

PROGRAMMANLEITUNG

Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Institut für Verkehrswesen
Martin Hartmann

Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen
FE-Nr. 03.0461/2009/GGB „Wechselwirkungen zwischen Streckenabschnitten und
Knotenpunkten bei der Ermittlung von Fahrtgeschwindigkeiten“

2016

Programmversion 1.06-OSS

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	3
1.1 Übersicht	3
1.2 Software Anforderungen	3
2. Modellierung eines Netzabschnittes	5
2.1 Diskretisierung.....	5
2.2 Vorlauf	5
2.3 Setzung von Standardwerten	6
2.4 Segmentierung eines Netzabschnittes.....	6
2.5 Eingabe der Nachfrage.....	8
2.6 Parametrierung eines Netzabschnittes.....	9
3. Auswertung eines Netzabschnittes.....	11
3.1 Interpretation der 15-Min Auswertung	11
3.2 Graphische Ausgaben	14
4. Kalibrierung	15
Referenzen.....	16
Anhang: Liste der Variablen.....	17

1. Einführung

Dieses Dokument ist eine Programmanleitung zur Anwendung des Werkzeugs „Deutsches FREEVAL“, welches im Rahmen des von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsprojekts FE 03.0461/2009/GGB (Hartmann et al., 2019) vom Institut für Verkehrswesen am Karlsruhe Institut für Technologie entwickelt wurde. Das Projekt lehnt sich im gesamten Umfang an die letzte Fassung des deutschen Handbuchs für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) (FGSV, 2015) an. Ziel ist es, das im Handbuch dargestellte Regelwerk auch unter Berücksichtigung von den Richtlinien für Anlage von Autobahnen (RAA) (FGSV, 2008) und den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN) (FGSV, 2008) in einem Modell möglichst den Vorschriften nahe abzubilden, zu automatisieren und somit dem HBS-Anwender die Bewertung der Qualität des Verkehrsablaufs von Straßenverkehrsanlagen zu erleichtern.

Dieses Dokument ist folgendermaßen strukturiert: Kapitel 1 führt in die Problematik der Netzabschnittsbewertung auf deutschen Autobahnen ein, stellt die softwaretechnische Mindestanforderungen vor und diskutiert die Rahmenbedingungen der Anwendung. Kapitel 2 befasst sich mit der Modellierung eines Netzabschnittes aus der Benutzerperspektive, um mögliche fehlerhafte Eingaben bzw. nicht-konforme Modellierungsschritte zu vermeiden. Kapitel 3 diskutiert die Auswertung eines Netzabschnittes und befasst sich vor allem mit der richtigen Interpretation der Modellausgaben. Kapitel 4 befasst sich mit dem Thema der Kalibrierung eines Netzabschnittes. Schließlich wird eine Liste aller verwendeten Variablen im Modell dargestellt.

1.1 Übersicht

Das Programm „Deutsches FREEVAL“ dient der Analyse von Autobahnnetzabschnitten unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen überbelasteten Knotenpunkten und Strecken. Die Analyse lehnt sich an die HBS-Verfahren an und vereinigt die Methoden der Auswertung der Qualitätsstufen von Verkehrsabläufen (QSV) gemäß HBS-Kapitel A3 (Strecken), A4 (Knotenpunkte) und den Stufen des Angebotsqualität (SAQ) gemäß HBS-Kapitel A5 (Netzabschnitte). Um eine Analyse der übersättigten Netzelemente (Auslastungsgrad > 1.0) zu ermöglichen, führt das Modell eine deterministische Berechnung des Verkehrsflusses nach dem Prinzip des Cell Transmission Modells (CTM) durch. Eine ausführliche Beschreibung des Modellierungsansatzes ist in der Literatur zu finden (Daganzo, 1994, Hartmann, Vortisch, Schroeder, 2015, Hartmann et al. 2019).

Während das HBS die Bewertung in einer Bemessungsstunde betrachtet, kann der Netzabschnitt im Modell für bis zu 24 Stunden analysiert werden. Dies bedeutet vor allem, dass sich die zeitlichen und räumlichen Komponenten des Verkehrsflusses (vor allem Staupropagierung) im vollen Spektrum abbilden lassen und eine erweiterte Analyse des Netzabschnittes ermöglichen. Dieses Dokument hat das Ziel, die Rahmenbedingungen für die Modellanwendung zu definieren und eine korrekte Interpretation der Modellausgaben zu gewährleisten.

1.2 Software Anforderungen

Das Programm ist in zwei Teile gegliedert: der Berechnungskern und die Benutzerschnittstelle. Da der Berechnungskern in .NET Framework programmiert wurde, muss mindestens .NET 4.0 auf dem Rechner installiert sein. Die Installationsdatei ist zum Beispiel unter folgende http-Adresse zu finden:

<https://www.microsoft.com/de-de/download>. Die Benutzerschnittstelle ist in Microsoft Excel ausgeführt und für Excel 2010 (oder aktuellere Version) optimiert. Kompatibilität besteht auch mit der Excel Version 2007.

Um die Analyse erfolgreich durchzuführen, müssen beide Diskretisierungsdateien (.xslm Datei) und Executable (.exe Datei) im gleichen Arbeitsordner gespeichert werden. Der Arbeitsordner sollte nicht in einem Cloud-Ordner (OneDrive, Microsoft Office 365 etc.) angelegt werden, da hier bei unterschiedlichen Windows-Versionen der absolute Pfad nicht konsistent ist.

Da die Excel Schnittstelle teilweise durch Makros gesteuert ist, ist es notwendig, den Makros die Ausführung in Excel zu erlauben (Abbildung 1).

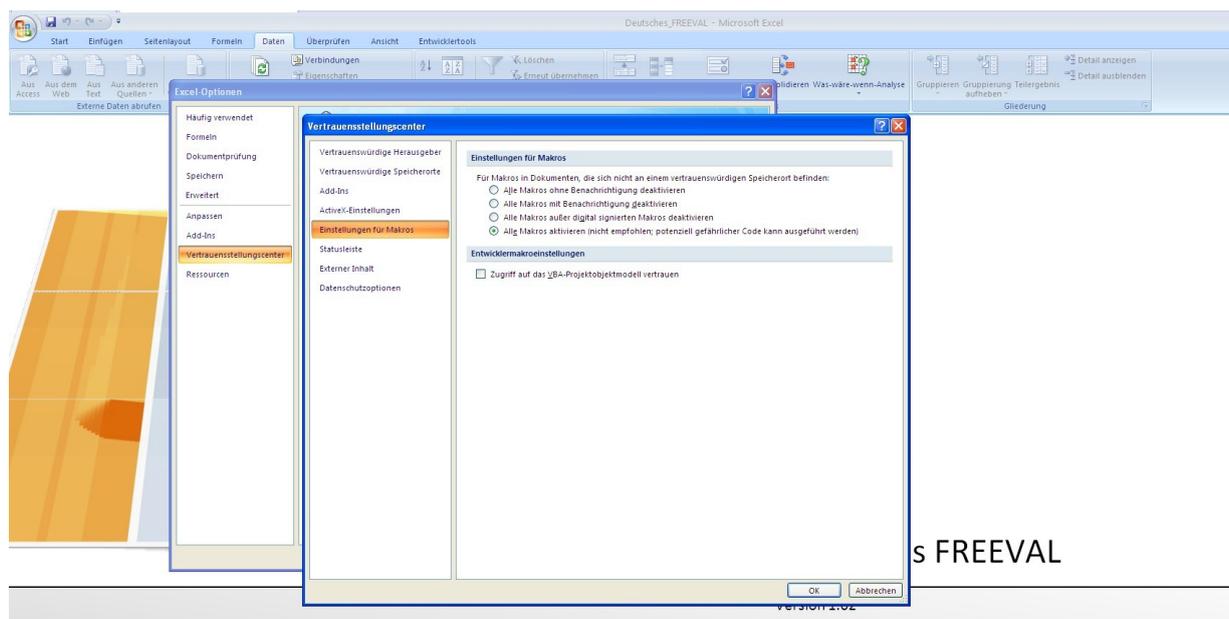
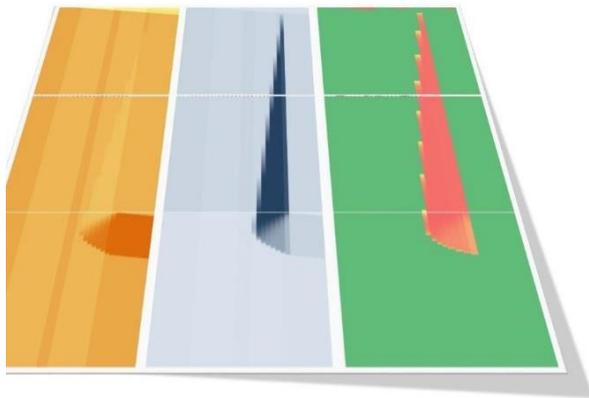


Abbildung 1: Makroeinstellungen in Excel 2007

Da die Diskretisierungsschritte die Modellumgebung unwiderruflich verändern, sollte nach dem Programmstart die neue Version unter einem neuen Namen gespeichert und eine Sicherheitskopie erstellt werden.

2. Modellierung eines Netzabschnittes

Methodischer Kern des Deutschen FREEVAL ist ein Verkehrsflussmodell, das den Auf- und Abbau von Rückstau in Überlastungssituationen und damit die verbundenen Fahrzeitverluste abbildet. Um dieses Verfahren zu beurteilen, muss erst ein Netzabschnitt definiert werden. Die Länge des Netzabschnittes ist theoretisch nicht begrenzt, da die Segmente eine beliebige Länge aufweisen können. Das Modell kann bis zu 24 15-Min-Zeitintervalle analysieren. Eine grundsätzliche Bedingung ist, dass die Übersättigung (Verkehrsdichte in einem Segment $>$ kritische Dichte) nicht an den Modellbeginn- und Modellendsegmenten auftritt.



Deutsches FREEVAL

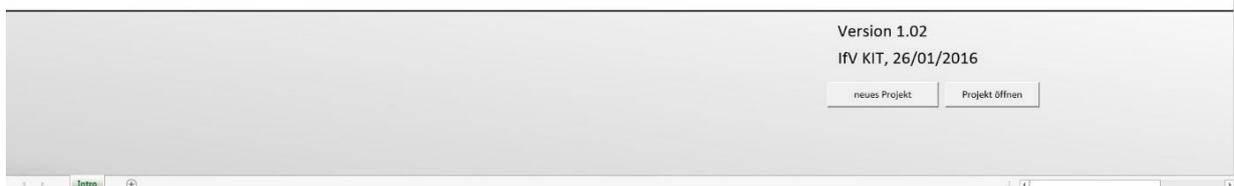


Abbildung 2: Intro

2.1 Diskretisierung

Die Analyse wird durch den Startzeitpunkt und den Endzeitpunkt bestimmt und wird in 15-Min-Zeitintervallen durchgeführt. Dabei ist eine Vorlaufperiode (Abschnitt 2.2) zu beachten. Die Anzahl der Segmente wird aus einem Lageplan oder einer Orthophotokarte mit Berücksichtigung des HBS-Verfahrens ermittelt. Abschnitt 2.4 fasst die Hinweise zur korrekten Segmentierung eines Netzabschnittes zusammen.

2.2 Vorlauf

Je nach Länge des Netzabschnitts ist eine Vorlaufperiode zu berücksichtigen, um einen ungesättigten Verkehrszustand vor der ersten ausgewerteten Zeitperiode zu etablieren. Die Länge der Vorlaufperiode richtet sich nach der Gesamtlänge des Netzabschnittes. Für je 30 km des Netzabschnittes sind eine 15 Min-Vorlaufperiode (Diskretisierung 15-Min-Nachfrageintervall) oder vier 15-Min-Vorlaufperioden (Diskretisierung 1-h-Nachfrageintervall) zu berücksichtigen. Um beispielsweise einen Netzabschnitt von 80 km zu modellieren, dürfen die erste drei Zeitperioden "t=1" bis "t=3" nicht ausgewertet werden, sondern müssen als Vorlaufperioden betrachtet werden. Falls das Nachfrageintervall als Stundenwert festgelegt ist, soll eine ganze Stunde ("t=1" bis "t=4") als Vorlaufperiode definiert werden.

Grundsätzlich wird empfohlen, eine Stunde vor und nach (jeweils vier 15-Min-Zeitintervalle) der geplanten Analysedauer als Puffer zu modellieren.

2.3 Setzung von Standardwerten

Im Eingabedialog sind mehrere Standardwerte einzustellen:

- Stauabfluss

Hier wird die Ausprägung des Fundamentaldiagramms bestimmt: Der Anwender kann die Standardwerte der Staudichte und des Capacity Drops durch bereits erhobenen empirischen Wert ersetzen.

- RAA 2008

Die Richtlinien für die Anlage von Autobahnstraßen (2008) unterscheiden zwischen mehreren Straßenkategorien und Entwurfsklassen. Um beispielsweise einem Netzabschnitt eine nicht zulässige Einfahrt zuzuordnen, ist die Eingabe von beiden Kategorien notwendig.

- Zuflussregelung

Soll eine Zuflussregelungsanlage (ZRA) im Netzabschnitt stattfinden, muss das Arbeitsblatt dementsprechend angepasst werden.

- Nachfrageintervall

Im HBS wird 1 Stunde als Standardintervall für die Bemessung definiert. Eine Eingabe der Nachfrage in 1-Stundenintervallen ist somit vorgegeben, eine 15-Min-Intervall-Eingabe ist hingegen optional. Die Ausgabe der Modellergebnisse erfolgt in 15-Min-Zeitintervallen, eine Mittelung der Ergebnisse in 1-Stundenintervallen ist nach Durchführung der Simulation jederzeit möglich.

2.4 Segmentierung eines Netzabschnittes

In dieser Programmeinleitung wird beispielsweise ein Netzabschnitt analysiert, der in der Morgenspitzenstunde (7:00 – 8:00) als übersättigt gilt. Um die zeitliche Ausprägung der Übersättigung abzubilden, wird die Analysedauer auf 4 Stunden gesetzt (6:00 – 10:00). Es ist zu beachten, dass das erste Zeitintervall nur als Vorlauf gilt und die Ergebnisse somit nicht zu verwenden sind. Die regelbasierte Segmentierung ist bei Hartmann et al. (2019) beschrieben.

The screenshot shows the 'Deutsches FREEVAL' configuration window. It is divided into several sections:

- DISKRETISIERUNG:** Startzeitpunkt (06:00), Endzeitpunkt (10:00), Anzahl Segmente (9).
- STAUABFLUSS:** Staudichte (135 [Kfz/km/FS]), Capacity Drop (7 [%]). A button 'STANDARDWERTE ÄNDERN' is present.
- RAA 2008:** Straßenkategorie (AS 0/1), Entwurfsklasse (EKA 1 A).
- ZUFLUSSREGELUNG:** (auf mindestens 1 Einfahrt) with radio buttons for 'ja' and 'nein' (selected).
- NACHFRAGEINTERVALL:** Radio buttons for 'Stunde' (selected) and '15-Min'.
- Benutzerinformationen:** Text input fields for Dateiname, Autor, Einrichtung, and Datum (dd.mm.yyyy).

Buttons 'OK' and 'Abbrechen' are located at the bottom of the window.

Abbildung 3: Beispiel einer Diskretisierung

Die räumliche Ausprägung des Netzabschnittes wird in diesem Beispiel als eine Folge von 9 Segmenten modelliert und ist in Abbildung 4 zu sehen:

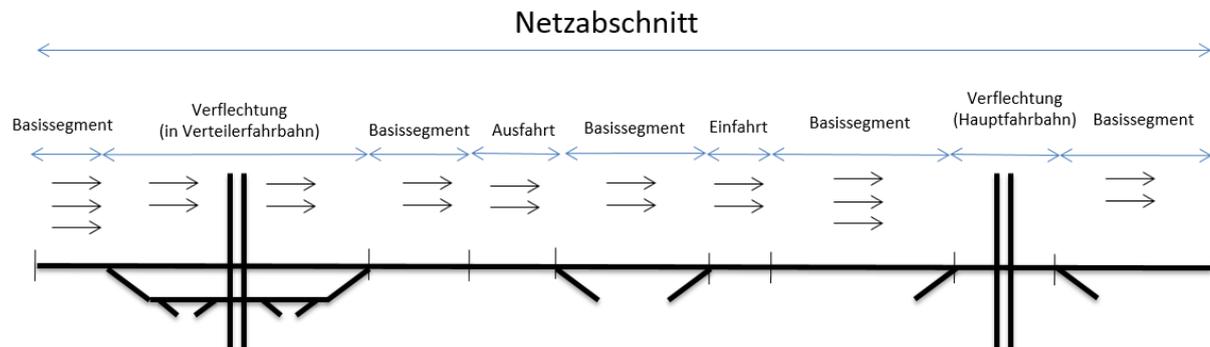


Abbildung 4: Diskretisierung eines Beispielnetzabschnittes

Grundsätzlich ist folgende Segmentierungsregelung zu folgen:

- **Einfahrt:** Bestimmt durch die Position der Trenninselspitze. Je nach Einfahrttyp beträgt die Segmentlänge nach den RAA 2008 von der Trenninselspitze **stromabwärts** entweder 250 m bzw. 500 m. In Einzelfällen kann diese Länge vom Anwender überschrieben werden.
- **Ausfahrt:** Bestimmt durch die Position der Trenninselspitze. Je nach Ausfahrttyp beträgt die Segmentlänge nach RAA 2008 von der Trenninselspitze **stromaufwärts** entweder 250 m oder 500 m. In Einzelfällen kann diese Länge vom Anwender überschrieben werden.
- Verflechtung:
 - **Verflechtung auf der durchgehenden Hauptfahrbahn:** Bestimmt durch die Position der beiden Trenninselspitzen (Einfahrt-Ausfahrt: Kleeblatt ohne Verteilerfahrbahn). Die Segmentlänge entspricht der Verflechtungslänge nach RAA 2008.
 - **Verflechtung in der Verteilerfahrbahn:** Bestimmt durch die Position der beiden Trenninselspitzen (Ausfahrt-Einfahrt: Kleeblatt mit Verteilerfahrbahn). Die Segmentlänge entspricht der Länge der Sequenz Ausfahrt-Strecke-Einfahrt. Die Verteilerfahrbahn wird als eine Sequenz von Strecke-Ausfahrt-Strecke-Verflechtung-Strecke-Einfahrt-Strecke modelliert und entspricht einem Kleeblatt mit zwei direkten und zwei indirekten Verbindungsrampen.
- **Basissegment:** Alle restliche Segmente, die nicht als Einfahrt, Ausfahrt bzw. Verflechtung definiert sind. Sobald es zu einer erheblichen Veränderung einer der Einflussgrößen nach Ziffer A3.3.1 (Definition der „Teilstrecke“ nach HBS-Kapitel A3) kommt, ist ein neues Basissegment zu definieren.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Basissegment	Verflechtung (Verteilerfb.)	Basissegment	Ausfahrt	Basissegment	Einfahrt	Basissegment	Verflechtung (Hauptfb.)	Basissegment

Abbildung 5: Deutsches FREEVAL: Segmentierung

2.5 Eingabe der Nachfrage

In nächstem Schritt wird die Nachfrage eingegeben. Es ist ein Stundenwert in Kfz/h für den Zufluss in den Netzabschnitt (Querschnitt auf der Hauptfahrbahn) und für jede Ein- und Ausfahrt (Querschnitt auf der Rampe) einzugeben. Falls die Nachfrage als 15-Min-Intervall eingegeben wird, muss die Nachfrage zuvor vom Nutzer auf die Einheit Kfz/h hochgerechnet werden. Eine Zuordnung der Nachfrage zu den Querschnitten in einem Beispielnetzabschnitt ist in Abbildung 6 visualisiert. Zusätzlich benötigt das Programm den Schwerverkehr als Prozentanteil in allen Querschnitten.

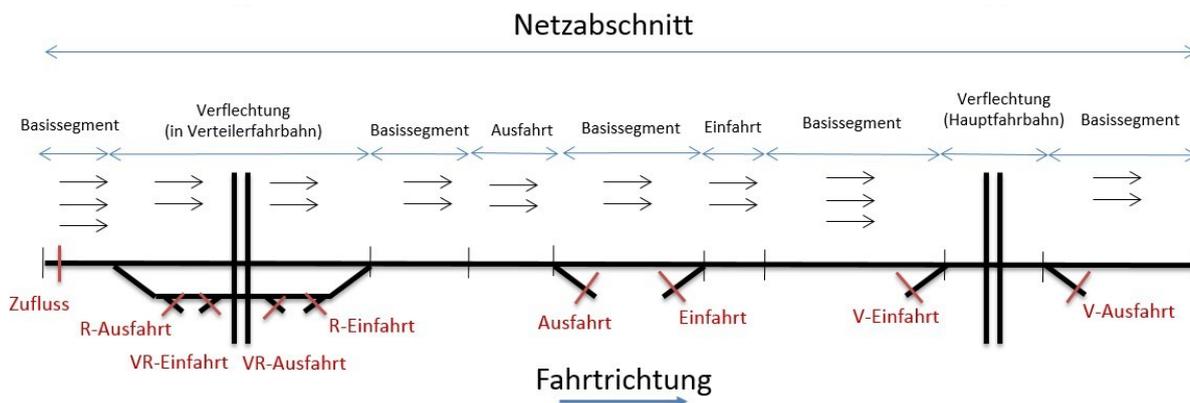


Abbildung 6: Zuordnung der Nachfrage zu Querschnitten

Verkehrsnachfrage [Kfz/h]		Segment 1		Segment 2			Segment 4	Segment 6	Segment 8	
1-Stundenintervall (Startzeitpunkt)	Zufluss	Ausfahrt	VR-Einfahrt	VR-Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	V-Einfahrt	V-Ausfahrt	
06:00:00	2000	100	150	200	250	300	250	200	150	
07:00:00	3200	120	150	220	200	300	450	180	160	
08:00:00	3000	140	190	240	290	340	190	160	170	
09:00:00	2200	160	210	260	310	360	160	140	180	

Schwerverkehrsanteil [%]		Segment 1		Segment 2			Segment 4	Segment 6	Segment 8	
1-Stundenintervall (Startzeitpunkt)	Zufluss	Ausfahrt	VR-Einfahrt	VR-Ausfahrt	Einfahrt	Ausfahrt	Einfahrt	V-Einfahrt	V-Ausfahrt	
06:00:00	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	
07:00:00	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	
08:00:00	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	
09:00:00	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	

Abbildung 7: Eingabe der Stundennachfrage und SV-Anteil im Beispielszenario

2.6 Parametrierung eines Netzabschnittes

In einem nächsten Schritt wird der Netzabschnitt nach HBS-Vorgaben parametrierung. Jedes Segment benötigt die Eingabe von folgenden Einflussgrößen:

- Segmentlänge
- Fahrstreifenanzahl
- Längsneigung
- Lage
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit
- (Kapazitätsfaktor)
- Knotenpunkttyp

Die Eingabe der Einflussgrößen ist auf eine diskrete, per Dropdown-Liste vorgegebene Menge begrenzt. Die Segmentlänge eines Basissegments ist vom Anwender einzugeben. Die

Segmentlänge im Knotenpunkt ist nach RAA-Vorgaben vorbelegt. Allerdings ist ein Überschreiben des Wertes möglich. Die HBS-Kapazität eines Segments wird anhand der Einflussgrößen bestimmt und ausgegeben. Abbildung 8 zeigt die Aufteilung der Benutzeroberfläche zwischen den Eingabebereichen „Hauptfahrbahn“, „Rampen“ und „Verteilerfahrbahn“. Da die Verflechtungssegmente eine zusätzliche Parametrierung benötigen, wird ein Dialog für die Eingabe der Segmentlänge erst zusammen mit dem Befehl „Analyse starten“ geöffnet (Abbildung 9 bzw. Abbildung 10).

Soll der Netzabschnitt mit einer SBA (Streckenbeeinflussungsanlage) gesteuert werden, muss die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf SBA gesetzt werden. Ebenso soll bei der Modellierung einer temporären Seitenfahstreifenfreigabe (TSF) das Tempolimit auf SBA eingestellt werden.

Farbkodierung:

- gelb - Eingabe erforderlich
- orange - Eingabe von einem anderen Blatt übernommen
- schwarze Schrift - Überschreibung des Wertes erlaubt (gilt nicht für schreibgeschützte Zellen)

Sobald der Netzabschnitt komplett parametrier ist, kann die Simulation mit dem Schalter „Analyse starten“ gestartet werden.

Analyse starten											
Hauptfahrbahn											
Hauptfahrbahn	Segmentnummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Segmenttyp	Basissegment	Verflechtung (Verteilerfb.)	Basissegment	Ausfahrt	Basissegment	Einfahrt	Basissegment	Verflechtung (Hauptfb.)	Basissegment	
Segmentbeschreibung											
	Segmentlänge L_s [m]	500		500	250	500	250	500		500	
	Fahstreifenanzahl n [-]	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	SV-Anteil $b_{SV,VA}$ [%]	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	
	Längsneigung s_i [%]	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%	
	Ballungsraum [-]	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	innerhalb	
	Nachfrage q_k [Kfz/h]	1000	700	1100	800	800	1050	1050	1250	1100	
	zulässige Höchstgeschw. v_{sw} [km/h]	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	ohne	
	Kapazitätsfaktor [-]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	HBS Kapazität [Kfz/h]	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	
	Knotenpunkt				A 1-2		E 1-2 / E 2-2				
Einfahrt	Nachfrage $q_{k,E}$ [Kfz/h]		400				250		200		
	Geschw. (Rampe) [km/h]		60				60		60		
	SV-Anteil $b_{SV,VA}$ [%]		10,0%				10,0%		10,0%		
	Kapazitätsfaktor KF [-]		1				1		1		
Ausfahrt	Nachfrage $q_{k,A}$ [Kfz/h]		300		300				150		
	Geschw. (Rampe) [km/h]		60		60				60		
	SV-Anteil $b_{SV,VA}$ [%]		10,0%		10,0%				10,0%		
	Kapazitätsfaktor [-]		1		1				1		
Rampen											
Verteilerfahrbahn	Segmentnummer	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7			
	Segmenttyp	Basissegment	Ausfahrt	Basissegment	Verflechtung	Basissegment	Einfahrt	Basissegment			
	Segmentbeschreibung										
	Nachfrage $q_{k,VA}$ [Kfz/h]	300	200	200	350	150	400	400			
SV-Anteil $b_{SV,VA}$ [%]	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%				
Kapazitätsfaktor [-]	1	1	1	1	1	1	1				
Einfahrt	Nachfrage $q_{k,VE}$ [Kfz/h]				150		250				
	SV-Anteil $b_{SV,VA}$ [%]				10,0%		10,0%				
	Kapazitätsfaktor [-]				1		1				
Ausfahrt	Nachfrage $q_{k,VA}$ [Kfz/h]		100		200						
	SV-Anteil $b_{SV,VA}$ [%]		10,0%		10,0%						
	Kapazitätsfaktor [-]		1		1						
Verteilerfahrbahn											

Abbildung 8: Parametrierung eines Netzabschnittes

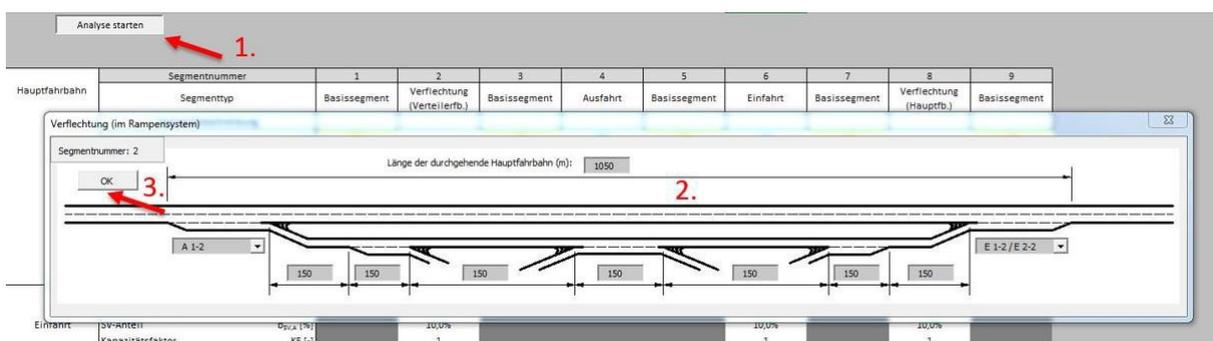


Abbildung 9: Parametrierung eines Verflechtungsbereichs im Segment 2 (Verteilerfahrbahn)

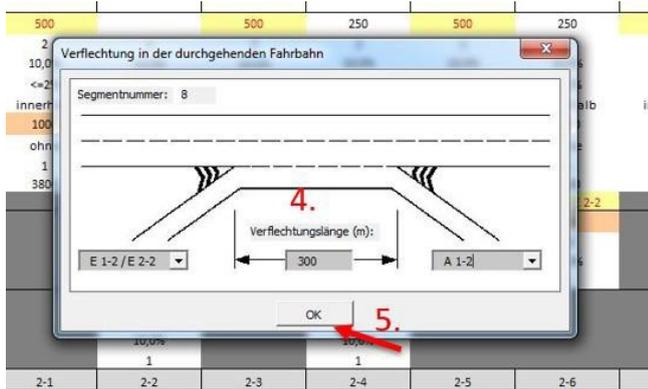


Abbildung 10: Parametrierung eines Verflechtungsbereichs im Segment 8 (Hauptfahrbahn)

3. Auswertung eines Netzabschnittes

Nach einer erfolgreichen Berechnung werden Ausgabeblätter eingblendet und farbkodiert (Abbildung 11). Das Modell gibt die Ergebnisse in 15-Minuten-Intervallen aus, um eine detaillierte Auswertung des Netzabschnittes zu ermöglichen. Die Farbkodierung der jeweiligen Zeitperioden basiert auf Ergebnissen der SAQ-Berechnung anhand der HBS-Definition: Farbstufen grün (SAQ A) bis dunkel rot (SAQ F). Die Vorlaufperiode „t=1“ ist nicht auszuwerten und ist somit in weiß dargestellt.

Es werden zusätzlich folgende Arbeitsblätter ausgegeben:

- Zusammenfassung – Aggregierte Ergebnisse über die gesamte Analysedauer
- K – Konturplot der Verkehrsdichte
- V – Konturplot der Geschwindigkeit
- Q – Konturplot der Verkehrsstärke
- QSV – Konturplot der Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs
- V-Diagramm – 3D-Oberfläche Diagramm der Geschwindigkeit

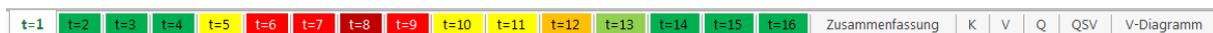


Abbildung 11: Die Ausgabe-Leiste

3.1 Interpretation der 15-Min Auswertung

- HBS- vs. Modellkapazität

Die Ergebnisse der Simulation sind grundsätzlich an die HBS-Methodik angelehnt. Aufgrund der modelltechnischen Eigenschaften des Werkzeuges sind die Modellausgaben mit Sorgfalt zu interpretieren.

Zuerst gibt das Modell auf der Hauptfahrbahn zwei Kapazitäten aus: Die aus der Eingabe abgeleitete HBS-Kapazität (HBS-Tabellen A3-1 und A3-3) und die Modellkapazität, die aufgrund mehrerer Einflussfaktoren von der HBS-Kapazität abweichen kann. Diese Einflussfaktoren werden repräsentiert durch:

- Kapazitätsfaktor (Benutzereingabe)
- Capacity Drop (Benutzereingabe)
- Interpolierung der HBS-Kapazität für jeweilige SV-Anteile (Tabellen A3-2, A3-3)
- Aufteilung der Kapazität im Knotenpunkt anhand der Belastungsdiagrammen in HBS Kapitel A4

Der Auslastungsgrad (d.h. Nachfrage/Kapazität) sowie das Verhältnis zwischen der Verkehrsstärke und der Kapazität werden anhand der Modellkapazität berechnet. Weil der Capacity Drop kein Bestandteil des HBS ist, weist die resultierende QSV-Bewertung einen modell-orientierten Charakter aus.

- Differenz zwischen Nachfrage und Verkehrsstärke

		Segmentnummer	1	2
		Segmenttyp	Basissegment	Verflechtung (Verteilerfb.)
		Segmentbeschreibung		
Hauptfahrbahn	Segmentlänge	L_M [m]	500	1050
	Fahrstreifenanzahl	n [-]	2	2
	freie Geschw.	v_{FREI} [km/h]	129,0	129,0
	mittlere Geschw.	v_F [km/h]	106,2	112,2
	Verkehrsdichte	k [Kfz/km/ln]	11,6	10,2
	HBS Kapazität	C_M [Kfz/h]	3800	3800
	Modellkapazität	$C_{M,M}$ [Kfz/h]	3800	3636
	Nachfrage	q_N [Kfz/h]	3000	2620
	Verkehrsstärke	q_M [Kfz/h]	2995	2612
	Auslastungsgrad (q_N/C_M)	x [-]	0,79	0,69
Verkehrsstärke/Kapazität (q_M/C_M)	[-]	0,79	0,69	

Abbildung 12: Differenz zwischen Nachfrage und Verkehrsstärke

Das Modell wird in einem sehr feinen Grad (1 Sekunde Zeitschritt, ca. 30 m Zellenlänge) diskretisiert, um die Realität so gut wie möglich abzubilden. Die Vorteile dieser Auflösung sind beispielsweise die genaue Verortung des Engpasses, sowie die zeitliche und räumliche Ausbreitung von Stoßwellen. Um die Informationsmenge für den Benutzer auf das Notwendigste zu beschränken, werden die Ausgaben in 15-Minuten Intervallen aggregiert. Durch die Propagierung von Stoßwellen können die aggregierten Ergebnisse eines fixen 15-Minuten Zeitfensters innerhalb eines Segments von den Eingabegrößen aus der Theorie abweichen. Das Prinzip ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt: Die Verkehrsstärke wird als **mittlere Verkehrsstärke** über ein Segment und 15-Minuten ausgegeben und kann somit Residuen der Verkehrsstärke der angrenzenden Nachfrageintervalle (ungesättigter Verkehrszustand, Abbildung 13: Bereich oberhalb der Stoßwelle „v_frei“) bzw. die Auswirkungen eines Engpasses (übersättigter Verkehrszustand, Abbildung 14: Überhang der Nachfrage während der Stauabbau) enthalten. Die Ausgabe einer maximalen oder mittleren Verkehrsstärke innerhalb einer Zelle (statt Segment) ist nicht sinnvoll, weil dies mit einem Informationsverlust verbunden wäre.

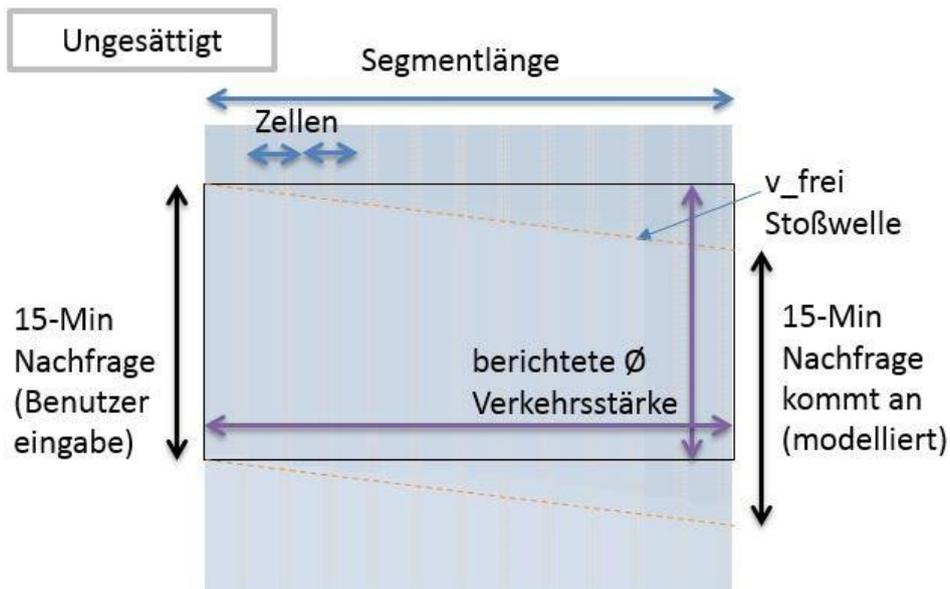


Abbildung 13: Propagierung einer Stoßwelle in einem ungesättigten Verkehrszustand

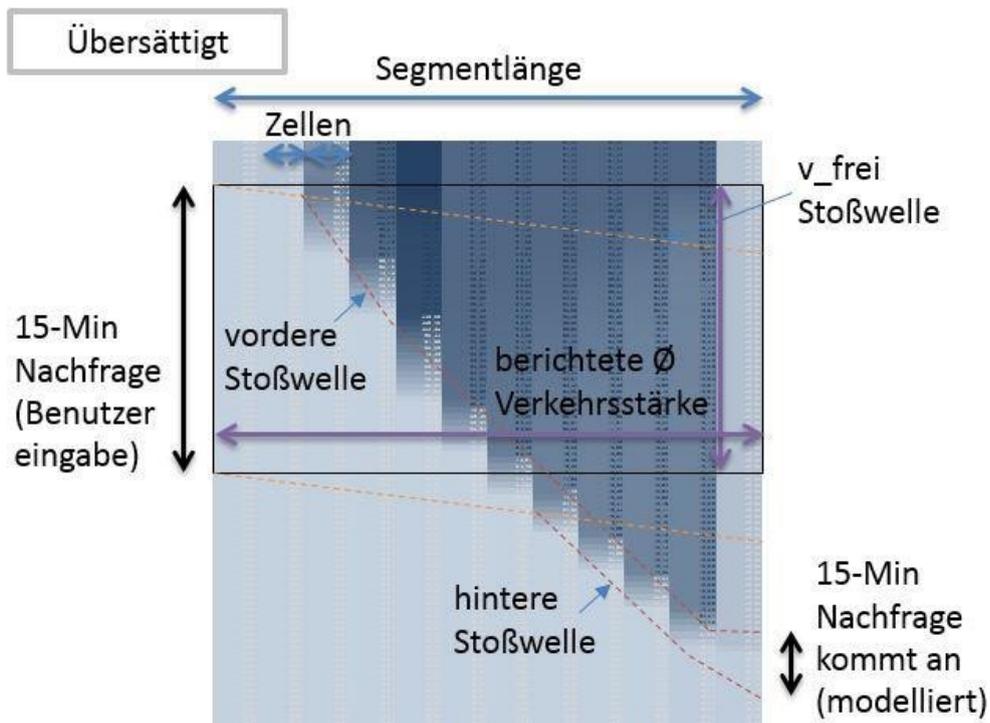


Abbildung 14: Propagierung einer Stoßwelle in einem übersättigten Verkehrszustand

- Arbeitsblatt „Zusammenfassung“

Dieses Arbeitsblatt gibt die relevanten Kenngrößen aus, die über die gesamte Analysedauer für das jeweilige Segment aggregiert (gemittelt bzw. summiert) wurden. Diese Ansicht hilft dabei, die am höchsten ausgelasteten Segmente (maximaler Auslastungsgrad, mittlere Verkehrsstärke/Kapazität Verhältnis) oder baulichen Engpässe (mittlere QSV) zu identifizieren.

3.2 Graphische Ausgaben

Die Modellausgabe beinhaltet die Konturdiagramme der Verkehrsdichte, Geschwindigkeit und Verkehrsstärke und eignet sich für eine genaue Nachvollziehung der Dynamik des Verkehrsflusses. Die resultierende Auswertung der QSV basierend auf dem Auslastungsgrad findet im Arbeitsblatt „QSV“ statt. Zusätzlich wird eine drehbare 3D-Oberfläche ausgegeben, welche die mittlere Kfz-Geschwindigkeit innerhalb des Netzabschnittes visualisiert.



Abbildung 15: Graphische Modellausgabe

Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs (basiert auf Auslastungsgrad)									
15-Minuten Intervall (Startzeitpunkt)	Segment								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
06:00:00	B	B	C	B	B	C	B	C	C
06:15:00	B	C	C	B	B	C	B	C	C
06:30:00	B	C	C	B	B	C	B	C	C
06:45:00	B	C	C	B	B	C	B	C	C
07:00:00	D	D	D	D	D	F	D	E	D
07:15:00	D	E	D	D	D	F	D	E	D
07:30:00	D	E	D	D	D	F	D	E	D
07:45:00	D	E	D	D	D	F	D	E	D
08:00:00	D	E	D	D	C	D	D	D	D
08:15:00	D	D	D	D	C	D	D	D	D
08:30:00	D	D	D	D	C	D	D	D	D
08:45:00	D	D	D	D	C	D	D	D	D
09:00:00	C	D	C	C	B	C	C	C	B
09:15:00	C	C	C	C	B	C	C	C	B
09:30:00	C	C	C	C	B	C	C	C	B
09:45:00	C	C	C	C	B	C	C	C	B

Abbildung 16: QSV Bewertung

4. Kalibrierung

Um die Kalibrierung bzw. Änderung von gewünschten Parameter durchzuführen, müssen bestimmte Zeilen aus- bzw. eingblendet werden (Schaltfläche „Nachbearbeitung“ im Arbeitsblatt „t=1“).

Nachbearbeitung											
Segmentnummer	Segment									SUMME	
	Segmenttyp	Basissegment	Verflechtung (Verteilerfb.)	Basissegment	Ausfahrt	Basissegment	Einfahrt	Basissegment	Verflechtung (Hauptfb.)		Basissegment
Segmentbeschreibung											
Segmentlänge	L_s [m]	500	1050	500	250	500	250	500	300	500	4350
Fahrstreifenanzahl	n [-]	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
freie Geschw.	v_{fH8} [km/h]	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	129,0	
mittlere Geschw.	v_m [km/h]	125,3	126,6	125,0	126,3	126,4	125,3	125,4	124,5	125,2	
Verkehrsdichte	k [Kfz/km/h]	3,8	2,7	4,1	3,1	2,9	3,8	3,8	4,5	3,9	
HS Kapazität	C_{sH} [Kfz/h]	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	3800	
Modellkapazität	C_{sM} [Kfz/h]	3800	3636	3800	3636	3800	3636	3800	3636	3800	
Nachfrage	q_s [Kfz/h]	1000	700	1100	800	800	1050	1050	1250	1100	

Abbildung 17:

Die Kalibrierung besteht grundsätzlich aus drei Teilen:

1. Änderung der Nachfrage und des SV-Anteils (Schaltfläche „Nachfrage bearbeiten“)
2. Anpassung des Standard-Fundamentaldiagramms und des Capacity Drops (Schaltfläche „Standardwerte ändern“)
3. Bearbeitung der Einflussgrößen im Netzabschnitt

		Analyse starten	Nachfrage bearbeiten		Standartwerte ändern		
		Segmentnummer	1	2	3	4	5
Hauptfahrbahn	Segmenttyp	Basissegment		Verflechtung Verteilerfb.)	Basissegment	Ausfahrt	Basissegment
	Segmentbeschreibung						
	Segmentlänge	L_i [m]	500	1050	500	250	500
	Fahrstreifenanzahl	n [-]	2	2	2	2	2
	SV-Anteil	$b_{SV,i}$ [%]	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%	10,0%
	Längsneigung	s_i [%]	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%	<=2%

Hier ist es möglich, den Kapazitätsfaktor zu ändern und somit die Kapazität um einen gegebenen Bruchteil (0 – 1.0) zu reduzieren. Dies dient der schnellen Auswertung von Wassäre-Wenn-Szenarien (Baustelle, Fahrstreifenspernung, Gewitter etc). Nach einem Kalibrierungsschritt kann die Simulation erneut gestartet und ausgewertet werden.

5. Referenzen

Daganzo, C. F. (1994). The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory. *Transportation Research Part B*, Vol. 28, No. 4, S. 269–287.

FGSV (2008). Richtlinie für die Anlage von Autobahnen (RAA). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

FGSV (2008). Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

FGSV (2015). Handbuch für Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

Hartmann, M., Vortisch, P. (2016). A rationale for enhancing the German Highway Capacity Manual to incorporate oversaturated freeway facility analysis. *Transportation Research Procedia*, Band 15, S. 426-437.

Hartmann, M., Vortisch, P., Schroeder, B. (Januar 2015). A German Approach to Freeway Facility Evaluation. *Washington D.C.: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* Vol. 2483, pp. 66-73, abgerufen von: <http://dx.doi.org/10.3141/2483-08>.

Hartmann, M., Vortisch, P., Vieten, M., Chatzipanagiotidou, Y., Haug, A., Spangler, M. (2019). Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten. *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 314*, Bergisch Gladbach.

6. Anhang: Liste der Variablen

Variablenname	Abkürzung	Einheit	Variabletyp
Anzahl Segmente	NS	-	Global
Anzahl Zeitperioden	TP	-	Global
Staudichte	KJ	Kfz/km/FS	Global
Kritische Dichte	KC	Kfz/km/FS	Global
Verkehrsdichte	K	Kfz/km/FS	Segment
Capacity Drop	CD	%	Global
Segmentlänge	L _H	m	Segment
Fahstreifenanzahl	n	-	Segment
Schwerverkehrsanteil (Hauptfahrbahn)	b _{SV,H}	%	Segment
Schwerverkehrsanteil (Einfahrt)	b _{SV,E}	%	Segment
Schwerverkehrsanteil (Ausfahrt)	b _{SV,A}	%	Segment
Längsneigung	S _i	%	Segment
Nachfrage (Hauptfahrbahn)	q _N	Kfz/h	Segment
Nachfrage (Einfahrt)	q _{N,E}	Kfz/h	Segment
Nachfrage (Ausfahrt)	q _{N,A}	Kfz/h	Segment
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	v _{ZUL}	Km/h	Segment
Freie Geschwindigkeit (Hauptfahrbahn)	v _{FREI}	Km/h	Segment
Freie Geschwindigkeit (Einfahrtsrampe)	v _{FREI,E}	Km/h	Segment
Freie Geschwindigkeit (Ausfahrtsrampe)	v _{FREI,A}	Km/h	Segment
Mittlere Geschwindigkeit	v _F	Km/h	Segment
Verkehrsstärke (Hauptfahrbahn)	q _H	Kfz/h	Segment
HBS-Kapazität (Hauptfahrbahn)	C _{H,HBS}	Kfz/h	Segment
Modellkapazität (Hauptfahrbahn)	C _{MOD}	Kfz/h	Segment
HBS-Kapazität (Einfahrt)	C _{E,HBS}	Kfz/h	Segment
HBS-Kapazität (Ausfahrt)	C _{A,HBS}	Kfz/h	Segment
Kapazitätsfaktor (Hauptfahrbahn)	KF _H	-	Segment
Kapazitätsfaktor (Einfahrt)	KF _E	-	Segment
Kapazitätsfaktor (Ausfahrt)	KF _A	-	Segment
Zuflussregelung	ZR	Kfz/h	Segment
Auslastungsgrad	x	-	Segment
Verkehrsstärke/Kapazität	q _H /C	-	Segment
Warteschlange	N _W	Kfz	Segment
Verlustzeit (Rampe)	v _{lz}	Kfz·h	Segment
Fahrtzeit mit freien Geschwindigkeit	TT _{FREI}	min	Segment
Fahrtzeit berechnet	TT _{FREI}	min	Segment
Fahrtgeschwindigkeitsindex	I _{VF}	-	Netzabschnitt
Qualitätsstufe des Verkehrsablaufs	QSV	-	Segment
Stufe der Angebotsqualität	SAQ _N	-	Netzabschnitt