) \quad Gl. 4-15$$

Mit: $t_{i...n}$ Zeitpunkt innerhalb der Stauzeit

$L_S(t_i)$ Staulänge [km]

$q(t_i)$ Zuflussverkehrsstärke (innerhalb des Intervalls $(t_i - t_{i-1})$ konstant) [Kfz/h]

$k(t_i)$ Verkehrsdichte im ungestörten Zufluss [Kfz/km]

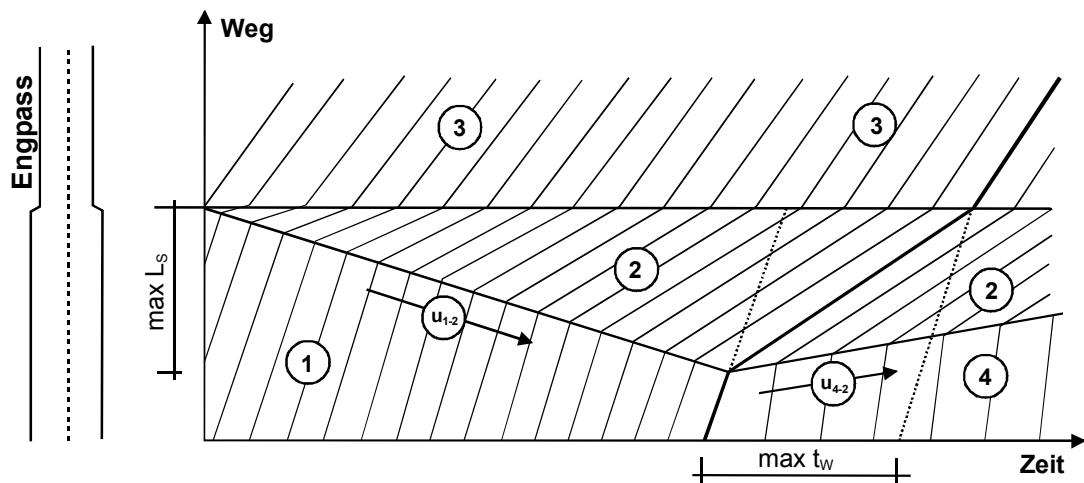
C_E Kapazität des Engpasses [Kfz/h]

Die Verlustzeit eines Fahrzeugs, das zum Zeitpunkt t_i in den Stau hineinfährt, ergibt sich anschließend zu:

$$t_{W,Stau}(t_i) = L_S(t_i) \cdot \left(\frac{1}{v_{Stau}} - \frac{1}{v(t_i)} \right) \quad Gl. 4-16$$

Mit: $t_{W,Stau}(t_i)$ Verlustzeit [h]

$v(t_i)$ Geschwindigkeit im ungestörten Zufluss [km/h]



- ① Verkehrsfluss auf dem freien Streckenabschnitt vor dem Engpass mit $q_1 > C_E$, v_1 und k_1
- ② Verkehrsfluss im Stau vor dem Engpass mit $q_2 = C_E$, $v_2 = v_{Stau}$ und $k = k_{Stau}$
- ③ Verkehrsfluss innerhalb des Engpasses mit $q_3 = C_E$, $v_3 = v_E$ und $k_3 = k_E$
- ④ Verkehrsfluss auf dem freien Streckenabschnitt vor dem Engpass mit $q_4 < C_E$, v_4 und k_4
- ⑤ **Stauaufbau:** Geschwindigkeit der Stoßwelle am Stauende $u = (q_1 - q_2) / (k_1 - k_2)$
- ⑥ **Stauabbau:** Geschwindigkeit der Stoßwelle am Stauende $u = (q_4 - q_2) / (k_4 - k_2)$

Abb. 4-7: Zeit-Weg-Diagramm an einem Engpass [in Anlehnung an ZACKOR, 1976]

Zusätzlich kann die Verlustzeit $t_{W,E}$ berechnet werden, die aus der im Vergleich zur ungestörten Strecke geringeren Geschwindigkeit v_E im Engpassbereich (z.B. Arbeitsstelle) resultiert:

$$t_{W,E}(t_i) = L_E \cdot \left(\frac{1}{v_E} - \frac{1}{v(t_i)} \right) \quad \text{Gl. 4-17}$$

Bewertung

Das Dichtestoßwellenmodell nach ZACKOR mit seinen zwei Teilbereichen des Fundamental-Diagramms, die sowohl den Streckenabschnitt vor dem Engpass als auch den Engpass selbst repräsentieren, eignet sich aufgrund seiner guten Handhabbarkeit sowie seiner Flexibilität sehr gut für eine Anwendung im Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung.

4.5 Die Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs

Modellbeschreibung

Einen anderen Ansatz zur Modellierung von Verkehrsstörungen anhand makroskopischer Kenngrößen wählen KERNER und REHBORN in ihrer „Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs“. Sie fanden in verschiedenen Untersuchungen heraus, dass neben dem „freien Verkehr“ im Bereich „dichter Verkehr“ (instabiler Bereich) zwei unterschiedliche Verkehrsphasen unterschieden werden müssen [KERNER et al.; 1998/2001]:

1) Breite, sich bewegende Staus („Wide Moving Jams“)

Diese Staus werden an Anfang und Ende räumlich durch zwei sich kontinuierlich stromaufwärts bewegende Fronten begrenzt, an denen sowohl die Geschwindigkeit als auch die Verkehrsdichte eine starke Veränderung erfährt. Innerhalb des Staus ist die Geschwindigkeit sehr niedrig (bis zum zeitweiligen Stillstand) und die Dichte sehr hoch. Der Zusatz „breit“ definiert die Längsausdehnung des Staus, die in diesem Fall deutlich größer ist als die Breite der stromabwärtigen und stromaufwärtigen Staufront. Die Geschwindigkeit der stromabwärtigen Staufront ist von KERNER und REHBORN als ein charakteristischer, d.h. vorhersagbarer Parameter identifiziert worden. Sie ergibt sich (in Anlehnung an die Stoßwellentheorie aus Abschnitt 4.4) aus der Neigung der Sekante zwischen den beiden Punkten q_{out}/k_{min} und $q=0/k_{max}$ (siehe Abb. 4-8). Die Bewegung der stromaufwärtigen Front errechnet sich analog anhand der Punkte $q_0(t)/k_0$ (Verkehrsstärke und Verkehrsdichte im Zufluss auf den Stau) und $q=0/k_{max}$. Auf der Basis dieses Modells kann die Bewegung der Wide Moving Jams nach erstmaliger Identifizierung an einem Messquerschnitt ohne eine weitere Validierung von Modellparametern abgebildet werden.

2) Synchronisierter Verkehr

Im Gegensatz zu den Wide Moving Jams ist die stromabwärtige Front des synchronisierten Verkehrs, nachdem dieser erstmals an einem Engpass entstanden ist, räumlich fixiert. Nach REHBORN und KERNER werden alle räumlich-zeitlichen Muster des dichten Verkehrs, die sich nicht den sich bewegenden breiten Staus zuordnen lassen, die also

keine konstant wandernde stromabwärtige Front besitzen, dem synchronisierten Verkehr zugeordnet. Infolge dessen weist diese „Phase“ des Verkehrs ein ausgesprochen komplexes Verhalten auf. Als synchronisierter Verkehr kann sowohl der gebundene Verkehr (hohe Verkehrsdichte bei annähernd konstanter Geschwindigkeit) als auch der Stop-and-Go-Verkehr, der seinerseits aus einer Anzahl schmaler sich bewegender Staus („Narrow Moving Jams“) besteht, bezeichnet werden.

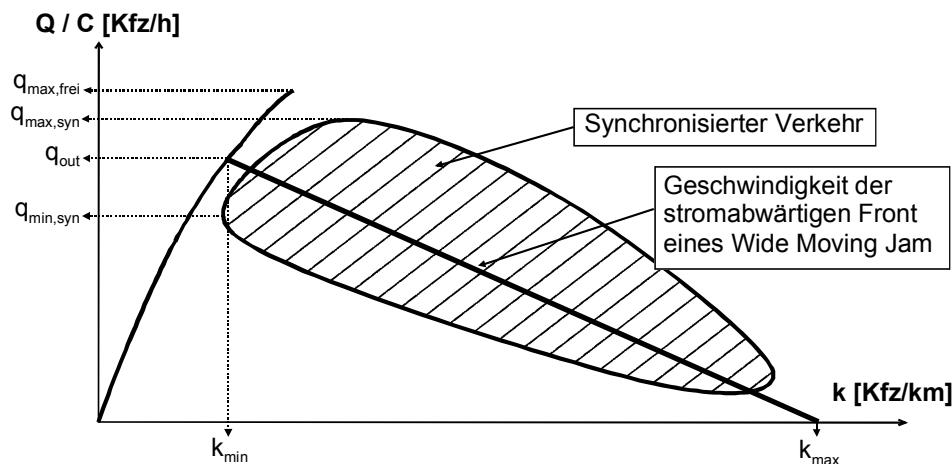


Abb. 4-8: Darstellung der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs [nach KERNER, 2001]

Bezogen auf das in dieser Arbeit behandelte Problem der Stauentwicklung an Engpässen kommt dem Zustand „Synchronisierter Verkehr“ eine besondere Bedeutung zu. KERNER fand heraus, dass innerhalb des synchronisierten Verkehrs häufig eine „Selbst-Verdichtung“, der sogenannte „Pinch Effect“ auftritt [KERNER, 1998]. In dieser Pinch Region (siehe Abb. 4-9) ist die durchschnittliche Geschwindigkeit niedrig (etwa 20-35 km/h) und die Verkehrsdichte hoch (ca. 45-70 Kfz/km).

Ein weiteres Phänomen, das KERNER im Bereich von isolierten Engpässen, d.h. an Engpässen, deren Verkehrsablauf nicht durch benachbarte Engpässe beeinflusst wird, identifiziert hat, ist die limitierte Länge des Bereichs mit synchronisiertem Verkehr. Demnach übersteigt diese Länge - auch wenn die Verkehrsnachfrage q_{in} dauerhaft größer ist als die Kapazität des Engpasses q_{out} - nicht eine engpassspezifische Länge L_{syn} [KERNER, 2001].

Das Maß L_{syn} wird bestimmt durch die Länge der Pinch Region, d.h. durch den Weg, den die Stop-and-Go-Wellen im verdichten synchronisierten Verkehr (Narrow Moving Jams) zurücklegen, bis sie sich in Wide Moving Jams umwandeln und damit den Übergang in eine andere Phase des Verkehrs einleiten (siehe Abb. 4-9). Die durchaus interessante Fragestellung nach der möglichst exakten Prognose der Länge L_{syn} in Abhängigkeit von den verkehrlichen und äußeren Randbedingungen am Engpass bleibt jedoch bislang offen.

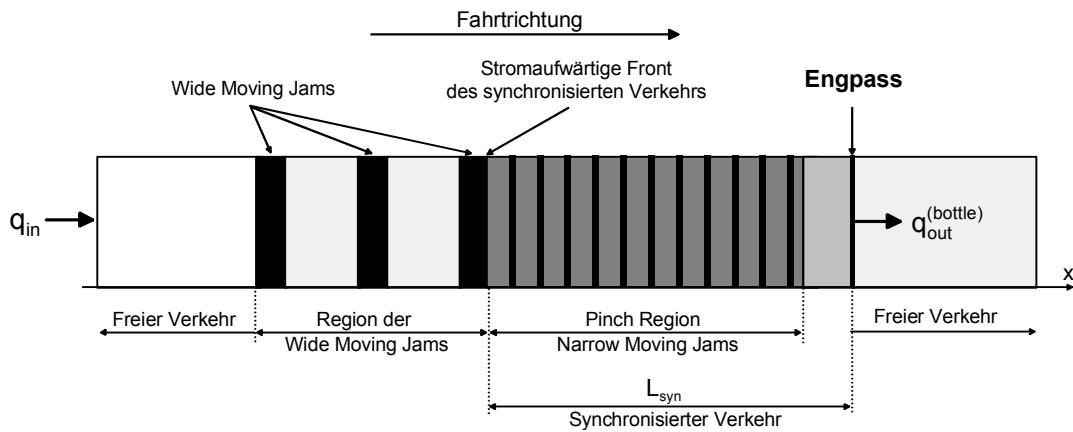


Abb. 4-9: Darstellung des Verkehrsablaufs an einem isolierten Engpass nach der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs [KERNER, 2001]

Bewertung

Die Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs findet derzeit bei der Modellierung des Verkehrsablaufs im Rahmen der Verkehrsbeeinflussung auf hessischen Autobahnen Anwendung. An den für die Berechnung erforderlichen Eingangsdaten wird erkennbar, dass zur Modellierung der Staumentwicklung Daten aus benachbarten Messquerschnitten benötigt werden. Die Identifizierung der verschiedenen Phasen des Verkehrs anhand von aktuellen Messdaten ist somit zwingende Voraussetzung für die Anwendung der Drei-Phasen-Theorie des Verkehrs. Aus diesem Grund erscheint der Einsatz des Modells bei der eher langfristig angesiedelten Prognose von Überlastungerscheinungen, die Gegenstand dieser Arbeit ist, ungeeignet.

4.6 Fazit

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Verkehrsablaufmodelle repräsentieren lediglich eine Auswahl aller vorhandenen makroskopischen Ansätze. Die Aufzählung der Modelle ist keinesfalls vollständig, vielmehr wurden diejenigen Verfahren betrachtet, die für die gegebene Aufgabenstellung - die Nachbildung von Überlastungerscheinungen an Engpässen - geeignet erscheinen.

Hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit sind sowohl das Dichtestoßwellenmodell als auch das deterministische Warteschlangenmodell gut für einen Einsatz innerhalb des zu entwickelnden Stauprognoseverfahrens geeignet. Beide Ansätze basieren auf der Nutzung von makroskopischen Daten (Verkehrsstärke, Verkehrsdichte, Geschwindigkeit) und liefern auch bei der Verwendung größerer historischer Daten aussagekräftige Ergebnisse. Um eine endgültige Entscheidung über den Einsatz eines der beiden Modelle zu treffen, werden im folgenden Abschnitt beide Verfahren direkt miteinander verglichen. Zu diesem Zweck wird eine Stau-längen- und Verlustzeitberechnung an Hand einer beispielhaften Verkehrssituation an einer Baustellenverkehrsführung durchgeführt:

(a) Eingangsdaten

Freie Strecke:

- C_F 3800 Kfz/h bei einem GV-Anteil von 10 % und einer Längsneigung unter 2 %
 $Q(t_i)$ 3000 Kfz/h in der betrachteten Stunde
 v_f 130 km/h
 v_{opt} 80 km/h

Engpassbereich:

- C_E 2680 Kfz/h (z.B. 4s+0-Verkehrsführung)
 v_{Stau} 17,9 km/h
 k_{Stau} 150 Kfz/km

(b) Stauberechnung mit Hilfe des Dichtestoßwellenmodells

Der stabile Bereich des Fundamentaldiagramms wird vereinfacht durch eine lineare Geschwindigkeits-Verkehrsdichte-Beziehung dargestellt, womit die Verkehrsstärke-Verkehrsdichte-Beziehung einen parabolischen Verlauf erhält. Die Kapazität der freien Strecke C_F ist dabei kleiner als das rechnerische Maximum der Parabel, so dass die Gleichungen 4-18 bis 4-20 für den Wertebereich $q = [0; C_F]$ gelten.

$$v = v_f - b \cdot k \quad \text{Gl. 4-18}$$

$$b = \frac{v_f - v_{opt}}{k_{opt}} \quad \text{mit} \quad k_{opt} = \frac{C_F}{v_{opt}} \quad \text{Gl. 4-19}$$

$$v = \frac{v_f}{2} + \sqrt{\left(\frac{v_f}{2}\right)^2 - q \cdot b} \quad \text{Gl. 4-20}$$

- Mit:
- | | | |
|-------|--|--------------------------|
| q | Verkehrsstärke im Zufluss der Baustelle (freier Streckenabschnitt) | [Kfz/h] |
| v | zugehörige Geschwindigkeit auf dem freien Streckenabschnitt | [km/h] |
| k | zugehörige Verkehrsdichte auf dem freien Streckenabschnitt | [Kfz/km] |
| b | Konstante | [km ² /Kfz/h] |
| C_F | Kapazität der freien Strecke | [Kfz/h] |

Anhand dieser Gleichungen sowie der Gleichungen aus Abschnitt 4.4 können die folgenden Ergebniswerte ermittelt werden:

$$v(t_i) = 97,7 \text{ km/h}$$

$$k(t_i) = 30,7 \text{ Kfz/km}$$

$$L_s = -\frac{3000 - 2680}{30,7 - 150} \cdot 1 = \underline{\underline{2,68 \text{ km}}}$$

$$t_w = 2,68 \cdot \left(\frac{1}{17,9} - \frac{1}{97,7} \right) = 0,123 \text{ h} = \underline{\underline{7,4 \text{ min}}}$$

(c) Stauberechnung mit Hilfe des deterministischen Warteschlangenmodells

Basierend auf den in Abschnitt 4.3 dargestellten Zusammenhängen ergeben sich folgende Werte:

$$M_{S,E} = 0 + (3000 - 2680) = 320 \text{ Kfz}$$

$$t_w = \frac{320}{2680} = 0,119 \text{ h} = \underline{\underline{7,16 \text{ min}}}$$

$$L_s = \frac{320}{150} = \underline{\underline{2,13 \text{ km}}}$$

(d) Vergleich der Ergebnisse

Wie aus den einzelnen Berechnungen ersichtlich wird, unterscheiden sich die Ergebnisse trotz gleicher Eingangswerte voneinander. Die aufgetretene Differenz in der Staulänge lässt sich durch die fehlende Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung des Staus im deterministischen Warteschlangenmodell erklären. Hier werden im Falle eines Staus die wartenden Fahrzeuge am Engpass quasi „gestapelt“ und nacheinander abgeführt. Die Berechnung der Staulänge basiert anschließend auf der Annahme, dass der Fahrzeugstapel unter Ansatz einer mittleren Dichte einfach „umgeklappt“ wird [z.B. RESSEL, 1994]. Der Streckenabschnitt stromaufwärts des Engpasses ist jedoch in der Realität mit Fahrzeugen, die frei auf den Engpass zufließen, belegt (im Beispiel mit: $Q(t_i) = 3000 \text{ Kfz/h}$, $v(t_i) = 97,7 \text{ km/h}$ und $k(t_i) = 30,7 \text{ Kfz/km}$). Diese Fahrzeuge müssten bei einer räumlichen Betrachtung stromaufwärts verlagert werden. Somit erhöht sich die Anzahl der vom Stau betroffenen Fahrzeuge, und der Stau wird länger. Die Berechnung der Staulänge müsste also in diesem Fall lauten:

$$L_{S,korr.} = \frac{M}{k_{Stau}} + L_{S,korr.} \cdot \frac{k(t_i)}{k_{Stau}} = \frac{M}{k_{Stau} - k(t_i)} = \frac{3000 - 2680}{150 - 30,7} = \underline{\underline{2,68 \text{ km}}}$$

Es ergibt sich somit derselbe Zusammenhang wie im Dichtestoßwellenmodell. Auch die Verlustzeit eines Fahrzeugs am Ende einer Staustunde ist in beiden Modellansätzen unterschiedlich. Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass beim Dichtestoßwellenmodell die Verlustzeit eines Fahrzeugs, das zu einem bestimmten Zeitpunkt am Stauende eintrifft, berechnet wird. Beim deterministischen Warteschlangenmodell hingegen, in dem die Ausdehnung des Staus vernachlässigt wird, gilt die Verlustzeit für ein Fahrzeug, das sich zum berechneten Zeitpunkt bereits am Beginn des Engpasses (also an der Stauwurzel) befindet. In der Zeit, die das Fahrzeug vom Stauende bis zur Stauwurzel bei freier Geschwindigkeit benötigt, erhöht sich jedoch die Anzahl der im Stau wartenden Fahrzeuge. Dementsprechend berechnet sich die Verlustzeit eines Fahrzeugs, das am Ende der Staustunde auf das Stauende auffährt zu

$$t_{w,korr.} = \frac{M_{S,E} \cdot \left(1 + \frac{L_{S,korr.}}{v(t_i)}\right)}{C} = \frac{320 + 9}{2680} = 0,123 \text{ h} = \underline{\underline{7,4 \text{ min}}}$$

und entspricht damit dem Wert, den die Berechnung mit dem Dichtestoßwellenmodell ergeben hat.

Der Vergleich der Berechnungsmodelle zeigt, dass bei Verwendung relativ einfacher Eingangsgrößen grundsätzlich beide Verfahren gut zur Nachbildung der Stauentwicklung geeignet sind. Die mit dem deterministischen Warteschlangenmodell berechneten Staulängen und - in geringerem Umfang - die Verlustzeiten weisen aufgrund der fehlenden Betrachtung der räumlichen Ausdehnung systematische Abweichungen von den Ergebnissen, die mit Hilfe des Dichtestoßwellenmodells ermittelt wurden, auf. Diese Differenzen lassen sich nur durch den Einbezug des Verkehrsablaufs im Vorfeld des Engpasses beseitigen. Da beide Modelle hinsichtlich ihrer Handhabbarkeit vergleichbar sind, wird das Dichtestoßwellenmodell mit seiner sowohl räumlichen als auch zeitlichen Betrachtungsebene für den Einsatz innerhalb des Stauprognoseverfahrens vorgezogen.

5. Empirische Untersuchungen des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen

5.1 Vorbemerkung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die wesentlichen Grundlagen der Modellierung von Staus an Autobahnengpässen zusammen getragen. Wie bereits einleitend beschrieben, liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognoze an Autobahnbaustellen. Zur Kalibrierung dieses Verfahrens, vor allem zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Randbedingungen auf die Kapazität von Arbeitsstellen, wurden in einem Zeitraum von insgesamt vier Jahren umfangreiche Untersuchungen des Verkehrsablaufs an entsprechenden Autobahnabschnitten durchgeführt. Diese Untersuchungen umfassten sowohl die Analyse vorhandener, automatisch erfasster Daten als auch die Durchführung eigener Erhebungen im Bereich von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer. Die jeweiligen Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

5.2 Auswertung vorhandener Staudaten für verschiedene Autobahnabschnitte

5.2.1 Automatisch erfasste Verkehrsdaten im Bereich von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer im hessischen Autobahnnetz

Datenbasis

Von den zuständigen Behörden des Landes Hessen wurden folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- Übersicht über die im gesamten Autobahnnetz von Hessen durchgeführten Dauerbaustellen im Zeitraum vom 01.01.1999 bis 31.07.1999 (insgesamt 66) mit Angabe der Dauer der Baumaßnahme, der Kilometrierung, der Verkehrsführung sowie der Fahrstreifenbreite im Baustellenbereich
- Übersicht über alle Tagesbaustellen, die zwischen dem 01.01.1999 und dem 31.07.1999 auf der BAB 5 im Bereich von Hessen durchgeführt wurden (insgesamt 345) mit Angabe der Dauer der Instandsetzungs- oder Unterhaltungsmaßnahme, der Kilometrierung sowie der Verkehrsführung
- Übersicht über automatische Zählstellen im hessischen Autobahnnetz
- Protokoll aller ARIAM-Meldungen für das hessische Autobahnnetz für den Zeitraum vom 01.01.1999 bis 31.07.1999

In den Protokollen der ARIAM-Meldungen sind neben der automatisch generierten Textmeldung, die an die Landesmeldestelle gesendet wird, die Bezeichnung des Erfassungsquerschnitts sowie die der Störungsmeldung zu Grunde gelegten Verkehrsdaten aufgezeichnet. An Hand der Zählstellenübersicht konnte über die entsprechende Kilometrierung festgestellt werden, welche Messquerschnitte sich im Vorfeld von Tages- oder Dauerbaustellen des betrachteten Zeitraums befinden. Anschließend wurden die ARIAM-Protokolle nach den betreffenden Messquerschnittsbezeichnungen durchsucht und die zugehörigen Verkehrsdaten herausgefiltert.

Trotz der sehr umfangreichen Datenbasis konnten nur für wenige Tages- und Dauerbaustellen aussagekräftige Daten gewonnen werden. Die Ursachen hierfür liegen zum einen in Störungen innerhalb der Datenerfassung (Messwerte wurden lückenhaft oder zeitweise gar nicht erfasst) und zum anderen in externen Störungen des Verkehrsablaufs (Unfälle, Vollsperrungen, Anschlussstellen oder Autobahnkreuze/-dreiecke im Erfassungsbereich).

Arbeitsstellen längerer Dauer

Von den 66 gemeldeten Dauerbaustellen war bei 17 eine Zuordnung von Messquerschnitten möglich. Bei der Auswertung der ARIAM-Protokolle erwies sich jedoch nur noch eine Dauerbaustelle als geeignet für eine weitere Datenauswertung. In den anderen Fällen wurden entweder keine ARIAM-Meldungen gefunden oder die gemeldeten Störungen wurden vorrangig durch Verflechtungsvorgänge im Bereich der Erfassungsquerschnitte hervorgerufen, so dass ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Staubildung und Baustelle nicht gesichert war.

Bei der verbliebenen Baustelle handelte es sich um eine 3n+3-Verkehrsführung zwischen dem Bad Homburger Kreuz und der Anschlussstelle Friedberg auf der A5 (Fahrtrichtung Nord). Nach Aussagen der zuständigen Autobahnmeisterei treten in diesem Bereich zwar auch ohne Baustelle Stauungen auf (der reine Fahrbahnquerschnitt wurde durch die Verkehrsführung ohnehin nur unwesentlich eingeschränkt), die Stauerscheinungen hätten sich jedoch während der Zeit der Bauausführung gehäuft. Dies sei im Wesentlichen auf die Schaulustigkeit der Verkehrsteilnehmer zurückzuführen gewesen. Abb. 5-1 gibt einen Überblick über die ermittelten Kapazitätswerte (Mittelwerte der Verkehrsstärke während der Staudauer) im Baustellenbereich (Beispiele für einzelne Ganglinien siehe Anlage 1). Dabei ergibt sich eine relativ große Spanne zwischen 4155 und 5027 Kfz/h, wobei kein signifikanter Zusammenhang zwischen den verschiedenen Wochentagen erkennbar ist.

Aufgrund der Beschaffenheit der Grunddaten konnte der genaue SV-Anteil an den einzelnen Tagen nicht zugeordnet werden. Da jedoch alle Stauereignisse an Werktagen stattfanden, ist davon auszugehen, dass keine signifikanten Unterschiede im SV-Anteil aufgetreten sind, so dass der Einfluss des Lkw-Verkehrs trotz der im Bereich der Baustelle auftretenden Längsneigungen (max. 2,5%) zur Erklärung dieser Differenzen kaum herangezogen werden kann.

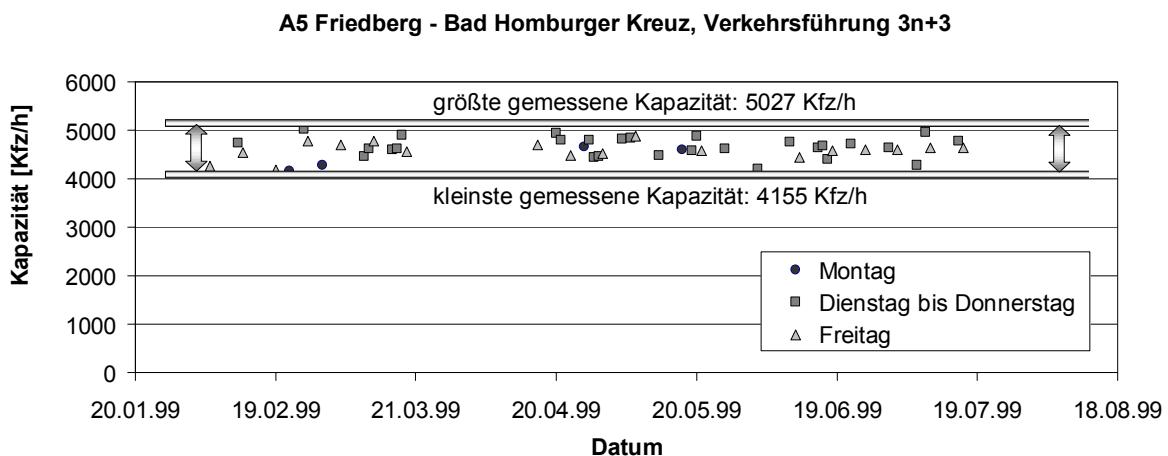


Abb. 5-1: Kapazitätswerte der Dauerbaustelle AK Bad Homburg - AS Friedberg

Es liegt daher die Vermutung nahe, dass die Schwankungen zum einen durch unterschiedliche Witterungsbedingungen und zum anderen durch mehr oder weniger starke Aktivität auf der Baustelle hervorgerufen wurden. Genaue Daten zur Bestätigung dieser Annahme konnten jedoch nachträglich nicht mehr zugeordnet werden.

Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Von den insgesamt 345 Tagesbaustellen, die auf der A5 während der ersten Hälfte des Jahres 1999 betrieben wurden, konnte 146 Arbeitstellen ein entsprechender Erfassungsquerschnitt zugeordnet werden. Die ARIAM-Protokolle wiesen für 33 dieser Erfassungsquerschnitte Störungsmeldungen aus. Nach der genauen Auswertung der Verkehrsdaten zeigte sich jedoch, dass in der Mehrzahl der Fälle die Störungsmeldung nicht innerhalb des gemeldeten Zeitraums der Tagesbaustelle lag bzw. eine unvorhergesehene Störung (z.B. Unfall) die Ursache für den aufgetretenen Stau war.

Hierzu muss angemerkt werden, dass die Grundlage für die Auswahl eine Übersichtsliste der von den Autobahnmeistereien an das ASV Frankfurt gemeldeten Tagesbaustellen bildete. Inwieweit die Baustellen zum geplanten Termin tatsächlich durchgeführt wurden, ging aus dieser Quelle nicht hervor. Es verblieben letztendlich 5 Tagesbaustellen, für die plausible Verkehrsdaten ausgewertet werden konnten (Ganglinien siehe Anlage 1).

Tab. 5-1 gibt eine Übersicht über die an diesen Arbeitsstellen ermittelten Kapazitätswerte. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen zweistufigen Verkehrsführungen lassen sich vermutlich auch hier auf verschiedene Witterungsbedingungen oder sonstige äußere Faktoren zurückführen. Der Einfluss der Lage im Netz kann ausgeschlossen werden, da sich ausnahmslos alle Arbeitsstellen im Ballungsraum (Rhein-Main-Gebiet) befanden.

Ort	Datum	Verkehrsführung	Kapazität [Kfz/h]	SV-Anteil [%]
Heppenheim - Bensheim	18.03.1999 Donnerstag	2n+1	1388	16
Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM	23.02.1999 Dienstag	3n+2	2729	16
Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM	24.02.1999 Mittwoch	3n+2	3165	16
Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM	06.05.1999 Donnerstag	3n+2	2938	15
Friedberg - Bad Homburger Kreuz	23.06.1999 Mittwoch	3n+2	3187/3136	16

Tab. 5-1: Übersicht über Kapazitätswerte an Tagesbaustellen auf der A5

5.2.2 Automatisch erfasste Verkehrsdaten im Bereich von Arbeitsstellen kürzerer Dauer im Autobahnnetz von Nordrhein-Westfalen

Im Rahmen der Softwareweiterentwicklung der Verkehrsinformationszentrale (VIZ) in NRW führte das Ingenieurbüro HEUSCH-BOESEFELDT (Aachen) 1999 einen Probetrieb für eine neue Software zur Nachbildung und Prognose der Verkehrszustände im NRW-Autobahnnetz durch. Innerhalb dieser Probephase wurden Tagesbaustellen, die von den Autobahnmeistereien gemeldet wurden, manuell in das System eingegeben. Die auf dieser Basis durchgeführte Stauprognose konnte mit den tatsächlich gemessenen Verkehrsdaten, die im Minutenrhythmus von den Verkehrsrechnerzentralen übermittelt wurden, verglichen werden. Ähnlich wie im hessischen Autobahnnetz wurden auch hier den Tagesbaustellen die entsprechenden Erfassungsquerschnitte zugeordnet und anschließend überprüft, ob im fraglichen Zeitraum Stauerscheinungen beobachtet werden konnten. Die entsprechenden Verkehrsdaten wurden daraufhin der Universität Kassel zu weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Zusätzliche Verkehrsdaten an Arbeitsstellen kürzerer Dauer wurden im Rahmen einer weiteren Datenakquirierung für das Jahr 2000 vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (Niederlassung Hamm) geliefert.

Tab. 5-2 zeigt die Kapazitätswerte, die aus den ausgewerteten Staudaten ermittelt wurden (siehe auch Anlage 2). Die Datensätze sind dabei nach der Verkehrsführung und nach der gemessenen Kapazität geordnet.

In einigen Fällen wurde derselbe Stau an mehreren verschiedenen Erfassungsquerschnitten detektiert, wobei sich zum Teil unterschiedliche Kapazitätswerte ergaben. Eine nähere Analyse der betreffenden Daten zeigte, dass sich innerhalb der detektierten Staustrecke zwischen den Erfassungsquerschnitten Knotenpunkte befinden, so dass der stromaufwärts des Knotenpunktes gelegene Querschnitt deutlich niedrigere Messwerte lieferte als derjenige Querschnitt, der die tatsächlich abgeföhrte Verkehrsmenge erfasste.

BAB	Ort	Verkehrs-führung	Datum	Kapazität [Kfz/h]	SV-Anteil [%]
45	AK Olpe-Süd - Freudenberg	2n+1	26.10.2000 Donnerstag	1187	29
2	Herten - Gelsenkirchen-Buer	2n+1	12.09.2000 Dienstag	1378	15
44	AK Unna-Ost - AK Werl	2n+1	24.11.2000 Freitag	1400	26
43	Marl-Nord - Haltern	2n+1	17.09.1999 Freitag	1417	24
59	Flughafen Köln/Bonn - AD Porz/AS Rath	2n+1	03.08.1999 Dienstag	1582	24
59	AD Porz/AS Rath - Flughafen Köln/Bonn	2n+1	10.08.1999 Dienstag	1634	16
3	AK Hilden - Mettmann	3n+2	11.08.1999 Mittwoch	2692	20
4	Köln-Poll - Köln-Süd	3n+2	08.09.1999 Mittwoch	2849	22
3	AK Hilden - Mettmann	3n+2	12.08.1999 Donnerstag	2896	17
1	Köln-Lövenich - AK Köln-Nord	3n+2	15.09.1999 Mittwoch	3080	25
2	Kamen/Bergkamen - Dortmund-Nordost	3n+2	13.09.1999 Montag	3273	16
2	AK Bad Oeynhausen - Porta Westfalica	3n+2	10.08.2000 Donnerstag	3425	38
1	AK Leverkusen-West - Köln-Niehl	3n+2	11.08.1999 Mittwoch	3606	17

Tab. 5-2: Übersicht über Kapazitätswerte an Tagesbaustellen auf Autobahnen in NRW

Abb. 5-2 zeigt beispielhaft die Situation an einer untersuchten Arbeitsstelle auf der A45 zwischen dem Autobahnkreuz Olpe-Süd und der Anschlussstelle Freudenberg. Der Verkehrsablauf wurde zuerst 100 m hinter der Arbeitsstelle erfasst, so dass die Kapazität mit 1187 Kfz/h über die Dauer der Arbeitstelle hinweg eindeutig quantifiziert werden kann. Der zweite Messquerschnitt befand sich 4,1 km stromaufwärts der Arbeitsstelle. Etwa 20 Minuten nach der Einrichtung der Arbeitsstelle kann hier ein deutlicher Geschwindigkeitseinbruch festgestellt werden. Die anschließend gemessene maximale Verkehrsstärke liegt jedoch mit 839 Kfz/h deutlich unter der stromabwärts gemessenen Kapazität (-29%).

Die Ursache für die aufgetretene Differenz liegt in dem Autobahnkreuz Olpe-Süd, das sich zwischen dem zweiten Erfassungsquerschnitt und der Arbeitstelle befindet. Die Verkehrsströme, die sich von der A4 kommend in die A45 (Fahrtrichtung Süd) einfädeln wollten, bewirkten hier eine zusätzliche Reduktion der Kapazität des Streckenabschnitts für die durchgehenden Verkehrsströme.

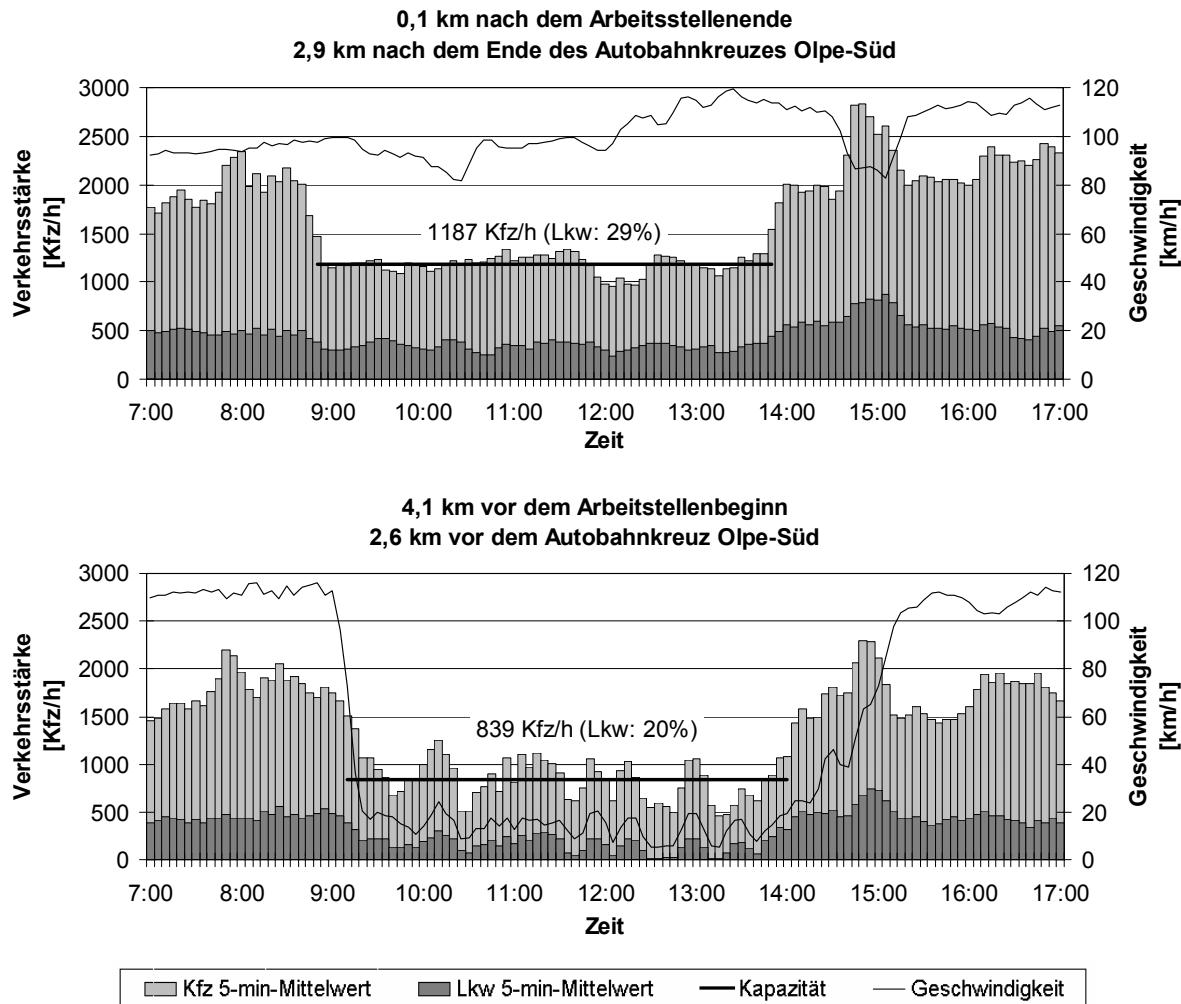


Abb. 5-2: Darstellung des Einflusses von Autobahnknotenpunkten auf den Verkehrsablauf im Vorfeld einer Arbeitsstelle (A 45 AK Olpe-Süd - AS Freudenberg, 26.10.2000, Verkehrsführung 2n+1)

Die Verkehrszustände auf der A4 konnten im betreffenden Zeitraum nicht analysiert werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass die einfahrenden Ströme aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit nahezu ungehindert auf die Hauptfahrbahn drängten.

Das Phänomen der Knotenpunkte im Arbeitsstellenbereich bzw. im Zulauf von Arbeitstellen ist bereits in Abschnitt 3.9 angesprochen worden. Auch im HCM 2000 [TRB, 2000] wird davon ausgegangen, dass Rampenströme an Knotenpunkten im Regelfall ihre Einfahrt erzwingen. Dieser Vorgang bewirkt demnach eine direkte Senkung der Anzahl der abfließenden Fahrzeuge im Hauptstrom und eine zusätzliche, indirekte Reduktion der Kapazität durch die beim Einfädeln entstehenden Turbulenzen.

5.2.3 Auswertung der Daten von umsetzbaren Stauwarnanlagen

Bei umsetzbaren Stauwarnanlagen (UStWA) handelt es sich um vorübergehend aufgebaute Streckenbeeinflussungsanlagen, die dem Ziel der Stauwarnung an Arbeitsstellen auf Bundesfernstraßen dienen [BMV, 1999]. Der Einsatz der Stauwarnanlagen wird von den einzelnen Bundesländern überwacht. Die Ergebnisse der Auswertungen von insgesamt drei dieser Anlagen sollen im Folgenden dargestellt werden.

UStWA A 1 Dortmund Richtung Bremen

Diese Anlage an der Brücke Dortmund-Ems-Kanal in Fahrtrichtung Nord (Nähe AS Ladbergen) war während ihrer Einsatzzeit in das Verkehrstelematiksystem des Landes Nordrhein-Westfalen integriert, so dass ein Zugriff auf die Anlage von der Verkehrsrechnerzentrale Recklinghausen aus möglich war. Die Datenübertragung erfolgte über eine Funkverbindung. Da sich eine Verarbeitung der archivierten Daten als zu aufwendig erwies, wurde mit dem Autobahnamt Hamm eine Speicherung der laufenden Daten vereinbart. Diese Daten wurden dem Fachgebiet direkt zur Weiterverarbeitung zugesandt.

Bei der Baustelle handelte es sich um eine 4s+0-Verkehrsführung, wobei die vier Behelfsfahrstreifen auf der Richtungsfahrbahn Dortmund (Süd) geführt wurden. Die Erfassungs- und Anzeigequerschnitte waren auf der Richtungsfahrbahn Bremen (Nord) installiert. Insgesamt wurden die Verkehrsdaten für den Zeitraum vom 10.5.1999 bis zum 20.03.2000 ausgewertet, so dass sowohl Urlaubs- als auch Normalverkehr erfasst werden konnte (Übersicht über den Anlagenaufbau und die Lage der Baustelle siehe Anlage 3).

Abb. 5-3 gibt einen Überblick über die ermittelten Werte (im Zeitraum von Dezember 1999 bis März 2000 wurden durch die Anlage keine Staus erfasst). Anhand der Differenzierung der Ergebniswerte nach Werktagen und Ferienreiseverkehren lässt sich ein deutlicher Einfluss aufzeigen.

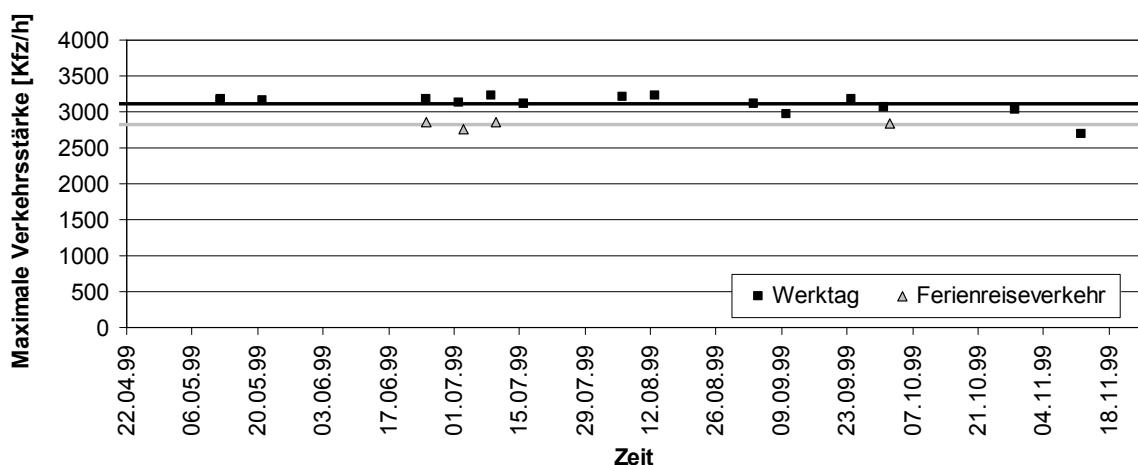


Abb. 5-3: Kapazitätswerte an der Baustelle Dortmund-Emskanal (VF 4s+0)

Durch eine einfache Mittelwertbildung in beiden Kategorien ergibt sich folgendes Bild: Der Kapazitätsmittelwert im Werktagsverkehr beläuft sich auf 3110 Kfz/h bei einem mittleren Lkw-Anteil von 11,3%, während des Urlaubsreiseverkehrs beträgt die mittlere maximal erreichbare Verkehrsstärke dagegen nur 2823 Kfz/h bei einem durchschnittlichen Lkw-Anteil von 4,6%. Dies entspricht einer Kapazitätsreduktion von etwa 9%, wobei der geringere Lkw-Anteil im Ferienreiseverkehr noch nicht berücksichtigt ist. Die Ursache für diese Reduktion ist allem Anschein nach beim Fahrerkollektiv zu suchen, das sich an Ferienwochenenden aus weniger geübten Fahrern zusammensetzt als werktags.

Aussagen zu mittleren Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten während der Stauereignisse, die für die Eichung des später einzusetzenden Staumodells wünschenswert gewesen wären, können aufgrund der fehlenden räumlichen Verteilung der ausgewerteten Daten nicht getroffen werden.

UStWA A 9 bei Gefrees

Die umsetzbare Stauwarnanlage befand sich im Untersuchungszeitraum im Vorfeld einer Dauerbaustelle zwischen den Anschlussstellen Münchberg-Süd und Münchberg-Nord im Bereich der Münchberger Senke. Der ursprüngliche Trassenverlauf war durch starke Längsneigungen von bis zu 5,2 % gekennzeichnet. Um eine Verbesserung des Verkehrsablaufs zu erreichen, sollte die neue Trasse über eine Brücke führen. Während des Bauzeitraumes wurde der Verkehr über eine 4+0-Verkehrsführung auf der alten Trasse geführt und dabei zusätzlich von drei auf zwei Fahrstreifen eingeengt (Lage- und Höhenplan siehe Anlage 4).

Von der Verkehrsrechnerzentrale Nürnberg wurden Verkehrsdaten für den Zeitraum vom 10.6.1999 bis 8.8.1999 bereitgestellt, so dass auch in diesem Fall sowohl Urlaubs- als auch Normalverkehr erfasst werden konnte. Die Auswertung der Daten ergab, dass an der Baustelle regelmäßig Staus auftraten, insbesondere an Freitagen (siehe Tab. 5-3 sowie Anlage 4). Häufig fand eine zusätzliche Beeinträchtigung des Verkehrsablaufs durch Unfälle oder Pannen im Baustellenbereich statt. Nach Auskunft der Polizeidirektion Hof wurden im betrachteten Zeitraum 35 Unfälle registriert. Die in Tab. 5-3 dargestellten Kapazitätswerte ergeben daher auch ein sehr heterogenes Bild. So ist beispielsweise kein direkter Einfluss des Ferienreiseverkehrs feststellbar. Dagegen ist die Kapazität an einigen Normalwerktagen gegenüber dem Durchschnitt stark reduziert.

Um weiterhin Aufschluss über die im Stau gefahrenen Geschwindigkeiten zu erhalten, wurden die an mehreren Querschnitten hintereinander erfassten Geschwindigkeitswerte während eines Stauereignisses räumlich und zeitlich gemittelt. Aus den somit berechneten mittleren Staugeschwindigkeiten konnte in einem zweiten Schritt unter Berücksichtigung der jeweils gemessenen Verkehrsstärke die entsprechende Dichte im Stau ermittelt werden. Dabei ergaben sich querschnittsbezogene Werte in Höhe von 103-110 Kfz/km (Tab. 5-3). Da die Strecke im Vorfeld der Arbeitsstelle bereits dreistreifig ausgebaut ist, entspricht dies demnach fahrstreifenbezogenen Dichten von 34-37 Kfz/(km/FS).

Datum	Wochentag	Kapazität [Kfz/h]	SV-Anteil [%]	Mittlere Stau-geschwindigkeit [km/h]	Mittlere Dichte im Stau [Kfz/km]
11.06.99	Freitag	2814	15,3	25,5	110
18.06.99	Freitag	2515	17,3	24,4	103
20.06.99	Sonntag	2915	10,8	26,8	109
25.06.99	Freitag	3132/2616	14,3	26,7	103
16.07.99	Freitag	2519	15,8	23,4	108
30.07.99	Freitag	2873/3012	15,7	*	*
31.07.99	Samstag	2754/2854	6,7	*	*
01.08.99	Sonntag	2769/2928	7,6	*	*

* Staudauer nicht ausreichend zur Bestimmung einer mittleren Geschwindigkeit bzw. Dichte

Tab. 5-3: Kapazitätswerte an der Autobahnbaustelle Münchberger Senke

Diese Werte liegen deutlich unter denen, die beispielsweise von RESSEL in seiner Untersuchung ermittelt wurden (siehe Abschnitt 4.2, Abb. 4-2 [RESSEL, 1994]). Ein Zusammenhang zwischen Schwererverkehrsanteil und Verkehrsdichte ist - obwohl dieser grundsätzlich zu vermuten wäre und in anderen Untersuchungen auch herausgestellt wurde - nicht erkennbar.

Abb. 5-4 (oben) zeigt beispielhaft den Verlauf einer Verkehrsstärkeganglinie 200 m vor dem Beginn des Baustellenengpasses. Der Geschwindigkeitseinbruch bei Überschreitung der Kapazität der Arbeitsstelle ist deutlich sichtbar. Zusätzlich ist jedoch ein zweiter kritischer Punkt in diesem Diagramm erkennbar. Offensichtlich war zu diesem Zeitpunkt (etwa eine Stunde nach Eintritt des Überlastungsstaus) ein weiterer Einbruch zu verzeichnen, so dass die Kapazität ab diesem Punkt noch einmal deutlich abnahm.

Betrachtet man parallel dazu die Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitenanganglinie 300 m hinter dem Baustellenbeginn (Abb. 5-4 unten), ist zu erkennen, dass nach dem zweiten Einbruch auch innerhalb des Baustellenengpasses niedrigere Geschwindigkeiten auftraten. In diesem Fall konnte also das eingangs bereits beschriebene Capacity-Drop-Phänomen deutlich beobachtet werden. Auslöser für den Zusammenbruch des Verkehrsablaufs im Baustellenbereich könnte z.B. die starke Steigung im zweiten Teil der Baustellenverkehrsführung sein. Hinzuzufügen ist jedoch, dass dieses Phänomen bei den weiteren Datensätzen nicht erneut auftrat. Da in allen Fällen keine direkte Beobachtung des Verkehrsablaufs möglich war, kann die genaue Ursache für den Verkehrsstärkeeinbruch nicht abschließend geklärt werden.

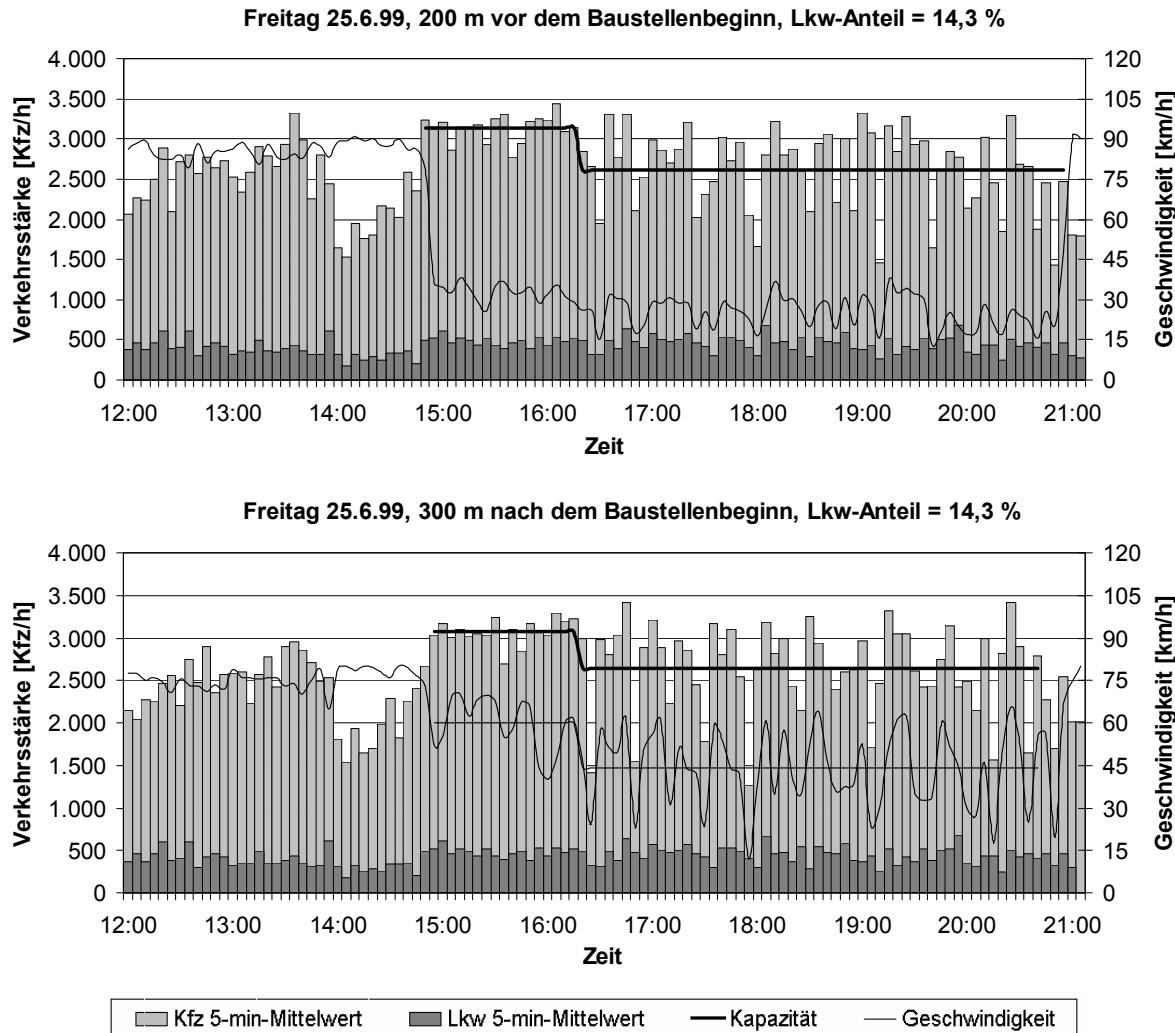


Abb. 5-4: Ganglinien der Verkehrsstärke und der Geschwindigkeit im Vorfeld und innerhalb des Baustellenbereichs an der umsetzbaren Stauwarnanlage Gefrees

Abb. 5-5 zeigt in der Darstellung des Fundamentaldiagramms den Stauaufbau, den Kapazitätseinbruch und die spätere Stauauflösung. An Hand dieser Abbildung wird noch einmal deutlich, wie schwierig sich die Abschätzung der Kenngrößen eines Staus an einem Baustellenengpass gestaltet. Um die Stauentwicklung mit Hilfe des Fundamentaldiagramms mit den in Kapitel 4 beschriebenen Gleichungen nachbilden zu können, ist die Festlegung eines exakten Punktes zur Beschreibung des Zustandes „Stau vor der Baustelle“ nötig. Die Abbildung zeigt jedoch, dass sowohl die Kapazität und die Geschwindigkeit als auch die Verkehrsdichte innerhalb dieses Zustands nicht konstant sind. Vielmehr bilden die Werte trotz der Aggregation zu 30-min-Intervallen eine Punktewolke.

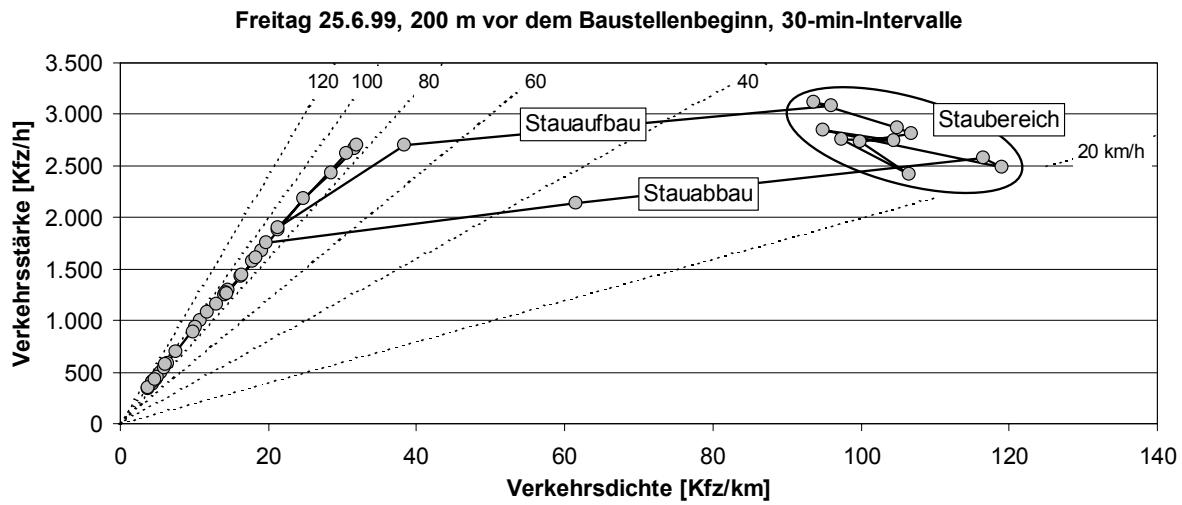


Abb. 5-5: Fundamentaldiagramm 200 m vor dem Baustellenbereich an der UStWA Gefrees

UStWA A1 Dortmund/Unna - Schwerte

Diese Stauwarnanlage war im Untersuchungszeitraum auf der A1 zwischen dem Autobahnkreuz Dortmund/Unna und der Anschlussstelle Schwerte installiert. Der Verkehr wurde im Bereich der Arbeitsstelle in einer 4+0-Verkehrsführung abgewickelt. Innerhalb des Untersuchungszeitraums wechselte die Lage der Arbeitsstelle, so dass sowohl der Verkehrsablauf mit als auch ohne Überleitung der Verkehrsströme auf die Gegenfahrbahn (Dez. 2000 / Feb. 2001) erfasst werden konnte. Abb. 5-6 enthält die im Untersuchungszeitraum ermittelten Kapazitätswerte, in Anlage 5 finden sich detaillierte Darstellungen der erhobenen Daten sowie ein Übersichtsplan der Stauwarnanlage.

Deutlich erkennbar ist in beiden Erfassungszeiträumen der Kapazitätsunterschied zwischen den Werktagen einerseits und den Sonn- bzw. Feiertagen auf der anderen Seite. Die Ursache für die im Mittel niedrigeren Kapazitäten an Werktagen liegt in dem wesentlich höheren Schwerverkehrsanteil. Da es sich bei der Untersuchungsstrecke um weitgehend ebenes Gelände handelt, kann die starke Kapazitätsreduktion jedoch nur zu einem kleinen Anteil den größeren Zeit- und Weglücken bei der Fahrzeugfolge Pkw-Lkw bzw. Lkw-Pkw zugeordnet werden. Der wesentliche Anteil resultiert aus den Verkehrsstörungen, die aufgrund der Verflechtungsvorgänge im Bereich der Tank- und Rastanlage Lichtendorf etwa 1 km nach Beginn der Baustellenverkehrsführung entstanden. Wie auch schon am Beispiel in Abschnitt 5.2.2 (Abb. 5-2) dargestellt, bewirkten diese Einfädelungsvorgänge eine Reduktion der Kapazität. Aufgrund der gegenüber Knotenpunkten auf der freien Strecke begrenzteren Verhältnisse innerhalb der Arbeitsstelle trug hier insbesondere der Schwerverkehr zur Störung des Verkehrsablaufs auf der durchgehenden Fahrbahn bei. Dementsprechend war an Werktagen bei hohem Schwerverkehrsanteil eine wesentlich niedrigere Kapazität zu beobachten als an Wochenenden bei geringem Schwerverkehrsanteil. Diese These wurde auch von den zuständigen Straßenverkehrsbehörden bestätigt, die an Werktagen häufig auf dem Hauptfahrstreifen eine wesentlich höhere Staulänge registrierten als auf dem Überholfahrstreifen.

Ein weiterer Zusammenhang, der beim Vergleich der beiden Erfassungszeiträume deutlich wird, ist die Abhängigkeit der Kapazität von der Verkehrsführung. Bildet man jeweils über alle Werktagen des Monats Dezember sowie Februar den Mittelwert, ergibt sich eine Differenz von 6,5%, d.h. bei Überleitung der Verkehrsströme auf die Gegenfahrbahn konnten im Mittel 6,5% weniger Fahrzeuge abgeführt werden als ohne Überleitung.

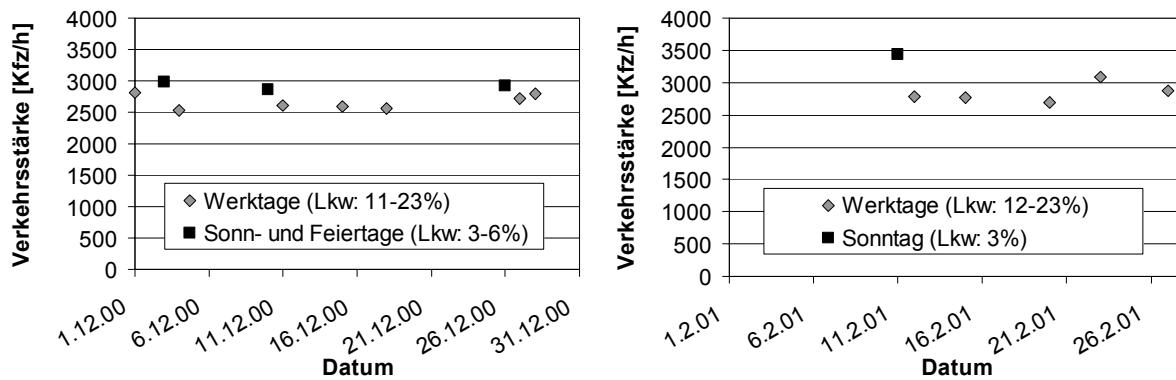


Abb. 5-6 Kapazitätswerte an der Arbeitsstelle A1 Schwerte

Aufgrund der Dichte der Datenerfassung war es weiterhin möglich, zeitlich räumliche Darstellungen des Verkehrsablaufs vor dem Arbeitsstellenengpass zu erzeugen. In Abb. 5-7 ist beispielhaft das Zeit-Weg-Diagramm der Geschwindigkeiten im Vorfeld der Arbeitsstelle abgebildet. In dieser Darstellung lässt sich der Vorgang des Stauaufbaus und Stauabbaus¹⁵ in Form von Wellen sehr gut erkennen. Die Dichtestoßwellen finden somit als geeignetes Mittel zur Modellierung der Staumentwicklung Bestätigung.

Anhand der räumlich-zeitlich gemittelten Geschwindigkeiten während der einzelnen Stauergebnisse konnten auch hier Verkehrsdichten im Stau bestimmt werden. Tab. 5-4 enthält die entsprechenden Daten der einzelnen Stauereignisse. Im Vergleich zur Stauwarnanlage A9 bei Gefrees traten hier im Mittel wesentlich geringere querschnittsbezogene Dichten auf. Im Monat Dezember (mit Überleitung der Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn) lagen diese zwischen 78 Kfz/km und 112 Kfz/km, im Februar (ohne Überleitung auf die Gegenfahrbahn) zwischen 72 Kfz/km und 86 Kfz/FS. Die Ursache für die niedrigeren Dichten und die damit verbundenen höheren Geschwindigkeiten ließ sich jedoch anhand des verfügbaren Datenmaterials nicht eindeutig bestimmen.

¹⁵ Die Verkehrsdaten wurden querschnittsbezogen ausgewertet, so dass in dieser Darstellung der unterschiedliche Staulängenverlauf auf den einzelnen Fahrstreifen nicht erkennbar ist.

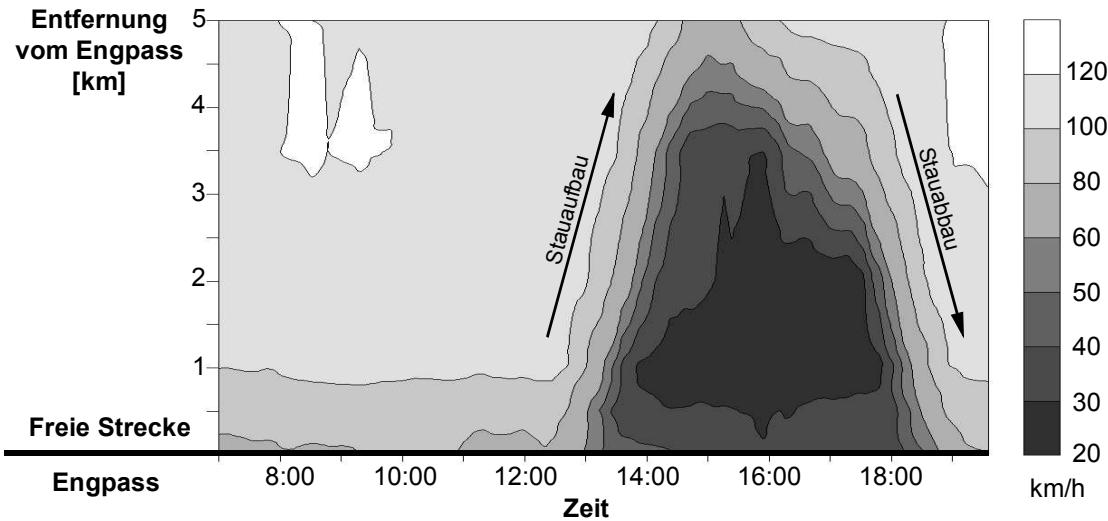


Abb. 5-7: Beispiel für den Stauauf- und -abbau an der Arbeitstelle A1 Schwerte (01.12.2000)

Datum	Kapazität [Kfz/h]	SV-Anteil [%]	Mittlere Staugeschwindigkeit [km/h]	Mittlere Dichte im Stau [Kfz/km]
01.12.2000 (Fr)	2811	17	29,3	96
03.12.2000 (So)	2982	6	26,7	112
04.12.2000 (Mo)	2524	22	29,5	86
10.12.2000 (So)	2859	5	25,9	110
11.12.2000 (Mo)	2604	23	31,2	83
15.12.2000 (Fr)	2594	19	26,2	99
18.12.2000 (Mo)	2560	23	32,6	78
26.12.2000 (So)	2916	3	29,9	98
27.12.2000 (Mo)	2717	11	29,7	91
28.12.2000 (Di)	2797	13	31,6	89
11.02.2001 (So)	3436	3	*	*
12.02.2001 (Mo)	2781	22	36,5	76
15.02.2001 (Do)	2775	21	34,6	80
20.02.2001 (Di)	2698	23	37,7	72
23.02.2001 (Fr)	3089	12	*	*
27.02.2001 (Di)	2867	22	33,5	86

* Staudauer nicht ausreichend zur Bestimmung einer mittleren Geschwindigkeit bzw. Dichte

Tab. 5-4: Kapazitätswerte, mittlere Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten im Stau an der Arbeitsstelle A1 Schwerte

Unabhängig von den Ergebnissen der Auswertung der UStWA A9 konnte bei der weiteren Analyse der Daten dennoch ein wesentlicher Einfluss identifiziert werden: Mit zunehmendem Schwerverkehrsanteil wird die Dichte im Stau geringer. In Abb. 5-8 sind die Daten des Monats Dezember exemplarisch dargestellt. Mittels einer Regressionsrechnung wurde versucht, den Einfluss des Schwerverkehrsanteils auf die Verkehrsdichte zu quantifizieren. Die lineare Regression bietet für den Bereich, der mit Daten versorgt ist (SV-Anteil 3-23%), die beste

Anpassung. Grundsätzlich wäre jedoch auch eine Funktion mit degressiver Abnahme der Werte, z.B. eine negative logarithmische Funktion, denkbar. Ausgehend von der Annahme, dass die Weglücken zwischen Pkw und Lkw größer sind als die Weglücken zwischen zwei Lkw, ließe sich auf diese Weise ein stärkerer Einfluss einzelner Lkw bei geringem Schwerverkehrsanteil und ebenso ein durch Kolonnenbildung abnehmender Einfluss bei hohem Schwerverkehrsanteil modellieren.

Da die an der Stauwarnanlage erfassten Daten jedoch nur einen Einzelfall mit den entsprechenden speziellen Randbedingungen repräsentieren und daher für eine abschließende Untersuchung des Zusammenhangs nicht ausreichen, können an dieser Stelle keine allgemein gültigen Regeln für die Bestimmung der Verkehrsdichte in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil abgeleitet werden.

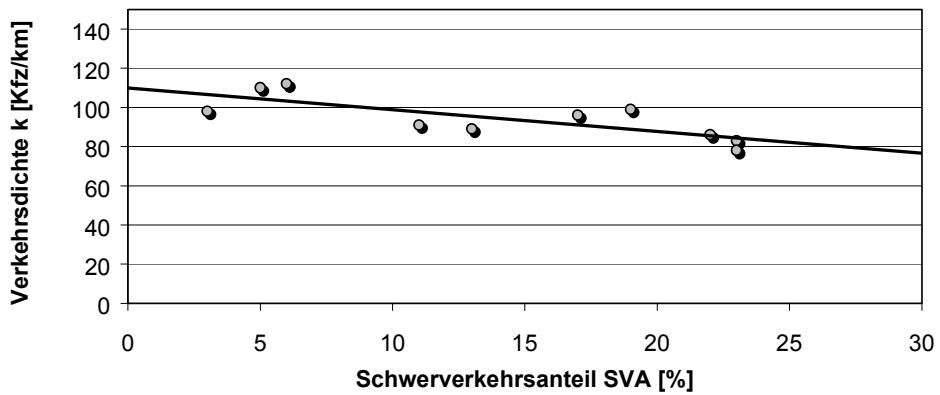


Abb. 5-8: Möglichkeiten der Darstellung des Einflusses des Schwerverkehrsanteils auf die Dichte im Stau

Eine weitere Tendenz, die sich anhand der ausgewerteten Daten ableiten lässt, ist die im Vergleich etwas höhere Dichte im Stau bei anschließender Überleitung der Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn (Dezember 2000) als im Vergleichsfall ohne Überleitung (Februar 2001). Aufgrund der geringen Anzahl der ausgewerteten Stauereignisse erscheint jedoch auch hier die Formulierung einer mathematischen Gesetzmäßigkeit nicht statthaft.

5.3 Ergänzende Erhebungen

5.3.1 Messmethodik

Da die eingangs beschriebenen Auswertungen automatisch erfasster Daten im Bereich von Arbeitsstellen auf Autobahnen lediglich querschnittsbezogene Daten des Verkehrsablaufs liefern können, wurden zusätzlich eigene Erhebungen an Tages- und Dauerbaustellen durchgeführt. Dabei sollten Messsysteme eingesetzt werden, die den folgenden Anforderungen entsprechen:

- Bei Querschnittsmessungen im Zu- und Abflussbereich sind alle Fahrzeuge nach Fahrstreifen und Fahrzeugklassen getrennt aufzunehmen (evtl. mit den dazugehörigen Geschwindigkeiten).
- Im Staubereich und im anschließenden Baustellenengpass sollen für einzelne, zufällig ausgewählte, als repräsentativ geltende Fahrzeuge Bewegungslinien aufgenommen werden.
- Die Verkehrsteilnehmer dürfen in ihrem Fahrverhalten nicht durch die Messeinrichtung beeinflusst werden.
- Die Installation des Messsystems muss schnell und mit geringem Aufwand möglich sein, da die Messungen im Regelfall nur auf einen Tag oder wenige Stunden beschränkt sind. Der Verkehrsablauf soll durch den Installationsvorgang nicht beeinträchtigt werden.
- Die Messsysteme sollen im Hinblick auf den personellen und materiellen Aufwand kostengünstig sein.
- Die Messfehler sollen gering und bei den nachfolgenden Auswertungen möglichst vernachlässigbar sein.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Messsysteme - vor allem in Hinblick auf Material- und Personalkosten - wurde folgende Messmethodik gewählt (eine Übersicht über grundsätzlich einsetzbare Messgeräte befindet sich in Anlage 6):

- Erfassung der Zu- und Abflussverkehrsstärken sowie der Geschwindigkeiten:
 - Videoaufnahmen
 - Dauerzählstellen
- Ermittlung der Fahrzeiten:
 - Messfahrten (CORREVIT[®]¹⁶ - Sensor)
- Ermittlung der Staulänge:
 - direkte Beobachtung (evtl. Videoaufnahmen)
 - Messfahrten (CORREVIT[®] - Sensor)
- Erfassung des Geschwindigkeitsprofils innerhalb der Staustrecke und der Baustelle:
 - Messfahrten (CORREVIT[®] - Sensor)

¹⁶ Der CORREVIT[®] - Sensor misst auf opto-elektronischer Grundlage kontinuierlich die gefahrene Geschwindigkeit; die Daten werden auf einem Datenträger gespeichert und stehen anschließend zur Auswertung zur Verfügung.

5.3.2 Auswahl geeigneter Messstrecken

Grundsätzliche Überlegungen

Ziel war es, bei der Auswahl der Untersuchungsstrecken ein möglichst großes Spektrum an Einflussfaktoren abzudecken, d.h. sowohl unterschiedliche Typen von Verkehrsführungen:

- Reduktion der Fahrstreifenanzahl von 3 auf 2
- Reduktion der Fahrstreifenanzahl von 2 auf 1
- Einengung/Überleitung von Fahrstreifen
- Mitbenutzung des Standstreifens

als auch verschiedene verkehrliche Randbedingungen:

- Messung an Werktagen und Wochenend- bzw. Reisetagen
- Berücksichtigung unterschiedlicher Witterungsbedingungen
- Berücksichtigung unterschiedlicher Gradienten
- Qualitative Unterscheidung nach Überleitungsbereichen mit $v_{zul} = 60 \text{ km/h}$ und $v_{zul} = 80 \text{ km/h}$
- Qualitative Berücksichtigung des Einflusses von Anschlussstellen im Baustellenbereich

Bei der Analyse der Verkehrsführungen, die in den Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen (RSA) für Arbeitsstellen an Autobahnen vorgegeben sind (siehe auch Abschnitt 3.4.1), zeigt sich jedoch, dass eine strenge Abgrenzung der einzelnen, oben genannten Kriterien im Rahmen der Untersuchung nicht möglich ist. Vielmehr wird der Verkehrsablauf an einer Arbeitsstelle im Regelfall von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, deren einzelne Potentiale nur sehr schwer zu analysieren sind.

Ein weiteres Problem bei der Auswahl geeigneter Messstrecken ergab sich aus der Tatsache, dass Staus an Arbeitsstellen zwar häufiger auftreten als auf der freien Strecke, andererseits aber nur wenige Arbeitstellen wirklich regelmäßig Staus verursachen. Vor allem bei der Einrichtung von Dauerbaustellen wird im Regelfall durch eine Optimierung der Bauablaufplanung versucht, die verkehrlichen Einschränkungen so gering wie möglich zu halten.

Dies äußert sich zum Beispiel im vermehrten Einsatz von dreistreifigen Baustellenverkehrsführungen auf hochbelasteten Autobahnabschnitten. Um dennoch bereits im Vorfeld der Messungen besonders stauanfällige Baustellen herausfiltern zu können, wurden telefonische Umfragen bei den zuständigen Straßenbauämtern, Autobahnpolizeistationen und Autobahnmeistereien durchgeführt. Zusätzlich wurde - wenn möglich - auch bei den verantwortlichen Bauleitern der Baustellen nachgefragt, wann Staus an den jeweiligen Baustellen zu erwarten seien. Trotz dieser umfangreichen Vorarbeiten konnte nie mit Sicherheit vorausgesagt werden, ob am festgesetzten Messtag tatsächlich ein Stau eintreten würde, und in einigen Fällen blieben die Messungen trotz allseitiger Versicherungen der zuständigen Institutionen bezüglich der Stauanfälligkeit der Baustellen erfolglos. Im Verlauf der Untersuchungen an Dauerbaustellen (Nov. 1998 - Juli 1999) wurden insgesamt 13 Messungen durchgeführt. Eine Übersicht enthält Tab. 5-5.

Datum/ Wochentag	Zeit	BAB	AS davor	VF	Grad. [%]	Witterung	Bemerkung
16.11.98 Montag	6-16	2	Herford - Vlotho/Exter	2+2	-	nass	kein Stau
19.11.98 Donnerstag	15-19	7	Rhüden - Bockenem	2n+1	-0,8	trocken	max. Staulänge: 4 km
26.11.98 Donnerstag	6-18	7	Hannover/ Kirchhorst - Laatzen	3s+1	0,7	trocken	Stau AK Hannover-Ost
27.11.98 Freitag	6-16					nass	kein Stau
19.03.99 Freitag	12-18	4	Bad Hersfeld - Friedewald	2+0	4,5	trocken	max. Staulänge: 14 km
25.03.99 Donnerstag	14-19					trocken	max. Staulänge: 3 km
23.03.99 Dienstag	7-10	7	Guxhagen - Kasseler Kreuz	3n+2	3,0-7,0	nass	max. Staulänge: 5 km
28.05.99 Freitag	14-19	2	Bad Nenndorf - Bad Eilsen	4+0	-	nass	kein Stau
09.06.99 Mittwoch	15-18	7	Friedland - Göttingen	2n+1	-0,2	trocken	max. Staulänge: 6 km
02.07.1999 Freitag	14-21	3	Wiesentheid - Schlüsselfeld	4s+0	1,5	trocken	kein Stau
03.07.1999 Samstag	9-16						Stau (Unfall)

* Anteil Schwerverkehr + Kfz mit Wohnanhänger

Tab. 5-5: Übersicht über durchgeführte Messungen an Dauerbaustellen (genaue Lagepläne in Anlage 6)

Wie aus der Tabelle ersichtlich, konnte nur in 7 Fällen ein Stauereignis beobachtet werden, wobei in zwei Messungen der Stau nicht durch die eigentliche Überlastung der Baustelle auftrat. Während Stausituationen an Arbeitsstellen mit Fahrstreifenreduktionen relativ sicher voraussagbar waren (vor allem bei der Reduktion von zwei auf einen Fahrstreifen), konnten Überlastungen an Arbeitsstellen ohne Fahrstreifenreduktion (nur Einengung und/oder Überleitung von Fahrstreifen) nur in besonderen Fällen festgestellt werden.

Bei der Baustelle an der BAB 3 zwischen Wiesentheid und Schlüsselfeld im Bereich der Anschlussstelle Geiselwind wurde der Stau vermutlich durch einen kleineren Unfall innerhalb der Baustelle verursacht; in der Baustelle auf der BAB 7 zwischen Laatzen und Kreuz Hannover/Kirchhorst entstanden die Störungen durch die Verflechtungsvorgänge am Kreuz Hannover Ost. Auch bei anderen Messungen an Baustellen, in denen Anschlussstellen lagen, konnte festgestellt werden, dass die Einfädelvorgänge - vor allem bei stark verkürzten Beschleunigungsstreifen - den Verkehrsablauf bei hohem Verkehrsaufkommen zum Teil erheblich stören.

Die Berücksichtigung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer, die aufgrund ihrer einfacheren Ausstattung und der häufig auftretenden Reduktion von Spuren in der Regel stauanfälliger sind als Dauerbaustellen, erwies sich bei der Planung der Messungen insofern als schwierig, als dass die Planungsbefugnis über die Durchführung derartiger Maßnahmen im Sinne der genauen Terminfestlegung im Regelfall den einzelnen Autobahnmeistereien obliegt. Häufig wird die endgültige Entscheidung von den Autobahnmeistern erst am Tag der Ausführung gefällt, so dass in diesem Fall das rechtzeitige Eintreffen des Messteams unmöglich ist.

Mit Unterstützung des Landesbetriebs Straßenbau in Nordrhein-Westfalen (Niederlassung Hamm) konnte dennoch eine Serie von Messungen organisiert werden (Mai 2001), die einzelnen Untersuchungsstrecken sind in Tab. 5-6 dargestellt.

Datum/ Wochentag	Zeit	BAB	von KP bis KP	VF	Grad. [%]	Witterung	Bemerkung
07.05.01 Montag	10-13	2	Kamen - Kamen/Bergkamen	3n+2s	-	trocken	kein Stau
07.05.01 Montag	20-21	2	Oelde - Beckum	2n+1	-	trocken	kein Stau
08.05.01 Dienstag	8-10	2	Kamen - Kamen/Bergkamen	3n+2s	-	trocken	kein Stau
08.05.01 Dienstag	11-13	2	Essen/Gladbeck - Recklinghausen	2n+1	-	trocken	Staulänge: 3 km
08.05.01 Dienstag	19-22	2	Beckum - Hamm/Uentrop	2n+1	-	trocken	Staulänge: ca.2 km
09.05.01 Mittwoch	9-13	40	Bochum - Stahlhausen	2n+1	-	trocken	Staulänge: ca. 5,5 km
09.05.01 Mittwoch	19-23	2	Hamm/Uentrop - Oelde	2n+1	-	trocken	Staulänge: ca. 5 km
10.05.01 Donnerstag	9-11	1	AK Kamen - Hamm/ Bockum/Werne	2n+2s	-	trocken	Kein Stau
10.05.01 Donnerstag	18-21	45	Lüdenscheid-Süd - Meinerzhagen	2n+1	-	trocken	Staulänge: 2 km

Tab. 5-6: Übersicht über durchgeführte Erhebungen an Arbeitsstellen kürzerer Dauer (genaue Lagepläne in Anlage 6)

5.3.3 Auswertung der Messungen

Die Auswertung der Messungen erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Teil wurden die Videoaufzeichnungen der einzelnen Messtage nach folgendem Schema ausgewertet:

- Zählung in 5-min-Intervallen
- getrennte Erfassung der Fahrspuren
- Differenzierung nach Pkw und Schwerverkehr

In Anlage 6 sind die Ganglinien der Abflussverkehrsstärke der einzelnen Baustellen dargestellt. Dabei wurden zum Teil die Originaldaten (5-min-Intervalle) als auch die zu 15-min-Intervallen aggregierten Werte über die gesamte Staudauer abgebildet. Zusätzlich enthalten die Diagramme, wie z.B. in Abb. 5-9 dargestellt, die über die Staudauer hinweg ermittelte Kapazität.

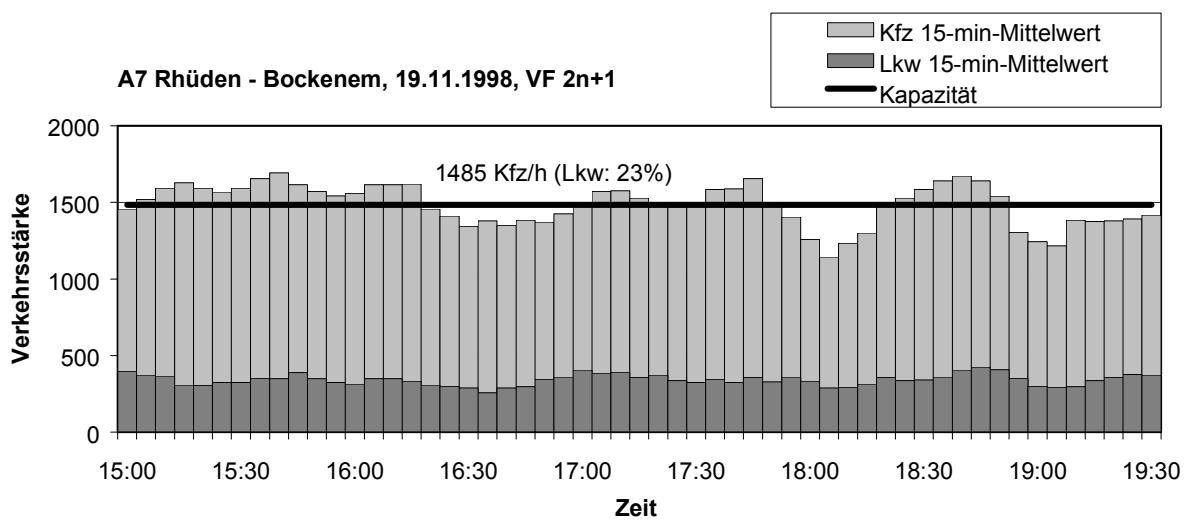


Abb. 5-9: Beispiel für eine Verkehrsstärkeganglinie an einer Arbeitsstelle längerer Dauer (aufgenommen während der Überlastung)

Die Tabellen 5-7 bis 5-9 geben eine Übersicht über diese Kapazitätswerte an den einzelnen Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer. Der Mittelwert deckt dabei die gesamte Staudauer ab. Der kleinste und der größte ermittelte Wert basieren auf einer gleitenden Mittelwertbildung über 60 Minuten. Der zusätzlich angegebene Varianzkoeffizient dient als Indikator für die Stabilität des berechneten Mittelwertes.

Bei der Analyse der gemessenen Kapazitätswerte zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung mit den Werten, die an den automatischen Zählstellen erfasst bzw. die in anderen Untersuchungen ermittelt wurden. Eine Ausnahme bildet jedoch zum einen die sehr niedrige Kapazität im Bereich der Arbeitsstelle längerer Dauer auf der A4 bei Bad Hersfeld, die offensichtlich auf die starke Längsneigung im Arbeitsstellenbereich zurückzuführen ist. Zum anderen weist die Arbeitsstelle kürzerer Dauer auf der A40 bei Bochum eine extrem hohe Kapazität auf. Hier liegt die Ursache allem Anschein nach in der Lage des Streckenabschnitts in einem starken Ballungsraum und der damit einhergehenden dauerhaft hohen Verkehrsbelastung.

Ort	Datum	VF	Beschreibung FS-Breite [m] Gradiente [%] SV-Anteil [%] Anteil Nahverkehr [%]	Kapazität (60-min-Intervall) ^{a)} [Kfz/h]			Varianz- koeffizient [%]
				Mittelwert	kleinster	größter	
Arbeitsstellen längerer Dauer mit einstreifiger Verkehrsführung							
A 7 Rhüden - Bockenem	19.11.98	2n+1	3,50 -0,8 23 < 50	1485	1339	1604	4,8
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald	19.03.99	2+0	4,00 4,5 8 < 50	1220	1088	1327	5,3
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald	25.03.99	2+0	4,00 4,5 17 < 50	1070	1030	1078	1,4
A 7 Friedland - Göttingen	09.06.99	2n+1	3,80 -0,2 25 < 50	1386	1342	1443	2,1

^{a)} Gleitende Mittelwerte aus 5-min-Intervallen

Tab. 5-7: Kapazitätswerte an Arbeitstellen längerer Dauer, ermittelt aus den Videoauswertungen (einstreifige Verkehrsführungen)

Ort	Datum	VF	Beschreibung FS-Breite [m] Gradiente [%] SV-Anteil [%] Anteil Nahverkehr [%]	Kapazität (60-min-Intervall) ^{a)} [Kfz/h]			Varianz- koeffizient [%]
				Mittelwert	kleinster	größter	
Arbeitsstellen längerer Dauer mit zweistreifiger Verkehrsführung							
A 7 Guxhagen - Kassel	23.03.99	3n+2	3,75/3,50 3,0 - 7,0 18 < 50	2316	2244	2365	1,8
A 3 Wiesenheid - Schlüsselfeld	03.07.99	4s+0	3,00/2,50 1,5 6 < 50	2792	b)	b)	b)

^{a)} Gleitende Mittelwerte aus 5-min-Intervallen

^{b)} Daten wurden aus Dauerzählstelle entnommen (nur Stundenwerte verfügbar)

Tab. 5-8: Kapazitätswerte an Arbeitstellen längerer Dauer, ermittelt aus den Videoauswertungen (zweistreifige Verkehrsführungen)

Ort	Datum	VF	Beschreibung FS-Breite [m] Gradient [%] SV-Anteil [%] Anteil Nahverkehr [%]	Kapazität (60-min-Intervall) ^{a)} [Kfz/h]			Varianz- koeffizient [%]
				Mittelwert	kleinster	größter	
Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit einstreifiger Verkehrsführung							
A2 Essen/Gladbeck - Recklinghausen	08.05.01	2n+1	3,5 - 33 > 50	1631	1606	1647	0,5
A2 Beckum - Hamm/Uentrop	08.05.01	2n+1	3,5 - 33 < 50	1500 1422	b)	b)	b)
A40 Bochum - Stahlhausen	09.05.01	2n+1	3,5 - 19 > 50	1820	1747	1903	2,0
A2 Hamm/Uentrop - Oelde	09.05.01	2n+1	3,5 - 43 < 50	944 ^{c)}	867	1083	7,4
A45 Lüdenscheid-Süd - Meinerzhagen	10.05.01	2n+1	3,5 - 22 < 50	1501	1474	1527	0,7

a) Gleitende Mittelwerte aus 1-min-Intervallen

b) Stau trat nur während kurzer Zeiträume auf, daher keine Auswertung von 60-min-Intervallen möglich

c) Während der Staudauer veränderten sich die Lichtverhältnisse von Tageslicht zu Dunkelheit, dementsprechend nahm die Kapazität kontinuierlich ab. Der Verkehrsablauf war zudem zeitweise durch ein liegengebliebenes Fahrzeug im Vorfeld der Arbeitsstelle beeinflusst. Weiterhin behinderten über eine im Arbeitsstellenbereich liegende Anschlussstelle zufließende Fahrzeuge den Verkehr.

Tab. 5-9: Kapazitätswerte an Arbeitsstellen kürzerer Dauer, ermittelt aus den Videoauswertungen

Im zweiten Schritt erfolgte die Auswertung der Daten der Geschwindigkeitsmessungen, die mit Hilfe des Correvit®-Sensors durchgeführt worden waren. Dabei wurden sowohl Geschwindigkeitsganglinien (Darstellung in Abhängigkeit von der Zeit) als auch Geschwindigkeitsprofile (in Abhängigkeit vom Weg) ermittelt. Die Geschwindigkeitsganglinien geben einen direkten Aufschluss über die Verlustzeit, wobei auch die Zeiträume mit absolutem Stillstand erkennbar sind; Geschwindigkeitsprofile hingegen ermöglichen die Darstellung und die Ermittlung der Staulänge. In Anlage 6 sind jeweils Geschwindigkeitsganglinie und -profil für die Messfahrten bei Überstauung der Arbeitsstelle dargestellt.

Abb. 5-10 zeigt ein Beispiel für die Darstellung der gemessenen Geschwindigkeiten in Form eines Profils. In dieser Darstellung sind insgesamt fünf Messfahrten mit unterschiedlichen Startzeitpunkten und dementsprechend verschiedenen Staulängen zusammengefasst, so dass die Entwicklung des Staus deutlich sichtbar wird. Auf eine zeitliche Zuordnung der Geschwindigkeitsprofile wurde in dieser Darstellung aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

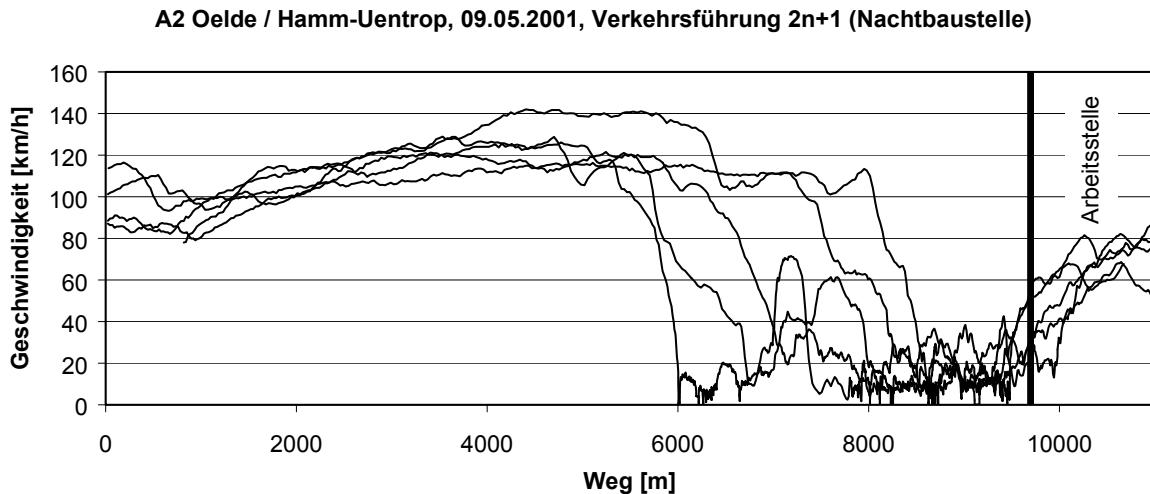


Abb. 5-10: Beispiel für Geschwindigkeitsprofile im Vorfeld einer Arbeitsstelle (vollständige Darstellung der Geschwindigkeitsmessungen in Anlage 6)

Eine Übersicht über die gemessenen Staulängen, sowie über die durchschnittlich im Stau gefahrenen Geschwindigkeiten mit der Angabe der Fahrspur enthalten die Tabellen 5-10 bis 5-12. Als Staubeginn (in Fahrtrichtung) wurde hier der Punkt definiert, an dem die Geschwindigkeit das erste Mal unter 30 km/h fiel.

Mit Hilfe der Reisegeschwindigkeiten und der mittleren Kapazität der Arbeitsstellen ließ sich weiterhin die mittlere Dichte im Stau pro Messfahrt errechnen. Um dabei den Einfluss der Verflechtungsvorgänge im Bereich von Fahrstreifenreduktionen berücksichtigen zu können, wurden die Dichtewerte in Staulängenklassen bis einschließlich 1,0 km und über 1,0 km eingeteilt und anschließend deren jeweiliger Mittelwert gebildet.

Vergleicht man die gewonnenen Daten aus den eigenen Messungen wiederum mit den Angaben vorhandener Untersuchungen (z.B. Abschnitt 4.2, Abb. 4-2 [RESSEL, 1994]), zeigt sich, dass die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Verkehrsdichten aufgrund der relativ hohen Geschwindigkeiten im Stau sehr niedrig liegen.

Für Verkehrsführungen mit einer Reduktion von zwei auf einen Fahrstreifen (z.B. 2n+1 und 2+0) ergeben sich beispielsweise querschnittsbezogene Verkehrsdichten zwischen 73 Kfz/km (Schwerverkehrsanteil 43%) und 123 Kfz/km (Schwerverkehrsanteil 8%) bei einer Staulänge > 1 km. Zum Vergleich: RESSEL gibt in seiner Arbeit Werte zwischen 130 Kfz/km (Güterverkehrsanteil 30%) und 155 Kfz/km (Güterverkehrsanteil 0%) an. Der von RESSEL verwendete Begriff des Güterverkehrsanteils bezeichnet dabei im Grundsatz die gleiche Fahrzeuggruppe, die in der hier vorliegenden Untersuchung unter dem Begriff Schwerverkehr zusammengefasst ist.

Ort/Datum/VF [-]	Kapazität (SV-Anteil) C [Kfz/h] [%]	Stau- länge L [km]	Geschwindigkeit im Stau v [km/h]	Dichte im Stau^{a)} k [Kfz/km]	Dichte bei L = < 1 km k [Kfz/km]	Dichte bei L > 1 km k [Kfz/km]
Arbeitsstellen längerer Dauer mit einstreifiger Verkehrsführung						
A 7 Rhüden - Bockenem 19.11.98 2n+1	1485 (23)	1,4 1,5 2,5 2,4 3,0 2,5 3,0 2,2	18,8 (links) 20,3 (rechts) 18,3 (links) 12,0 (rechts) 14,9 (links) 13,1 (rechts) 12,7 (links) 16,0 (rechts)	79 73 81 124 100 113 117 93		98
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald 19.03.99 2+0	1220 (8)	3,2 11,0 14,0	11,2 (rechts) 9,8 (links) 8,9 (rechts)	109 124 137		123
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald 25.03.99 2+0	1070 (17)	0,8 1,0 0,2 1,0 0,6 1,3 1,8	13,5 (rechts) 22,5 (links) 24,4 (rechts) 14,1 (links) 12,5 (rechts) 13,2 (links) 9,6 (rechts)	79 48 44 76 86 81 111	67	96
A 7 Friedland - Göttingen 09.06.99 2n+1	1386 (25)	6,2 6,2 5,9	15,1 (links) 14,9 (links) 12,4 (rechts)	92 93 112		99

^{a)} mit k = C/v

Tab. 5-10: Übersicht über die Geschwindigkeitsmessungen im Stau an Arbeitstellen längerer Dauer (einstreifige Verkehrsführungen)

Ort/Datum/VF [-]	Kapazität (SV-Anteil) C [Kfz/h] [%]	Stau- länge L [km]	Geschwindigkeit im Stau v [km/h]	Dichte im Stau^{a)} k [Kfz/km]	Dichte bei L = < 1 km k [Kfz/km]	Dichte bei L > 1 km k [Kfz/km]
Arbeitstellen längerer Dauer mit zweistreifiger Verkehrsführung						
A 7 Guxhagen - Kassel 23.03.99 3n+2	2316 (20)	4,2 4,7 3,0	13,2 (rechts) 15,3 (links) 15,3 (Mitte)	175 151 151		159

^{a)} mit k = C/v

Tab. 5-11: Übersicht über die Geschwindigkeitsmessungen im Stau an Arbeitstellen längerer Dauer (zweistreifige Verkehrsführungen)

Ort/Datum/VF [-]	Kapazität (SV-Anteil) C [Kfz/h] ([%])	Stau- länge L [km]	Geschwindigkeit im Stau v [km/h]	Dichte im Stau ^{a)} k [Kfz/km]	Dichte bei L = \leq 1 km [Kfz/km]	Dichte bei L > 1 km [Kfz/km]
Arbeitsstellen kürzerer Dauer mit einstreifiger Verkehrsführung						
A2 Essen/Gladbeck - Recklinghausen 08.05.01 2n+1	1631 (33)	0,9 1,3 ^{b)}	24,4 (links) 20,7 (rechts) 20,3 (links)	67 79 80	67	80
A40 Bochum - Stahlhausen 09.03.01 2n+1	1820 (19)	1,2 3,6 4,5 3,5 5,0 3,4 5,4 5,1	13,4 (links) 18,0 (rechts) 20,1 (rechts) 16,2 (links) 20,6 (links) 12,8 (rechts) 13,5 (links) 13,8 (rechts)	136 101 91 112 88 142 135 132		117
A2 Hamm/Uentrop - Oelde 09.05.01 2n+1 (Nachtbaustelle)	944 (43)	1,1 3,0 4,4 2,7 0,9	11,7 (links) 14,1 (links) 13,1 (rechts) 13,2 (links) 26,6 (rechts)	81 67 72 72 35	35	73
A45 Lüdenscheid-West Meinerzhagen 10.05.01 2n+1	1501 (22)	0,5 0,8	15,3 (links) 17,5 (rechts)	98 86	92	

^{a)} mit $k = C/v$

^{b)} 900 m Stau aufgrund von Störfall ca. 2,1 km vor dem Arbeitsstellenbeginn mit anschließendem kurzfristigem Geschwindigkeitsanstieg. Etwa 500 m vor Arbeitstellenbeginn erneuter Geschwindigkeitszusammenbruch.

Tab. 5-12: Übersicht über die Geschwindigkeitsmessungen im Stau an Arbeitstellen kürzerer Dauer

Prinzipiell ist auch hier - wie schon am Beispiel der umsetzbaren Stauwarnanlage A1 Dortmund/Unna gezeigt - ein Zusammenhang zwischen Schwerverkehrsanteil und Verkehrsdichte erkennbar. Eine Regressionsanalyse liefert jedoch aufgrund der geringen Anzahl der Messwerte keine sinnvollen Ergebnisse.

6. Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Schätzung der Kapazität eines Arbeitsstellenengpasses

6.1 Vergleich der eigenen Datenbasis mit den vorhandenen Verfahren

6.1.1 Vorbemerkung

Die im vorangegangenen Kapitel zusammengetragenen Daten zum Verkehrsablauf im Bereich von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer belegen, welche Spannweite der Kapazitätswerte an Arbeitsstellen bei unterschiedlichen Randbedingungen auftreten kann. Ziel des folgenden Kapitels ist es daher, unter Berücksichtigung bereits vorhandener Ansätze sowie der erarbeiteten Datenbasis ein verbessertes Verfahren zur Schätzung der Kapazität von Arbeitsstellen zu entwickeln.

In der Literaturrecherche zeigte sich, dass vor allem zwei Verfahren für die hier behandelte Problematik von Bedeutung sind. Es handelt sich dabei zum einen um das Verfahren zur Abschätzung der verkehrlichen Wirkung einer Baustellenverkehrsführung in den Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP) [BMV, 1996] und zum anderen um die Untersuchungen zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen, die von RESSEL durchgeführt und in einer nachfolgenden Studie weiter differenziert wurden [RESSEL, 1994 und 1996]. Im Zusammenhang mit der Analyse von Arbeitsstellen kürzerer Dauer ist zusätzlich die Arbeit von STÖCKERT zu nennen [STÖCKERT, 2001], die sich jedoch im Wesentlichen an die RBAP anlehnt, so dass dieses Verfahren nicht separat betrachtet wird.

In Tab. 6-1 bis Tab. 6-3 sind die Ergebnisse der eigenen Erhebungen für Tages- und Dauerautobastellen (Messungen und Auswertungen von automatisch erfassten Daten) den Literaturangaben aus den oben genannten Quellen gegenübergestellt. Bei Arbeitsstellen, für die aufgrund einer automatischen Datenerfassung über einen längeren Zeitraum Kapazitätswerte erfasst wurden, ist stellvertretend der jeweils niedrigste und höchste gemessene Wert angegeben.

Auf Grund des in Anbetracht der Vielzahl von Einflussfaktoren geringen Stichprobenumfangs wird an dieser Stelle auf eine ausführliche statistische Auswertung verzichtet. Um dennoch Aufschluss über die Vorzüge bzw. Nachteile der beiden oben genannten Verfahren zu erhalten, ist in den Tabellen zusätzlich die prozentuale Differenz zwischen den an den Arbeitsstellen erhobenen Kapazitäten und den jeweiligen theoretisch ermittelten Werten angegeben. Die durchschnittliche Abweichung zu den gemessenen bzw. automatisch erfassten Daten berechnet sich anschließend folgendermaßen:

a) durchschnittliche Abweichung ohne Berücksichtigung der Vorzeichen:

$$|\Delta C| = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta C_i|}{n} \quad \text{Gl. 6-1}$$

b) durchschnittliche Abweichung mit Berücksichtigung der Vorzeichen:

$$\Delta C = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta C_i}{n} \quad \text{Gl. 6-2}$$

Der in Gleichung 6-2 berechnete Kennwert soll dabei vor allem Aufschluss über systematische Über- oder Unterschätzungen geben. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

6.1.2 Arbeitsstellen längerer Dauer

RBAP

Grundsätzlich lässt sich bei Arbeitsstellen mit geringen Längsneigungen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten feststellen. Der durchschnittliche Abweichungsbetrag $|\Delta C|$ beträgt bei einstreifigen Verkehrsführungen 3,0% und bei mehrstreifigen 6,4%, wobei die Werte im ersten Fall insgesamt unter ($\Delta C = -3\%$) und im zweiten Fall bis auf eine Ausnahme über ($\Delta C = +5,3\%$) den Messwerten lagen.

Bei hohen Längsneigungen wird der Einfluss des Schwerverkehrs an allen Arbeitsstellen zu stark bewertet, so dass die Umrechnung der Messwerte von Kfz in Pkw-Einheiten zu Werten führt, die die nach RBAP ermittelte Kapazität deutlich übersteigen. Die durchschnittliche Abweichung ΔC liegt an einstreifigen Verkehrsführungen bei -15% und an zweistreifigen Arbeitsstellen bei -21%.

RESSEL

Beim Vergleich der erhobenen Daten mit den von RESSEL vorgeschlagenen Werten zeigt sich eine genau gegenläufige Tendenz: Bei geringen Längsneigungen liegen die Kapazitätsangaben von RESSEL sowohl an ein- als auch an mehrstreifigen Verkehrsführungen insgesamt niedriger ($\Delta C = -15,5\%$ bzw. $-7,9\%$). Dieser Effekt wird bei hohen Längsneigungen ausgeglichen, so dass in diesem Bereich gute Übereinstimmungen festzustellen sind ($\Delta C = +3,5\%$ bzw. $+5,5\%$).

Ort	Datum	Verkehrsführung	Beschreibung					Vergleich mit vorhandenen Verfahren					
			Längsneigung [%]	FS-Breite [m]	GV-Anteil [%]	Witterung	Nahverkehr [%]	Messwerte	Kfz/h RESSEL	Differenz [%]	Messwerte ^{a)}	Pkw-E/h RBAP	Differenz [%]
Einstufige Verkehrsführungen													
A 7 Rhüden - Bockenem	19.11.98 Do	2n+1	-0,8	3,50	23	trocken	<50	1484	1224	-18	1655	1560	-6
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald	19.03.99 Fr	2+0	4,5	4,00	8	trocken	<50	1220	1219	0	1708	1560	-9
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald	25.03.99 Do	2+0	4,5	4,00	17	trocken	<50	1070	1143	+7	1979	1560	-21
A 7 Friedland - Göttingen	09.06.99 Mi	2n+1	-0,2	3,80	25	nass	<50	1386	1210	-13	1560	1560	0
Mehrstreifige Baustellenverkehrsführungen													
A 7 Guxhagen - Kassel	23.03.99 Di	3n+2	3,0/ 7,0	3,50 3,50	20	nass	< 50	2316	2673	+24	3937	3200	-19
A 3 Wiesentheid - Schlüsselfeld	03.07.99 Sa	4s+0	-	3,00 2,50	6	trocken	< 50	2792	2734	-2	2876	3100	+8
A 1 Dortmund-Ems-Kanal	16.07.99 Fr	4s+0	-	3,00 2,50	10	-	> 50	3114	2670	-14	3270	3260	0
A 1 Dortmund-Ems-Kanal	03.07.99 Sa	4s+0	-	3,00 2,50	3	-	< 50	2752	2670	-3	2793	2940	+5
A 9 Münchberger Senke	18.06.99 Fr	4s+0	5,2	3,00 2,50	17	-	> 50	2515	2534 ^{b)}	+1	4653	3350	-28
A 9 Münchberger Senke	20.06.99 So	4s+0	5,2	3,00 2,50	11	-	> 50	2915	2621 ^{b)}	-10	4518	3350	-26
A1 Dortmund/Unna - Schwerte	04.12.00 Mo	4s+0	-	3,00 2,50	22	-	> 50	2524	2492	-1	2802	3180	+13
A1 Dortmund/Unna - Schwerte	03.12.00 So	4s+0	-	3,00 2,50	6	-	> 50	2983	2734	-8	3072	3180	+4
A1 Dortmund/Unna - Schwerte	20.02.01 Do	4s+0	-	3,00 2,50	23	-	> 50	2698	2478 ^{b)}	-8	3008	3350	+11
A1 Dortmund/Unna - Schwerte	11.02.01 So	4s+0	-	3,00 2,50	3	-	> 50	3436	2782 ^{b)}	-19	3488	3350	-4
A 5 Bad Homburger Kreuz - Friedberg	22.02.99 Mo	3n+3	2,5	3,75 3,75 3,50	16	-	> 50	4618	4920	+7	6096	5490	-10

a) Die Messwerte wurden hier nach dem in den RBAP vorgesehenen Verfahren in Pkw-E umgerechnet.

b) RESSEL gibt in seiner Arbeit lediglich Kapazitätswerte für die baustellenzugewandte Seite an. In den gekennzeichneten Fällen handelt es sich jedoch um die baustellenabgewandte Seite, so dass der Vergleich nur bedingt statistisch ist.

Tab. 6-1: Vergleich der erhobenen Kapazitätswerte an Arbeitsstellen längerer Dauer mit den Angaben aus der Literatur

6.1.3 Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Nach dem gleichen Muster wurden auch die Kapazitätswerte an Tagesbaustellen miteinander verglichen (siehe Tab. 6-2 und Tab. 6-3). Einschränkend ist hier jedoch anzumerken, dass nur ein geringer Teil der zum Vergleich herangezogenen Daten aus eigenen Erhebungen resultiert. Wie bereits in Abschnitt 5.1 erläutert, wurde bei den automatisch erfassten Daten zwar eine zeitliche Zuordnung zur Arbeitsstellenplanung der Autobahnmeistereien vorgenommen, dennoch kann - anders als bei den vor Ort erfassten Daten - nicht dafür garantiert werden, wie sich die Verhältnisse vor Ort in der Realität gestaltet haben, d.h. ob die Arbeitsstelle tatsächlich wie geplant durchgeführt wurde, welche Witterungsbedingungen vorlagen oder ob der Verkehrsablauf durch Unfälle oder Nothalte innerhalb oder in der Nähe der Arbeitsstelle beeinflusst wurde. Die im Folgenden dargestellten Zusammenhänge sind entsprechend zu werten.

RBAP

Die Kapazität einstreifiger Verkehrsführungen auf der ebenen Strecke wird mit dem Verfahren relativ gut ermittelt ($|\Delta C| = 6,2\%$). Bis auf zwei Ausnahmefälle (A5 Heppenheim - Bensheim und A2 Herten - Gelsenkirchen) liegt die theoretisch ermittelte Kapazität jedoch unter den tatsächlich erreichten Werten ($\Delta C = -2,0\%$). Die Ursache für die beiden auffällig niedrigen Messwerte kann nachträglich nicht identifiziert werden, eine mögliche Erklärung wären jedoch z.B. widrige Witterungsbedingungen. Ähnlich wie im Fall der Arbeitsstellen längerer Dauer vergrößert sich die Differenz zwischen gemessenem und theoretisch berechnetem Wert bei größerer Längsneigung ($\Delta C = -17\%$).

Betrachtet man ausschließlich die in eigenen Messungen erfassten Daten (in Tab. 6-2 fett umrandet), ergibt sich ein noch deutlicheres Bild: die theoretisch ermittelte Kapazität liegt durchschnittlich 8,8% unter den tatsächlich gemessenen Werten.

An zweistreifigen Verkehrsführungen errechnen sich - ähnlich wie im Fall der Arbeitsstellen längerer Dauer - mit dem RBAP-Verfahren bis auf eine Ausnahme höhere Werte als tatsächlich erfasst ($|\Delta C| = 7,8\%$, $\Delta C = +6,0\%$). Die erhebliche Differenz zwischen den einzelnen Messwerten schlägt jedoch deutlich auf die Qualität der Schätzung durch. So liegt zum Beispiel die theoretisch ermittelte Kapazität an der Arbeitsstelle A1 AK Leverkusen - Köln-Niehl 9% unter dem gemessenen Wert, an der A5 Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz bei ähnlichen verkehrlichen Randbedingungen im Gegenzug 21% darüber. Hier kann aufgrund fehlender Beobachtungen lediglich vermutet werden, dass verkehrliche Einflüsse im Verflechtungsbereich der Knotenpunkte eine entscheidende Rolle gespielt haben.

Der Einfluss der Längsneigung auf die Ergebnisse bei zweistreifigen Verkehrsführungen konnte aufgrund fehlender Messdaten nicht untersucht werden.

Ort	Datum	Verkehrsführung	Beschreibung				Vergleich mit vorhandenen Verfahren					
			Längsneigung [%]	SV-Anteil [%]	Witterung	Nahverkehr [%]	Kfz/h			Pkw-E/h		
							Messwerte	RESSEL	Differenz	Messwerte ^{a)}	RBAP	Differenz
Einstufige Verkehrsführungen												
A 5 Heppenheim - Bensheim	18.03.99 Do	2n+1	-	16	-	< 50	1388	1275	-8	1499	1560	+4
A 59 Flughafen Köln/Bonn - AD Porz/AS Rath	03.08.99 Di	2n+1	-	24	-	> 50	1582	1217	-23	1772	1740	-2
A 59 Porz/Rath - Flughafen Köln/Bonn	10.08.99 Di	2n+1	-	16	-	> 50	1634	1275	-22	1765	1740	-1
A2 Herten - Gelsenkirchen	12.09.00 Di	2n+1	-	15	-	> 50	1378	1283	-7	1481	1740	+17
A 43 Marl-Nord - Haltern	17.09.00 Fr	2n+1	-	24	-	< 50	1417	1217	-14	1587	1560	-2
A 45 Olpe-Süd - Freudenberg	26.10.00 Do	2n+1	3,8	29	-	< 50	1187	1167	-2	1875	1560	-17
A 44 Unna-Ost - Werl	24.11.00 Fr	2n+1	-	26	-	< 50	1400	1202	-14	1582	1560	-1
A2 Essen-Gladbeck - Recklinghausen	08.05.01 Di	2n+1	-	33	trocken	> 50	1631	1155	-29	1900	1740	-8
A2 Beckum - Hamm-Uentrop	08.05.01 Di	2n+1	-	33	trocken	< 50	1460	1155	-21	1701	1560	-8
A40 Bochum - Stahlhausen	09.05.01 Mi	2n+1	-	19	trocken	> 50	1820	1253	-31	1993	1740	-13
A45 Lüdenscheid-Süd - Meinerzhagen	10.05.01 Do	2n+1	-	22	trocken	< 50	1501	1231	-18	1666	1560	-6

^{a)} Die Messwerte wurden hier nach dem in den RBAP vorgesehenen Verfahren in Pkw-E umgerechnet.

Tab. 6-2: Vergleich der erhobenen Kapazitätswerte an Arbeitsstellen kürzerer Dauer (einstufige Verkehrsführungen) mit den Angaben aus der Literatur

RESSEL

Die Kapazität von einstufigen Verkehrsführungen auf ebenen Streckenabschnitten wird an allen beobachteten Arbeitsstellen niedriger geschätzt ($\Delta C = -18,7\%$). Auch hier verstärkt sich der Effekt ($\Delta C = -24,8\%$), wenn man ausschließlich die direkt gemessenen Daten berücksichtigt. Die Kapazität der Arbeitsstelle mit hoher Längsneigung bildet das Modell dagegen gut ab ($\Delta C = -18,7\%$). Insgesamt ist jedoch einschränkend zu erwähnen, dass die Ermittlung der Kapazitätswerte bei RESSEL auf der Beobachtung des Verkehrsablaufs an Arbeitsstellen längerer Dauer beruht, so dass der hier vorgenommene Vergleich nur bedingt aussagekräftig ist.

Ort	Datum	Verkehrsführung	Beschreibung				Vergleich mit vorhandenen Verfahren					
			Längsneigung [%]	SV-Anteil [%]	Witterung	Nahverkehr [%]	Kfz/h			Pkw-E/h		
			Messwerte	RESEL	Differenz	Messwerte a)	RBAP	Differenz				
Mehrstreifige Baustellenverkehrsführung												
A 3 AK Hilden - Mettmann	11.08.99 Mi	3n+2	< 2	20	-	< 50	2692	2875	+7	2961	3200	+8
A 3 AK Hilden - Mettmann	12.08.99 Mi	3n+2	< 2	17	-	< 50	2896	2923	+1	3142	3200	+2
A 4 Köln/Poll - Köln-Süd	08.09.99 Mi	3n+2	< 2	22	-	> 50	2849	2845	0	3162	3570	+13
A 1 Köln/Lövenich - AK Köln-Nord	15.09.99 Mi	3n+2	< 2	25	-	> 50	3080	2800	-9	3465	3570	+3
A2 Kamen/Bergkamen - Dortmund-Nordost	13.09.99 Mo	3n+2	< 2	16	-	> 50	3273	2939	-10	3535	3570	+1
A2 AK Bad Oeynhausen - Porta Westfalica	10.08.00 Do	3n+2	< 2	38	-	< 50	3425	2605	-24 b)	4075	3200	-21 b)
A1 AK Leverkusen-West - Köln/Niel	11.08.99 Mi	3n+2	< 2	17	-	> 50	3606	2932	-19	3913	3570	-9
A 5 Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM	23.02.99 Di	3n+2	< 2	16	-	> 50	2729	2939	+8	2947	3570	+21
A 5 Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM	24.02.99 Mi	3n+2	< 2	16	-	> 50	3165	2939	-7	3418	3570	+4
A 5 Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM	06.05.99 Do	3n+2	< 2	16	-	> 50	2938	2939	0	3173	3570	+13
A 5 Friedberg - Bad Homburger Kreuz	23.06.99 Mi	3n+2	< 2	16	-	> 50	3187	2939	-8	3442	3570	+4

a) Die Messwerte wurden hier nach dem in den RBAP vorgesehenen Verfahren in Pkw-E umgerechnet.

b) Der Lkw-Anteil von 38% erscheint im Vergleich zu anderen Daten sehr hoch. Ob diese Differenz auf einen Erfassungsfehler zurückzuführen ist, kann jedoch nicht bestimmt werden. Daher geht diese Arbeitsstelle nicht in die Bewertung ein.

Tab. 6-3: Vergleich der erhobenen Kapazitätswerte an Arbeitsstellen kürzerer Dauer (zweistufige Verkehrsführungen) mit den Angaben aus der Literatur

An zweistufigen Verkehrsführungen werden insgesamt relativ gute Ergebnisse erzielt (durchschnittlicher Abweichungsbetrag $|\Delta C| = 6,9\%$), wobei die Schätzwerte im Mittel niedriger als die tatsächlich gemessenen Werte liegen ($\Delta C = -3,7\%$). Auch hier treten jedoch zwischen den Einzelergebnissen große Differenzen auf, deren mögliche Ursache bereits erläutert wurde.

6.1.4 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass beide Verfahren zum Teil gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Werten liefern. Je nach Anzahl der Fahrstreifen im Arbeitsstellenbereich, dem gemessenen Schwerverkehrsanteil sowie der vorhandenen Längsneigung sind jedoch in einigen Fällen gravierende Abweichungen festzustellen. Im Folgenden soll daher ein neues Verfahren entwickelt werden, das in der Lage ist, die Kapazität eines Arbeitsstellenengpasses unter allen Randbedingungen zutreffend abzubilden.

Wie in Kapitel 5 ausführlich beschrieben, stammen die zum Vergleich herangezogenen Messdaten aus unterschiedlichen Quellen. Während für die in den Messungen erhobenen Daten konkrete Aussagen zu vorherrschenden Randbedingungen vorliegen, stehen bei den automatisch erhobenen Werten ausschließlich Verkehrsdaten (zum Teil bereits in aggregierter Form) zur Verfügung. Informationen zur Witterung, vor allem aber zum Verkehrszustand im Umfeld der Arbeitsstelle, z.B. Störungen durch Unfälle bzw. Nothalte im Zulaufbereich oder stromabwärts der Arbeitsstelle, fehlen. Aus diesem Grund wird bei der Anpassung des neuen Verfahrens den manuell erhobenen Daten ein höheres Gewicht verliehen.

6.2 Modifizierung der vorhandenen Verfahren an Hand der gewonnenen Datenbasis

6.2.1 Grundsätzlicher Aufbau des neuen Verfahrens

Auf Grund der Vielfalt der Faktoren, die einen Einfluss auf die Kapazität eines Baustellenengpasses ausüben, wird ein Verfahren in Anlehnung an die RBAP gewählt, bei dem ausgehend von einer Grundkapazität die einzelnen Einflüsse in Form von Anpassungsfaktoren berücksichtigt werden. Da auf Grund des in Kapitel 5 beschriebenen Aufwandes bei der Erstellung der Datenbasis bei Weitem nicht alle Kombinationen von Faktoren an Baustellen gemessen werden konnten, basiert das folgende Modell im Wesentlichen auf Plausibilitätsüberlegungen, in welche die vorhandene Datenbasis sinnvoll eingebunden wurde:

Die Kapazität berechnet sich für jeden Behelfsfahrstreifen getrennt, wobei die jeweiligen Anpassungsfaktoren multiplikativ verknüpft werden. Die Grundkapazität wird in Anlehnung an die Richtlinien für die Baubetriebsplanung (RBAP) auf 1830 Pkw-E/h pro Fahrstreifen festgesetzt. Dabei handelt es sich nicht um einem maximal erreichbaren Wert, sondern vielmehr um einen Basiswert, der die überwiegende Anzahl aller Arbeitsstellen repräsentiert. Kapazitäten, die bei einem zugrunde gelegten Bezugsintervall von einer Stunde deutlich über diesen Wert hinaus reichten, konnten in den eigenen Erhebungen und Auswertungen lediglich in Ausnahmefällen nachgewiesen werden. Bei diesen Fällen (hierzu zählt zum Beispiel eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer auf der A40, in der - bezogen auf Pkw-Einheiten - deutlich höhere Werte realisiert wurden) handelte es sich jedoch ausschließlich um hoch belastete Stre-

ckenabschnitte in stark verdichteten Ballungsräumen, die in keinem Fall als repräsentativ für die Gesamtheit aller Arbeitsstellen anzusehen sind.

6.2.2 Einfluss der Verkehrsführung

Um die Wirkung der Verkehrsführung im Arbeitsstellenbereich auch hinsichtlich der Unterschiede zwischen Tages- und Dauerbaustellen zu berücksichtigen, werden insgesamt vier verschiedene Faktoren angesetzt. Dazu zählen:

- Bei allen Verkehrsführungen:
 - Reduktion der Anzahl der Fahrstreifen: Faktor 0,95
- Bei Dauerbaustellen
 - Überleitung von Fahrstreifen auf die Gegenfahrbahn: Faktor 0,9 bis 0,95 (je nach Ausbildung der Überleitung)
 - Geringe Fahrstreifenbreite: Faktor 0,95 ($b_{FS} < 3,25/ 2,75\text{m}$)
- Bei Tagesbaustellen:
 - Verschwenkung von Fahrstreifen (Verkehrsführungen mit Überleitung auf den Standstreifen): Faktor 0,9.

Der letztgenannte Faktor für die Berücksichtigung von Fahrstreifenüberleitungen auf den Standstreifen überschreitet deutlich den von STÖCKERT vorgeschlagenen Wert 0,5 (siehe Abschnitt 3.4.2, [STÖCKERT, 2001]). Zwar konnte diese Randbedingung im Rahmen der eigenen Erhebungen nicht direkt beobachtet werden, dennoch erscheint der von STÖCKERT angesetzte Faktor zu niedrig. Dies beruht vor allem auf der Überlegung, dass in der vorliegenden Arbeit die Kapazität eines Baustellenengpasses untersucht werden soll und insofern von einer Überlastung und damit einer vollständigen Nutzung des zu Verfügung stehenden Querschnitts auszugehen ist. Diese Aussage wurde ebenfalls von verschiedenen Verkehrsbehörden bestätigt. Die Frage nach der Beurteilung derartiger Verkehrsführungen ist an dieser Stelle nicht abschließend zu klären, zumal angenommen werden kann, dass die Akzeptanz und damit auch die Kapazität durch den einsetzenden Gewöhnungseffekt (vor allem in Ballungsräumen) ständig gesteigert wird.

In der Forschungsarbeit „Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen“ [BECKMANN et al., 2001], auf der die vorliegende Arbeit aufbaut, war für Tagesbaustellen zusätzlich ein genereller Reduktionsfaktor in Höhe von 0,95 vorgesehen. Dieser Ansatz gründete auf der durch Plausibilitätsüberlegungen gestützten Annahme, dass die im Vergleich zu Dauerbaustellen einfachere Ausstattung (Vorwarntafeln, Markierungen) eine Reduktion der Kapazität bewirkt. Messungen an Tagesbaustellen, die nach Abschluss des Projektes durchgeführt wurden, bestätigten diese Annahme jedoch nicht, so dass der entsprechende Faktor nicht mehr angesetzt wird.

In Gesprächen mit verantwortlichen Stellen wurde weiterhin darauf hingewiesen, dass sehr niedrige zulässige Geschwindigkeiten im Überleitungsbereich die Kapazität zusätzlich beein-

trächtigen. Da jedoch bei den eigenen Erhebungen und Auswertungen ein derartiger Einfluss nicht mit Sicherheit nachwiesen werden konnte (zumal im Regelfall die zulässige Geschwindigkeit bei 80 km/h und in Ausnahmefällen bei 60 km/h lag), wird in dem hier beschriebenen Verfahren kein diesbezüglicher Faktor angenommen.

6.2.3 Einfluss der Zusammensetzung des Fahrerkollektivs

Indikatoren für die Zusammensetzung des Fahrerkollektivs sind zum einen die Lage des Streckenabschnittes im Netz und zum anderen der betrachtete Zeitraum. Es ist davon auszugehen, dass Verkehrsteilnehmer in Ballungsräumen häufig der Gruppe des Berufsverkehrs zugeordnet werden können und insofern routinierter mit hohen Verkehrsdichten umgehen als Verkehrsteilnehmer, die sich auf überregionalen und daher schwächer ausgelasteten Streckenabschnitten bewegen. Bei der Auswertung der erhobenen Daten zeigte sich jedoch, dass eine Unterteilung der geografischen Lage in lediglich zwei Klassen (Ballungsraum/überregionale Verbindung) die Verkehrsverhältnisse nur unzureichend darstellt. Wie bereits in Abschnitt 6.2.1 beschrieben, weisen einige Arbeitsstellen auf extrem hoch belasteten Streckenabschnitten mit Stadtautobahncharakter (z.B. A40) Kapazitäten auf, die deutlich über den auf anderen, ebenfalls in Ballungsräumen gemessenen Werten liegen. Aus diesem Grund wird eine dritte Kategorie eingeführt, die als „hoch belastete Stadtautobahn“ bezeichnet wird.

Einige der ausgewerteten Daten stammen aus dem Bereich von mobilen Stauwarnanlagen. Obwohl die beiden betrachteten Anlagen nicht in Ballungsräumen lagen, konnte eine vergleichsweise hohe Kapazität erreicht werden. Die Ursache hierfür ist in der durch die Anlage verursachten zusätzlichen Harmonisierung der Geschwindigkeiten im Vorfeld der Baustelle zu sehen. Daher scheint in diesen Fällen der Ansatz eines Reduktionsfaktors für die Lage außerhalb eines Ballungsraumes nicht sinnvoll.

Zusätzlich ist eine zeitliche Einteilung des Fahrerkollektivs in Normalverkehr und Urlaubsverkehr vorzunehmen, wobei auch Arbeitstage vor langen Wochenenden und Feiertagen zur Kategorie Urlaubsverkehr gezählt werden sollten. In diesen Zeiträumen ist mit einem weniger routinierten Fahrerkollektiv zu rechnen, woraus eine Reduktion der Kapazität des betrachteten Streckenabschnittes resultiert.

Folgende Faktoren werden zur Berücksichtigung des Fahrerkollektivs vorgeschlagen:

- hoch belastete Stadtautobahn: Faktor 1,05-1,10
- überregionale Verbindungsstrecke: Faktor 0,90-0,95
- Urlaubsverkehr: generell Faktor 0,90 (ohne Berücksichtigung der Lage des Streckenabschnitts)

6.2.4 Einfluss der Umfeldbedingungen

Zu den Umfeldbedingungen zählen sowohl die Witterungsbedingungen (wie Nässe, Glätte, Regen, Schneefall) als auch die Sichtbedingungen (hell/dunkel/Nebel). Zusätzlich kann ein weiterer Faktor in diese Gruppe eingeordnet werden, der die Arbeitsstelle selbst betrifft. Bei den im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Befragungen wurde dieser Einflussfaktor immer wieder hervorgehoben. Demnach sinken die Konzentration der Verkehrsteilnehmer und damit auch die Kapazität eines Baustellenengpasses bei steigender Arbeitsaktivität innerhalb des Arbeitsbereiches.

Die Anwendbarkeit dieser Faktoren für eine mittel- bis langfristige Prognose ist als schwierig einzustufen, da sowohl die Witterungsbedingungen als auch die Aktivität innerhalb des Arbeitsbereiches lediglich auf der Basis aktueller Informationen abgeschätzt werden können. Sollten die betreffenden Daten jedoch im Einzelfall vorliegen, ist je nach Ausmaß der zu erwartenden Beeinträchtigung ein Reduktionsfaktor zwischen 0,85 und 0,95 anzusetzen.

6.2.5 Einfluss des Schwerverkehrs und der Längsneigung

Sowohl in den RBAP als auch bei RESSEL wird der Einfluss des Schwer- bzw. Güterverkehrsanteils und der Längsneigung berücksichtigt. Dies geschieht im ersten Fall durch eine Umrechnung der SV-Fahrzeuge in längsneigungsabhängige Pkw-Einheiten. RESSEL dagegen definiert Kapazitätswerte für bestimmte Randbedingungen hinsichtlich Längsneigung und SV-Anteil, wobei die wesentliche Kapazitätsreduktion durch die Gradiente bestimmt wird, jedoch vom SV-Anteil unabhängig bleibt. Diese Vorgehensweise entspricht im Grundsatz dem Prinzip des HBS [FGSV, 2001]. Der grundlegende Unterschied zwischen RBAP und RESSEL resultiert also aus der Frage, welche Fahrzeugart primär für Kapazitätseinbußen an Steigungsstrecken verantwortlich ist - der Schwerverkehr oder der Pkw-Verkehr.

Diese systematische Differenz äußert sich in der Größe der Grundkapazität bei reinem Pkw-Verkehr. RESSEL setzt für alle Verkehrsführungen sehr niedrige Grundkapazitäten an, berücksichtigt im Gegenzug dazu den Einfluss des Güterverkehrs aber selbst bei großen Längsneigungen nur mit Äquivalenzwerten¹⁷ zwischen 1,5 und 2 Pkw-E/Lkw (vgl. Abschnitt 3.5.2). In den RBAP werden die Grundkapazitäten höher angesetzt, zum Ausgleich können die Pkw-Äquivalenzwerte bei großen Längsneigungen bis zu 6 Pkw-E/Lkw betragen. In beiden Verfahren ist der Einfluss eines einzelnen Lkw unabhängig vom gesamten Schwer- bzw. Güterverkehrsanteil und von der Länge der Steigungsstrecke.

Aufgrund der geringen Datenmenge, die an Arbeitsstellen im Bereich von Steigungsstrecken erfasst wurde, kann an dieser Stelle kein regressionsbasiertes Verfahren zur Bestimmung

¹⁷ Die Verwendung von Äquivalenzwerten ist von RESSEL nicht vorgesehen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden diese Werte lediglich zu Vergleichszwecken ermittelt.

von Pkw-Äquivalenzwerten entwickelt werden. Dennoch zeigen die vorhandenen Daten einige Grundzusammenhänge auf:

- Mit steigender Längsneigung wird der Pkw-Äquivalenzwert größer.
- Bei positiver Längsneigung (Steigung) treten erheblich größere Pkw-Äquivalenzwerte auf als bei negativer (Gefälle).
- Mit steigendem GV-Anteil wird der Pkw-Äquivalenzwert kleiner.
- Mit steigender Länge des Abschnittes mit Längsneigung wird der Pkw-Äquivalenzwert größer.

Diese Zusammenhänge sind bereits im Highway Capacity Manual (HCM) [TRB, 2000] sehr gut berücksichtigt. Bei einem ersten Vergleich der eigenen Messergebnisse mit den ursprünglich im HCM 1994 [TRB, 1994] angegebenen Werten zeigte sich jedoch, dass die in Deutschland erhobenen Äquivalenzwerte deutlich niedriger lagen als die im HCM 1994 angegebenen. Aus diesem Grund wurde ein neuer Ansatz zur Bestimmung der Äquivalenzwerte entwickelt, der im Grundsatz dem Ansatz des HCM 1994 entspricht, bei dem jedoch durch eine Abminderung der Werte eine Anpassung an die eigene Datenbasis erreicht wurde. (Mit der Neufassung des HCM im Jahr 2000 sind auch dort die entsprechenden Äquivalenzwerte reduziert worden, so dass die aktuellen Angaben bis auf geringfügige Abweichungen dem hier vorgestellten Verfahren entsprechen.)

Um eine leichtere Handhabbarkeit des Verfahrens gewährleisten zu können, wurde (abweichend vom HCM) ein mathematischer Ansatz zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Äquivalenzwert und Schwerverkehrsanteil gewählt, der auf der folgenden Gleichung basiert:

$$E = 1,5 + a \cdot SV^{-b} \quad \text{Gl. 6-3}$$

Mit: E: Äquivalenzwert
 a, b Modellparameter (siehe Abb. 6-1 sowie Anlage 7)
 SV Schwerverkehrsanteil [%]

Für Längsneigungen zwischen -4% und +2% gilt ein einheitlicher Äquivalenzwert von 1,5 Pkw-E/Lkw. Liegen stärkere Längsneigungen vor, ist der Äquivalenzwert in Abhängigkeit von der Längsneigung, dem SV-Anteil zum betreffenden Zeitpunkt und der Länge des betrachteten Abschnittes mit Längsneigung nach Gleichung 6-3 zu ermitteln. Abb. 6-1 zeigt beispielhaft eine daraus resultierende Kurvenschar für die Gradienten +5% bei verschiedenen Abschnittslängen. Eine vollständige Darstellung der Äquivalenzwerte sowie der Parameter, die für die Berechnung notwendig sind, enthält Anlage 7.

Existieren innerhalb eines Arbeitsstellenbereiches mehrere Abschnitte mit Längsneigungen über 2% bzw. unter -4%, ist der ungünstigste (größte) Äquivalenzwert zu ermitteln. Für mehrere hintereinander liegende Abschnitte mit ähnlicher (gleichgerichteter) Längsneigung kann näherungsweise ein mittlerer Wert über die gesamte Länge angesetzt werden.

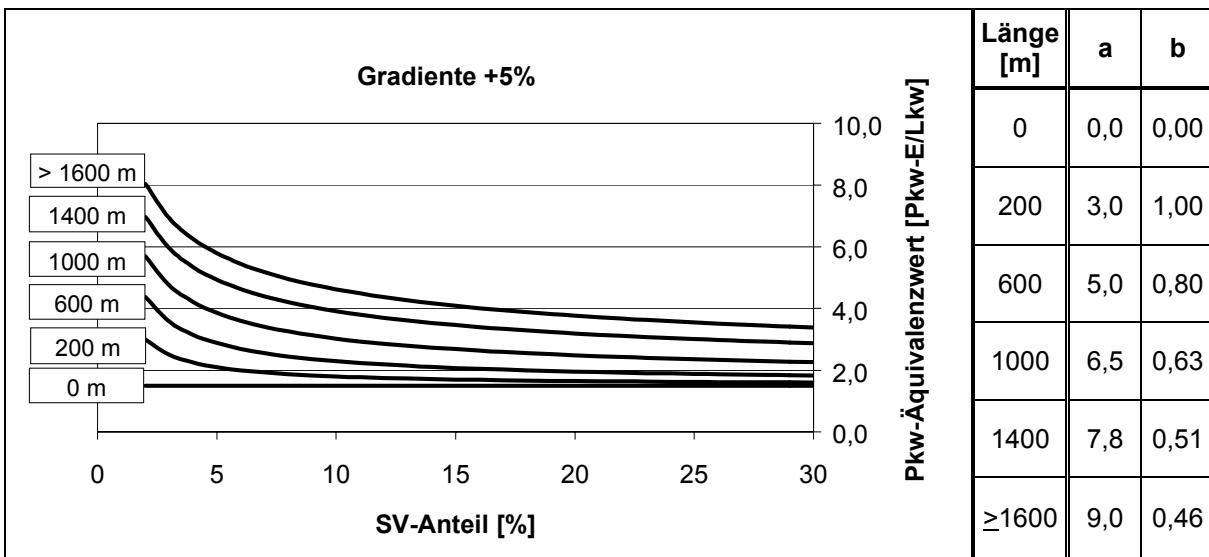


Abb. 6-1: Beispiel für die Ermittlung von Äquivalenzwerten für die Umrechnung von SV-Anteilen in Pkw-Einheiten bei einer Längsneigung von +4/-6% und unterschiedlichen Abschnittslängen

Nach der Ermittlung des jeweiligen Äquivalenzwertes E berechnet sich der Faktor f_{SV} zur Umwandlung des (Grund-)Kapazitätswertes von Pkw-Einheiten/h in Kfz/h folgendermaßen:

$$f_{SV} = \frac{1}{(1 - SVA + SVA \cdot E)} \quad \text{Gl. 6-4}$$

Mit:
 f_{SV} Reduktionsfaktor
 SVA Schwerverkehrsanteil (als Dezimalzahl)
 E Äquivalenzwert in Pkw-E/Lkw

6.2.6 Knotenpunkte

Bei der Modellierung des Einflusses von Knotenpunkten im Arbeitsstellenbereich ist die Information über die Rampenverkehrsbelastungen eine entscheidende Eingangsgröße. Zum einen erhöht oder reduziert sich - je nach Verhältnis zwischen abfließenden und zufließenden Verkehrsströmen - in direkter Form die Anzahl der Fahrzeuge, die den Arbeitsstellenengpass passieren müssen. Zum anderen bewirken Verflechtungsvorgänge an stark belasteten Knotenpunkten eine zum Teil nennenswerte Reduktion der Kapazität der durchgehenden Fahrbahn (siehe z.B. Abschnitt 5.2.3, UStWA Schwerte).

Der erstgenannte Faktor kann, zumindest bei Verfügbarkeit entsprechender Verkehrsdaten, relativ gut eingeschätzt werden. Voraussetzung ist jedoch, dass sich durch die Einrichtung der Arbeitsstelle keine nennenswerten Verlagerungen ergeben. Fließen am Knotenpunkt innerhalb der Arbeitsstelle mehr Fahrzeuge zu als ab, ist die erwartete Kapazität des Baustellenengpasses stromabwärts des Knotenpunktes um den Betrag ΔQ_{KP} zu reduzieren. Im entgegengesetzten Fall (Abfluss > Zufluss) wird eine Kapazitätssteigerung nicht wirksam, da

hier der Baustellenbereich stromaufwärts des Knotenpunktes für den Verkehrsablauf maßgebend ist.

Zur Berücksichtigung von Turbulenzen im Verflechtungsbereich von Einfahrten existieren verschiedene Untersuchungen (siehe auch Abschnitt 3.9), die sich jedoch im Wesentlichen auf Streckenabschnitte außerhalb von Arbeitsstellen beziehen, so dass spezielle Randbedingungen, wie z.B. verengte Fahrstreifen und verkürzte Beschleunigungsstreifen unberücksichtigt bleiben. Eine Anpassung der vorhandenen Ansätze an diese Randbedingungen war aufgrund der geringen Datenmenge, die in der vorliegenden Arbeit im Bereich von Knotenpunkten analysiert wurde, ebenfalls nicht möglich. Festzuhalten bleibt daher lediglich die rein qualitative Aussage, dass hohe Rampenströme - insbesondere im Einfahrbereich - eine über die reine Addition der Ströme hinausgehende Reduktion der Kapazität bewirken. Das Ausmaß der Reduktion erhöht sich bei steigendem Schwerverkehrsanteil auf der Rampe und auf der Hauptfahrbahn sowie bei Verschlechterung der fahrdynamischen Eigenschaften des Einfahrbereichs.

6.2.7 Verknüpfung der Faktoren

Wie eingangs beschrieben, soll die Verknüpfung der Faktoren multiplikativ erfolgen. Ein Aspekt, der in diesem Zusammenhang näher betrachtet werden muss, ist das eventuelle Auftreten von Kompensationseffekten bei der Berechnung der Kapazität von Baustellenverkehrsführungen, für die überdurchschnittlich viele Reduktionsfaktoren berücksichtigt werden müssen.

Tab. 6-4 enthält beispielhaft verschiedene mögliche Gesamtreduktionsfaktoren und daraus resultierende Kapazitäten für eine einstreifige Verkehrsführung (VF 2+0). In Zeile 1 sind die jeweils stärksten Reduktionsfaktoren gewählt (Urlaubsverkehr, starke Beeinträchtigung durch Umfeld-/ Witterungsbedingungen, schlecht ausgebauten Überleitung auf die Gegenfahrbahn), in Zeile 4 werden dagegen optimale Bedingungen unterstellt. Nach dem hier vorgeschlagenen Verfahren ergibt sich ein maximaler Reduktionsfaktor $f_{red,max}$ von 0,61 und damit eine Engpasskapazität C_E von ca. 1115 Kfz/h (Zeile 1). Im Vergleich dazu errechnet sich bei der gleichen Verkehrsführung unter optimalen Randbedingungen ein Reduktionsfaktor von lediglich 0,92 ($C_E = 1690$ Kfz/h).

Fahrer-kollektiv	Umfeld	FS-Reduktion	FS-Überleitung	Schwer-verkehr	$f_{red,gesamt}$	Kapazität [Kfz/h]
0,90	0,85	0,95	0,90	0,93	0,61	1115
0,95	0,95	0,95	0,90	0,93	0,72	1315
1,00	1,00	0,95	0,95	0,93	0,84	1535
1,10	1,00	0,95	0,95	0,93	0,92	1690

hier: mittlerer Schwerverkehrsanteil 15% (ohne Berücksichtigung von Längsneigungen)

Tab. 6-4: Spannweite möglicher Kapazitätswerte bei unterschiedlichen Randbedingungen am Beispiel einer 2+0-Verkehrsführung

Die Frage nach der Plausibilität der (theoretischen) maximalen Reduktionsfaktoren lässt sich an dieser Stelle nicht abschließend beantworten, zumal - wie bereits erwähnt - nur für wenige Kombinationen von Randbedingungen reale Verkehrsdaten im Bereich der Leistungsfähigkeit erfasst werden konnten. Da jedoch auch bei der Analyse dieser Verkehrsdaten große Spannweiten in den Kapazitätswerten auftraten, erscheint der vollständige Ansatz der jeweils zugehörigen Reduktionsfaktoren ohne Berücksichtigung von Kompensationseffekten angemessen.

6.3 Überprüfung des neuen Verfahrens an Hand der Datenbasis

Um einen Aufschluss über die Güte des entwickelten Verfahrens zu erhalten, wurden die berechneten Werte, analog den Berechnungen im Abschnitt 6.1, den tatsächlich gemessenen Werten gegenübergestellt (Tab. 6-5 bis Tab. 6-7). Einschränkend muss bemerkt werden, dass nicht alle vorgesehenen Faktoren zur Abminderung des Kapazitätsgrundwertes ordnungsgemäß angesetzt werden konnten. Dies betraf insbesondere die umfeldbedingten Faktoren, deren nachträgliche Zuordnung zu den automatisch erfassten Messwerten nicht möglich war.

Arbeitsstellen längerer Dauer

In allen Fällen - auch bei starken Längsneigungen im Baustellenbereich - lassen sich mit dem neuen Verfahren sehr gute Übereinstimmungen mit den Messwerten feststellen. Der durchschnittliche Abweichungsbetrag $|\Delta C|$ für einstreifige Verkehrsführungen beläuft sich auf lediglich 1,0%, für mehrstreifige Verkehrsführungen auf 4,1%. Systematische Über- oder Unterschätzungen sind kaum feststellbar, die durchschnittlichen Abweichungen ΔC unter Berücksichtigung der Vorzeichen betragen 1,0% bzw. 0,3%.

Arbeitsstellen kürzerer Dauer

Bei der Analyse der einstreifigen Verkehrsführungen ergibt sich ein durchschnittlicher Abweichungsbetrag $|\Delta C|$ von 4,9%, wobei die nach dem Modell ermittelten Werte im Mittel etwas höher als die gemessenen liegen ($\Delta C = +2,5\%$). Berücksichtigt man ausschließlich die Messwerte aus den eigenen Erhebungen, bei denen eindeutige Aussagen zu den jeweiligen Randbedingungen getroffen werden können, ermittelt das Modell mit $\Delta C = -3,0\%$ etwas niedrigere Werte als tatsächlich gemessen. Es sind jedoch eindeutige Verbesserungen gegenüber den Vergleichsverfahren feststellbar.

Um die fehlenden Informationen über die vorherrschenden Umfeldbedingungen bei automatisch erfassten Daten auszugleichen, wurde in diesen Fällen zusätzlich eine untere Grenze der Kapazität der einzelnen Tagesbaustellen mit einer dazwischen liegenden Spanne von 10% berechnet. Es zeigt sich, dass bis auf zwei Ausnahmen alle Messwerte in dem somit ermittelten Wertebereich liegen.

Ort	Datum	Verkehrsführung	Reduktionsfaktoren								SV		Kapazität / FS [Kfz/h]	Kapazität Gesamt [Kfzh]	Gemessener Wert [Kfzh]	Differenz [%]	
			Urlaubsverkehr	Ballungsräum	FS-Reduktion	FS-Überleitung	Fahrstreifenbreite	Umfeldbedingungen	Arbeitsaktivität	Aquivalenzwert	SV-Anteil						
Einstreifige Verkehrsführungen																	
A 7 Rhüden - Bockenem	19.11.98 Do	2n+1	1,00 0,95	0,95 0,95	1,00 0,95	1,00 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,23	0,23	1481	1481	1484	0		
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald	19.03.99 Fr	2+0	1,00 0,90	0,90 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	4,4 0,08	0,08	1229	1229	1220	1		
A 4 Bad Hersfeld - Friedewald	25.03.99 Do	2+0	1,00 0,90	0,90 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	3,5 0,17	0,17	1097	1097	1070	2		
A 7 Friedland - Göttingen	09.06.99 Mi	2n+1	1,00 0,95	0,95 0,95	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,25	0,25	1395	1395	1386	1		
Mehrstreifige Verkehrsführungen																	
A 7 Guxhagen - Kassel	23.03.99 Di	3n+2	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	2,4 0,20	0,20	1164 1226	2390	2316	3		
A 3 Wiesentheid - Schlüsselfeld	03.07.99 Sa	4s+0	0,90 0,90	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,06	0,06	1371 1443	2814	2792	1		
A 1 Dortmund-Ems-Kanal	16.07.99 Fr	4s+0	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,10	0,10	1494 1573	3067	3114	-2		
A 1 Dortmund-Ems-Kanal	03.07.99 Sa	4s+0	0,90 0,90	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,03	0,03	1391 1464	2856	2752	4		
A 9 Münchberger Senke	18.06.99 Fr	4s+0	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	3,0 0,17	0,17	1178 1240	2419	2515	-4		
A 9 Münchberger Senke	20.06.99 So	4s+0	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	3,4 0,11	0,11	1245 1310	2555	2915	-12		
A1 DO/Unna - Schwerte	04.12.00 Mo	4s+0	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 0,90	0,90 0,90	1,5 0,22	0,22	1272 1339	2611	2524	3		
A1 DO/Unna - Schwerte	03.12.00 So	4s+0	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,06	0,06	1523 1603	3127	2983	5		
A1 DO/Unna - Schwerte	20.02.01 Do	4s+0	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	1,00 1,00	0,95 0,95	1,00 1,00	0,90 0,90	1,5 0,23	0,23	1333 1403	2736	2698	1		
A1 DO/Unna - Schwerte	11.02.01 So	4s+0	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 0,95	1,00 1,00	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,03	0,03	1627 1713	3340	3436	-3		
A 5 Bad Homburger Kreuz - Friedberg	22.02.99 Mo	3n+3	1,00 1,00 1,00	1,00 1,00 1,00	1,00 1,00 1,00	1,00 1,00 1,00	0,95 0,95 0,95	1,00 1,00 1,00	0,95 0,95 0,95	1,5 0,16	0,16	1610 1610 1739	4958	4618	7		

Tab. 6-5: Vergleich der Messwerte an Dauerbaustellen mit den nach dem neuen Modell ermittelten Kapazitätswerten

Ort	Datum	Verkehrsführung	Reduktionsfaktoren						SV		Kapazität / FS [Kfz/h]	Kapazität gesamt [Kfz/h] (obere Grenze)	Kapazität gesamt [Kfz/h] (-10% - untere Grenze)	Gemessener Wert [Kfz/h]	Differenz [%] (obere Grenze)	Differenz [%] (untere Grenze)
			Urlaubstransport	Ballungsräum	FS-Reduktion	Umfeldbedingung	Arbeitsaktivität	Aquivalenzwert	SV-Anteil							
Einstufige Verkehrsführungen																
A5 Heppenheim-Bensheim	18.3.99 Do	2n+1	1,00	0,95	0,95	1,00	1,00	1,5	0,16	1529	1529	1376	1388	10	-1	
A59 Fhf. Köln - Porz/Rath	03.08.99 Di	2n+1	1,00	1,05	0,95	1,00	1,00	1,5	0,24	1630	1630	1467	1582	3	-7	
A 59 Porz/Rath - Fhf. Köln	10.08.99 Di	2n+1	1,00	1,05	0,95	1,00	1,00	1,5	0,16	1690	1690	1521	1634	3	-7	
A2 Herten - Gelsenkirchen	12.09.00 Di	2n+1	1,00	1,00	0,95	1,00	1,00	1,5	0,15	1617	1617	1455	1378	17	6	
A 43 Marl-Nord - Haltern	17.09.00 Fr	2n+1	1,00	0,95	0,95	1,00	1,00	1,5	0,24	1475	1475	1327	1417	4	-6	
A 45 Olpe-Süd - Freudenberg	26.10.00 Do	2n+1	1,00	0,95	0,95	1,00	1,00	2,4	0,29	1175	1175	1057	1187	-1	-11	
A 44 Unna-Ost - Werl	24.11.00 Fr	2n+1	1,00	0,95	0,95	1,00	1,00	1,5	0,26	1462	1462	1315	1400	4	-6	
A2 E-Gladbeck - Recklinghausen	08.05.01 Di	2n+1	1,00	1,05	0,95	1,00	1,00	1,5	0,33	1567	1567	-	1631	-4	-	
A2 Beckum - Hamm-Uentrop	08.05.01 Di	2n+1	1,00	0,95	0,95	1,00	1,00	1,5	0,33	1418	1418	-	1460	-3	-	
A40 Bochum - Stahlhausen	09.05.01 Mi	2n+1	1,00	1,1	0,95	1,00	1,00	1,5	0,19	1746	1746	-	1820	-4	-	
A45 Lüdensch. - Meinerzhagen	10.05.01 Do	2n+1	1,00	0,95	0,95	1,00	1,00	1,5	0,22	1488	1488	-	1501	-1	-	

Tab. 6-6: Vergleich der Messwerte an Tagesbaustellen mit den nach dem neuen Modell ermittelten Kapazitätswerten (einstufige Verkehrsführungen)

Der durchschnittliche Abweichungsbetrag $|\Delta C|$ für zweistufige Verkehrsführungen liegt mit 9,4% über den in den Vergleichsverfahren ermittelten Werten (RESSEL: 6,9%; RBAP 7,8%). Da jedoch - wie bereits eingangs beschrieben - die dem Vergleich zugrunde liegenden Messwerte aus automatischen Erfassungen stammen und somit in keinem Fall detaillierte Aussagen zu äußeren Randbedingungen vorliegen, wird auf eine weitere Veränderung des Verfahrens verzichtet. Denkbare, jedoch mangels Beobachtungen nicht nachweisbare Einflussfaktoren können zum einen widrige Witterungsbedingungen und zum anderen verkehrliche Einflüsse der Knotenpunkte (Autobahnkreuze) in der Arbeitsstellenumgebung sein.

Ort	Datum	Verkehrsführung	Reduktionsfaktoren						SV		Kapazität / FS [Kfz/h]	Kapazität gesamt [Kfz/h] (Obere Grenze)	Kapazität gesamt [Kfz/h] (-10% - untere Grenze)	Gemessener Wert [Kfz/h]	Differenz [%] (Obere Grenze)	Differenz [%] (untere Grenze)	
			Urlaubsverkehr	Ballungsraum	FS-Reduktion	Umfeldbedingung	Arbeitsaktivität	Äquivalenzwert									
Zweistufige Verkehrsführungen																	
A3 Hilden - Mettmann	11.08.99 Mi	3n+2	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,2	1501 1580	3082	2774	2692	14	3			
A3 Hilden - Mettmann	12.08.99 Do	3n+2	1,00 1,00	0,95 0,95	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,17	1522 1602	3124	2812	2896	8	-3			
A4 Köln-Poll - Köln/Süd	08.09.99 Mi	3n+2	1,00 1,00	1,05 1,05	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,22	1645 1731	3376	3038	2849	18	7			
A1 Köln-Löv. - Köln/Nord	15.09.99 Mi	3n+2	1,00 1,00	1,05 1,05	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,25	1623 1708	3331	2998	3080	8	-3			
A2 Kamen/Berg. - Dortmund-NO	13.09.99 Mo	3n+2	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,16	1610 1694	3304	2974	3273	1	-9			
A1 AK Leverkusen - Köln/Niehl	11.08.99 Mi	3n+2	1,00 1,00	1,05 1,05	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,17	1682 1771	3453	3108	3606	-4	-14			
A5 Friedberg - Bad Homburg	23.06.99 Mi	3n+2	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,16	1610 1694	3304	2974	3187	4	-7			
A5 Bad Hombg. - Frankfurt NW	06.05.99 Do	3n+2	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,16	1610 1694	3304	2974	2938	12	1			
A5 Bad Hombg. - Frankfurt NW	23.02.99 Di	3n+2	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,16	1610 1694	3304	2974	2729	21	9			
A5 Bad Hombg. - Frankfurt NW	24.02.99 Mi	3n+2	1,00 1,00	1,00 1,00	0,95 1,00	1,00 1,00	1,00 1,00	1,5 0,16	1610 1694	3304	2974	3165	4	-6			

Tab. 6-7: Vergleich der Messwerte an Tagesbaustellen mit den nach dem neuen Modell ermittelten Kapazitätswerten (zweistufige Verkehrsführungen)

Zusammenfassung

Das in den vorangegangenen Abschnitten entwickelte Verfahren ist prinzipiell gut geeignet, die Kapazität eines Baustellenengpasses unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen zu ermitteln. Tab. 6-8 enthält noch einmal alle in den vergangenen Abschnitten dargestellten Reduktionsfaktoren in einer Übersicht.

Auf eine Darstellung der Kapazitäten für einzelne Verkehrsführungen soll aufgrund der Vielzahl möglicher Kombinationen von Randbedingungen (siehe z.B. Tab. 6-4) verzichtet werden.

Grundkapazität 1830 Pkw-E/h/Fahrstreifen		Reduktionsfaktor
Allgemein		
Fahrerkollektiv	Hoch belastete Stadtautobahn	1,05-1,10
	Überregionale Verbindungsstrecke	0,90-0,95
	Urlaubsverkehr	0,90
Widrige Umfeldbedingungen		0,85 - 0,95
Schwerverkehrsanteil + Längsneigung (E = Äquivalenzwert)		1 $(1 - SVA + SVA \cdot E)$
Reduktion eines benachbarten Fahrstreifens		0,95
Arbeitsstellen längerer Dauer		
Überleitung auf die Gegenfahrbahn		0,90 - 0,95
Geringe Fahrstreifenbreite		0,95
Arbeitsstellen kürzerer Dauer		
Verschwenkung von Fahrstreifen		0,90

Tab. 6-8: Übersicht über Faktoren für die Ermittlung der Kapazität von Arbeitsstellenengpässen

Als problematisch erweist sich - insbesondere bei einem größeren Prognosehorizont - die Einschätzung der Umfeldbedingungen, die einen starken Einfluss auf die Verkehrszustände haben. Ein denkbarer Lösungsansatz wäre hier die Ermittlung eines Wertebereiches anstatt eines diskreten Wertes der Kapazität. Eine darauf aufbauende Verkehrsprognose würde jedoch zu keiner eindeutigen Aussage kommen, vielmehr stünden mehrere mögliche Ergebnisse (eventuell mit unterschiedlichen Eintrittswahrscheinlichkeiten) nebeneinander.

7. Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

7.1 Vorbemerkung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden schrittweise die für eine Verkehrsprognose notwendigen Modellierungsgrundlagen erarbeitet und dargestellt. Inhalt des folgenden Kapitels ist die Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Analysen zu einem Verfahren zur Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen eines Engpasses. Grundsätzlich gelten die nachfolgenden Ausführungen für jegliche Arten eines Engpasses (die entsprechenden Grundlagen wurden in Kapitel 3 dargelegt), das besondere Augenmerk lag und liegt jedoch auch hier auf der Entwicklung und der Anwendung eines Verfahrens zur Stauprognose an Arbeitsstellen.

Um eine leichtere Anwendung des Stauprognoseverfahrens zu ermöglichen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Programm SAB (**S**tauprognose an **A**utobahn**b**austellen [OTTO et al., 2001]) entwickelt, dessen grundsätzliche Funktionsmerkmale in Abschnitt 7.2 erläutert sind. Eine erste Anwendung fand das Programm SAB bzw. eine darauf aufbauende Version bei einer Untersuchung, die im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durchgeführt wurde und deren Ziel die Quantifizierung sämtlicher jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen war, die auf Engpasssituationen an Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer zurückzuführen sind [OBER-SUNDERMEIER et al., 2003]. Die Ergebnisse dieser Untersuchung - begrenzt auf Arbeitstellen mit einer Dauer über 14 Tagen - sowie wesentliche Erkenntnisse und Modellanpassungen, die aus den durchgeföhrten Berechnungen resultieren, sind in Abschnitt 7.3 dargestellt.

7.2 SAB - ein Software-Tool zur Ermittlung der verkehrlichen Wirkungen von Arbeitsstellen

7.2.1 Aufbau und Funktionsweise des Programms SAB

Das Programm SAB wurde mit dem Ziel entwickelt, Behörden sowie anderen mit dem Bau und der Unterhaltung von Autobahnen befassten Institutionen ein praktikables Werkzeug zur Einschätzung der verkehrlichen Wirkung einer bestimmten Arbeitsstelle zu liefern. Der Aufbau des Programms SAB lehnt sich im Grundsatz an die auch im Rahmen dieser Arbeit gewählte Gliederung an:

- Modellierung der Verkehrsnachfrage
- Ermittlung der Kapazität des Arbeitsstellenengpasses
- Modellierung des Verkehrsablaufs / Berechnung der Stauentwicklung

Das Programm besteht aus mehreren Eingabe- und Ergebnisformularen, in denen Schritt für Schritt die folgenden Informationen abgefragt bzw. Zwischen- und Endergebnisse angezeigt werden:

Lage und Charakteristik des Streckenabschnittes

Um eine spätere Zuordnung der erstellten Prognose zu ermöglichen und die Lage des betrachteten Streckenabschnittes zu definieren, werden folgende Informationen benötigt:

- Bundesland
- Autobahnnummer
- Anschlussstellen vor und hinter der Baustellenverkehrsführung
- Lage der Autobahn im Netz (Ballungsraum - überregionale Verbindung)
- Genaue Anfangs- und Endkilometrierung der Baustelle
- Längsneigung innerhalb des Baustellenbereiches

Baustellencharakteristik

Nachdem die Streckencharakteristik des ungestörten Streckenabschnittes definiert ist, ist das Programm mit den Daten der zu planenden oder laufenden Baustelle zu versorgen. Dazu wird die Verkehrsführung innerhalb der Baustelle nach den RSA [BMV, 1995] angegeben, wobei nach Tages- und Dauerbaustellen zu unterscheiden ist. Zusätzlich sind die Breite der Behelfsfahrstreifen und die zulässige Geschwindigkeit im Baustellenbereich anzugeben. Letzterer Wert wird für die Berechnung des Zeitverlustes, der beim Durchfahren des eigentlichen Baustellenbereiches auf Grund der Differenz zwischen „freier“ Geschwindigkeit und zulässiger Höchstgeschwindigkeit entsteht, benötigt.

Verkehrsnachfrage

Zur Erstellung der Stauprognose ist weiterhin die Angabe der Verkehrsnachfrage im Prognosezeitraum in einheitlichen Zeitintervallen erforderlich. Dazu ist sowohl das Gesamtverkehrsaufkommen in Kraftfahrzeugen pro Zeitintervall als auch der Anteil des Schwerverkehrs in Fahrzeugen pro Zeitintervall anzugeben. Weiterhin sind zusätzliche Randbedingungen (Normal-/Urlaubsverkehr) zu klären.

Liegen beim Anwender keine streckenbezogenen Verkehrsnachfragedaten vor, können alternativ mittels typisierter Ganglinien in Verbindung mit dem DTV-Wert Ganglinien der zu erwartenden Verkehrsnachfrage erzeugt werden (siehe hierzu auch Abschnitt 2.2.1).

Ermittlung der Kapazität des Arbeitsstellenengpasses und der freien Strecke

Nachdem alle Einflussfaktoren, welche die Lage des Streckenabschnittes, die Baustellenverkehrsführung und die Verkehrsnachfrage betreffen, definiert worden sind, erfolgt die Ermittlung der Kapazität des Baustellenengpasses. Die in Kapitel 6 beschriebenen Parameter zur Bestimmung der Kapazität unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen sind in

das Programm als Standardeinstellung eingebunden. Eine Änderung der Parameter über einen eigenen Menüpunkt ist jedoch möglich, so dass Erfahrungswerte einzelner Anwender in die Berechnung einbezogen werden können. Da der Anteil des Schwerverkehrs über die Äquivalenzwerte in die Berechnung eingeht, muss die Kapazität für jedes Zeitintervall neu ermittelt werden, so dass sich - vergleichbar mit der Verkehrsnachfrage - eine Ganglinie der Kapazität ergibt.

Eine weitere Eingangsgröße für die Nachbildung der Staumentwicklung ist die Kapazität der freien Strecke. Dieser Wert wird zum einen als Eingangsparameter für die Definition des Fundamentaldiagramms benötigt, zum anderem dient er zur Überprüfung der Plausibilität der prognostizierten Verkehrsnachfrage. Übersteigt die Nachfrage, z.B. bei Großveranstaltungen, langen Wochenenden etc., die Kapazität der freien Strecke, muss die Verkehrsnachfrage durch einen zusätzlichen Algorithmus auf den auf dem freien Streckenabschnitt realisierbaren Wert herabgesetzt werden (z.B. durch eine zeitliche Verlagerung). Die Ermittlung der Kapazität der freien Strecke erfolgt analog zur Vorgehensweise bei der Kapazität des Arbeitsstellenengpasses. Aufbauend auf den Angaben vorhandener Untersuchungen (siehe auch Abschnitt 3.2) wird die Grundkapazität pro Fahrstreifen auf 2000 Pkw-E/h festgelegt. Durch die Verwendung von Pkw-Äquivalenzwerten für die Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils und der Längsneigung (siehe Abschnitt 6.2.5) sowie durch den Ansatz von lagespezifischen Faktoren (siehe Abschnitt 6.2.3) ergibt sich auch hier eine Anpassung des Kapazitätswertes an die Charakteristik des jeweiligen Streckenabschnitts.

Berechnung der verkehrlichen Wirkungen der Arbeitsstelle

Im abschließenden Teil des Programms erfolgt die eigentliche Modellierung der Staumentwicklung an der Arbeitsstelle und die Ausgabe der nutzerrelevanten Informationen wie Staulänge, Staudauer und vor allem die Verlustzeit eines einzelnen Fahrzeugs im Stau.

Wie bereits in Kapitel 4 ausgeführt, eignet sich das makroskopische Stoßwellenmodell in dem hier vorliegenden Kontext sehr gut. Die zugehörigen Berechnungsgrundlagen sind ebenfalls ausführlich beschrieben worden. Die Eingangsparameter für die Berechnung sind neben der Nachfrageverkehrsstärke diejenigen Parameter, die zur Definition des Fundamentaldiagramms im stabilen und im instabilen Bereich dienen. Dazu zählen die Kapazität der freien Strecke C_{FS} , die freie Geschwindigkeit v_f (bei $k \rightarrow 0$) und die optimale Geschwindigkeit v_{opt} (bei $q \rightarrow C_{FS}$) für den stabilen Bereich sowie die Kapazität des Baustellenengpasses C_E und die Dichte k_{Stau} bzw. Geschwindigkeit v_{Stau} im Stau.

Die Festlegung der beiden letztgenannten Parameter erweist sich im Hinblick auf die untersuchte Datenbasis als schwierig, da - wie in Kapitel 5 beschrieben - kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte bzw. Geschwindigkeit einerseits und der Verkehrszusammensetzung und Verkehrsführung andererseits erkennbar ist. Deutlich wird in jedem Fall, dass die hohen Verkehrsdichten, die beispielsweise von RESSEL beobachtet wurden [RESSEL, 1994], durch die eigenen Datenanalysen nicht bestätigt werden können. Insbesondere bei der Auswertung der Daten der umsetzbaren Stauwarnanlagen und der

Einzelerfassungsquerschnitte im hessischen Autobahnnetz zeigt sich, dass bei Überlastung der Baustelle (ohne weitere Störungen wie Unfälle etc.) mit relativ hohen mittleren Geschwindigkeiten (über 30 km/h) gefahren wird, so dass die Verkehrsdichte vergleichsweise niedrig ist. Da diese Problematik im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht abschließend geklärt werden konnte, wird im Folgenden vereinfachend von einer durchschnittlichen Dichte von 50 Kfz/km pro Fahrstreifen ausgegangen. Die im Stau gefahrene Geschwindigkeit berechnet sich dann anschließend in Abhängigkeit von der jeweiligen Kapazität.

Die Ausgabe der Ergebnisse der Stauberechnung erfolgt sowohl in Form von einzelnen charakteristischen Kenngrößen, wie der maximalen Wartezeit und der Staudauer, als auch in Form von Ganglinien der Verlustzeit und der Staulänge (siehe Abb. 7-1).

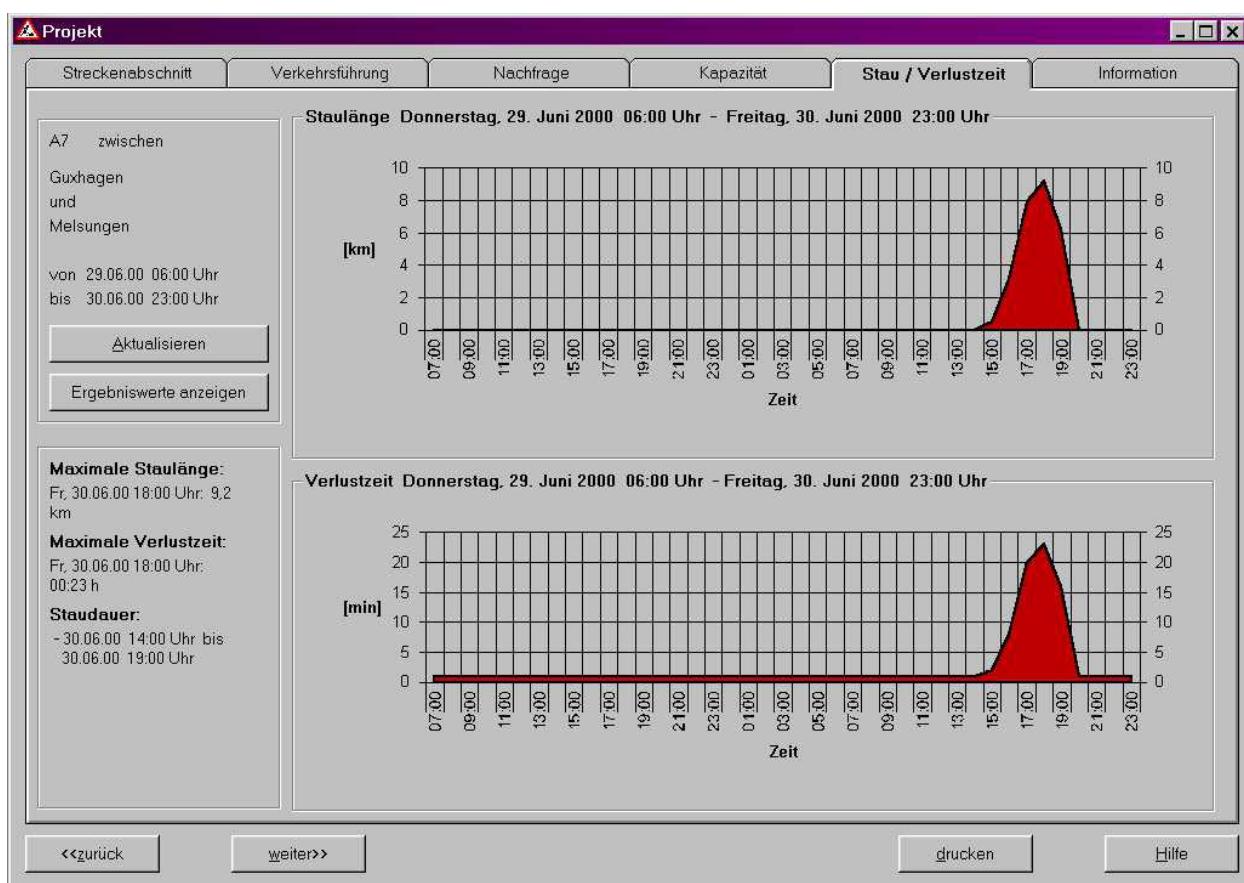


Abb. 7-1: Beispiel für eine Ergebnisanzeige mit dem Programm SAB [OTTO et al., 2001]

Die angezeigten Verlustzeiten setzen sich dabei aus zwei Anteilen - der Verlustzeit beim Durchfahren des Staubereichs und der Verlustzeit, die beim Durchfahren der Baustelle mit reduzierter Geschwindigkeit entsteht - zusammen. Somit können auch in staufreien Zeiten Verlustzeiten angezeigt werden (die Werte sind auf Minuten gerundet). Die Verlustzeit bezieht sich dabei auf die Zeit, die beim Fahren mit „normaler“, den Verkehrsverhältnissen angepasster Geschwindigkeit benötigt worden wäre.

7.2.2 Anbindung von Datenbanken

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, müssen bei der vorhandenen Programmversion alle Eingaben manuell vorgenommen werden. Um die Eingabe der Eingangsdaten zu erleichtern und Wiederholungen zu vermeiden, ist eine Katalogisierung des gesamten Autobahnnetzes bzw. des für den Anwender relevanten Netzausschnittes (mit der Option der manuellen Korrektur einzelner Eingabewerte) anzustreben. Dies bietet den Vorteil, dass einmal eingegebene Daten und Informationen für weitere Anwendungen erhalten bleiben und die Anwendung des Programms lediglich die Angabe der baustellenrelevanten Daten erfordert.

In den letzten Jahren wurden in vielen Straßen- und Verkehrsverwaltungen Bemühungen angestellt, einzelne Prozessschritte (Planung, Bau, Bestandsaufnahme etc.) in einer Prozesskette zu verbinden. Der hierzu nötige Datenfluss auf der Basis von Netzwerken kann erst mit einer umfassenden Standardisierung der zwischen den Prozessen fließenden Daten erreicht werden [STEIN et al., 1997]. Hinzu kommen die Ansprüche der Anwender aus der Privatwirtschaft, die hochwertige, straßenbezogene Informationen als Grundlage für Navigationssysteme und andere Mobilitätsdienstleistungen benötigen.

Derzeit existieren - je nach Art der Fachaufgabe - unterschiedlichste Standards und Regelwerke bezüglich der Erstellung und der Verwaltung von straßenbezogenen Daten. Jeder einzelne Standard definiert das Objekt Straße auf eine eigene, fachbezogene Art, so dass der Austausch und die fachübergreifende Auswertung von Daten häufig auf Grund unterschiedlicher Grundstrukturen erschwert werden.

Lösungsansätze bieten hier zum einen die Initiativen einzelner Bundesländer, innerhalb ihres Verwaltungsbereiches einheitliche Datenstrukturen zu schaffen (z.B. NWSIB - Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen), zum anderen werden auf Bundesebene Standards geschaffen, die in Zukunft den reibungslosen Austausch von straßenbezogenen Daten zwischen verschiedenen Beteiligten und verschiedenen Anwendungen ermöglichen soll. In diesem Zusammenhang ist vor allem der **Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA)** zu nennen.

7.3 Quantifizierung jährlicher staubedingter Reisezeitverluste an Arbeitstellen längerer Dauer im Bundesautobahnnetz

7.3.1 Vorbemerkung

Ziel der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Untersuchung, die 2002/03 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt wurde, war neben der eigentlichen Quantifizierung der jährlichen Reisezeitverluste an Arbeitsstellen auf Autobahnen die Anwendung und die Validierung des in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten Verfahrens zur Er-

mittlung der verkehrlichen Wirkungen von Arbeitsstellen an einer realen Datenbasis [OBERSUNDERMEIER et al., 2003].

Da volkswirtschaftliche Aspekte, d.h. die vollständige Bezifferung jährlicher Straßennutzerkosten aufgrund von Arbeitsstellen (sowohl längerer als auch kürzerer Dauer), im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine eher untergeordnete Rolle spielen und vielmehr die Methodik der Verkehrsablaufmodellierung im Vordergrund steht, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf Arbeitsstellen mit einer Dauer über 14 Tagen¹⁸. Diese Eingrenzung gründet auf der Tatsache, dass für die entsprechenden Arbeitstellen aufgrund einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen geführten Statistik aussagekräftige Daten zur Verfügung stehen.

7.3.2 Datengrundlage

Arbeitsstellen

Arbeitsstellen mit einer Dauer über 14 Tagen werden jährlich von den einzelnen Bundesländern im Rahmen der koordinierten Baustellenplanung des Bundes zentral gemeldet. Jeder einzelnen Baumaßnahme sind dabei die wesentlichen Informationen über Lage, Dauer und eingesetzten Verkehrsführung zugeordnet.

Im Bezugsjahr 2000 wurden laut Unterlagen der koordinierten Baustellenplanung 578 Arbeitsstellen mit einer Dauer über 14 Tagen eingerichtet. In diesen 578 Datensätzen waren 4 Arbeitsstellen enthalten, die auf Rampen im Bereich von Knotenpunkten durchgeführt wurden. Da diesen Arbeitsstellen keine geeigneten Verkehrsnachfragedaten (Verkehrsstärken, Ganglinientypen etc.) zugeordnet werden konnten, wurden sie aus der Arbeitsstellendatenbank entfernt.

Die somit verbliebenen Arbeitsstellen teilten sich - nach Anzahl der Fahrstreifen differenziert - folgendermaßen auf:

- 4-streifige Streckenabschnitte: 77%
- 6-streifige Streckenabschnitte: 18%
- 5- oder 7-streifige Streckenabschnitte (versch. Anzahl Fahrstreifen pro Richtung): 5%

Die Häufigkeit der einzelnen Verkehrsführungen sind am Beispiel der 4- und 6-streifigen Autobahnen in Abb. 7-2 aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass zumindest auf 4-streifigen Autobahnen im überwiegenden Fall (77%) im Bereich der Arbeitsstellen die ursprüngliche Fahrstreifenanzahl erhalten blieb. An 6-streifigen Autobahnen traf dies immerhin noch auf etwa 64% der Arbeitsstellen zu. Weiterhin ist ersichtlich, dass bei 52% (4-streifige BAB) bzw. 34%

¹⁸ Im Folgenden wird diese Gruppe von Arbeitsstellen vereinfachend als Arbeitsstellen längerer Dauer bezeichnet. Die zeitliche Definition von Arbeitstellen längerer Dauer weicht in diesem Fall von der in den Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen (RSA) gegebenen Definition (> 1 Tag) ab.

(6-streifige BAB) der Arbeitsstellen Verkehrsführungen mit einer Überleitung auf die Gegenfahrbahn eingerichtet wurden, so dass bei der Berechnung von aufgetretenen Reisezeitverlusten beide Richtungsfahrbahnen zu berücksichtigen waren. Die Summe der zu berücksichtigenden Datensätze erhöhte sich auf diese Weise auf etwa 1000.

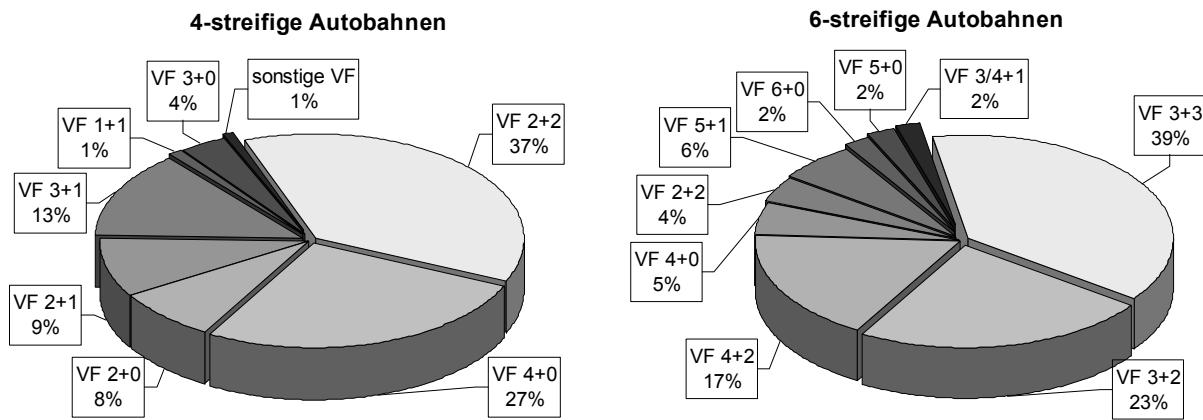


Abb. 7-2: Häufigkeit der Verkehrsführungsarten auf 4- und 6-streifigen Autobahnen im Bezugsjahr 2000

Verkehrsnachfrage

Die zur Berechnung der Reisezeitverluste notwendige Modellierung der Verkehrsnachfrage erfolgte, wie in Kap. 2 beschrieben, auf Basis der von PINKOFSKY entwickelten Ganglinientypen [PINKOFSKY, 2002]. Zu diesem Zweck waren jeder Arbeitsstelle folgende Daten zuzuordnen:

- Durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge (DTV) bezogen auf das Jahr 2000
- Schwerverkehrsanteil
- Wochen- und Tagesganglinientyp

Da die von PINKOFSKY ermittelten Ganglinientypen ausschließlich Dauerzählstellen, nicht jedoch den übrigen Streckenabschnitten zugeordnet worden sind, bestand eine weitere Aufgabe in der Bestimmung einer repräsentativen Dauerzählstelle für jede Arbeitsstelle.

Kapazität / streckenbezogene Daten

Zur Bestimmung der Reduktionsfaktoren, die der Anpassung des Grundkapazitätswertes an die tatsächlichen Strecken- und Verkehrsverhältnisse dienen, wurden jeder Arbeitsstelle die entsprechenden Informationen zugeordnet. Dabei war zu unterscheiden zwischen

- Faktoren, die sich aus der Verkehrsführung in der Arbeitsstelle ergaben (Fahrstreifenreduktionen und -überleitungen, Fahrstreifenbreite etc.), sowie
- Faktoren, die durch die Streckencharakteristik auf dem betroffenen Autobahnabschnitt bestimmt wurden (ursprüngliche Fahrstreifenanzahl, Längsneigung, Lage im Netz).

7.3.3 Berechnungsergebnisse

Vorbemerkung

Da das im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Programm SAB, das grundsätzlich eine automatisierte Berechnung der verkehrlichen Wirkung von Arbeitsstellen ermöglicht, lediglich auf die Planung einzelner Arbeitsstellen nicht aber auf die Verarbeitung einer größeren Menge von Datensätzen ausgelegt ist, wurde - aufbauend auf der vorhandenen Software - ein neues Programm (QuantAS) entwickelt. Dieses Programm ist in der Lage, die für die Berechnung der Zeitverluste einer gesamten Arbeitsstelle relevanten Informationen aus entsprechenden Datenbanken mit Arbeitsstellen- und Verkehrsnachfragedaten einzulesen sowie die über die Dauer einer Arbeitsstelle aggregierten Ergebnisdaten auszugeben [OTTO, 2002].

Aufgrund unterschiedlicher Bewertungsansätze der Zeitkosten werden die Ergebnisse differenziert nach unterschiedlichen Fahrzeuggruppen (Pkw/Lkw) sowie unterschiedlichen Fahrtzwecken (Werkstage/Sonn- und Feiertage) ausgewiesen. Eine weitere Unterscheidung erfolgt hinsichtlich der zugrunde gelegten Referenzgeschwindigkeit v_R : Aus Sicht der *Straßennutzer* gilt diejenige Geschwindigkeit als Referenz, die auf dem betreffenden Streckenabschnitt ohne das Vorhandensein einer Arbeitsstelle gefahren werden könnte, d.h. die Geschwindigkeit v_R ist abhängig von der Verkehrsnachfrage und liegt im Regelfall höher als die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Arbeitsstellbereich. Somit können - auch ohne Überlastung des Engpasses - Verlustzeiten durch das Befahren des Arbeitsstellbereiches mit gegenüber der freien Strecke reduzierter Geschwindigkeit auftreten. Aus Sicht des *Systembetreibers* stellt die Referenzgeschwindigkeit v_R eine Größe dar, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung zu definieren ist. Im hier vorliegenden Fall wird v_R auf den Wert 80 km/h festgelegt, d.h. Zeitverluste, die beim Passieren der Arbeitsstelle entstehen, werden im Regelfall nicht gewertet (Ausnahme: Arbeitsstellen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit unter 80 km/h).

Berechnung mit Standardparametern

Der erste Berechnungsdurchlauf erfolgte mit den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Standard-Modellparametern:

- Berechnung der Kapazität nach dem in Kapitel 6 vorgeschlagenen Verfahren
- Modellierung der Verkehrsnachfrage auf der Basis der von PINKOFSKY ermittelten Ganglinientypen sowie einem Variationskoeffizienten zur Berücksichtigung der stochastischen Schwankungen in Höhe von $V = 0,10$

Die Ergebnisse dieses Berechnungsdurchlaufs sind in Abb. 7-3 in Form einer Verteilung der maximal berechneten Staulänge und der zugehörigen durchschnittlichen Verlustzeit pro Tag sowie in Tab. 7-1 als Summe der Verlustzeiten dargestellt.

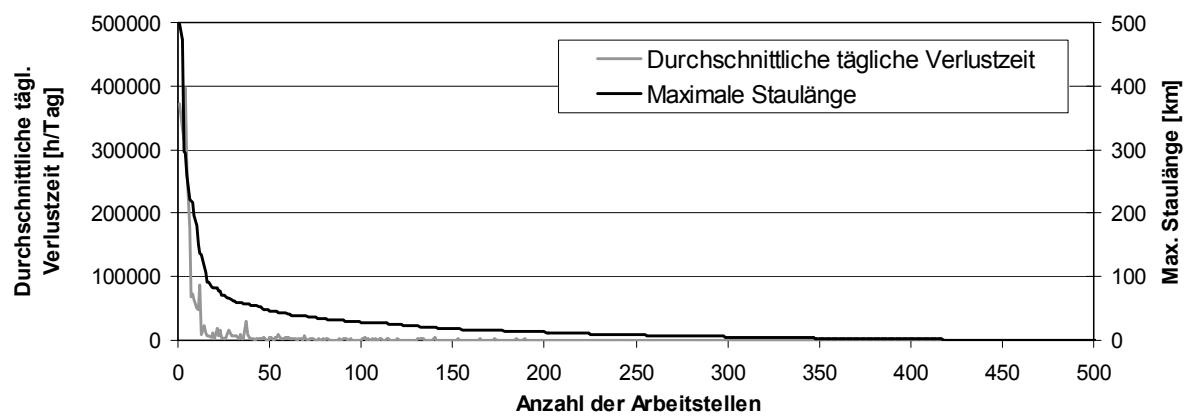


Abb. 7-3: Ergebnisse der Berechnung der Verlustzeiten an Arbeitsstellen längerer Dauer mit Standardparametern: Darstellung der Staulänge sowie der durchschnittlichen Verlustzeit pro Tag für die 500 am stärksten überlasteten Arbeitsstellen

		Referenzgeschwindigkeit	
		80 km/h	freie Strecke
Zeitverluste durch Stau [Mio. h]	Pkw Werkstage	232,05	249,50
	Pkw Sonn-/Feiertage	13,17	14,11
	Lkw	51,76	51,76
Zeitverluste durch Befahren der Arbeitsstelle mit Geschwindigkeitsbegrenzung [Mio. h]	Pkw Werkstage	3,16	25,04
	Pkw Sonn-/Feiertage	0,56	4,30
	Lkw	0,99	0,99
Summe [Mio. h]		301,69	345,70

Tab. 7-1: Ergebnisse der Berechnung der Verlustzeiten an Arbeitsstellen längerer Dauer mit Standardparametern

Die Auswertung dieser Ergebnisse zeigt, dass bei 17,6% der 1000 Datensätze während ihrer Laufzeit mindestens einmal eine Staulänge über 15 km berechnet wurde. Im Rahmen von Umfragen bei Straßenverkehrsbehörden, die mit der Stauprognose an Arbeitsstellen befasst sind, wurde jedoch mehrfach betont, dass Staulängen in dieser Größenordnung nur in Ausnahmefällen auftreten. Da die maximal ermittelte Staulänge bei annähernd 500 km liegt (4,5% der Datensätze weisen zeitweise Staulängen über 50 km auf), ist insgesamt von systematischen Fehleinschätzungen bei der Ermittlung der Verlustzeiten auszugehen.

Berechnung mit Berücksichtigung von Verlagerungseffekten

Die Ergebnisse der Modellierung sowie die zitierten Beobachtungen vor Ort belegen, dass die bereits in Kapitel 2 erwähnten Verlagerungseffekte bei der Modellierung von Überlastungserscheinungen eine ganz entscheidende Rolle spielen. Über das Ausmaß dieser Verla-

gerungen, vor allem in Abhängigkeit vom Grad der bestehenden Überlastung, liegen jedoch bislang keine aussagekräftigen Untersuchungen vor.

Prinzipiell kann eine Verlagerung der Verkehrsnachfrage zum einen durch einen Gewöhnungseffekt hervorgerufen werden (insbesondere auf Abschnitten mit einem hohen Anteil ortskundiger Fahrer, wie z.B. der erwähnten A100), d.h. ein Teil der Verkehrsteilnehmer weicht dem Engpass zu erfahrungsgemäß stark belasteten Zeiten von vorn herein aus. Zum anderen bewirken aktuelle Verkehrsinformationen über Rundfunk oder Verkehrsbeeinflussungsanlagen eine weitere Verlagerung der Verkehrsnachfrage.

Letztere Annahme wird insbesondere durch die Tatsache gestützt, dass jährlich sowohl von privater als auch von öffentlicher Seite mehrere Millionen Euro¹⁹ in Verkehrswarn- und -informationsdienste investiert werden und diesem System der Verkehrsinformation somit auch eine nennenswerte Wirksamkeit unterstellt wird.

Hinsichtlich der Ausprägung der Verlagerung ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Staulänge (die Verlustzeit als eigentlich entscheidendes Kriterium ist für den Verkehrsteilnehmer in den meisten Fällen schwer einschätzbar) eine Verstärkung des Verlagerungseffekts eintritt. Bei der Ableitung von möglichen Verlagerungsfunktionen sind daher zunächst drei Annahmen plausibel:

- 1) Bei einer gewissen minimalen Staulänge treten keine nennenswerten Verkehrsverlagerungen auf, da die im Stau auftretenden Verlustzeiten vom Verkehrsteilnehmer geringer eingestuft werden als diejenigen Zeitverluste, die bei Verlagerung der Fahrt zu erwarten wären.
- 2) Mit steigender Staulänge steigt auch der Verlagerungsanteil.
- 3) Mit hohen Staulängen nähert sich der Verlagerungsanteil asymptotisch einem Grenzwert an, da davon auszugehen ist, dass in keinem Fall 100% der Verkehrsteilnehmer von einer Störung informiert sind. Ausnahmen bilden hier Vollsperrungen, bei denen der Verkehr vollständig von der Polizei umgeleitet wird, sowie Verkehrsbeeinflussungsanlagen, an denen Stauinformationen grundsätzlich für jedes Fahrzeug verfügbar sind.

Eine weitere wesentliche Eingangsgröße für die Bestimmung des verlagerbaren Anteils der Verkehrsnachfrage ist die Verfügbarkeit einer oder mehrerer Alternativrouten, wobei sowohl die Kapazität dieser Route(n) als auch der jeweilige Umwegfaktor entscheidend für die Höhe der zu erwartenden Reisezeit beim Verlassen der Originalroute sind. Auch hier kann wieder

¹⁹ In der Untersuchung „Entwurf und Bewertung von Verkehrsinformations- und -leitsystemen unter Nutzung neuer Technologien“ [KELLER/ZACKOR et al., 1998] wurden die jährlichen Kosten (bezogen auf das Jahr 2000 bei Unterstellung einer konservativen Entwicklung) allein für Verkehrsinformations- und -rechnerzentralen sowie für die notwendige Datenerfassung auf etwa 14 Mio. EUR geschätzt. Eine exakte Zuordnung aller anfallenden Kosten, z.B. auch in Landesmeldestellen, Radiostationen etc., ist jedoch aufgrund der vielfältigen Aufgabenüberschneidungen kaum möglich.

das eingangs erwähnte Beispiel der Arbeitsstelle auf der A100 zur Verdeutlichung herangezogen werden. Die starken Verlagerungseffekte, die dort beobachtet werden konnten, sind nicht zuletzt darauf zurück zu führen, dass aufgrund der Lage des Streckenabschnitts innerhalb des Stadtgebiets von Berlin zahlreiche Alternativrouten vorhanden waren, die - zumindest in der Summe - eine ausreichende Leistungsfähigkeit aufwiesen.

Da zur Übertragung dieser rein qualitativen Aussagen in ein mathematisches Modell bislang keine Untersuchungen vorliegen, wurde für die vorliegende Aufgabenstellung eine Verlagerungsfunktion entwickelt, die den oben genannten Grundregeln entspricht, die jedoch aufgrund fehlender Datengrundlagen lediglich als Erstversorgung anzusehen ist. Aus diesem Grund wurde auch auf eine Differenzierung hinsichtlich der Netzstruktur und damit der Verfügbarkeit von Alternativrouten verzichtet.

Die in Abb. 7-4 dargestellte Verlagerungsfunktion löst sich erst ab einer Staulänge von 3 km nennenswert vom Wert 1,0 ab ($f = 0,946$, d.h. 5,4% der Fahrzeuge wählen eine Alternativroute). Zwischen 3 und 10 km Staulänge weist die Funktion das stärkste Gefälle auf, in diesem Bereich reagieren die Verkehrsteilnehmer entsprechend empfindlich auf Störungsmeldungen. Bei einer Staulänge von 10 km nutzen demnach bereits etwa 35% der Fahrzeuge eine Alternativroute bzw. verschieben ihre Fahrt auf einen anderen Zeitraum. Mit weiter ansteigender Staulänge nimmt der verlagerte Anteil der Fahrzeuge immer schwächer zu. Die Differenz der verlagerten Verkehrsströme zwischen 30 und 40 km Staulänge ist demnach geringer als zwischen 5 und 15 km, da zu erwartende Reisezeitverluste im Bereich sehr hoher Staulängen nur noch sehr ungenau eingeschätzt werden können.

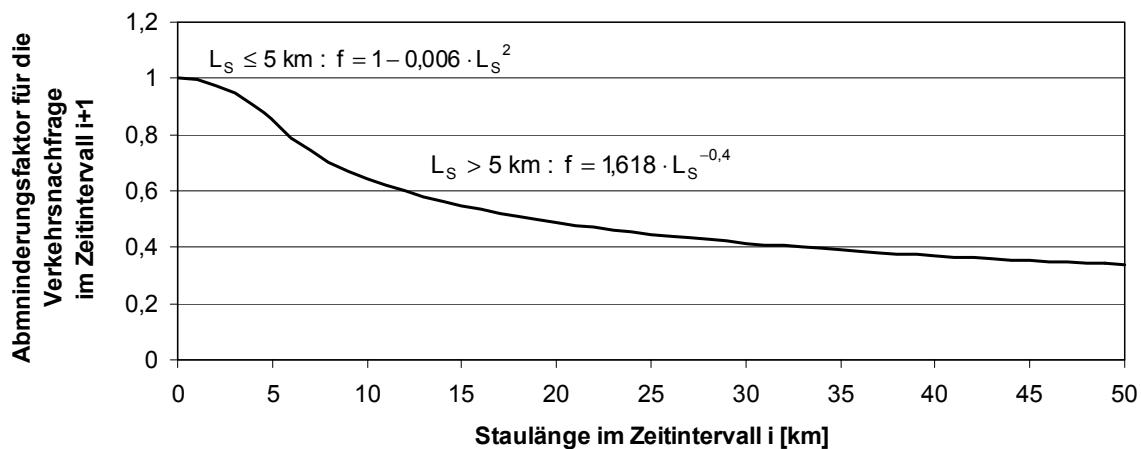


Abb. 7-4: Verlagerung der Verkehrsfrage in Abhängigkeit von der Staulänge (Erstversorgung)

Die somit entworfene Verlagerungsfunktion fand Eingang in einen neuen Berechnungsdurchlauf, dessen Ergebnisse in Abb. 7-5 als Verteilung der maximal berechneten Staulänge und der zugehörigen durchschnittlichen Verlustzeit pro Tag sowie in Tab. 7-2 als Summe der Verlustzeiten dargestellt sind.

Bereits anhand der maximal errechneten Staulänge wird deutlich, dass die angesetzte Verlagerungsfunktion eine Reduzierung der unplatabel hohen Staulängen des ersten Berechnungsdurchlaufs auf realistischere Werte bewirkt. Die maximale Staulänge beträgt demnach nur noch 31 km, die im Beispiel betrachtete Arbeitsstelle auf der A100 in Berlin weist lediglich noch einen Maximalwert von 16 km auf. Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des gewählten Modellansatzes ist damit einerseits nachgewiesen, andererseits lassen sich jedoch aufgrund fehlender Langzeitbeobachtungen an den jeweiligen Arbeitsstellen keine Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Einzelergebnisse ziehen.

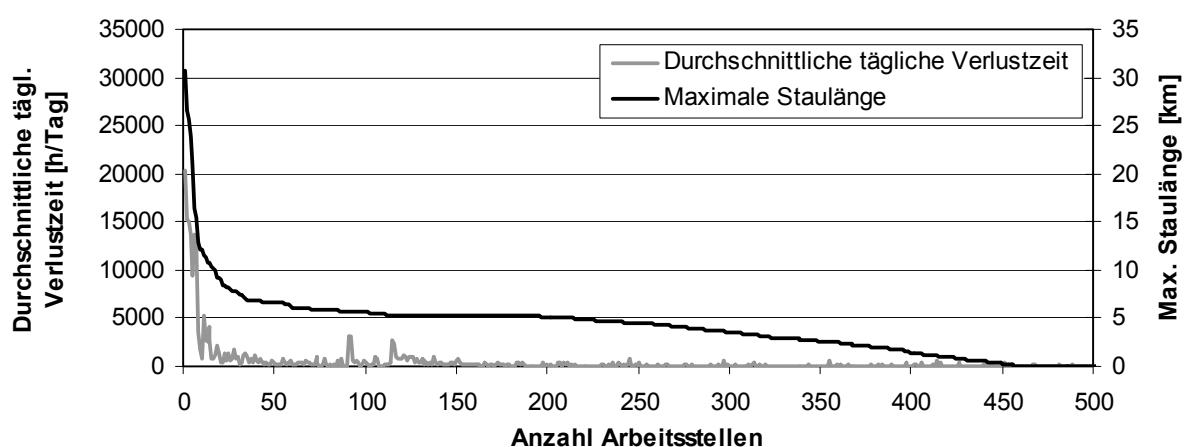


Abb. 7-5: Ergebnisse der Berechnung der Verlustzeiten an Arbeitsstellen längerer Dauer mit Standardparametern, mit Berücksichtigung von Verlagerungseffekten: Darstellung der Staulänge sowie der durchschnittlichen Verlustzeit pro Tag für die 500 am stärksten überlasteten Arbeitsstellen

		Referenzgeschwindigkeit	
		80 km/h	freie Strecke
Zeitverluste durch Stau [Mio. h]	Pkw Werkstage	14,25	15,89
	Pkw Sonn-/Feiertage	0,92	1,01
	Lkw	4,81	4,81
Zeitverluste durch Befahren der Arbeitsstelle mit Geschwindigkeitsbegrenzung [Mio. h]	Pkw Werkstage	3,06	25,06
	Pkw Sonn-/Feiertage	0,56	4,29
	Lkw	0,99	0,99
Summe [Mio. h]		24,58	52,05
Reduktion gegenüber der Berechnungsvariante ohne Verkehrsverlagerung (Tab. 7-1)		-91,9 %	-84,9 %

Tab. 7-2: Ergebnisse der Berechnung der Verlustzeiten an Arbeitsstellen längerer Dauer mit Standardparametern, mit Berücksichtigung von Verlagerungseffekten

Vergleicht man die ermittelten Reisezeitverluste der beiden Berechnungsvarianten mit und ohne Verlagerung der Verkehrsnachfrage (Tab. 7-1 und Tab. 7-2) miteinander, zeigt sich auch hier, welchen immensen Einfluss die Verlagerung von zum Teil geringen Verkehrsnachfrage-Anteilen auf die Ergebnisse hat. Bei einer angesetzten Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h bewirkt die Verkehrsverlagerung eine Reduktion der Gesamtreisezeitverluste (auf der Autobahn) um annähernd 92%. Unter Berücksichtigung der Reisezeitverluste innerhalb der Arbeitsstelle, die durch die jeweilige Geschwindigkeitsbegrenzung hervorgerufen werden (Referenzgeschwindigkeit: freie Strecke), beträgt die Differenz immerhin noch etwa 85%. Diese Ergebnisse verdeutlichen außerdem, dass bereits eine geringfügige Variation der Verlagerungsfunktion eine starke Veränderung der Berechnungsergebnisse nach sich zieht. Hier besteht demnach erheblicher Forschungsbedarf, der jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht abgedeckt werden konnte.

Eine weiterer Aspekt, der im Falle der Modellierung von Verlagerungseffekten grundsätzlich berücksichtigt werden muss, ist das Ausmaß der Reisezeitverluste derjenigen Fahrzeuge, die durch eine räumliche oder zeitliche Verlagerung ihrer Fahrt für eine Entspannung der Verkehrssituation am eigentlichen Arbeitsstellenengpass - das heißt auf der Autobahn - gesorgt haben. Die in Tab. 7-2 dargestellten Ergebnisse, die ausschließlich die Verkehrsverhältnisse auf den betroffenen Autobahnabschnitten repräsentieren, stellen demnach lediglich eine untere Grenze aller aufgetretenen Reisezeitverluste dar. Die Zeitverluste im untergeordneten Netz (bei räumlicher Verlagerung der Fahrt) sowie diejenigen Einbußen, die aus einer zeitlichen Verschiebung des Fahrtantritts resultieren, sind jedoch - wenn überhaupt - nur im Einzelfall zu quantifizieren. Im vorliegenden Fall können lediglich die ursprünglich ohne Verlagerungseffekte berechneten Summen als obere Grenze herangezogen werden, da davon auszugehen ist, dass dem einzelnen Fahrer durch eine zeitliche oder räumliche Verlagerung seiner Fahrt im Allgemeinen geringere Zeitverluste entstehen als ohne Verlagerung bei einer Fahrt durch den Stau.

7.3.4 Fazit

Die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Berechnungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Stauprognose an Arbeitsstellen in einem praxisnahen Kontext anzuwenden und zu testen. Wesentliches Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist die Erkenntnis, dass die in Kapitel 2 beschriebenen Verfahren zur Modellierung der Verkehrsnachfrage insbesondere auf Streckenabschnitten mit starker Überlastungsgefährdung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern.

Am Beispiel einer Arbeitsstelle auf der A100 im Berliner Stadtgebiet konnte aufgezeigt werden, dass räumliche und zeitliche Verlagerungen der Verkehrsnachfrage zu einer deutlichen Verminderung der theoretisch zu erwartenden Staulängen führen. Eine Verlagerungsfunktion in Abhängigkeit von der Staulänge, die zur Berücksichtigung dieses Effekts entwickelt wurde, bewirkt dementsprechend eine starke Reduktion der modellierten Reisezeitverluste und damit eine Annäherung der Modellierung an die tatsächlichen Verkehrsverhältnisse auf den betroffenen Autobahnabschnitten. Aufgrund fehlender Vor-Ort-Beobachtungen ist diese Ver-

lagerungsfunktion jedoch lediglich als Erstversorgung anzusehen. Ebenso können mit diesem Verfahren keine Aussagen zu den Reisezeitverlusten der verlagerten Fahrzeuge getroffen werden.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognoze an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer. Das Hauptaugenmerk lag in diesem Zusammenhang auf der Entwicklung eines Verfahrens zur Schätzung der Kapazität eines Arbeitsstellenengpasses.

Für die Erstellung einer Stauprognoze sind im Wesentlichen drei Modellierungsschritte erforderlich: die Ermittlung der zu erwartenden Verkehrsnachfrage, die Schätzung der Kapazität des betreffenden Streckenelements sowie die Modellierung des Verkehrsablaufs bzw. der Stauentwicklung am Engpass unter Nutzung der beiden erstgenannten Eingangsgrößen. In Anlehnung an diese Gliederung befasst sich der erste Teil der Arbeit mit der Analyse und der Aufbereitung vorhandener Methoden und Ansätze im gegebenen Kontext.

Bei der Verkehrsnachfragemodellierung bieten sich demnach - je nach angestrebtem Prognosehorizont - verschiedene Verfahren an. Besonders hervorzuheben sind hier jedoch die Langfristprognosen, die ausschließlich auf der Analyse historischer Daten beruhen und bei denen im Regelfall typisierte Ganglinien zur Anwendung kommen. Eine bessere Anpassung der prognostizierten Werte an die Realität kann hier durch die Einführung einer stochastischen Komponente bezogen auf das einzelne Zeitintervall bzw. auf eine gesamte Ganglinie erreicht werden.

Die Ermittlung der Kapazität von Streckenelementen ist bereits in der Vergangenheit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen. Je nach thematischer Ausrichtung wurden dabei auch spezielle Randbedingungen, wie z.B. starke Längsneigungen, widrige Witterungsbedingungen, hoch belastete Anschlussstellen und Störfälle (Unfälle/Nothalte) berücksichtigt. Für die in dieser Arbeit vorwiegend behandelte Problematik der Arbeitsstellen auf Autobahnen sind die Arbeiten von RESSEL [RESSEL, 1994] und STÖCKERT [STÖCKERT, 2001] sowie die Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP) [BMV, 1996] von besonderer Bedeutung.

Auch zur Modellierung des Verkehrsablaufs bzw. der Stauentwicklung steht grundsätzlich eine Vielzahl von möglichen Ansätzen zur Verfügung. Da das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit auf der Entwicklung eines Verfahrens zur Planung und Bewertung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen (weniger auf der zeitnahen Verkehrsinformation) liegt, muss jedoch bereits bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage im Regelfall auf die Integration aktueller und detaillierter Verkehrsdaten verzichtet werden. Aus diesem Grund erscheint der Einsatz mikroskopischer Modelle, die den Verkehrsablauf auf fahrzeugfeiner Ebene abbilden, nicht angemessen. Unter den makroskopischen Modellen sind sowohl das deterministische Warteschlangenmodell als auch das Dichtestoßwellenmodell, das auf dem Fundamentaldiagramm des Verkehrs basiert, als geeignet anzusehen. Bei einem direkten Vergleich dieser beiden Ansätze stellte sich weiterhin heraus, dass das Fundamentaldiagramm auf

Grund seiner zeitlich-räumlichen Betrachtungsweise und der umfangreichen Kalibrierungsmöglichkeiten für den Einsatz im Stauprognoseverfahren am besten geeignet ist.

Im Anschluss an diesen theoretisch ausgelegten Teil befasst sich der zweite Komplex der Arbeit mit der umfangreichen Erfassung und Analyse von Verkehrsablaufdaten an Arbeitsstellen längerer und kürzerer Dauer. Dazu zählen zum einen automatisch erfasste Staudaten von umsetzbaren Stauwarnanlagen und sonstigen Streckenabschnitten und zum anderen Daten aus eigenen Messungen an überlasteten Arbeitsstellen. Im Rahmen der durchgeföhrten Erhebungen wurden sowohl Videoaufnahmen im Arbeitsstellenbereich aufgezeichnet und ausgewertet, als auch Geschwindigkeitsganglinien und -profile von im Stau mitfahrenden Fahrzeuge mit Hilfe eines optoelektronischen Sensors aufgenommen.

Aufgrund der Vielfalt der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren einerseits und der begrenzten Datenbasis andererseits basierte die anschließende Entwicklung eines Verfahrens zur Schätzung der Kapazität eines Baustellenengpasses im Wesentlichen auf Plausibilitätsüberlegungen, in die jedoch sowohl die Erkenntnisse aus vorangegangenen Arbeiten als auch die vorhandenen Daten sinnvoll eingebunden wurden. Das Ergebnis bildet ein Verfahren in Anlehnung an die Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP) [BMV, 1996], bei dem - ausgehend von einer Grundkapazität von 1830 Pkw-E/h pro Fahrstreifen - verschiedene Einflüsse in Form von Faktoren berücksichtigt werden. Diese betreffen im Wesentlichen:

- Verkehrsführung
 - Fahrstreifenreduktion
 - Fahrstreifenüberleitung
 - Fahrstreifenbreite
- Zusammensetzung des Fahrerkollektivs (Fahrkönnen)
 - Lage des Streckenabschnittes im Netz
 - Urlaubsverkehr
- Umfeldbedingungen
 - Witterungsbedingungen
 - Aktivitäten im Arbeitsstellenbereich
- Schwerverkehrsanteil und Längsneigung

Der Einfluss des Schwerverkehrs in Verbindung mit hohen Längsneigungen wird durch Äquivalenzwerte realisiert, die von der Stärke der Längsneigung, der Länge des Abschnittes mit Längsneigung und dem Schwerverkehrsanteil abhängig sind. Zur Bestimmung dieser Äquivalenzwerte stehen Diagramme zur Verfügung, die in Anlehnung an die Wertetabellen im Highway Capacity Manual (HCM) [TRB, 1994] für unterschiedliche Längsneigungen entwickelt wurden. Der Ansatz des deutschen Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) [FGSV, 2001], der bei der Bestimmung der Kapazität keinen Zusammenhang zwischen Schwerverkehr und Gradienten herstellt, fand im Rahmen dieser Arbeit keine Anwendung.

Auf der Basis der drei beschriebenen Teilbereiche - Ermittlung der Verkehrsnachfrage, Ermittlung der Kapazität des Baustellenengpasses und der daraus resultierenden Nachbildung der Stauentwicklung - wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein EDV-Programm entwickelt, das bei Eingabe aller verkehrsnachfrage- und baustellenrelevanten Daten die Informationen für den Nutzer, wie die zu erwartende Staulänge, Staudauer und Verlustzeit, berechnet und grafisch ausgibt. Um eine bessere Anpassung des Programms an die Bedürfnisse der Nutzer zu erreichen, sollte die Anbindung von Datenbanken, die sowohl streckencharakteristische als auch verkehrliche Informationen enthalten, angestrebt werden.

Eine erste praktische Anwendung fand das neu entwickelte Stauprognoseverfahren in einer Untersuchung, die von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Auftrag gegeben wurde. Ziel dieser Untersuchung war die Quantifizierung sämtlicher jährlicher Reisezeitverluste, die aus Kapazitätseinschränkungen im Bereich von Arbeitsstellen resultieren. Ein wesentliches Ergebnis der durchgeföhrten Berechnungen ist, dass die Modellierung der Verkehrsnachfrage auf der Basis historischer Daten (z.B. durch typisierte Ganglinien) die realen Verkehrsverhältnisse insbesondere an stark überlasteten Arbeitsstellen nur unzureichend wiedergibt. Anhand der theoretisch ermittelten maximalen Staulängen an mehreren Arbeitsstellen mit einer Dauer über 14 Tagen konnte die eingangs dieser Arbeit geäußerte Annahme, dass sowohl durch Gewöhnungseffekte als auch durch Verkehrsinformationen jeglicher Art nennenswerte Verkehrsverlagerungen entstehen, erhärtet werden. Die Vernachlässigung dieser Verlagerungseffekte führt demnach zu einer deutlichen Überschätzung der tatsächlich an der Arbeitsstelle aufgetretenen Reisezeitverluste.

Zur Übertragung dieser Erkenntnis in das eingesetzte Stauprognoseverfahren wurde ein Modell entwickelt, das einen direkten Zusammenhang zwischen der aktuellen Staulänge an der Arbeitsstelle und dem verlagerten Anteil der Verkehrsnachfrage unterstellt. Für dieses Modell lassen sich aufgrund bisher fehlender empirischer Untersuchungen lediglich plausible Randbedingungen definieren, so dass der im Rahmen dieser Arbeit gewählte Ansatz nicht mehr als eine Erstversorgung darstellen kann. Die starke Differenz der berechneten Ergebnisse mit und ohne Verlagerung von Verkehrsströmen verdeutlicht zudem den vorhandenen Forschungsbedarf.

Trotz dieser letztendlich offen gebliebenen Fragestellung bildet das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Stauprognoseverfahren ein leistungsfähiges, robustes und vor allem praktikables Werkzeug zur Verbesserung der Planung und Bewertung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen auf Autobahnen. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Modellanpassung sowohl bei der Ermittlung der Kapazität des Arbeitsstellenengpasses als auch bei der Modellierung der Stauentwicklung ist es in der Lage, nahezu jede Verkehrssituation abzubilden. Die deutlichen Schwankungen der ausgewerteten empirischen Daten belegen jedoch auch, dass eine weitere ausführliche Validierung durch die Praxis wünschenswert ist.

Literaturverzeichnis

AUGUST et al., 1991: August, H.; Beck, H.

Verfahren zur Planung von Tagesbaustellen auf Autobahnen mit dem Versuch einer Stauprognose - Ein Pilotprojekt des Landschaftsverbandes Westfalen-Lippe. In: Straße + Autobahn, Heft 8/1991, S. 433-436

BAST: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.)

Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik. Bergisch Gladbach, jährlich aktualisiert

BAST, 1992: Bundesanstalt für Straßenwesen

Baustellen auf Betriebsstrecken der Bundesautobahnen in der Ferienreisezeit. Bergisch Gladbach 1992

BAST, 1995: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.)

Straßenverkehrszählung 1995 - Ergebnisse für die Bundesfernstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 47. Bergisch Gladbach 1995

BÄUMER, 2002: Bäumer, H.

Einsatzkriterien für Nothaltemöglichkeiten an ein- und zweibahnigen Straßen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 25. Bochum 2002

BECKMANN et al., 2002: Beckmann*, A.; Zackor, H.:

Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen. Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 808. Bonn 2001

BMV, 1995: Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.)

Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen, Ausgabe 1995 (RSA 95). Bonn 1995

BMV, 1996: Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.)

Richtlinien zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen, Ausgabe 1996 (RBAP 96). Bonn 1996

BMV, 1997(b): Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.)

Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS), Entwurf Ausgabe 1997. Aufgestellt von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST). Bonn 1997

BMV, 1998: Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.):

Beschleunigung der Bauarbeiten an BAB-Betriebsstrecken zur Verbesserung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs. Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (Entwurf). Bonn 1998

* seit 2001: Ober-Sundermeier

BMV, 1999: Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.)

Hinweise für umsetzbare Stauwarnanlagen, Ausgabe 1999 (HUS 99). Bonn 1999

BMVBW, 2002: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

Koordinierte Baubetriebsplanung des BMVBW: Jährliche statistische Auswertung. Bonn 2002

BMVBW, 2001: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.)

Verkehr in Zahlen 2001/2002. Deutscher Verkehrs-Verlag. Hamburg 2001

BOLTE et al., 1984: Bolte, F.-F.; Pollmann, P.

Stauberechnung zur Planung und Terminierung von Straßenbauarbeiten. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 4/1984, S. 121-127

BREITENSTEIN et al., 1980: Breitenstein, J.; Keller, H.; Lenz, K.-H.; Zackor, H.

Fahrzeugpulks und Verkehrsstaus. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 1/1980, S. 16-26

BREßLER, 2001: Breßler, A..

Verkehrssicherheit und Verkehrsablauf an Steigungsstrecken - Kriterien für Zusatzfahrstreifen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 24. Bochum 2001

BRILON et al., 1994: Brilon, W.; Grossmann, M.; Blanke, H.

Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Straßen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669. Bonn 1994

BRILON et al., 1997: Brilon, W.; Lemke, K.:

Fehmarn-Belt-Querung - Szenarische Leistungsfähigkeitsbetrachtung für einen Tunnel. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 02.163/1995/FR im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum. Bochum 1997

BRILON et al., 2002: Brilon, W.; Zurlinden, H.

Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 03.327/1999/KGB der Bundesanstalt für Straßenwesen (noch unveröffentlicht). Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum. Bochum 2002

CERWENKA et al., 1995: Cerwenka, P.; Klamer, M.

Tempolimits für Personenkraftwagen aus ökonomischer Sicht. In: Zeitschrift für Verkehrswissenschaft, 66 (1995), S. 87-112

CREMER, 1976: Cremer, M.

Modellbildung und Messwertaufbereitung für den Verkehrsablauf auf Schnellstraßen. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 3/1976, S. 86-92

CREMER, 1979: Cremer, M.

Der Verkehrsfluss auf Schnellstraßen. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1979

DOORMANN, 1973: Doormann,J.

Dynamische Modelle in der Straßenverkehrstechnik. Veröffentlichung des Instituts für Städtebauwesen, TU Braunschweig 1973

EDIE, 1954: Edie, L.C.

Traffic Delays at Tall Booths. Operations Research 2, No. 2; 1954

ENGELMANN, 2002: Engelmann, F.

Verkehrsablauf an Fahrstreifenreduktionen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 02.196/1999/ARB der Bundesanstalt für Straßenwesen (unveröffentlicht). Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover. Hannover 2002

FGSV, 1991(a): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Merkblatt über Detektoren für den Straßenverkehr. Köln 1991

FGSV, 1991(b): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Empfehlungen für Verkehrserhebungen - EVE '91. Köln 1991

FGSV, 1992: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Hinweise für Steuerungsmodelle von Wechselverkehrszeichenanlagen in Außerortsbereichen, Ausgabe 1992. Köln 1992

FGSV, 1992/96: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Merkblatt über Luftverunreinigungen an Straßen (MLuS 92), Ausgabe 1992, geänderte Fassung 1996. Köln 1996

FGSV, 1996: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte, Ausgabe 1996 (RAS-Q 96). Köln 1996

FGSV, 1997: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, Aktualisierung der RAS-W-86, Entwurf 1997 (EWS 97). Köln 1997

FGSV, 2000: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb, Ausgabe 2000. Köln 2000

FGSV, 2001: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.)

Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS), Ausgabe 2001. Köln 2001

GAZIS et al., 1961: Gazis, D:C.; Herman, R.; Rothery, R.W.

Nonlinear Follow-The-Leader Models of Traffic Flow. Operns. Res. 9 (1961)

GREENSHIELDS, 1935: Greenshields B.D.

A Study in Highway Capacity. Highway Research Board, Proc. 14, 1935

HANSEN et al., 1998: Hansen, I.A.; Westland, D.

Staumentwicklung richtig deuten - Kritik zum Beitrag: „KERNER/REHBORN: Messungen des Verkehrsflusses: Charakteristische Eigenschaften von Staus auf Autobahnen“. In: Internationales Verkehrswesen 7+8/1998, Seite 345 ff.

HEIDEMANN et al., 1990: Heidemann, d.; Hotop, R.

Verteilung der PKW-Geschwindigkeiten im Netz der Bundesautobahnen - Modellmodifikation und Aktualisierung. In: Straße und Autobahn, Heft 3/1990

HEIDEMANN et al., 1982: Heidemann, D.; Wimber, P.

Typisierung von Verkehrsstörkegänglinien durch clusteranalytische Verfahren. Schriftenreihe Straßenverkehrszählungen, Heft 26. Bergisch Gladbach 1982

- HEUSCH/BOESEFELDT, 1996:** Laffont, S.; Regniet,G.; Schmidt,G.
Stau-Prognose für Baustellen auf Autobahnen in Bayern. Dokumentation zum Verfahren (Entwurf). Auftraggeber Autobahndirektion Südbayern. Aachen 1996
- HLSV, 1999:** Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrs wesen
Baustelleninformation in Hessen. Informationsbroschüre. Wiesbaden 1999
- HOFFMANN et al., 1981:** Hoffmann, G.; Eichhorn, J.; Franz, G.-M.; Schwencke, K.-R.; Zmeck, D.
Auswirkungen von Reparatur-Baumaßnahmen auf der Bundesautobahn Stadtring Berlin auf den Verkehrsablauf und das Unfallgeschehen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 329. Bonn 1981
- HUBSCHNEIDER et al., 1977:** Hubschneider, H.; Leutzbach, L.; Wiedemann, R.
Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen mit zweispurigen Richtungsfahrbahnen im Hinblick auf empirisch nicht ausreichend verifizierbare Situationen. Forschungsauftrag der BASt, 1977
- KAYSER et al., 1991:** Kayser, H.J.; Hess, M.
Planung von Baustellen auf Autobahnen (RS 7/90), Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH Aachen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben des BMV. Bonn 1991
- KELLER, 1987:** Keller, H.
Mathematische Modelle des Verkehrsablaufs. In: Lapierre, R.; Steierwald, G.: Verkehrsleittechnik für den Straßenverkehr, Band I: Grundlagen und Techniken der Verkehrsleittechnik. Springer Verlag, Berlin 1987
- KELLERMANN, 1997:** Kellermann, G.
Stau an Baustellen - ein vereinfachtes Berechnungsverfahren. In: Straße + Autobahn, Heft 7/1997, S. 366-370
- KERNER, 2001:** Kerner, B. S.
Tracing and Forecasting of Congested Patterns for Highway Traffic Management, 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings. Oakland (USA) 2001
- KERNER, 1998:** Kerner, B. S.
Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow. Physical Review Letters, Vol. 81, 3797-4000, 1998
- KERNER ET AL., 1998:** Kerner, B. S.; Rehborn, H.
Messungen des Verkehrsflusses: Charakteristische Eigenschaften von Staus auf Autobahnen. In: Internationales Verkehrswesen, Heft 5/1998, S. 196-203
- KRAUSE, 1988:** Krause, S.
Ein selbstregulierendes Prognoseverfahren zur Verkehrsbeeinflussung. Mitteilung des Lehrstuhls für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, RWTH Aachen, Heft 28. Aachen 1988
- LEMKE et al., 2001:** Lemke, K.; Moritz, K.:
Freigabe von Seitenstreifen auf Bundesautobahnen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V94. Bergisch Gladbach 2001
- LENZ et al., 1970:** Lenz, K.-H.; Steinhoff, H.
Verkehr auf Behelfsfahrstreifen der BAB-Baustellen. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 4/1970, S. 107-112

LENZ, 1971: Lenz, K.-H.

Verbesserung des Verkehrsflusses auf Autobahnen durch kurzzeitige Zufahrtsbeschränkungen. Straßenbautagung Berlin 1970, Tagungsbericht. Kirschbaum Verlag. Bonn 1971

LEUTZBACH, 1972: Leutzbach, W.

Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses. Springer Verlag, 1972

LIGHTHILL et al., 1955: Lighthill, M.J.; Witham, G.B.

On Kinematic Waves, II, A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads; Proc. Roy. Soc. 229A, 1955

MATTHEIS, 2002: Mattheis, C.

Auswirkungen der Umnutzung von BAB-Standstreifen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V91. Bergisch-Gladbach 2002

MATHEWS, 1984: Mathews, D. H.

Traffic Management for Major Roadworks on Dualcarriageways. PTRC 12th Summer Annual Meeting, Proceedings of Seminar L, S. 239-254, 1984

MAY et al., 1968: May, A.D.; Keller, H.

Evaluation of Single- and Two-Regime Traffic Flow Models. In: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1969. Bonn 1968

MAZE et al., 2000: Maze, T.H.; Schrock, S.D.; Kamyab, A.

Capacity of Freeway Work Zone Lane Closures. Proceedings of the Mid Continent Transportation Symposium. Center for Transportation Research and Education Iowa State University. Ames Iowa, 2000

MICHAELS, 1963: Michaels, R.M.

Perceptual Factors in Car-Following. Proc. 2 Int. Symp. on the Theory of Road Traffic Flow. London 1963

MOMATEC, 2002:

Analyse der Verkehrsnachfrageschwankungen an hessischen Autobahnabschnitten. Untersuchung im Rahmen der Entwicklung von Verkehrsmanagement-Tools. Aachen, 2002

MORALES, 1987: Morales, J. M.

Analytical Procedures for Estimating Freeway Traffic Congestion. In: ITE Journal 57 (1987), Nr.1, S. 45-49

MURA, 1976: Mura, S.

Ein dynamisches Modell zur Beurteilung und Prognose des Straßenverkehrs. In: Straßenverkehrstechnik 5/1976, S. 183-187

OBER-SUNDERMEIER et al., 2003: Ober-Sundermeier, A.; Otto, J.

Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen - Störungsursache: Arbeitsstellen. Forschungsprojekt FE 01.153/2000/CRB im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Fachgebiet Verkehrstechnik, Universität Kassel (bislang unveröffentlicht). Kassel, 2003

OECD, 1990:

Verkehrsführung und Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen, Bericht einer Arbeitsgruppe der OECD. Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Straßenbau. Bern 1990

OTTO, 2002: Otto, J.C.

QuantAS (Quantifizierung von Reisezeitverlusten an Arbeitsstellen) - Programmdokumentation. Universität Kassel, Fachgebiet Verkehrstechnik, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Kassel 2002

OTTO et al., 2001: Otto, J.C.; Beckmann, A.:

SAB (Stauprognose an Autobahnbaustellen) - Bedienungsanleitung und Programmdokumentation. Universität Kassel, Fachgebiet Verkehrstechnik, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Kassel 2001

PAPENDRECHT et al., 1991: Papendrecht, J. H.; Schuurmann, H.

Bottlenecks on Freeways: Traffic Operational Aspects of Roadworks. In: Highway Capacity and Level of Service. Proceedings of the International Symposium on Highway Capacity, Karlsruhe, 24. - 27.07.1991, Verlag A.A. Balkema, S. 283-288. Rotterdam 1991

PONZLET, 1996a: Ponzlet, M.

Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 718. Bonn 1996

PONZLET, 1996b: Ponzlet, M.

Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum, Heft 16. Bochum 1996

REKERSBRINK, 1994: Rekersbrink, A.

Verkehrsflusssimulation mit Hilfe der Fuzzy-Logik und einem Konzept potentieller Kollisionszeiten. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen Universität Karlsruhe (TH), Heft 51. Karlsruhe 1994

RESSEL, 1994: Ressel, W.

Untersuchung zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen. Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 37. München 1994

RESSEL, 1996: Ressel, W.

Untersuchung des Ingenieurbüro Dr.-Ing. Ressel + Partner im Auftrag der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren. Unveröffentlicht. 1996

RÖHR et al., 1996: Röhr, T.; Lindenbach, A.

Entwicklung von Verfahren zur großräumigen Prognose der Verkehrsentwicklung und Folgerungen für den Datenaustausch von Verkehrsrechnerzentralen, Teil I: Prognoseverfahren. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 727. Bonn 1996

RUTISHAUSER et al., 1994: Rutishauser, G.; Mögerle, R.; Keller, R.

Leistungsfähigkeit beim Fahrstreifenabbau auf Hochleistungsstraßen (FA 42/90). Bundesamt für Straßenbau, Heft 337. Bern 1994

SACHSE, 1992: Sachse, T.

Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Straßenabschnitten. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 614. Bonn 1992

SCHMUCK ET AL., 1984: Schmuck, A.; Becker, H.

Untersuchungen über Einflüsse auf baustellenbedingte geschwindigkeitsabhängige Anteile an den Straßennutzungskosten. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 421. Bonn 1984

SCHÖNBORN ET AL., 1995: Schönborn, H.-D.; Schulte, W.

RSA-Handbuch. Kirschbaum Verlag. Bonn 1995

SCHRECKENBERG ET AL., 1998: Schreckenberg; Barlovic; Esser; Froese; Knospe u.a.:

Mikroskopische Simulation von Straßenverkehrsnetzen und analytische Methoden. In: Stadt Region Land 66 - Tagungsband zum Ergebnis-Workshop Verkehr und Mobilität - Verhalten, Simulation, Umwelt. Aachen 1998

SCHULTE, 1992: Schulte, W.

Verbesserung bei der Durchführung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 4/1992, S. 177-187

STÖCKERT, 2001: Stöckert, R.

Auswirkungen von Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrsablaufes. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Heft 457, VDI-Verlag. Düsseldorf 2001

TODOSIEV, 1963: Todosiev, E.P.

The Action-Point-Model of the Driver-Vehicle-System. Engin. Experiment. Station; Ohio State University, Columbus, Ohio, Report Nr. 202, A-3, 1963

TRB: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (Hrsg.):

Highway Capacity Manual (HCM 2000). Transportation Research Board Special Report 209. Washington, D.C. 1994

TRB: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (Hrsg.):

Highway Capacity Manual (HCM 2000), Metric Version. Transportation Research Board. Washington, D.C. 2000

VAN AERDE, 1995: van Aerde, M.

A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials. Paper No. 950802, Presented at the 74th TRB Annual Meeting. Washington 1995

WIEDEMANN, 1974: Wiedemann, R.

Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen Universität Karlsruhe (TH), Heft 8. Karlsruhe 1974

WU, 2000: Wu, N.

Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm - Ein neues Modell und seine Anwendungen. In: Straßenverkehrstechnik, Heft 8/2000, S. 378-388

ZACKOR, 1976: Zackor, H.

Untersuchung von Steuerungsmodellen zur Verkehrsstromführung mit Hilfe von Wechselwegweisern, Teil III: Entwicklung von Steuerungsmodellen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 199. Bonn 1976

ZACKOR ET AL., 1980: Zackor, H.; Herkt, S.

Verbesserung des Steuerungsmodells zur Wechselwegweisung auf Autobahnen im Rhein/Main-Gebiet. Berat. Ing. Steierwald/Schönharting, i.A. Hrsg. Landesamt für Straßenbau. Wiesbaden 1980

ZACKOR ET AL., 2001: Zackor, H.; Möller, B.

Strategien zur Verkehrssteuerung an hoch belasteten Anschlussstellen; Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 803. Bonn, 2001

Anlagen

- Anlage 1:** Auswertung automatisch erfasster Staudaten an Arbeitsstellen im hessischen Autobahnnetz
- Anlage 2:** Auswertung automatisch erfasster Staudaten an Arbeitsstellen im nordrhein-westfälischen Autobahnnetz
- Anlage 3:** Auswertung der Daten der umsetzbaren Stauwarnanlage A1 Ladbergen
- Anlage 4:** Auswertung der Daten der umsetzbaren Stauwarnanlage A9 Gefrees
- Anlage 5:** Analyse des Verkehrsablaufs an der umsetzbaren Stauwarnanlage A1 Dortmund/Unna - Schwerte
- Anlage 6:** Ergänzende Erhebungen an Autobahnbaustellen
- Anlage 7:** Verfahren zur Ermittlung von Pkw-Äquivalenzwerten in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil und der Längsneigung

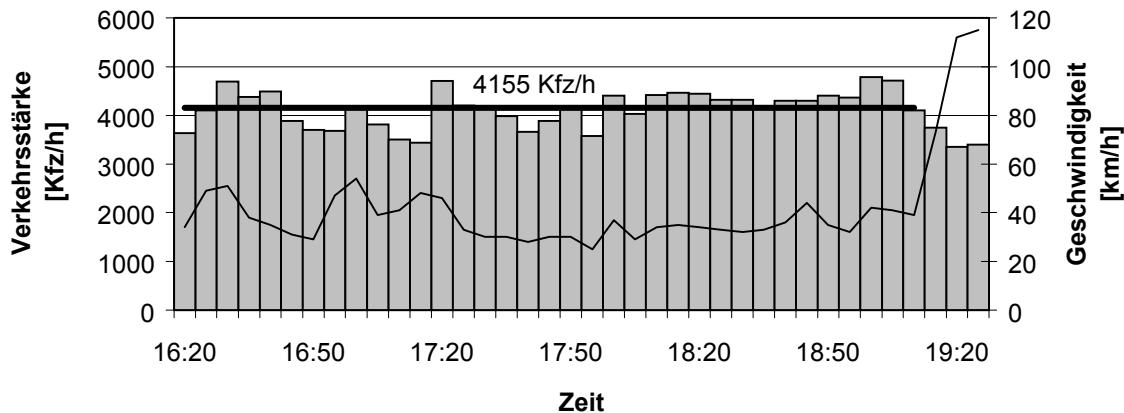
Anlagen

Anlage 1: Auswertung automatisch erfasster Staudaten an Arbeitsstellen im hessischen Autobahnnetz

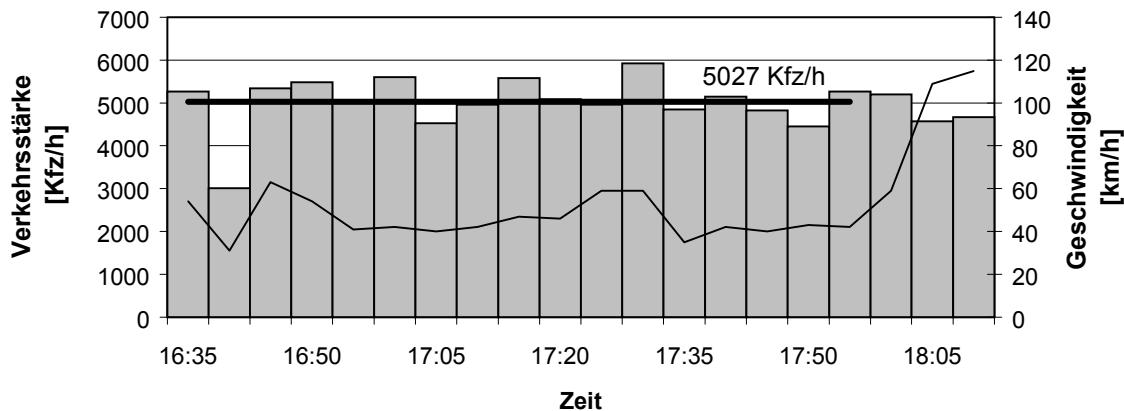
A1-2 bis A1-3 Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien der Stauereignisse an Arbeitsstellen längerer Dauer

A1-4 bis A1-5 Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien der Stauereignisse an Arbeitsstellen kürzerer Dauer

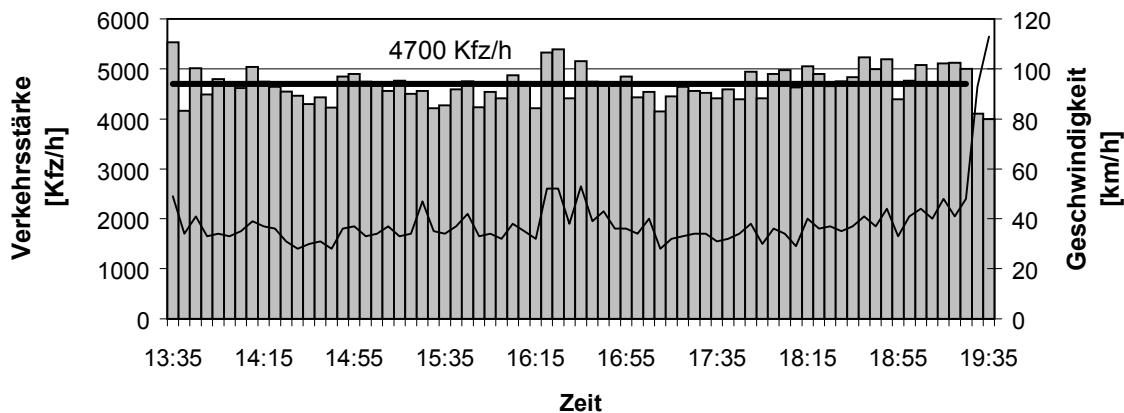
Dauerbaustelle VF 3n+3
 A5 AK Bad Homburg - AS Friedberg
 Montag 22.02.1999



Dauerbaustelle VF 3n+3
 A5 AK Bad Homburg - AS Friedberg
 Donnerstag 25.02.1999

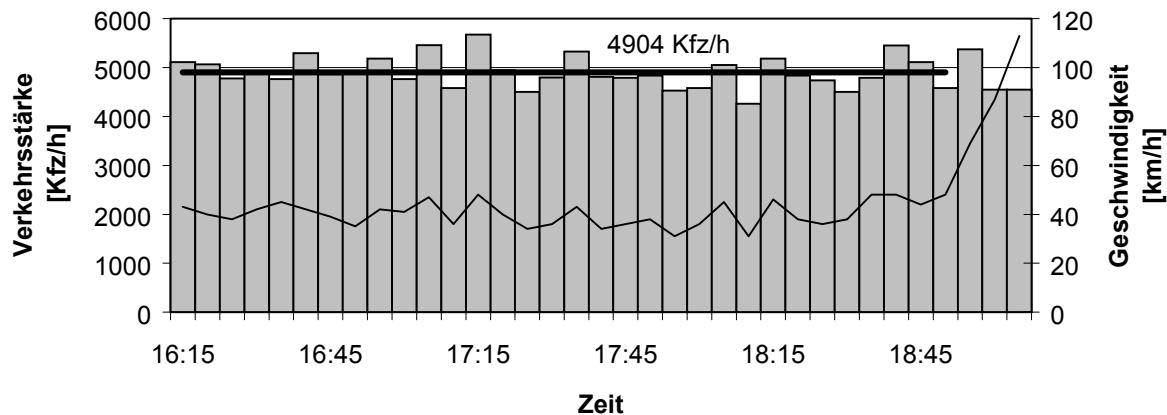


Dauerbaustelle VF 3n+3
 A5 AK Bad Homburg - AS Friedberg
 Freitag 05.03.1999

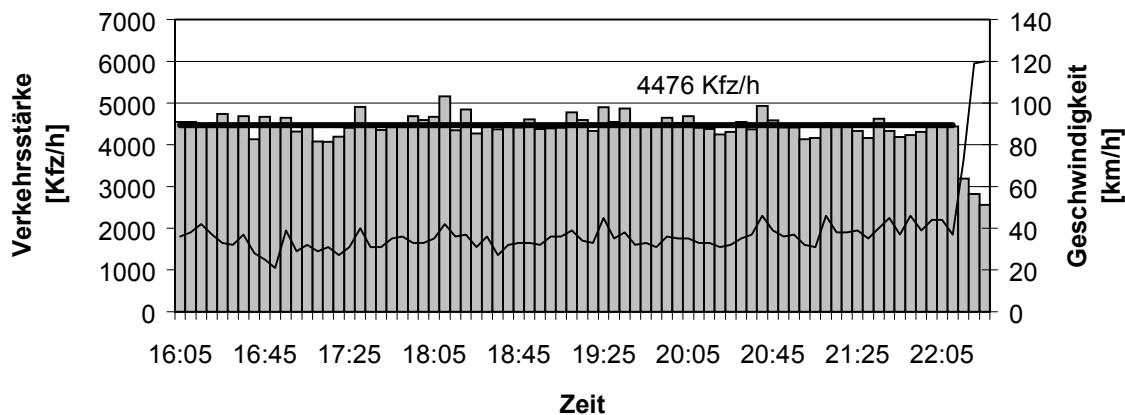


[■ Kfz 5-min-Mittelwert — Kapazität — Geschwindigkeit]

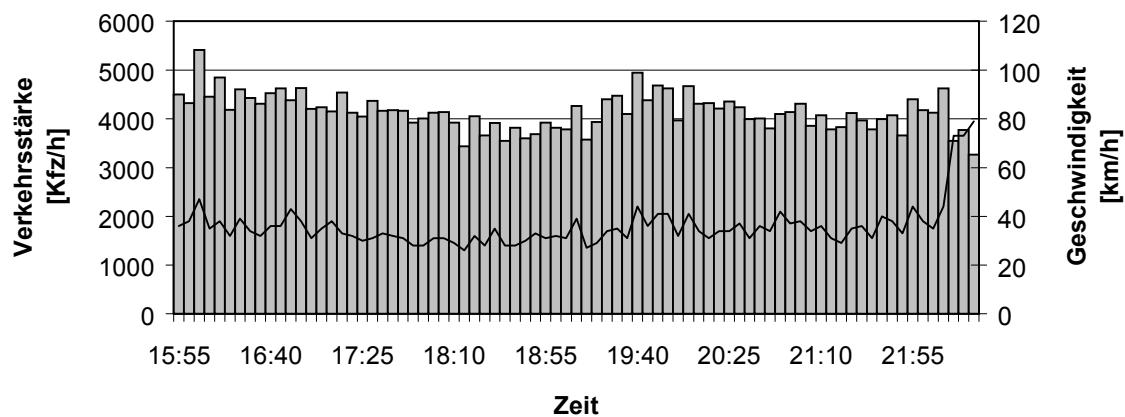
Dauerbaustelle VF 3n+3
 A5 AK Bad Homburg - AS Friedberg
 Donnerstag 18.03.1999



Dauerbaustelle VF 3n+3
 A5 AK Bad Homburg - AS Friedberg
 Mittwoch 12.05.1999

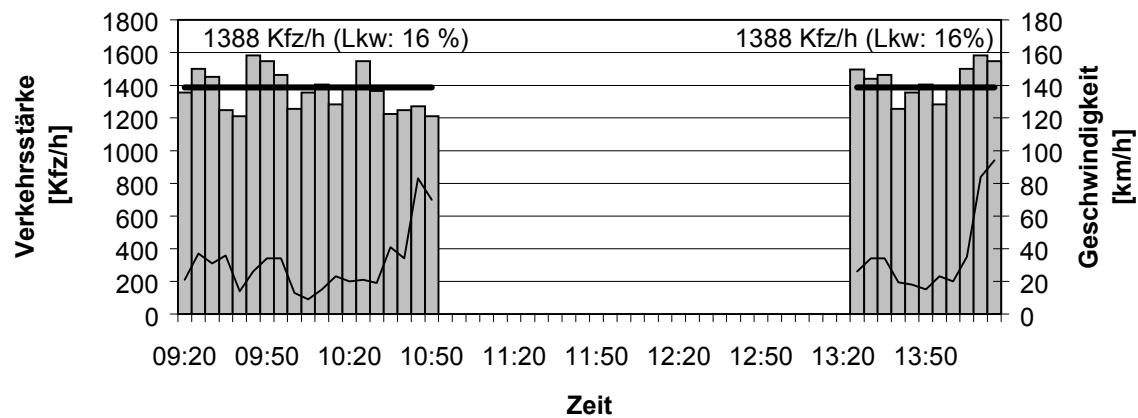


Dauerbaustelle VF 3n+3
 A5 AK Bad Homburg - AS Friedberg
 Mittwoch 02.06.1999

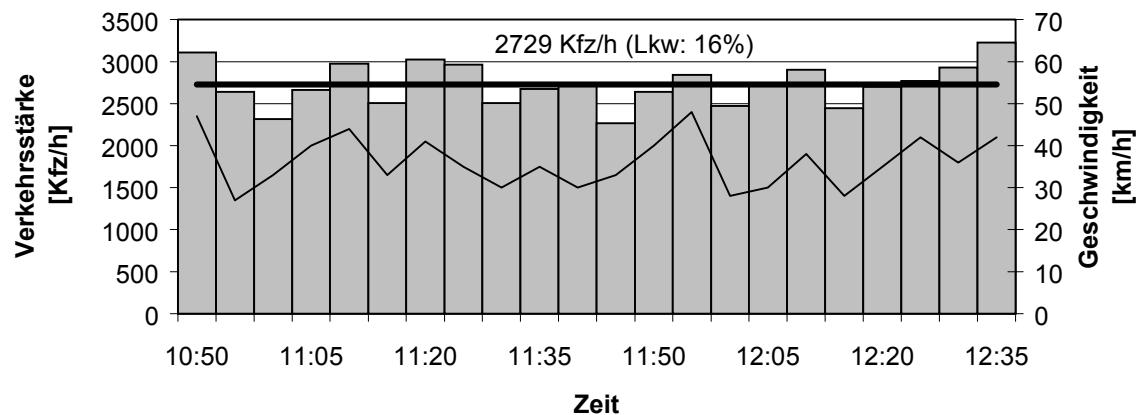


Kfz 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	-----------	-----------------

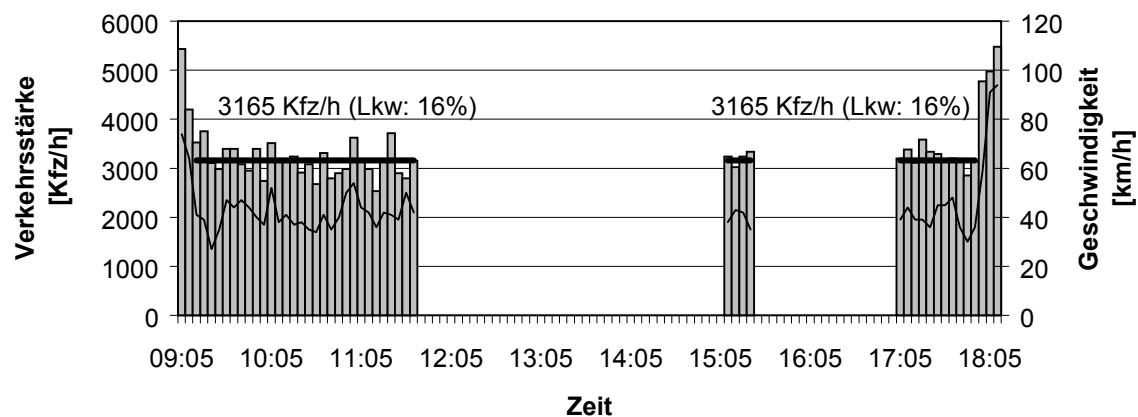
Tagesbaustelle VF 2n+1
A5 Heppenheim - Bensheim
Donnerstag 18.03.1999



Tagesbaustelle VF 3n+2
A5 Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM
Dienstag 23.02.1999

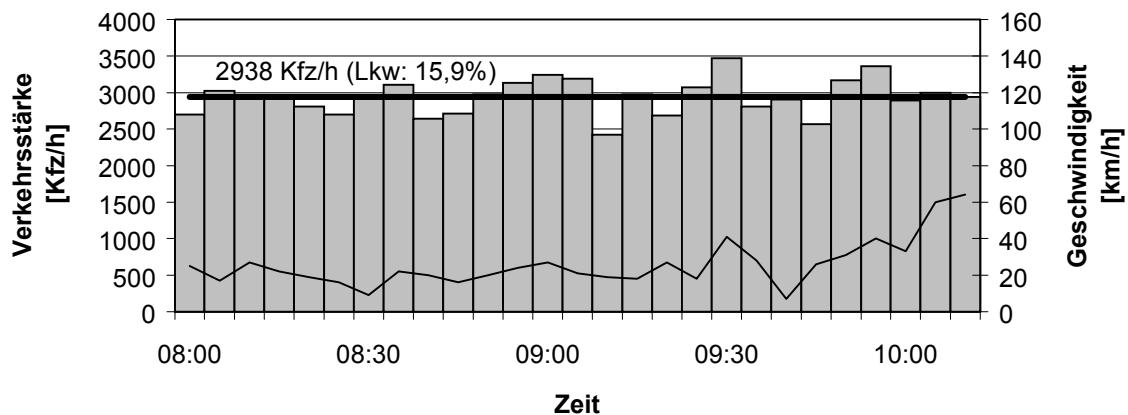


Tagesbaustelle VF 3n+2
A5 Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM
Mittwoch 24.02.99

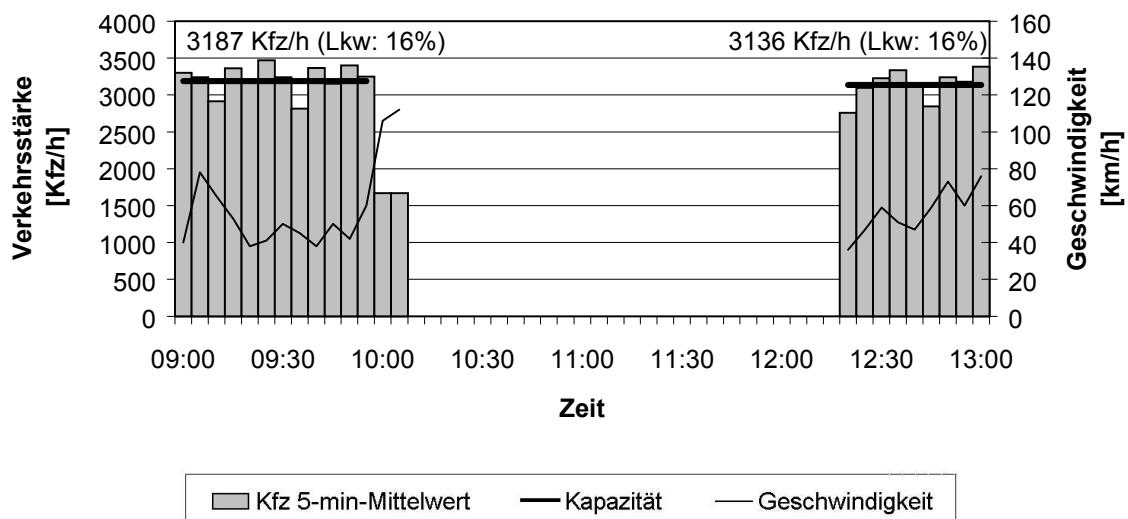


Kfz 5-min-Mittelwert — Kapazität — Geschwindigkeit

Tagesbaustelle VF 3n+2
 A5 Bad Homburger Kreuz - Nordwestkreuz FFM
 Donnerstag 06.05.1999

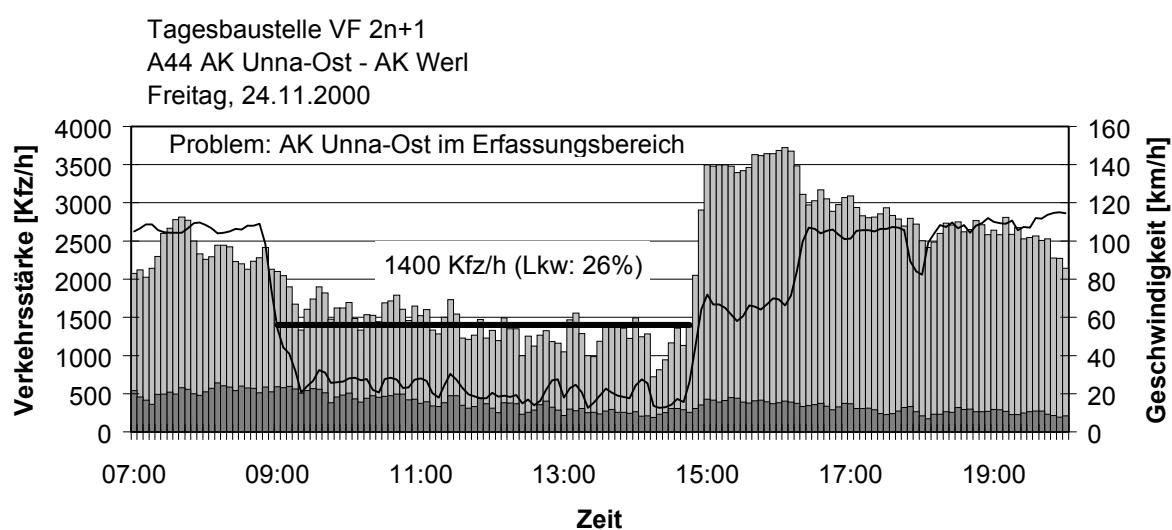
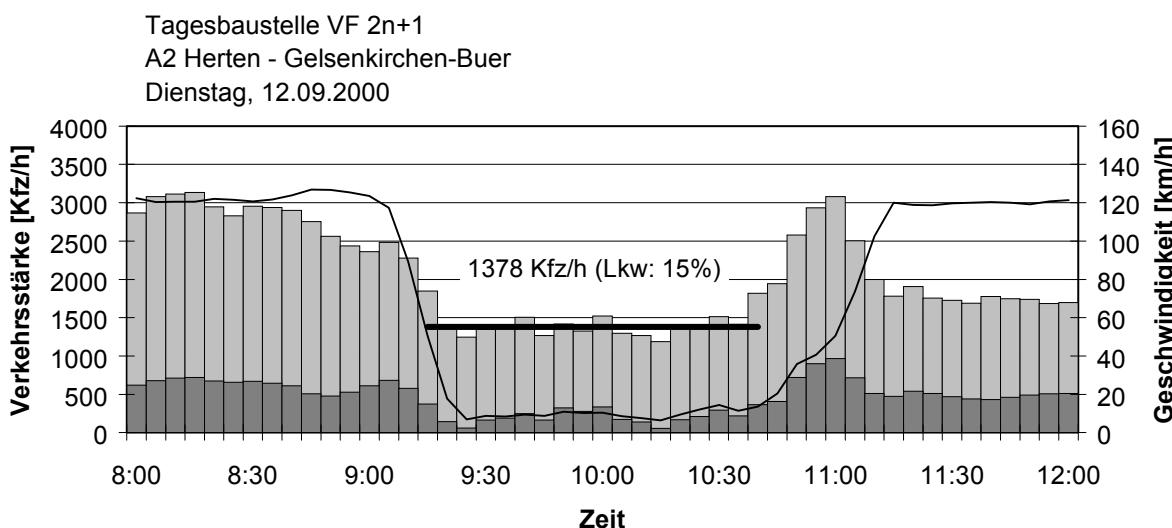
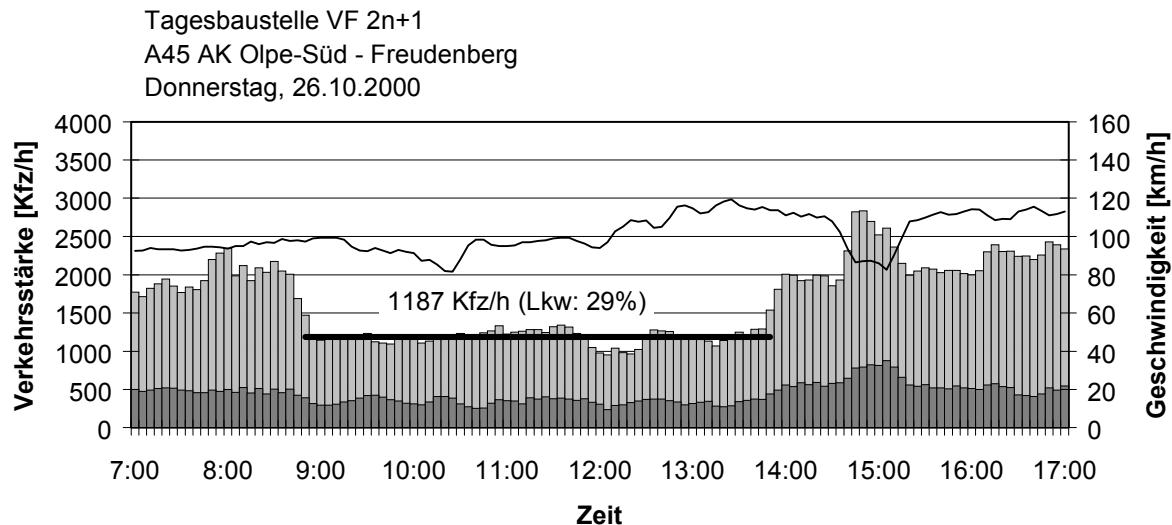


Tagesbaustelle VF 3n+2
 A5 Friedberg - Bad Homburger Kreuz
 Mittwoch 23.06.1999

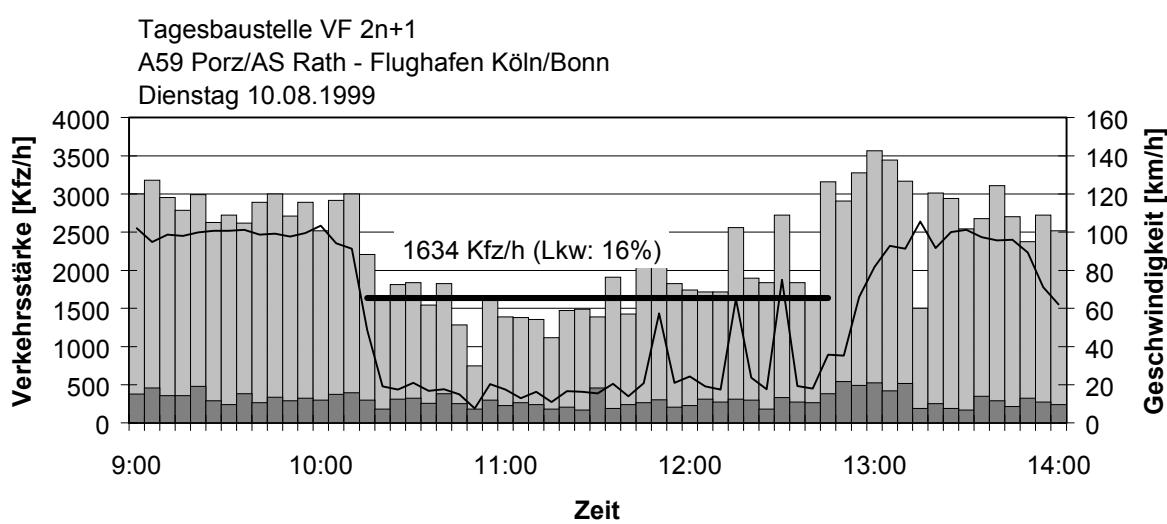
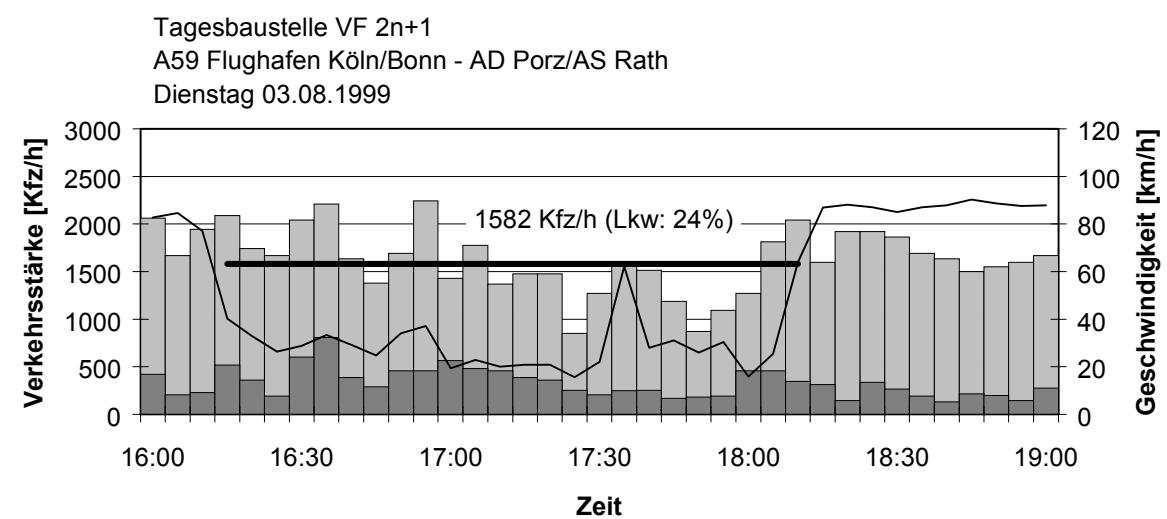
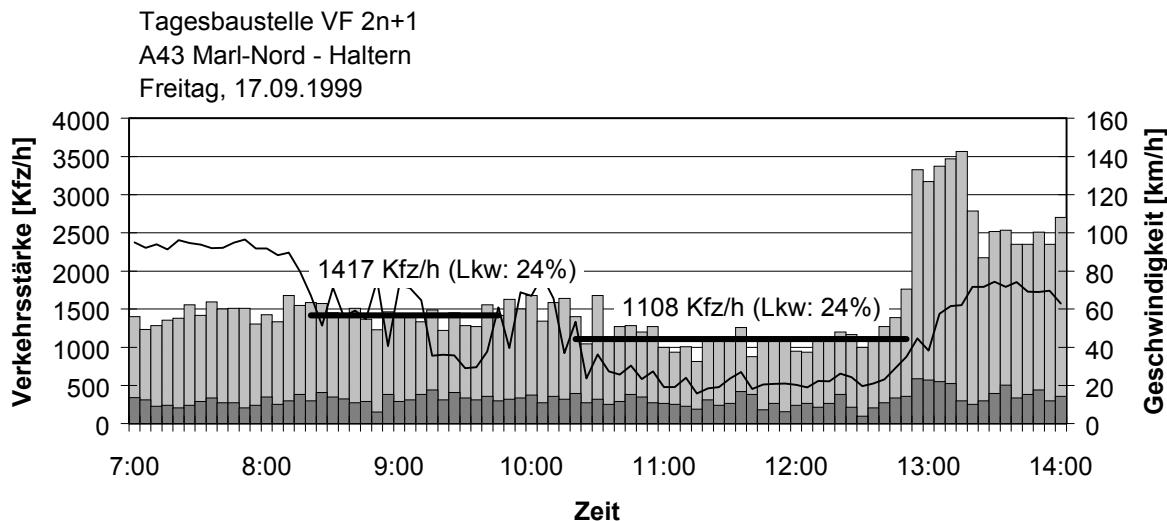


Anlage 2: Auswertung automatisch erfasster Staudaten an Arbeitsstellen im nordrhein-westfälischen Autobahnnetz

A2-2 bis A2-6 Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien der Stauereignisse an Arbeitsstellen kürzerer Dauer

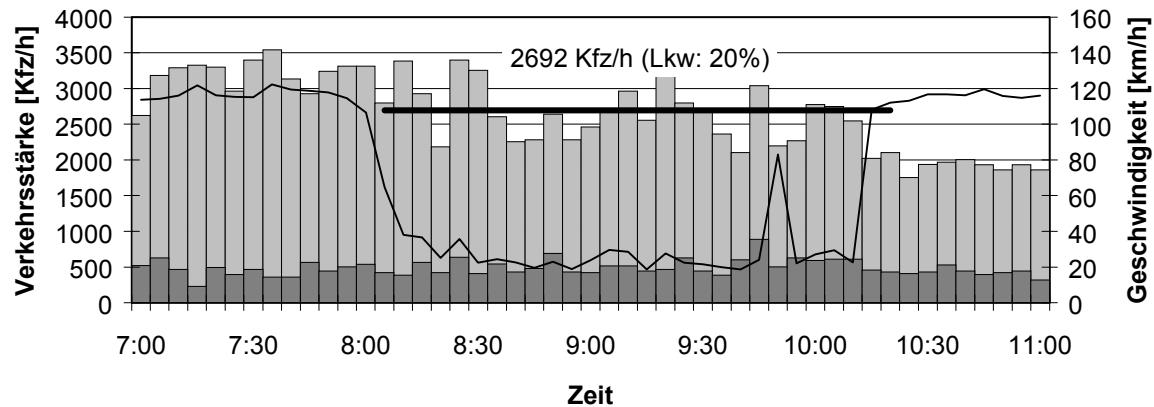


Kfz 5-min-Mittelwert	Lkw 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	----------------------	-----------	-----------------

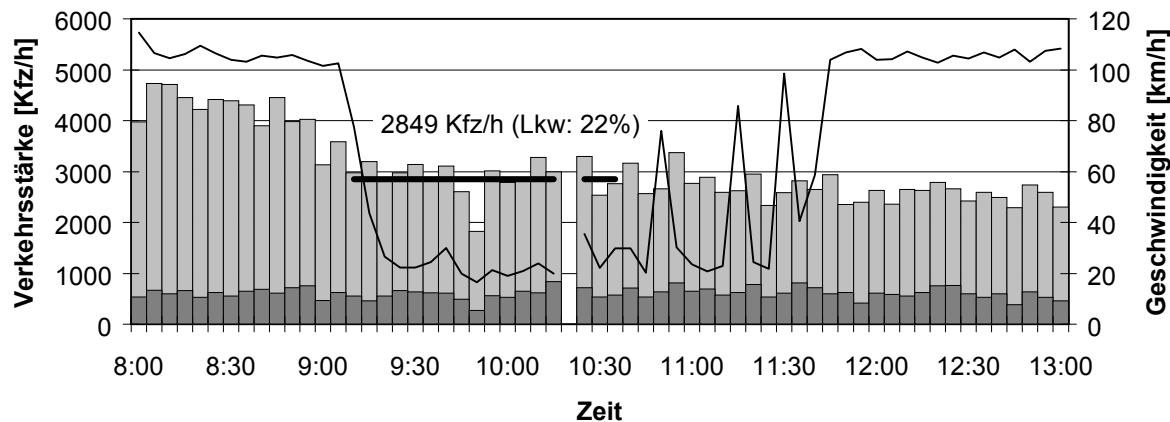


 Kfz 5-min-Mittelwert	 Lkw 5-min-Mittelwert	— Kapazität	— Geschwindigkeit
---	---	--	--

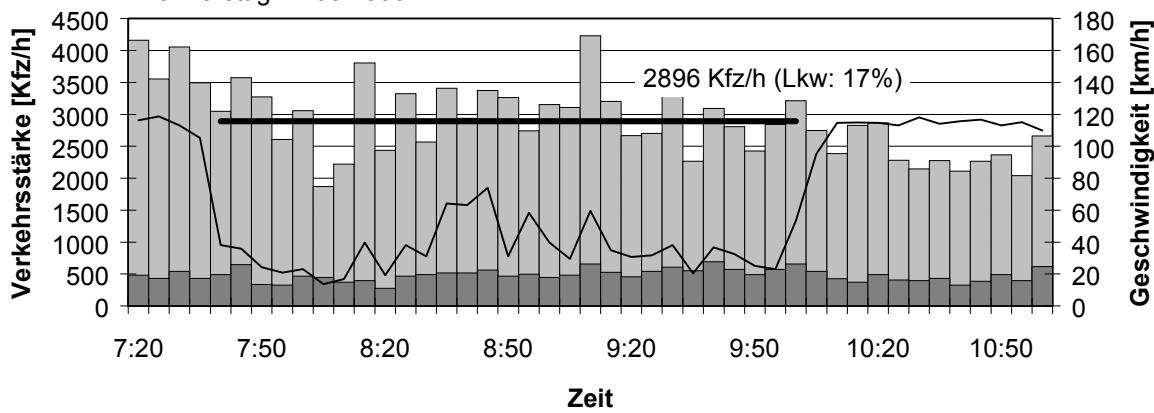
Tagesbaustelle VF 3n+2
 A3 AK Hilden - Mettmann
 Mittwoch 11.08.1999



Tagesbaustelle VF 3n+2
 A4 Köln-Poll - Köln-Süd
 Mittwoch 08.09.1999

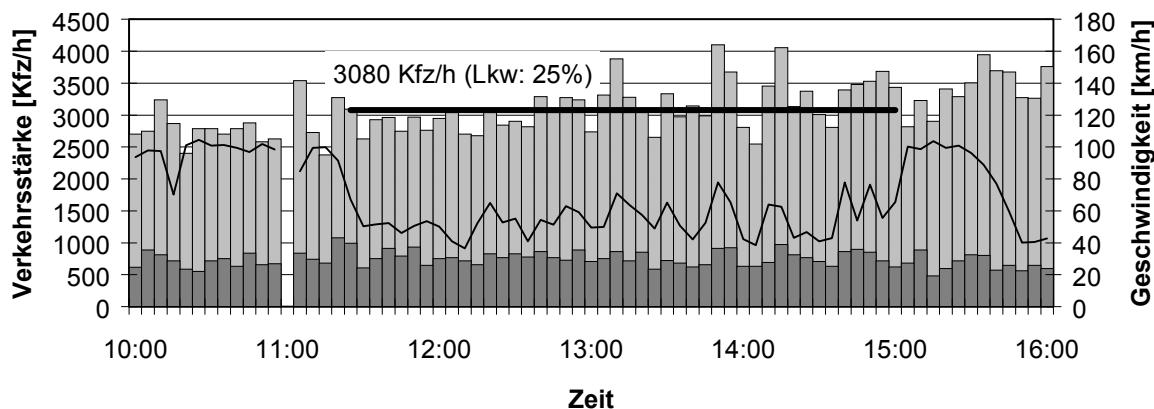


Tagesbaustelle VF 3n+2
 A3 AK Hilden - Mettmann
 Donnerstag 12.08.1999

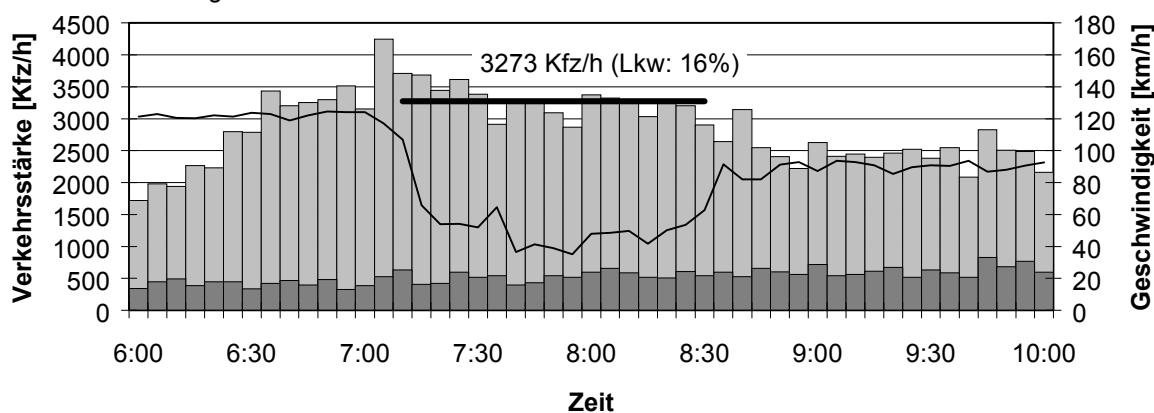


Kfz 5-min-Mittelwert	Lkw 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	----------------------	-----------	-----------------

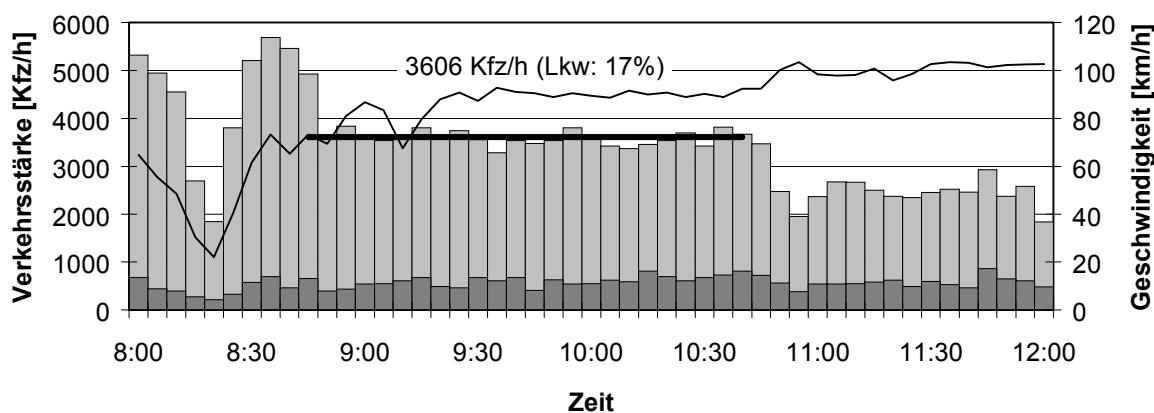
Tagesbaustelle VF 3n+2
A1 Köln-Lövenich - AK Köln-Nord
Mittwoch 15.09.1999



Tagesbaustelle VF 3n+2
A2 Kamen/Bergkamen - Dortmund-Nordost
Montag 13.09.1999



Tagesbaustelle VF 3n+2
A1 AK Leverkusen-West - Köln-Niehl
Mittwoch 11.08.1999

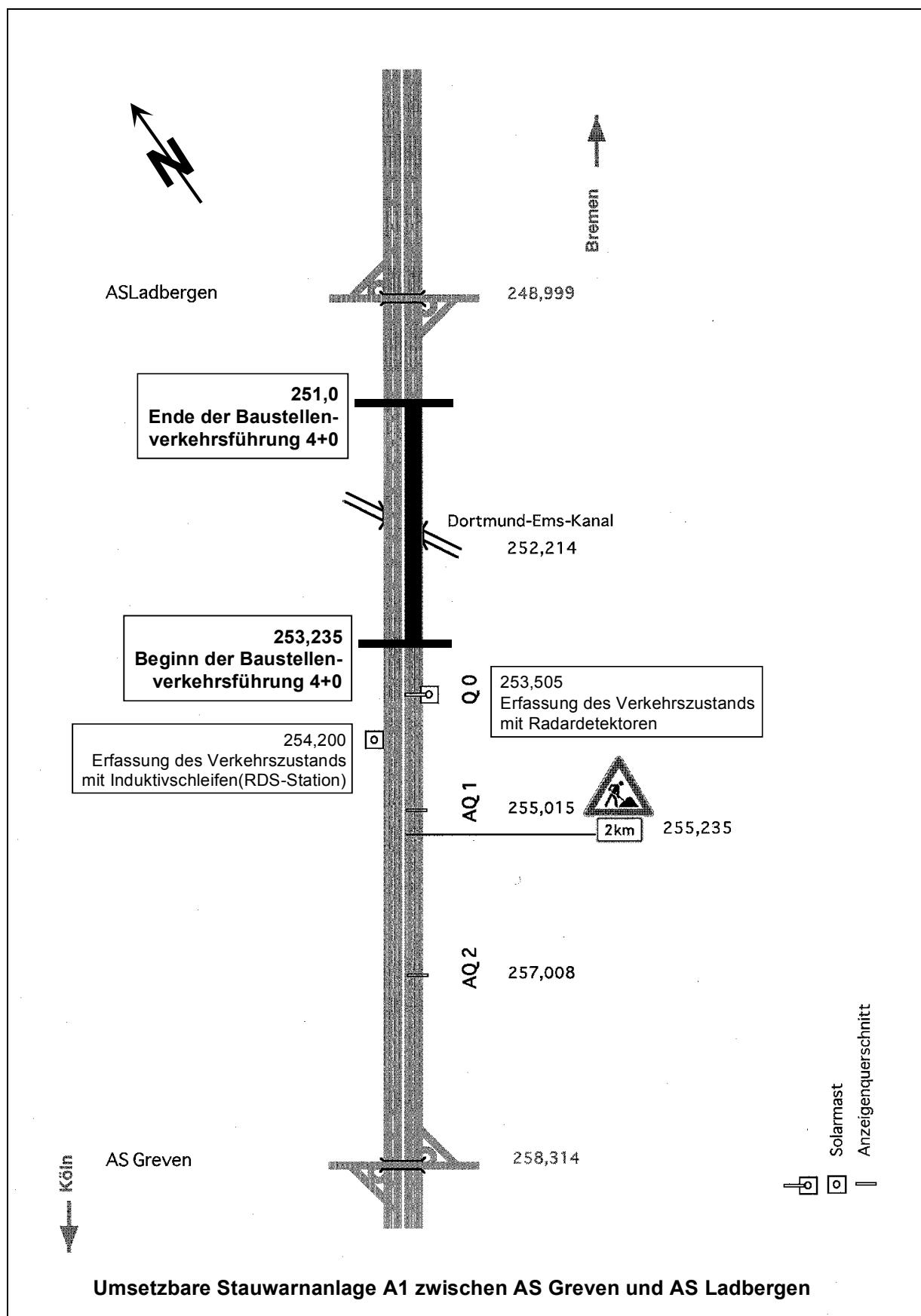


Kfz 5-min-Mittelwert	Lkw 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	----------------------	-----------	-----------------

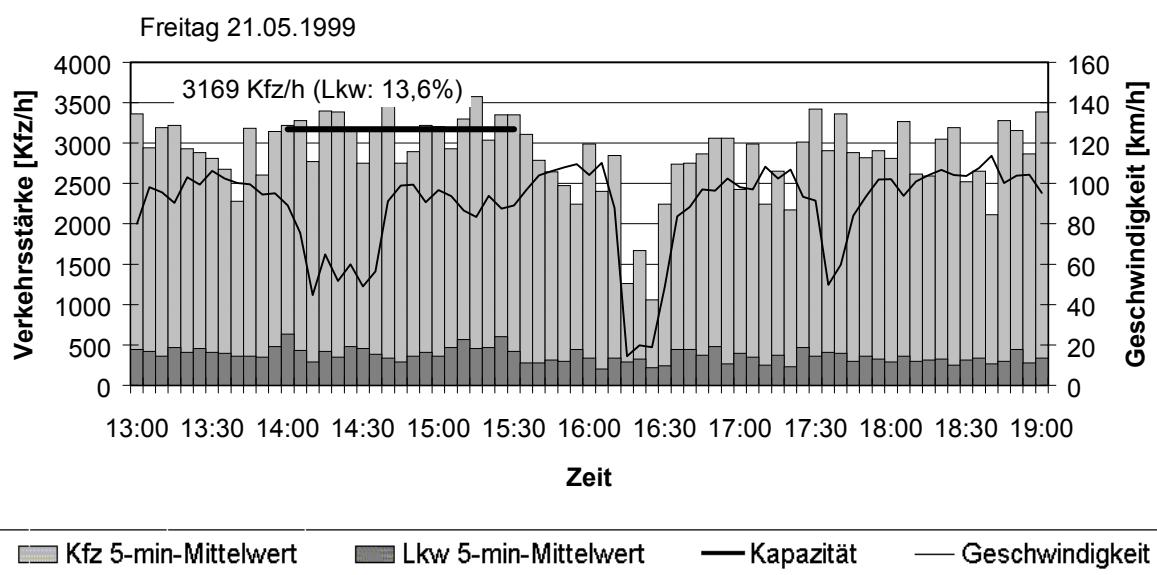
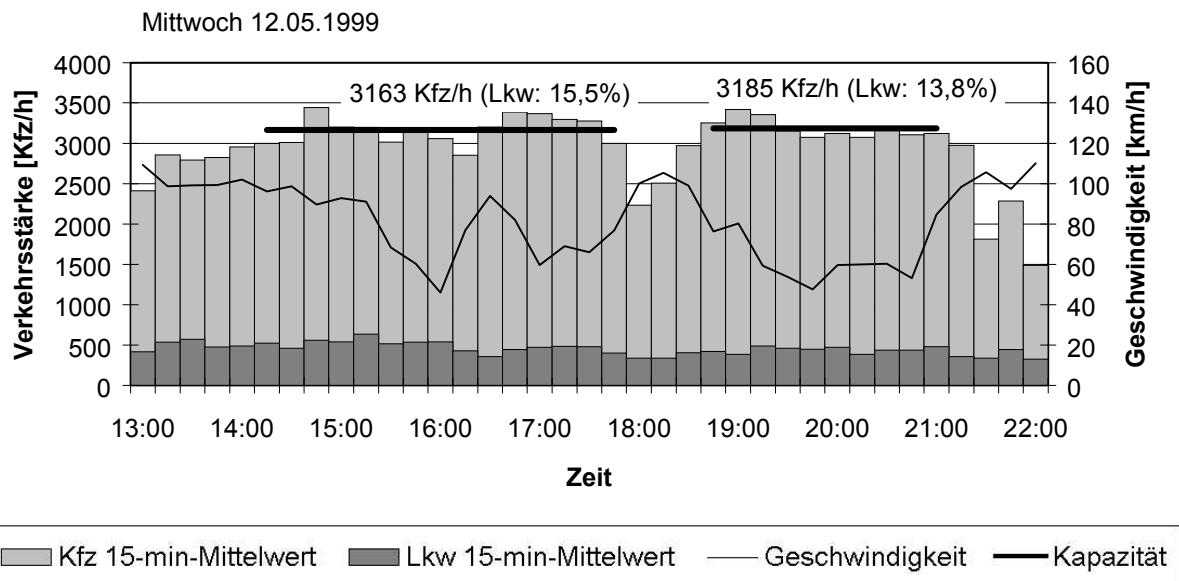
**Anlage 3: Auswertung der Daten der umsetzbaren Stauwarnanlage
A1 Ladbergen**

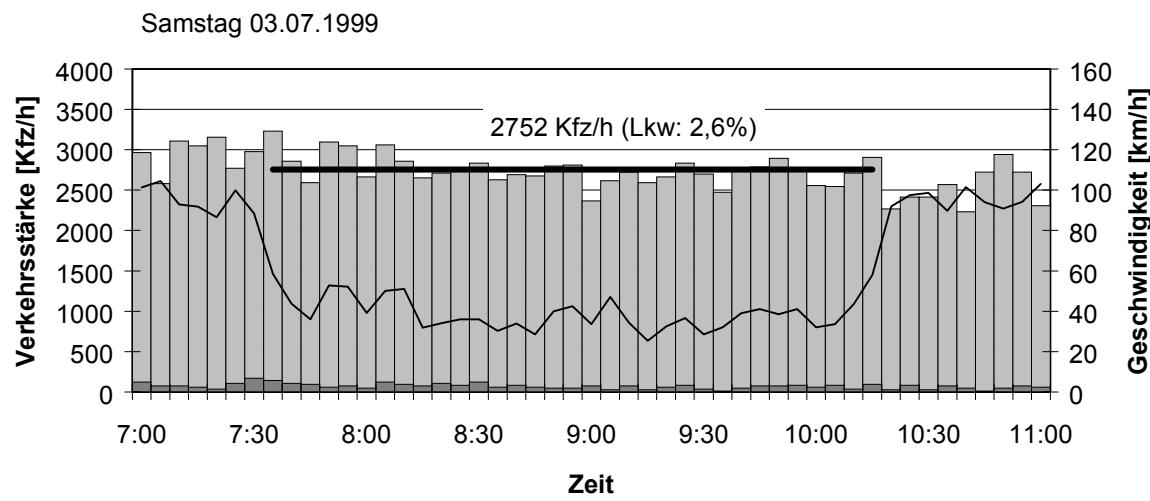
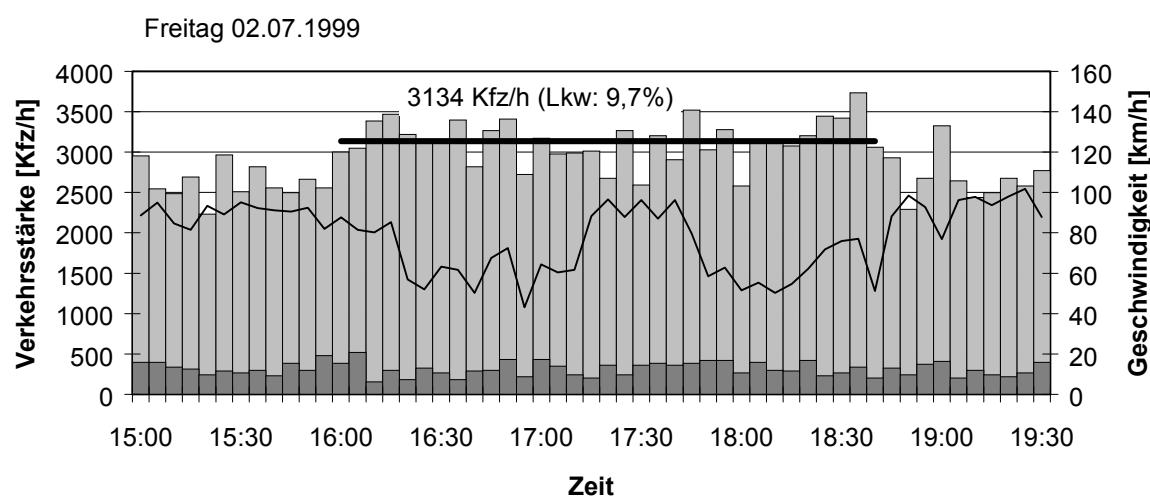
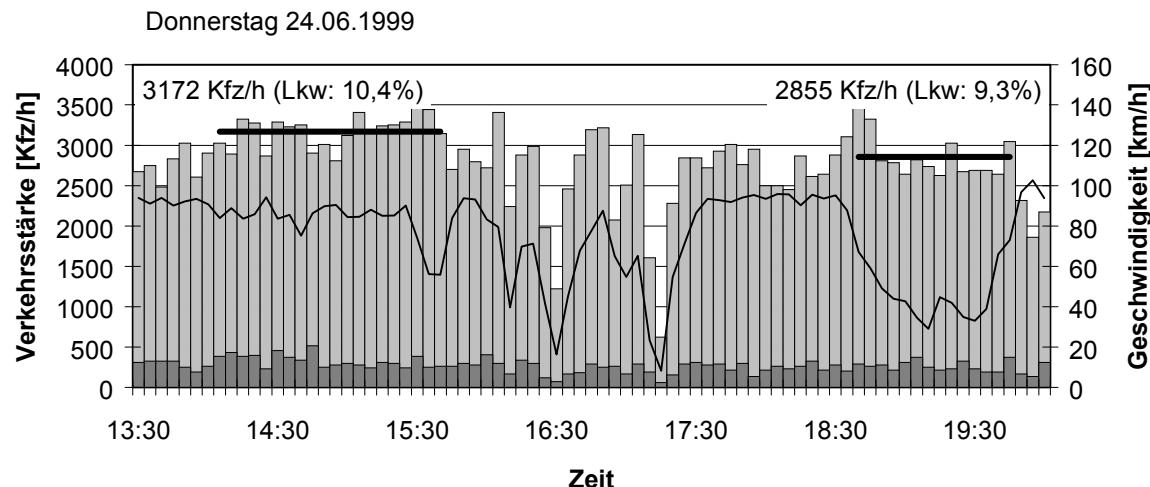
A3-2 Übersichtsplan der Anlage

A3-3 bis A3-8 Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien der erfassten Stauereignisse



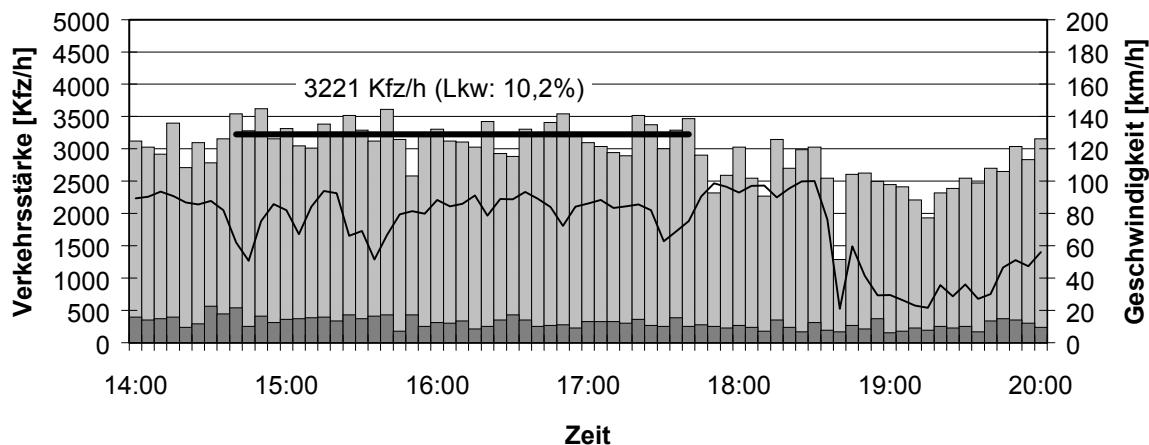
[Plangrundlage: Autobahnamt Hamm]



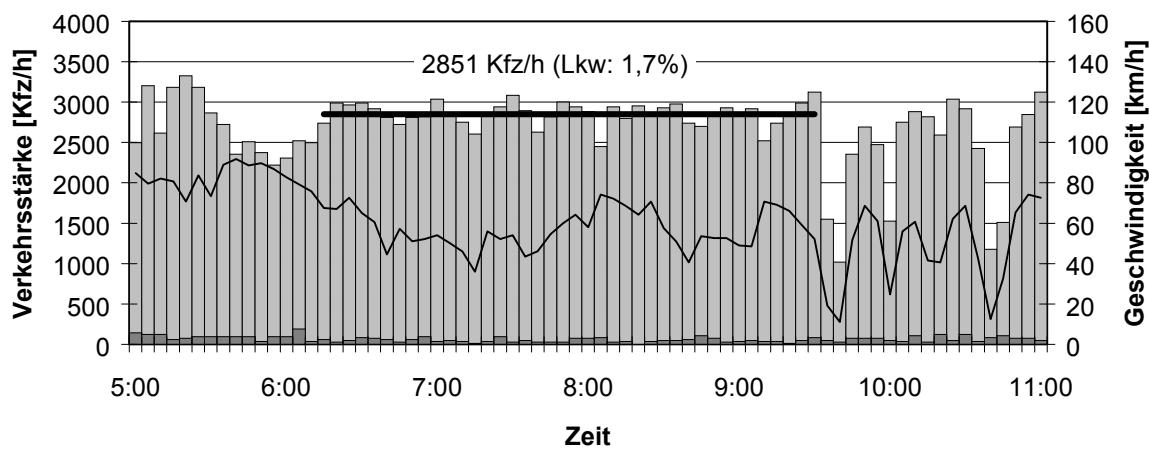


Kfz 5-min-Mittelwert	Lkw 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	----------------------	-----------	-----------------

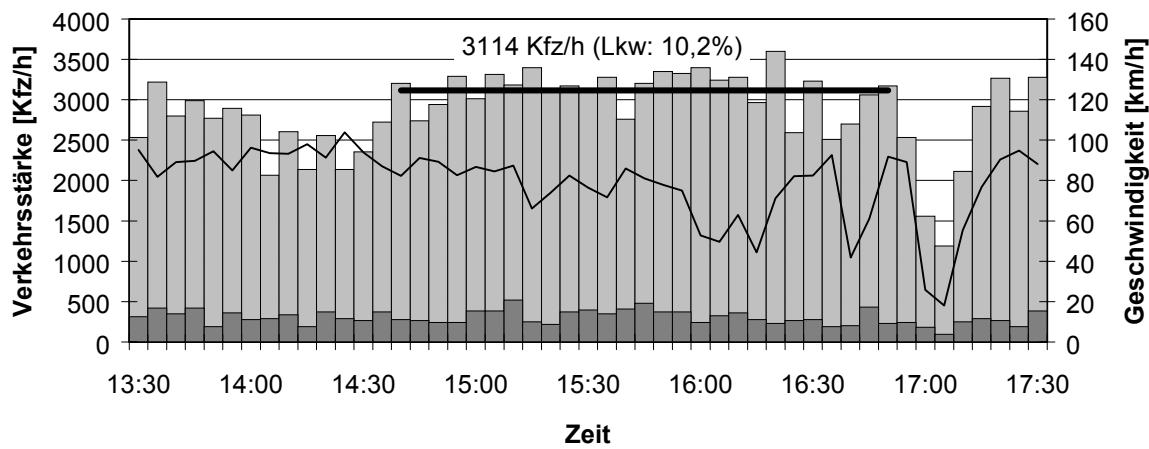
Freitag 09.07.1999



Samstag 10.07.1999

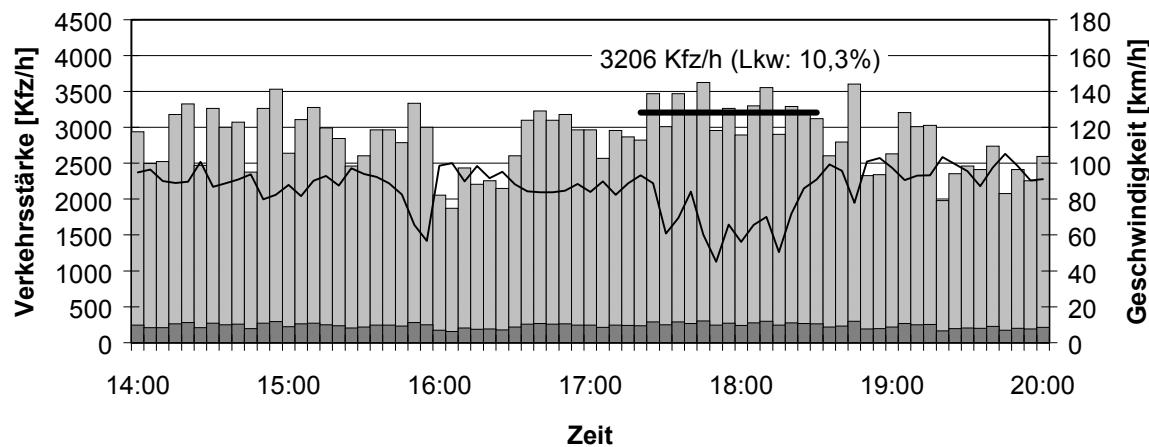


Freitag 16.07.1999

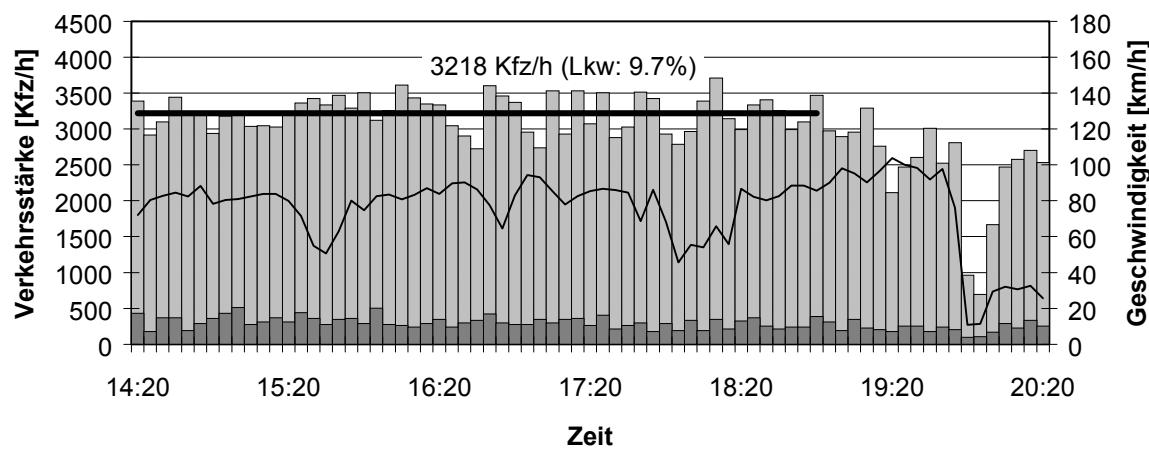


Kfz 5-min-Mittelwert	Lkw 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	----------------------	-----------	-----------------

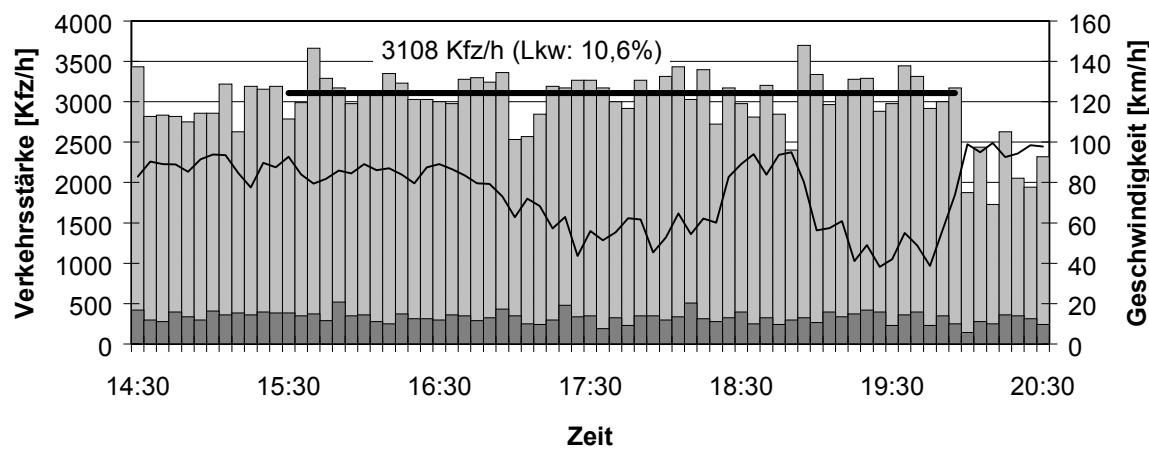
Freitag 06.08.1999



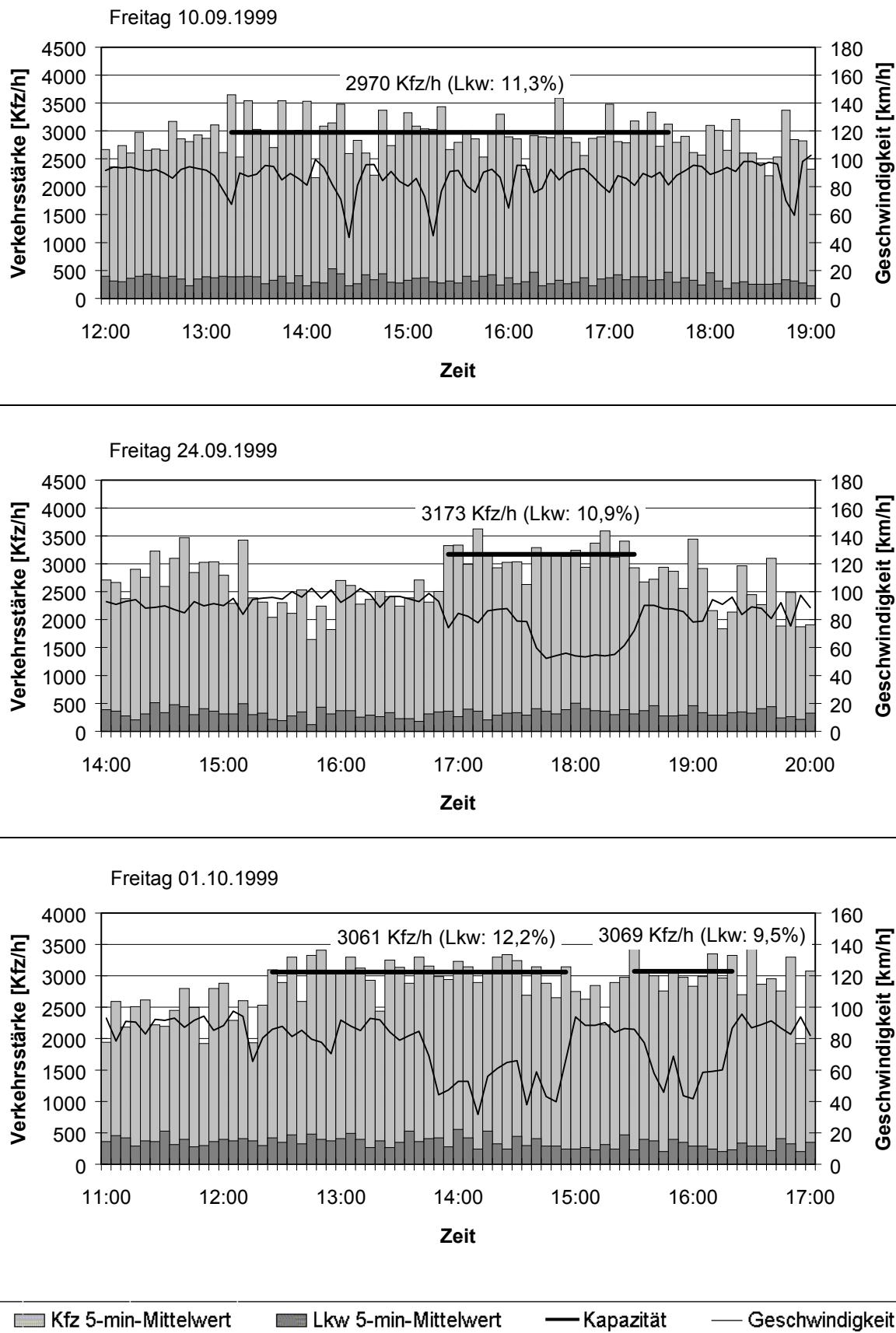
Freitag 13.08.1999

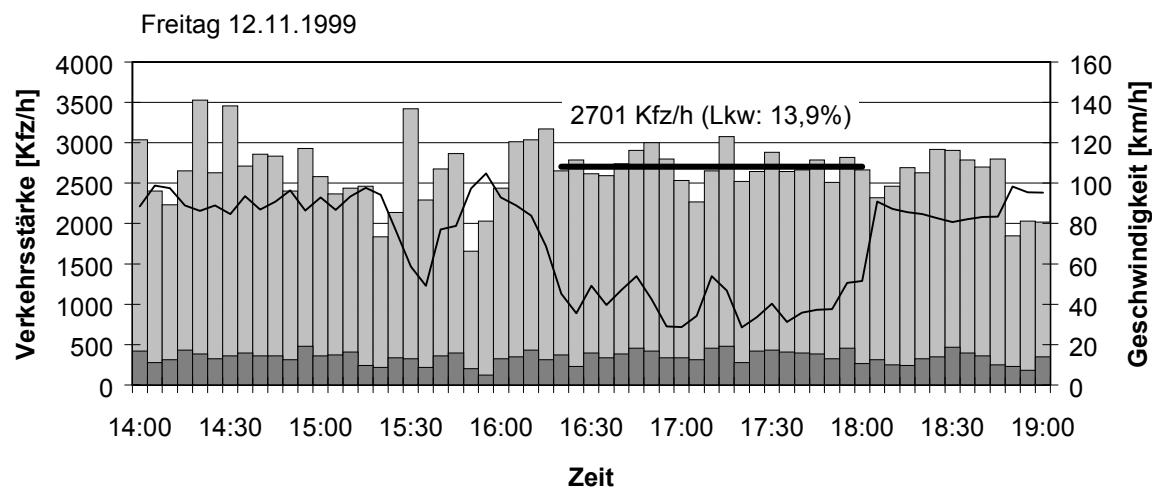
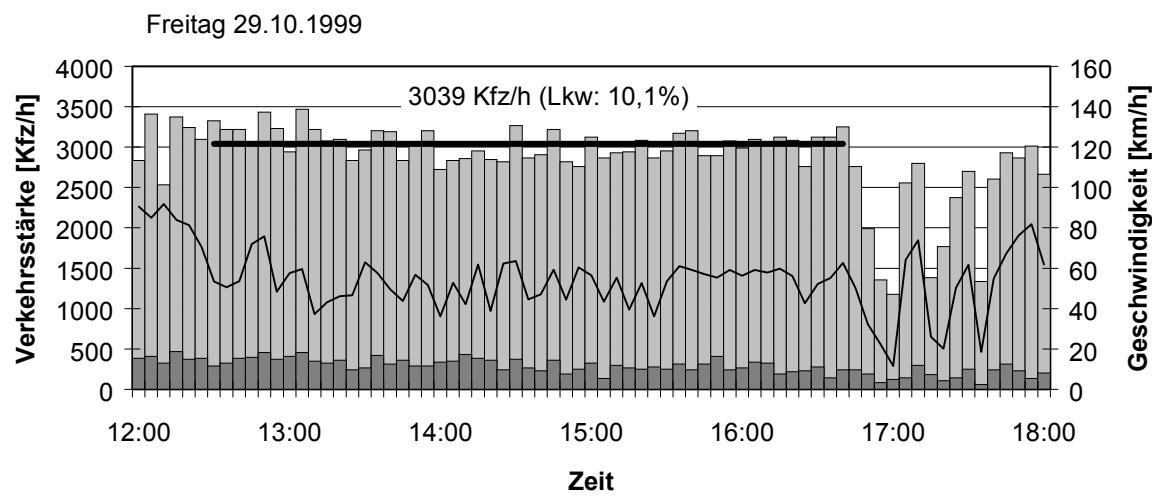
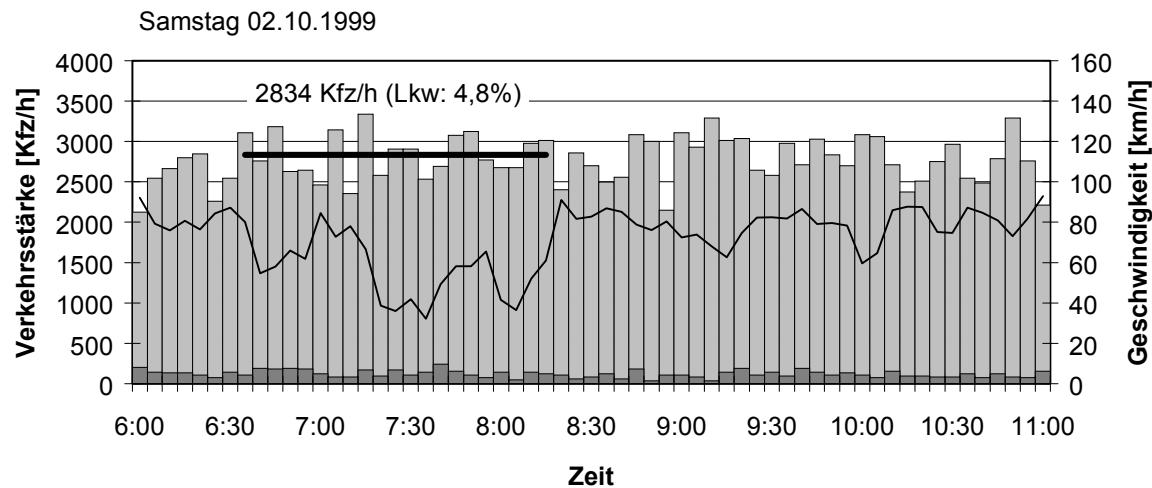


Freitag 03.09.1999



Kfz 5-min-Mittelwert	Lkw 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	----------------------	-----------	-----------------



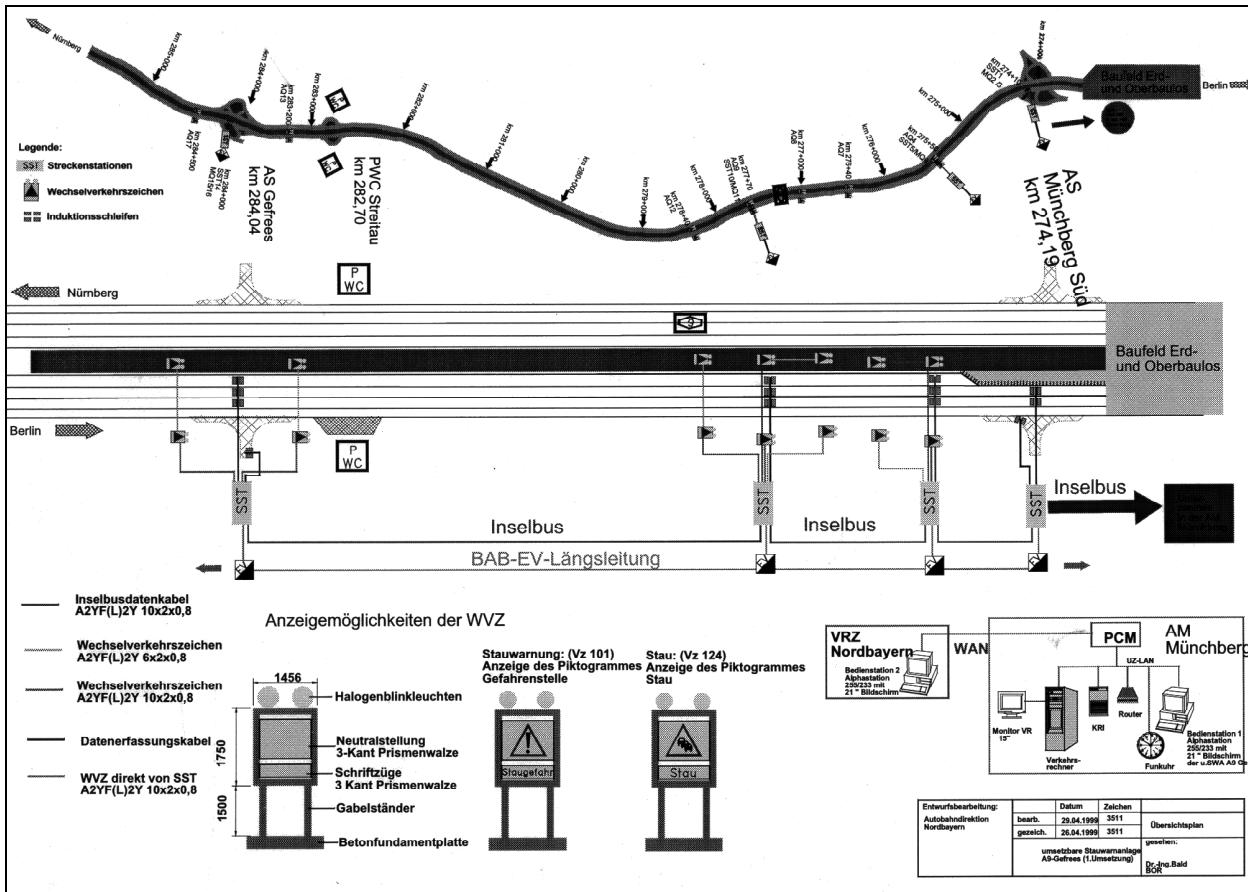


■ Kfz 5-min-Mittelwert ■ Lkw 5-min-Mittelwert — Kapazität — Geschwindigkeit

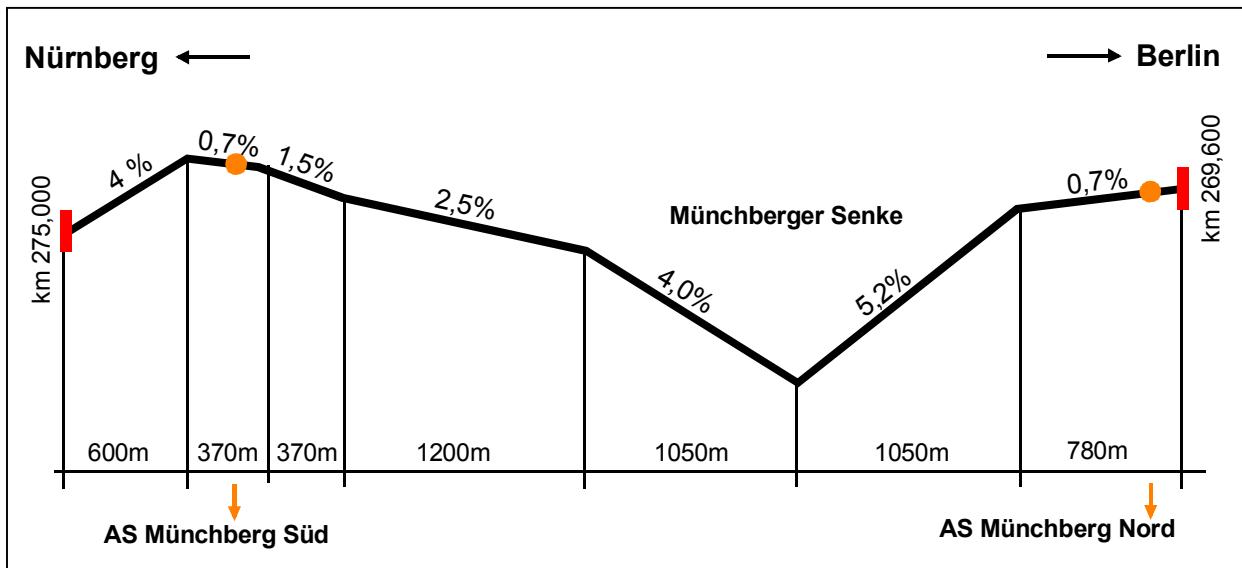
**Anlage 4: Auswertung der Daten der umsetzbaren Stauwarnanlage
A9 Gefrees**

A4-2 Übersichtsplan der Anlage

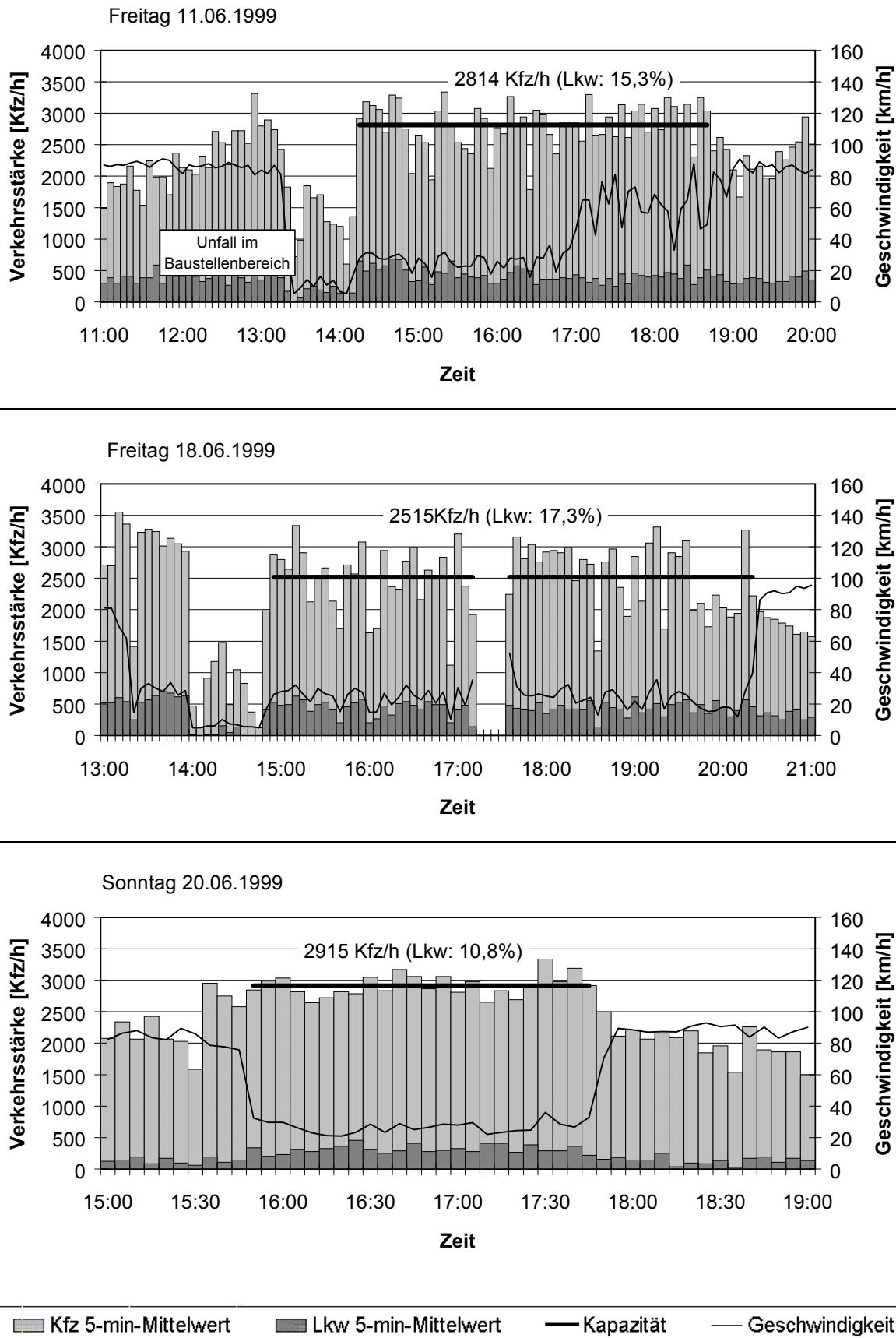
A4-3 bis A4-5 Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien der erfassten Stauereignisse

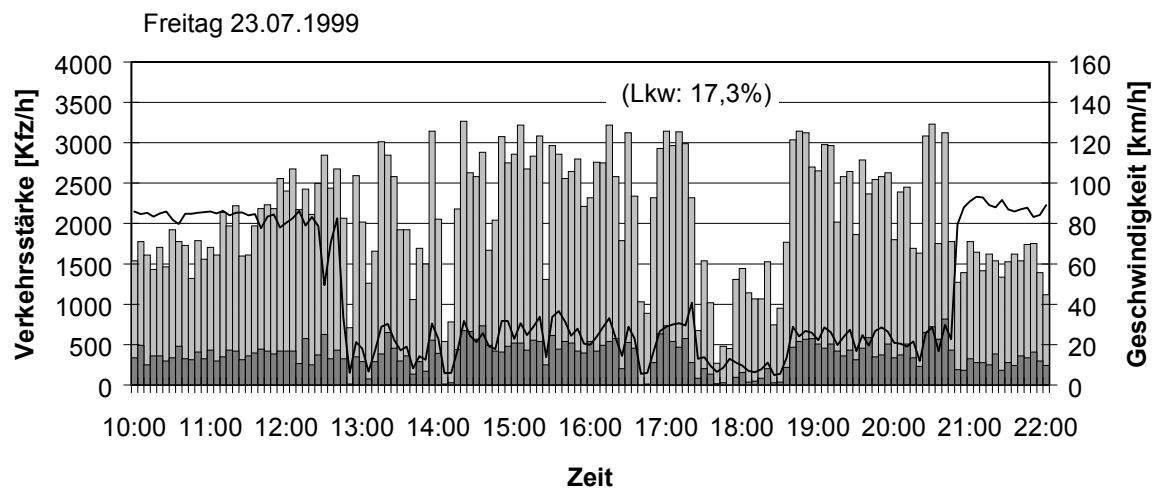
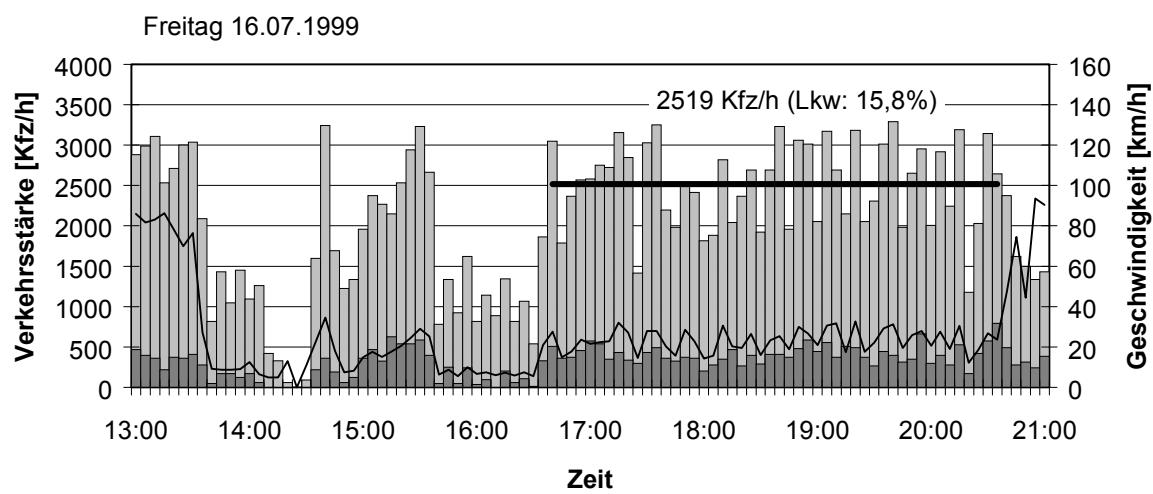
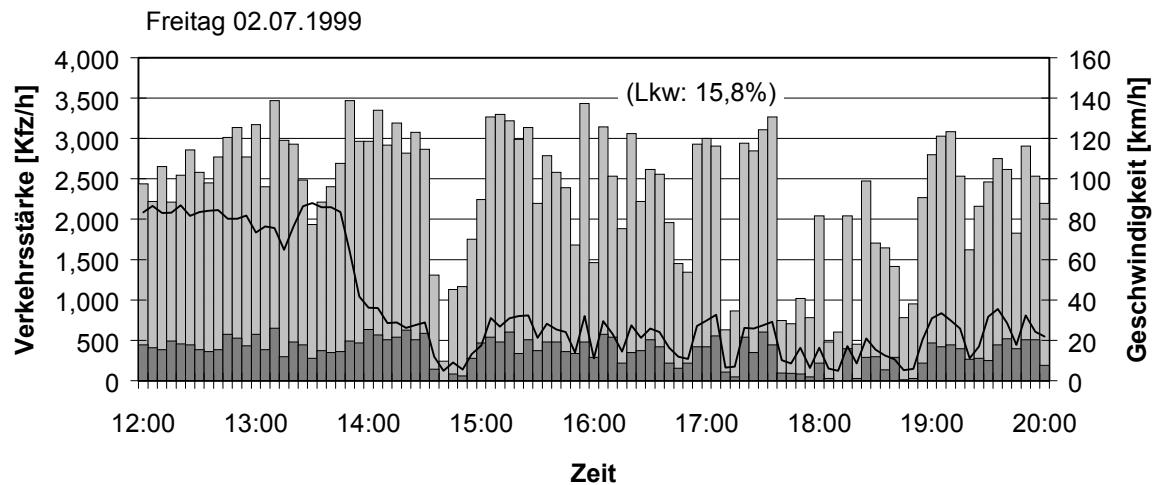


Lageplan der umsetzbaren Stauwarnanlage Gefrees [Autobahndirektion Nordbayern]

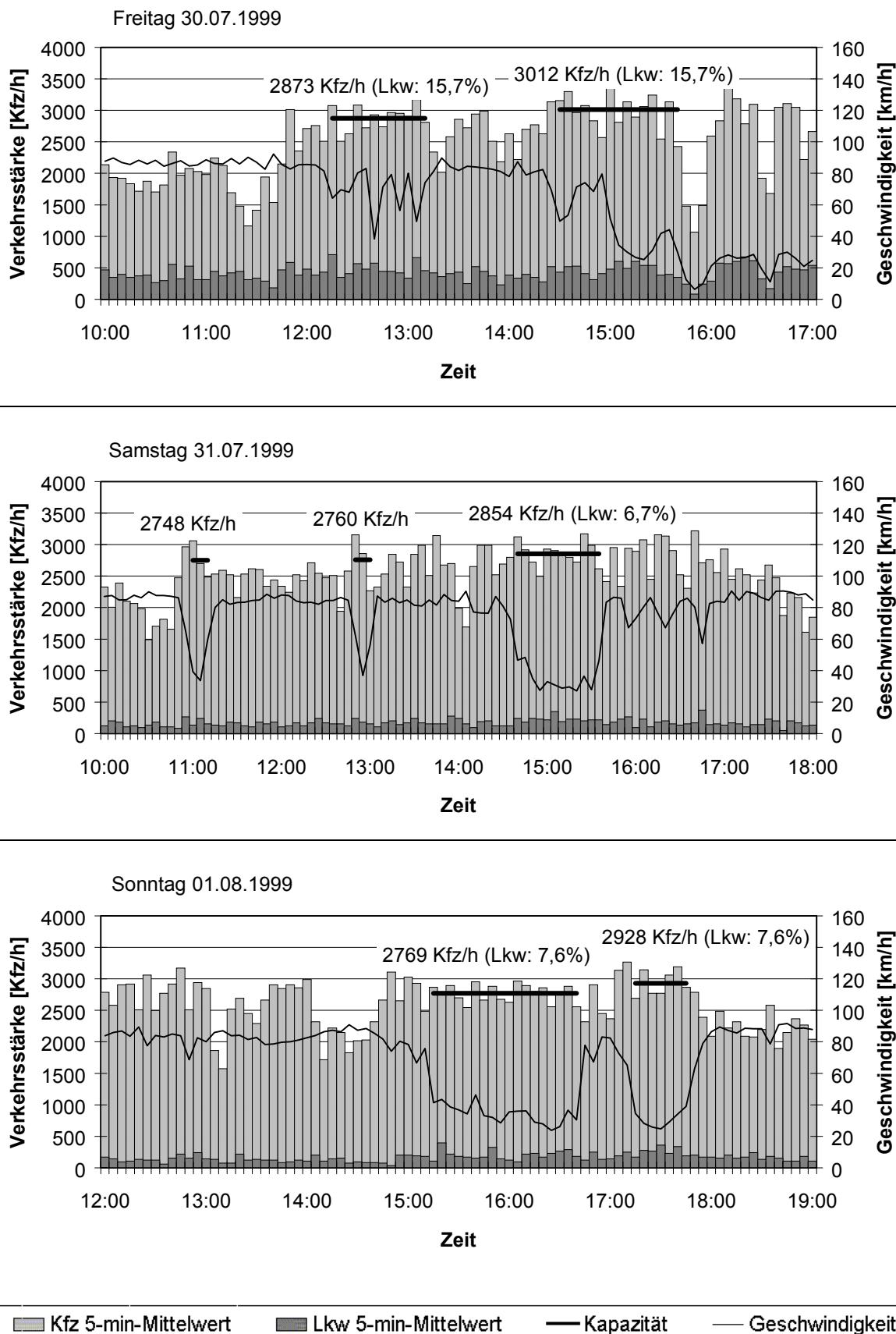


Höhenprofil der Baustelle an der Münchberger Senke



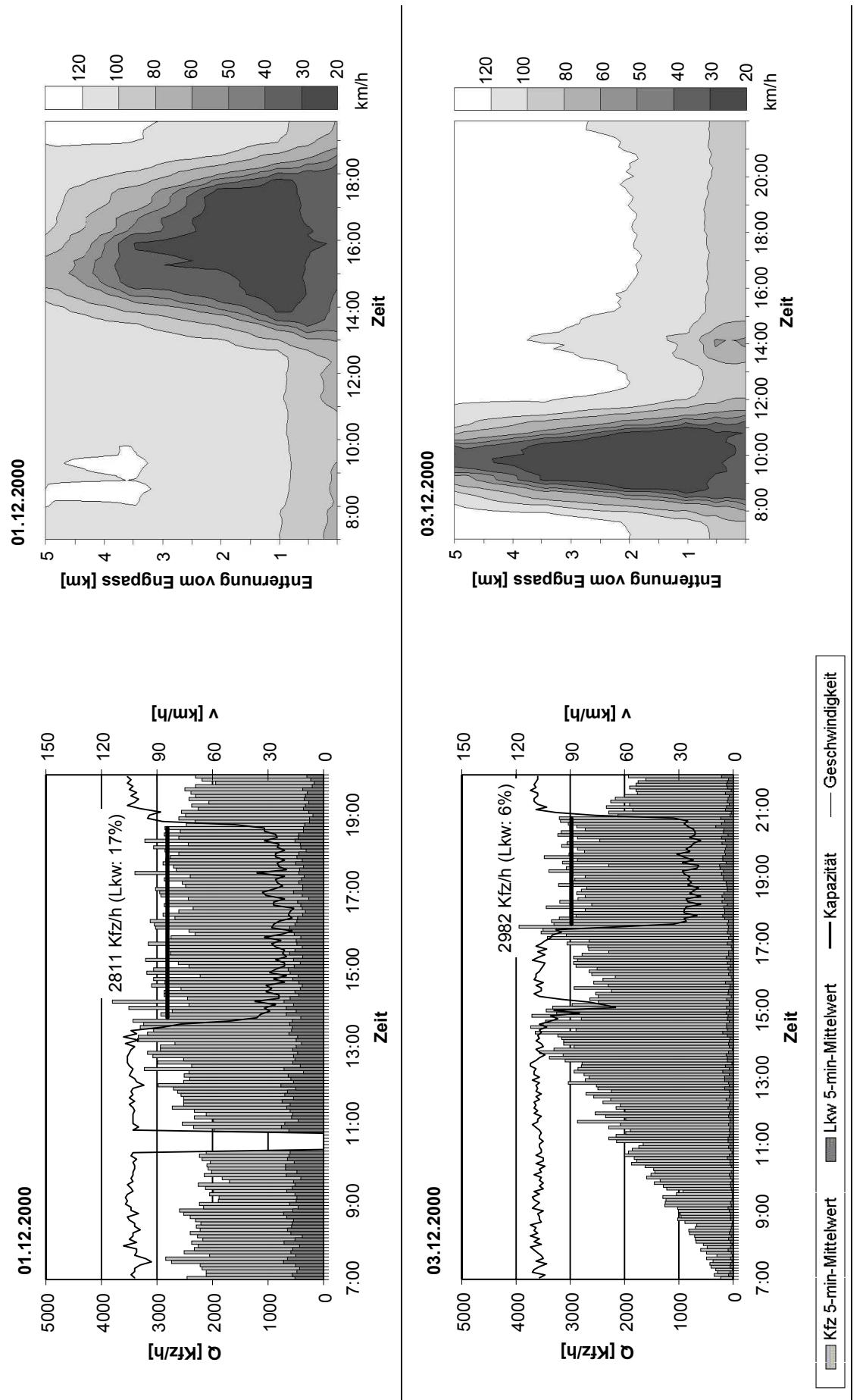


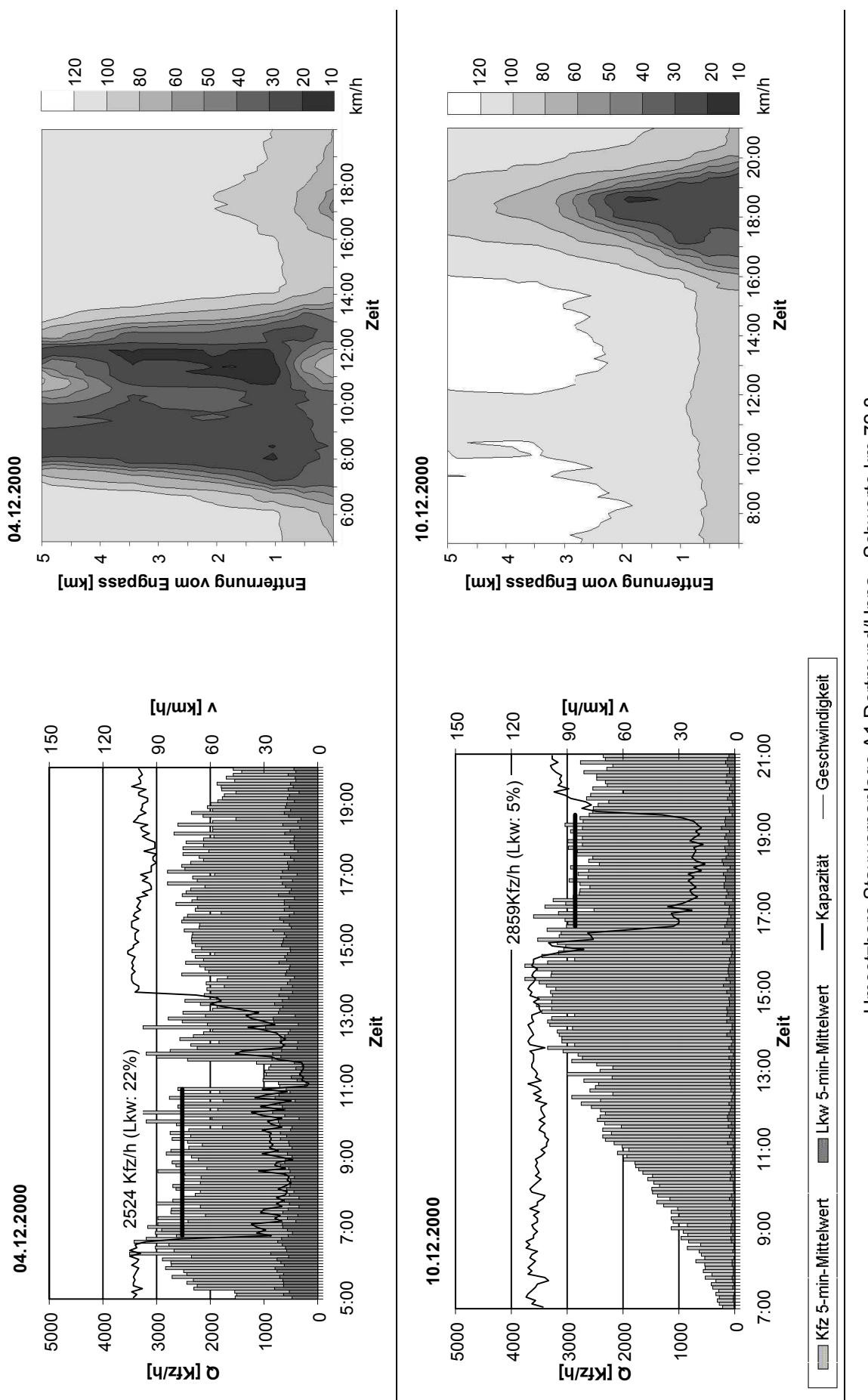
Kfz 5-min-Mittelwert	Lkw 5-min-Mittelwert	Kapazität	Geschwindigkeit
----------------------	----------------------	-----------	-----------------

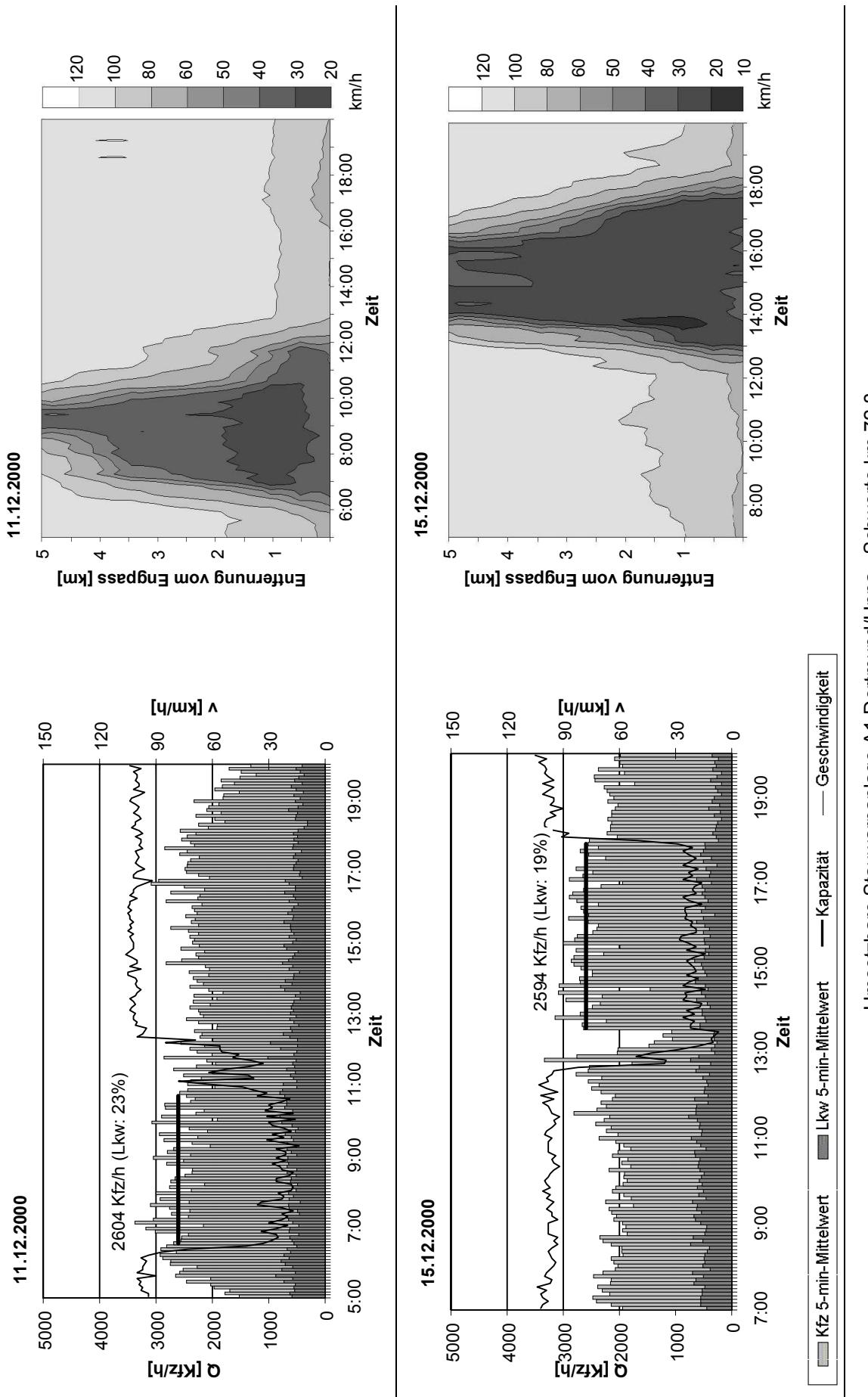


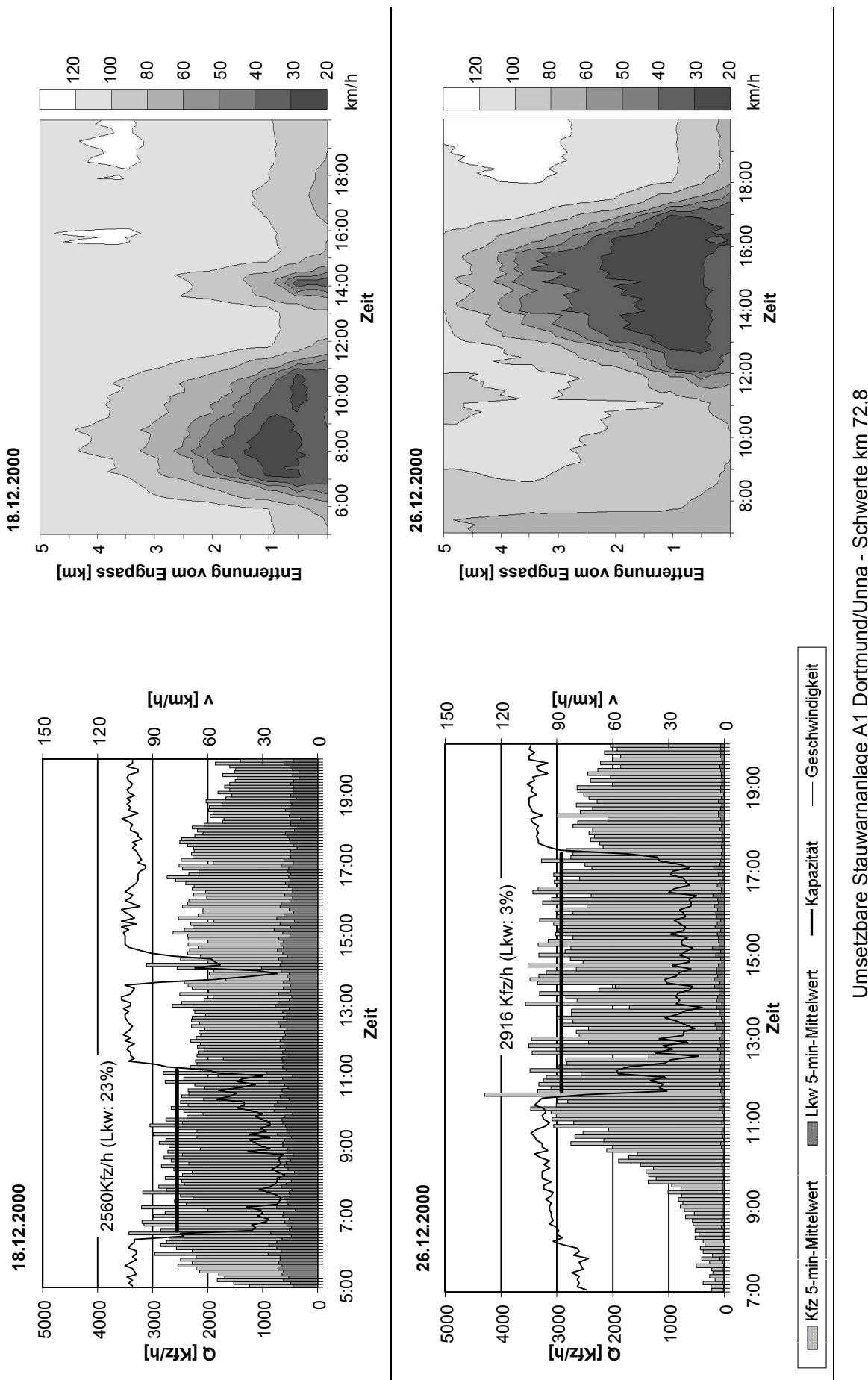
Anlage 5: Analyse des Verkehrsablaufs an der umsetzbaren Stauwarnanlage A1 Dortmund/Unna - Schwerte

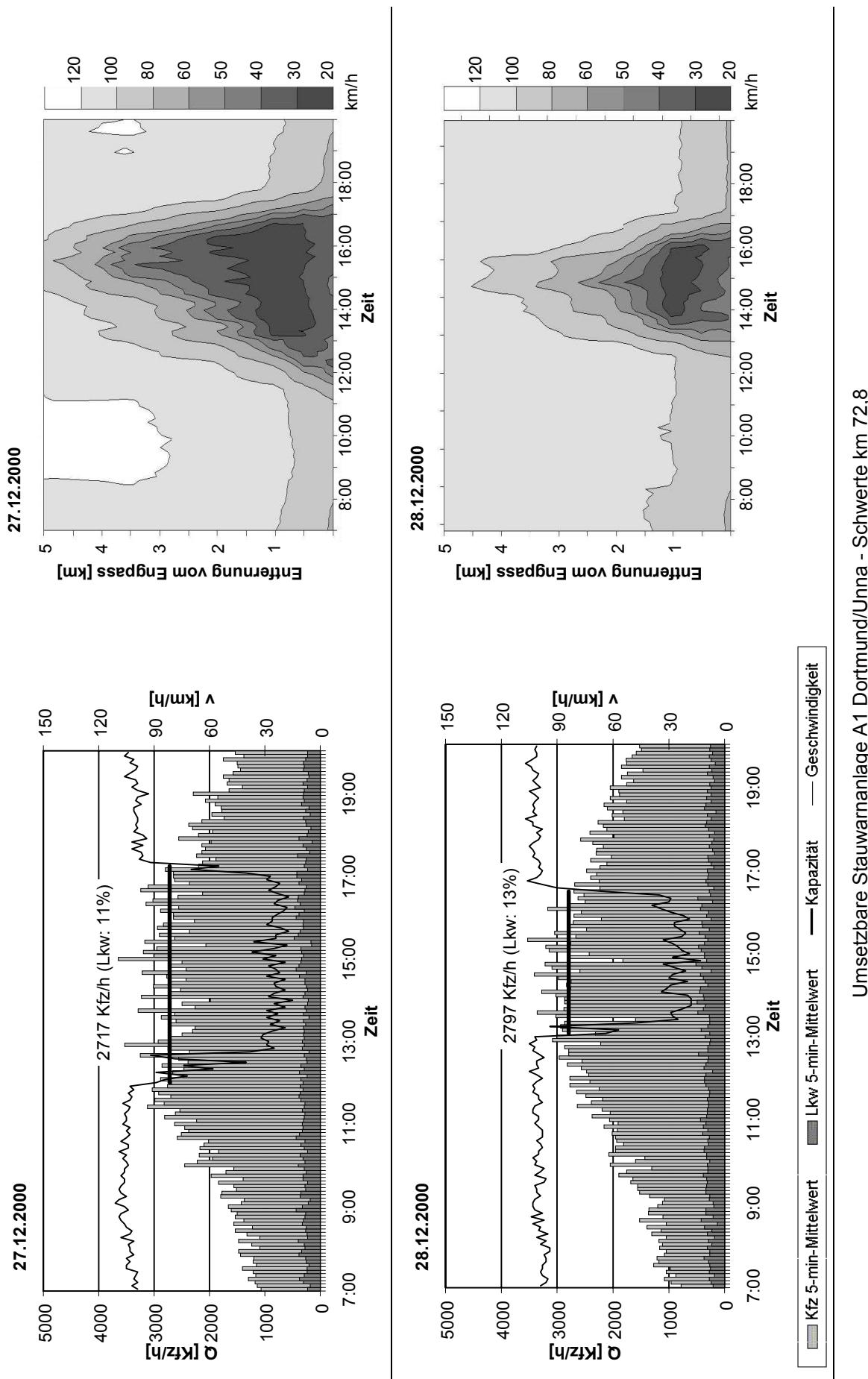
A5-2 bis A5-9 Verkehrsstärke- und Geschwindigkeitsganglinien sowie zeitlich-räumliche Darstellung des Verkehrsablaufs der einzelnen Stauereignisse

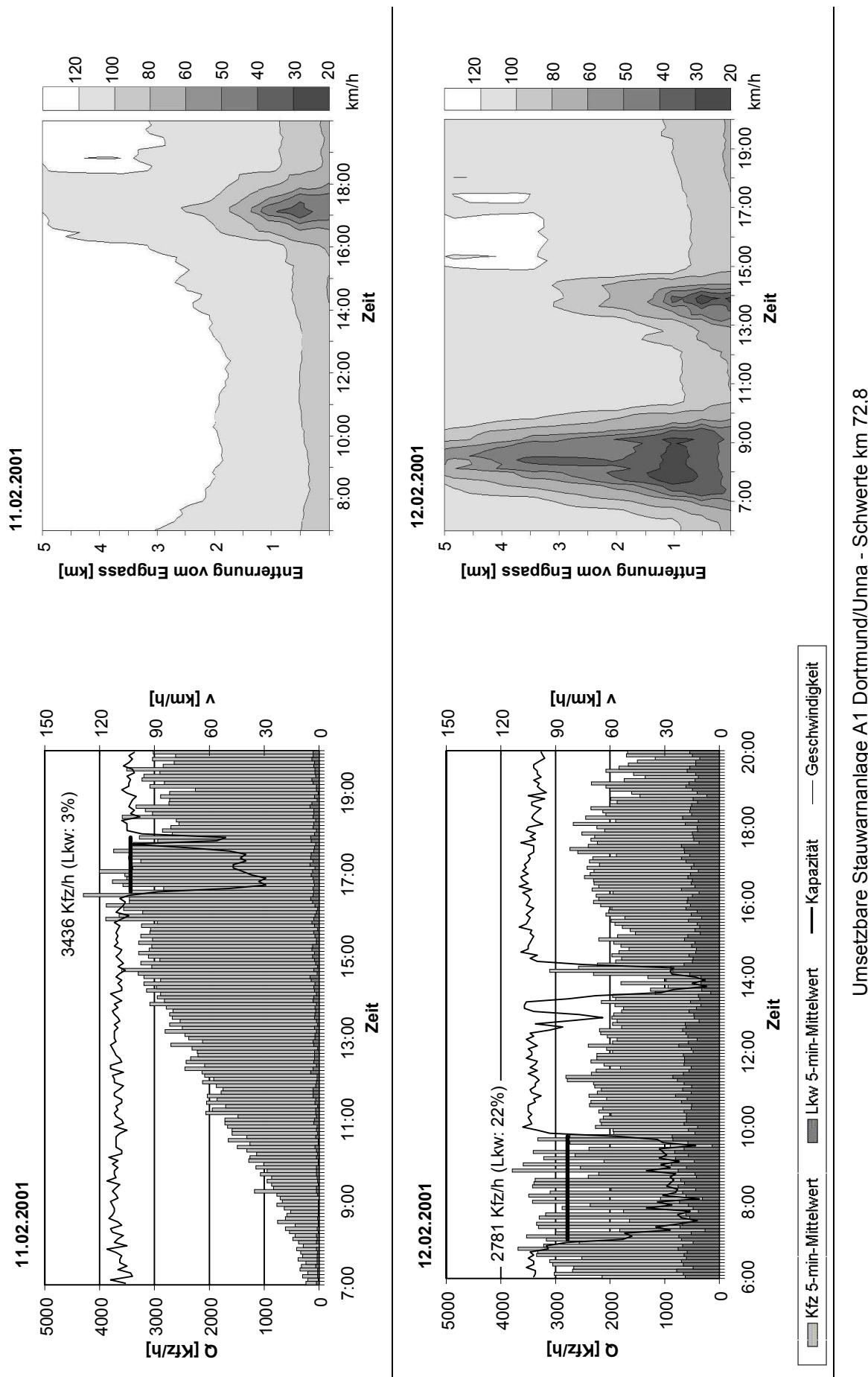


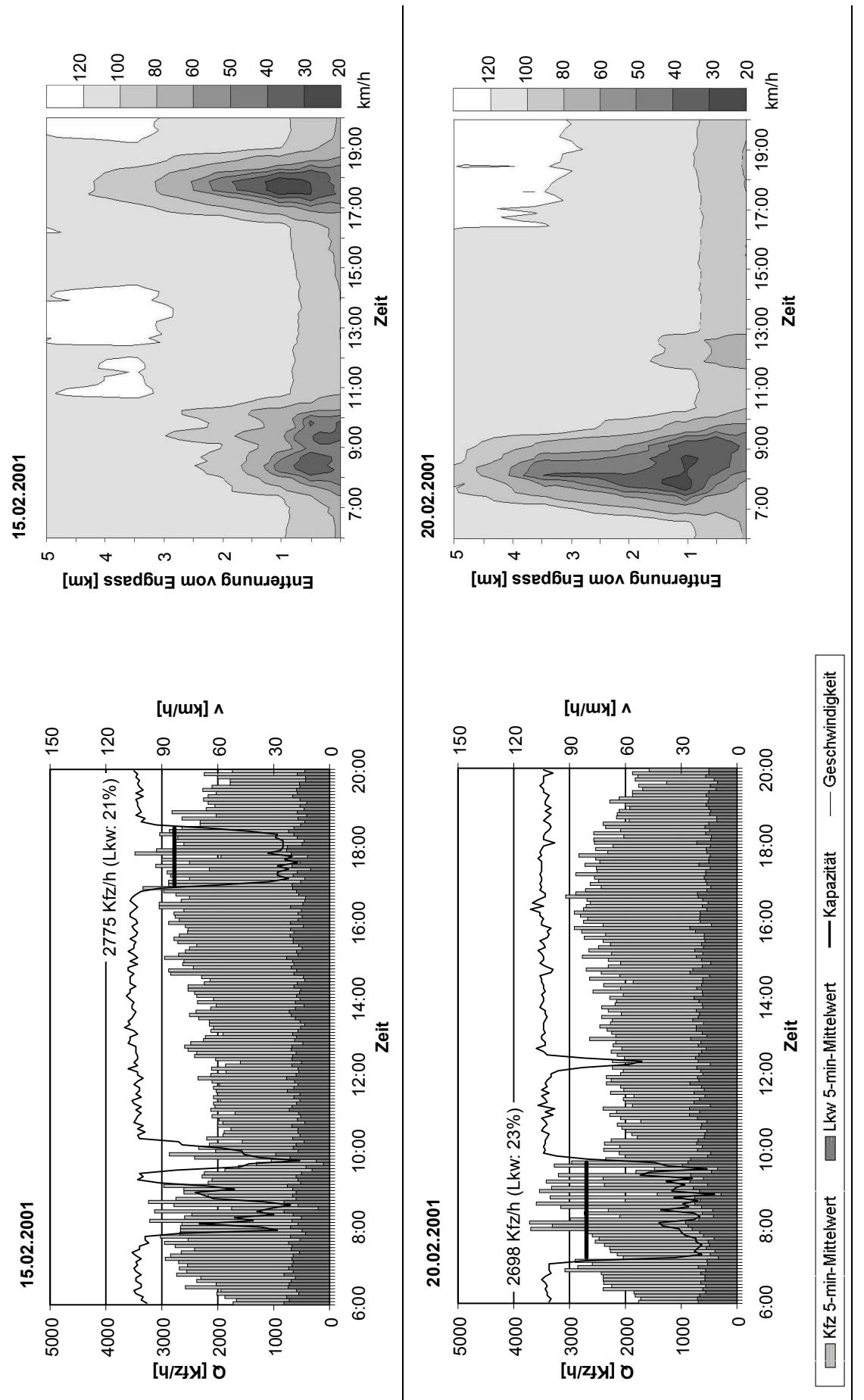


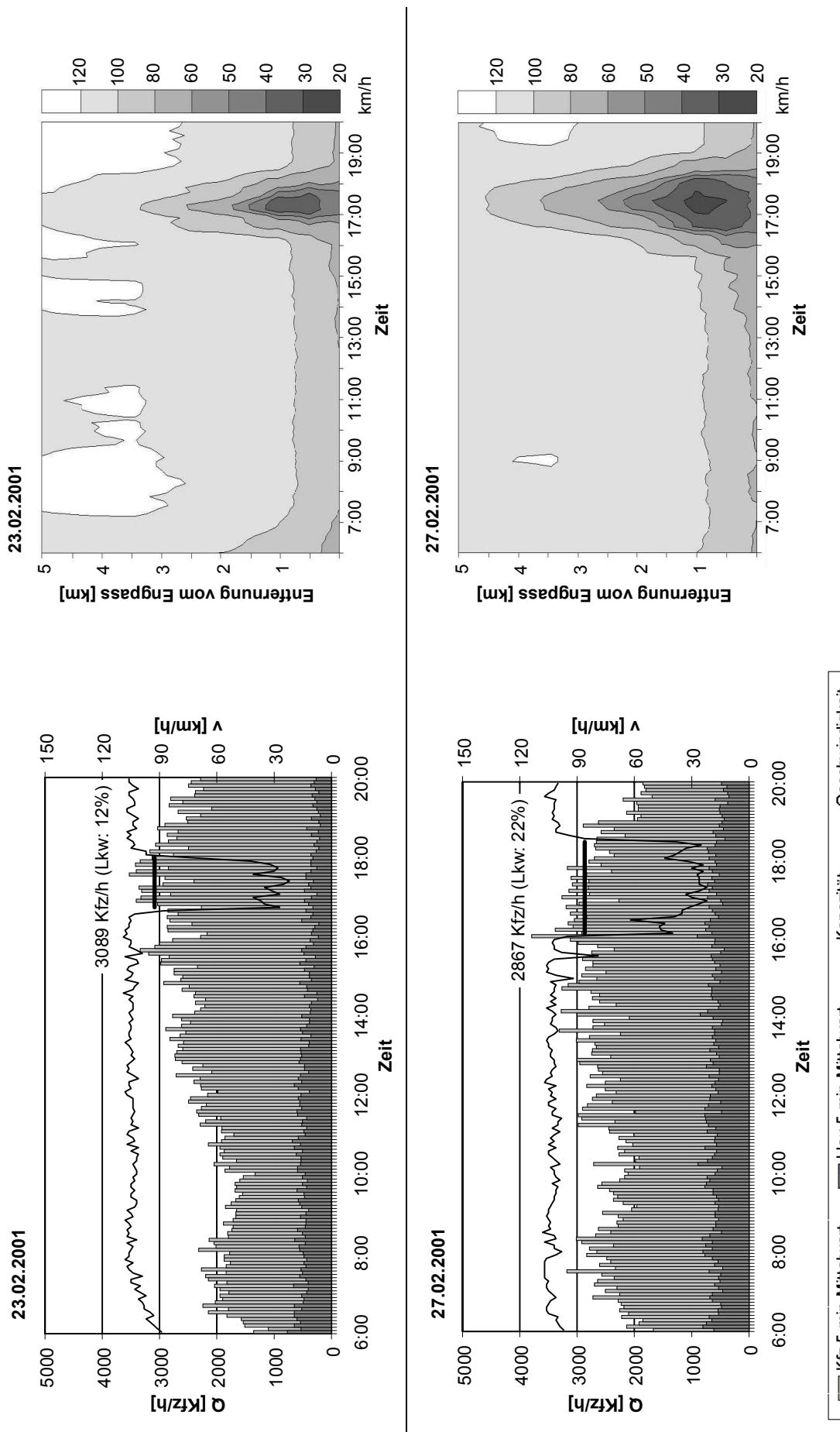












Anlage 6: Ergänzende Erhebungen an Autobahnbaustellen

A6-2 bis A6-4 Messmethodik

A6-5 bis A6-10 Dokumentationsblätter der einzelnen Messungen
Ganglinien der Verkehrsstärke bei Überstauung der Baustellenengpässe
Geschwindigkeitsganglinie und -profile der einzelnen Messfahrten an den verschiedenen Baustellen

Messmethodik

a) Querschnittsbezogene Messungen

Die Erfassung von querschnittsbezogenen Daten erfolgt bei verkehrstechnischen Untersuchungen in der Regel mit Hilfe von Detektoren. Sie werden gemäß ihrem physikalischen Prinzip und ihrer Arbeitsweise in fünf Gruppen unterteilt [FGSV, 1991(a)]:

- Berührungsdetektoren, z.B. Druckschlauch
- magnetische Wechselfelddetektoren, z.B. Induktivschleife
- Strahlungsfelddetektoren, z.B. Infrarot-, Ultraschall- und Mikrowellensensoren
- elektrische Wechselfelddetektoren, z.B. kapazitive Anforderungstaster
- magnetische Gleichfelddetektoren, z.B. magnetische Schienenschalter

In der Praxis werden in den meisten Fällen Induktivschleifendetektoren eingesetzt. Mit ihrer Hilfe können Anzahl, Länge (Art) und Geschwindigkeit der Fahrzeuge sowie Bruttozeitlücken aufeinander folgender Fahrzeuge für definierte Zeitintervalle und nach Fahrstreifen getrennt erfasst werden. Probleme ergeben sich bei dieser Detektorart bei der Erfassung von Fahrzeugen mit niedrigem Geschwindigkeitsniveau (Stop-and-Go-Verkehr). Außerdem ist die Installation der Induktivschleifen mit einem relativ hohen Aufwand verbunden. In der Regel werden die Schleifen in eingefräste Schlitze in der Fahrbahn verlegt. Für mobile Messungen besteht alternativ die Möglichkeit, die Schleifen auf die Fahrbahn aufzukleben, wobei auch diese Methode sehr zeitaufwendig ist. Eine Alternative in dieser Hinsicht bieten Detektoren, die mit Hilfe von pneumatischen Schläuchen arbeiten. Mit diesem System können auch niedrige Geschwindigkeiten zuverlässig erfasst werden. Die Schläuche werden mit Klemmen auf der Fahrbahn befestigt, womit sich der Installationsaufwand in vertretbaren Grenzen hält. Ein Nachteil, der beide Systeme betrifft, ist die Notwendigkeit, für die Zeit der Einrichtung die Fahrbahn zu sperren. Besonders bei ständig erhöhtem Verkehrsaufkommen können somit Beeinträchtigungen des Verkehrsablaufs entstehen, die zu einer Verfälschung der Messwerte führen.

Messsysteme, die keinen Eingriff in den Verkehrsablauf erfordern, sind die Strahlungsfelddetektoren, da sie in der Regel kopfüber an Brücken o. ä. angebracht werden können. Diese Geräte sind für den Fahrer zwar im allgemeinen deutlich sichtbar, im Hinblick auf den Bekanntheitsgrad der in letzter Zeit häufig an Brücken installierten Infrarotdetektoren kann eine Beeinflussung des Fahrverhaltens der Verkehrsteilnehmer aber dennoch vernachlässigt werden. Probleme ergeben sich hier durch die eingeschränkte Standortauswahl, da man immer auf das Vorhandensein von erhöhten Bauwerken über oder direkt neben der Fahrbahn angewiesen ist.

Eine völlig neue Methode zur Erfassung von Verkehrsdaten ist die Videobildverarbeitung. Dabei werden die analogen Bilddaten der Kamera digitalisiert. Mit Hilfe von virtuellen Detektorlinien, die auf dem Videobild verlegt werden, können Bewegungen von Objekten im Bild-

ausschnitt über Änderungen der Grauschattierungen erkannt und ausgewertet werden. Das Messsystem liefert als Ausgabedaten Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten, Fahrzeugklassifizierungen und Belegungsgrade. Da die virtuellen Detektoren innerhalb des auswertbaren Bildausschnittes nahezu beliebig angeordnet werden können, wird hier der Übergang von der reinen Querschnittsmessung zur Linienmessung ermöglicht.

Vorteile dieses Systems:

- keine Verkehrsunterbrechung bei der Installation
- kein Eingriff in die Fahrbahnoberfläche
- zuverlässige Erfassung von Stop-and-Go-Verkehr
- einfache Installation und Wartung
- nachträgliche Auswertung möglich (auch mehrfach)
- Videobildaufzeichnung zur zusätzlichen, qualitativen Auswertung des Verkehrsgeschehens

Nachteile:

- sehr kostenintensiv
- für genaue Messergebnisse erhöhter Standort der Kamera notwendig (für mobile Messungen daher Kfz-Anhänger mit ausfahrbarem Mast erforderlich)
- Gefahr der Beeinflussung des Fahrverhaltens der Verkehrsteilnehmer bei Befestigung der Kamera auf dem Anhänger und damit erhöhter Auffälligkeit des Messsystems
- Probleme bei der Auswertung von Bildmaterial, das in der Dunkelheit und bei schlechten Witterungsverhältnissen aufgenommen wurde (Reflexionen auf der Fahrbahn durch die Scheinwerfer)

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung von querschnittsbezogenen Verkehrsdaten bietet der Einsatz von einfachen Videokameras. Die Auswertung des Bildmaterials erfolgt in diesem Fall manuell am Videorecorder. Diese Methode ist in der Auswertungsphase zwar relativ personalintensiv, andererseits ist das System aber an der Messstrecke flexibel und unkompliziert einsetzbar. Des Weiteren bleibt die Erfassung der notwendigen Verkehrsdaten im Regelfall auf wenige Stunden pro Messung beschränkt, da nur Zeiträume, in denen Staus auftreten, ausgewertet werden müssen. Nicht zu vernachlässigen ist außerdem die Tatsache, dass das vorhandene Bildmaterial zusätzlich zur Ermittlung von Fahrzeiten verwendet werden kann, wenn einzelne Fahrzeuge an zwei aufeinander folgenden Querschnitten identifiziert werden.

Unabhängig von den speziell für Messungen einsetzbaren Systemen existiert auf den deutschen Autobahnen ein Netz von Dauerzählstellen. Dieses Zählstellennetz umfasste 1996 446 Zählstellen, von denen 94% eine gesonderte Lkw-Erfassung ermöglichen [BASt, 1997]. Somit besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Daten von Dauerzählstellen, die innerhalb der Messstrecke liegen und die nicht durch den Baustellenbetrieb beeinträchtigt werden, zu verwenden.

b) Linienbezogene Messungen

Zur Beurteilung und Erfassung des Fahrverhaltens im Stau- und Baustellenbereich sowie zur Erfassung der Staulängen und Verlustzeiten beim Durchfahren des Staus ist es notwendig, den Geschwindigkeitsverlauf kontinuierlich entlang der Untersuchungsstrecke aufzunehmen.

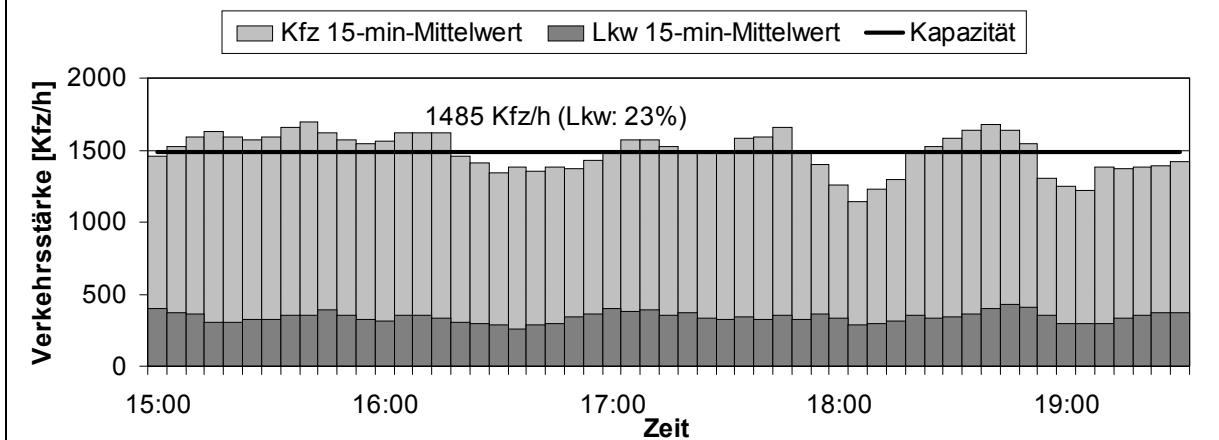
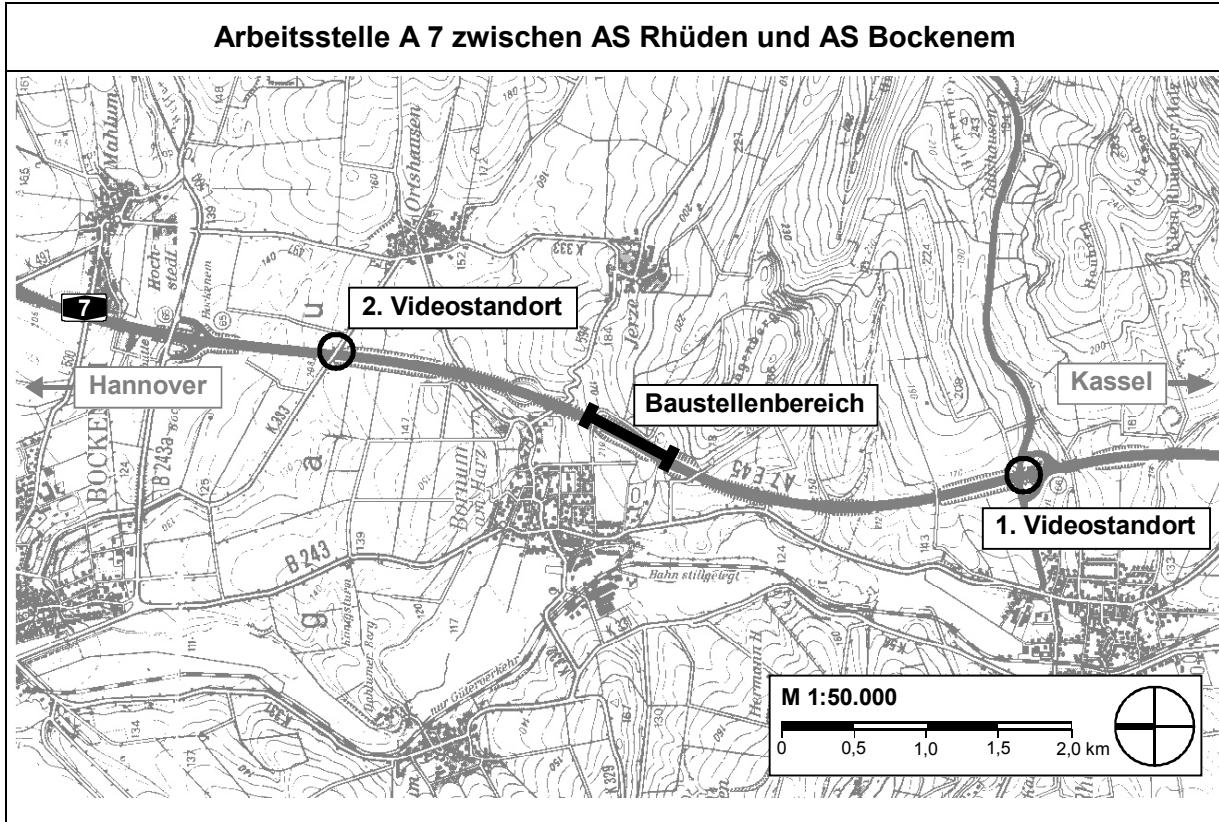
Prinzipiell wird bei der messtechnischen Aufnahme von Geschwindigkeiten entlang einer Strecke zwischen dem Geschwindigkeitsprofil als Funktion der Geschwindigkeit vom Weg und der Geschwindigkeitsganglinie als Funktion der Geschwindigkeit von der Zeit unterschieden. Beide Darstellungsarten sind im Rahmen dieser Untersuchung von Bedeutung. Die Geschwindigkeitsganglinie gibt einen direkten Aufschluss über die Verlustzeiten, die beim Durchfahren des Staus und des Baustellenbereiches auftreten, während an dem Geschwindigkeitsprofil die Staulänge abgelesen werden kann.

Die Aufnahme der Längsgeschwindigkeit eines einzelnen Fahrzeugs erfolgt mit Hilfe einer mobilen Messanlage, die am oder im Fahrzeug befestigt wird. Grundsätzlich sind dabei verschiedene Messsysteme denkbar:

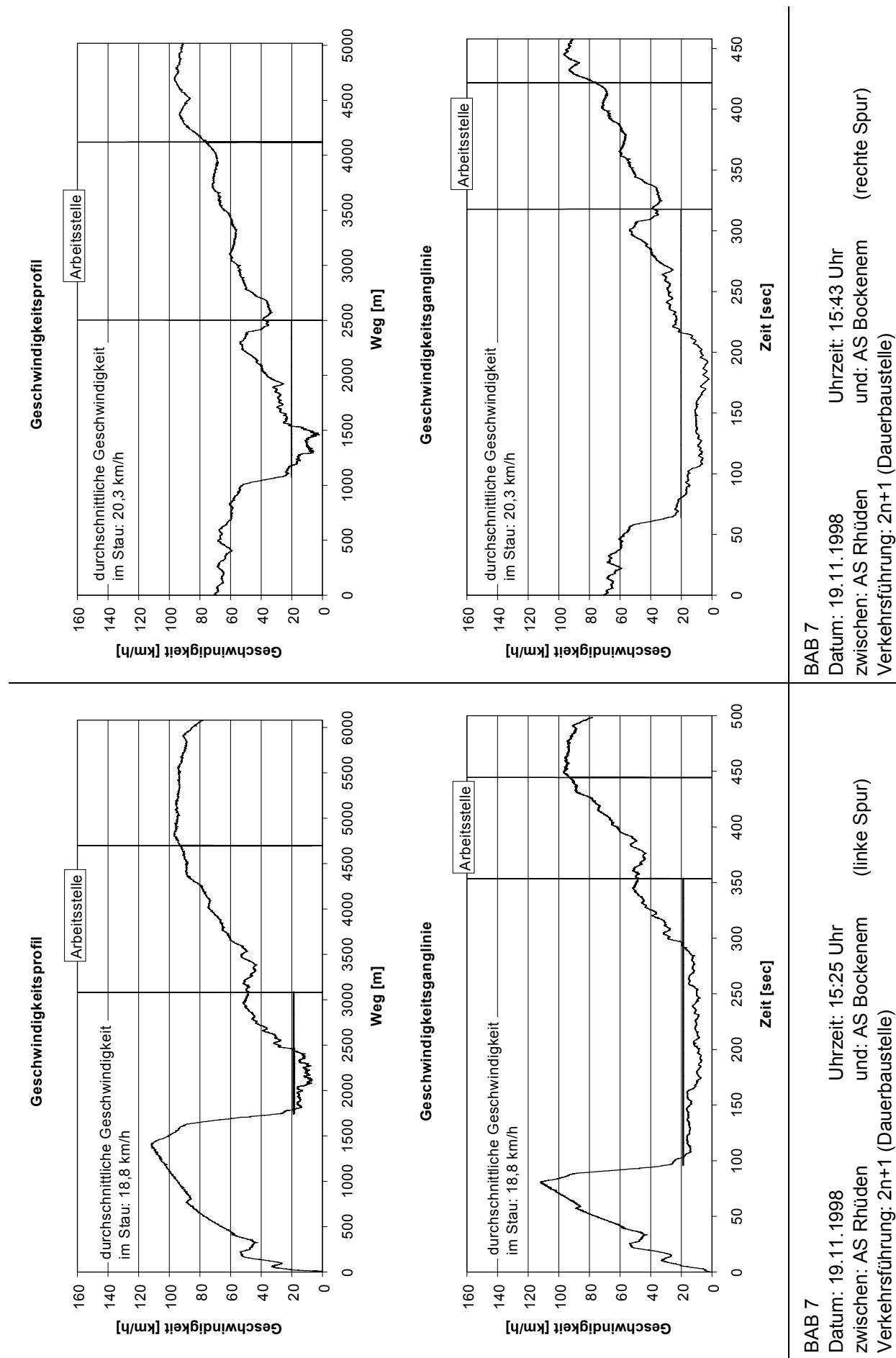
Der Tachograph trägt kontinuierlich die Augenblicksgeschwindigkeit grafisch auf eine Registerscheibe auf. Nachteilig wirkt sich aber die Tatsache aus, dass nur pauschale Geschwindigkeitsbilder ohne exakte Möglichkeit der Zuordnung von Geschwindigkeit und Zeit geliefert werden.

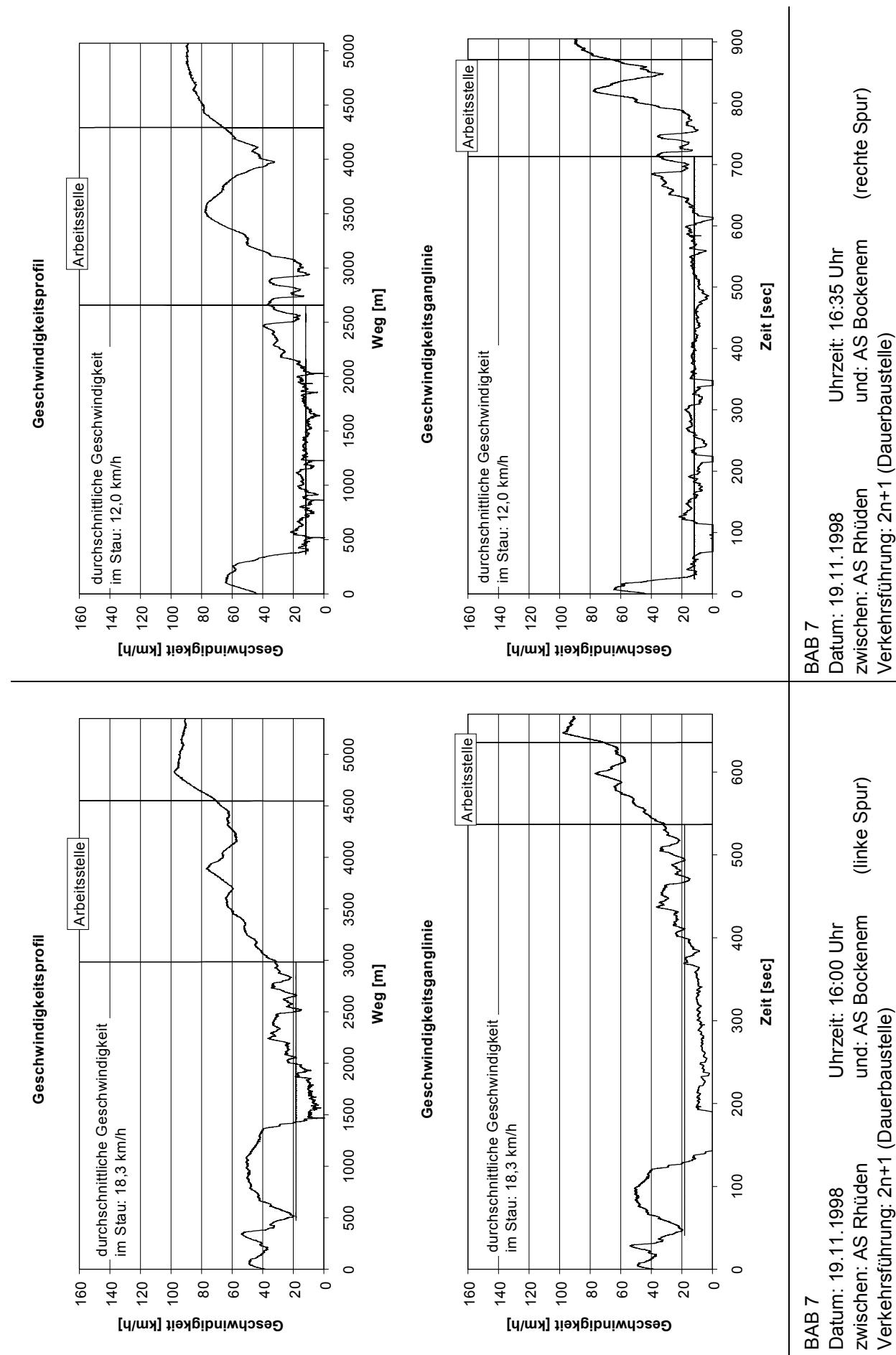
Das Schleppradsystem arbeitet über ein zusätzlich installiertes, normiertes Messrad, wobei über einen Wegimpulsgeber die Anzahl der Radumdrehungen pro Zeiteinheit als proportionale Größe zur gefahrenen Geschwindigkeit gemessen wird. Dieses System ist nur sehr auffällig am Fahrzeug anzubringen.

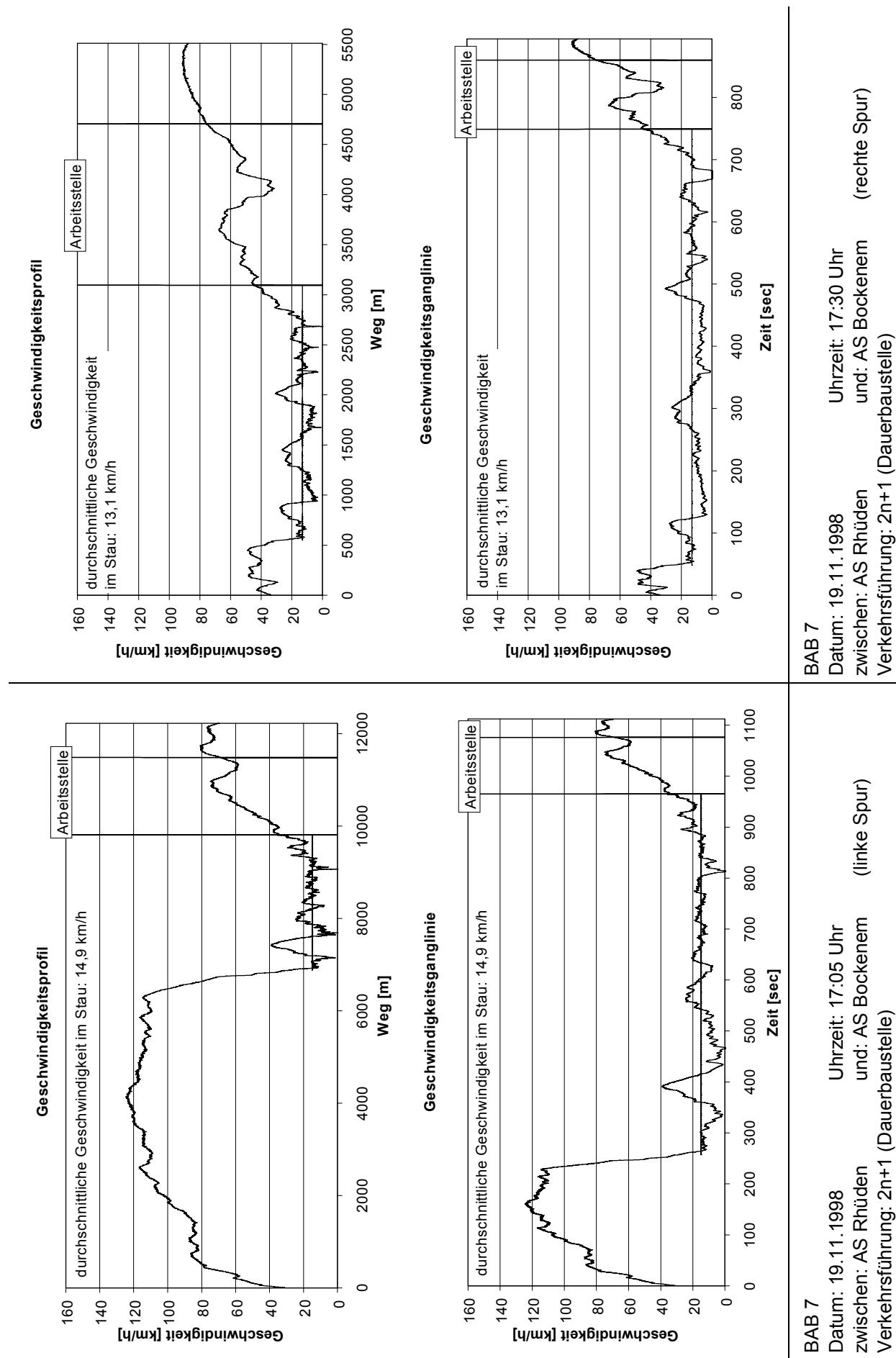
Für die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeföhrten Messungen wurde ein optoelektronisches Geschwindigkeitsmesssystem (CORREVIT® – Sensor) eingesetzt. Es ermöglicht eine berührungslose und damit auch schlupffreie Erfassung der Geschwindigkeit. Der Sensor kann relativ unauffällig an der vorderen oder hinteren Stoßstange oder seitlich am Fahrzeug angebracht werden. Über eine Reflektorlampe wird ein Lichtstrahl auf die Fahrbahn geworfen. Der Strahlengang des optischen Systems überträgt das Objektbild auf ein Prismengitter. Bei Bewegung des Sensors (Fahrzeugs) und der daraus resultierenden Veränderung der Kontrastpunkte der Fahrbahnoberfläche wird durch dieses Gitter eine geschwindigkeitsproportionale Frequenz erzeugt, die mit einem speziellen Filter und der entsprechenden Auswertungssoftware zu Geschwindigkeitswerten aufbereitet wird. Das Messsystem nimmt Messwerte in vordefinierten Zeitschritten (z.B. Zehntelsekunden) auf. Die Ausgabedateien enthalten für jedes Messintervall die zugehörige momentane Geschwindigkeit, die Beschleunigung und den zurückgelegten Weg. Zusätzlich können über einen analogen Signalgeber an prägnanten Stellen (wie z.B. Beginn/Ende einer Baustelle) Marken gesetzt werden.

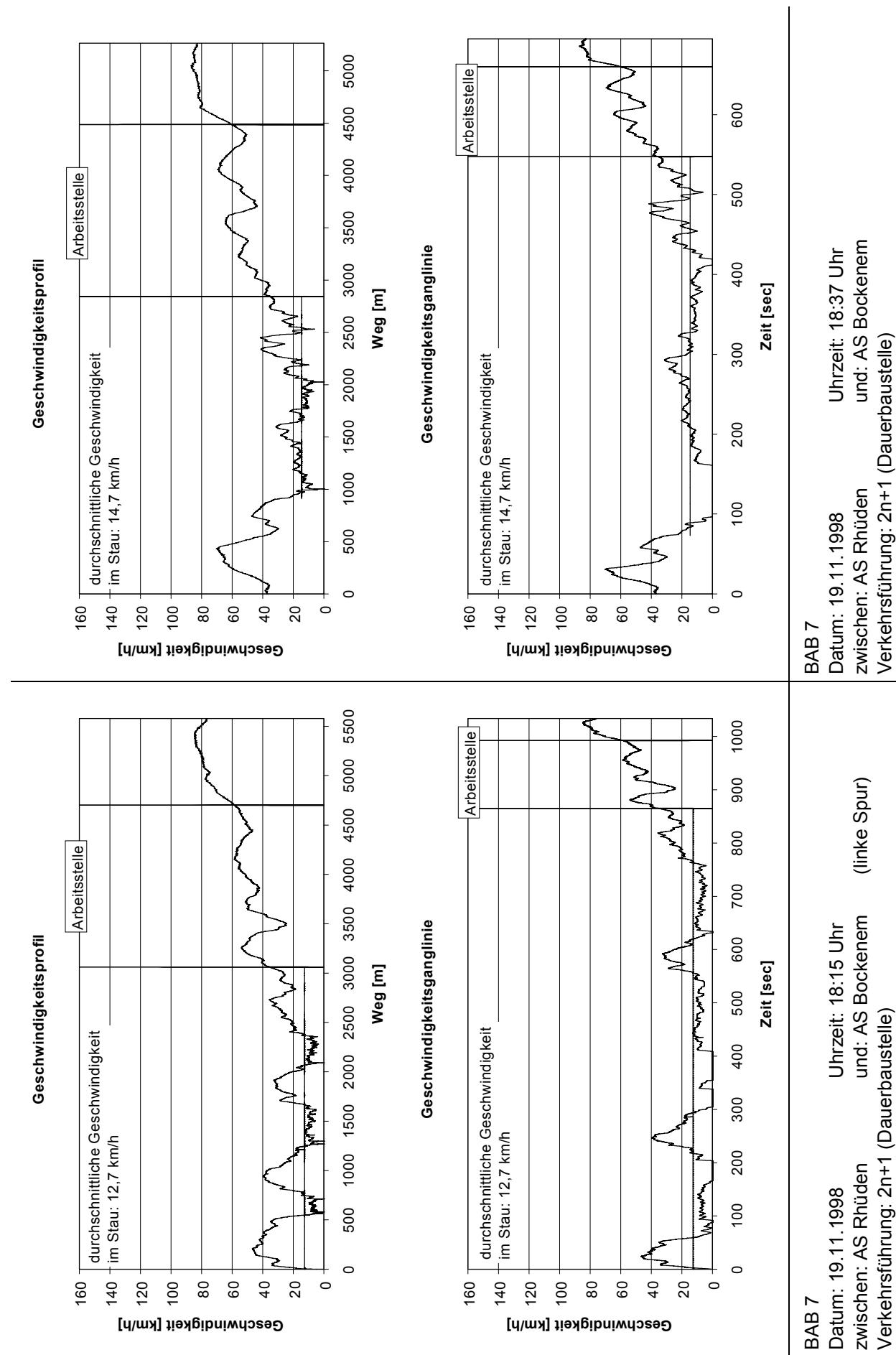


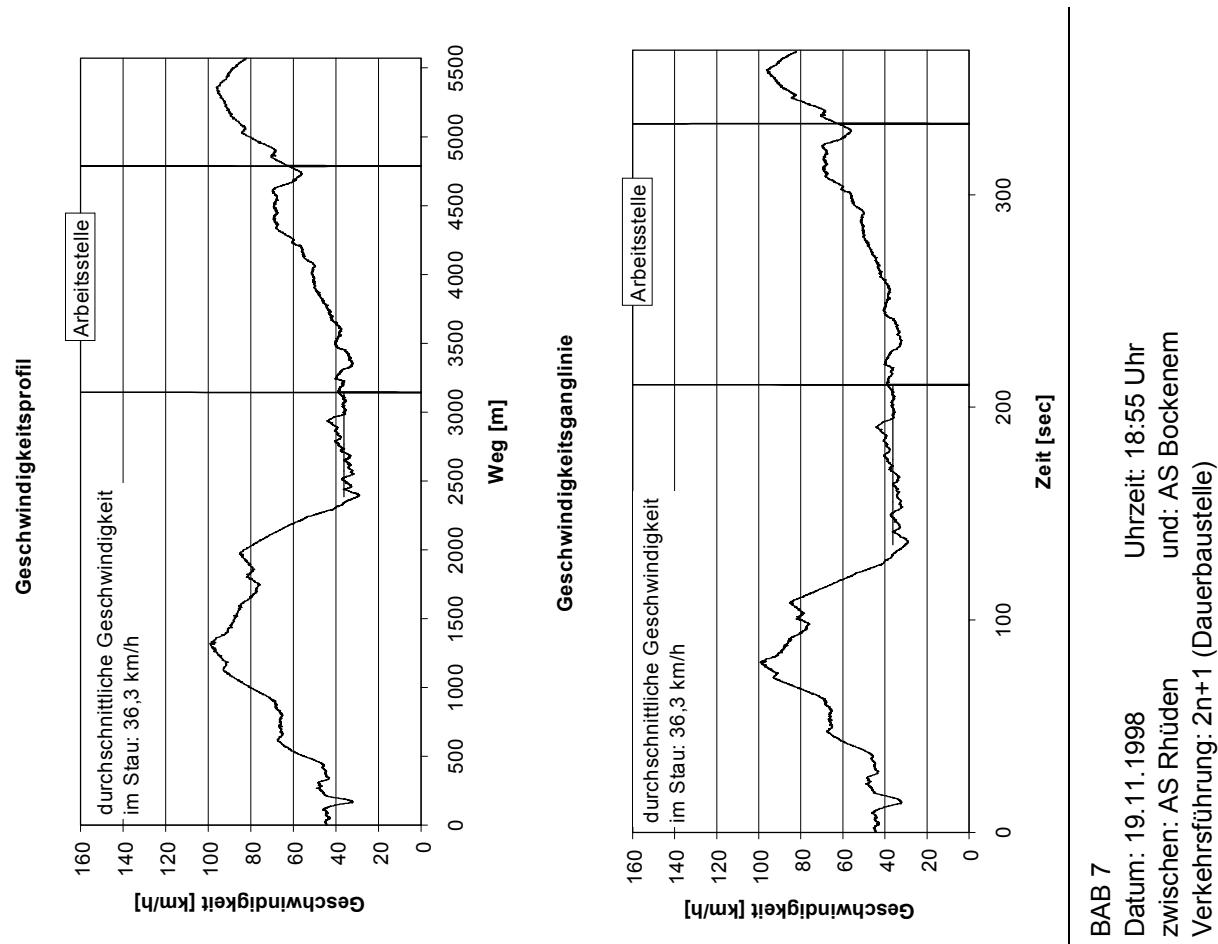
Zeitpunkt der Messung	19.11.1998
Lage der Arbeitsstelle	BAB 7 km 210,500 – km 209,900 (Behelfsfahrstreifen auf der Richtungsfahrbahn Hannover)
Verkehrsführung (RSA-95)	2n + 1 (DI/3 nach RSA), Länge: 0,6 km (Hauptfahrstreifen gesperrt)
Breite des Behelfsfahrstreifens	3,50 m
Längsneigung im Arbeitsstellenbereich	0,8 % Gefälle in Richtung Hannover
Witterung	trocken, gute Sicht
Geschätzter Anteil des Nahverkehrs	< 50 %
DTV laut Straßenverkehrszählung 1995	64.100 Kfz/24h
Bemerkungen	maximale Staulänge: 4 km

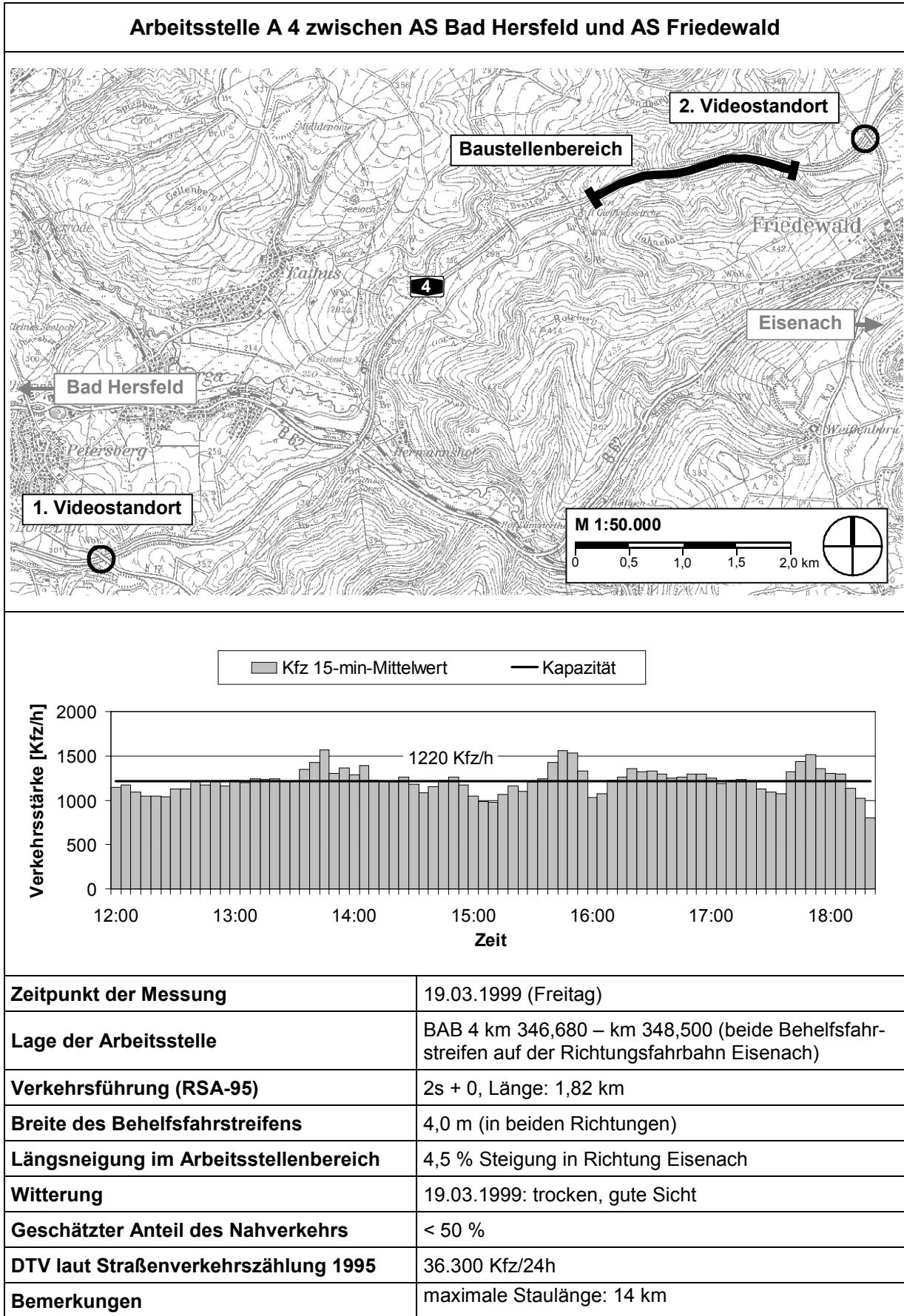


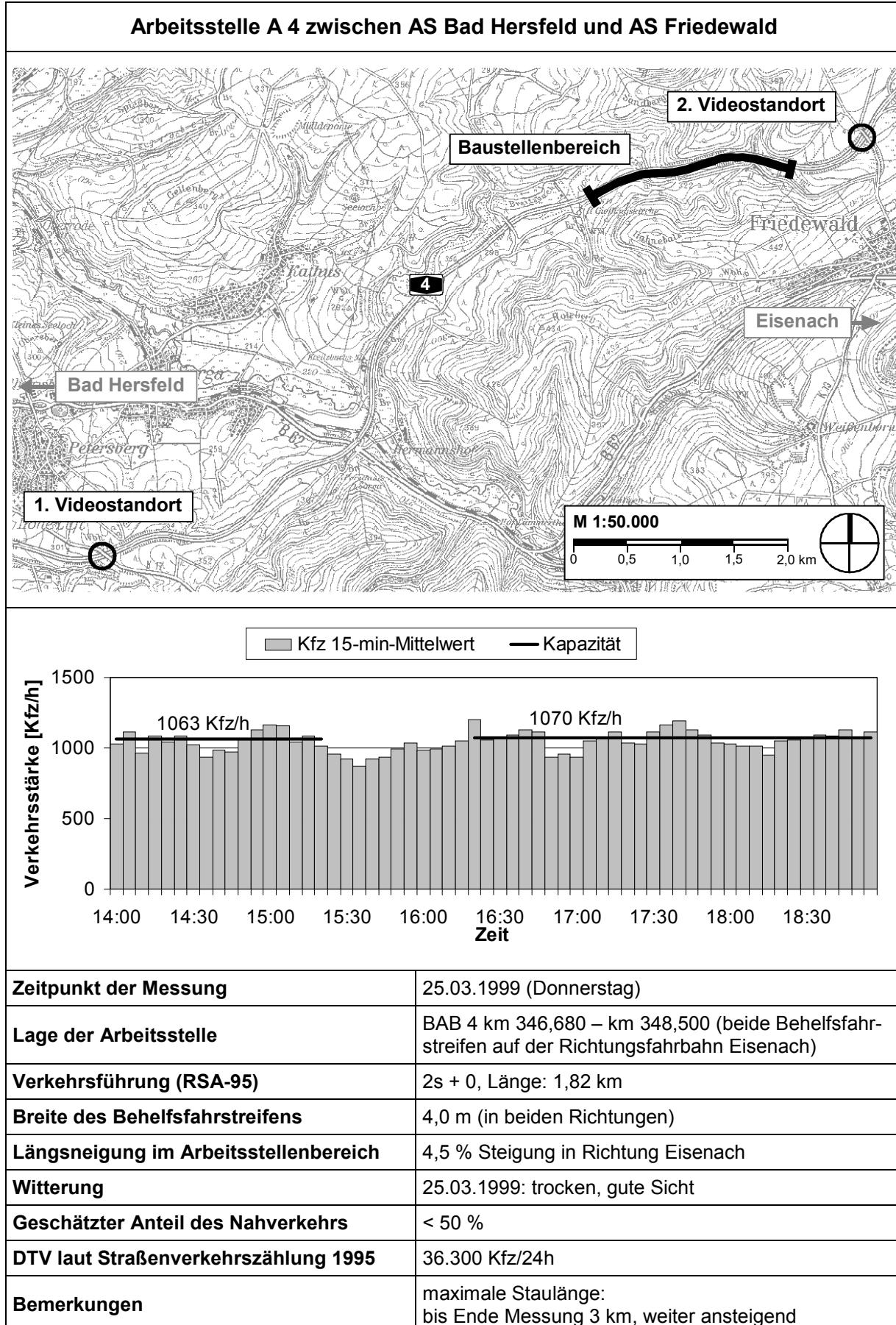


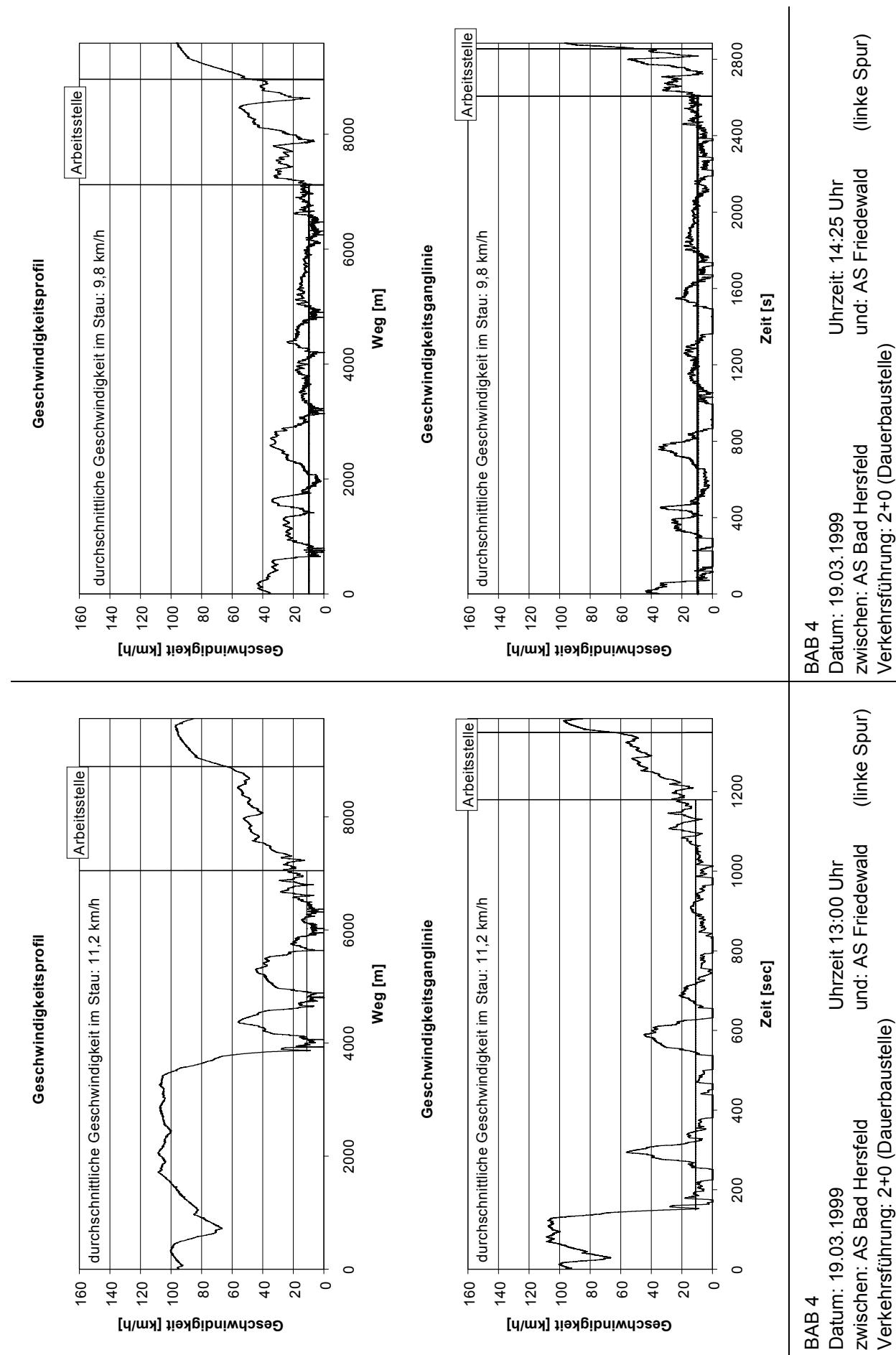


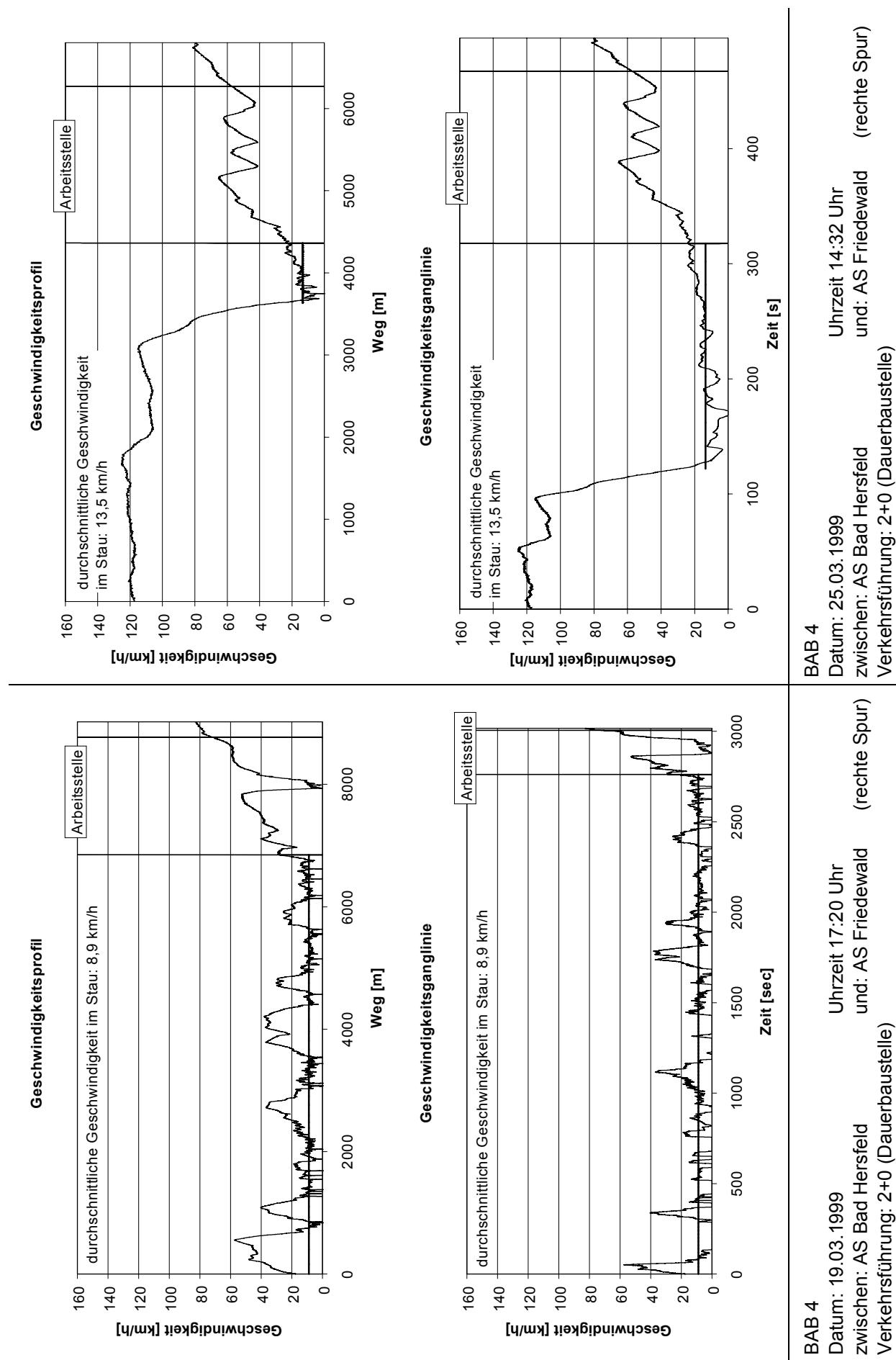


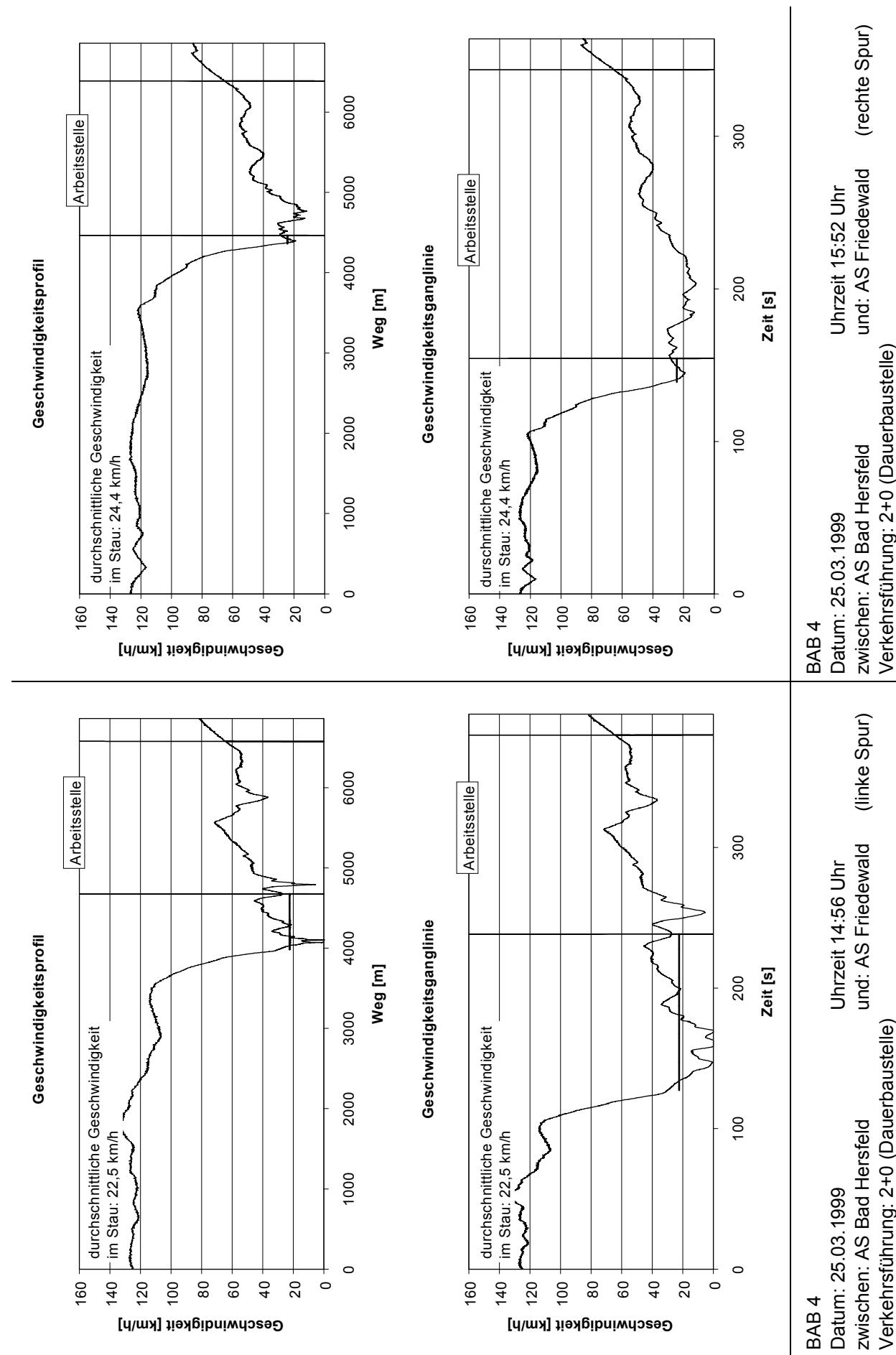


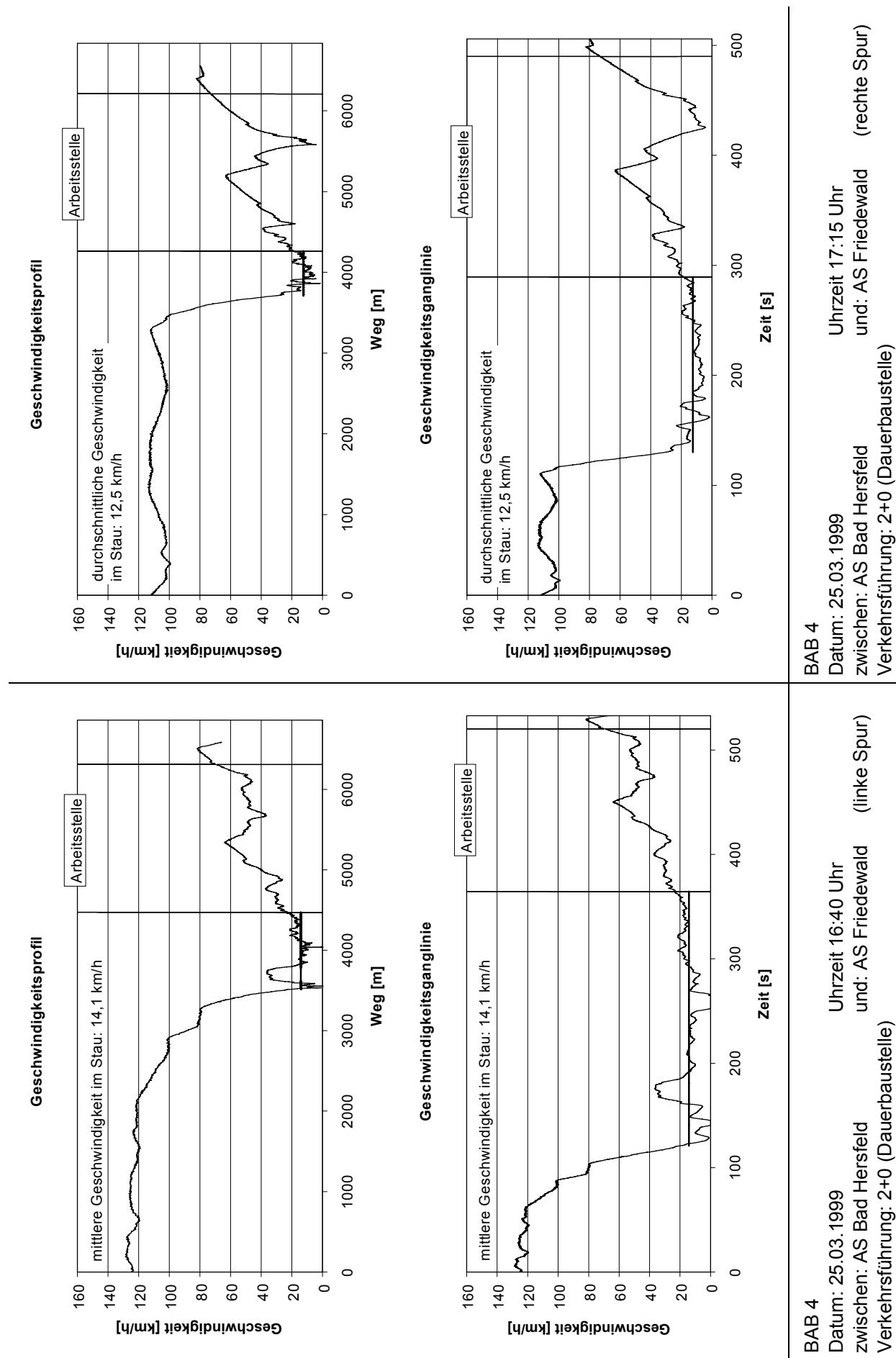


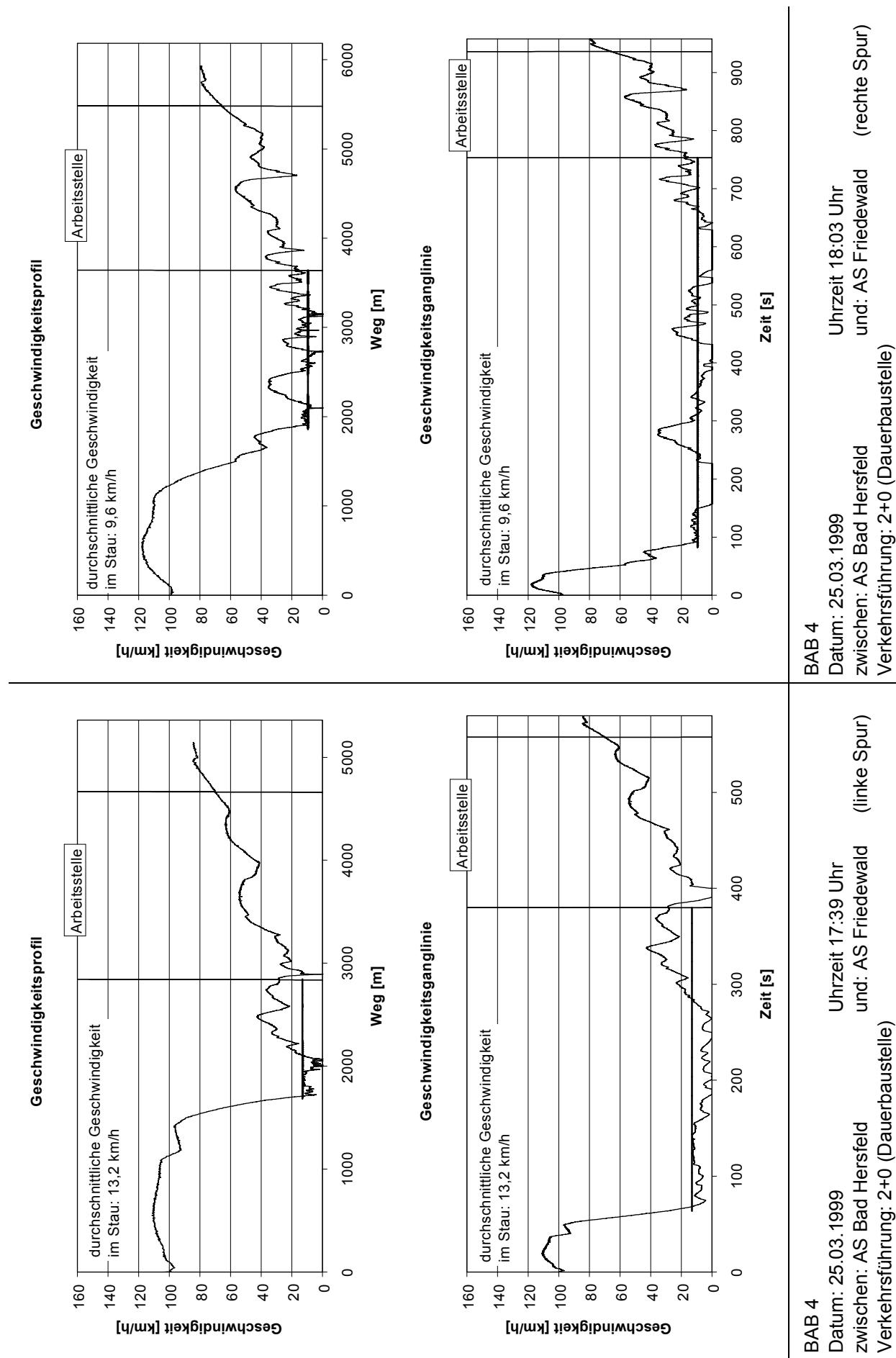


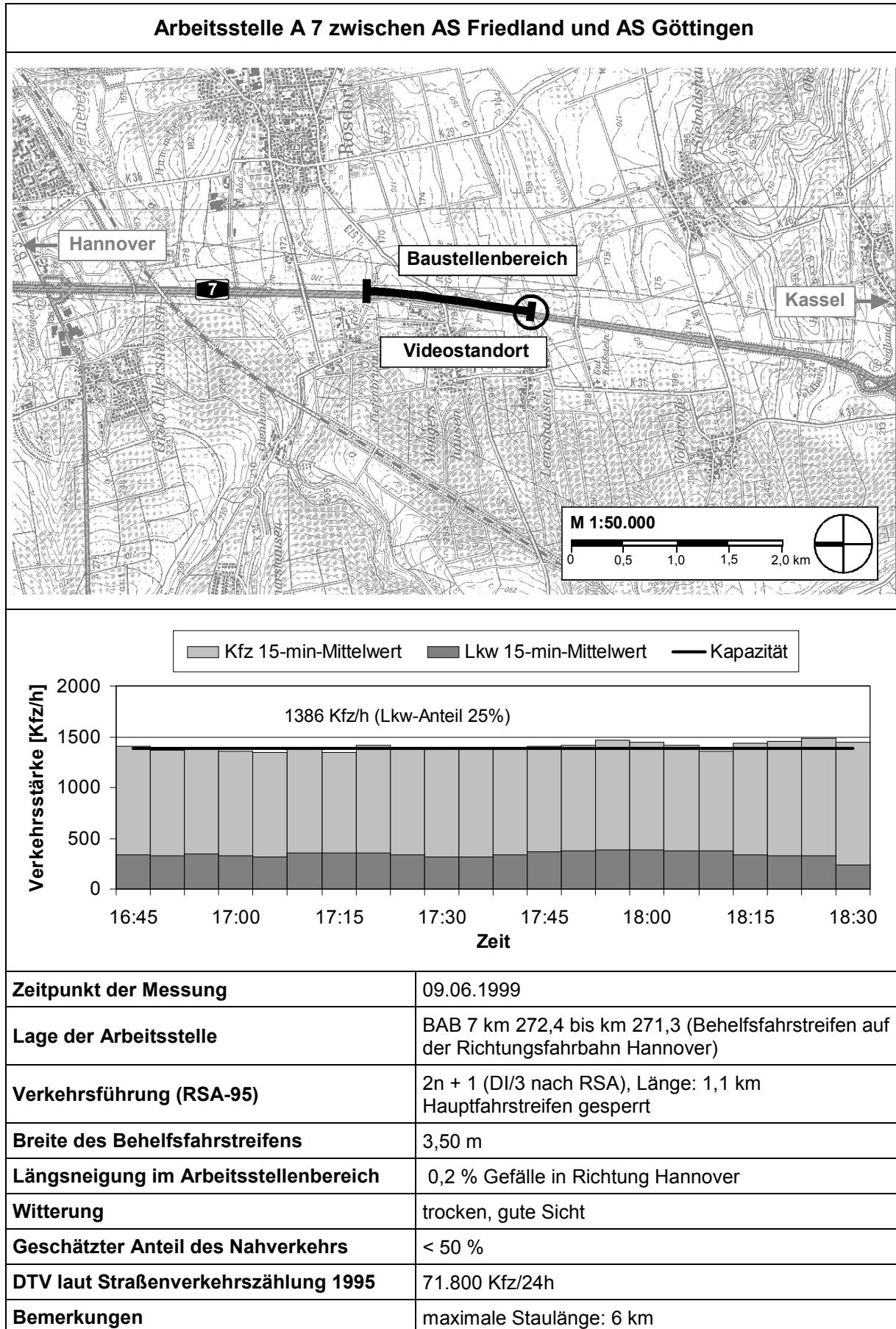


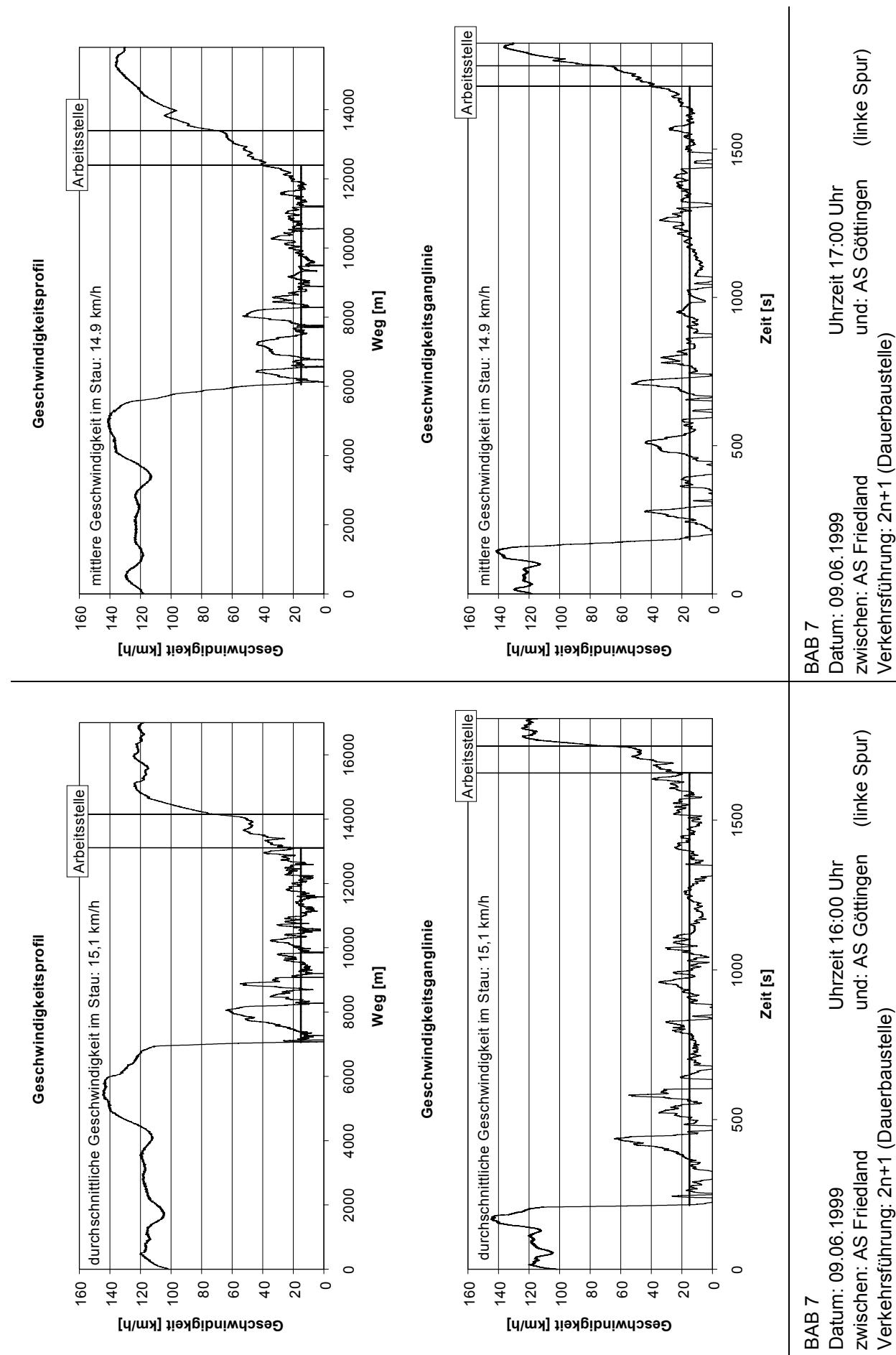


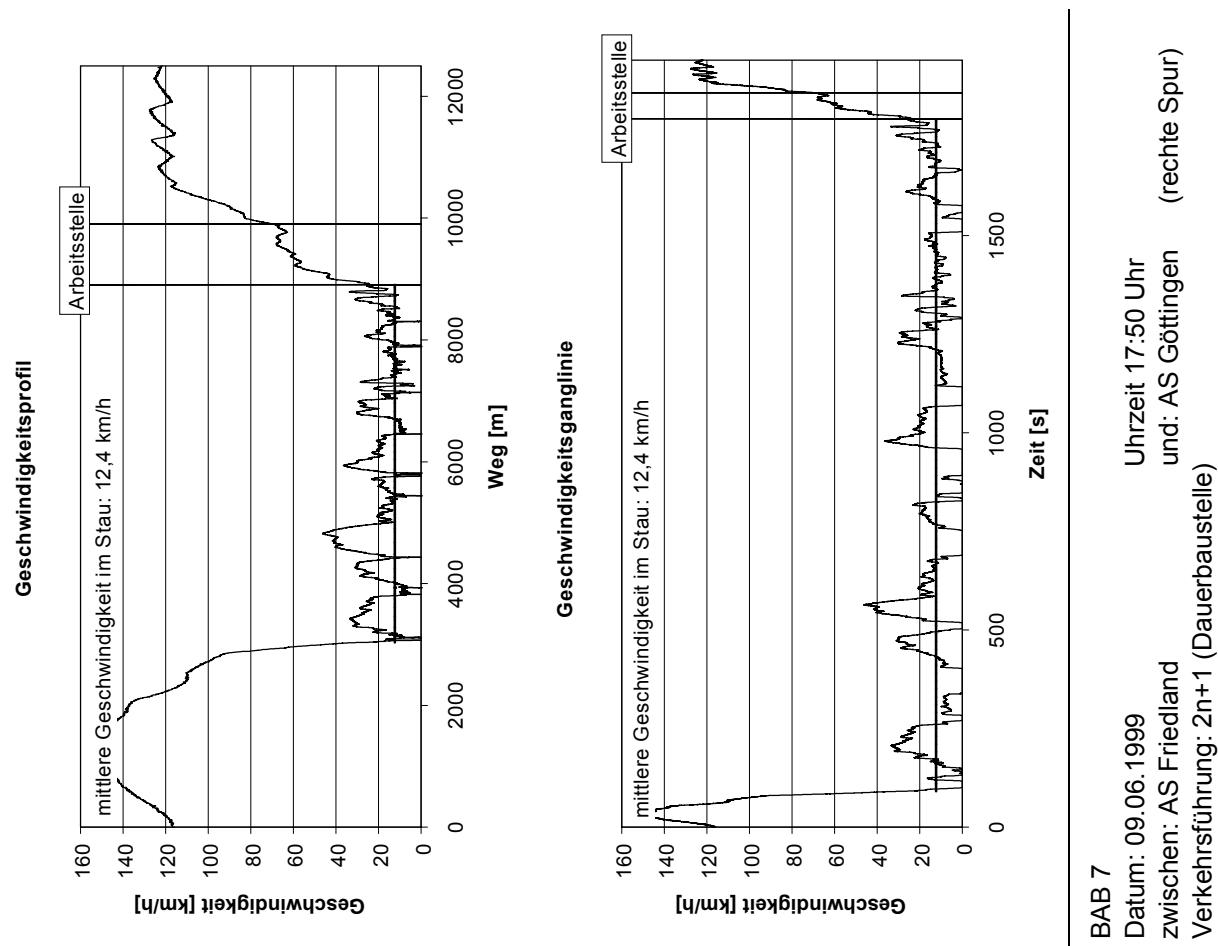


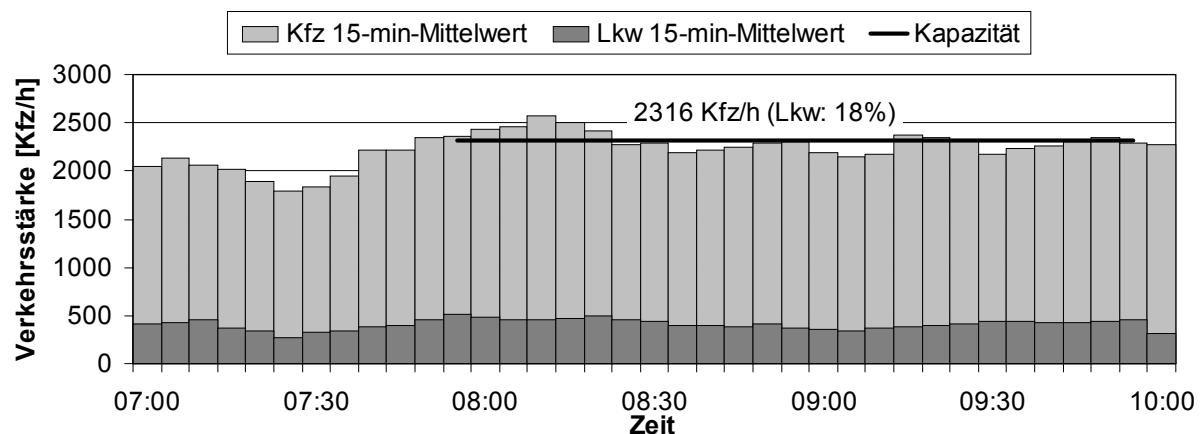
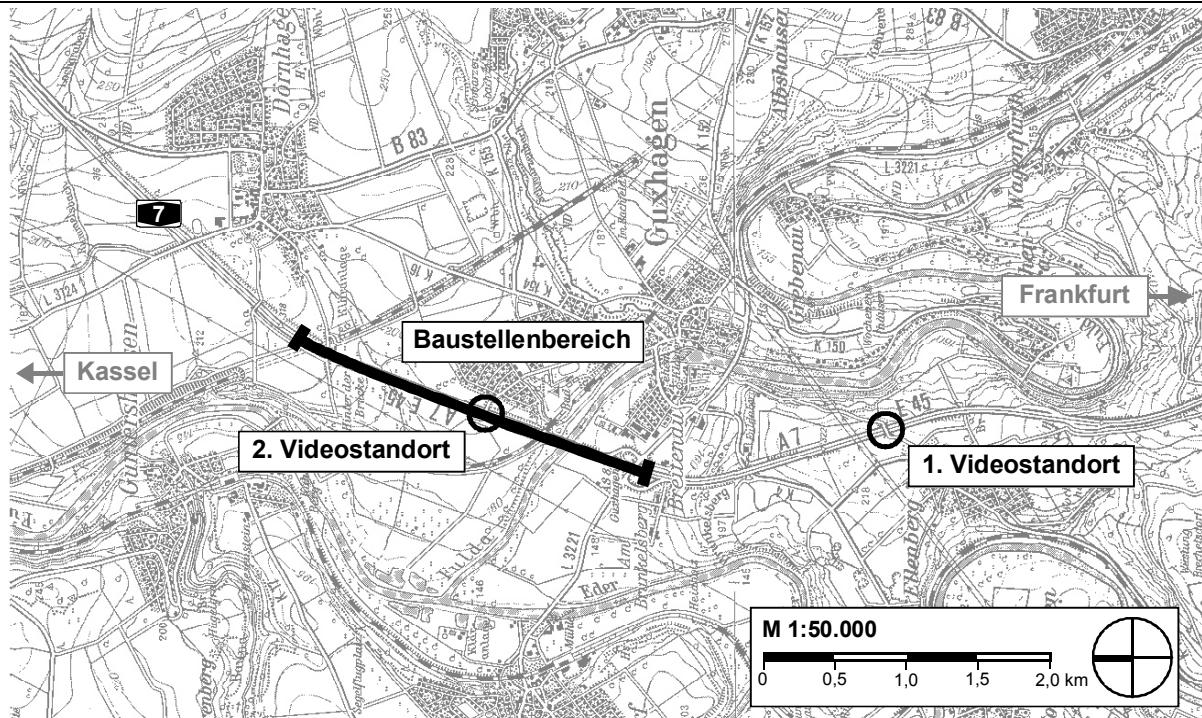




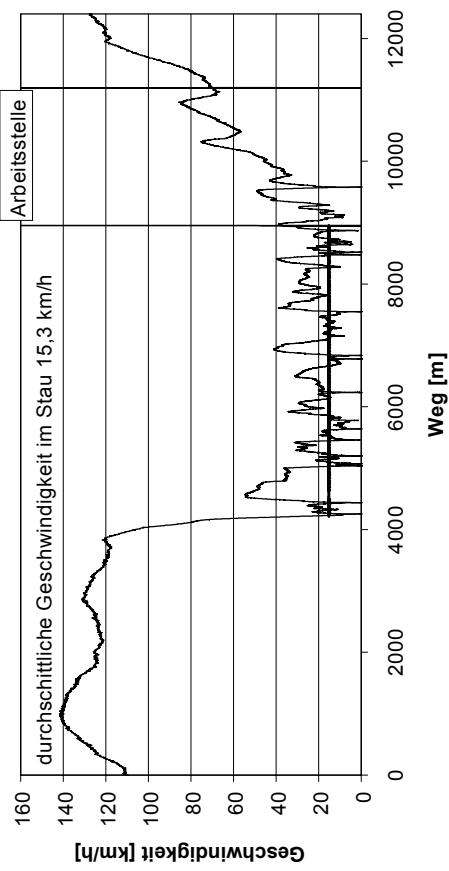
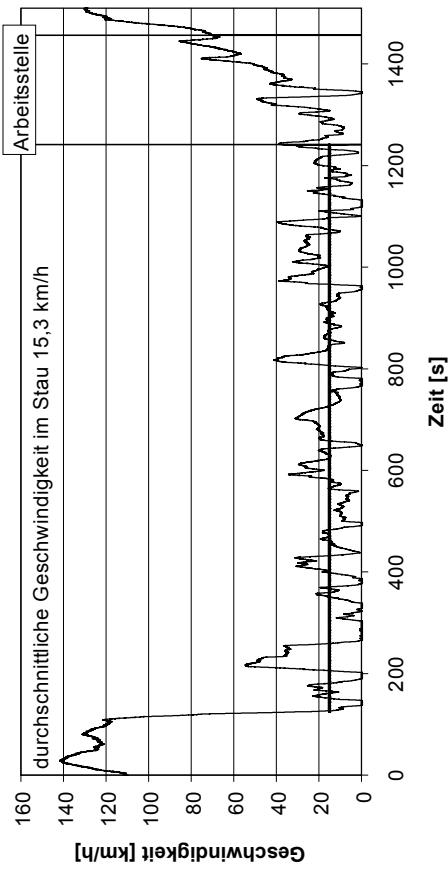






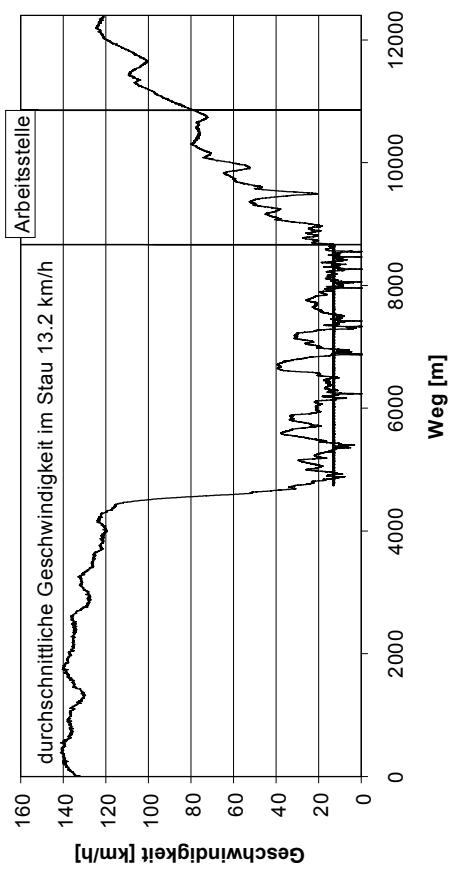
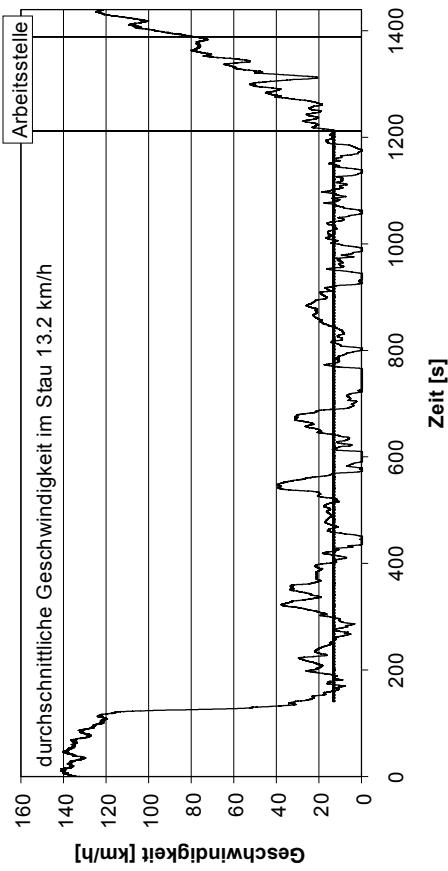
Arbeitsstelle A 7 zwischen AS Guxhagen und Kasseler Kreuz


Zeitpunkt der Messung	23.03.1999
Lage der Arbeitsstelle	BAB 7 km 320,750 – km 318,550 (Behelfsfahrstreifen auf der Richtungsfahrbahn Kassel)
Verkehrsführung (RSA-95)	3n + 2, Länge: 2,2 km (Hauptfahrstreifen gesperrt)
Breite des Behelfsfahrstreifens	rechter FS: 3,50 m, linker FS: 3,50 m
Längsneigung im Arbeitsstellenbereich	3,0-7,0 % Steigung in Richtung Kassel (je 450 m)
Witterung	Nieselregen
Geschätzter Anteil des Nahverkehrs	< 50 %
DTV laut Straßenverkehrszählung 1995	70.500 Kfz/24h
Bemerkungen	Die Messung lag in der Zeit der CeBit- Hannover. Maximale Staulänge: 5 km

Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 7
Datum: 23.03.1999
zwischen: AS Guxhagen und: AS Kassel (linke Spur)

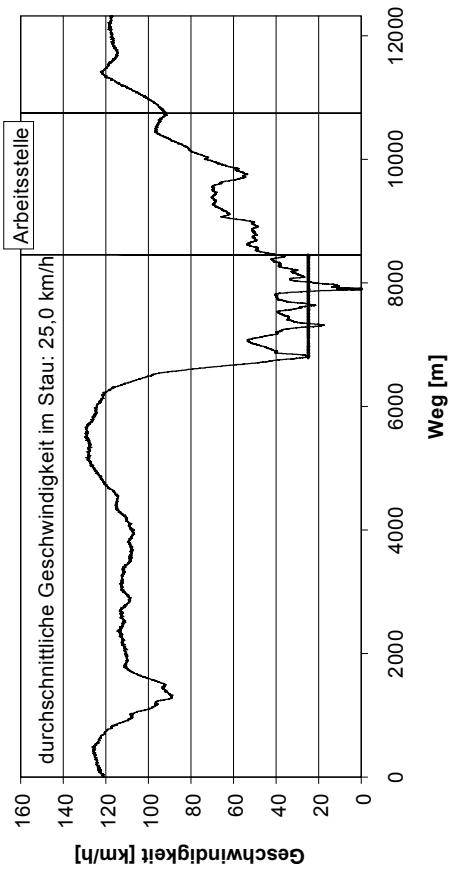
Uhrzeit 08:05 Uhr
Verkehrsführung: 3n+2 (Dauerbaustelle)

Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

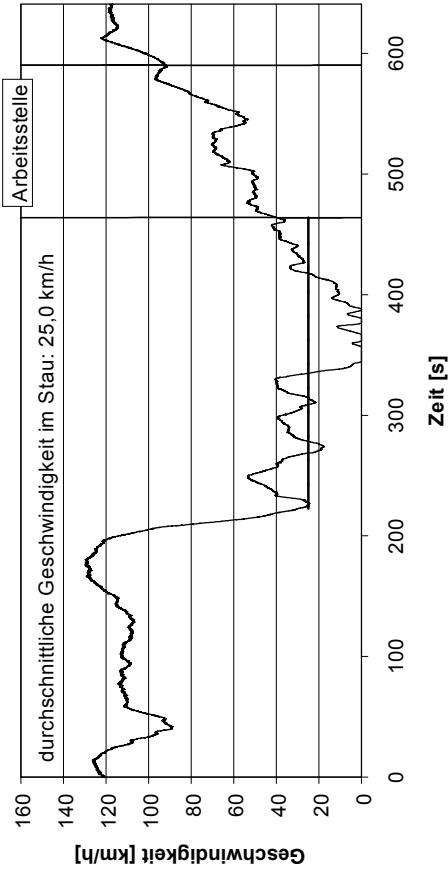
BAB 7
Datum: 23.03.1999
zwischen: AS Guxhagen und: AS Kassel (rechte Spur)

Uhrzeit 08:46 Uhr
und: AS Kassel (linke Spur)

Geschwindigkeitsprofil



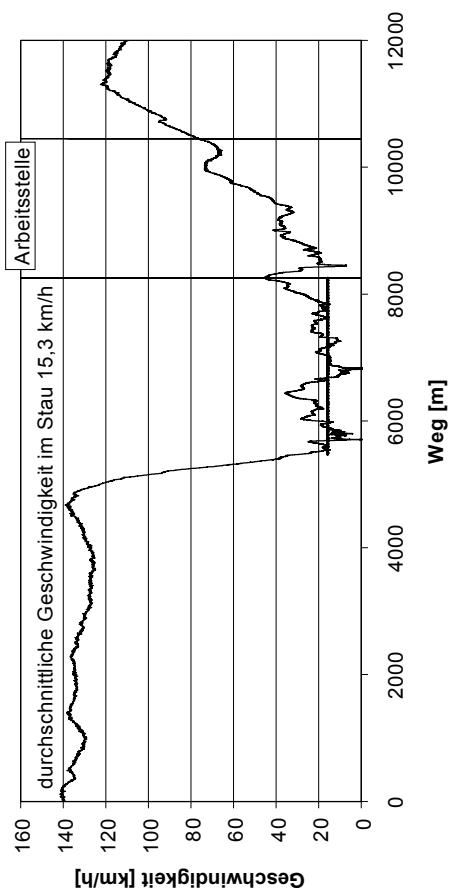
Geschwindigkeitsganglinie



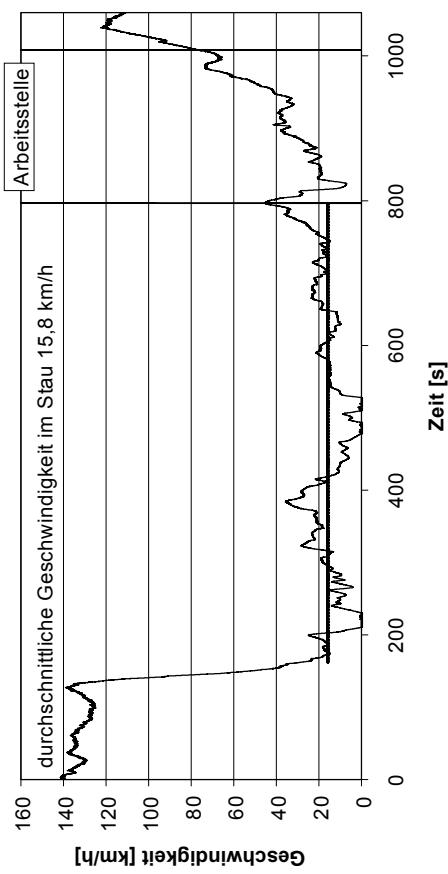
BAB 7
Datum: 26.03.1999
zwischen: AS Guxhagen
Verkehrsführung: 3n+2 (Dauerbaustelle)

Uhrzeit 12:40 Uhr
und: AS Kassel (mittlere Spur)
(mittlere Spur)

Geschwindigkeitsprofil



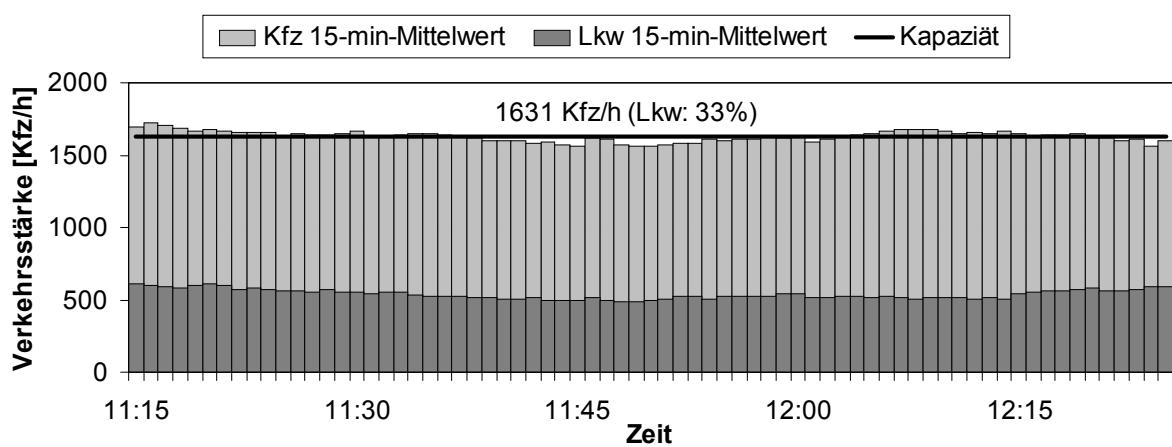
Geschwindigkeitsganglinie



BAB 4
Datum: 23.03.1999
zwischen: AS Guxhagen
Verkehrsführung: 3n+2 (Dauerbaustelle)

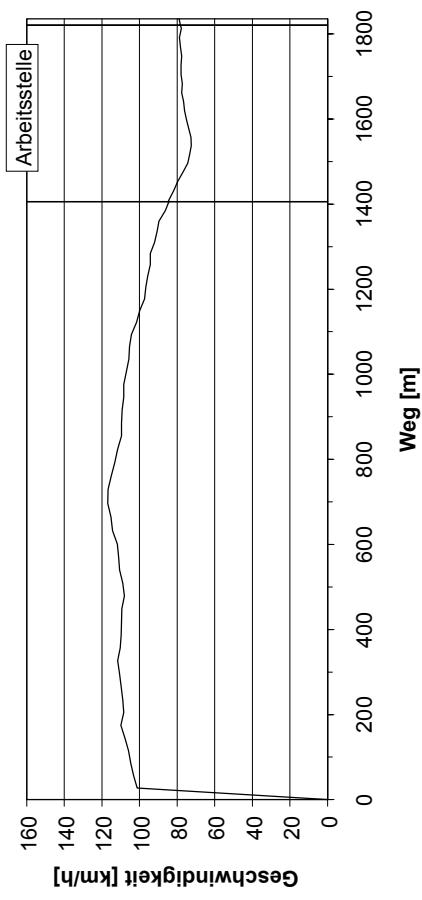
Uhrzeit 09:29 Uhr
und: AS Kassel (mittlere Spur)

Baustelle A 2 zwischen AS Essen-Gladbeck - AS Recklinghausen

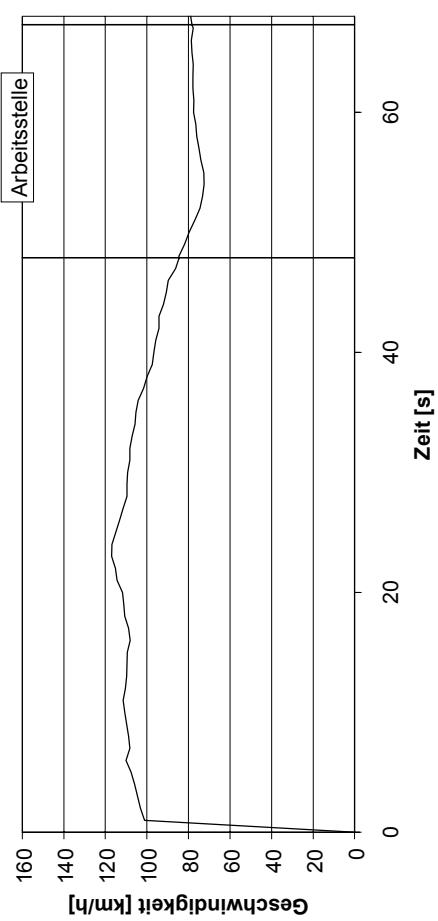


Zeitpunkt der Messung	08.05.2001
Lage der Baustelle	BAB 2 km 456,400 bis km 456,100
Verkehrsführung (RSA-95)	2n + 1, (Hauptfahrstreifen gesperrt)
Breite des Behelfsfahrstreifens	3,50 m
Längsneigung im Baustellenbereich	< 2%
Witterung	trocken
Geschätzter Anteil des Nahverkehrs	> 50 %
DTV laut Straßenverkehrszählung 1995	56.900 Kfz/24h
Bemerkungen	Maximale Staulänge: 3 km

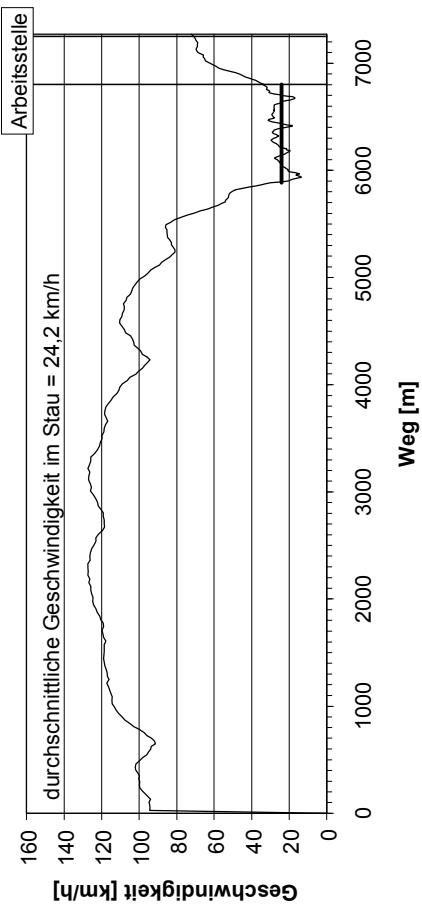
Geschwindigkeitsprofil



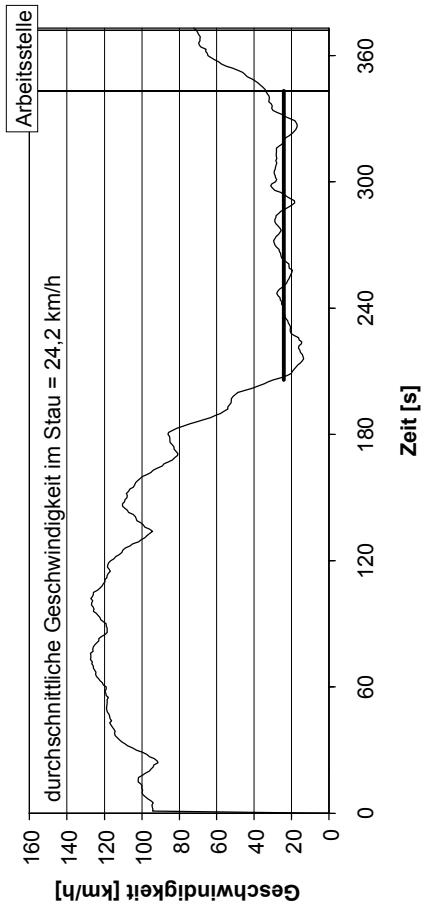
Geschwindigkeitsganglinie



Geschwindigkeitsprofil



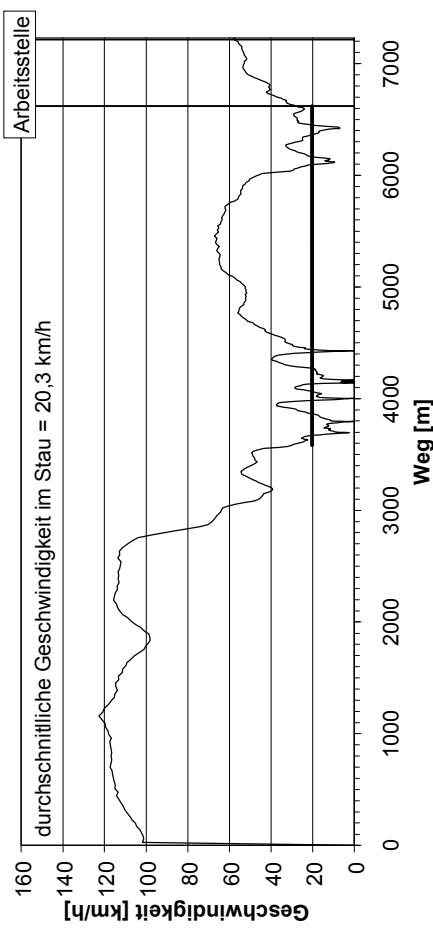
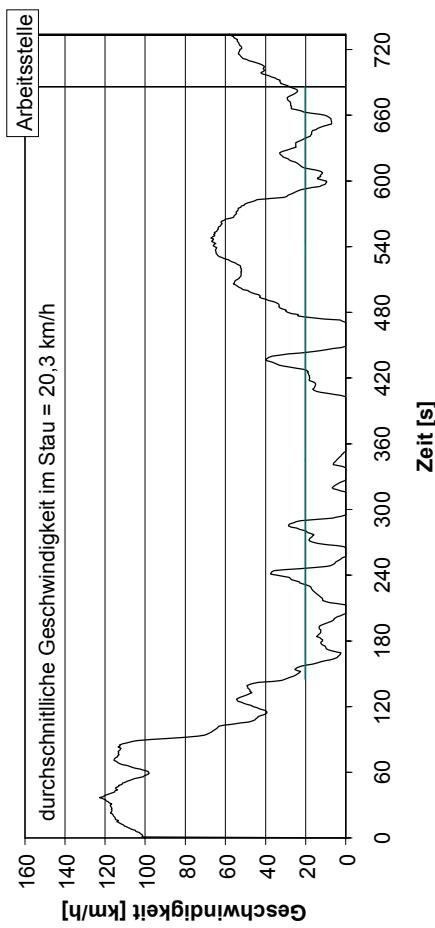
Geschwindigkeitsganglinie



BAB 2
Datum: 08.05.2001
zwischen: AS Essen-Gladbeck
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

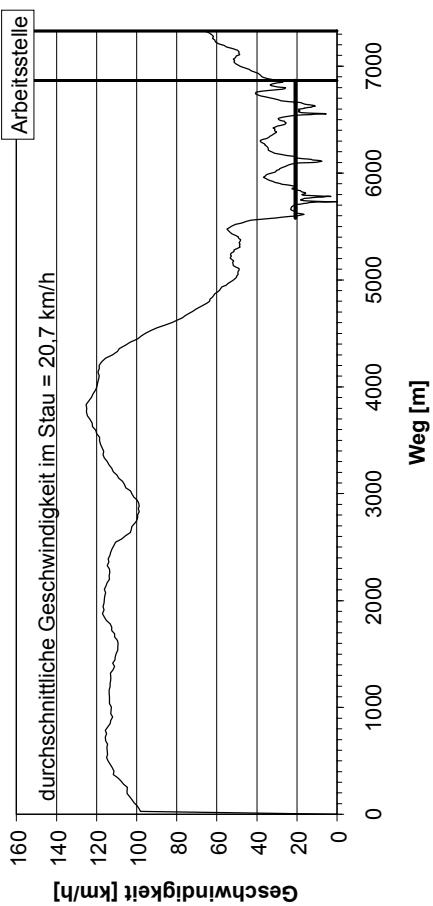
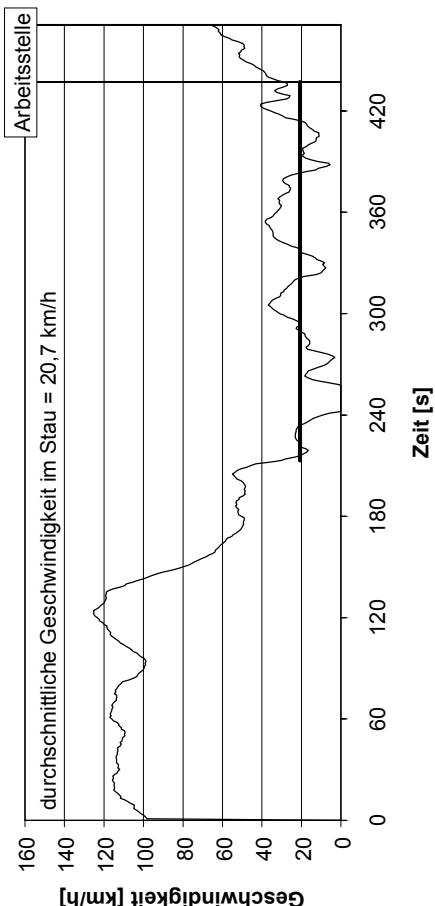
BAB 2
Uhrzeit: 11:18 Uhr
und: AK Recklinghausen
Unterwegs: A6 Essen-Gladbeck
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

Uhrzeit: 11:28 Uhr
und: AK Recklinghausen

Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

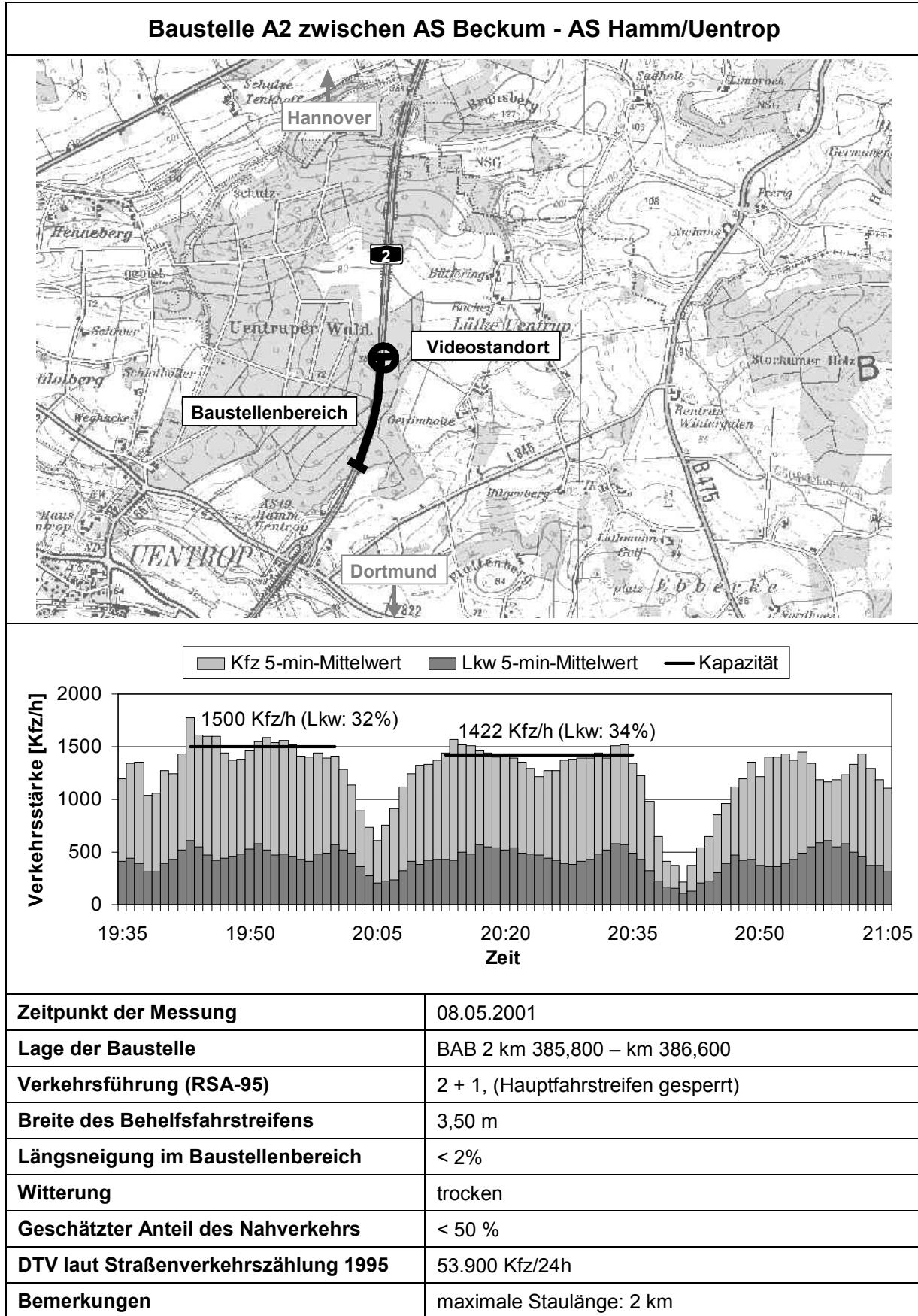
BAB 2
Datum: 08.05.2001
zwischen: AS Essen-Gladbeck und: AK Recklinghausen
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

Uhrzeit: 11:45 Uhr
und: AK Recklinghausen

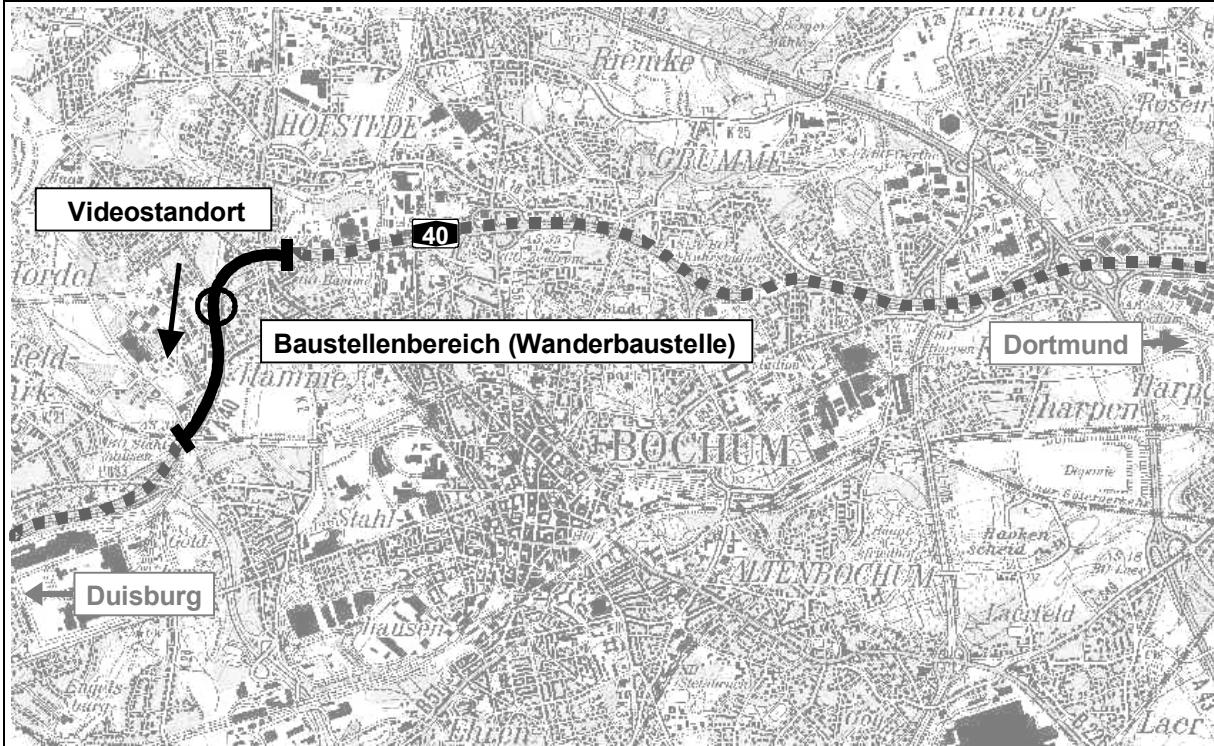
Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 2
Datum: 08.05.2001
zwischen: AS Essen-Gladbeck und: AK Recklinghausen
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

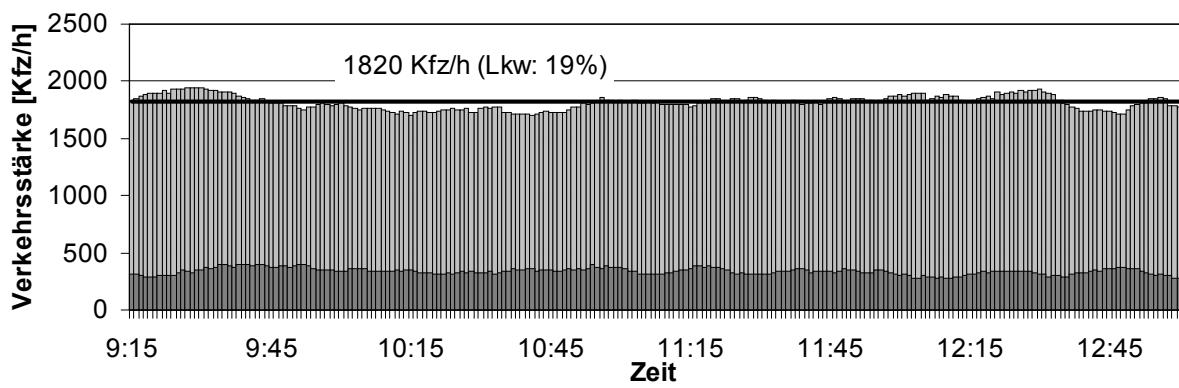
Uhrzeit: 12:05 Uhr
und: AK Recklinghausen



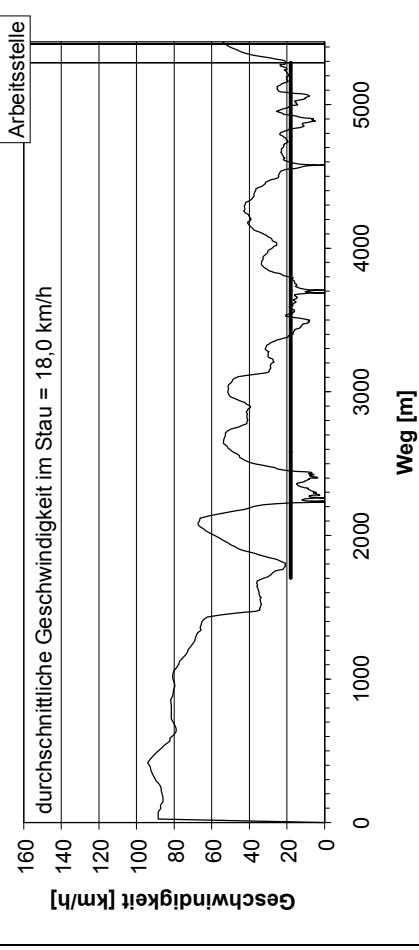
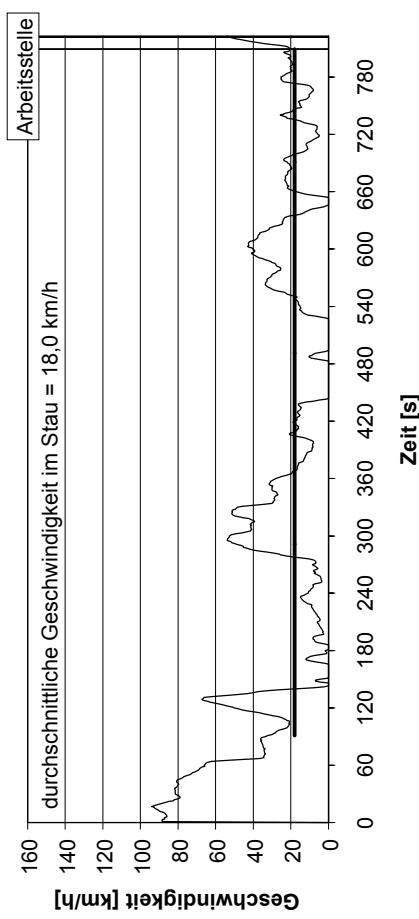
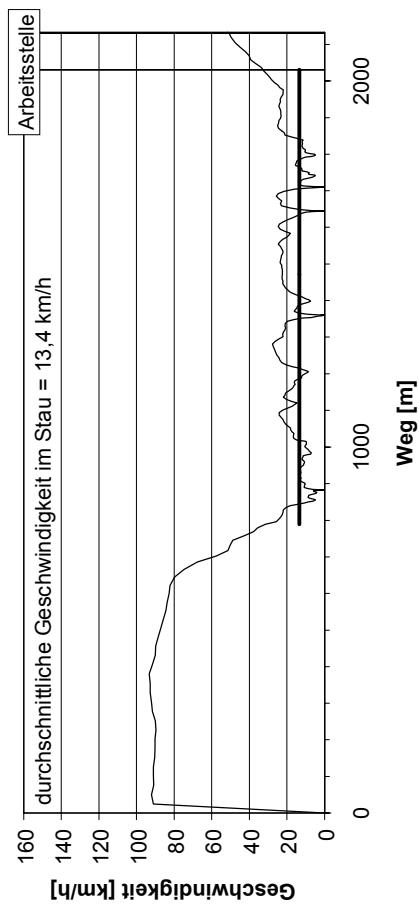
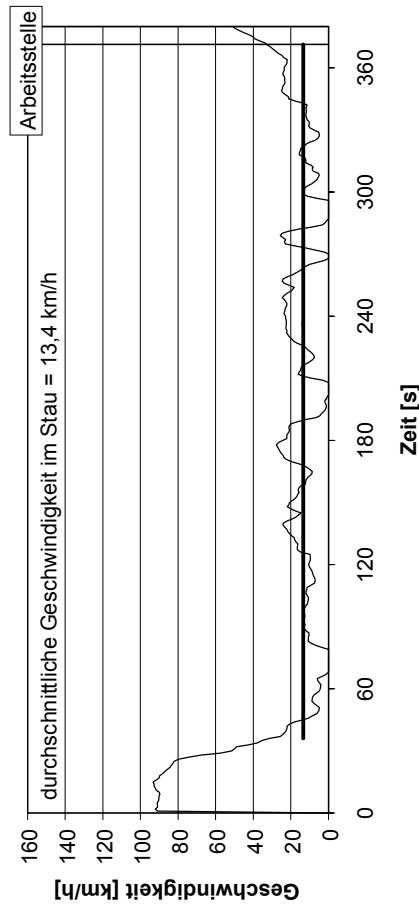
Baustelle A40 zwischen AK Bochum - AS Stahlhausen



■ Kfz 15-min-Mittelwert ■ Lkw 15-min-Mittelwert — Kapazität



Zeitpunkt der Messung	09.05.2001
Lage der Baustelle	BAB 40 km 6,600 bis km 5,000 (Wanderbaustelle)
Verkehrsführung (RSA-95)	2n + 1, (Hauptfahrstreifen gesperrt)
Breite des Behelfsfahrstreifens	3,50 m
Längsneigung im Baustellenbereich	< 2%
Witterung	trocken
Geschätzter Anteil des Nahverkehrs	> 50 %
DTV laut Straßenverkehrszählung 1995	90.500 Kfz/24h
Bemerkungen	maximale Staulänge: 5,5 km

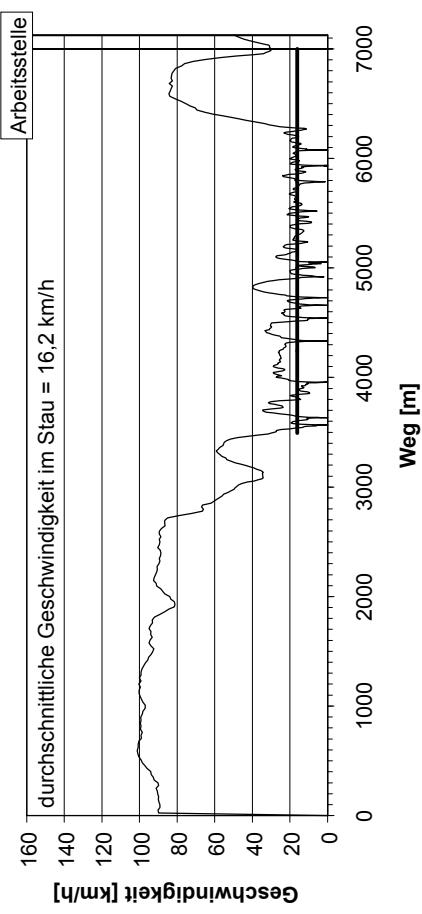
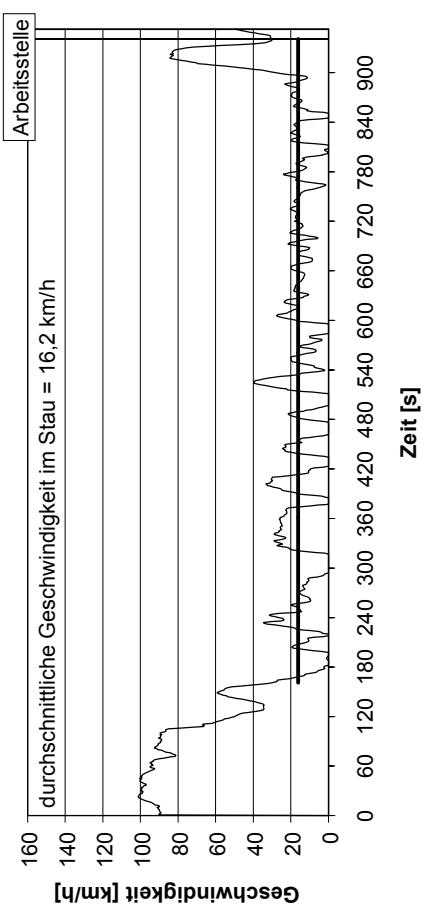
Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie****Geschwindigkeitsprofil****Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 40
Datum: 09.05.2001
zwischen: AS BO-Ruhrstation
Verkehrsführung: 2+1 (Tagesbaustelle)

Uhrzeit: 09:17 Uhr
und: AS BO-Hamme (linke Spur)

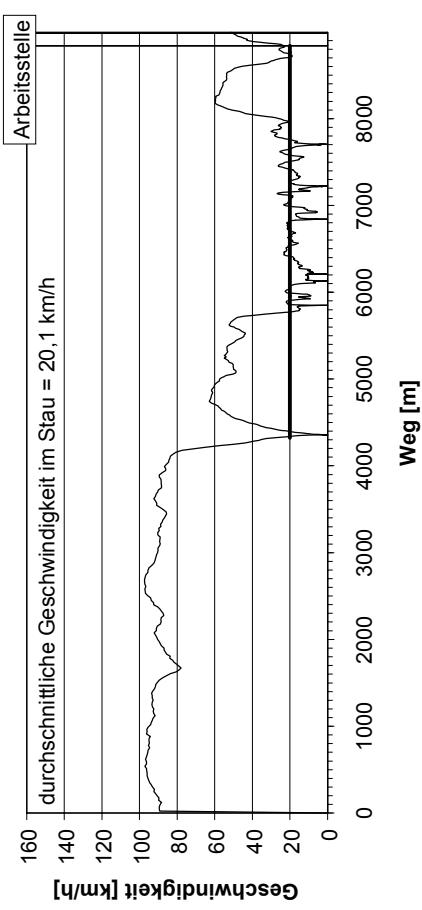
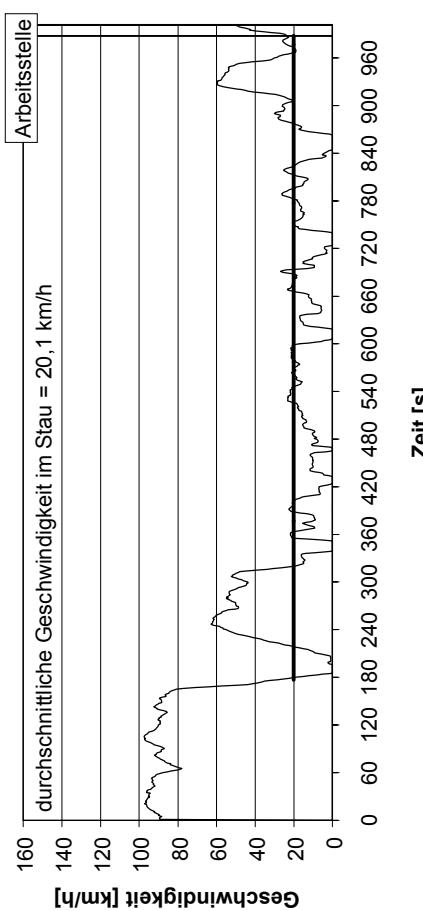
Uhrzeit: 09:49 Uhr
und: AS BO-Stahlhausen (rechte Spur)

BAB 40
Datum: 09.05.2001
zwischen: AS BO-Harpem
Verkehrsführung: 2+1 (Tagesbaustelle)

Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

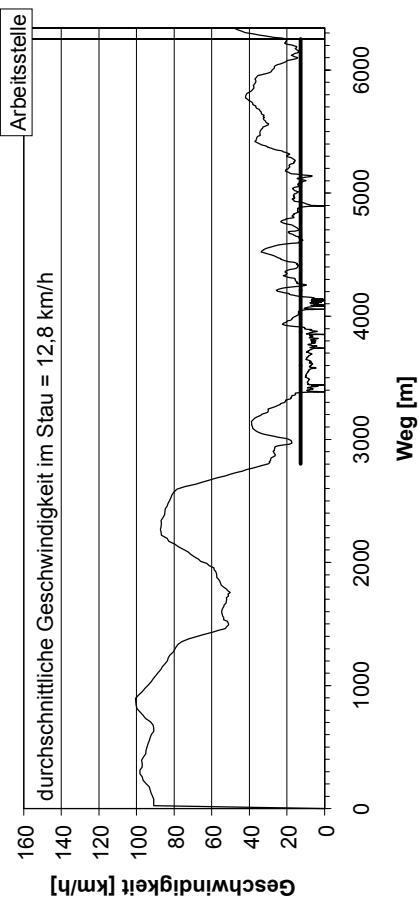
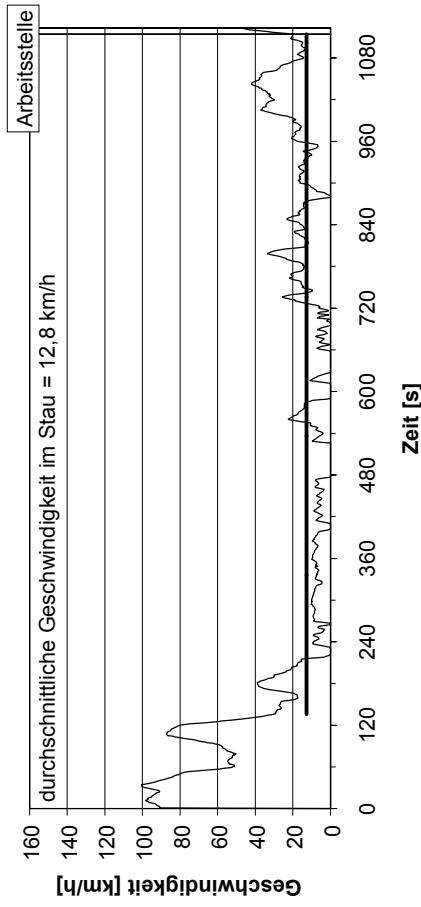
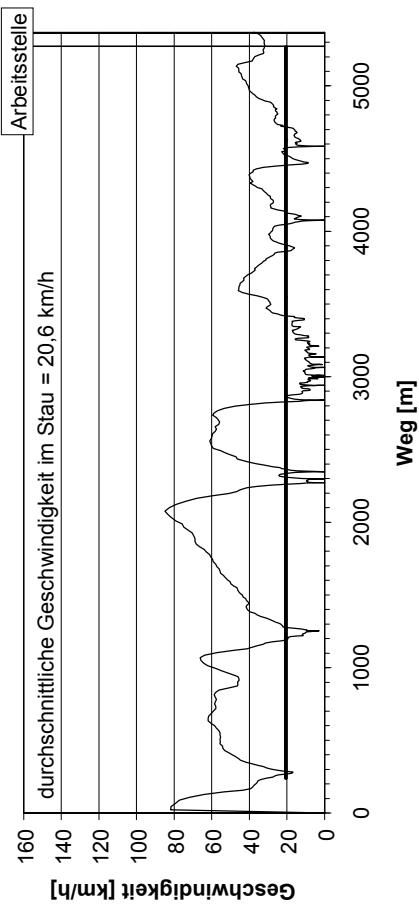
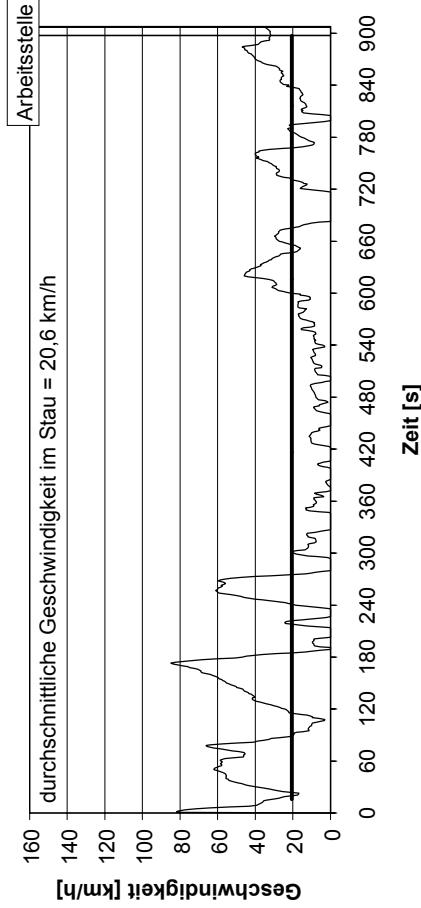
BAB 40
Datum: 09.05.2001
zwischen: AS DO-Lütgendortmund
Verkehrsführung: 2+1 (Tagesbaustelle)

Uhrzeit: 10:28 Uhr
und: AS BO-Stahlhausen (linke Spur)

Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 40
Datum: 09.05.2001
zwischen: AS BO-Werre
Verkehrsführung: 2+1 (Tagesbaustelle)

Uhrzeit: 10:57 Uhr
und: AS BO-Stahlhausen (linke Spur)

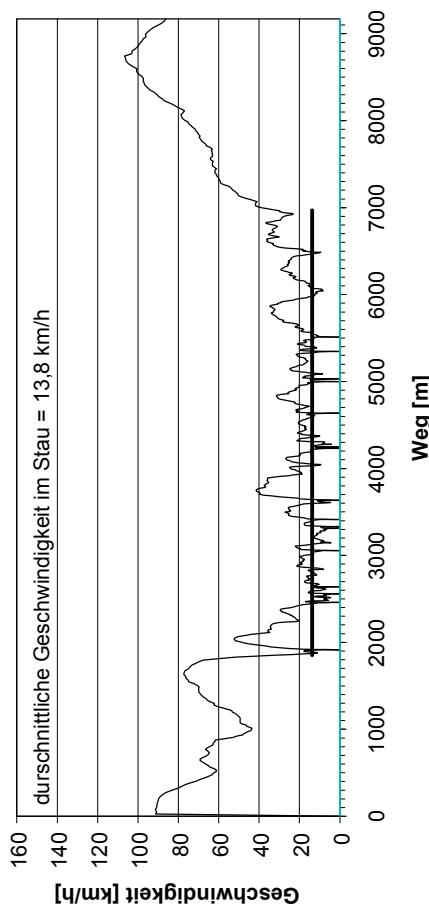
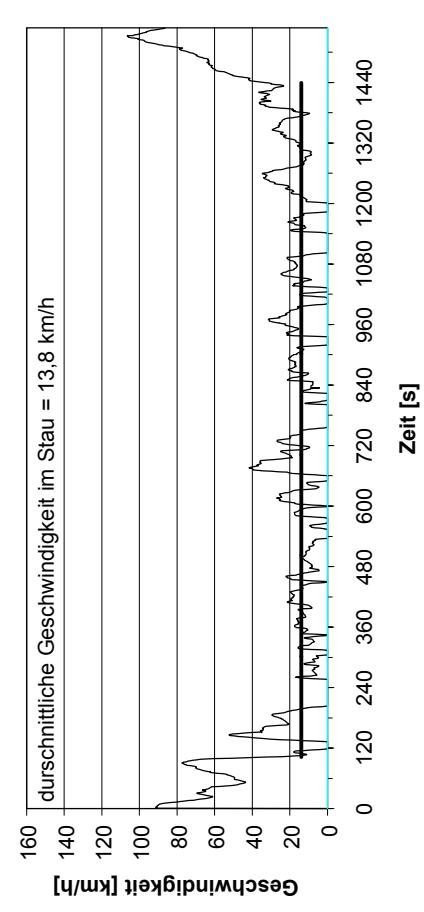
Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie****Geschwindigkeitsprofil****Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 40
Datum: 09.05.2001
zwischen: AK Bochum
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

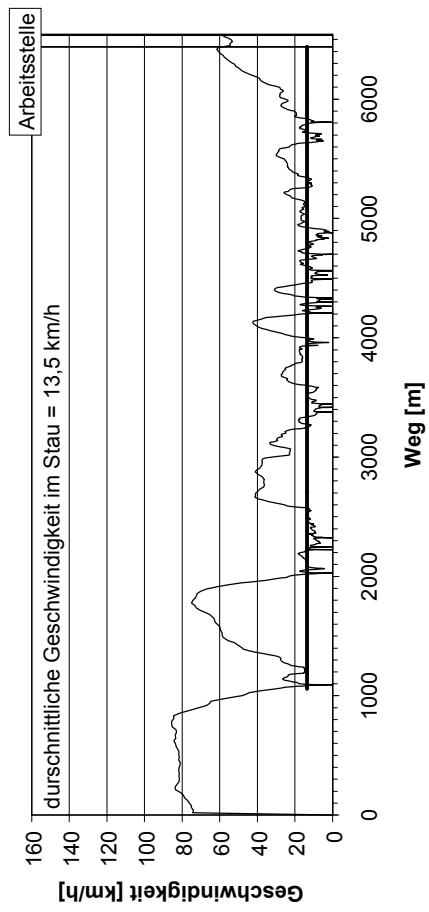
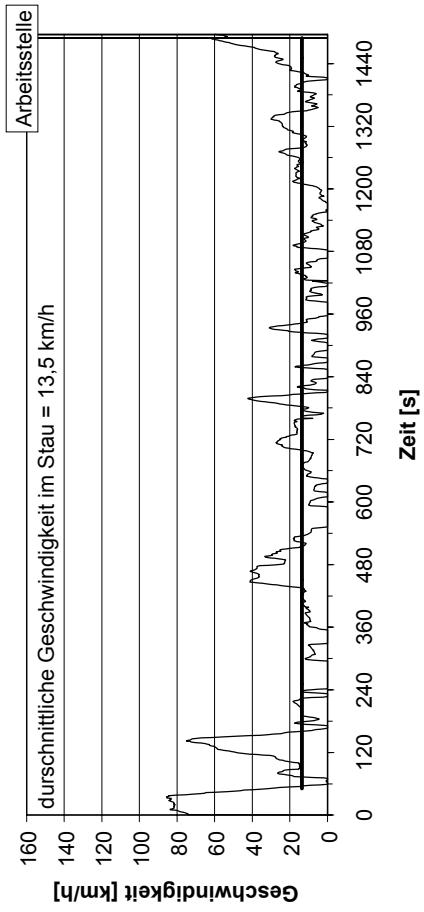
BAB 40
Uhrzeit: 11:26 Uhr
und: AS Stahlhausen (linke Spur)

BAB 40
Datum: 09.05.2001
zwischen: AK Bochum
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

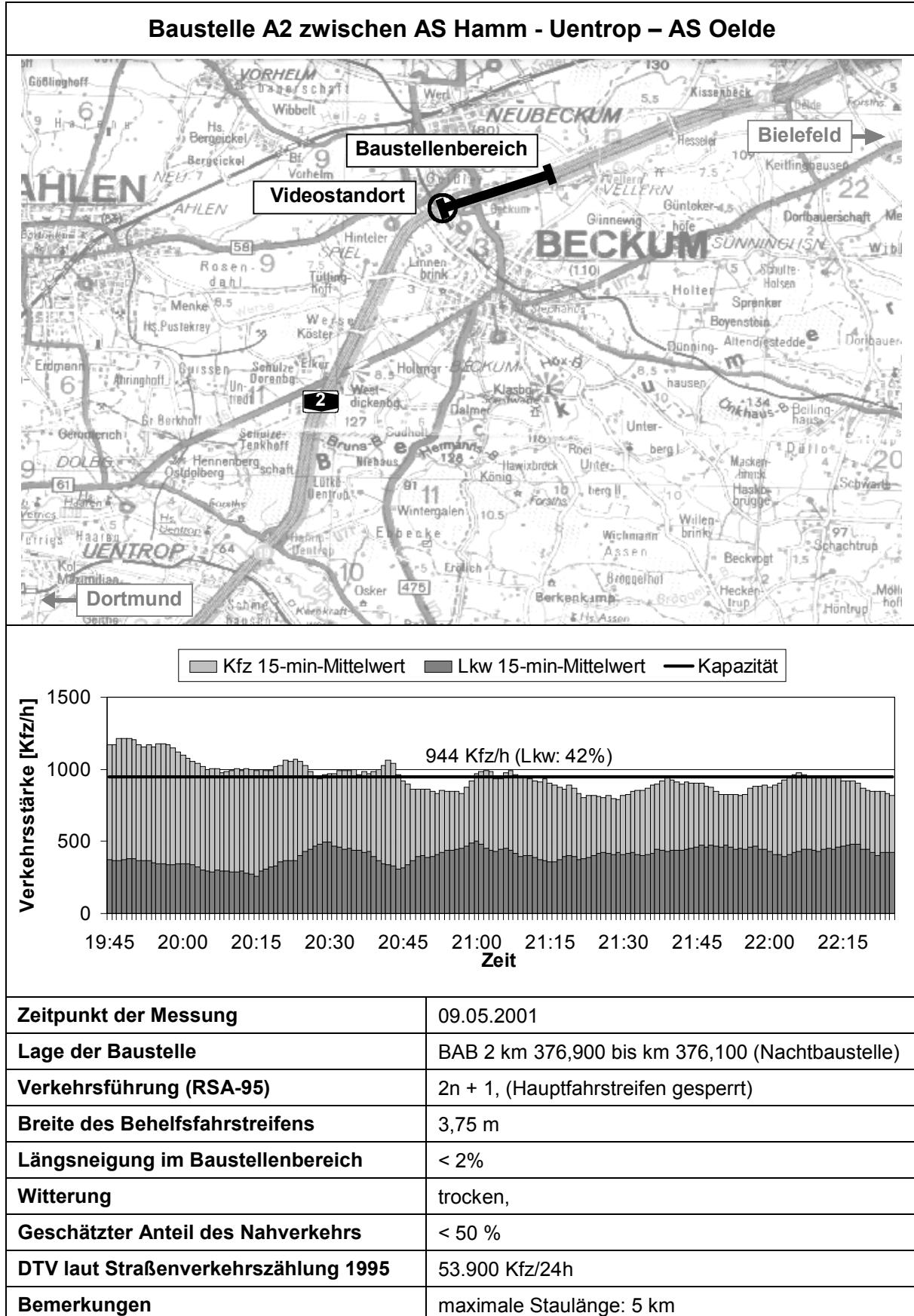
Uhrzeit: 11:52 Uhr
und: AK Stahlhausen (rechte Spur)

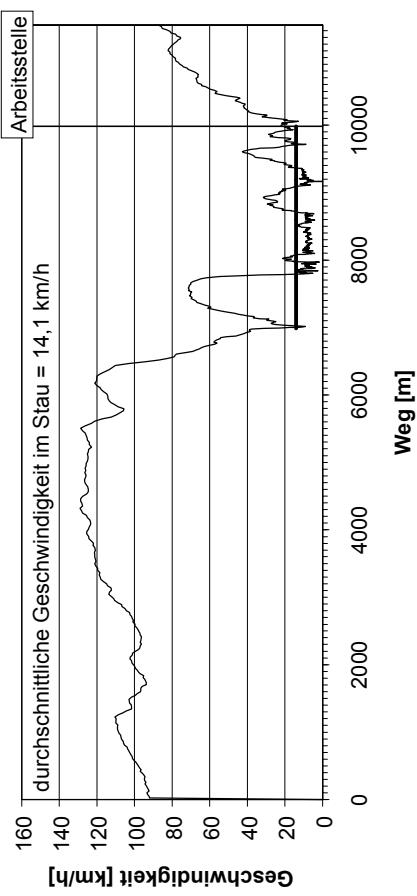
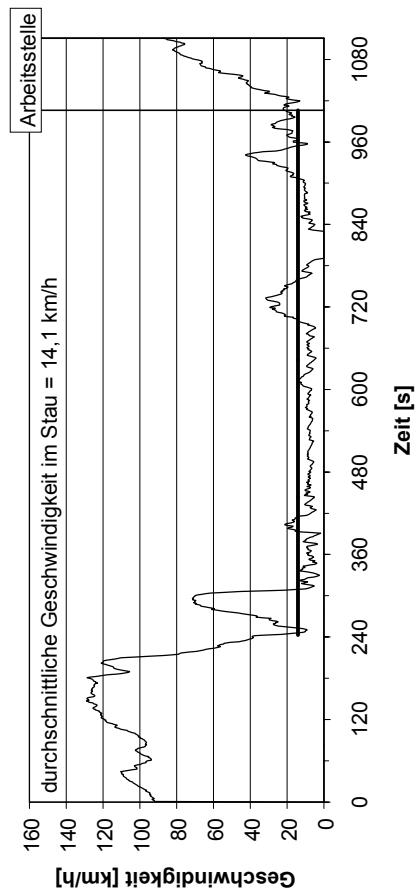
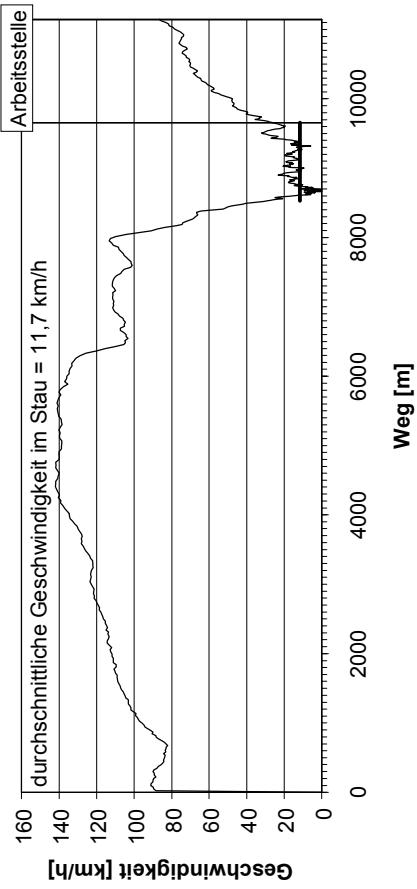
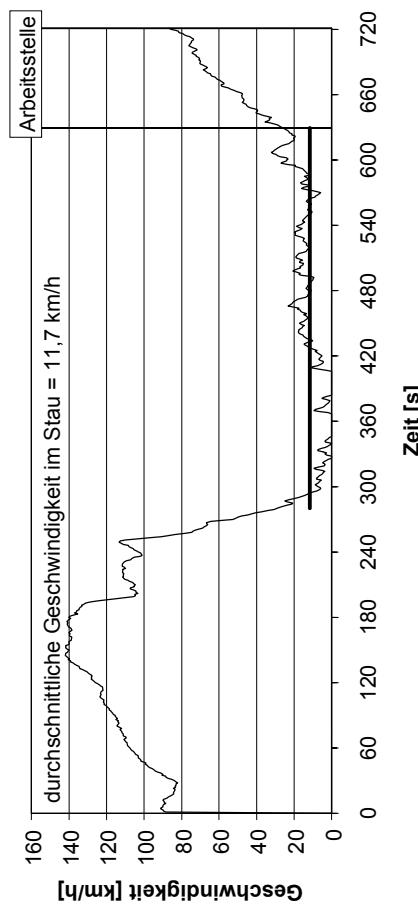
Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 40
Uhrzeit: 12:22 Uhr
und: AS BO-Wattenscheid (linke Spur)
zwischen: AK Bochum
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

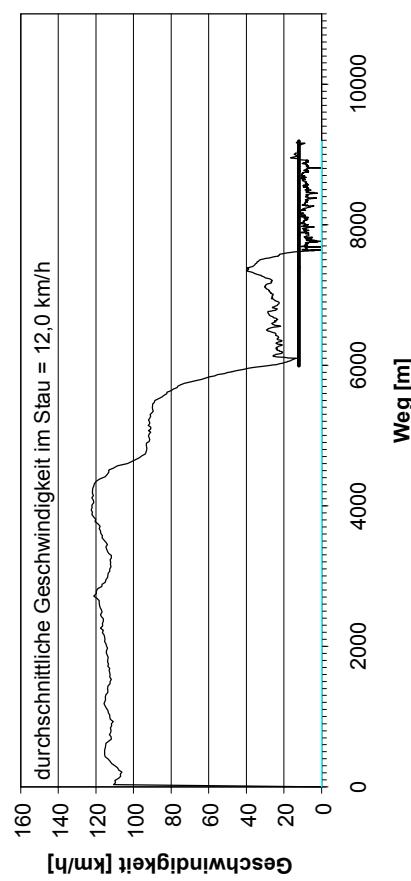
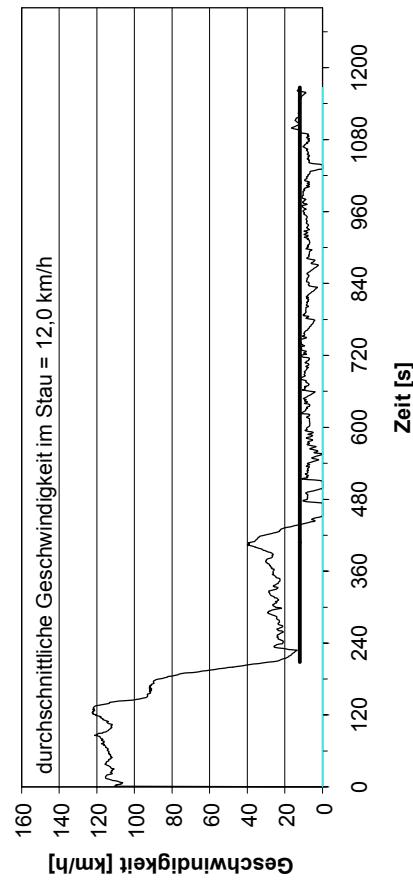
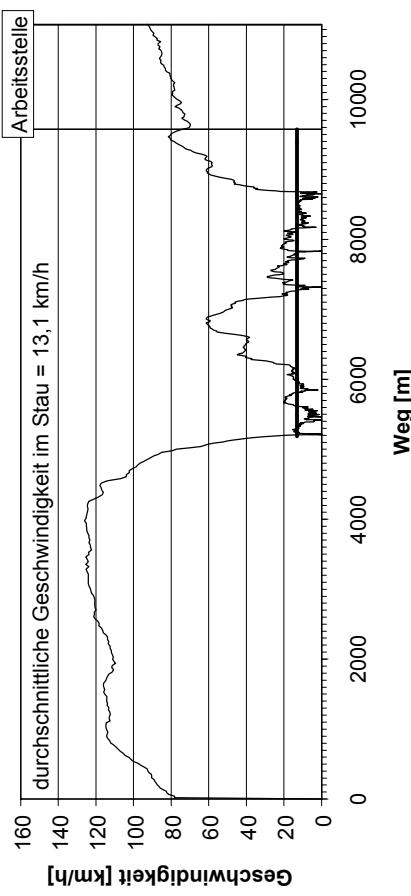
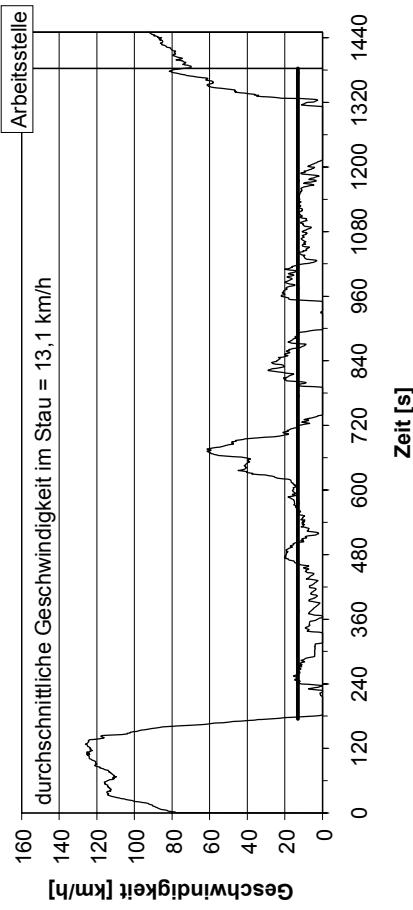
BAB 40
Datum: 09.05.2001
zwischen: AS BO-Wattenscheid (rechte Spur)
Uhrzeit: 13:44 Uhr
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)



Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie****Geschwindigkeitsprofil****Geschwindigkeitsganglinie**

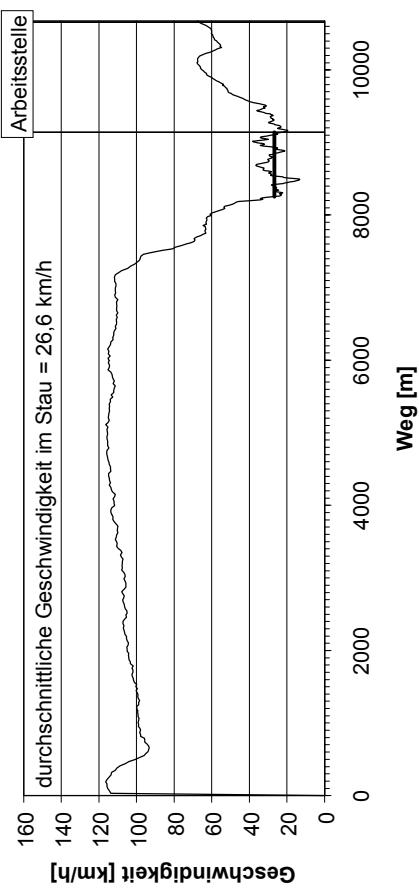
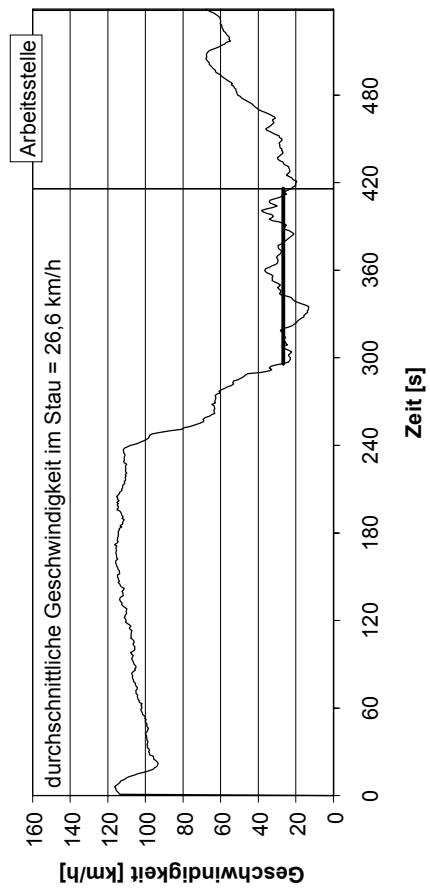
BAB 2
Datum: 09.05.2001
zwischen: AS Hamm-Uentrop
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

BAB 2
Uhrzeit: 19:53 Uhr
und: AS Oelde (linke Spur)
Zwischen: AS Hamm-Uentrop
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

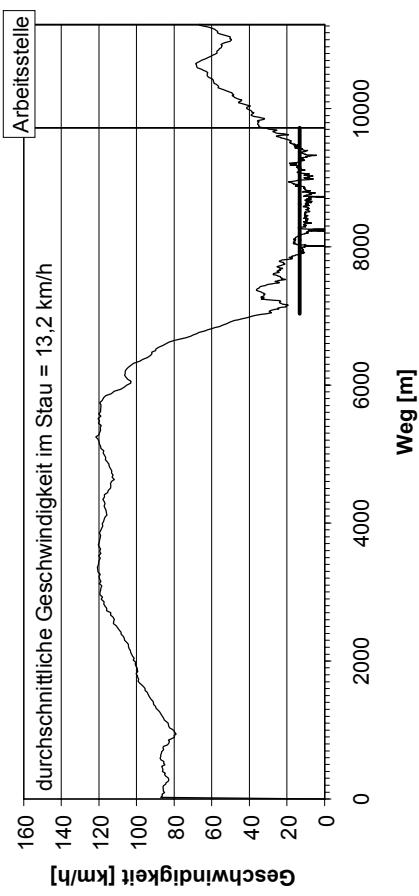
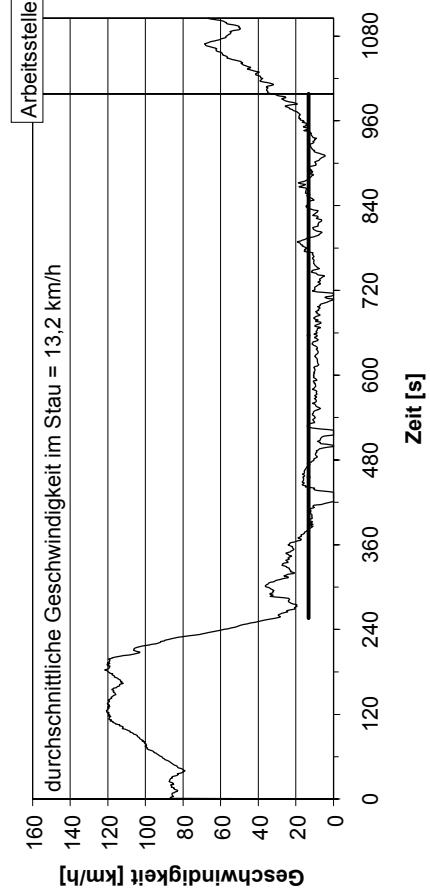
Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie****Geschwindigkeitsprofil****Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 2
Datum: 09.05.2001
zwischen: AS Hamm-Uentrop und: AS Oelde (rechte Spur)
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle),
(liegengebliebenes Fahrzeug im Zulaufbereich der Arbeitsstelle)

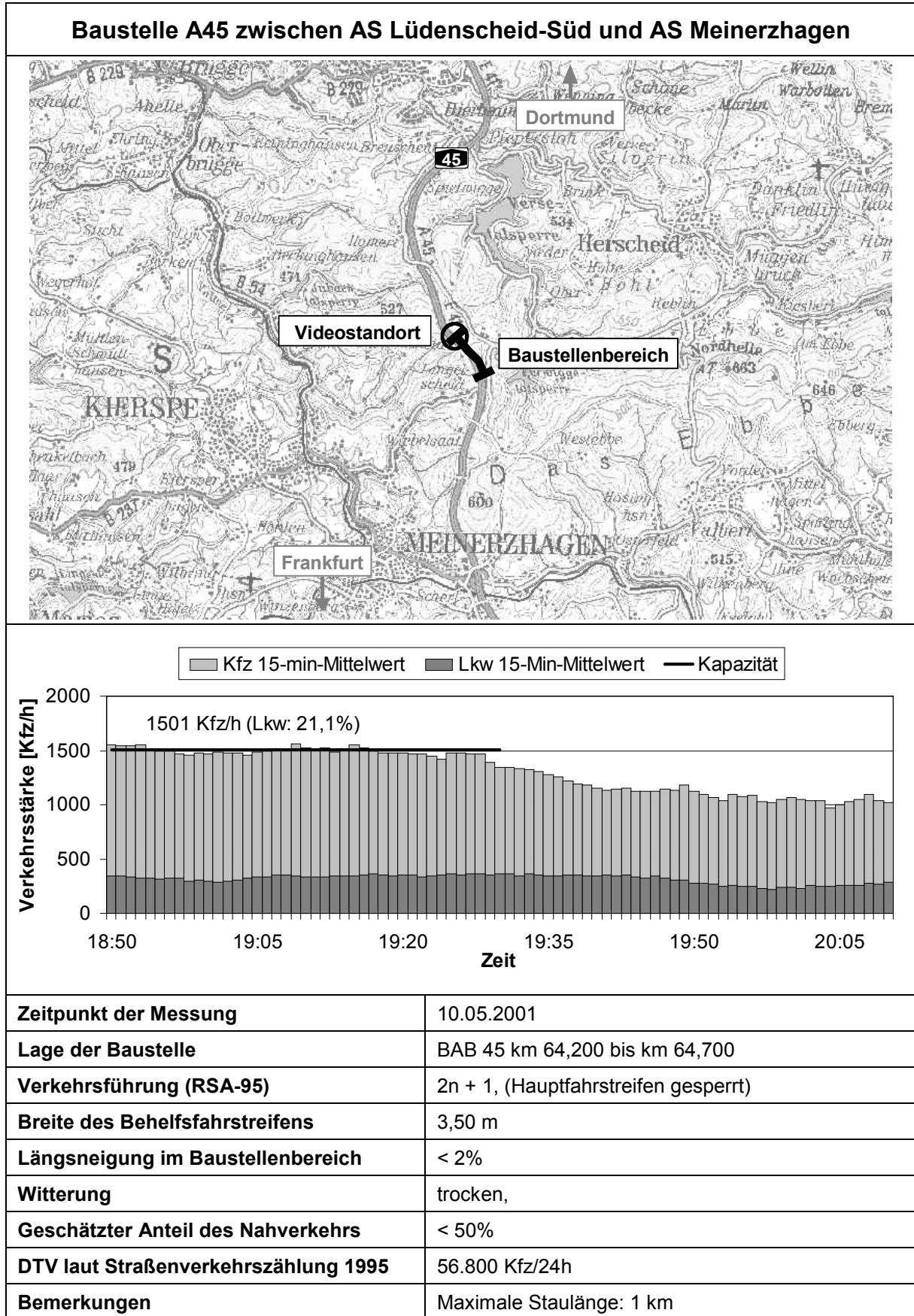
BAB 2
Uhrzeit: 20:27 Uhr
und: AS Oelde (rechte Spur)
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

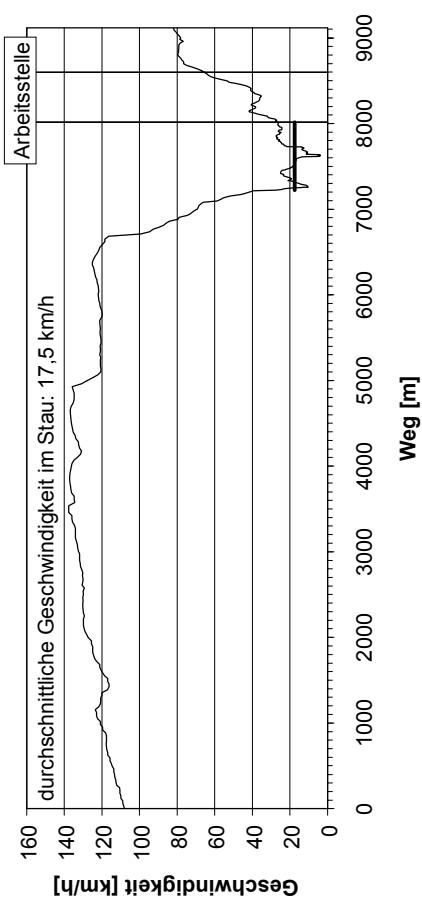
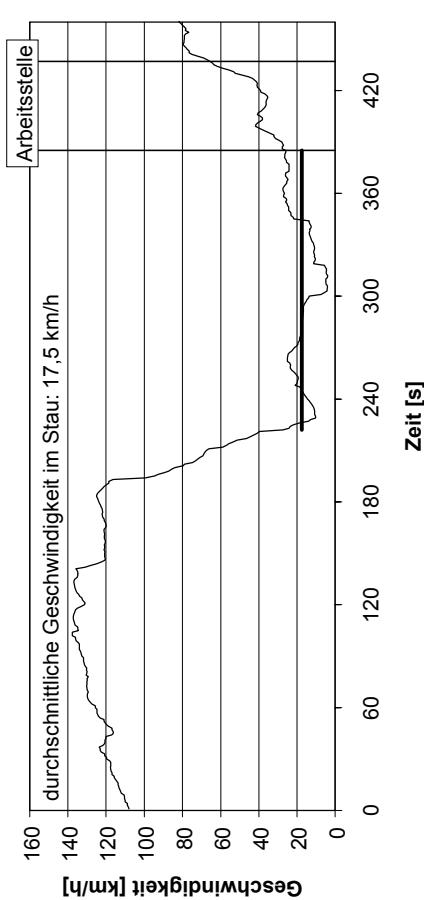
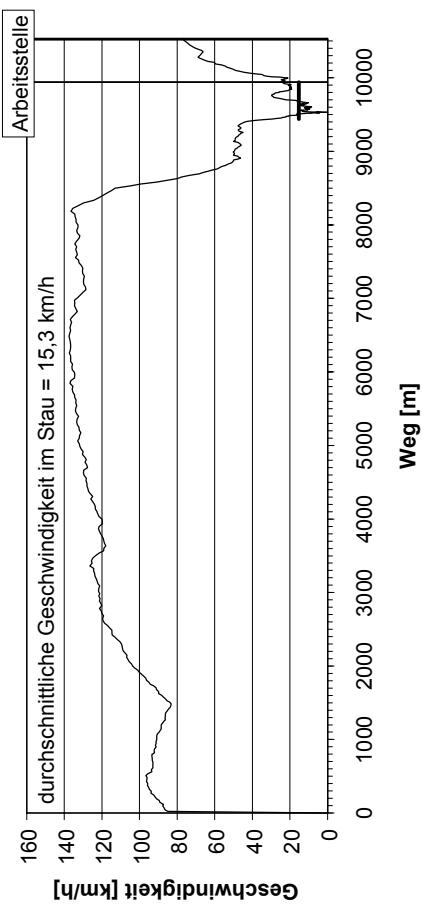
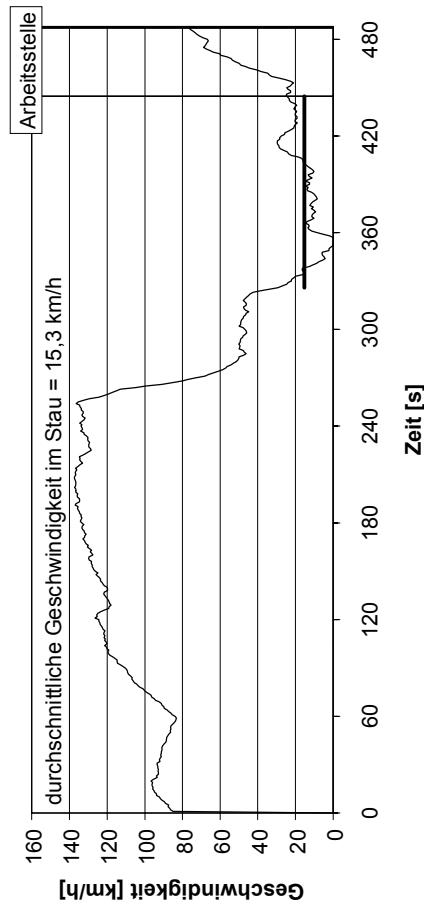
Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 2
Datum: 09.05.2001
Uhrzeit: 21:46Uhr
zwischen: AS Hamm-Uentrop und: AS Oelde (linke Spur)
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 2
Datum: 09.05.2001
Uhrzeit: 22:24Uhr
zwischen: AS Hamm-Uentrop und: AS Oelde (rechte Spur)
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)



Geschwindigkeitsprofil**Geschwindigkeitsganglinie****Geschwindigkeitsprofil****Geschwindigkeitsganglinie**

BAB 45

Datum: 10.05.2001
Uhrzeit: 18:45Uhr
zwischen: AS Lüdenscheid-Süd und: AS Meinerzhagen (linke Spur)
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

BAB 45

Datum: 10.05.2001
Uhrzeit: 19:02 Uhr
zwischen: AS Lüdenscheid-Süd und: AS Meinerzhagen (rechte Spur)
Verkehrsführung: 2n+1 (Tagesbaustelle)

Anlage 7: **Verfahren zur Ermittlung von Pkw-Äquivalenzwerten in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil und der Längsneigung**

A7-2 bis A7-3 Darstellung der Modellparameter zur Ermittlung des Äquivalenzwertes E

Die Berechnung des Äquivalenzwertes E erfolgt nach der Gleichung:

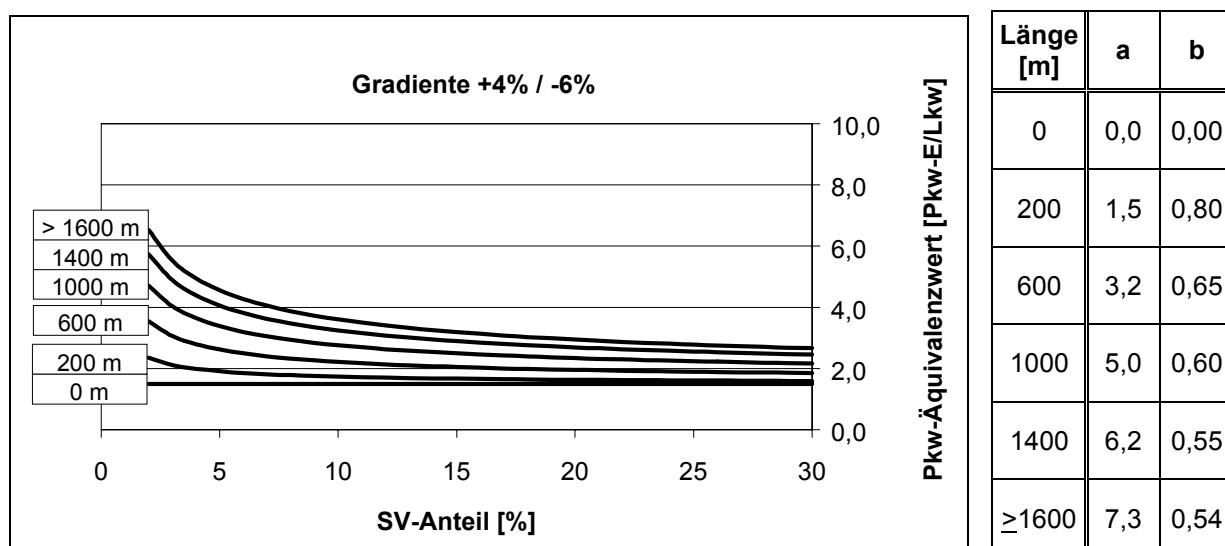
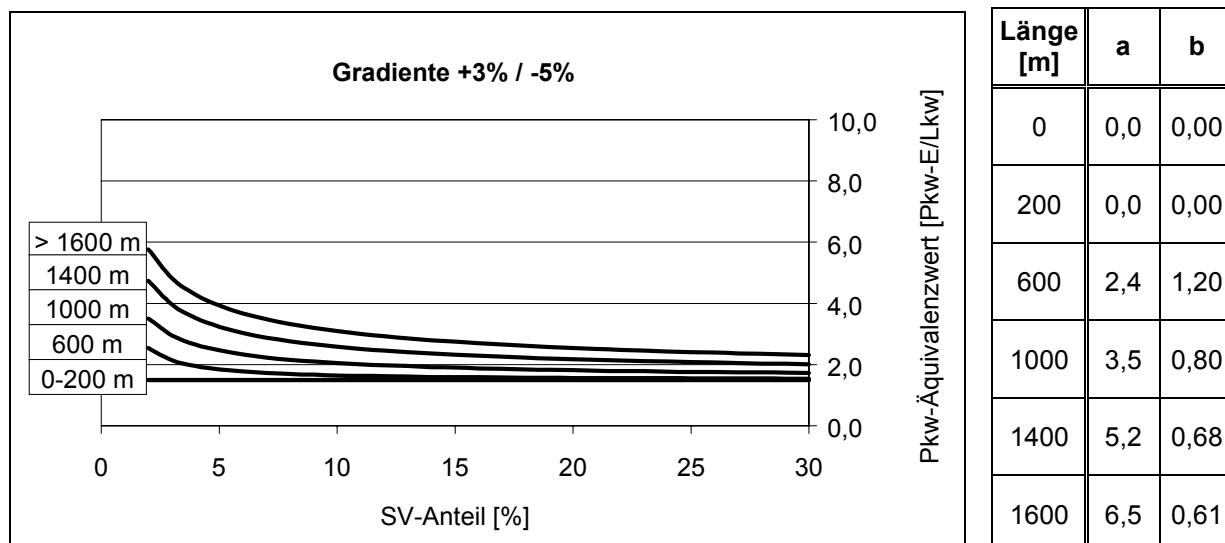
$$E = 1,5 + a \cdot SV^{-b}$$

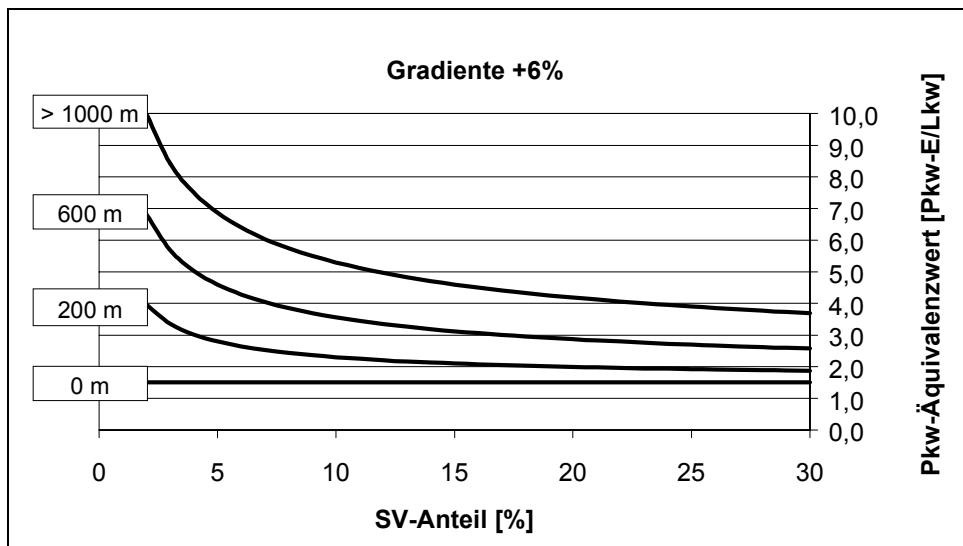
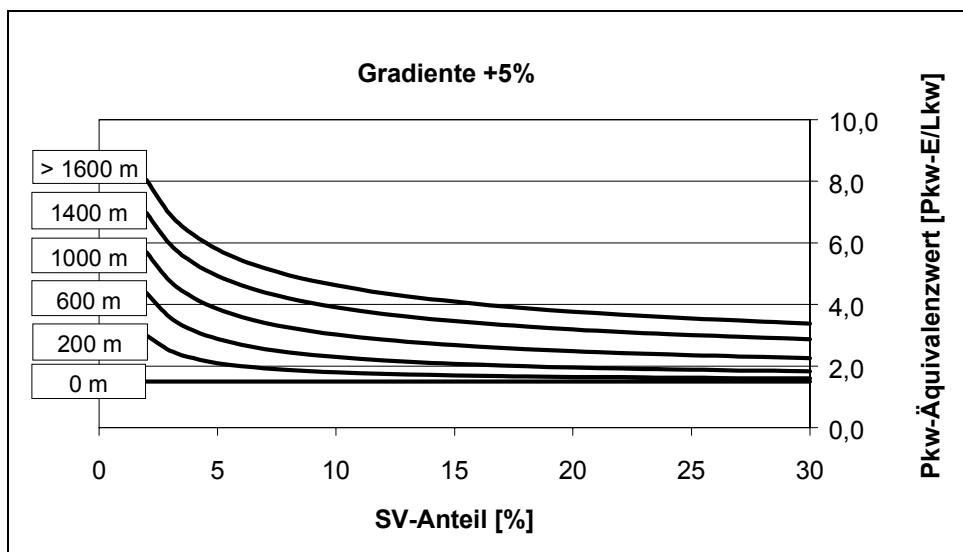
Mit:

E: Äquivalenzwert

a, b Modellparameter (siehe nachstehende Tabellen)

SV Schwerverkehrsanteil [%]





In der Schriftenreihe Verkehr bisher erschienene Hefte:

- 1 Köhler, Uwe:
Verkehrsplanung im Widerstreit der Meinungen, 1989
(vergriffen)
- 2 1. Kasseler Nahverkehrstage:
Der ÖPNV zwischen Stadt und Umland, 1990
(EUR 6,--)
- 3 2. Kasseler Nahverkehrstage:
Verknüpfungen von Fern- und Nahverkehr, 1992
(EUR 6,--)
- 4 Arndt, Karin:
Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung einer potentiellen
P+R-Nachfrage im Berufsverkehr, 1993
(EUR 9,--)
- 5 3. Kasseler Nahverkehrstage:
Stößt der öffentliche Verkehr an seine Grenzen?, 1994
(EUR 9,--)
- 6 4. Kasseler Nahverkehrstage:
Beiträge zum Stadt- und Regionalverkehr, 1996
(EUR 12,--)
- 7 Strauß, Susanne:
City-Logistik - Ein Instrument zur Verringerung des städtischen
Güterverkehrs, 1997
(vergriffen)
- 8 Klein, Angelika:
Die ÖPNV-Grundgebühr Ein Instrument zur zukunftsorientierten Gestaltung
und Finanzierung des öffentlichen Personennahverkehrs, 1998
(EUR 12,--)
- 9 5. Kasseler Nahverkehrstage:
Nahverkehrspläne - eine erste Bilanz, 1998
(EUR 12,--)
- 10 6. Kasseler Nahverkehrstage:
– 10 Jahre Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung, 2000
(EUR 15,--)
- 11 Klotz, Günter:
Bahnbau und Bürgerbeteiligung, 2002
(EUR 15,--)
- 12 7. Kasseler Nahverkehrstage:
Wettbewerb im öffentlichen Verkehr, 2002
(EUR 15,--)
- 13 Zöllner, Ralf:
Einsatzbereiche von Schienenregionalbahnen, 2002
(EUR 15,--)

- 14 Listl, Gerhard:
Anwendung neuer Technologien zur Erfassung des Verkehrsablaufs, 2003
(EUR 22,--; parallel online veröffentlicht unter:
http://www.upress.uni-kassel.de/abstracts_fr/3-89958-025-7.html)
- 15 Ober-Sundermeier, Anja:
Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognoze an Engpässen auf
Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen
(EUR 18,--; parallel online veröffentlicht unter:
http://www.upress.uni-kassel.de/abstracts_fr/3-89958-034-6.html)

Die Hefte 1 -13 sind zu bestellen über das Fachgebiet Verkehrssysteme und
Verkehrsplanung, Universität Kassel, 34109 Kassel
Fax Nr. (0561) 804-7382 E-mail: mabbutt@bauing.uni-kassel.de

Ab Heft 14 ist die Bestellung vorzunehmen über die kassel university press GmbH,
Diagonale 10, 34127 Kassel
Fax Nr. (0561) 804-3429 E-mail: geschaeftsfuhrung@upress.uni-kassel.de
Online-Bestellung über <http://www.upress.uni-kassel.de>