



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Knoten in makroskopischen Verkehrsmodellen

**Modélisation de croisements dans des modèles
macroscopiques de transport**

Modelling of intersections in macroscopic transport models

TransOptima GmbH
Claude Weis
Milenko Vrtic

RappTrans AG
Anne-Kathrin Bodenbender
Florian Harder
Raffael Fischer
Yves Gasser

Rudolf Keller & Partner AG
Johannes Liesch
Thomas Lehmann
Daniel Bärlocher

**Forschungsprojekt SVI 2017/007 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)**

November 2020

1695

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Knoten in makroskopischen Verkehrsmodellen

**Modélisation de croisements dans des modèles
macroscopiques de transport**

**Modelling of intersections in macroscopic transport
models**

TransOptima GmbH
Claude Weis
Milenko Vrtic

RappTrans AG
Anne-Kathrin Bodenbender
Florian Harder
Raffael Fischer
Yves Gasser

Rudolf Keller & Partner AG
Johannes Liesch
Thomas Lehmann
Daniel Bärlocher

**Forschungsprojekt SVI 2017/007 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Claude Weis, TransOptima GmbH

Mitglieder

Dr. Milenko Vrtic, TransOptima GmbH

Anne-Kathrin Bodenbender, RappTrans AG

Dr. Florian Harden, RappTrans AG

Raffael Fischer, RappTrans AG

Yves Gasser, RappTrans AG

Johannes Liesch, Rudolf Keller & Partner AG

Thomas Lehmann, Rudolf Keller & Partner AG

Daniel Bärlocher, Rudolf Keller & Partner AG

Begleitkommission

Präsident

Marco Richner, Gruner AG

Mitglieder

Cécile Baumeler, Viaplan AG

Maik Hömke, Bundesamt für Strassen (ASTRA) (ab 09/2019)

René Huber, Tiefbauamt (TBA), Stadt Zürich

Christian Hürlimann, Amt für Verkehr (AfV), Kanton Zürich

Andreas Justen, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Martin Tinguely, Bundesamt für Strassen (ASTRA) (bis 03/2019)

Paul Widmer, büro widmer AG

Antragsteller

Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung und Ziele	13
1.1 Einleitung.....	13
1.2 Stand der Forschung und Forschungsbedarf	14
1.3 Ziele der Forschungsarbeit	16
2 CR-Funktionen	17
2.1 Funktionsansätze	18
2.1.1 Logistische Funktion	18
2.1.2 Sigmoidale Funktion.....	19
2.2 Herleitung aus Messdaten	21
3 Schaffung der Grundlagen	23
3.1 Datensammlung und -bereitstellung	23
3.2 Festlegung der Knoten- und Abbiegertypisierung.....	27
3.3 Übersicht über die ausgewerteten Knoten.....	28
3.4 Datenaufbereitung.....	29
3.4.1 Aggregation der Rohdaten	29
3.4.2 Ermittlung von Kennwerten	29
4 Schätzung der CR-Funktionen	31
4.1 Datenlage	31
4.2 Kalibration der Parameter	31
4.3 Ergebnisse: Parameter und Modellgüten.....	32
4.4 Ergebnisse: Verläufe der CR-Funktionen	33
5 Validierung der CR-Funktionen	37
5.1 Umsetzung in Verkehrsmodellen	37
5.1.1 Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM ZH).....	37
5.1.2 Gesamtverkehrsmodell des Kantons Aargau (GVM AG)	37
5.1.3 Vorgehen.....	37
5.2 Vergleichsdaten	39
5.2.1 Reisezeitenmonitoring Kanton Zürich	39
5.2.2 Reisezeitmessungen Kanton Aargau.....	41
5.3 Modelltests	43
5.4 Ergebnisse	44
5.4.1 Kanton Zürich.....	44
5.4.2 Kanton Aargau	50
5.4.3 Zusammenfassung.....	55
5.5 Exkurs: Abbildung von Knotenwiderständen in <i>TransCAD</i>	56
6 Fazit und Empfehlungen	59
Anhänge	61
Glossar	89
Literaturverzeichnis	90
Projektabschluss	93

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	96
SVI Publikationsliste.....	97

Zusammenfassung

Makroskopische Verkehrsmodelle sind in der Schweiz seit vielen Jahren als Instrument für die Beantwortung und Unterstützung vielfältiger Fragestellungen im Einsatz. Der Hauptanwendungsbereich dieser Modelle liegt in der strategischen Verkehrsplanung, also auf der Untersuchung grossräumig wirkender Massnahmen (Stufe Kanton, Bund). Mit den in letzter Zeit immer häufiger aufkommenden Anforderungen an kleinräumiger werdende Anwendungsfelder für die Modelle steigt jedoch auch der Bedarf nach verbesserten Methoden zur Abbildung der Verkehrsströme auf dieser Auflösungsstufe. Im Gegensatz zu grossräumigen Betrachtungen spielen hier Knoten eine immer zentralere Rolle. Immer häufiger wird erwartet, dass die makroskopischen Modelle valide Knotenstrombelastungen als Ergebnisse, z.B. für Kapazitätsanalysen oder die Weiterverwendung in Mikrosimulationen, liefern.

Hauptaufgabe der vorliegenden Forschungsarbeit war es, die Lücke der fehlenden empirischen Abstützung der Knotenwiderstände in den Modellen so weit wie möglich zu schliessen. Es wird damit möglich, aufbauend auf eine festzulegende Knotentypisierung Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärken am Knoten und den benötigten Zeiten je Abbieger (und abhängig von deren Priorisierung) zu treffen. Das dafür zu verwendende Instrument sind die sogenannten *Capacity-Restraint*-(CR)-Funktionen.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden nach Knoten- und Abbiegertypen differenzierte CR-Funktionstypen und deren aus statistischen Schätzungen hervorgehende Parametrisierung für die Abbildung von Knotenwiderständen in makroskopischen Verkehrsmodellen abgeleitet. Die Funktionen mit den kalibrierten Parametern dienen als Grundlagen für Reisezeitberechnungen in Verkehrsmodellen.

In der Praxis werden zwei CR-Funktionstypen spezifisch für die Widerstandsberechnung an Knoten eingesetzt:

- Die logistische CR-Funktion bildet den Verlauf der Auslastungs-Zeit-Kurve anhand folgender Gleichung ab:

$$t = t_0 + \frac{a}{1 + f \cdot e^{(b+d \cdot sat)}}$$

- Die sigmoidale CR-Funktion ist wie folgt gegeben:

$$t = t_0 + \frac{d \cdot sat^f}{b + sat^f}$$

mit: t Durchfahrzeit für belasteten Knoten / Abbieger
 t_0 Durchfahrzeit für unbelasteten Knoten / Abbieger
 sat Auslastung des Knotens / Abbiegers (Verhältnis Belastung / Kapazität)
 a, b, d, f Parameter der CR-Funktion

Für sämtliche betrachteten Knoten- und Abbiegertypen konnten statistisch signifikante Schätzungen der Modellparameter durchgeführt werden.

Die Schätzungen führen zu einer im Vergleich zu den bisher verwendeten Werten korrekteren Abbildung der für das Zurücklegen einer Route benötigten Reisezeiten in den Verkehrsmodellen und bewirken somit auch eine präzisere Modellierung des Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahlverhaltens (in welche die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf Veränderungen der Fahrtzeiten einfließt). Von dieser genaueren Abbildung der Fahrtzeiten profitiert auch die Kosten-Nutzen-Analyse, sowohl hinsichtlich der berechneten Nachfrageauswirkungen von Massnahmen (Berechnung des Mehrverkehrs) als auch bezüglich der daraus resultierenden Zeitgewinne und -verluste (im Stamm- und Mehrverkehr). Nutzniesser der Ergebnisse der Forschungsarbeit sind also sowohl die Ersteller von Verkehrsmodellen als auch die praktischen Anwender von Modelloutputs.

Die Umsetzbarkeit der Ergebnisse der Forschungsarbeit in die Praxis ist verhältnismässig einfach, und die hier erzielten Erkenntnisse können schnell angewandt werden. So müssen lediglich bei zukünftigen Erstellungen von Verkehrsmodellen die hier ausgewiesenen Parametersätze in der Umlegungssoftware implementiert werden. Somit ist die Projektarbeit also sehr praxisnah und die Verbesserungen in der Modellierungspraxis sowie die darauf bezogenen Empfehlungen kommen unmittelbar beim Endnutzer an. Die Ergebnisse der Forschung sind als Empfehlungen für die Praxis anzusehen.

Die neu geschätzten Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen führen grossmehrheitlich zu einer Verbesserung der in den Modellen abgebildeten Fahrtzeiten, vor allem im belasteten Netz (wo die CR-Funktionen ihre Wirkung entfalten). Eine weitere Differenzierung der Knoten und Abbieger, z.B. räumlich oder nach deren Topologie, könnte zu einer nochmaligen Verbesserung der hier erzielten Ergebnisse führen. Für die entsprechenden Modellschätzungen wäre aber eine substantiell grössere Datengrundlage vonnöten, um die statistische Signifikanz der ermittelten Effekte sicherzustellen.

Die für den Einsatz in makroskopischen Verkehrsmodellen empfohlenen Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen und deren Parameter sind in untenstehender Tabelle aufgeführt.

Knoten- / Abbiegertyp	Funktion	Parameter			
		a	b	d	f
Ungeregelt					
Knoten innerorts		79.2			
Knoten sonstige		31.5	6.2	1.1	0.1
Abbieger Hauptstrom → Hauptstrom / Hauptstrom → Nebenstrom, rechts	logistisch	22.1		5.9	
Abbieger Hauptstrom → Nebenstrom, links (nicht vortrittsberechtigt)		20.6		5.6	
Abbieger Nebenstrom → Hauptstrom, rechts (nicht vortrittsberechtigt)		22.6	3.4	5.9	24.0
Abbieger Nebenstrom → Hauptstrom, links / Nebenstrom → Nebenstrom		26.5		6.8	

Kreisel					
Knoten innerorts		7.0		18.9	
Knoten sonstige		5.0	8.6	9.5	37.2
Abbieger rechts	logistisch				
Abbieger geradeaus		17.3	0.1	3.3	15.7
Abbieger links					

LSA					
Knoten innerorts				11.6	
Knoten sonstige				9.5	1.1
Abbieger Hauptstrom → Hauptstrom	sigmoidal	-	0.5	21.0	
Abbieger Hauptstrom → Nebenstrom				30.2	4.2
Abbieger Nebenstrom → Hauptstrom / Nebenstrom → Nebenstrom				51.6	

Résumé

Les modèles macroscopiques de transport sont utilisés en Suisse depuis de nombreuses années et servent comme support à de différents types de projets. Le domaine d'application principal de ces modèles est la planification stratégique, donc l'analyse de mesures avec un impact spatial plutôt vaste (niveau cantonal ou fédéral). Néanmoins, les applications à de plus petites échelles devenant de plus en plus répandues, le besoin de modéliser les flots de circulation à ces échelles par des méthodes adéquates a augmenté. Sur ce niveau, les croisements deviennent de plus en plus importants, et l'attente des usagers est une représentation correcte de leurs flux. Ces résultats sont alors utilisés pour des analyses de capacité ou comme données d'entrée pour des simulations microscopiques.

Le but principal du présent projet de recherche était d'effacer autant que possible le manque de base empirique des résistances de croisement présent dans les modèles actuels. Basées sur un typage des croisements, les analyses rendent possible de quantifier les relations entre les niveaux de charge de ceux-ci et les temps de bifurcation. Les instruments utilisés à cette fin sont les fonctions *capacity restraint* (CR).

Dans le présent projet de recherche, des fonctions CR, différenciées par type de croisement et de sens de bifurcation ont été établies et leurs paramètres ont été statistiquement estimés. Les fonctions et les paramètres calibrés y correspondants servent au calcul des temps de trajet dans les modèles macroscopiques de transport.

En pratique, deux types de fonctions CR sont utilisées pour le calcul des résistances des croisements:

- La fonction CR logistique donne le trace de la courbe charge-temps comme suit:

$$t = t_0 + \frac{a}{1 + f \cdot e^{(b+d \cdot sat)}}$$

- La fonction CR sigmoïdale est donnée comme suit:

$$t = t_0 + \frac{d \cdot sat^f}{b + sat^f}$$

avec: t temps mis pour croiser, sous charge
 t_0 temps mis pour croiser, sans charge
 sat degré de charge (rapport charge / capacité)
 a, b, d, f paramètres de la fonction CR

Les estimations mènent à une représentation plus correcte des temps de trajet dans les modèles par rapport aux valeurs utilisées jusqu'à présent, et donc à une modélisation plus précise du comportement en matière de choix de destination, de mode et de route (lesquelles sont basées entre autres sur la réaction des usagers des systèmes de transport à des temps de trajet modifiés). Cette représentation améliorée des temps de trajet bénéficie finalement aussi à l'analyse coût-avantage, en ce qui concerne autant les effets calculés de certaines mesures sur la demande (calcul du trafic additionnel) que les gains et pertes de temps en résultant. Les bénéficiaires des résultats du projet de recherche sont donc non seulement les constructeurs de modèles de transport mais aussi les usagers pratiques des outputs en dérivés.

Les résultats du projet de recherche peuvent être transférés de façon relativement facile pour des applications pratiques. Les futures créations de modèles de transport n'auront qu'à implémenter les paramètres dérivés ici dans leurs logiciels de modélisation. Il s'ensuit que le projet de recherche est très proche de la pratique et que les améliorations à la pratique et les recommandations y référant atteignent ses usagers de façon très

immédiate. Les résultats du projet de recherche sont à considérer comme recommandations aux futures applications pratiques.

Les fonctions CR pour les croisements et bifurcations mènent majoritairement à une amélioration des temps de trajet calculés dans les modèles de transport, particulièrement dans des réseaux sous charge (où les fonctions déploient leurs effets). Une différenciation encore plus détaillée des croisements et bifurcations, par exemple par situation spatiale ou topologie, pourrait mener à une amélioration ultérieure des résultats obtenus. Pour effectuer les estimations des fonctions correspondantes, une base de données nettement plus grande serait désormais nécessaire afin de maintenir la significativité des effets obtenus.

Les fonctions CR pour les croisements et les paramètres correspondants à utiliser dans les modèles macroscopiques de transport sont listés dans le tableau ci-dessous.

Type de croisement / sens de bifurcation	Type de fonction	Paramètres			
		a	b	d	f
Carrefour sans giratoire ni feux de circulation					
Carrefour en emplacement urbain		79.2			
Carrefour en emplacement non-urbain		31.5	6.2	1.1	0.1
Bifurcation principal → principal / principal → secondaire (à droite)	logistique	22.1		5.9	
Bifurcation principal → secondaire (à gauche)		20.6		5.6	
Bifurcation secondaire → principal (à droite)		22.6	3.4	5.9	24.0
Bifurcation secondaire → principal (à gauche) / secondaire → secondaire		26.5		6.8	
Giratoire					
Carrefour en emplacement urbain		7.0		18.9	
Carrefour en emplacement non-urbain		5.0	8.6	9.5	37.2
Bifurcation à droite	logistique				
Bifurcation tout droit		17.3	0.1	3.3	15.7
Bifurcation à gauche					
Feux de circulation					
Carrefour en emplacement urbain				11.6	
Carrefour en emplacement non-urbain				9.5	1.1
A Bifurcation principal → principal / principal	sigmoïdale	-	0.5	21.0	
Bifurcation principal → principal / secondaire				30.2	4.2
Bifurcation secondaire → principal / secondaire → secondaire				51.6	

Summary

Macroscopic transport models have been in use in Switzerland for many years and allow answering questions and supporting projects of different kinds. The main applications of these models has traditionally been in strategic transport planning and thus in the assessment of rather large-scale measures (on a cantonal and federal level). However, the recent advent of smaller-scale applications has increased the need for improved methods to reproduce traffic flows at a higher granularity. On this level, nodes play a bigger role, and users often expect the resulting turn flows to adequately reflect reality, so that they can be used in capacity analyses or as an input for microscopic simulations.

The main goal of the present research project was to close the gap of the missing empirical support of node resistances in the current models. Based on a classification of nodes and turns, it will now be possible to derive the relationships between capacity utilisation and turn times. So-called *capacity restraint* (CR) functions are used to implement those relationships in the models.

In the present research project, node and turn category specific CR functions were derived and their parameters estimated by means of statistical modelling techniques. The functions, along with their calibrated parameters, serve as a base for the computation of travel times in macroscopic transport models.

In practice, two types of CR functions are used specifically for the calculation of node and turn times:

- The logistic CR function uses the following equation to derive the demand-time-curve:

$$t = t_0 + \frac{a}{1 + f \cdot e^{(b+d \cdot sat)}}$$

- The sigmoidal CR function is given as follows:

$$t = t_0 + \frac{d \cdot sat^f}{b + sat^f}$$

with: t time to cross, loaded network
 t_0 time to cross, empty network
 sat degree of capacity utilisation (ratio of load vs. capacity)
 a, b, d, f parameters of CR function

Compared with the values used thus far, the parameter estimations lead to a more correct reproduction of travel times in aforementioned transport models and thus effect a more precise modelling of destination, mode and route choice behaviour (which use the reactions of travellers to changes in travel times as an input). This more accurate representation of travel times also benefits cost-benefit analysis, in regard to the calculated demand effects of measures (i.e., of induced travel demand) as well as the resulting time gains and losses. The beneficiaries of the results of the research project are both the originators of transport models and the practical users of their outputs.

The results from the research project can be transferred to practical applications in a relatively straightforward fashion. Future implementations of transport models will simply need to set their parameters according to the values detailed herein. As such, the research work is very much in step with actual practice and its aspirational improvements in modelling practice and the respective recommendations reach the end user immediately. The results from the research project are to be considered as recommendations for practical use.

The use of the node and turn specific CR functions obtained herein mostly lead to an improvement of the travel times calculated in transport models, especially in loaded

networks (where the CR functions become effective). A more detailed differentiation of the nodes and turns, e.g. by spatial setting or topology, might lead to a further improvement of the results. A substantially larger data base would however be necessary for the estimation of the corresponding functions, in order to maintain the statistical significance of the resulting effects.

The CR functions and the respective parameters to be used in macroscopic transport models are listed in the table below.

Node / turn type	Function type	Parameters			
		a	b	d	f
Regular (no roundabout or traffic lights)					
Node in urban setting		79.2			
Node in non-urban setting		31.5	6.2	1.1	0.1
Turn main → main / main → secondary, right	logistic	22.1		5.9	
Turn main → secondary, left		20.6		5.6	
Turn secondary → main, right		22.6	3.4	5.9	24.0
Turn secondary → main, left / secondary → secondary		26.5		6.8	

Roundabout					
Node in urban setting		7.0		18.9	
Node in non-urban setting		5.0	8.6	9.5	37.2
Turn right	logistic				
Turn straight		17.3	0.1	3.3	15.7
turn left					

Traffic lights					
Node in urban setting				11.6	
Node in non-urban setting				9.5	1.1
Turn main → main	sigmoidal	-	0.5	21.0	
Turn main → secondary				30.2	4.2
Turn secondary → main / secondary → secondary				51.6	

1 Einleitung und Ziele

1.1 Einleitung

Makroskopische Verkehrsmodelle sind in der Schweiz seit vielen Jahren als Instrument für die Beantwortung und Unterstützung vielfältiger Fragestellungen im Einsatz. Der Hauptanwendungsbereich dieser Modelle liegt in der strategischen Verkehrsplanung, also auf der Untersuchung grossräumig wirkender Massnahmen (Stufe Kanton, Bund). Mit den in letzter Zeit immer häufiger auftretenden Anforderungen an kleinräumiger werdende Anwendungsfelder für die Modelle steigt jedoch auch der Bedarf nach verbesserten Methoden zur Abbildung der Verkehrsströme auf dieser Auflösungsstufe. Im Gegensatz zu grossräumigen Betrachtungen spielen hier Knoten eine immer zentralere Rolle. Immer häufiger wird erwartet, dass die makroskopischen Modelle valide Knotenstrombelastungen als Ergebnisse, z.B. für Kapazitätsanalysen oder die Weiterverwendung in Mikrosimulationen, liefern.

Eine Grundvoraussetzung für die korrekte Abbildung dieser Ströme ist eine möglichst detaillierte Beschreibung der Abbiegerelationen am betreffenden Knoten. Das entsprechende Fahrverhalten (Routenwahl) wird seinerseits massgebend von den Warte- und Durchfahrtszeiten je Abbiegestrom beeinflusst. Der heutige Stand der Anwendung ist, dass die Schätzung dieser Zeiten auf Annahmen beruht, welche zum Teil grob mit Messdaten validiert sind. Eine systematische Erfassung vorhandener Messdaten und eine darauf basierende Optimierung der Abbildung der Abbiegezeiten in makroskopischen Verkehrsmodellen fehlten jedoch bisher.

Hier knüpft die vorliegende Forschungsarbeit an. Hauptaufgabe ist es, die oben beschriebene Lücke der fehlenden empirischen Abstützung der Knotenwiderstände in den Modellen so weit wie möglich zu schliessen. Es wird damit möglich, aufbauend auf eine festzulegende Knotentypisierung Aussagen über die Zusammenhänge zwischen Verkehrsstärken am Knoten und den benötigten Zeiten je Abbieger (und abhängig von deren Priorisierung) zu treffen. Das dafür zu verwendende Instrument sind die sogenannten Capacity-Restraint-Funktionen (CR-Funktionen). Diese beschreiben sowohl für Strecken als auch für Knoten die im Mittel minimal benötigte Zeit auf dem unbelasteten Element sowie die Abhängigkeit zwischen dessen Auslastung (Belastung im Verhältnis zur Kapazität) und den Fahr- oder Abbiegezeiten.

Eine möglichst gute Abbildung dieser CR-Funktionen in den Modellen ermöglicht wiederum eine korrektere Verteilung der Verkehrsströme im Netz (Routenwahlverhalten) und führt somit sowohl im Gesamtsystem als auch auf kleinräumiger Ebene (bis hin zu den Knotenströmen) zu einer realitätsgetreueren Abbildung der Belastungen. Für Strecken liefert die kürzlich abgeschlossene VSS-Studie 2015/113 „Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen“ die benötigten Werkzeuge. Diese konnten im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit erstmals auch für Knoten erarbeitet werden.

1.2 Stand der Forschung und Forschungsbedarf

Seit langem beschäftigen sich Verkehrsingenieure mit der Frage der Kapazität von Strassenknotenpunkten. Für die Schweiz behandelte Hans Joachim Rapp bereits im Jahr 1954 mit seiner Doktorarbeit (Rapp, 1954) die Leistungsfähigkeit von ungesteuerten Verkehrsknotenpunkten. Rapp entwickelte einen objektiven Massstab zur Beurteilung der Verkehrsleistung der einzelnen Knotenpunkte, vormals hatten oftmals „Gefühlsargumente“ die Oberhand.

Heute werden in der Schweiz für statische Leistungsfähigkeitsanalysen von Verkehrsknoten die gültigen VSS-Normen aus der Gruppe Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität und Belastbarkeit (VSS, 1999; VSS, 2006; VSS, 2008) angewandt. Diese Normen sind zwar bisher nur grob in makroskopischen Verkehrsmodellen implementiert (auch da sie keine Hinweise zur Parametrisierung von CR-Funktionen enthalten), stellen aber den Praxisstandard der Verkehrstechnik in der Schweiz dar:

- Die Norm SN 640 022 (VSS, 1999) gibt Vorgaben zu Knoten ohne Lichtsignalanlagen. Der Geltungsbereich dieser Norm umfasst Einmündungen und vierarmige Kreuzungen ohne Lichtsignalanlage oder ohne Kreisverkehr.
- Die Norm SN 640 023a (VSS, 2008) ermöglicht die Berechnung von Knoten mit Lichtsignalanlagen. Die Norm gilt nur für Fahrzeuge auf Fahrstreifen des Individualverkehrs.
- Durch die Vorgaben aus der Norm SN 640 024a (VSS, 2006) ist die Leistungsfähigkeitsberechnung von Knoten mit Kreisverkehren geregelt. Diese Norm gilt für Knoten mit Kreisverkehr mit einstreifiger Verkehrsführung.

Mit dem Forschungsauftrag VSS 1998/076 „Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel“ (Lindenmann *et al.*, 2004) wurde vom IVT an der ETH Zürich untersucht, wie sich die Leistungsfähigkeit von hochbelasteten Kreisverkehren in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn verhält. Dieser Forschungsbericht diente zur Überprüfung und Ergänzung der SN 640 024 zur überarbeiteten Version SN 640 024a. Eine Aussage bezüglich Wartezeiten wurde nicht gemacht; es wurde auf die einschlägige Literatur (z.B. Kimber und Hollis, 1979) verwiesen. Der Forschungsbericht VSS 2005/301 „Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel“ (Lindenmann, *et al.*, 2009) gibt weiteren Aufschluss über das Fahrverhalten an Kreiseln. Weitere Institutionen untersuchen ebenfalls die Leistungsfähigkeit von Knoten mit Kreisverkehren. Im Mai 2017 fand beispielsweise die *5th International Conference on Roundabouts* (TRB, 2017), mit einer Vortragsreihe (Session 5c) betreffend die Kapazität von verschiedenen Kreisverkehrssystemen, statt.

Mit dem Forschungsprojekt VSS 2008/301 „Leistungsfähigkeit und Verkehrsqualität von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren“ (Pitzinger und Spacek, 2009) wurde ein analytisches Verfahren zum Abschätzen der Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten erarbeitet. Mit dem Forschungsbericht VSS 2011/308 „Verkehrsablauf an ungesteuerten Knoten innerorts unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten: Ermittlung repräsentativer Richtwerte und Zusammenhänge“ (Menendez *et al.*, 2015) wurde das erarbeitete analytische Schätzverfahren in grossen Schweizer Städten anhand von Erhebungen überprüft. Resultierend auf den Ergebnissen soll ein Normentwurf erarbeitet werden.

Gemäss Helbing (2009) gibt es nur wenige theoretische Ansätze, um grundlegende Zusammenhänge zwischen makroskopischen Verkehrsvariablen wie der Verkehrsdichte, Fahrzeit und Geschwindigkeit zu bestimmen.

Die Fragestellung nach der Kapazität von Knotenpunkten wird nicht nur in Westeuropa oder in den USA untersucht, auch in Russland oder China stehen Verkehrsplanende vor den gleichen Fragestellungen – auch wenn diese in den Ländern verschiedene Voraussetzungen finden. Chubukov *et al.* (2016) schlagen einen Ansatz vor, bei dem die Staulänge zur Verbesserung und Bestimmung von Kapazitäten berücksichtigt wird. Zhaowei *et al.* (2014) schätzen die Kapazität und Verlustzeiten an Kreisel mittels Verwendung der *Conflict Theory* ab. Diese Arbeit zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen

Eintritts- und Kreisfahrbahnströmen besteht. Durch diese Arbeiten konnten die im *Highway Capacity Manual* (TRB, 2016) für Kreisverkehre vom Typ B verwendeten Schätzwerte validiert werden.

In allen Arbeiten wird festgehalten, dass die Knotenauslastung einen direkten Einfluss auf die Reisezeit hat, respektive zu Zeitverlusten führt. Die Zusammenhänge sind hinreichend beschrieben, besonders die Wartezeiten bei Knoten mit Lichtsignalanlagen sind gut erforscht. Die Kapazität von Fahrspuren und Abbiegern sind durch die Umlaufzeit und die ggf. nachfrageabhängige Grünzeit der LSA bestens bekannt. Bei Kreisverkehrssystemen ist die Abhängigkeit ebenfalls erforscht, jedoch weniger mit empirischen Werten gestützt.

Für die Umlegung und Routenwahl in Verkehrsmodellen existieren gut erforschte Algorithmen (Vrtic, 2005; PTV, 2018b), welche eine realitätsnahe Abbildung der Verkehrsströme ermöglichen. In der Gleichgewichtsumlegung z.B. wird die Reisezeit mit den eingangs beschriebenen CR-Funktionen berechnet. Diese Funktionen beschreiben den Zusammenhang zwischen Fahrzeit bzw. Wartezeit und Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Netzattributierung. Jedoch beziehen sich die Netzattribute zumeist auf Strecken, noch nicht auf Knoten und deren Widerstandsattribute. Die Leistungsfähigkeit von Strecken ist kürzlich im VSS-Forschungsauftrag 2015/113 „Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen“ abgehandelt worden (Vrtic *et al.*, 2018).

Die Entwickler von Verkehrsmodellierungssoftware beschreiben für ihre Produkte statische Lösungen für Knotenwiderstände: In *Visum* und *TransCAD* besteht die Möglichkeit, Widerstände in manuellen Attributen an Knoten festzulegen. So werden im Gesamtverkehrsmodell der Region Basel (Arendt Consulting, 2015), welches mit der Software *TransCAD* erstellt wurde, streckentypische Abbiegewiderstände verwendet. Dazu werden Abbiegezuschläge bestimmt: Es werden für alle möglichen Kombinationen von sich kreuzenden Streckentypen an einem Knoten unterschiedliche (pauschale, nicht explizit von der Belastung abhängige) Abbiegezuschläge für Geradeausfahrende, Links- und Rechtsabbieger und definiert.

In *Visum* sind drei verschiedene Möglichkeiten gegeben, Knotenwiderstände zu verwenden. Dies sind Abbieger-CR-Funktionen, Knoten-CR-Funktionen oder die Knotenwiderstandsberechnung nach dem *Highway Capacity Manual*, dabei wird die *Intersection Capacity Analysis* (ICA) verwendet (PTV, 2018). Die Methodik nach ICA wurde bei der Aktualisierung des Gesamtverkehrsmodells des Kantons Zürich 2013 (Vrtic *et al.*, 2013) für Lichtsignalanlagen im innerstädtischen Bereich angewandt.

Unabhängig von der Software- oder Methodenwahl stellt sich stets die Frage, inwiefern die verwendeten Daten empirisch belastbar sind. Welche Widerstandsfunktionen sind an welchen Knotentypen anzuwenden? Zu welcher Verbesserung führt ein differenziertes Set an Widerstandsfunktionen in den Modellaussagen? Zu diesen Fragen besteht heute eine Lücke in der Verkehrsmodell-Literatur.

Zum belastungsabhängigen und damit prognosefähigen Einsatz der Methoden der Knotenleistungsfähigkeit in Verkehrsmodellen existiert keine Literatur, auch nicht im internationalen Kontext. Dies lässt darauf schliessen, dass nach dem heutigen Wissensstand für jeden Knoten in Verkehrsmodellen die Widerstandsfunktionen oder Zeitzuschläge manuell festgelegt und eingetragen werden.

Es besteht ein Forschungsbedarf, wie eine prognosefähige Funktion in Verkehrsmodelle integriert werden kann, welche die Leistungsfähigkeit von jedem Knotenstrom in Abhängigkeit des Knotentyps und der Gesamtbelastung am Knoten betrachtet (z.B. Menge von konkurrierenden Konfliktströmen). Ausgehend von den in den VSS-Normen und -Forschungsberichten gut dokumentierten Leistungsfähigkeitszusammenhängen an Knoten soll eine Implementierung der Routinen in Schweizer Verkehrsmodelle erforscht werden.

Für verschiedene Knoten, d.h. Kreisverkehre, Knoten mit Lichtsignalanlagen und vortrittsgeregelte Knoten an unterschiedlichen Orten (sowohl innerorts als auch ausserorts) mit unterschiedlichen Attributen (wie Geschwindigkeit, Geometrie) fehlen spezifische CR-Funktionen, um eine prognosefähige Abbildung von Kapazität, Sättigung und Verlustzeiten

zu ermöglichen. Es ist zu prüfen, für welche Fälle Knoten- oder Abbiegerwiderstände sinnvoller sind. Nach Möglichkeit sollen auch die Einflüsse von relevanten Faktoren wie z.B. Fussverkehrsströmen, ÖV-Linien oder Vortrittsregelungen zumindest näherungsweise berücksichtigt werden.

1.3 Ziele der Forschungsarbeit

Inhaltlich können die Arbeitsschritte des Projekts wie folgt zusammengefasst werden:

- Sichtung der nationalen und internationalen Literatur;
- Sammlung, Sichtung, Zusammenführung und Aufbereitung der in der Schweiz vorhandenen empirischen Datengrundlagen zur Verknüpfung von Verkehrsstärken und Warte- bzw. Durchfahrtszeiten an Knoten;
- Festlegung des möglichen Detaillierungsgrades der Knoten-CR-Funktionen (Knotentypisierung);
- Kalibration der Parameter der Knoten-CR-Funktionen je Abbiegestrom (t_0 , Kapazität und Funktionsverlauf) für die festgelegten Knotentypen;
- Validierung der resultierenden Funktionsverläufe (anhand eines bestehenden Verkehrsmodells);
- Abgabe von Empfehlungen für die praktische Anwendung der erzielten Resultate.

Mit der verbesserten Abbildung der Knotenwiderstände wird der Modellierungs- und Bewertungspraxis ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dem die Qualität der Modellkalibration optimiert werden kann. Somit können die Entscheidungsprozesse zur Durchführung von Infrastrukturprojekten auf der Basis qualitativ besserer Informationsgrundlagen geführt werden. Nutzniesser der Ergebnisse der Forschungsarbeit sind sowohl die Ersteller von Verkehrsmodellen als auch die praktischen Anwender derer Outputs.

2 CR-Funktionen

Wie einleitend erwähnt bilden die CR-Funktionen die Grundlage für eine realistische Abbildung von Fahrtzeiten in Verkehrsmodellen.

In der Theorie gibt es zahlreiche Ansätze, um den Verlauf der CR-Funktionen, also die Abhängigkeit der Fahrtzeit von der Kapazitätsauslastung eines Netzelements (Strecke oder Knoten), zu beschreiben. In der Verkehrsmodellierungssoftware *Visum* (PTV, 2018b), welche für die Mehrheit der in der Schweiz vorhandenen Verkehrsmodelle die Programmgrundlage bildet, sind verschiedene dieser Ansätze implementiert.

In der Verkehrsplanungspraxis und in Verkehrsmodellen werden vor allem CR-Funktionen ohne fixe Begrenzung der Leistungsfähigkeit eingesetzt, um einerseits eine Konvergenz des Modells und andererseits die Abbildung von Stausituationen zu ermöglichen. Bei einer fixen Leistungsfähigkeit und einer CR-Funktion mit Leistungsfähigkeitsgrenze würden Stausituationen unvollständig abgebildet werden und somit ein unplausibles Routenwahlverhalten entstehen. Dadurch würde die Prognosefähigkeit des Verkehrsmodells stark beeinträchtigt. Aus diesem Grund werden die Funktionsverläufe auch beim Überschreiten der Kapazitätsgrenze fortgeschrieben und entsprechend der Warteschlangentheorie angepasst. Hier muss zusätzlich eine Plausibilisierung der Parameter entsprechend dem Routenwahlverhalten vorgenommen werden.

Die in *Visum* spezifisch für Knoten vorgesehenen Ansätze, welche in dieser Forschungsarbeit untersucht werden sollen, werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt.

Anschliessend folgt eine Abhandlung über den Umgang mit dem Überlastbereich, welcher in der Realität nicht in derselben Form gemessen werden kann, wie er in makroskopischen Verkehrsmodellen behandelt wird. Es wird daher ein Verfahren verwendet, den Überlastbereich aus dem Verkehrsstärke-Widerstands-Diagramm abzuleiten.

2.1 Funktionsansätze

2.1.1 Logistische Funktion

Die logistische CR-Funktion bildet den Verlauf der Auslastungs-Zeit-Kurve anhand folgender Gleichung ab:

$$t = t_0 + \frac{a}{1 + f \cdot e^{(b+d \cdot sat)}}$$

mit: t Durchfahrzeit für belasteten Knoten / Abbieger
 t_0 Durchfahrzeit für unbelasteten Knoten / Abbieger
 sat Auslastung des Knotens / Abbiegers (Verhältnis Belastung / Kapazität)
 a, b, d, f Parameter der CR-Funktion

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Verläufe der logistischen CR-Funktion exemplarisch für typische Wertekombinationen der massgebenden Parameter. t_0 wurde hierbei jeweils auf 10 Sekunden fixiert.

Hier ist ersichtlich, dass der Parameter a die Differenz zwischen der benötigten Zeit im unbelasteten und voll ausgelasteten Zustand abbildet (Abb. 1). Die Werte der Parameter b , d , und f bestimmen die Lage des Beginns des Anstiegs und die Ausprägung der "S-Kurve", also die Steigung der Funktion zwischen Unter- und Überlastbereich (Abb. 2).

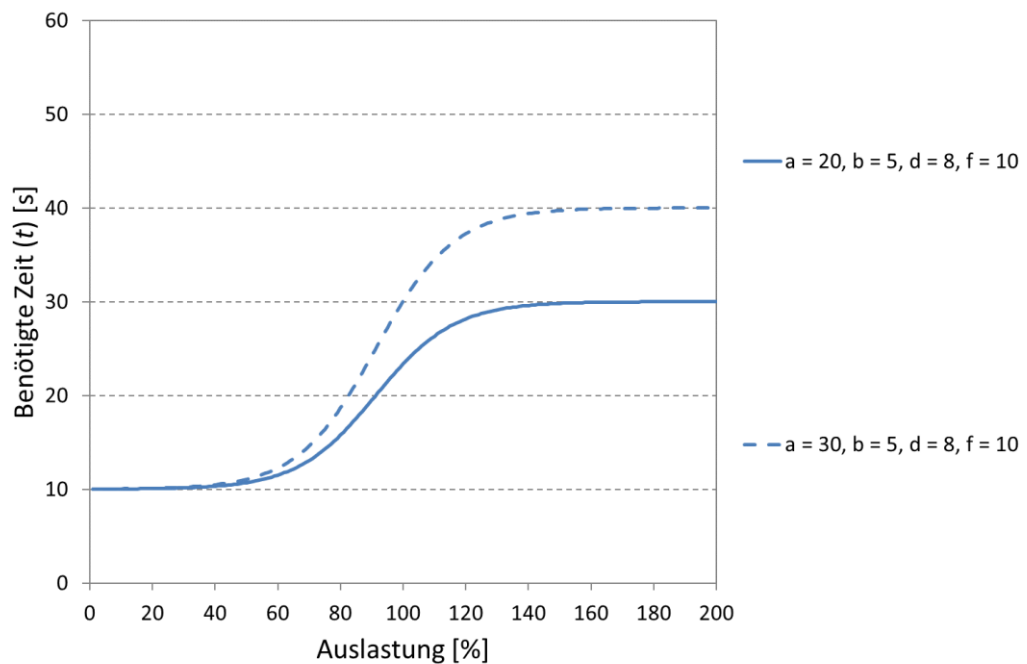


Abb. 1 Vergleich der Verläufe der logistischen CR-Funktion für verschiedene Werte des Parameters a .

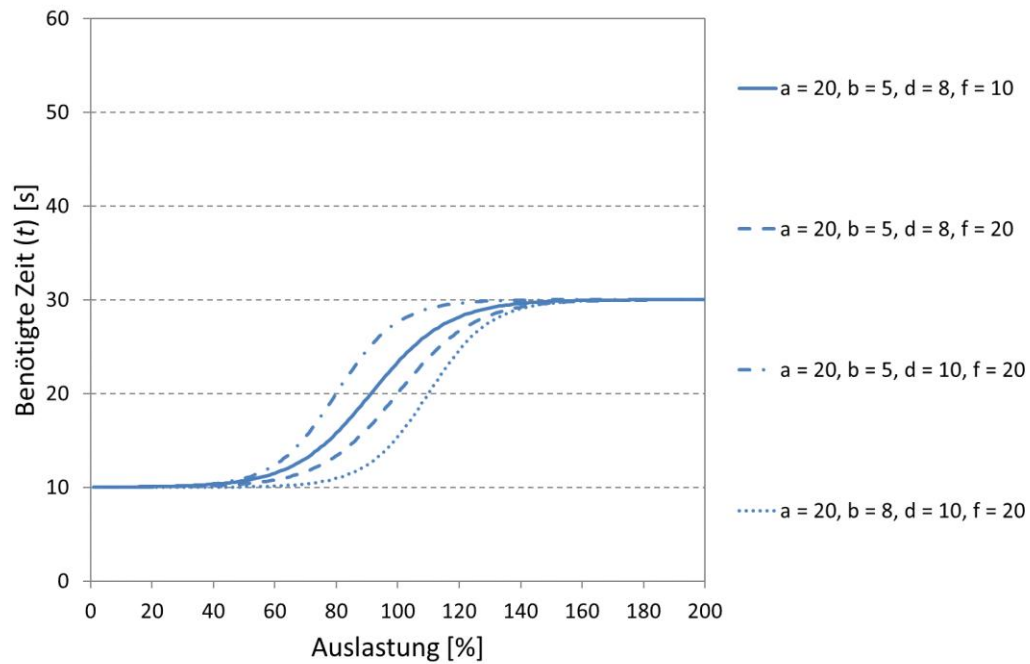


Abb. 2 Vergleich der Verläufe der logistischen CR-Funktion für verschiedene Werte der Parameter b , d und f .

2.1.2 Sigmoidale Funktion

Auch die sigmoidale CR-Funktion bildet eine S-Kurve ab, dies über folgende Gleichung:

$$t = t_0 + \frac{d \cdot sat^f}{b + sat^f}$$

mit: t Durchfahrzeit für belasteten Knoten / Abbieger
 t_0 Durchfahrzeit für unbelasteten Knoten / Abbieger
 sat Auslastung des Knotens / Abbiegers (Verhältnis Belastung / Kapazität)
 b, d, f Parameter der CR-Funktion

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Verläufe der sigmoidalen CR-Funktion exemplarisch für typische Wertekombinationen der massgebenden Parameter. t_0 wurde hierbei jeweils auf 10 Sekunden fixiert.

Hier ist ersichtlich, dass der Parameter d die Differenz zwischen der benötigten Zeit im unbelasteten und voll ausgelasteten Zustand abbildet (Abb. 3). Die Lage und Steigung der Kurve werden durch die Werte der Parameter b und f bestimmt.

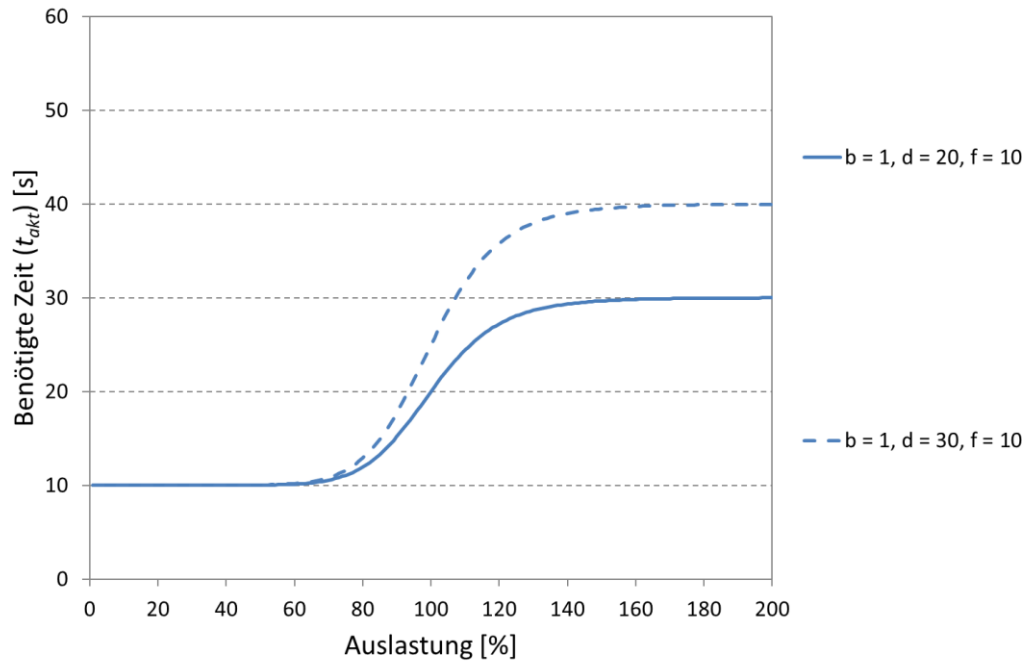


Abb. 3 Vergleich der Verläufe der sigmoidalen CR-Funktion für verschiedene Werte des Parameters d .

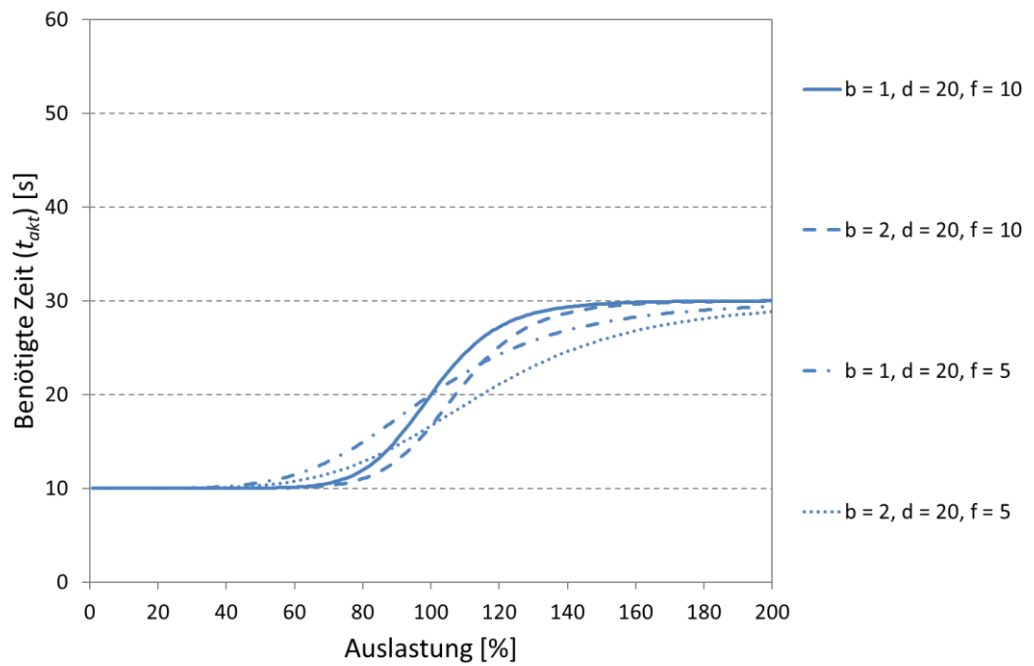


Abb. 4 Vergleich der Verläufe der sigmoidalen CR-Funktion für verschiedene Werte der Parameter b und f .

2.2 Herleitung aus Messdaten

In makroskopischen Verkehrsmodellen wird der Überlastbereich, also Auslastungen von Netzelementen (hier Knoten) über deren Kapazität hinaus, nicht hart begrenzt, sondern mit einer weiter verlaufenden Kurve für die Zunahme des Widerstands, abgebildet. Dies ist notwendig, damit alle in den Nachfragematrizen vorhandenen Fahrten auf das Netz umgelegt werden können und das Routenwahlverhalten realistisch bleibt. Konkret bedeutet der Überlastbereich ein Volumen an Fahrzeugen, welche ein Netzelement nicht innerhalb des betrachteten Zeitraums passieren können, sondern einen Überhang bilden. Durch die steigenden Reisezeitverluste bei über die Kapazität hinausgehenden Belastungen wird der vorhandene Stau näherungsweise abgebildet.

Empirisch ist dieser Überlastbereich nicht beobachtbar, da die Kapazität eines Netzelements in der Realität definitionsgemäss nicht überschritten werden kann und es ansonsten zu einem Kollaps des Verkehrsflusses, bzw. zu einem Stau, kommt. Dies ist durch das Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses, welches den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte k [Fzg/km], Verkehrsstärke q [Fzg/h] und Widerstand bzw. Zeit t [s] festlegt. Das Fundamentaldiagramm ist exemplarisch für einen Knoten in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Abb. 5 zeigt den Verlauf einer exemplarischen Verkehrsstärke-Zeit-Kurve für ein Netzelement mit einer Kapazität von ca. 1'200 Fahrzeugen pro Stunde. Das Diagramm ist getrennt in einen „freien“ Fluss (grün), und einen „gebundenen“ Fluss (orange). In letzterem Bereich ist der Verkehrsfluss behindert und kollabiert mit zunehmender Dichte bis zum Stillstand.

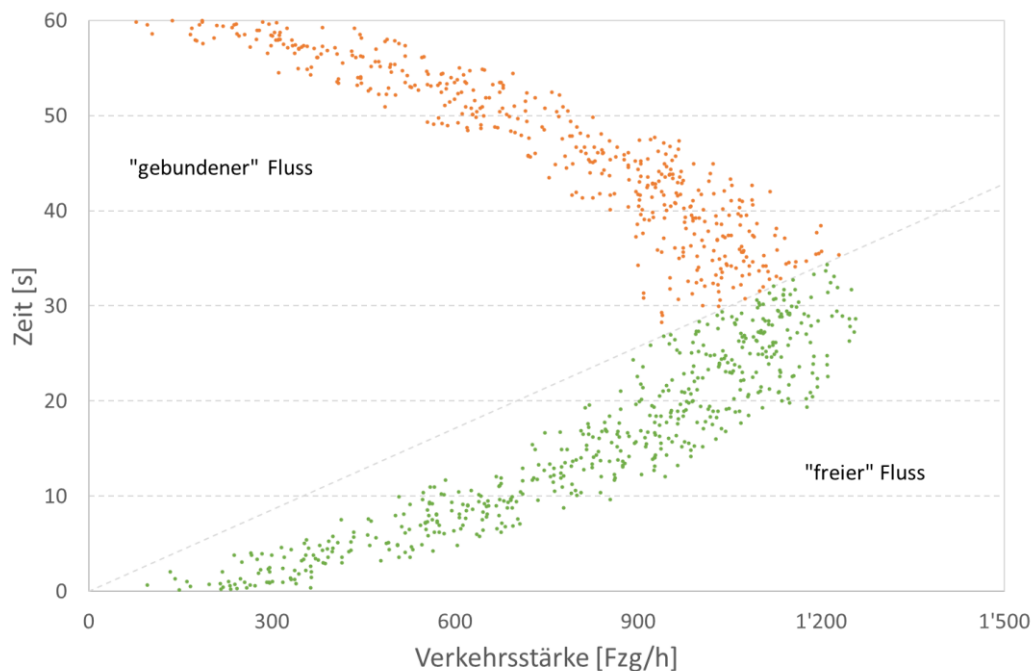


Abb. 5 Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses: Verkehrsstärke-Zeit-Diagramm.

Um die CR-Funktion in Form einer Nachfragekurve auf dem gesamten Wertebereich abbilden zu können, muss der gebundene Fluss in einen Überlastbereich umgewandelt werden. Moses *et al.* (2013) sowie in leicht abgewandelter Form Kucharski und Drabicki (2017) schlagen hierfür ein Vorgehen vor, bei welchem der gebundene Bereich oberhalb der Diagonale, welche die kritische Dichte abbildet, entlang der Kapazitätlinie gespiegelt wird. Das Vorgehen ist in Abb. 6 visualisiert. Diese idealisierte Nachfragekurve bildet die Grundlage für die hier vorgesehene empirisch basierte Forschungsarbeit.

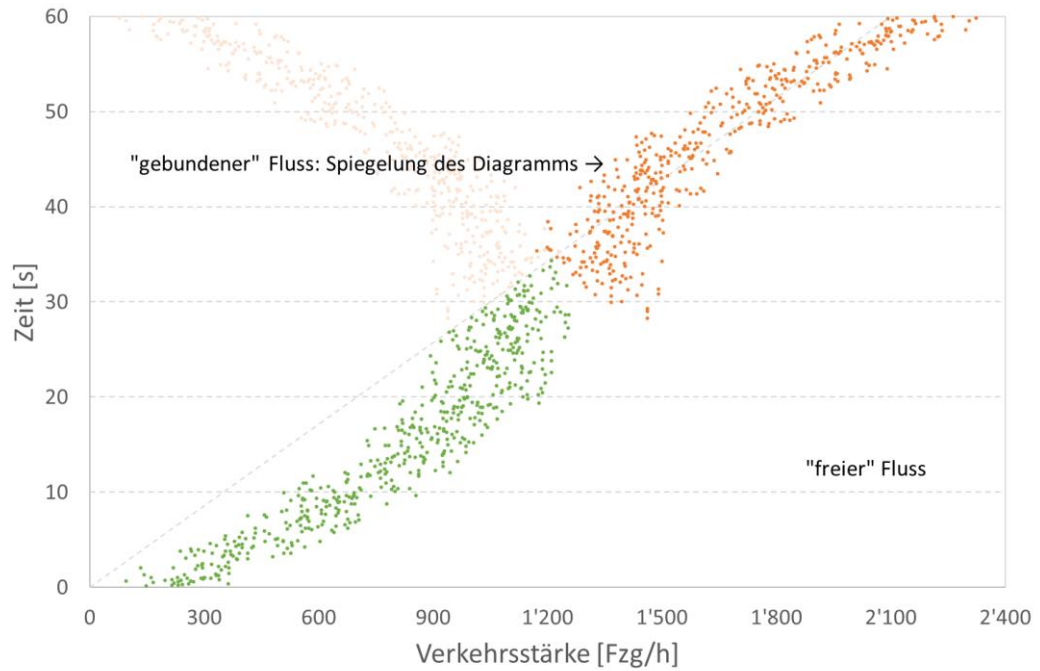


Abb. 6 Umwandlung des Verkehrsstärke-Zeit-Diagramms in eine Nachfragekurve.

Hierdurch entsteht ein „virtueller“ Überlastbereich, der zwar empirisch nicht beobachtet wird, aber die nicht bewältigbare Nachfrage abbildet und mit der Theorie konsistent ist, dass diese im Bereich oberhalb einer kritischen Verkehrsdichte auftritt.

Abb. 7 zeigt die für das vorliegende Beispiel aus der neuen Nachfragekurve resultierende logistische CR-Funktion, welche mittels einer Regression (Methode der kleinsten Quadrate) an die Datenpunkte angepasst wurde. Die resultierenden Parameterwerte sind in diesem idealisierten Beispiel: $a = 61.6$, $b = 0.7$, $d = 3.6$, $f = 19.1$. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist die resultierende Kurve sehr gut an den mittleren Verlauf der Daten angepasst.

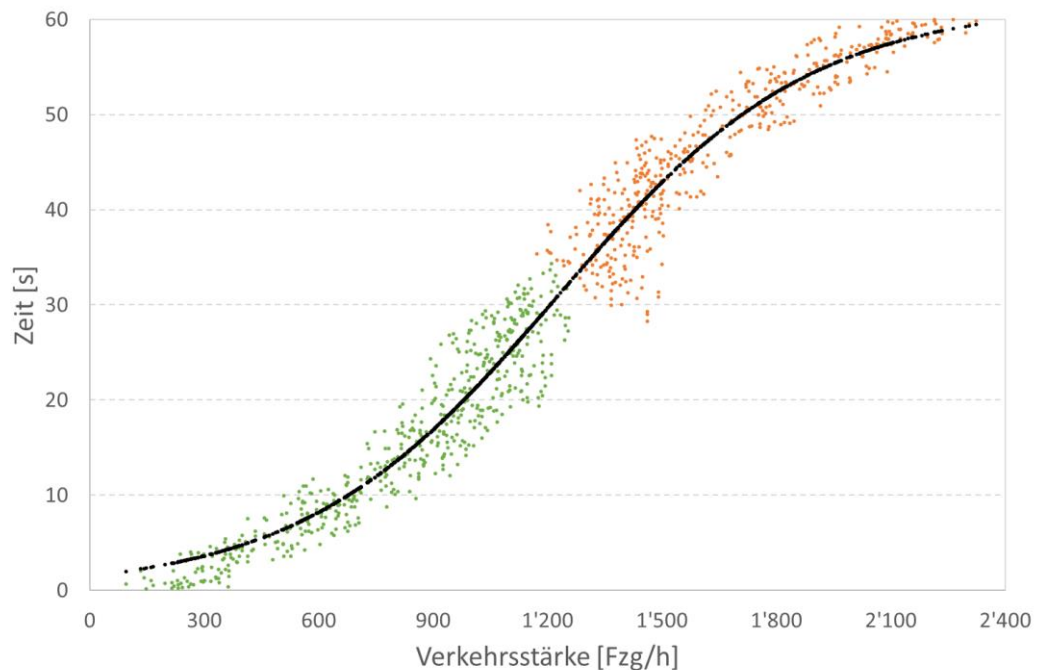


Abb. 7 Herleitung einer CR-Funktion aus Nachfragedaten.

3 Schaffung der Grundlagen

3.1 Datensammlung und -bereitstellung

Für eine genügende Datengrundlage zur Schätzung der CR-Funktionen galten folgende Anforderungen:

- Wahl repräsentativer Verkehrsknoten (ungeregelt, Kreisel und LSA):
 - keine Spezialformen, sondern verbreitete/bekannte Ausgestaltungen;
 - keine Anbindungen oder andere Knoten in unmittelbarer Nähe;
- Kenntnis der Verkehrsströme (Nachfrage, also Angebot inkl. Rückstau):
 - Messungen im überkritischen Bereich (Spitzenstunden);
- Kenntnis der Reisezeiten je Fahrzeug:
 - ausreichende Stichprobengrösse;
 - klar definierte Start- und Endquerschnitte;
 - Startquerschnitt in ausreichender Entfernung zum Knoten, damit die Beeinflussung der Reisezeit durch Rückstau sichergestellt ist.

Diesen Anforderungen mittels empirisch erhobener Daten gerecht zu werden, stellte hinsichtlich des Aufwandes eine nicht machbare Herausforderung dar. Zunächst wurden die bei den Bearbeitern der Forschungsarbeit vorhandenen Video- (RK&P, Rapp) und Zählraten (Kantone, Städte, etc.) unter Berücksichtigung der Anforderungen ausgewertet. Aufnahmen inkl. der erforderlichen Informationen waren nicht vorhanden und/oder nicht geeignet, da sie meist den Knoten selbst, und nicht die erforderliche Zufahrt zum Knoten, im Fokus hatten. Zudem standen auch mengenmässig (ausreichende Stichprobengrösse) nicht genügend Aufnahmen zur Verfügung. Der Ansatz neue, den Anforderungen entsprechende, Aufnahmen zu erzeugen und auszuwerten, konnte angesichts des damit einhergehenden Aufwandes nicht weiterverfolgt werden.

Um die Daten effizienter, aber dennoch mit ausreichender Qualität, zusammenzutragen, wurde der Einsatz der Mikrosimulationssoftware *Vissim* (PTV, 2018a)¹ diskutiert. Die Herausforderung hierbei war nicht die effiziente Erzeugung der Daten, sondern deren ausreichende Qualität. Der Beweis für die genügende Qualität und damit für die Erzeugung belastbarer Daten für diese Studie mittels *Vissim* wurde für jeden Knotentyp (ungeregelt, Kreisel und LSA) gemäss dem nachfolgend beschriebenen Verfahren erbracht.

Ein Knoten, zu welchem brauchbare Videoaufnahmen zur Verfügung standen, wurde in *Vissim* nachgebildet (wenn nicht bereits vorhanden) und ausgewertet. Die Validierung der Simulations-Ergebnisse erfolgte durch den Vergleich mit den Videoauswertungen (Empirie).

Nachfolgend wird die Beweisführung am Beispiel des Kreisels erläutert.

In Abb. 8 ist ein *Vissim*-Ausschnitt dargestellt. Daraus ersichtlich sind die Strecken und die Lage der Reisezeitmessungen. Der Start der Messung wird mit einer zum Knoten vorgelagerten Distanz (links) und die Endquerschnitte schematisch am Knoten selbst (rechts, orange, rot) angegeben.

¹ „Mikroskopische Simulation“ - manchmal auch Mikrosimulation - bedeutet, dass in der Simulation jede Funktionseinheit (Auto, Tram, Fussgänger der Realität ein individuelles Gegenstück hat, wobei das zu Grunde liegende Simulationsmodell alle relevanten Eigenschaften berücksichtigen muss. Ebenso werden alle Wechselwirkungen zwischen den Funktionseinheiten individuell berechnet.

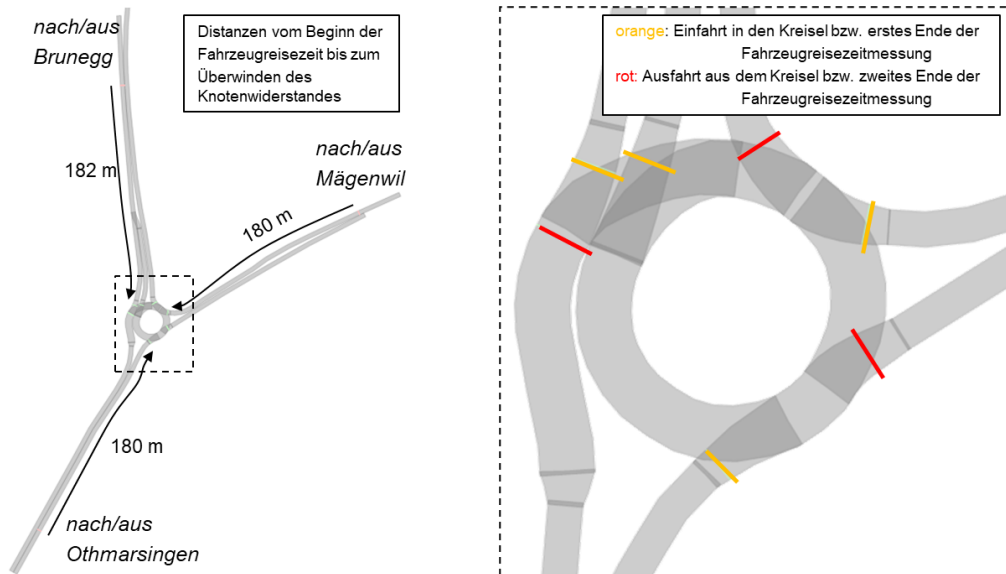


Abb. 8 Vissim-Ausschnitt mit Strecken und Definitionen der Reisezeitmessungen

Insbesondere beim Kreisell wurde zwischen der Reisezeit bis zum Ein- und derjenigen bis zum Ausfahren unterschieden. Damit konnte der durch den Knoten verursachte Verlust eruiert und von anderen Faktoren, die nicht direkt vom Knoten beeinflusst sind (z.B. einer Abflussproblematik aufgrund abseits des Knotens liegender Fussgängerstreifen), separiert werden.

Das Modell wurde hinsichtlich den beobachteten Verkehrsmengen und Fahrverhalten kalibriert und ausgewertet (Fahrzeugreisezeiten je Fahrzeug). Diese Auswertungen wurden anschliessend den Daten aus den Videoaufnahmen (beispielhaft in Abb. 9) gegenübergestellt.

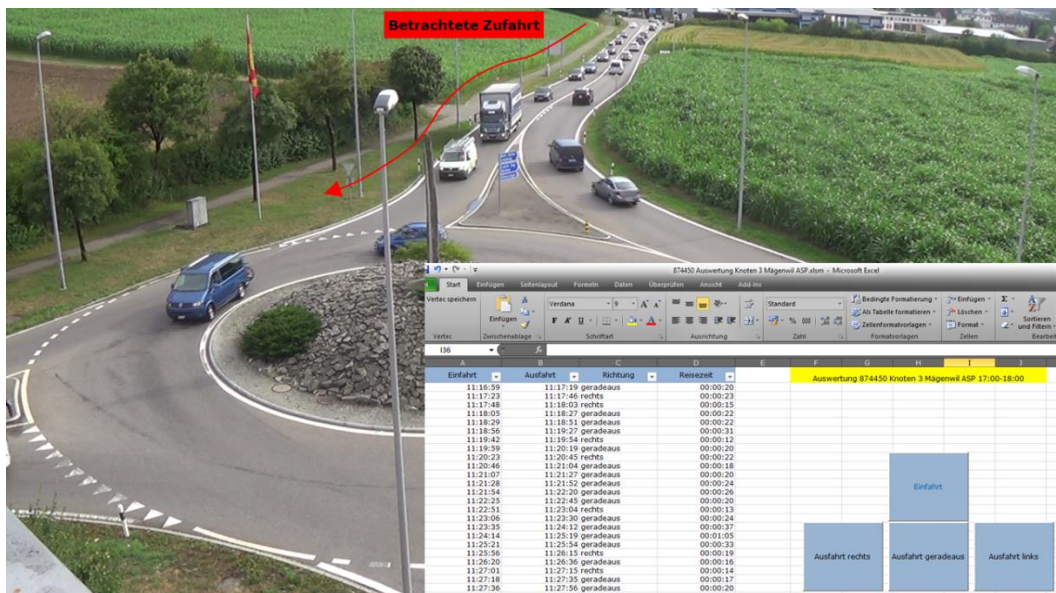


Abb. 9 Video-Ausschnitt mit Erfassungstabelle für die empirischen Daten

Aus der Gegenüberstellung gemäss Abb. 10 wurde die Tauglichkeit für belastbare, resp. die Realität in genügender Qualität abbildende Vissim-Reisezeiten für den Knotentyp Kreisell abgeleitet. Dieselbe Beweisführung ist zudem auch in für die Knotentypen LSA (Abb. 11) und unregelmäßig (Abb. 12) dargestellt. Die kumulative Verteilung (Y-Achse) weist für einen Wertebereich von 0-1 die Auslastung (Verkehrsdichte) dar; die X-Achse ist davon abhängig Reisezeit zur Durchfahrt des Knotens.

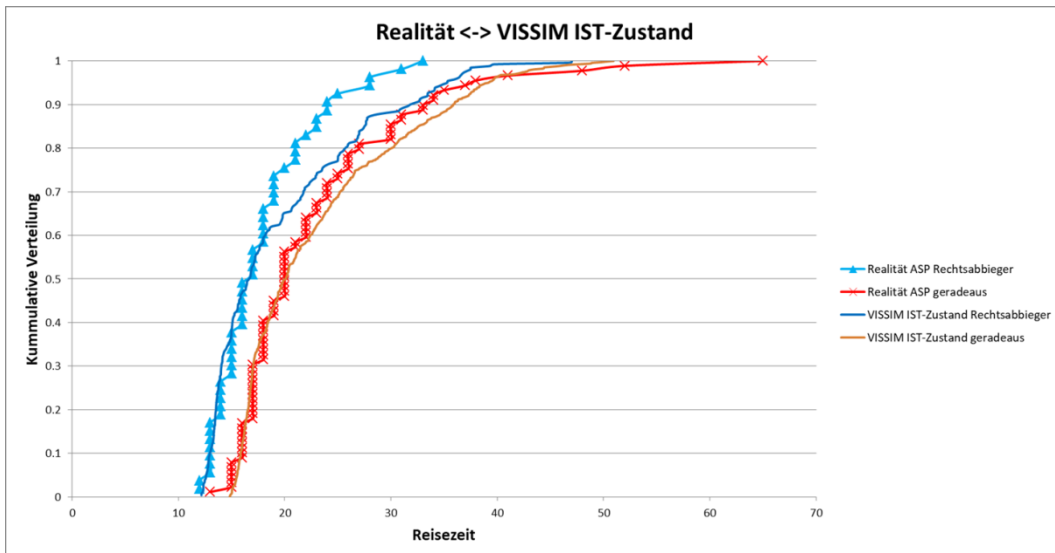


Abb. 10 Vergleich Empirie (Video/Realität) mit Simulation (VISSIM) – Kreisell

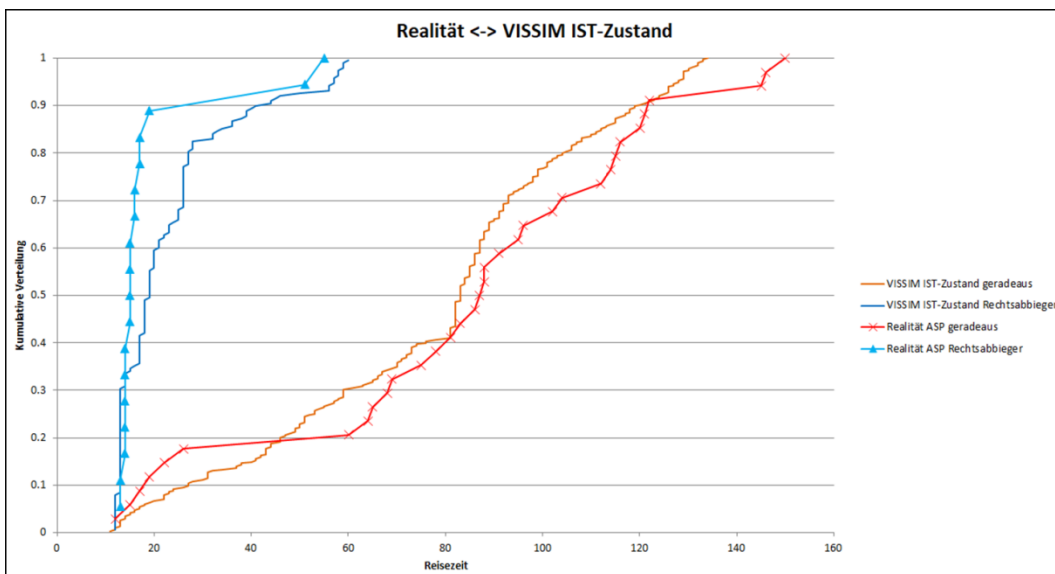


Abb. 11 Vergleich Empirie (Video/Realität) mit Simulation (Vissim) – LSA

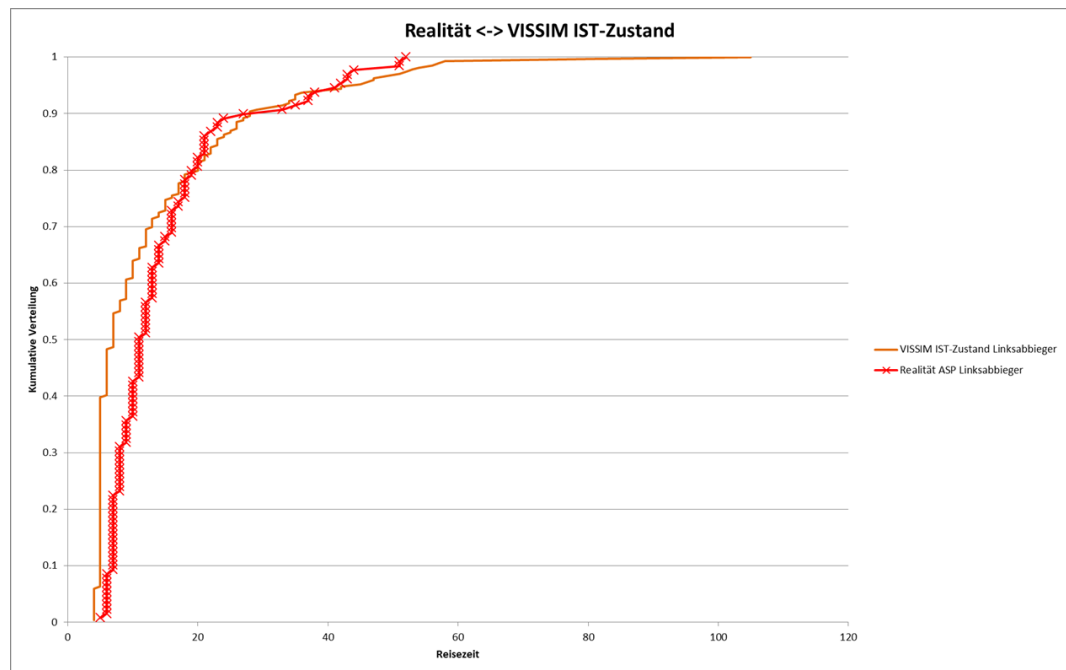


Abb. 12 Vergleich Empirie (Video/Realität) mit Simulation (Vissim) – unregelt

Der Vergleich der Daten (Realität vs. *Vissim*) in den obigen Grafiken zeigt eine gute optische Übereinstimmung. Einzig beim LSA-Vergleich stimmen die Kurven nicht überall genau überein. Dies liegt an der bedingten Vergleichbarkeit von Empirie und Simulation bei der LSA. In der Realität reagiert die LSA verkehrabhängig, während sie in der Simulation mit einem bestmöglichen Festzeitprogramm angenähert wurde.

Basierend auf diesen Vergleichen wurde festgestellt und in Abstimmung mit der Begleitkommission entschieden, dass anhand kalibrierter *Vissim*-Modelle die Reisezeiten ausreichend realitätsnah abgebildet und somit für die Erzeugung der Datengrundlage für die Schätzung der CR-Funktionen verwendet werden können.

Insgesamt wurden mit *Vissim* für 23 Knoten (Deutschschweiz, Romandie und Tessin) Fahrzeugreisezeiten erzeugt. Die geografische Einordnung der Knoten sowie die Definition derer Reisezeiten können Anhang I entnommen werden.

3.2 Festlegung der Knoten- und Abbiegertypisierung

Aus den oben beschriebenen Arbeiten zur Datenbereitstellung resultierte eine Grundlage von Daten zu insgesamt 23 Knoten, welche für die weiteren Analysen verwendet werden können. Der nächste Schritt ist die Festlegung einer Typisierung dieser Knoten, entlang derer die Auswertungen durchgeführt werden.

Ziel war es hierbei, eine möglichst differenzierte Typisierung zu wählen, welche aber in den aktuellen Schweizer Verkehrsmodellen, d.h. primär in der Software *Visum*, umsetzbar bleiben sollte. Diese gibt sowohl bei den Knoten- als auch bei den Abbiegertypen Grenzen vor: es können maximal 100 Knotentypen und 10 Abbiegertypen definiert werden. Erstere Limitierung ist für die vorliegenden Arbeiten irrelevant, da die mögliche Anzahl zu differenzierender Knotentypen im einstelligen Bereich liegt. Für Knoten und Abbieger können jeweils separate CR-Funktionen definiert werden, die bei der Berechnung des Durchfahrtswiderstands eines Abbiegestroms additiv wirken. Die Knoten-CR-Funktion dient dabei als Annäherung des Effekts der gegenseitigen Beeinflussung der einzelnen Abbiegerströme am Knoten, der in einem makroskopischen Verkehrsmodell nicht explizit über die einzelnen Fahrzeugströme abgebildet werden kann.

Nach Sichtung der Daten wurde folgende Typisierung festgelegt:

- 6 Knotentypen, gegeben durch die möglichen Kombinationen aus:
 - 3 Regelungsregimes:
 - unregelter Knoten;
 - Kreisel;
 - Lichtsignalanlage (LSA);
 - 2 Lagetypen:
 - innerorts;
 - sonstige.
- 10 Abbiegertypen:
 - Ungeregelt Hauptstrom → Hauptstrom / Hauptstrom → Nebenstrom, rechts (vortrittsberechtigt);
 - Ungeregelt Hauptstrom → Nebenstrom, links (nicht vortrittsberechtigt);
 - Ungeregelt Nebenstrom → Hauptstrom, rechts (nicht vortrittsberechtigt);
 - Ungeregelt Nebenstrom → Hauptstrom, links / Nebenstrom → Nebenstrom (nicht vortrittsberechtigt);
 - Kreisel rechts;
 - Kreisel geradeaus;
 - Kreisel links;
 - LSA Hauptstrom → Hauptstrom;
 - LSA Hauptstrom → Nebenstrom;
 - LSA Nebenstrom → Hauptstrom / Nebenstrom → Nebenstrom.

Somit wird die in *Visum* maximal mögliche Differenzierung der Abbiegertypen vollumfänglich ausgeschöpft. Bei den Knotentypen ist die Datenlage ausschlaggebend für die Beschränkung der Typenanzahl.

Für die 3 genannten Regelungsregimes (also unregelt, Kreisel und LSA) wurden jeweils separate Modellschätzungen durchgeführt. Hierbei wurden die Parameter der Knoten-CR-Funktionen nach den beiden Lagetypen unterschieden. Für die Abbieger-CR-Funktionen eines gleichen Typs wurden gemeinsame Parameter geschätzt. Somit weisen Knoten desselben Regelungstyps identische Verläufe der Abbieger-CR-Funktionen für die einzelnen Abbiegertypen auf, welche sich aber zusätzlich durch den additiven Anteil der lageabhängigen Knoten-CR-Funktionen unterscheiden.

3.3 Übersicht über die ausgewerteten Knoten

Insgesamt konnten Daten von 23 Knoten für die weiteren Analysen verwendet werden. Deren Aufteilung auf die verwendete Typisierung ist aus Tab. 1 ersichtlich. Für jeden der betrachteten Knotentyp-/Lage-Kombinationen ist demnach mindestens ein auswertbarer Knoten vorhanden, so dass die weiteren Auswertungen anhand der im vorigen Abschnitt vorgeschlagenen Typisierung durchgeführt werden konnte.

Tab. 1 Typisierung der ausgewerteten Knoten

Knotentyp	innerorts	sonstige
Ungeregelt	4	4
Kreisel	2	7
LSA	5	1

Die Datensammlung war stark von der Verfügbarkeit passender Simulationen bei RK&P abhängig. Eine lokale Konzentration um in der Vergangenheit untersuchte Projekte konnte deshalb nicht vermieden werden. Es wurde dennoch Wert darauf gelegt, die Knoten räumlich soweit wie möglich zu differenzieren, um bei den Auswertungen Aussagen über schweizweit gültige Mittelwerte treffen zu können. So konnte auch je ein Knoten aus der Romandie und dem Tessin in die Datenbank aufgenommen werden, wie Abb. 13 zeigt.

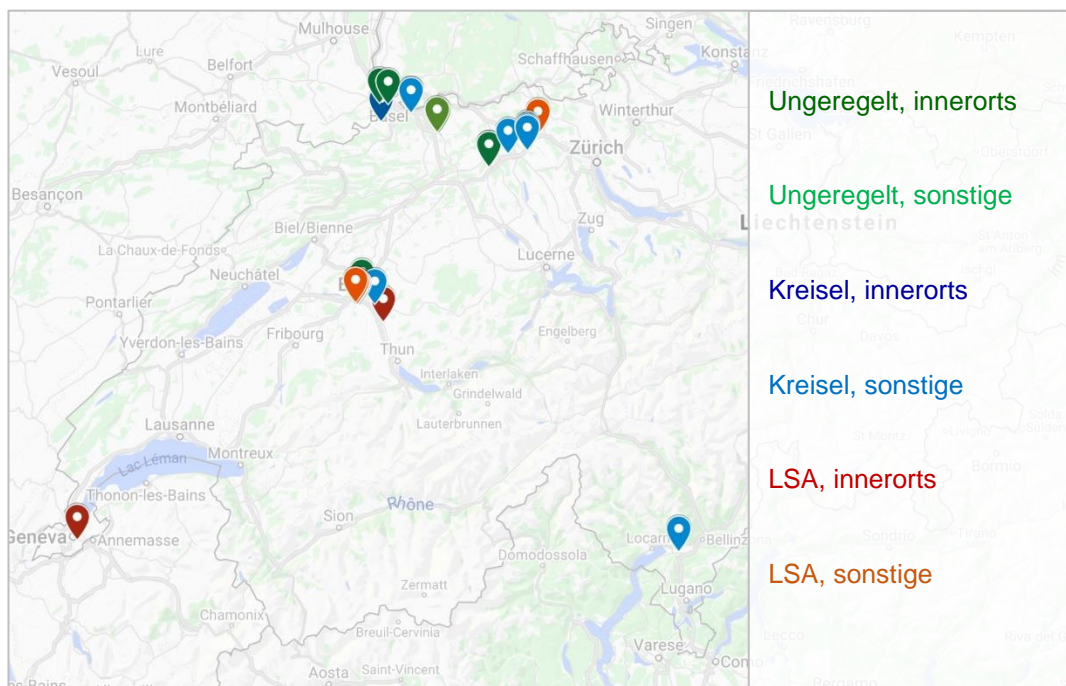


Abb. 13 Übersicht über die ausgewerteten Knoten (Kartenmaterial © Google Maps).

3.4 Datenaufbereitung

3.4.1 Aggregation der Rohdaten

Die mittels dem im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Vorgehen bereitgestellten Rohdaten wurden in der Folge für die weitere Analyse aufbereitet. Ziel hierbei war die Schaffung eines einheitlich formatierten Datensatzes als Grundlage für die nachfolgende Schätzung der Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen. Die Aufbereitung der Daten jedes einzelnen Knotens erfolgte mittels der Statistiksoftware *SPSS* (IBM, 2016) und bestand aus den folgenden Schritten:

- **Einlesen:**
Hier werden die vorliegenden Einzelfahrzeug-Rohdaten aus den zur Verfügung gestellten Excel-Datenfiles eingelesen und mit den korrekten Spaltennamen für die Weiterverarbeitung versehen.
- **Aggregation:**
Die Einzelfahrzeug-Daten werden zu 1-Minuten-Intervallen der einzelnen Abbiegerströme aggregiert, es werden also für alle Fahrzeuge, welche innert der betreffenden Minute den Knoten passieren bzw. einen bestimmten Abbiegevorgang durchführen, die Mittelwerte der benötigten Durchfahrzeiten berechnet. Zusätzlich werden die Fahrzeuge gezählt, also der Minute und dem Abbiegevorgang eine Belastung zugeordnet. Anschliessend werden die Minuten- zu Stundenwerten hochgerechnet, um eine einfachere Interpretation der Werte zu ermöglichen und den späteren Einbau in die Verkehrsmodelle zu erleichtern.
- **Typisierung der Abbieger:**
Jedem der (maximal 12) am Knoten auftretenden Abbiegevorgänge wird ein Typ (Knotentyp, Haupt-/Nebenstrom und Richtung) zugeordnet.
- **Gegenüberstellung der Verkehrsstärken und Zeiten:**
Für jeden am Knoten vorkommenden Abbiegetyp können jetzt Gegenüberstellungen der Belastungen (in Fahrzeugen pro Stunde) und der benötigten Durchfahrzeiten (in Sekunden) durchgeführt werden. Diese Darstellung der Verkehrsstärke-Widerstands- bzw. Auslastungs-Zeit-Diagramme erlaubt einerseits die detaillierte Plausibilisierung der Daten und ermöglicht andererseits die visuelle Festlegung der Kapazität des Abbiegers.

Derart aufbereitete Datensätze wurden für jeden einzelnen der 23 Knoten erzeugt. Die so entstandenen einzelnen Datensätze wurden für die anschliessende Analyse zu einem Gesamtdatensatz zusammengefügt.

3.4.2 Ermittlung von Kennwerten

Die nachfolgende Schätzung der CR-Funktionen benötigt die Vorgabe von Kennwerten als Eichungsgrundlage für die Funktionsverläufe. Aus den aufbereiteten Daten konnten je Knoten und Abbieger Werte für folgende Kenngrössen herausgelesen werden:

- die im unbelasteten Zustand für den Abbiegevorgang benötigte Zeit (t_0):
Diese ist abhängig von der Ausdehnung des Knotens und vom Abbiegevorgang (Mittelwerte je Knoten- und Abbiegertyp cf. Tab. 2).
- die Knoten- und Abbiegekapazitäten:
Diese entspricht der maximalen Anzahl Fahrzeuge, die innert einer Zeiteinheit (hier einer Stunde) passieren können (Mittelwerte je Knoten- und Abbiegertyp cf. Tab. 3). In makroskopischen Verkehrsmodellen kann keine harte Kapazitätsgrenze abgebildet werden, da dies zu Instabilitäten bei den Umlagungen führen würde; d.h., die CR-Funktionen bilden (wie in Abschnitt 2.2 beschrieben) immer auch einen Verlauf im Überlastbereich ab. Ein expliziter Abgleich mit den Werten aus den einschlägigen VSS-Normen ist hier nicht möglich, da diese immer auch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Abbiegeströmen an einem Knoten berücksichtigen. Die Grössenordnungen und relativen Verhältnisse der hier ermittelten Werte entsprechen jedoch jenen in den VSS-Normen *SN 640 022* (ungeregelte Knoten; VSS 1999), *SN 640 0224a* (Kreisel; VSS 2006) und *SN 640 023a* (LSA; VSS 2008).

Die in den nachfolgenden Tabellen aufgezeigten Werte sind als mittlere Richtwerte zu verstehen, die bei einer Anwendung der nachfolgend geschätzten CR-Funktionen in einem Verkehrsmodell verwendet und nach Bedarf (z.B. abhängig von lokalen Gegebenheiten oder der konkreten Ausgestaltung eines bestimmten Knotens) angepasst werden können. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die CR-Funktionen, und somit auch die t_0 -Werte des Knotens und des Abbiegers additiv wirken, für einen Abbiegestrom also die Werte des Knoten- und Abbiegertyps zusammengezählt werden.

Tab. 2 Richtwerte für Knoten- und Abbieger-Grundzeiten (t_0)

Knoten- / Abbiegertyp	t_0 [s]	
	innerorts	sonstige
Ungeregelt	0	0
(1) Hauptstrom → Hauptstrom / Hauptstrom → Nebenstrom, rechts (vortrittsberechtigt)	1	0
(2) Hauptstrom → Nebenstrom, links (nicht vortrittsberechtigt)	3	4
(3) Nebenstrom → Hauptstrom, rechts (nicht vortrittsberechtigt)	4	5
(4) Nebenstrom → Hauptstrom, links / Nebenstrom → Nebenstrom (nicht vortrittsber.)	5	6
Kreisel	3	5
(5) rechts	5	7
(6) geradeaus	8	10
(7) links	10	12
LSA	6	4
(8) Hauptstrom → Hauptstrom	5	6
(9) Hauptstrom → Nebenstrom	7	10
(10) Nebenstrom → Hauptstrom / Nebenstrom → Nebenstrom	9	15

Tab. 3 Richtwerte für Knoten- und Abbieger-Kapazitäten

Knoten- / Abbiegertyp	Kapazität [Fzg/h]	
	innerorts	sonstige
Ungeregelt	2'000	2'500
(1) Hauptstrom → Hauptstrom / Hauptstrom → Nebenstrom, rechts (vortrittsberechtigt)	1'200	1'500
(2) Hauptstrom → Nebenstrom, links (nicht vortrittsberechtigt)	900	1'000
(3) Nebenstrom → Hauptstrom, rechts (nicht vortrittsberechtigt)	600	600
(4) Nebenstrom → Hauptstrom, links / Nebenstrom → Nebenstrom (nicht vortrittsber.)	400	400
Kreisel	2'300	2'600
(5) rechts	900	1'200
(6) geradeaus	900	1'200
(7) links	900	1'200
LSA	2'500	3'000
(8) Hauptstrom → Hauptstrom	1'200	1'200
(9) Hauptstrom → Nebenstrom	1'000	1'000
(10) Nebenstrom → Hauptstrom / Nebenstrom → Nebenstrom	1'000	1'000

4 Schätzung der CR-Funktionen

4.1 Datenlage

Die gemäss dem beschriebenen Vorgehen aufbereiteten Daten für die 23 vorliegenden Knoten wurden anschliessend für die Kalibration der Parameter der CR-Funktionen für die einzelnen Knotentypen verwendet. Der aufbereitete Datensatz beinhaltet insgesamt 143'181 Beobachtungen, deren Aufteilung auf die einzelnen Knoten- und Abbiegertypen aus Tab. 4 ersichtlich ist.

Tab. 4 Zuordnung der Daten zu Knoten- und Abbiegertypen

Knoten- / Abbiegertyp	# Beobachtungen	
	innerorts	sonstige
Ungeregelt	10'279	8'411
(1) Hauptstrom → Hauptstrom / Hauptstrom → Nebenstrom, rechts (vortrittsberechtigt)	5'390	4'066
(2) Hauptstrom → Nebenstrom, links (nicht vortrittsberechtigt)	459	692
(3) Nebenstrom → Hauptstrom, rechts (nicht vortrittsberechtigt)	2'382	1'460
(4) Nebenstrom → Hauptstrom, links / Nebenstrom → Nebenstrom (nicht vortrittsber.)	2'048	2'193
Kreisel	9'305	86'018
(5) rechts	2'383	28'287
(6) geradeaus	4'052	35'150
(7) links	2'870	22'581
LSA	17'591	11'577
(8) Hauptstrom → Hauptstrom	8'736	4'689
(9) Hauptstrom → Nebenstrom	5'620	4'545
(10) Nebenstrom → Hauptstrom / Nebenstrom → Nebenstrom	3'235	2'343

Für sämtliche Knoten- und Abbiegertypen sowie deren Kombinationen mit der örtlichen Lage liegen somit genügend Datenpunkte für die nachfolgende Schätzung der CR-Funktionen vor. Wenngleich für einige Knotentypen nur wenige verschiedene Knoten in der Datengrundlage vorhanden sind, erlauben die grosse Anzahl an Einzelfahrzeugbeobachtungen und Verknüpfung der Daten dennoch eine robuste Auswertung. Dies wird auch durch die Plausibilität und Signifikanz der im nachfolgenden Abschnitt dargestellten Modellergebnisse verdeutlicht. Auch die im Vergleich zu den übrigen Abbiegertypen relativ geringe Anzahl an Beobachtungen für den Abbiegertyp (2) ist für die Schätzung des gewählten Modells dennoch ausreichend.

4.2 Kalibration der Parameter

Für die Schätzung der CR-Funktionen wurde wiederum die Statistiksoftware SPSS verwendet. Diese erlaubt die Spezifikation freier Funktionsformen, deren Parameter an eine bestehende Datengrundlage angepasst werden können. Im vorliegenden Fall wurden für beide CR-Funktionstypen (logistisch und sigmoidal) die Funktionen entsprechend der Programmsyntax eingegeben und mit den Inputdaten (Kombinationen aus Knoten- und Abbiegerbelastungen und Durchfahrtszeiten) verknüpft. Der Schätzalgorithmus optimiert die Funktionsverläufe so, dass die Summe der quadrierten Differenzen zwischen den beobachteten Daten und jenen, die durch die parametrisierte Funktion vorgegeben werden, minimal wird (Methode der kleinsten Quadrate). Der resultierende Parametersatz ist somit jener, für den die Funktionsverläufe am besten an die empirischen Daten angepasst sind.

Für jeden der drei Knotentypen wurde sowohl die logistische als auch die sigmoidale Formulierung getestet und am Ende jene Funktion beibehalten, deren Verlauf für den jeweiligen Typ am besten passt. Die Schätzung wurde als iteratives Verfahren durchgeführt und von Schritt zu Schritt entschieden, welche Parameter für jeden Abbiegertyp separat geschätzt werden konnten und bei welchen die Differenzen so gering waren, dass auf einen gemeinsamen Parameter abgestellt wurde. Die zentralen Entscheidungskriterien sind hierbei die Gesamtmodellgüte (d.h., die Passgenauigkeit der Kurve) sowie die statistischen Signifikanzen der einzelnen Parameter (d.h., der Umstand, ob die Differenzierung der Parameter einen mit ausreichender Sicherheit nicht zufällig entstandenen Effekt abbildet).

4.3 Ergebnisse: Parameter und Modellgüten

Die Ergebnisse der Modellschätzungen sind aus Tab. 5 ersichtlich. Aus Platzgründen sind die Abbiegertypen hier nicht ausgeschrieben, sondern gemäss der in den vorigen Tabellen definierten Nummerierung aufgelistet. Parameterwerte, welche auf dem 95%-Niveau statistisch signifikant sind, sind in der Tabelle *kursiv* abgedruckt; dies entspricht einem *t*-Wert von 1.96 oder mehr. Die anderen Werte sind mindestens auf dem 80%-Niveau statistisch signifikant; dies entspricht einem *t*-Wert von 1.28 oder mehr. Die *t*-Werte sind in der Tabelle jeweils in Klammern angegeben.

Tab. 5 Schätzung der CR-Funktionen: Ergebnisse (Parameterwerte und Modellgüten)

Knoten- / Abbiegertyp	Funktionstyp	Parameter (<i>t</i> -Wert)				Modellgüte <i>R</i> ²
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>f</i>	
Ungeregelt						
Knoten innerorts		79.2 (2.2)				
Knoten sonstige		31.5 (2.2)	6.2 (2.8)	1.1 (29.6)	0.1 (1.5)	
Abbieger (1)	logistisch	22.1 (115.4)		5.9 (32.6)		0.508
Abbieger (2)		20.6 (10.9)	3.4 (1.5)	5.6 (7.8)	24.0 (42.8)	
Abbieger (3)		22.6 (67.8)		5.9 (30.2)		
Abbieger (4)		26.5 (94.8)		6.8 (23.8)		

Kreisel						
Knoten innerorts		7.0 (64.0)		18.9 (15.7)		
Knoten sonstige		5.0 (48.2)	8.6 (4.4)	9.5 (15.6)	37.2 (5.1)	
Abbieger (5)	logistisch					0.549
Abbieger (6)		17.3 (214.4)	0.1 (1.6)	3.3 (72.5)	15.7 (4.0)	
Abbieger (7)						

LSA						
Knoten innerorts				11.6 (7.0)		
Knoten sonstige				9.5 (5.8)	1.1 (3.9)	
Abbieger (8)	sigmoidal	-	0.5 (10.7)	21.0 (23.1)		0.495
Abbieger (9)				30.2 (31.3)	4.2 (21.1)	
Abbieger (10)				51.6 (47.5)		

Mit dem oben beschriebenen iterativen Vorgehen war es möglich, für sämtliche Knoten- und Abbiegertypen statistisch signifikante Modellparameter zu schätzen. Die Modellgüten liegen durchgehend bei ca. $R^2 = 0.5$. Dies bedeutet, dass die parametrisierten CR-Funktionen ungefähr die Hälfte der in den Daten vorhandenen Varianz erklären. Der Anteil der nicht erklärten Varianz ist somit relativ hoch, was aber angesichts der Versuchsanlage mit an die Realität angepassten Simulationsdaten auch zu erwarten war. Die restliche Varianz ergibt sich grösstenteils aus lokalen Gegebenheiten, wie z.B. der Topographie der

Knoten, der Lage von Hindernissen (wie Fussgängerübergänge und ÖV-Haltestellen) und dem örtlichen Fahrverhalten (welches in der *Vissim*-Simulation jedes einzelnen Knotens einzeln kalibriert wurde). Diese Effekte können aber in CR-Funktionen, welche für die Ermittlung von Richtwerten zur Anwendung in Verkehrsmodellen angelegt sind, nicht umfassend berücksichtigt werden. Eine noch differenziertere Typisierung der Knoten würde es erlauben, diese Effekte implizit zu berücksichtigen, würde aber eine substanziiell grössere Datengrundlage voraussetzen. Falls in einem konkreten Anwendungsfall solche Effekte bekannt sind, welche eine Abweichung der verwendeten Parametrisierung von den hier ermittelten Standardwerten rechtfertigt oder notwendig macht, so kann diese durch den Anwender manuell angepasst werden. Dabei sollten aber jeweils die resultierenden Verläufe der CR-Funktionen sorgfältig plausibilisiert werden.

4.4 Ergebnisse: Verläufe der CR-Funktionen

Eine Interpretation der in Tab. 5 aufgeführten Parameterwerte wird erst durch eine Visualisierung der resultierenden Funktionsverläufe möglich. Diese sind aus den nachfolgenden Abbildungen ersichtlich:

- Abb. 14 zeigt den Verlauf der Abbieger-CR-Funktionen für die vier Abbiegertypen eines unregelmässigen Knotens.
- Abb. 15 zeigt den Verlauf der Knoten-CR-Funktionen für die beiden Lagetypen von unregelmässigen Knoten.
- Abb. 16 zeigt den Verlauf der Abbieger-CR-Funktionen für die drei Abbiegertypen eines Kreisels.
- Abb. 17 zeigt den Verlauf der Knoten-CR-Funktionen für die beiden Lagetypen von Kreiseln.
- Abb. 18 zeigt den Verlauf der Abbieger-CR-Funktionen für die drei Abbiegertypen eines LSA-Knotens.
- Abb. 19 zeigt den Verlauf der Knoten-CR-Funktionen für die beiden Lagetypen von LSA-Knoten.

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass die Knoten- und die Abbieger-CR-Funktionen in den Verkehrsmodellen jeweils additiv wirken, die Durchfahrtszeit eines Abbiegestroms also sowohl von dessen Belastung als auch von jener des Gesamtknotens, also aller Abbiegerrelationen zusammen, abhängt. Die Knoten-CR-Funktionen sind also als Zuschlag zu verstehen, über den die gegenseitige Beeinflussung der Abbieger an einem Knoten näherungsweise abgebildet wird. Diese Funktionen bilden einen Teil der durch die Abbieger-CR-Funktionen nicht erklärten Residuen ab und sind somit nicht in gleicher Weise direkt interpretierbar wie die Verläufe der Abbieger-CR-Funktionen.

Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass aus den geschätzten Parameterwerten für sämtliche Knoten- und Abbiegertypen plausible Kurvenverläufe für die CR-Funktionen resultieren. Sowohl die Verläufe an sich (insbesondere der Beginn der Steigung relativ zur Kapazität) als auch deren relative Lage (also z.B. längere mittlere Wartezeiten für einen nicht vortrittsberechtigten Linksabbieger als für einen Hauptstrom) sind jeweils in sich schlüssig und logisch. Die Knoten-CR-Funktionen geben vor allem die unterschiedlichen Netzkapazitäten zwischen dem Inner- und Ausserortsbereich wieder.

Ebenfalls in den Abbildungen enthalten sind die bisher in Verkehrsmodellen (z.B. im Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich GVM ZH – dies ist auch einer der im nachfolgenden Kapitel betrachteten Anwendungsfälle) hinterlegten Abbiegewiderstände für die einzelnen Knoten- und Abbiegertypen. Wie zu sehen ist, wird in der gängigen Praxis der Verkehrsmodellierung bisher meist mit pauschalen Zuschlägen pro Abbieger gerechnet, welche nicht von der Kapazitätsauslastung abhängig sind. Im untersuchten Beispiel sind einzig die LSA-Knoten bereits heute mit auslastungsabhängigen Zeitzuschlägen versehen. Bei allen Knotentypen bringt die Verwendung der hier neu geschätzten CR-Funktionen und deren Parametrisierung jedoch einen Mehrwert: die unregelmässigen Knoten und Kreiseln erhalten eine differenzierte Abbildung von auslastungsabhängigen Zeiten und somit eine realitätsgetreuere Abhängigkeit des

Routenwahlverhaltens vom Verkehrsgeschehen; bei den LSA führen die neuen Funktionen zu stabileren Verläufen im Überlastbereich und somit zu einer verbesserten Abbildung der Ausnutzung der vorhandenen Kapazitäten, die teilweise auch durch verkehrsabhängige Steuerungen erzielt werden kann.

Als Zwischenfazit kann die Schätzung der CR-Funktionen mit den vorhandenen Simulationsdaten als zielführend angesehen werden, und es ist zu erwarten, dass deren Anwendung zu einer realitätsnäheren Abbildung der Fahrtzeiten in belasteten Verkehrsmodellnetzen führen wird.

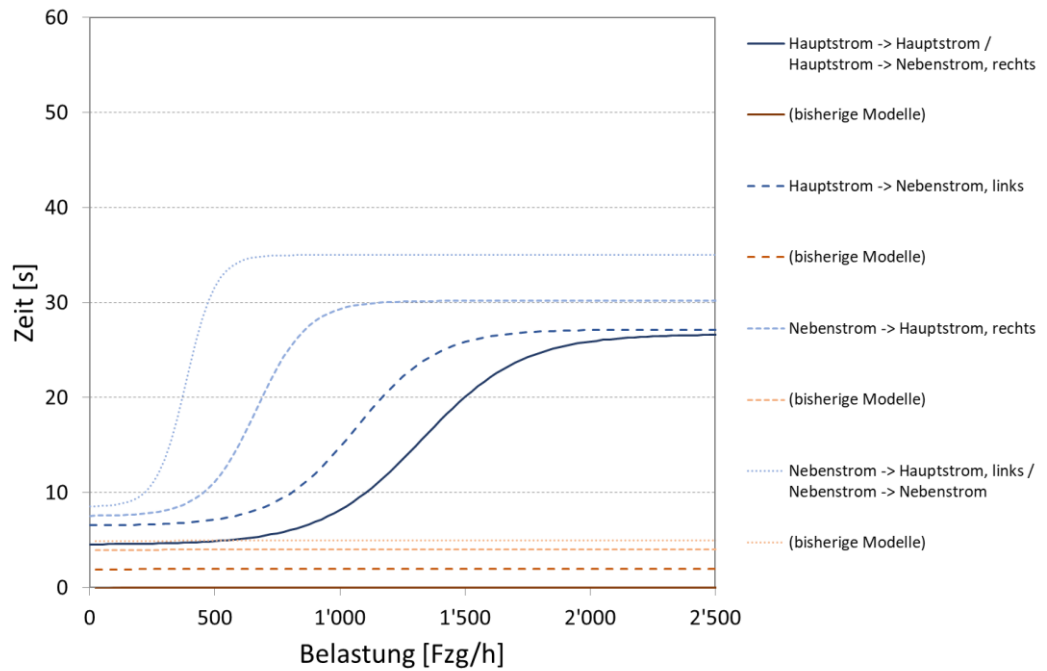


Abb. 14 Abbieger-CR-Funktionen für unregelte Knoten.

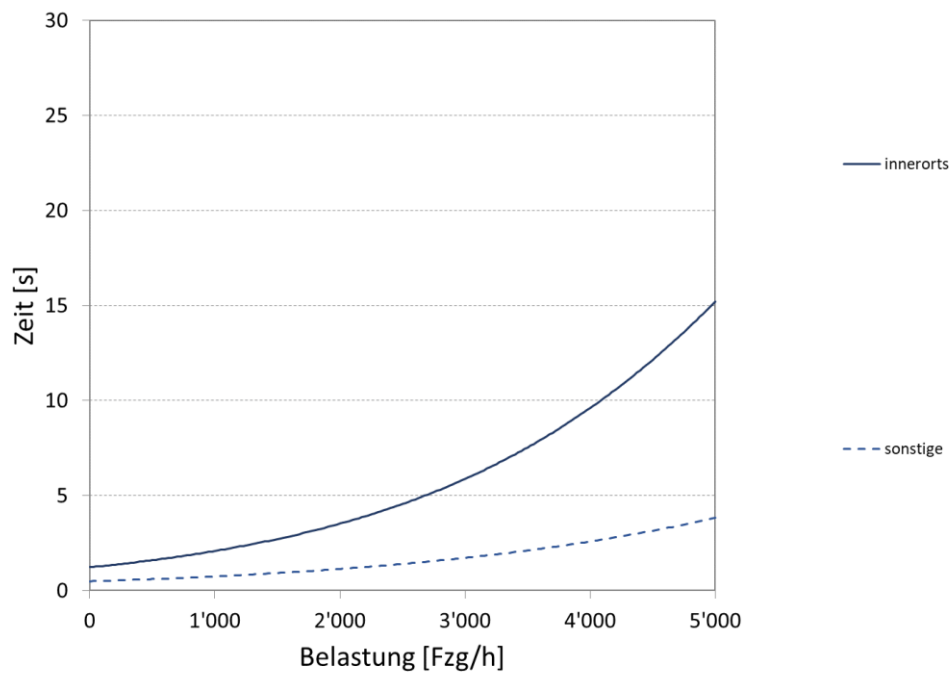


Abb. 15 Knoten-CR-Funktionen für unregelte Knoten.

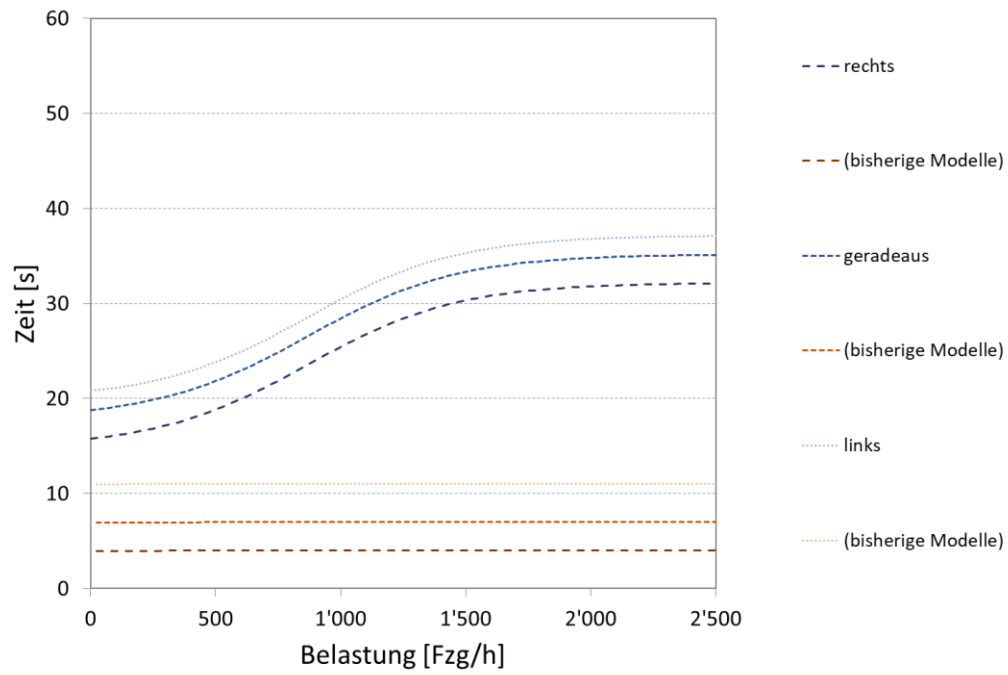


Abb. 16 Abbieger-CR-Funktionen für Kreisell.

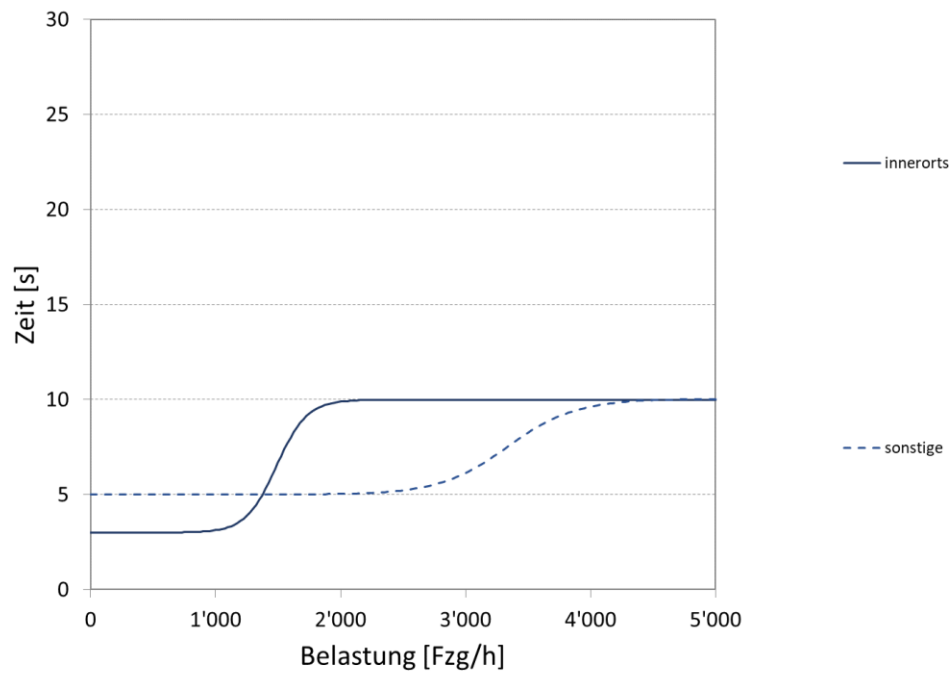


Abb. 17 Knoten-CR-Funktionen für Kreisell.

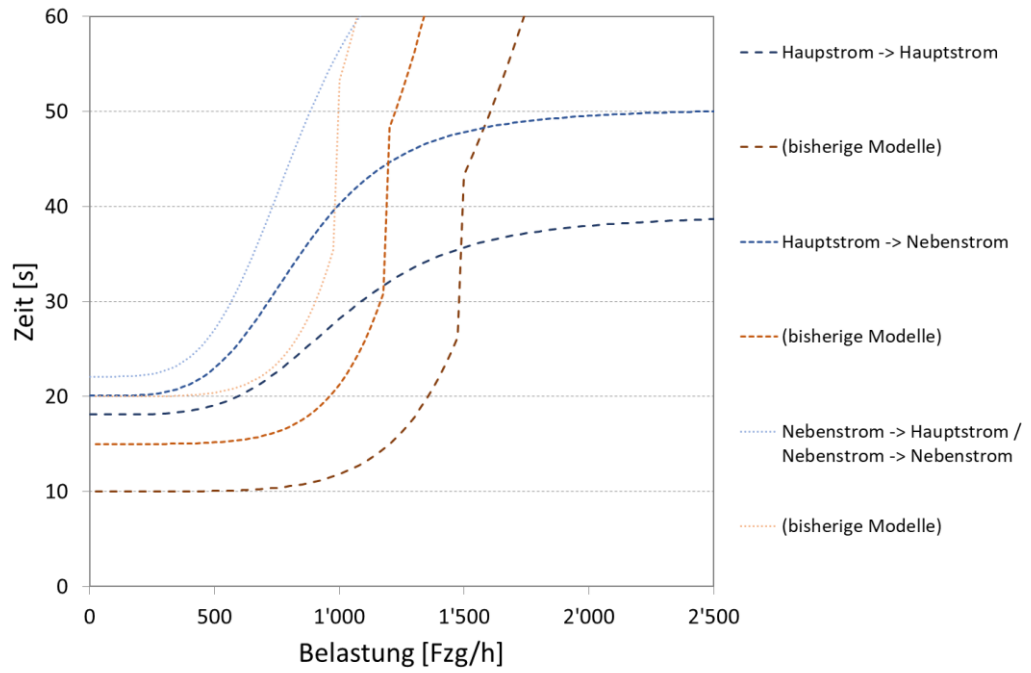


Abb. 18 Abbieger -CR-Funktionen für Lichtsignalanlagen.

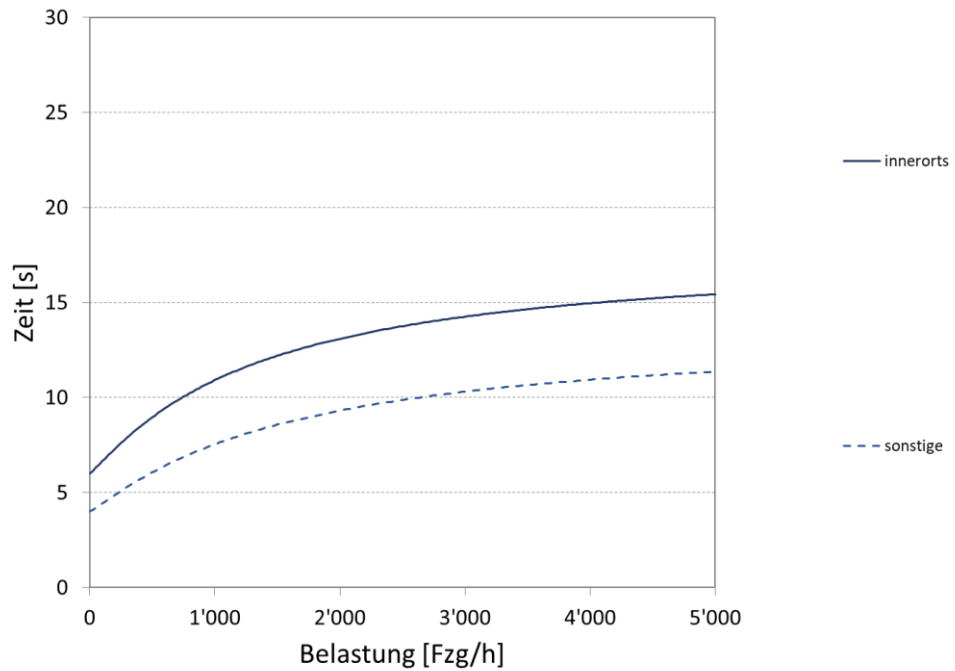


Abb. 19 Knoten-CR-Funktionen für Lichtsignalanlagen.

5 Validierung der CR-Funktionen

5.1 Umsetzung in Verkehrsmodellen

Die neu geschätzten CR-Funktionen sollten in konkreten Anwendungsfällen getestet werden, um die Plausibilität von deren Effekten zu überprüfen. Um die Entstehung von Zufallseffekten (z.B. aufgrund lokaler Gegebenheiten oder Messfehlern in den Vergleichsdaten) so gut wie möglich zu vermeiden und die Plausibilisierung so breit wie möglich abzustützen, wurden die Funktionen in zwei verschiedenen Verkehrsmodellen getestet.

5.1.1 Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich (GVM ZH)

Das GVM ZH wurde zuletzt umfassend auf einen Modellzustand 2013 kalibriert (Vrtic *et al.*, 2015). Dieser diente u.a. auch als Grundlage für die Überprüfung der neu entwickelten Strecken-CR-Funktionen im Projekt VSS 2015/113 (Vrtic *et al.*, 2018). Somit eignet sich das Modell gut zur Ergänzung dieser Arbeiten, welche die hier durchgeführten Neuschätzungen der Knoten-CR-Funktionen darstellen.

5.1.2 Gesamtverkehrsmodell des Kantons Aargau (GVM AG)

Das GVM AG wurde kürzlich neu aufgebaut und liegt in einem kalibrierten Zustand für das Jahr 2015 vor (Vrtic *et al.*, 2019). Auch hier wurden die im VSS-Projekt 2015/113 ermittelten Strecken-CR-Funktionen verwendet, die Vergleichsgrundlage ist also ähnlich gelagert wie beim GVM ZH.

5.1.3 Vorgehen

Die aus den in Kapitel 4 beschriebenen Modellschätzungen resultierenden Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen wurden zur Validierung in den beiden Verkehrsmodellen implementiert. Hierzu wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Einbau der Knoten- & Abbiegertypisierung ins Modell:
 - Zuweisung der CR-Funktionen zu den Typen;
 - Setzung der Parameter der CR-Funktionen;
- Attributierung der einzelnen Knoten & Abbieger:
 - Zuweisung des Knotentyps & der Lage (innerorts / sonstige);
 - Zuweisung der Abbiegertypen am Knoten.

In *Visum* kann jedem Knoten und Abbieger eine Typnummer zugewiesen werden. Dies wurde in beiden Modellen für alle Knoten, die auf einer der gemessenen Routen (cf. die Beschreibung der Validierungsgrundlage im nachfolgenden Abschnitt) liegen, durchgeführt. Die Zuweisung wurde wo möglich über Filterbedingungen automatisiert durchgeführt, erforderte aber anschliessend noch eine Plausibilisierung und manuelle Nachbearbeitung. Dies bedeutet auch, dass die Zuweisung nur für die untersuchten Knoten, und nicht flächendeckend für das ganze Modell, erfolgte.

Anschliessend erfolgte die Zuteilung der CR-Funktionen zu den einzelnen Knoten und Abbiegern. Hierfür mussten die CR-Funktionen definiert werden: jeder Knoten und Abbieger erhält eine Zuweisung des ihm zugehörigen Funktionstyps (sigmoidal bzw. logistisch) und des entsprechenden Parametersatzes sowie des Standardwerts für die unbelastete Zeit t_0 . Ein Beispiel einer solchen Zuweisung (Knotentyp "ungeregelt innerorts", Abbiegertyp "Hauptstrom → Hauptstrom / Hauptstrom → Nebenstrom, rechts (vortrittsberechtigt)" zeigen Abb. 20 und Abb. 21.

Parameter für CR-Funktion

Nummer:

Name:

Typ:

Funktion:

$$t_{\text{cur}} = t_0 + \frac{a}{1 + f \cdot e^{(b-d \cdot \text{sat})}}$$

wobei $\text{sat} = \frac{q}{q_{\text{max}} \cdot C}$

Parameter:
 a =
 b =
 c =
 d =
 f =

Gesperrt

Abb. 20 Parametrisierung der Knoten-CR-Funktion "ungeregelt innerorts" in Visum.

Parameter für CR-Funktion

Nummer:

Name:

Typ:

Funktion:

$$t_{\text{cur}} = t_0 + \frac{a}{1 + f \cdot e^{(b-d \cdot \text{sat})}}$$

wobei $\text{sat} = \frac{q}{q_{\text{max}} \cdot C}$

Parameter:
 a =
 b =
 c =
 d =
 f =

Gesperrt

Abb. 21 Parametrisierung der Abbieger-CR-Funktion "Hauptstrom → Hauptstrom / Hauptstrom → Nebenstrom, rechts (vortrittsberechtigt)" in Visum.

5.2 Vergleichsdaten

Um die in den Verkehrsmodellen abgebildeten Fahrtzeiten validieren zu können, ist jeweils ein Satz an Vergleichsdaten vonnöten. Diese bestehen hier aus Reisezeitmessungen, welche den Abgleich der Modellwerte mit real erhobenen Daten erlauben. So kann eruiert werden, ob der Einbau der neuen Knoten-CR-Funktionen zu einer Verbesserung der aus dem Modell resultierenden Fahrtzeiten führt.

5.2.1 Reisezeitenmonitoring Kanton Zürich

Im Kanton Zürich wurden im Jahr 2016 für 50 Routen (jeweils in zwei Richtungen, insgesamt also 100 Routen) Bluetooth-Messungen für ein Reisezeitenmonitoring durchgeführt (Tørholm *et al.*, 2016). Je nach Datenlage (Anzahl Messungen) werden dort Fahrtzeiten für den Gesamtverkehr (DWV zwischen 6:00 und 20:00), die Morgenspitzenstunde (MSP) und/oder die Abendspitzenstunde (ASP) ausgewiesen. Im Mittel wurden im Reisezeitenmonitoring zwischen 12% und 14% aller im Messzeitraum vorbeifahrenden Fahrzeuge erfasst. So stellt das Reisezeitenmonitoring eine statistisch abgesicherte Stichprobe dar, welche bereits bei einer Abdeckung von 5% gegeben wäre. (Ordon, 2016). Für Routen ohne ausreichend grosse Datengrundlage werden keine Werte ausgewiesen. Die Messwerte für 17 Routen mit mehr als 100 Einzelfahrzeugmessungen in mindestens einer Fahrtrichtung (34 Beobachtungen mit Hin- und Rückweg; cf. Abb. 22) wurden aus dem Bericht zum Reisezeitenmonitoring herausgelesen und als Vergleichswerte in eine entsprechende Tabelle eingegeben. Aufgrund von Überlappungen können in der Abbildung nicht alle Routen vollständig dargestellt werden.

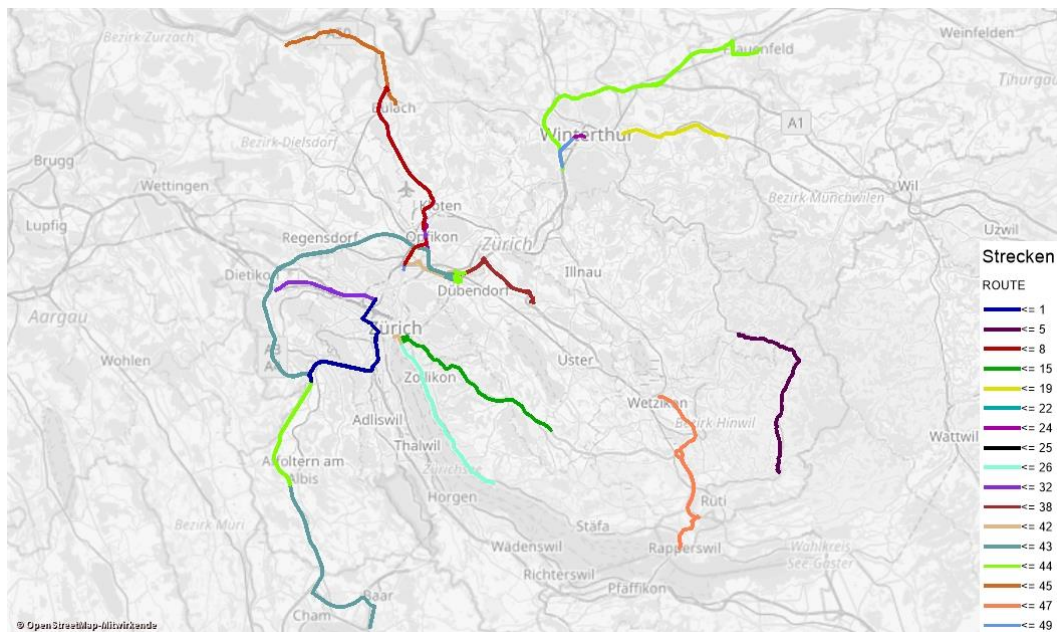


Abb. 22 Reisezeitenmonitoring Kanton ZH: verwendete Routen
(Kartenmaterial © OpenStreetMap)

Die Routen bestehen aus einer gut durchmischten Stichprobe von kürzeren und längeren Fahrten bis zu 40 Minuten (cf. Abb. 23) sowie verschiedenen Knotentypen mit Geradeausfahren und Abbiegern in alle Richtungen, so dass der Gesamtsatz an CR-Funktionen für alle Knoten- und Abbiegertypen validiert werden kann.

Aus Abb. 24 ist zudem ersichtlich, dass die Fahrtzeiten in der ASP teilweise deutlich länger sind als im DWV (im Mittel um ca. 26%), also zumindest in der ASP tendenziell eher hohe Netzauslastungen vorliegen bzw. eine Tagesganglinie mit relativ stark ausgeprägten Verkehrsspitzen vorliegt. In einigen Fällen, in denen die schwächer belastete Fahrtrichtung betrachtet wird, liegen die ASP-Zeiten hingegen recht nahe am DWV. Insgesamt bietet der

Datensatz somit eine gute Abdeckung aller möglichen Verkehrszustände und erlaubt eine breit abgestützte Validierung der Modelle.

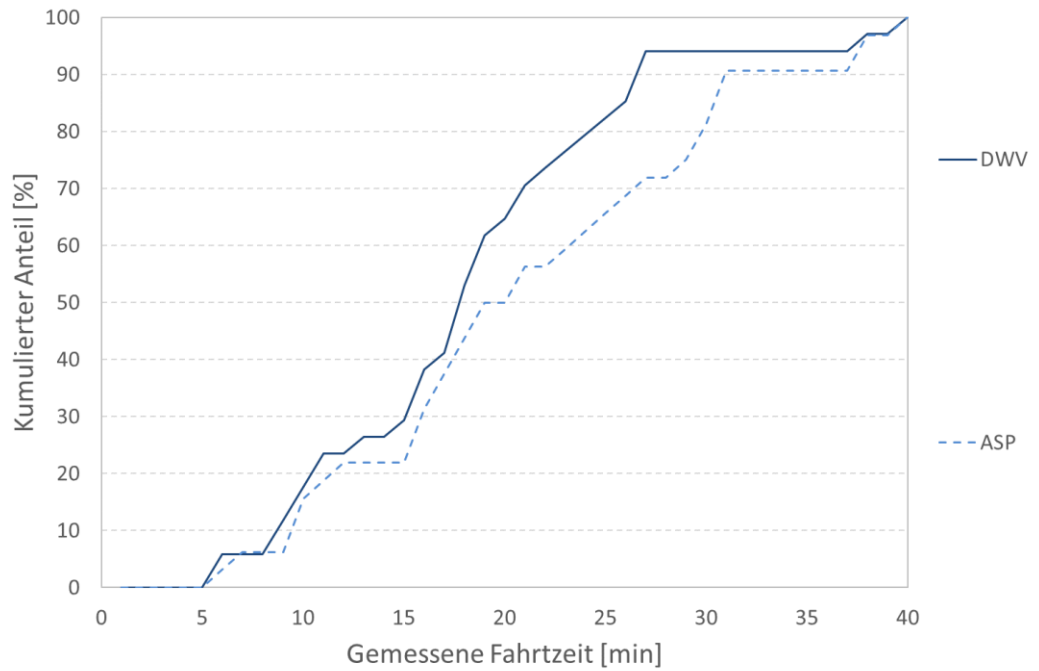


Abb. 23 Reisezeitenmonitoring Kanton ZH: Verteilung der Fahrtzeiten der verwendeten Routen.

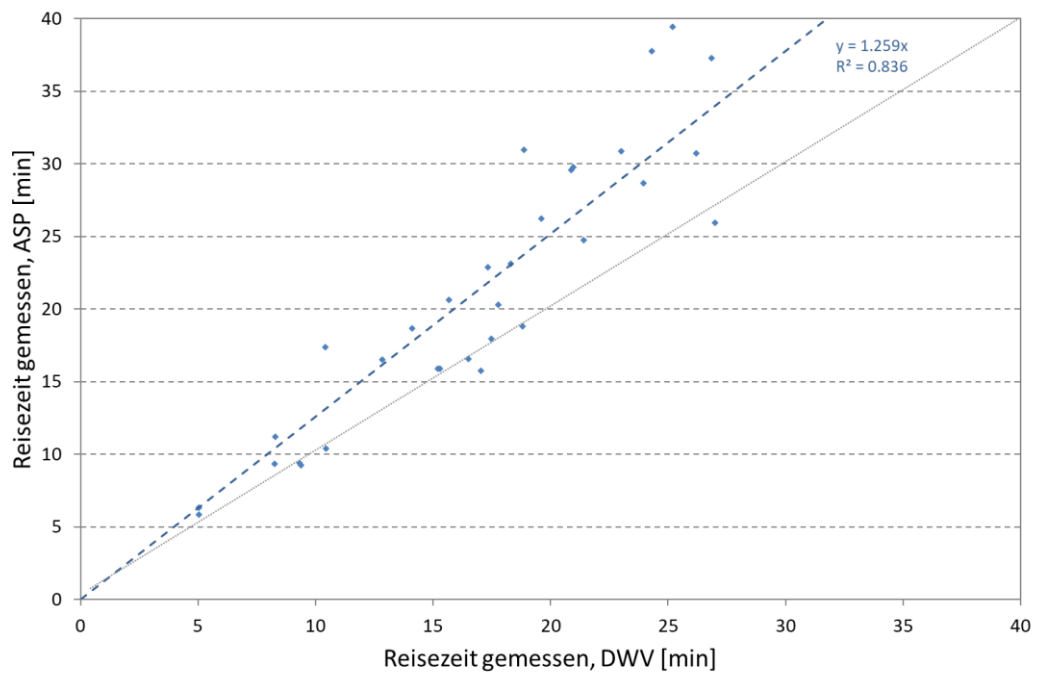


Abb. 24 Reisezeitenmonitoring Kanton ZH: Vergleich der Fahrtzeiten DWV vs. ASP.

5.2.2 Reisezeitmessungen Kanton Aargau

Im GVM AG war die Grundlage für die Validierung der Fahrtzeiten ein Satz aus 33 Routen; zu 11 davon (22 Beobachtungen mit Hin- und Rückrichtungen) liegen für die hier beabsichtigten Auswertungen verwendbare Daten vor (cf. Abb. 25).

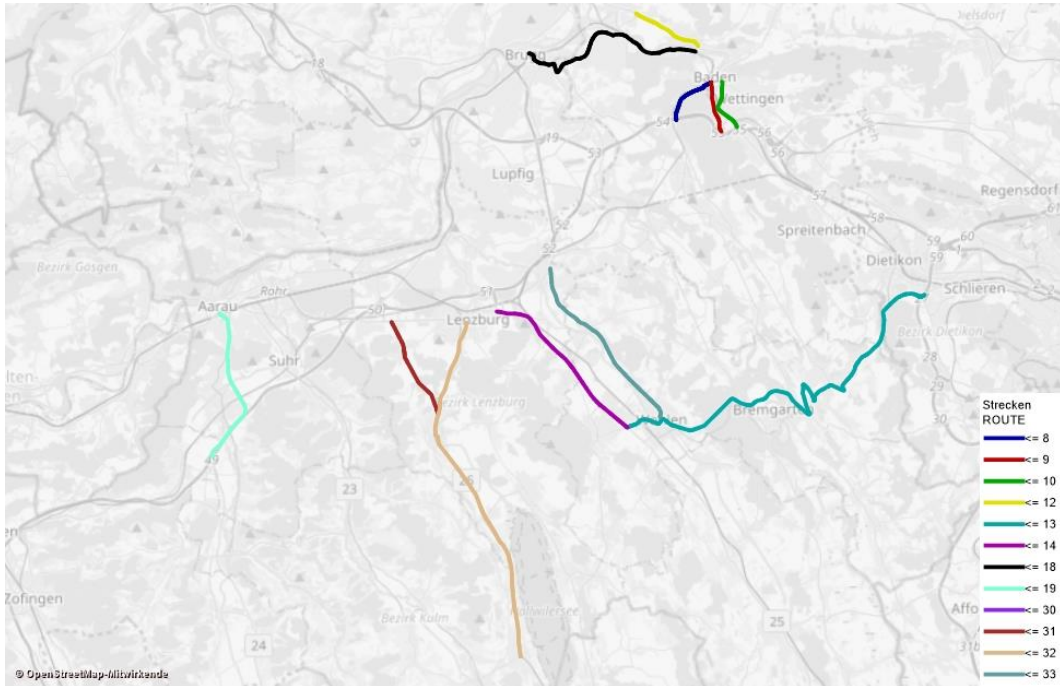


Abb. 25 Reisezeitmessungen Kanton AG: verwendete Routen
(Kartenmaterial © OpenStreetMap)

Die Zeiten wurden hier aus den für die Strecken verfügbaren Geschwindigkeitsprofilen (Daten aus Navigationsgeräten) für das Referenzjahr des GVM AG (2015) hergeleitet. Aus den Geschwindigkeiten für jede einzelne Stunde des Tages wurden so Fahrtzeiten für den DWV (im unbelasteten Netz) und die ASP (im belasteten Netz) ermittelt. Die Stichprobengrößen der Beobachtungen sind hier unbekannt, da der Datenlieferant diese nicht ausweist. Da die Datengrundlage aber aus weit verbreiteten Navigationsgeräten stammt und die daraus abgeleiteten Geschwindigkeiten auch für viele Modellerstellungen verwendet werden, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein ausreichend grosser Satz an Fahrzeugmessungen vorlag, um die Messungen als Vergleichsgrundlage für die hier vorgenommene zusätzliche Validierung verwenden zu können.

Die verwendeten Routen sind hier tendenziell eher kurz (bis zu 20 Minuten, cf. Abb. 26), beinhalten hauptsächlich Geradeausfahrer und befinden sich grösstenteils im Ausserortsbereich (Wege zwischen zwei Städten oder Dörfern).

Abb. 27 zeigt, dass hier die ASP-Zeiten durchwegs relativ nahe an jenen des DWV liegen (im Durchschnitt ca. 12% höher), die betrachteten Netzabschnitte also über den Tag verteilt eher homogen ausgelastet bzw. insgesamt weniger stark befahren sind. Aufgrund der vorwiegend ländlich gelegenen Routen erscheint dies plausibel.

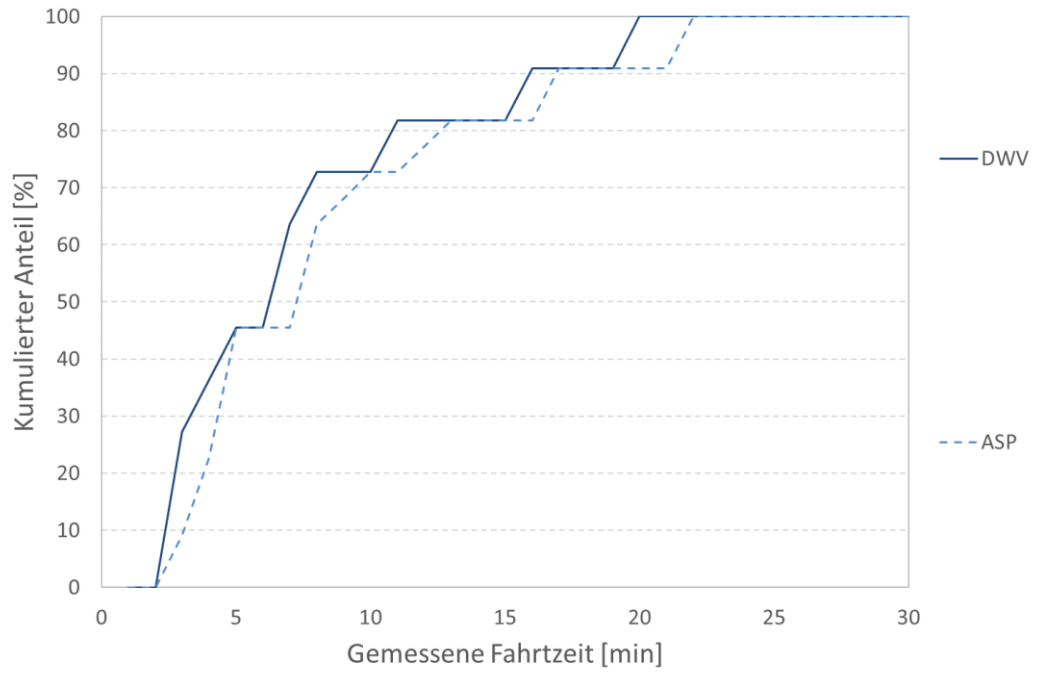


Abb. 26 Reisezeitmessungen Kanton AG: Verteilung der Fahrtzeiten der verwendeten Routen.

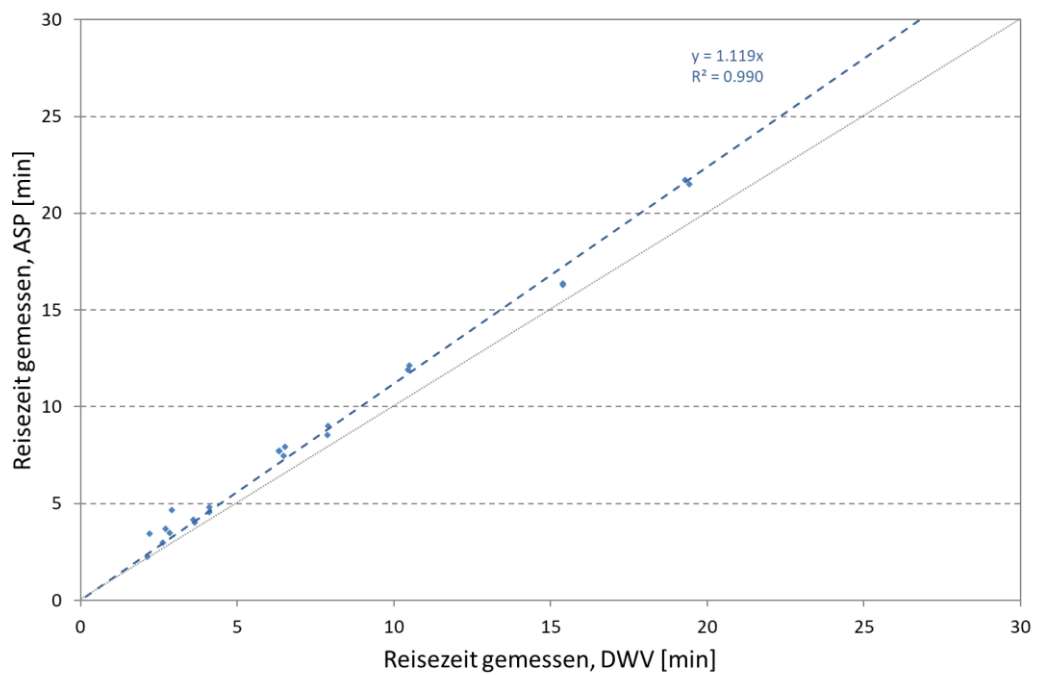


Abb. 27 Reisezeitenmonitoring Kanton AG: Vergleich der Fahrtzeiten DWV vs. ASP.

5.3 Modelltests

Die nachfolgend beschriebenen Auswertungen wurden jeweils für den durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) und die Abendspitzenstunde (17:00 – 18:00, ASP) durchgeführt.

Um den Vergleich zwischen den gemessenen und den im Modell abgebildeten Fahrtzeiten sauber durchführen zu können, ist eine genaue Nachverfolgung der gemessenen Routen unerlässlich. Hierzu wurden im Modell jeweils alle Strecken und Knoten, die zu einer analysierten Route gehören, ausgewählt und mittels eines entsprechenden Zusatzattributs gekennzeichnet. Dies erlaubt die nachfolgende Filtrierung der auszuwertenden Wege und das Auslesen von deren Fahrtzeiten. Ein Beispiel einer Route im GVM AG (zwischen Wohlen und Othmarsingen) ist in Abb. 28 dargestellt. Die dazwischenliegenden Knoten wurden entsprechend der in Kapitel 3 hergeleiteten Typisierung klassifiziert und sind farblich gleich codiert wie in Abb. 13.



Abb. 28 Beispielroute GVM AG (Kartenmaterial © OpenStreetMap).

Im Anschluss an die Aufbereitungsarbeiten an den Modellnetzen konnten die Fahrtzeiten für sämtliche betrachteten Routen aus den entsprechenden *Visum*-Listen herausgelesen werden. Dieser Schritt wurde sowohl für das Modell mit den alten, bisher in den Modellen verwendeten, und für jenes mit den neu implementierten Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen durchgeführt. Für jede der insgesamt 56 gemessenen Routen wurde das Vorgehen also viermal (je einmal im "alten" und im "neuen" Modell für den DWV und die ASP) durchgeführt, um alle Modellwerte zu ermitteln. Die so erhaltenen Fahrtzeiten wurden in dieselbe Tabelle übertragen, in der auch die Messdaten vorgehalten wurden, so dass die nachfolgend beschriebenen Vergleiche durchgeführt werden konnten. Die Aufzeichnung der entsprechenden Daten zu den modellierten Fahrtzeiten erlaubt somit den Vergleich beider Modellzustände mit den jeweiligen Messreihen und eine Abschätzung von deren Qualitätsverbesserung durch die neuen CR-Funktionen.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Kanton Zürich

DWV

Abb. 29 zeigt den Vergleich der Modellwerte mit dem Reisezeitenmonitoring für den DWV. Grau gestrichelt ist der Zielwert zu sehen: auf der Diagonalen würden bei einer 1:1-Übereinstimmung der beiden Datensätze sämtliche Punkte zu liegen kommen. Eine solche perfekte Übereinstimmung kann jedoch nie erreicht werden, da im Modell externe Faktoren, welche die Fahrtzeiten beeinflussen, nicht vollständig berücksichtigt werden können und natürlich auch die Messwerte Schwankungen aufweisen. Es ist jedoch zu sehen, dass die mittlere Abweichung zwischen den Modell- und Messwerten von 13.1% (mit den alten CR-Funktionen, im Diagramm als „Regression VSS 2015/113“ bezeichnet) auf 11.8% (mit den neuen CR-Funktionen, im Diagramm als „Regression SVI 2017/007“ bezeichnet) reduziert werden konnte und der Verlauf der Regressionsgerade sich wie erwünscht an die Diagonale annähert. Im Mittel verbessert die Verwendung der neu geschätzten CR-Funktionsverläufe die Abbildung der Fahrtzeiten im Modell also leicht (andererseits wird die Streuung der Werte auch marginal grösser, was den leicht tieferen Wert des Korrelationskoeffizienten R^2 erklärt).

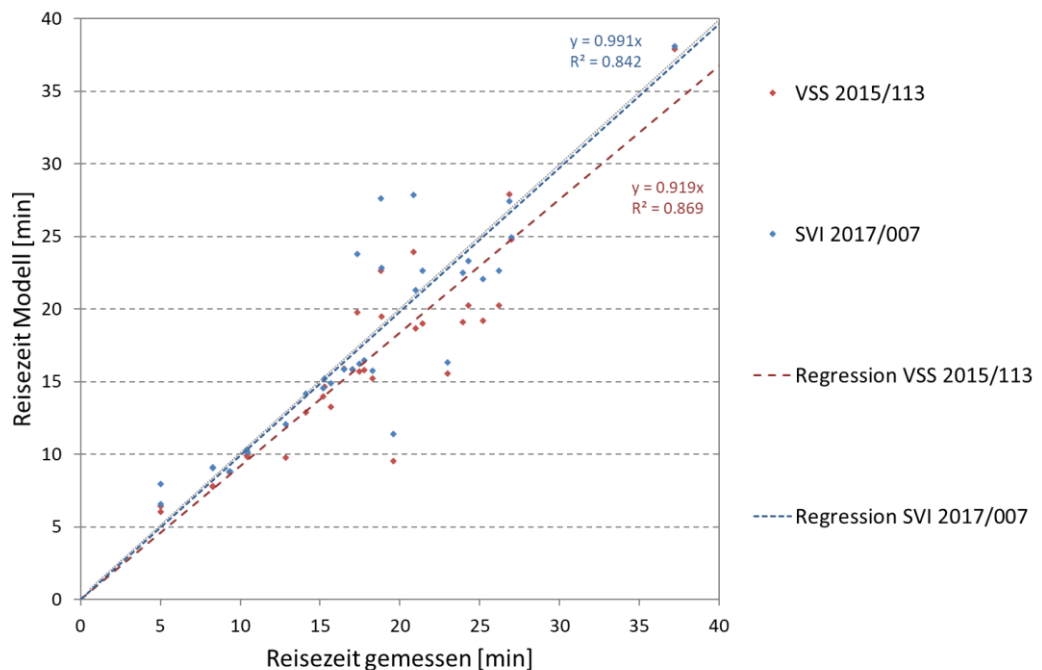


Abb. 29 Kanton ZH: Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

Abb. 30 hilft, diesen Eindruck zu bestätigen. Hier ist ersichtlich, dass für 23 der 34 verwendeten Messungen die Fahrtzeiten mit den neuen CR-Funktionen besser abgebildet werden als mit den alten CR-Funktionen. Die Verschlechterungen bewegen sich in den meisten (6 von 11) Fällen im Bereich unter einer Minute, wie Abb. 31 zeigt.

Dass die Verbesserungen relativ gesehen teilweise sehr substanziell sind, zeigen die Auswertungen der prozentualen Veränderungen der Abweichungen in Abb. 32. Unabhängig von der Länge der betrachteten Route konnten durch die Implementierung der neuen CR-Funktionen Verbesserungen von bis zu über 90% erreicht werden. Die Unabhängigkeit von der Distanz ist hier ebenfalls erfreulich, da die neuen CR-Funktionen so keine neuen unerwünschten Verzerrungen entlang der Weglängen bewirken.

Die Verteilung der Differenzen zwischen den alten und neuen Abweichungen in Abb. 33 verdeutlicht, dass in 68% der Fälle eine Verbesserung erzielt werden konnte und diese im Mittel substantieller sind als die wenigen Verschlechterungen.

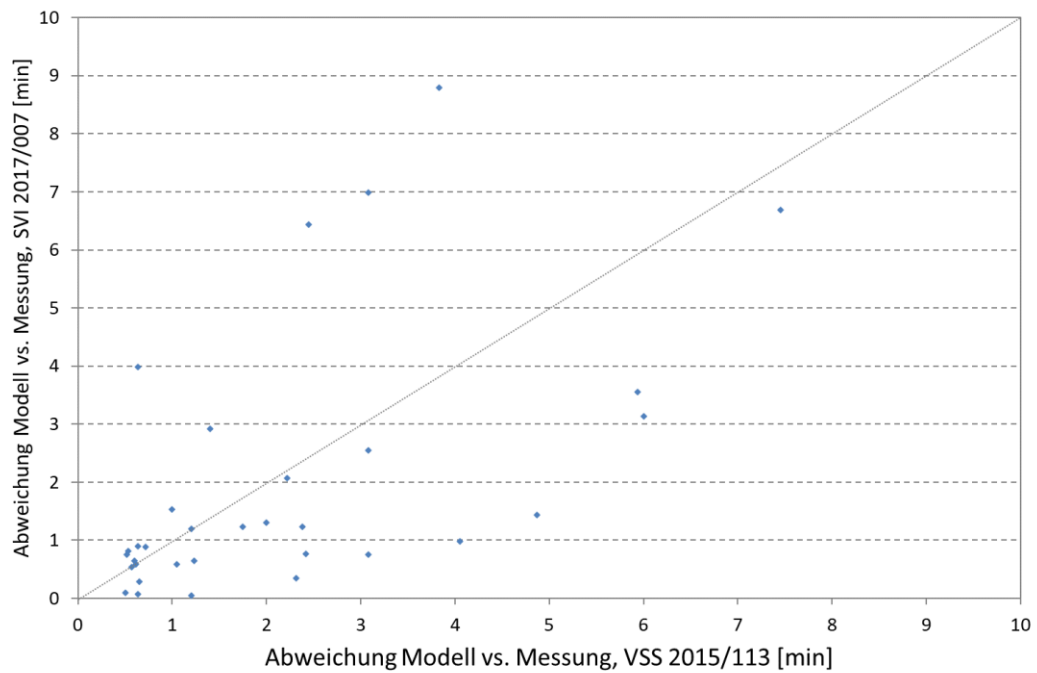


Abb. 30 Kanton ZH: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

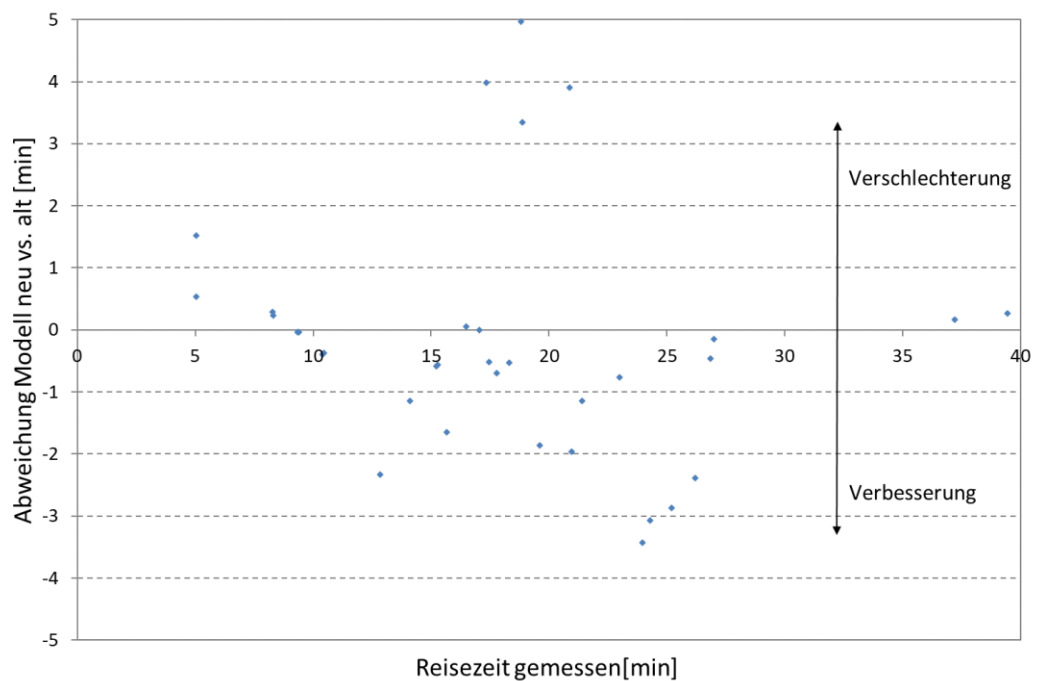


Abb. 31 Kanton ZH: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

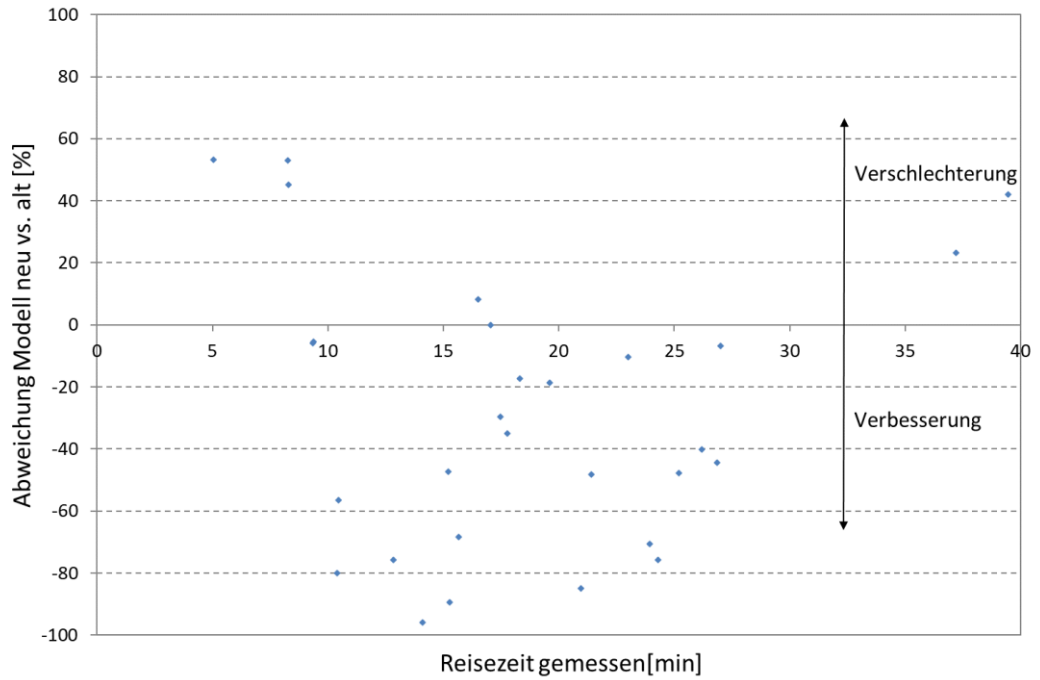


Abb. 32 Kanton ZH: Relative Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

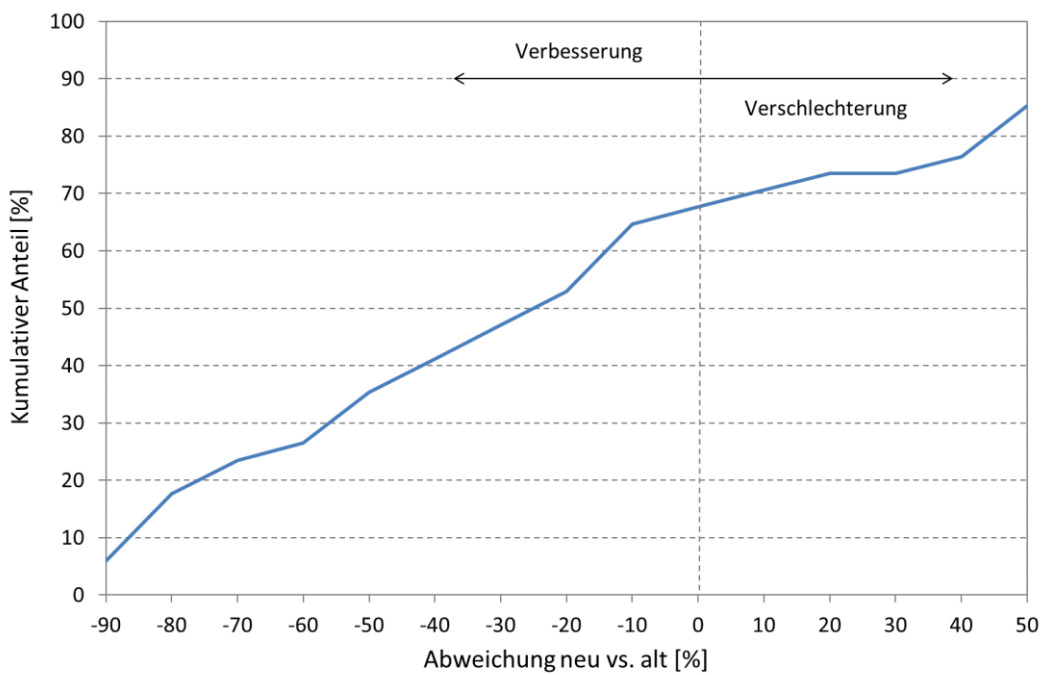


Abb. 33 Kanton ZH: Verteilung der relativen Verbesserungen und Verschlechterungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten (DWV).

ASP

In der ASP zeigt sich ein ähnliches Bild. Hier konnte die mittlere Abweichung zwischen Modell- und Messwert von 28.9% auf 24.0% reduziert werden (cf. Abb. 34). Da in den Spitzenstunden Kapazitätsengpässe deutlich häufiger sind und somit das Verkehrsgeschehen unregelmässiger und unvorhersehbarer wird, sind hier auch die Schwankungen in den Fahrtzeiten grösser. Daher war zu erwarten, dass die Abweichungen zwischen dem Modell und den Messungen einerseits grösser sein (und bleiben) würden als im DWV. Andererseits waren auch die durch die Implementierung der neuen Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen erzielten höheren Verbesserungen der Übereinstimmung zu erwarten, da gerade in den Spitzenstunden Knotenengpässe massgebender werden und diese neu verbessert abgebildet werden.

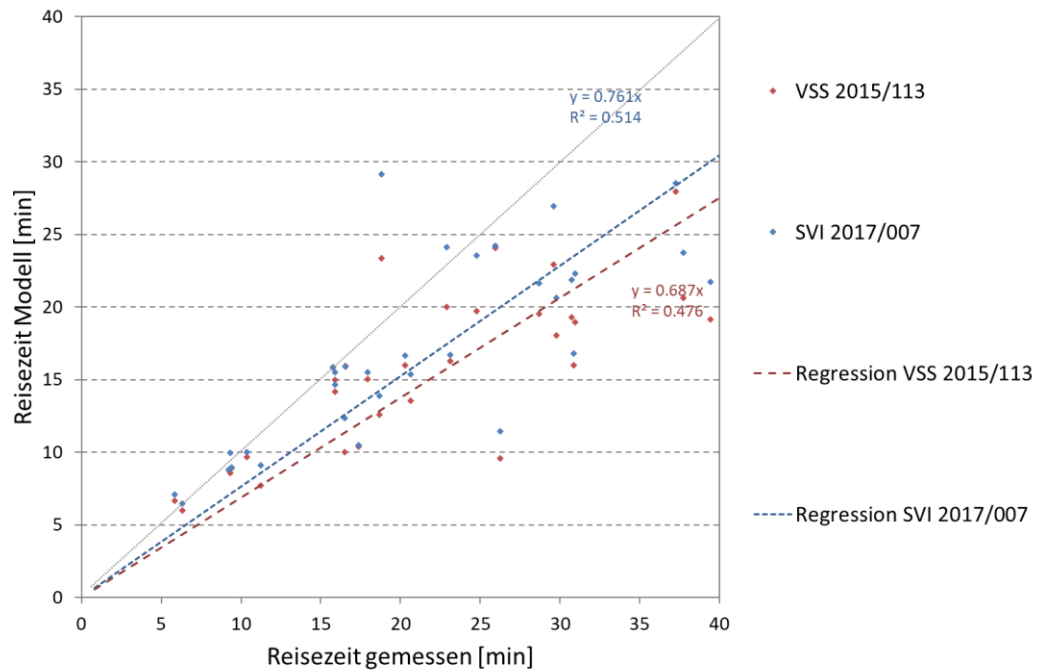


Abb. 34 Kanton ZH: Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

Insgesamt können die Schlüsse aus dem Tagesmodell hier bestätigt werden, wie Abb. 35 und Abb. 36 zeigen. Hier ist ersichtlich, dass die Verbesserungen insgesamt substanzieller sind als im DWV und kaum Verschlechterungen auftreten (nur in 3 von 32 Fällen).

Auch die Auswertungen der relativen Verbesserungen bzw. Verschlechterungen in Abb. 37 und Abb. 38 bestätigen diesen Eindruck.

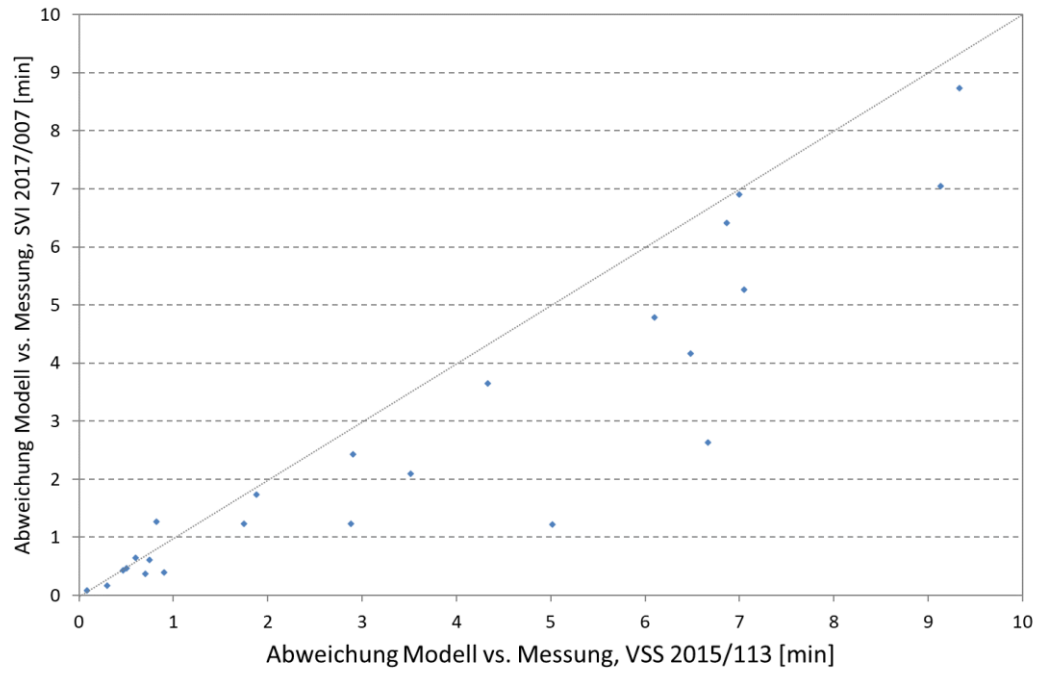


Abb. 35 Kanton ZH: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

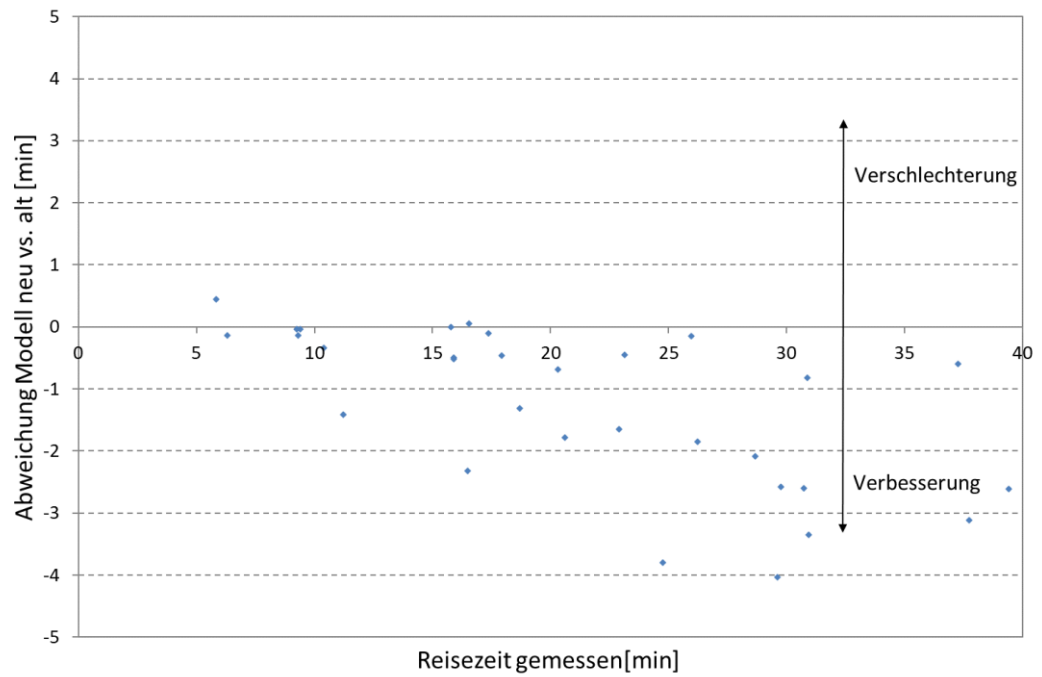


Abb. 36 Kanton ZH: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

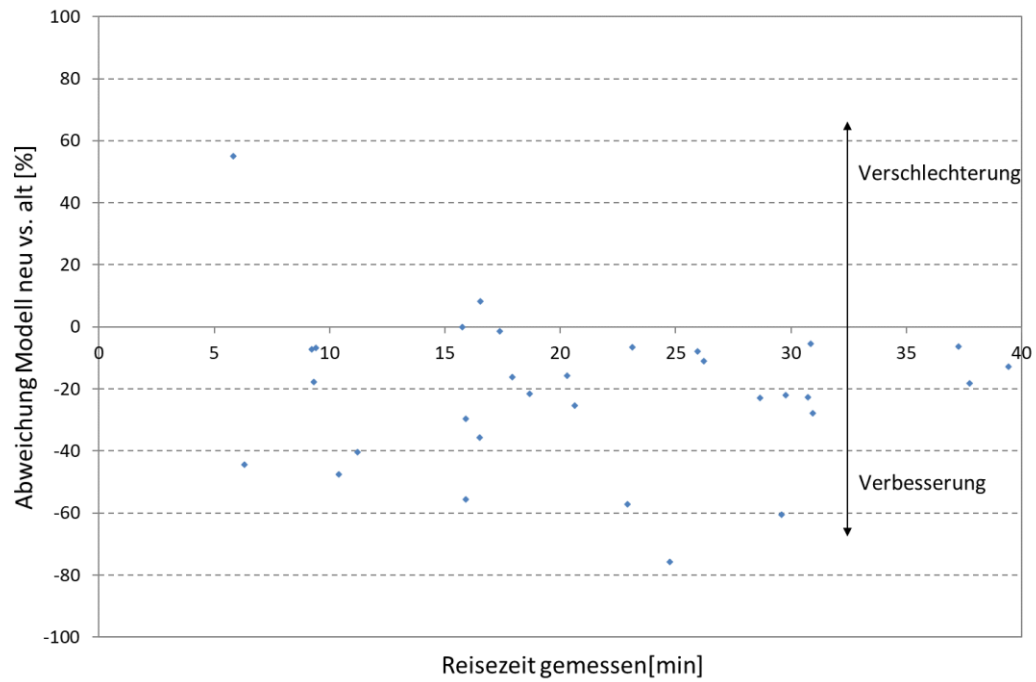


Abb. 37 Kanton ZH: Relative Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

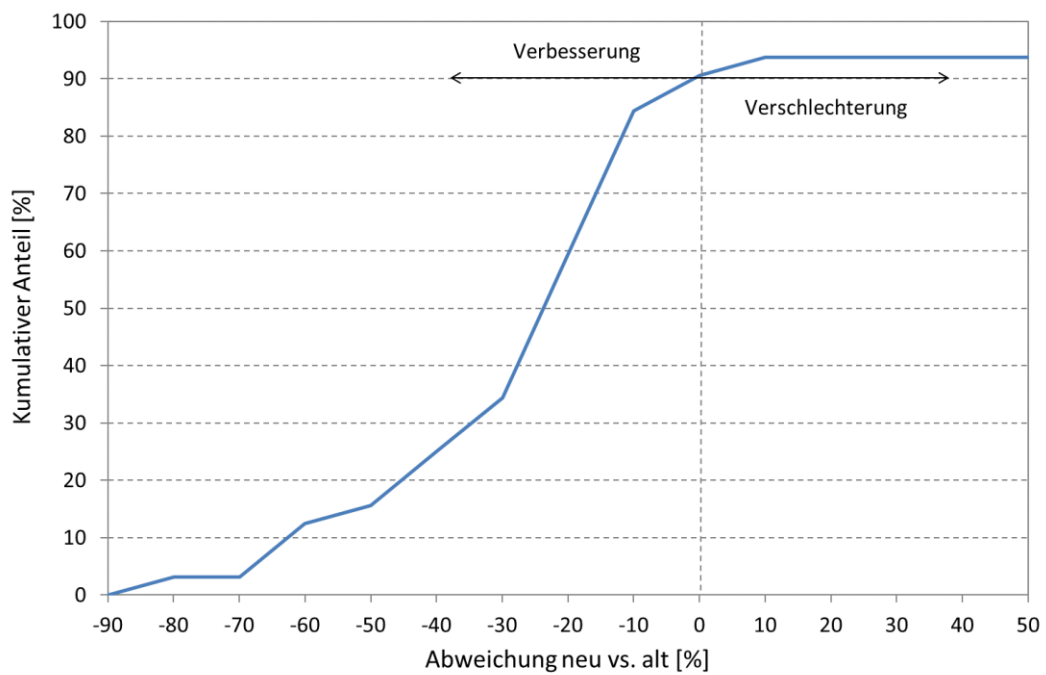


Abb. 38 Kanton ZH: Verteilung der relativen Verbesserungen und Verschlechterungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten (ASP).

5.4.2 Kanton Aargau

DWV

Im Gegensatz zu allen anderen Messungen beinhalten die DWV-Messdaten des Kantons Aargau Fahrtzeiten im unbelasteten Netz. Diese Fahrtzeiten wurden beim Aufbau des GVM AG spezifisch kalibriert und werden somit im Ausgangszustand sehr gut abgebildet. Eine Gegenüberstellung dieser mit den hier abgeleiteten Modellwerten ist nur bedingt aussagekräftig, da hier die Grund-Zeitzuschläge an den Knoten überproportional wirken. Zudem beinhaltet die Vergleichsgrundlage praktisch ausschliesslich Geradeausfahrer und kaum "echte" Abbiegevorgänge, bei denen die Grundzeiten realistischer sein dürften. In dieser Hinsicht ist bei der Interpretation der Zahlen in diesem Abschnitt Vorsicht geboten, der Vollständigkeit halber werden sie aber dennoch berichtet.

Wie Abb. 39 zeigt, verschlechtert sich durch den Einbau der neuen CR-Funktionen (und der Grundzuschläge) die Lage im unbelasteten Netz leicht: die mittlere Abweichung der Modell- zur gemessenen Zeit steigt von 2.2% auf 6.4%. Dies weist darauf hin, dass die Zeitzuschläge insbesondere für Geradeausfahrer bzw. Hauptströme im Ausserortsbereich tendenziell etwas überschätzt werden bzw. die bereits im Modell enthaltene implizite Abbildung über reduzierte Streckengeschwindigkeiten zusätzlich wirkt. Vor einer Anwendung der hier abgeleiteten Werte sollte daher stets anhand eigener Plausibilisierungen eruiert werden, ob die Grundzuschläge der Knotenzeiten realistisch sind oder allenfalls etwas reduziert werden sollten. Auch sollten sie abhängig vom Projekt (Neuaufbau oder Aktualisierung eines bestehenden Modells) an die Abbildung der im unbelasteten Netz gefahrenen Geschwindigkeiten (und die teilweise implizit darin enthaltenen Knotenwiderstände) angepasst werden.

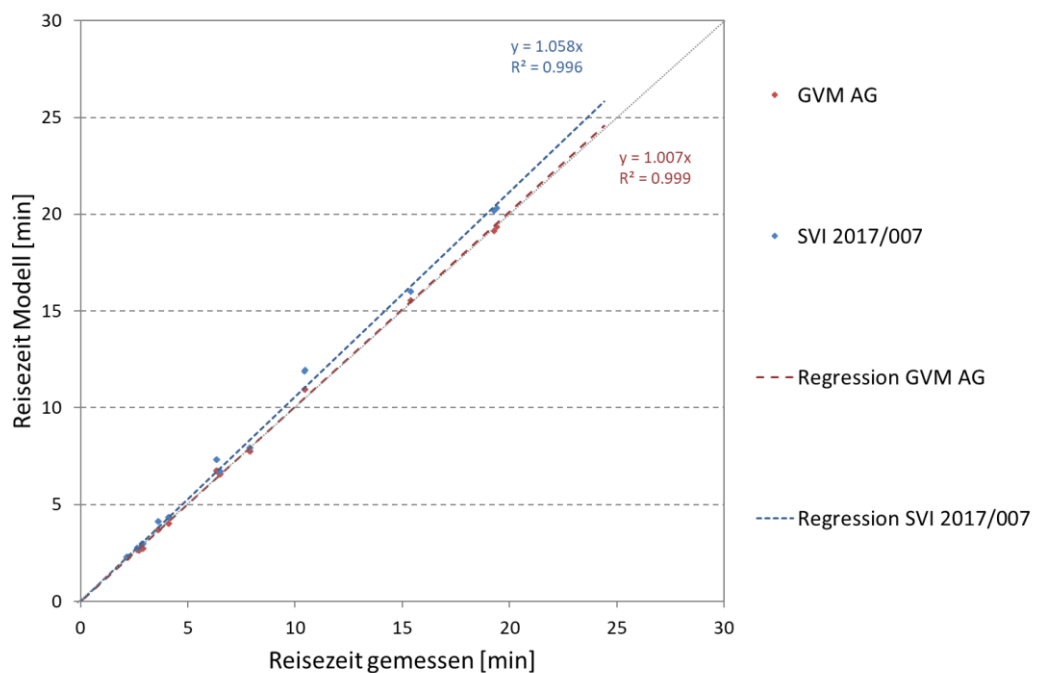


Abb. 39 Kanton AG: Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

Abb. 40 bestätigt einerseits, dass im unbelasteten Netz des GVM AG der Einbau der neuen CR-Funktionen mehrheitlich (18 von 22 Fällen) die Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Zeiten eher verschlechtert. Dies ist andererseits auch ein Hinweis darauf, dass die Fahrtzeiten hier bereits bei der Modellerstellung eingehend plausibilisiert wurden und zu schnelle Zeiten über eine Anpassung der Streckenattributierung (die oben erwähnte Reduktion der Geschwindigkeiten im unbelasteten Netz) abgemindert wurden. Die zusätzliche Berücksichtigung der Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen führt hier also teilweise zu einer doppelten Abbildung von Effekten, die bereits im Netz umgesetzt waren. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der

gemeinsamen Betrachtung des Strecken- und Knotenfahrverhalten bei einem Neuaufbau oder einer Aktualisierung eines Verkehrsmodells. Es sei hier auch auf die insgesamt sehr geringen Abweichungen hingewiesen, welche allesamt unter einer Minute liegen und bleiben.

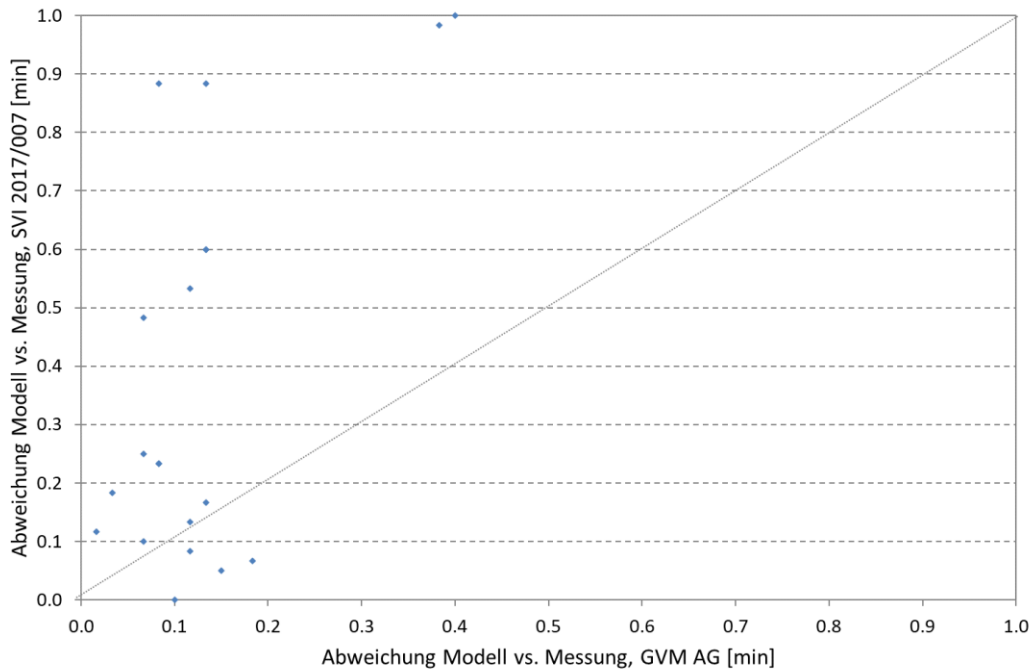


Abb. 40 Kanton AG: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

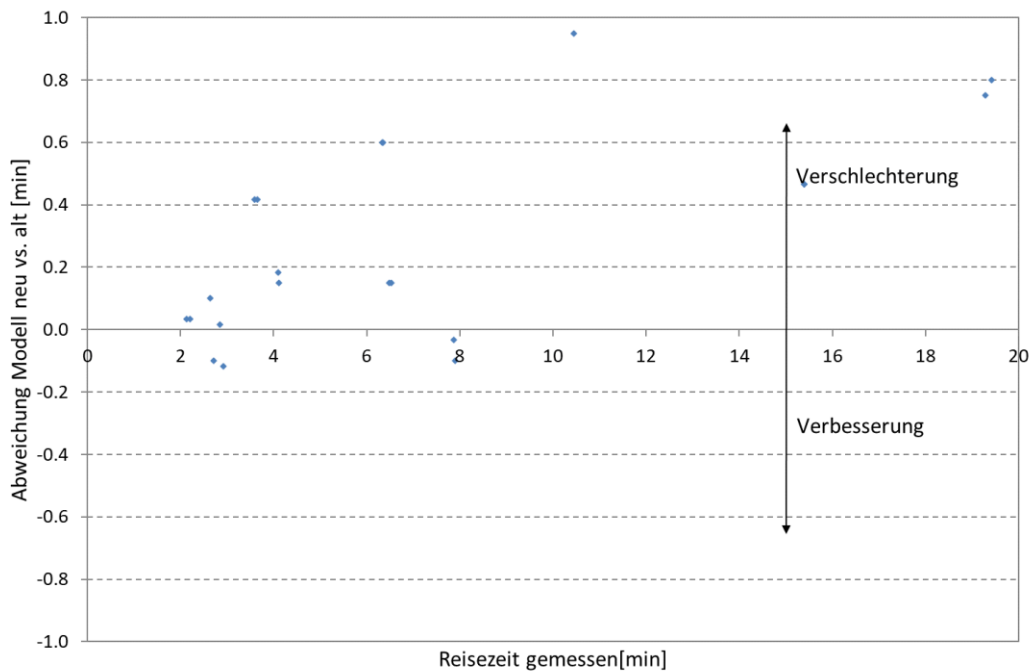


Abb. 41 Kanton AG: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (DWV).

ASP

Auch im belasteten Netz der ASP sind die Verbesserungen, welche die neuen CR-Funktionen bringen, weniger sichtbar als im GVM ZH. Die ungleiche Verteilung zwischen Geradeausfahrern und Abbiegern sowie die oben erwähnte eingehende Kalibrierung der Fahrzeiten bei der Modellerstellung führt hier zu heterogeneren Ergebnissen als beim GVM ZH. So führen die neuen CR-Funktionen zu einer nur geringen Reduktion der mittleren Abweichung zwischen modellierter und gemessener Fahrzeit von 7.9% auf 7.6% (cf. Abb. 42).

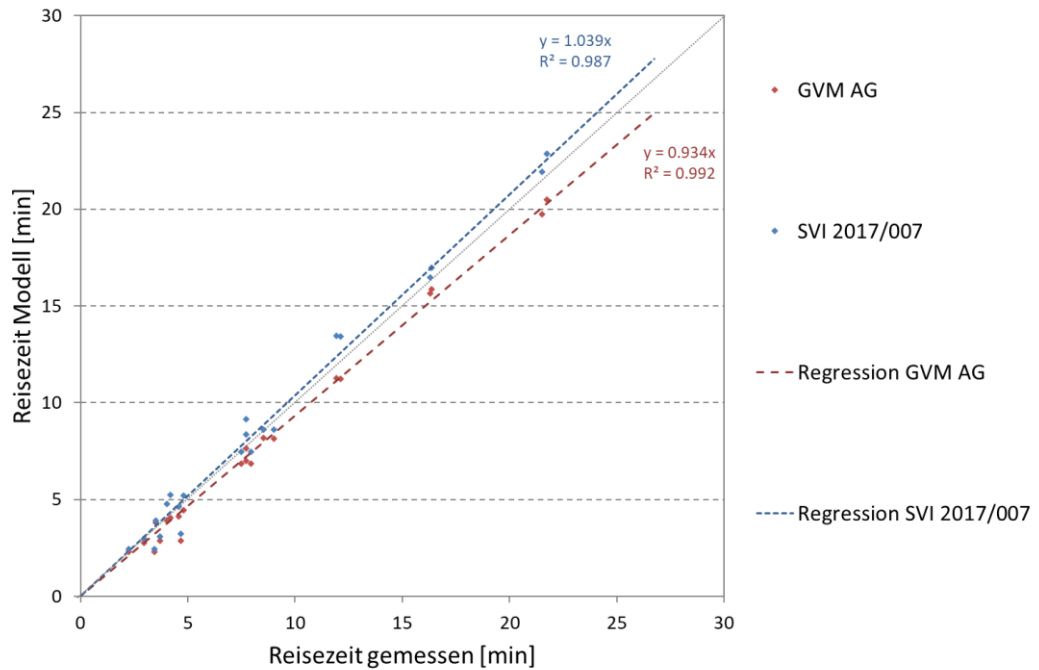


Abb. 42 Kanton AG: Übereinstimmung der Modellwerte mit den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

In 13 von 22 Fällen führen die neuen CR-Funktionen zu Verbesserungen der abgebildeten Fahrzeiten, wie Abb. 43 zeigt.

Diese bewegen sich entsprechend der im ursprünglichen Zustand bereits sehr guten Übereinstimmung durchwegs im Bereich von nur bis zu ca. einer Minute (cf. Abb. 44), und auch relativ gesehen sind sie geringer als im GVM ZH (cf. Abb. 45).

Wie Abb. 46 zeigt, konnte durch den Einbau der neuen CR-Funktionen in 59% der Fälle eine leichte Verbesserung der abgebildeten Fahrzeiten erzielt werden.

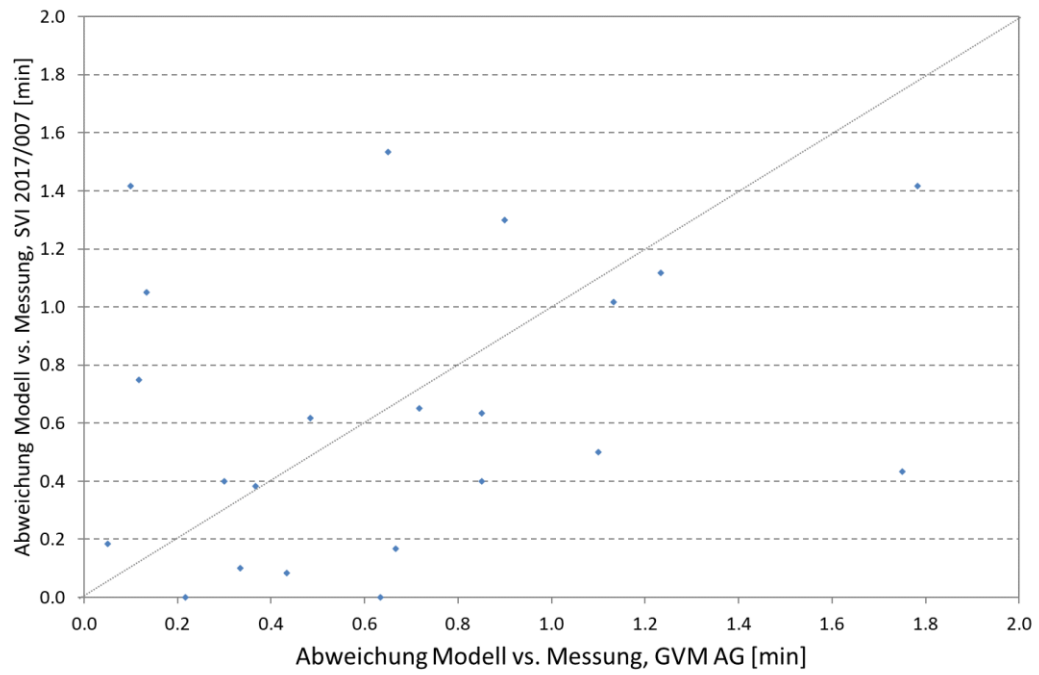


Abb. 43 Kanton AG: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

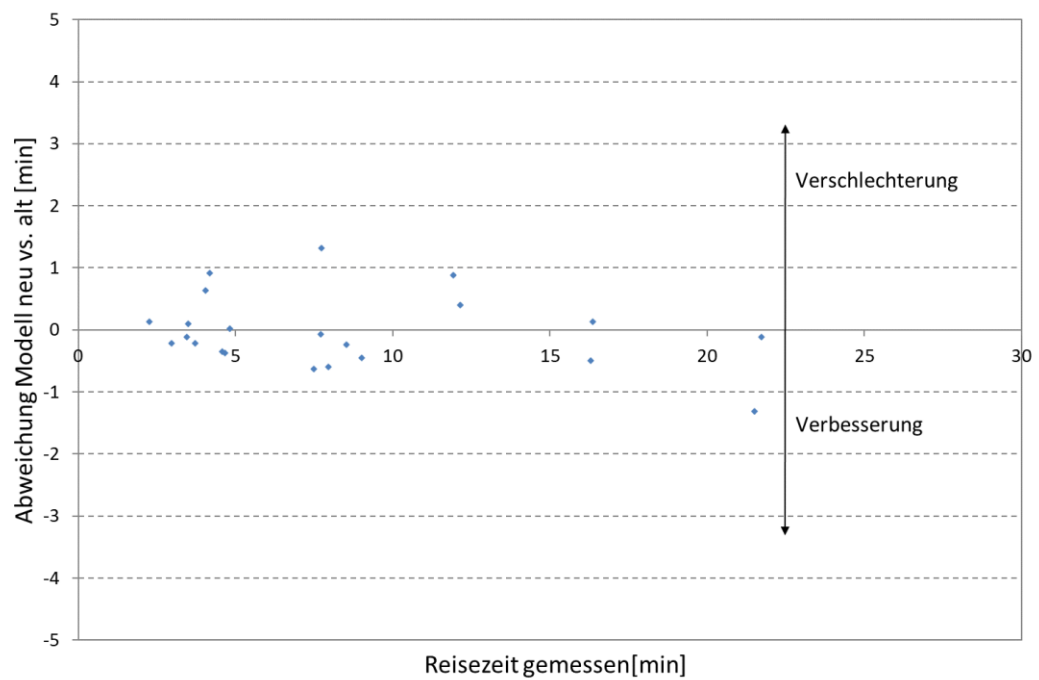


Abb. 44 Kanton AG: Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

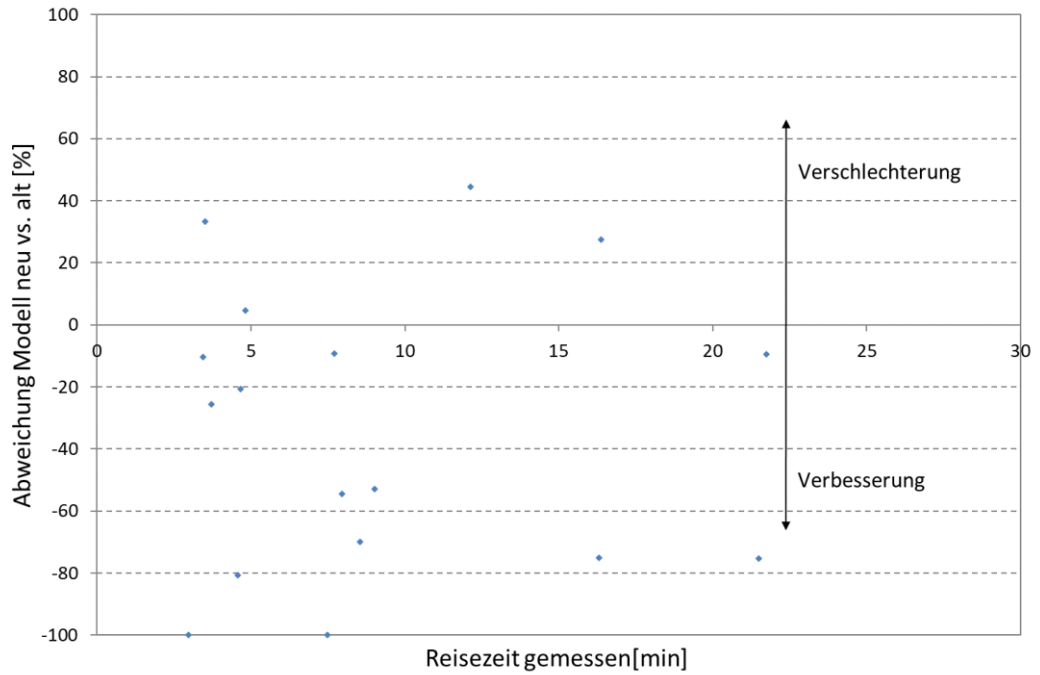


Abb. 45 Kanton AG: Relative Abweichung der Modellwerte von den Messungen, alte vs. neue CR-Funktionen (ASP).

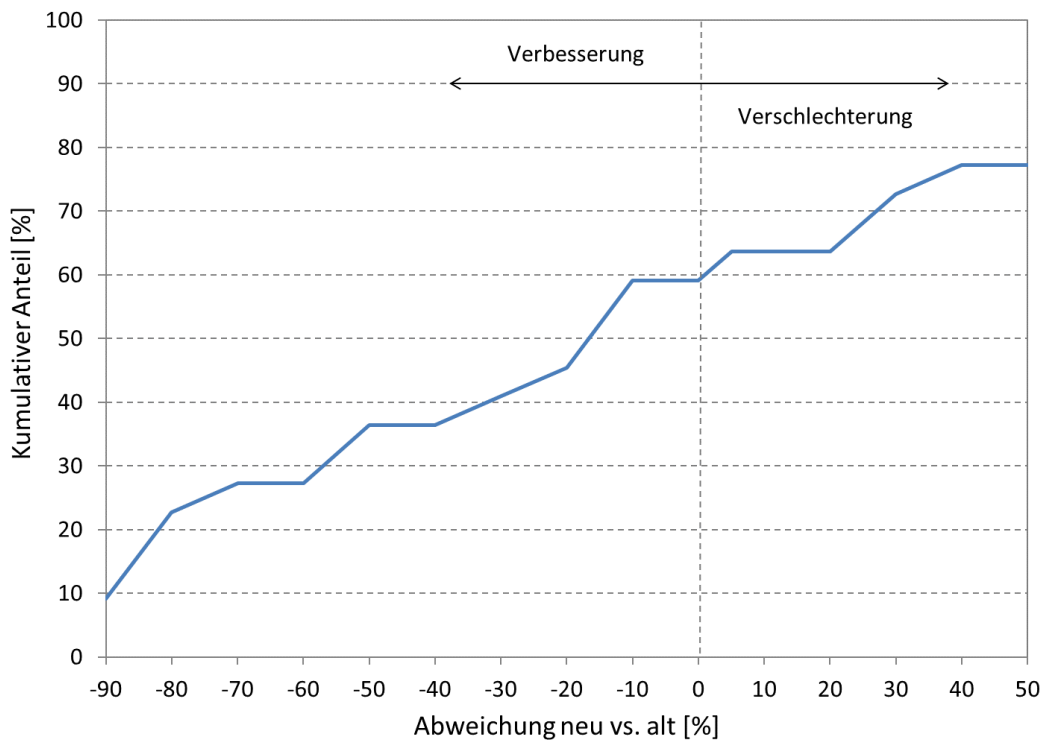


Abb. 46 Kanton AG: Verteilung der relativen Verbesserungen und Verschlechterungen der im Modell abgebildeten Fahrtzeiten (ASP).

5.4.3 Zusammenfassung

Die in den vorangegangenen Abschnitten detailliert besprochenen Ergebnisse sind zusammenfassend nochmals in Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6 Validierung der CR-Funktionen: Zusammenfassung der Ergebnisse

Modell		Mittlere Abweichung [min]		Mittlere Abweichung [%]		Mittlere Verbesserung [min]	Mittlere Verbesserung [%]
		vorher	nachher	vorher	nachher		
GVM ZH	DWV (t_{akt})	2.4	2.1	13.1	11.8	-0.3	-1.3
	ASP (t_{akt})	6.1	5.0	28.9	24.0	-1.0	-4.9
GVM AG	DWV (t_o)	0.2	0.5	2.2	6.4	+0.3	+4.2
	ASP (t_{akt})	0.7	0.6	7.9	7.6	-0.1	-0.3

Werden die DWV-Daten des GVM AG, welche aus den oben genannten Gründen nicht direkt für die hier durchgeführte Validierung anwendbar sind, ausser Betracht gelassen, ist durchgehend eine positive Wirkung der neuen Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen auf die modellierten Fahrtzeiten zu sehen.

Wenngleich die Differenzen in den Restfehlern, auch aufgrund der bereits im Originalzustand gut auf das aktuelle Verkehrsgeschehen und die dort vorliegenden Fahrtzeiten kalibrierten Modelle, keine Quantensprünge darstellen, so konnte doch gezeigt werden, dass die flexiblere Ausgestaltung der Knotenwiderstände punktuell zu spürbaren Verbesserungen führt und keine systematischen neuen Verzerrungen einbringt, die explizit gegen deren Verwendung sprechen würden.

Zudem sollte beachtet werden, dass der Anteil der Knotenwartezeiten an der Gesamtfahrtzeit insbesondere bei längeren Routen im Ausserortsbereich tendenziell relativ klein ist und in den kalibrierten Modellen die Knotenwiderstände bereits näherungsweise über die Streckenattributierung abgebildet sind. Die anzustrebende Verlagerung dieser Näherung hin zur expliziten Modellierung der Knotenwiderstände könnte auch im untergeordneten Netz zu einer differenzierteren Abbildung des Routenwahlverhaltens führen.

5.5 Exkurs: Abbildung von Knotenwiderständen in *TransCAD*

In der Verkehrsmodellierungssoftware *TransCAD* können Knotenwiderstände sowohl statisch wie auch dynamisch abgebildet werden. Bei einer dynamischen (belastungsabhängigen) Abbildung der Knotenwiderstände reduziert sich jedoch die Wahl der Umlegungsverfahren, weshalb in der Regel auf die statische Abbildung von Knotenwiderständen zurückgegriffen wird. Im GVM Basel werden für die Überquerung eines Knotens Abbiegewiderstände, die sich nach Streckentyp und Abbiegerichtung unterscheiden, definiert. Dafür werden für alle möglichen Kombinationen von sich kreuzenden Streckentypen unterschiedliche Abbiegezeiten für Links-, Rechts- und Geradeausfahrende bestimmt (Abb. 47).

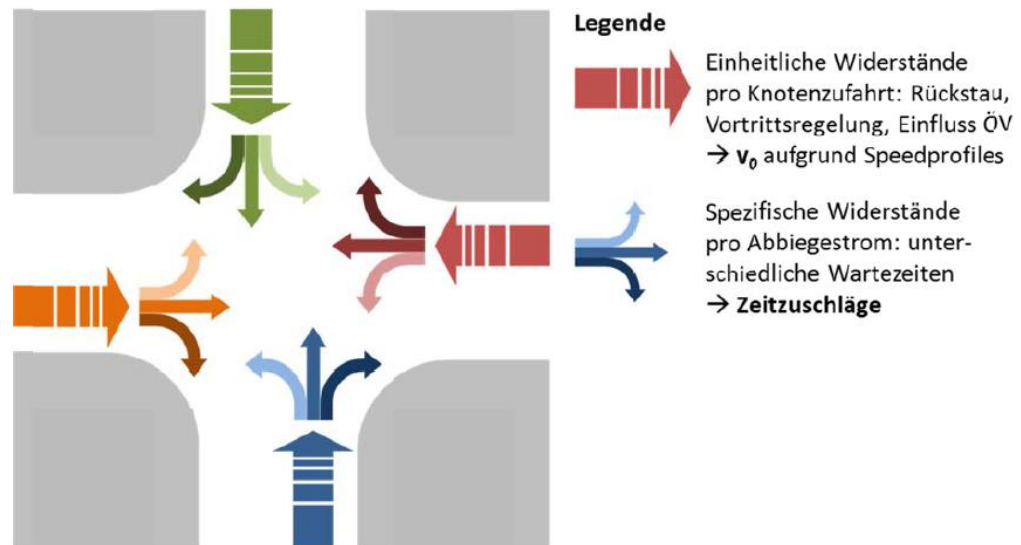


Abb. 47 Schematischer Aufbau der Widerstände in Knotenbereichen im GVM Basel (gemäss Modellbeschreibung).

Diese streckentypischen Abbiegezuschläge werden (wie auch Abbiegeverbote) in eigenen Dateien abgelegt. Hierbei ist es auch möglich, einzelne Abbiegebeziehungen mit besonderen (empirischen) Widerständen zu belegen.

Gemäss Handbuch (Caliper, 2018) steht in *TransCAD* ein eigenes Umlegungsverfahren zur Berücksichtigung belastungsabhängiger Abbiegeverzögerungen zur Verfügung (*Traffic Assignment with Volume-Dependent Turning Delays*). Um diese anzuwenden, müssen die Inputdaten (Knoten- und Streckenlayer) mit entsprechenden Attributen versehen werden:

- Knoten:
 - Ergänzen des Attributs *Control type*;
- Strecken:
 - Ergänzen des Attributs *Link control type*.

Mit Hilfe der *Intersection Control Editor Toolbox* (Abb. 48) kann dann eine Abbiegetabelle (*movement table*) erstellt werden, in der Informationen über Sättigungsgrad, Anzahl Spuren pro Abbiegebeziehung etc. enthalten sind. Ebenfalls wird bei Anwendung der *Intersection Control Editor Toolbox* der Kontrolltyp automatisch gesetzt.



Abb. 48 Intersection Control Editor in TransCAD 8.0: Beispiel einer LSA-signalisierten Kreuzung.

Für alle Knoten, an denen die belastungsabhängigen Abbiegeverzögerungen berücksichtigt werden sollen, müssen mit Hilfe des *Intersection Control Editor* die Attribute für den Kreuzungsbereich (Kreuzungstyp, Anzahl Spuren etc.) gesetzt werden.

Sind Knoten- und Streckenattribute gesetzt, kann im Rahmen einer statischen Umlegung die Option *Volume Dependent Turning Delays* ausgewählt werden. Neben der gewünschten Umlegungsmethode (*UE*, *Stochastic UE*, *All or Nothing*) kann auch die *Delay Function* gewählt werden. Zur Auswahl stehen die folgenden Funktionen (cf. Abb. 49):

- *Bureau of Public Roads*;
- *Conical Congestion Function*;
- *BPR & Conic VDF*;
- *Logit-based Volume Delay Function*;
- *Akcelik Flow Delay Function*;
- *Generalized Cost Function*;
- *Combined Link and Node Volume Delay Function*.

Hierbei berücksichtigen lediglich die *Logit-based Volume Delay Function* sowie die *Combined Link and Node Volume Delay Function* eigene Knotenparameter. Bei Verwendung der übrigen CR-Funktionen werden die Informationen aus dem Streckennetz verwendet und die Verzögerung des Knotens approximiert.

Abhängig von der gewählten CR-Funktion müssen unterschiedliche Parameter gesetzt werden. Die berücksichtigten Netzelemente (Reisezeit, Kapazität) werden direkt aus dem Streckenlayer übernommen. Für die Parameter der CR-Funktion (im obigen Beispiel α und β der BPR Funktion) werden die Werte dem Strecken- bzw. Knotenlayer entnommen.

Eine Modellierung mit dynamischen (belastungsabhängigen) Knotenwiderständen wurde auch bei der Erstellung des GVM Basel geprüft. Die Implementierung wurde jedoch aus verschiedenen Gründen (geringe Wirkung, wenige Grundlagen, reduzierte

Umlegungsmöglichkeiten² und vor allem deutliche Verlängerung der Rechenzeiten) verworfen. Die Datenstruktur des GVM Basel wurde allerdings so aufbereitet, dass eine spätere Implementierung möglich wäre.

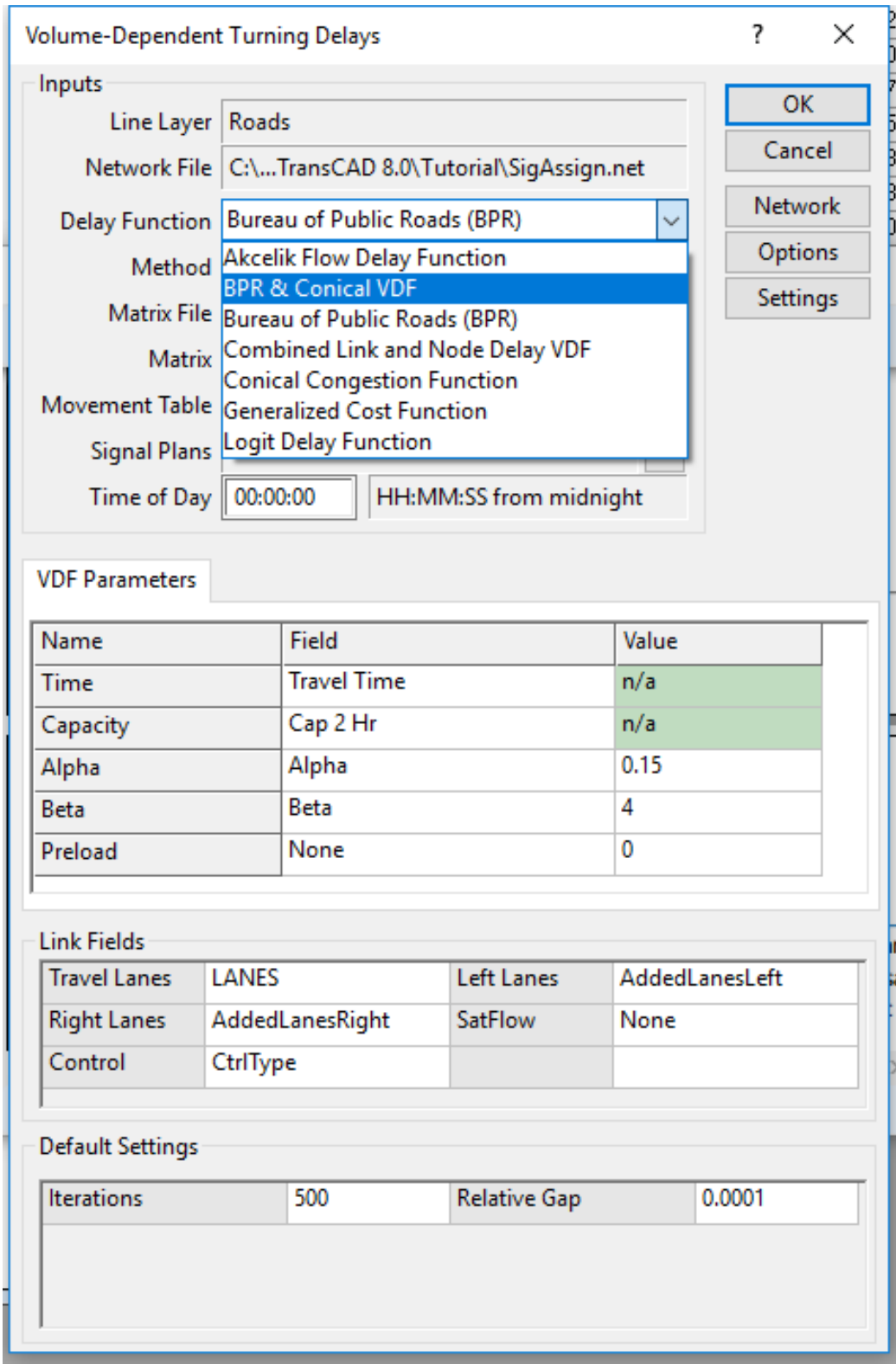


Abb. 49 Volume-Dependent Turning Delays Menü in TransCAD 8.0.

² dynamische Knotenwiderstände stehen in *TransCAD* nur für monomodale Umlegungsverfahren zur Verfügung.

6 Fazit und Empfehlungen

Im vorliegenden Forschungsprojekt konnte erstmals eine Kalibrierung von Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen auf Basis von aus der Empirie abgeleiteten Daten durchgeführt werden. Angesichts der Plausibilität der Verläufe der Funktionen und deren guter Passgenauigkeit an die Daten kann die Modellschätzung als zielführend bewertet werden. Künftig können für alle gängigen Typen von Verkehrsknoten flexible, auslastungsabhängige Widerstände modelliert werden, was zu einem realistischeren Routenwahlverhalten insbesondere im kleinräumigen Bereich führen dürfte.

Die neu geschätzten Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen führen grossmehrheitlich zu einer Verbesserung der in den Modellen abgebildeten Fahrtzeiten, vor allem im belasteten Netz (wo die CR-Funktionen ihre Wirkung entfalten). Die Zeiten im unbelasteten Netz (GVM AG) werden durch die neuen Grundzeiten an den Knoten leicht überschätzt. Da die Vergleichsgrundlage praktisch nur Geradeausfahrer beinhaltet, kann diese Aussage aber nicht verallgemeinert werden. Es sollte im Einzelfall geprüft werden, ob die Grundzuschläge für die Knoten (insbesondere im Ausserortsbereich) weggelassen werden können oder allenfalls die bereits vorhandene implizite Berücksichtigung der Knotenwiderstände in der Streckenattributierung (über reduzierte Geschwindigkeiten) abgemindert werden sollte. Da in Verkehrsmodellen stets die belasteten Netzzustände relevant sind (für verkehrstechnische Fragestellungen insbesondere die MSP und ASP), dürfte dies jedoch im Allgemeinen von untergeordneter Bedeutung sein.

Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Fahrtzeiten bestehen weiterhin – tendenziell werden die Reisezeiten im Modell insbesondere im innerstädtischen Bereich eher unterschätzt. Grund dafür sind vermutlich die Einflüsse weiterer Faktoren wie ÖV-Haltestellen, Fussgängerstreifen etc.

Die neuen CR-Funktionen können für den Einsatz in neuen Verkehrsmodellen empfohlen werden. Der Einbau in bestehende Modelle ist aufgrund der Typisierung der Knoten und Abbieger, aber vor allem wegen der dort bereits durchgeführten Kalibration und der impliziten Berücksichtigung der Knotenwiderstände in der Streckenattributierung (reduzierte Geschwindigkeiten) relativ aufwändig und fehleranfällig. Ein solcher Einbau sollte also bedarfsgerecht erfolgen sowie mit einer systematischen Überprüfung des Netzmodells und einer nochmaligen Feinjustierung der Streckenattribute einhergehen. Dabei sollten auch lokale Anpassungen, welche die explizite Abbildung der oben genannten weiteren Faktoren verbessern, eingeplant werden. Diese manuelle Überprüfung und Plausibilisierung der Netzattribute bleiben auch bei einem Einsatz der neuen Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen unabdingbar. Die Anwendung eines Verkehrsmodells (und im Speziellen der Aufbau eines Strassennetzmodells) bedingt immer die sorgfältige gegenseitige Abstimmung der Strecken- und Knotenattributierung. Wurde letztere jedoch bisher häufig implizit über pauschale Zeitzuschläge oder über Anpassungen der Zufahrtsstrecken näherungsweise abgebildet, kann nun eine explizitere Berechnung erfolgen. Damit einhergehend dürfte der Aufwand für die Kalibrierung der im unbelasteten Netz gefahrenen Geschwindigkeiten in neuen Modellen sinken, da diese tendenziell nur noch die Streckenzeiten, und nicht mehr implizit auch die Knotenzuschläge, abbilden müssen.

Die hier neu geschätzten Parameter für die Knoten- und CR-Funktionen können von Erstellern und Anwendern vor allem neuer Verkehrsmodelle direkt übernommen werden. Insbesondere deren Zusammenwirkung mit den in der VSS-Forschungsarbeit 2017/119 ermittelten Strecken-CR-Funktionen bietet Potential für eine verbesserte Abbildung der Fahrtzeiten und der Routenwahl im Gesamtnetz.

Eine weitere Differenzierung der Knoten und Abbieger, z.B. räumlich oder nach deren Topologie, könnte zu einer nochmaligen Verbesserung der hier erzielten Ergebnisse führen. Für die entsprechenden Modellschätzungen wäre aber eine substanziell grössere Datengrundlage vonnöten, um die statistische Signifikanz der ermittelten Effekte sicherzustellen.

Anhänge

I	Ausgewertete Knoten	63
I.1	Knoten RK-00: Gambarogno TI (Kreisel)	65
I.2	Knoten RK-01: Genf GE (LSA)	66
I.3	Knoten RK-08: Münsigen BE (LSA)	67
I.4	Knoten RK-10: Therwil BL (Kreisel)	68
I.5	Knoten RK-12: Bern BE (ungeregelt)	69
I.6	Knoten RK-17: Sissach BL (ungeregelt)	70
I.7	Knoten RK-19: Sissach BL (ungeregelt)	71
I.8	Knoten RK-22: Allschwil BL (ungeregelt)	72
I.9	Knoten RK-23: Muri BE (Kreisel)	73
I.10	Knoten RK-32: Basel BS (ungeregelt)	74
I.11	Knoten RK-36: Pratteln BL (ungeregelt)	75
I.12	Knoten RK-37: Wabern BE (Kreisel)	76
I.13	Knoten RK-39: Wabern BE (LSA)	77
I.14	Knoten RK-40: Wabern BE (LSA)	78
I.15	Knoten RK-41: Wabern BE (LSA)	79
I.16	Knoten RK-48: Oberentfelden AG (ungeregelt)	80
I.17	Knoten RK-52: Oberentfelden AG (ungeregelt)	81
I.18	Knoten RK-56: Pratteln BL (Kreisel)	82
I.19	Knoten RK-71: Aarau AG (Kreisel)	83
I.20	Knoten RK-72: Baden AG (LSA)	84
I.21	Knoten RK-74: Mägenwil AG (Kreisel)	85
I.22	Knoten RK-75: Mägenwil AG (Kreisel)	86
I.23	Knoten RK-76: Mägenwil AG (Kreisel)	87

I Ausgewertete Knoten

Tab. 7 Übersicht über die ausgewerteten Knoten

Kanton	Knoten Nr.	Ort	Knotenart
TI	RK-00	Gambarogno	Kreisel
GE	RK-01	Genf	LSA
BE	RK-08	Münsingen	LSA
BL	RK-10	Therwil	Kreisel
BE	RK-12	Wankdorf	Ungeregelt
BL	RK-17	Sissach	Ungeregelt
BL	RK-19	Sissach	Ungeregelt
BL	RK-22	Allschwil	Ungeregelt
BE	RK-23	Muri bei Bern	Kreisel
BS	RK-32	Basel	Ungeregelt
BL	RK-36	Pratteln	Ungeregelt
BE	RK-37	Wabern bei Bern	Kreisel
BE	RK-39	Wabern bei Bern	LSA
BE	RK-40	Wabern bei Bern	LSA
BE	RK-41	Wabern bei Bern	LSA
AG	RK-48	Oberentfelden	Ungeregelt
AG	RK-52	Oberentfelden	Ungeregelt
BL	RK-56	Pratteln	Kreisel
AG	RK-71	Aarau Ost	Kreisel
AG	RK-72	Anschl. Baden West	LSA
AG	RK-74	Mägenwil	Kreisel
AG	RK-75	Mägenwil	Kreisel
AG	RK-76	Mägenwil	Kreisel

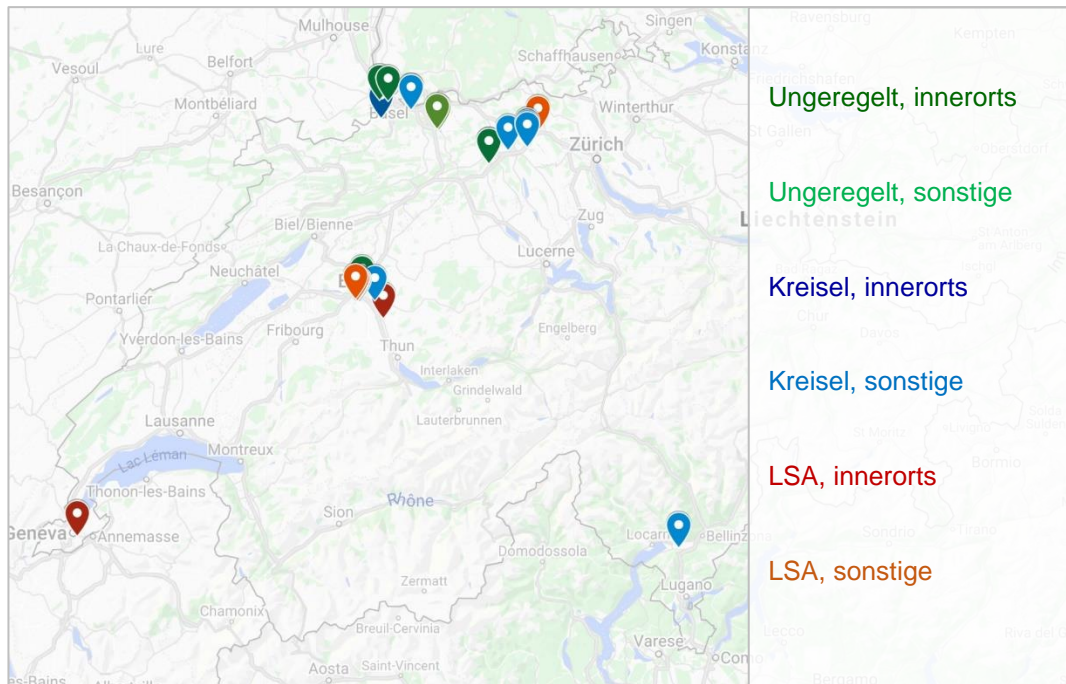


Abb. 1 Übersicht über die ausgewerteten Knoten (Kartenmaterial © Google Maps).

I.1 Knoten RK-00: Gambarogno TI (Kreisel)



Abb. 2 Knoten RK-00: Lage.

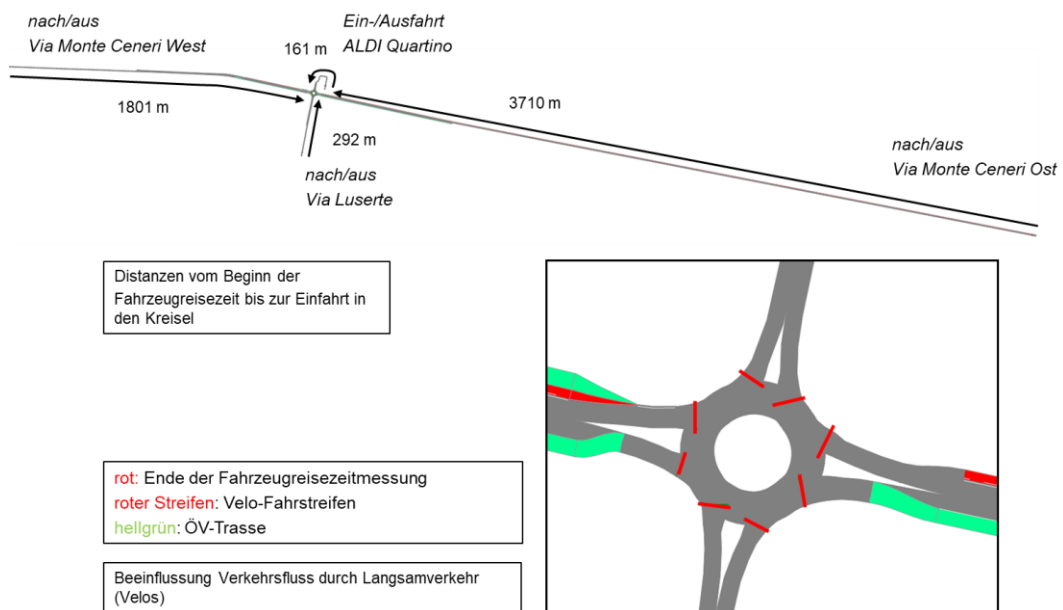


Abb. 3 Knoten RK-00: Ausgestaltung.

I.2 Knoten RK-01: Genf GE (LSA)



Abb. 4 Knoten RK-01: Lage.

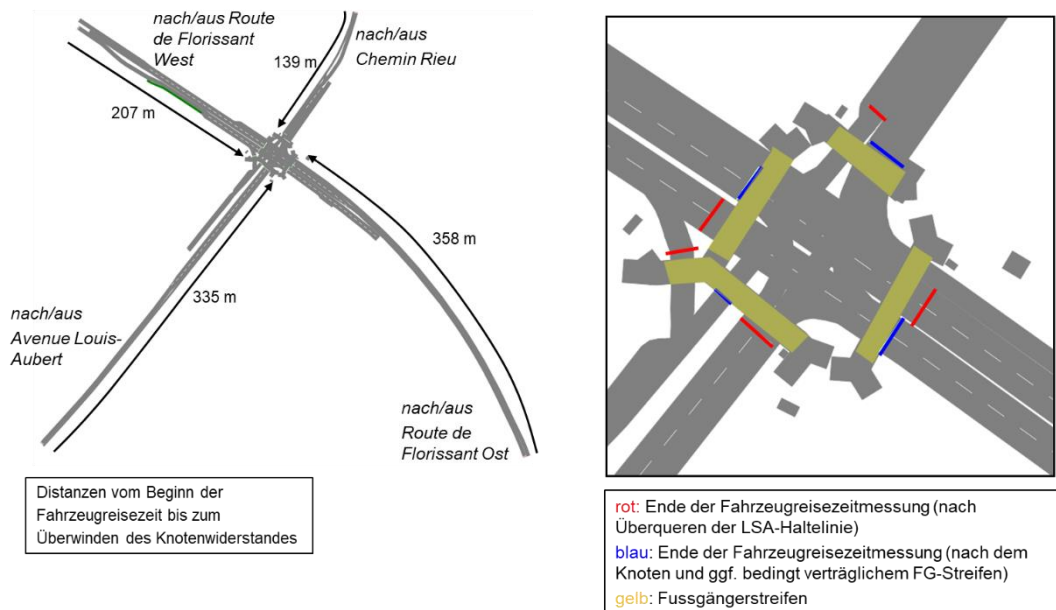


Abb. 5 Knoten RK-01: Ausgestaltung.

I.3 Knoten RK-08: Münsingen BE (LSA)



Abb. 6 Knoten RK-08: Lage.

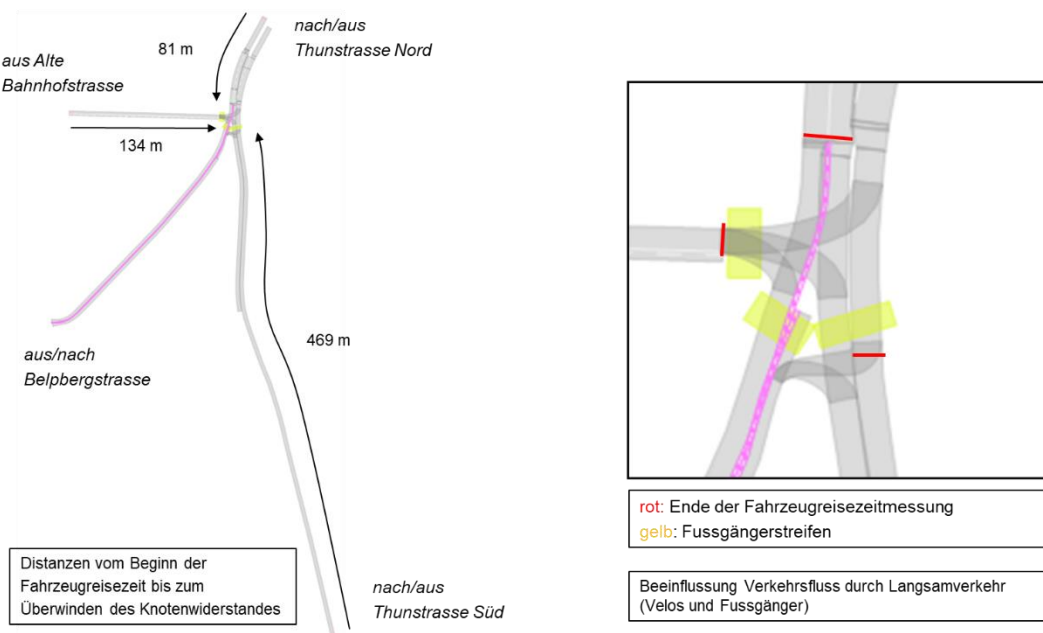


Abb. 7 Knoten RK-08: Ausgestaltung.

I.4 Knoten RK-10: Therwil BL (Kreisel)

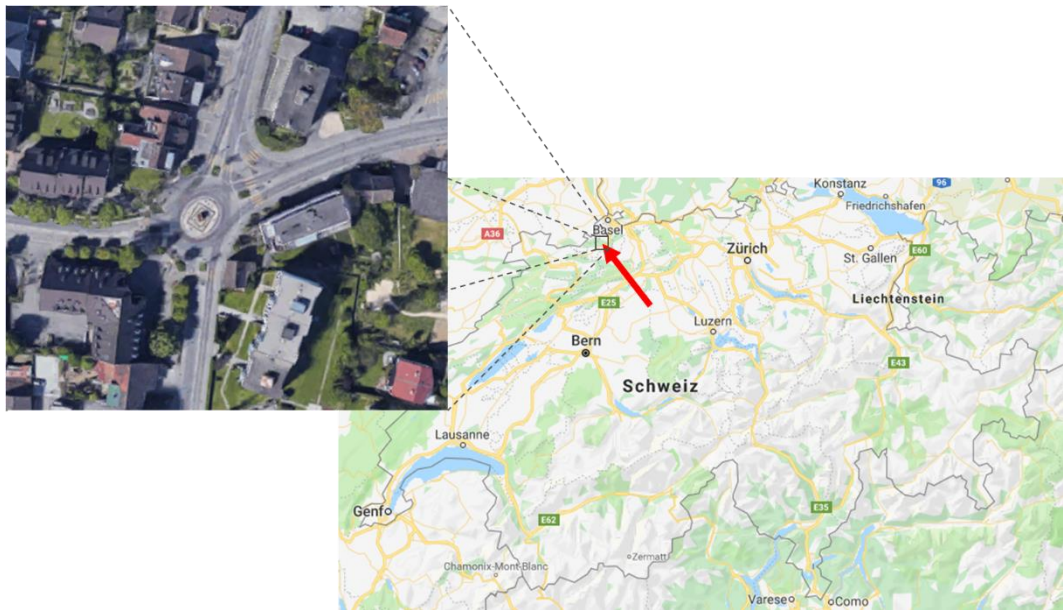


Abb. 8 Knoten RK-10: Lage.

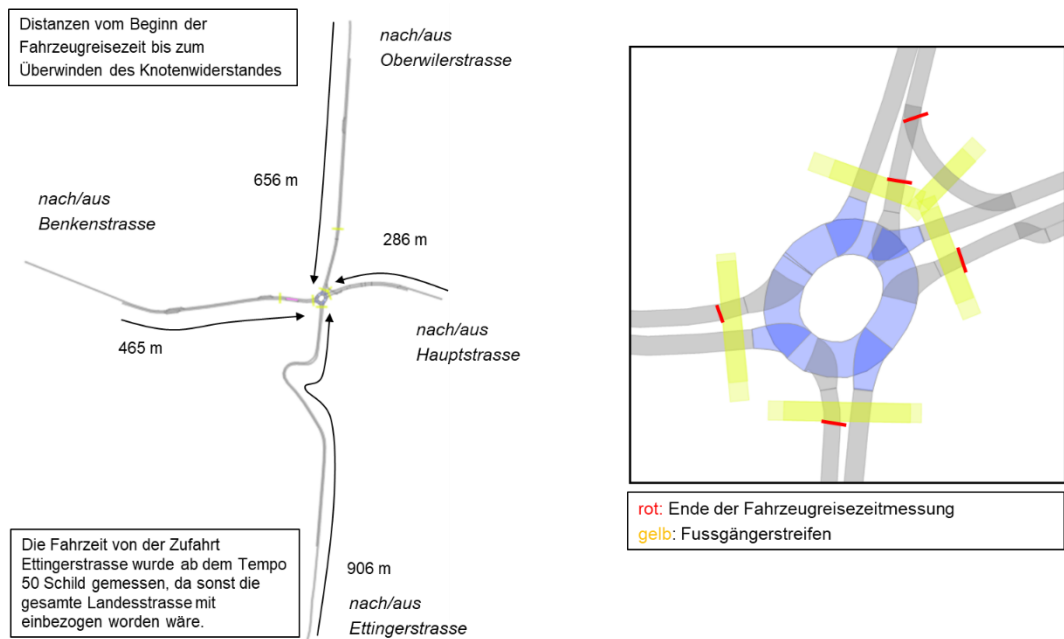


Abb. 9 Knoten RK-10: Ausgestaltung.

I.5 Knoten RK-12: Bern BE (ungeregelt)



Abb. 10 Knoten RK-12: Lage.

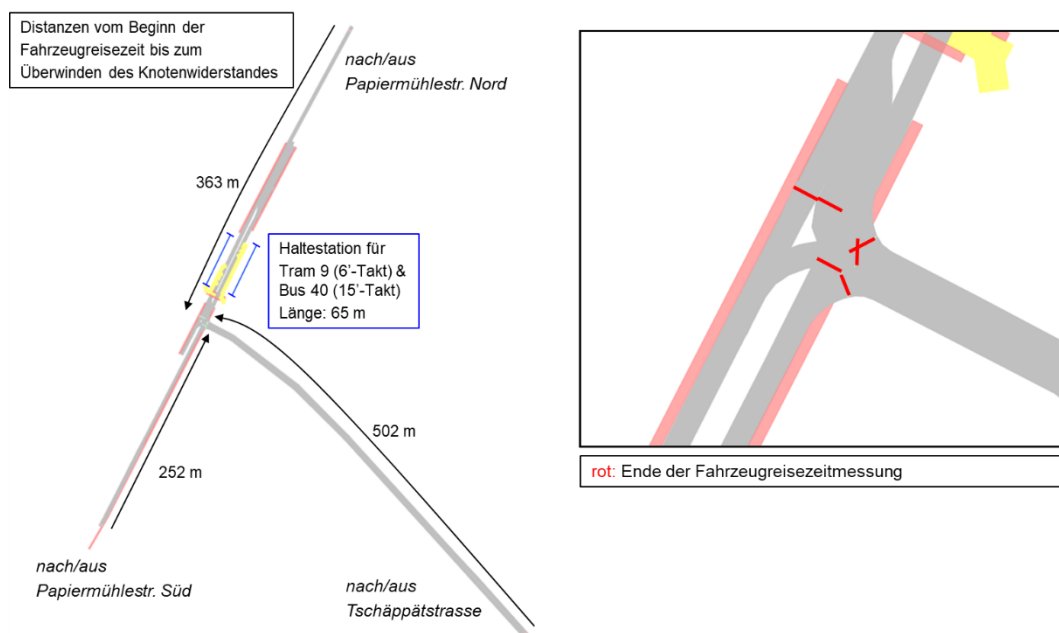


Abb. 11 Knoten RK-12: Ausgestaltung.

I.6 Knoten RK-17: Sissach BL (ungeregelt)



Abb. 12 Knoten RK-17: Lage.

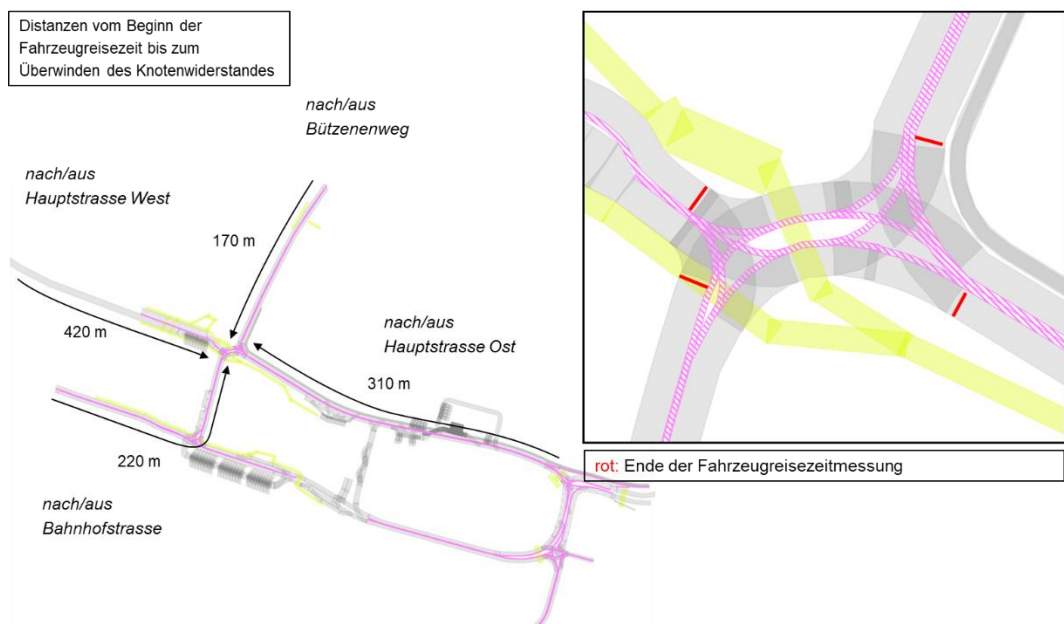


Abb. 13 Knoten RK-17: Ausgestaltung.

I.7 Knoten RK-19: Sissach BL (ungeregelt)

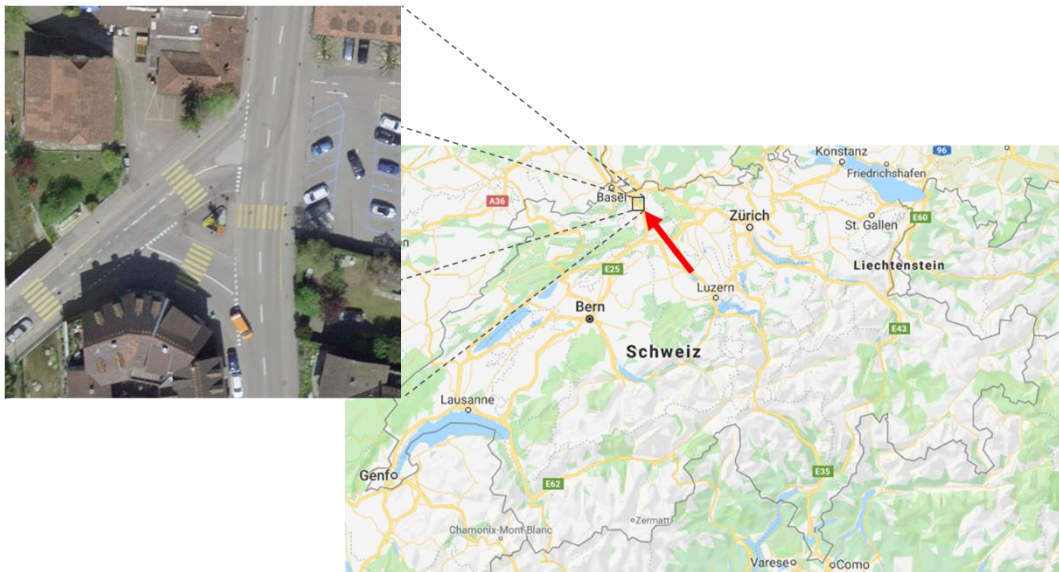


Abb. 14 Knoten RK-19: Lage.

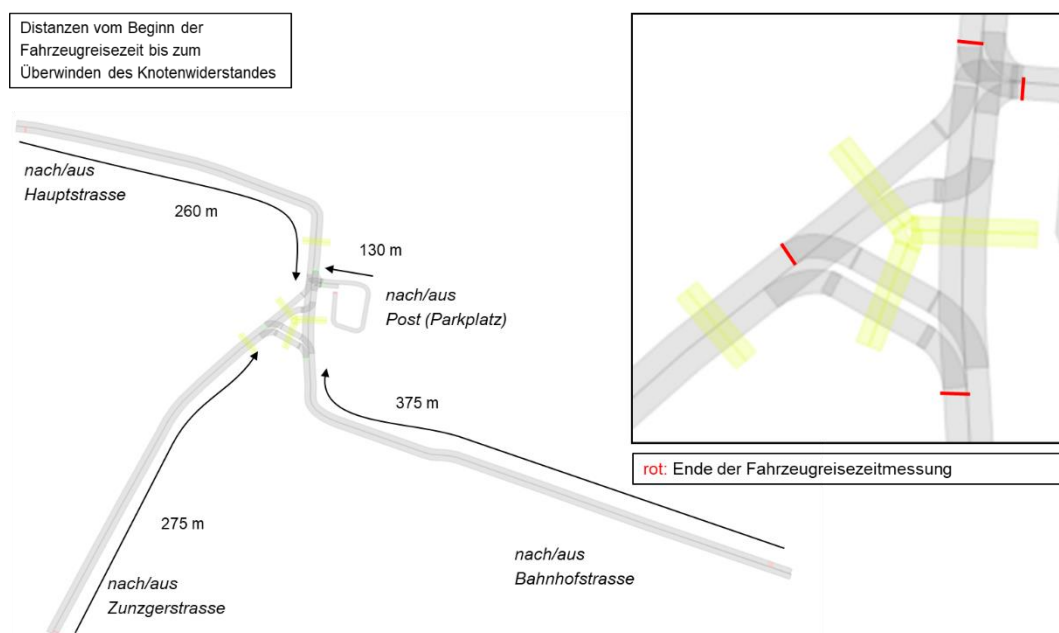


Abb. 15 Knoten RK-19: Ausgestaltung.

I.8 Knoten RK-22: Allschwil BL (ungeregelt)

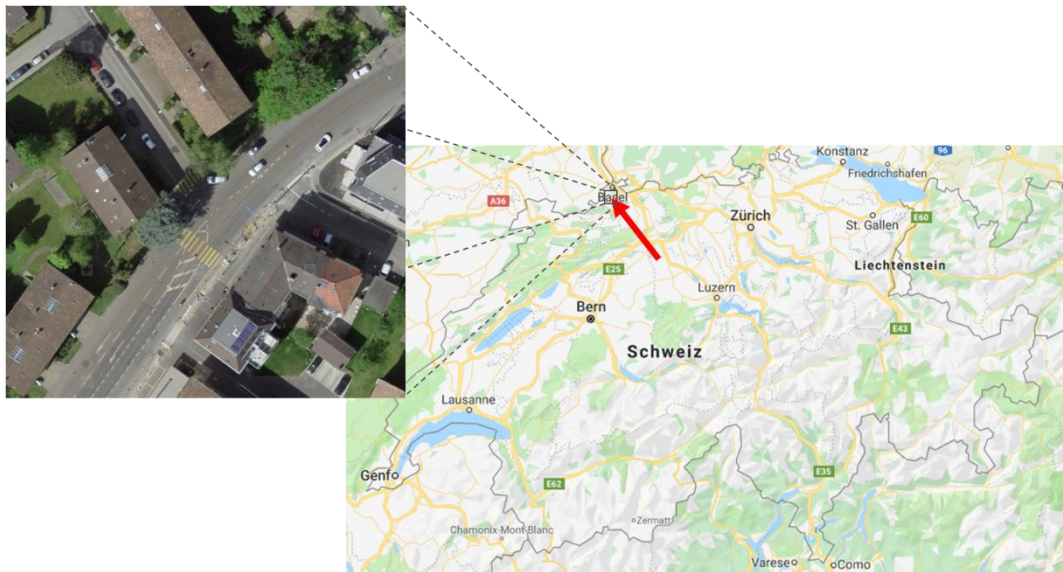


Abb. 16 Knoten RK-22: Lage.

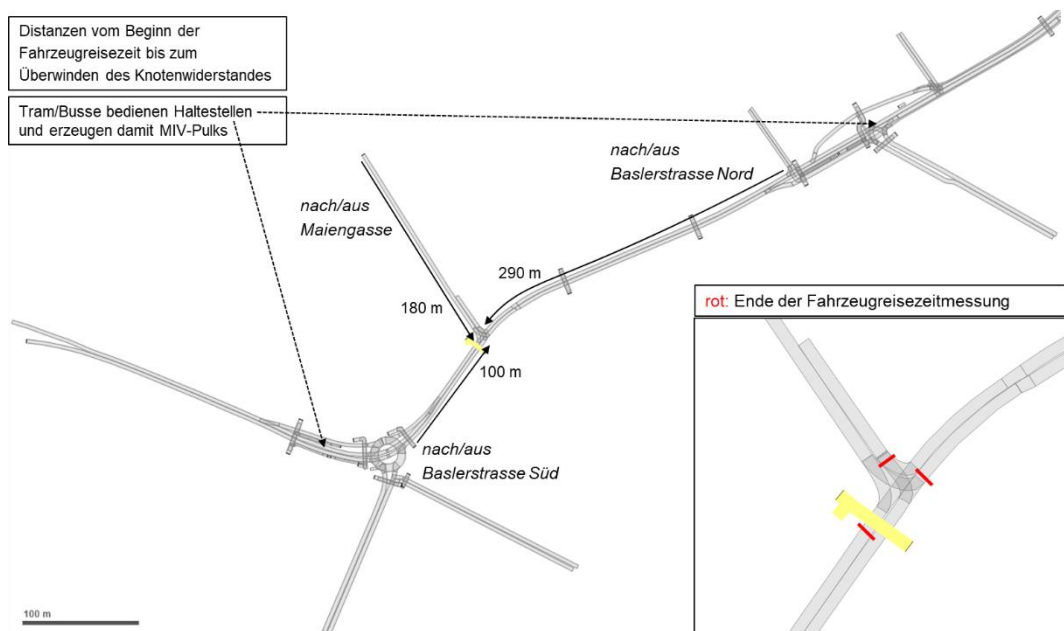


Abb. 17 Knoten RK-22: Ausgestaltung.

I.9 Knoten RK-23: Muri BE (Kreisel)



Abb. 18 Knoten RK-23: Lage.

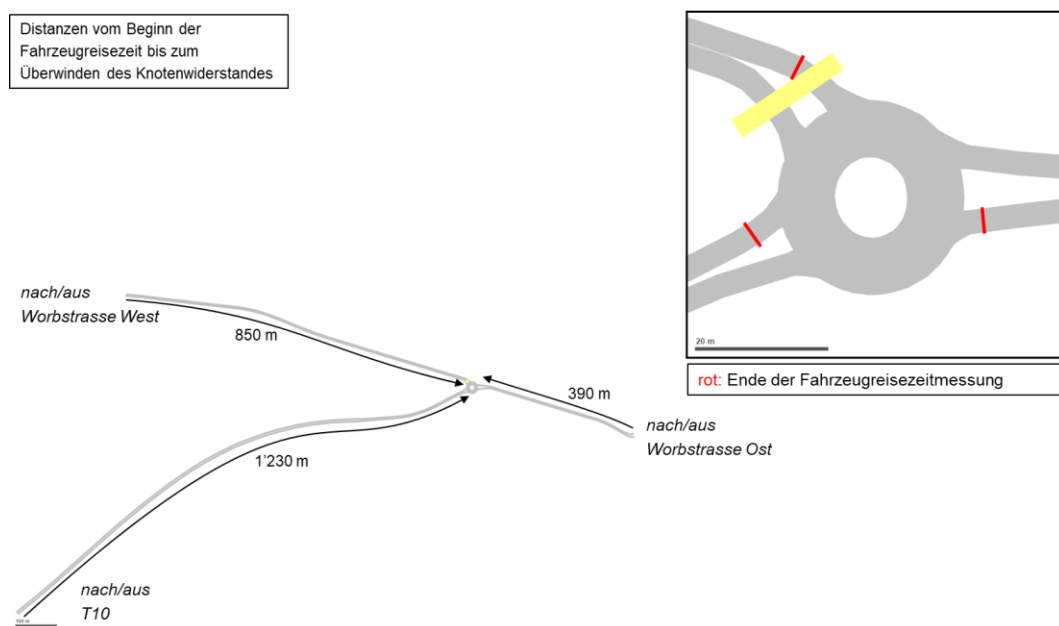


Abb. 19 Knoten RK-23: Ausgestaltung.

I.10 Knoten RK-32: Basel BS (ungeregelt)



Abb. 20 Knoten RK-32: Lage.

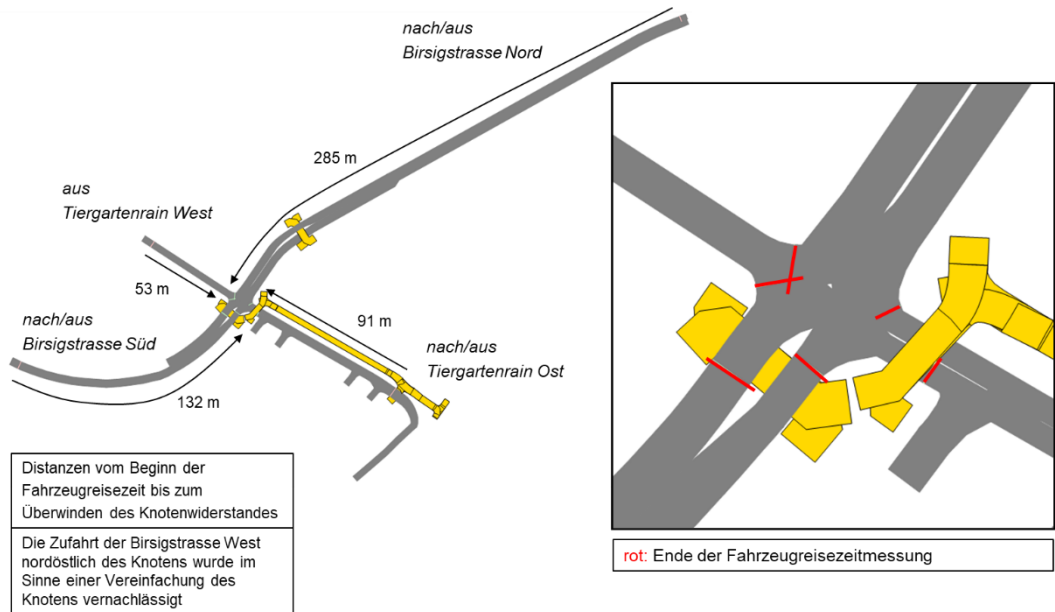


Abb. 21 Knoten RK-32: Ausgestaltung.

I.11 Knoten RK-36: Pratteln BL (ungeregelt)

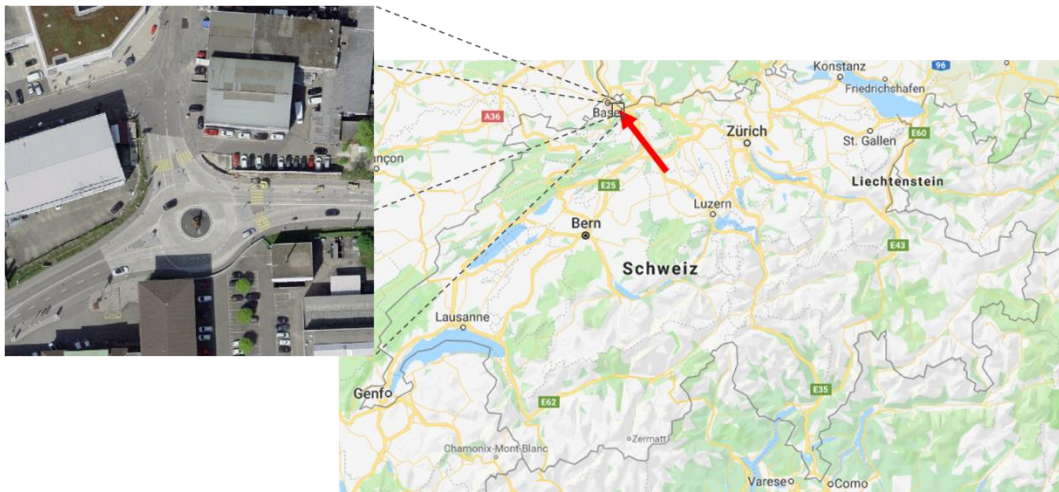


Abb. 22 Knoten RK-36: Lage.

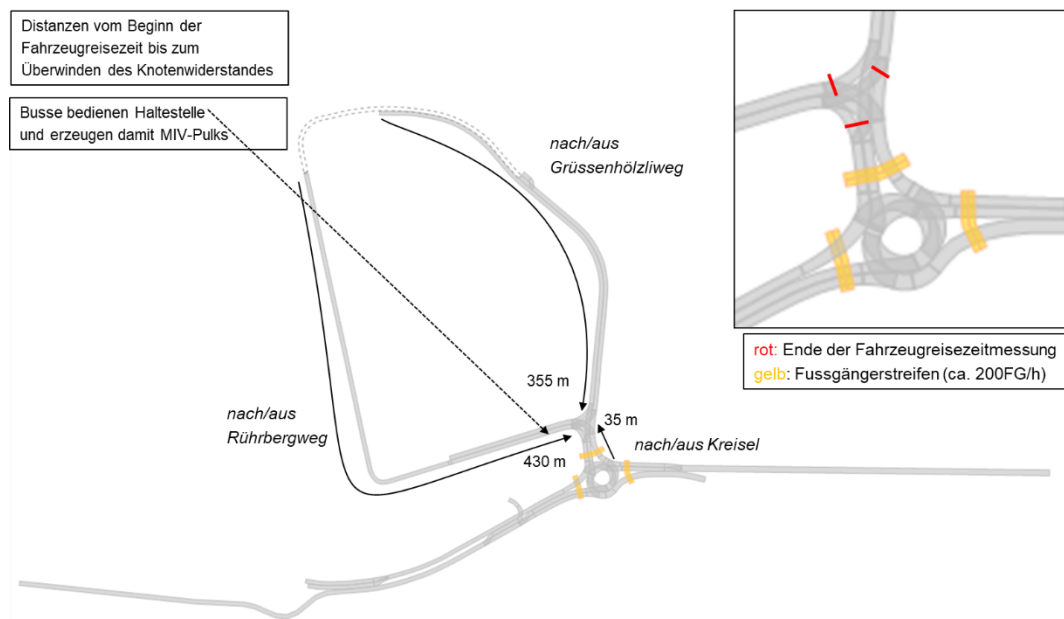


Abb. 23 Knoten RK-36: Ausgestaltung.

I.12 Knoten RK-37: Wabern BE (Kreisel)



Abb. 24 Knoten RK-37: Lage.

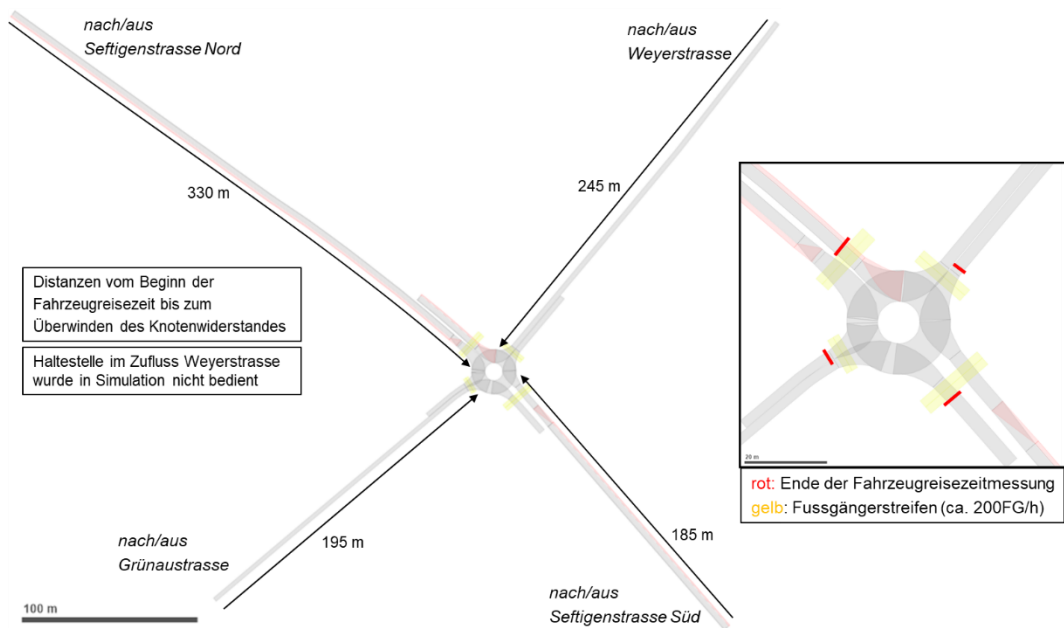


Abb. 25 Knoten RK-37: Ausgestaltung.

I.13 Knoten RK-39: Wabern BE (LSA)



Abb. 26 Knoten RK-39: Lage.

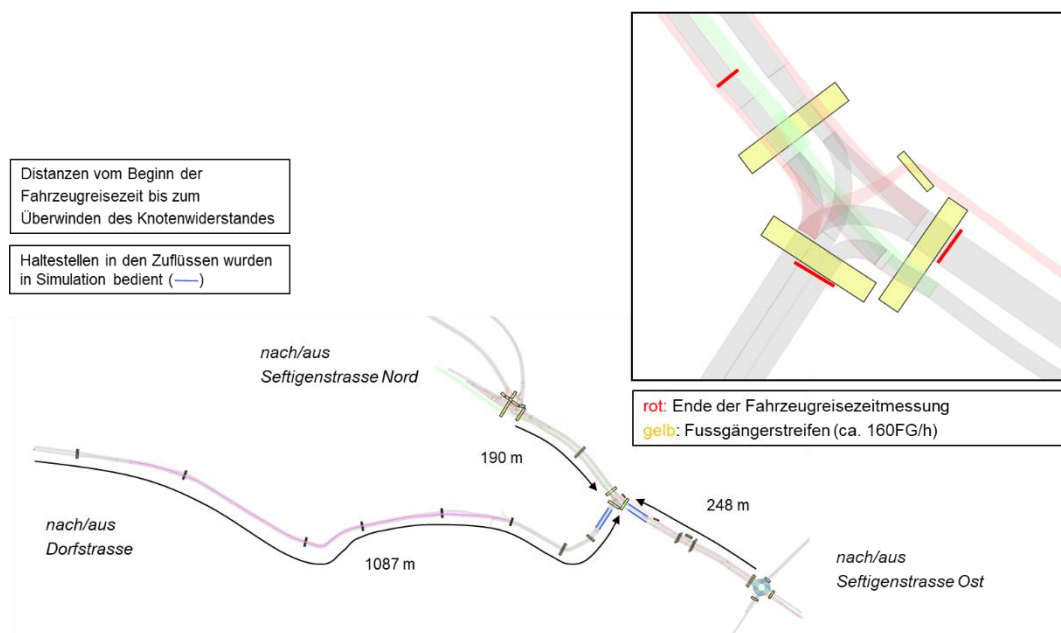


Abb. 27 Knoten RK-39: Ausgestaltung.

I.14 Knoten RK-40: Wabern BE (LSA)



Abb. 28 Knoten RK-40: Lage.

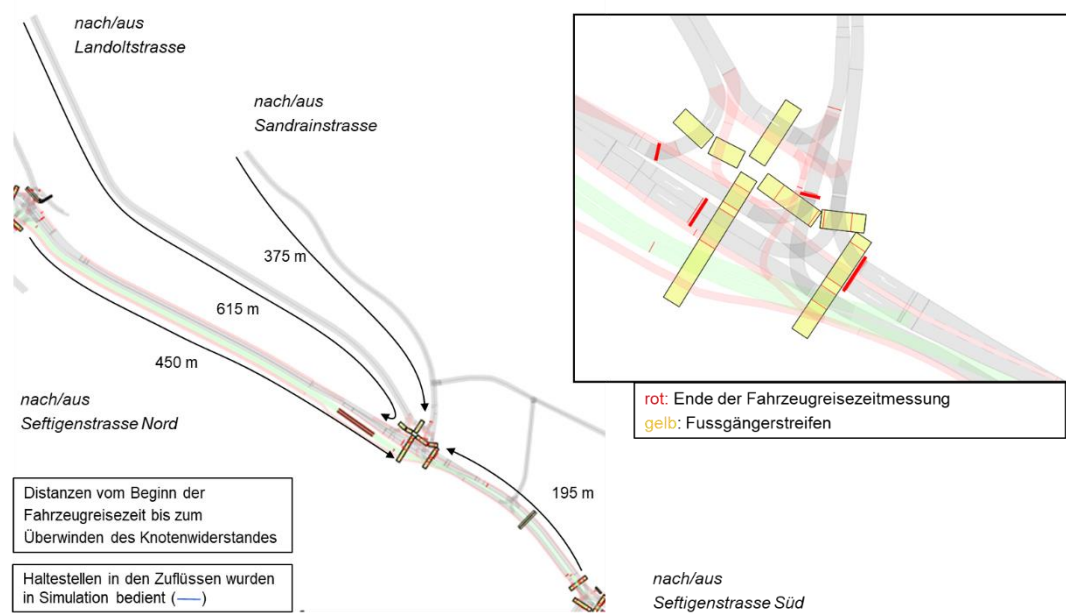


Abb. 29 Knoten RK-40: Ausgestaltung.

I.15 Knoten RK-41: Wabern BE (LSA)



Abb. 30 Knoten RK-41: Lage.

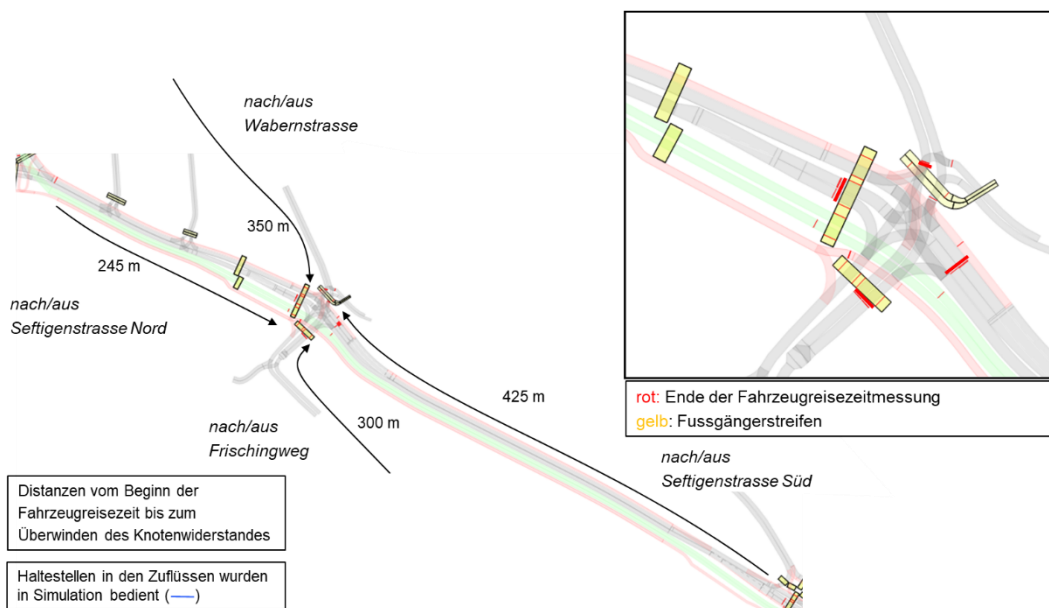


Abb. 31 Knoten RK-41: Ausgestaltung.

I.16 Knoten RK-48: Oberentfelden AG (ungeregelt)

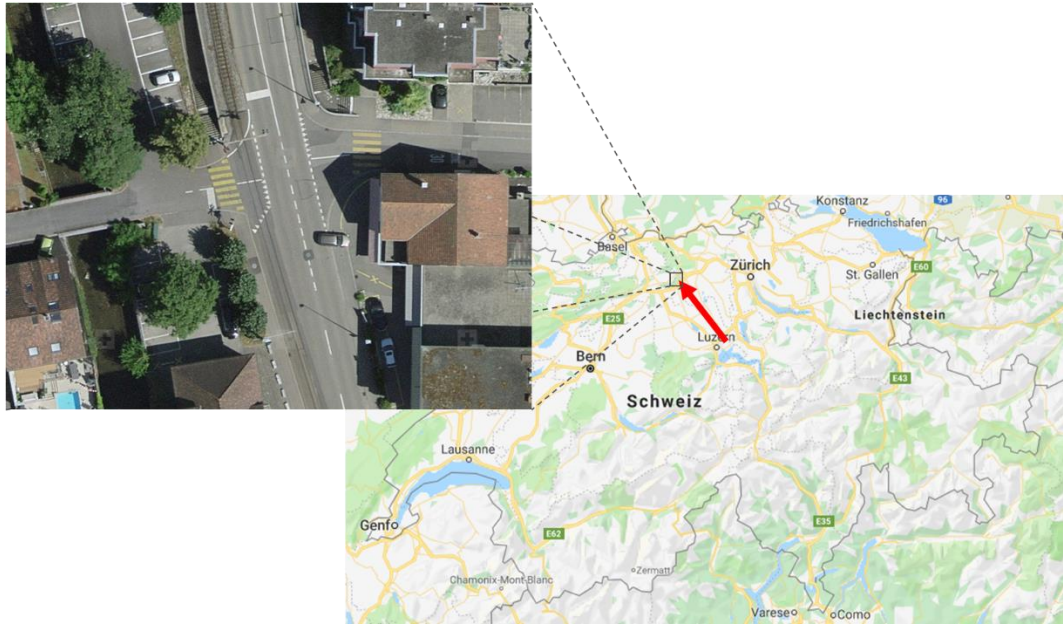


Abb. 32 Knoten RK-48: Lage.

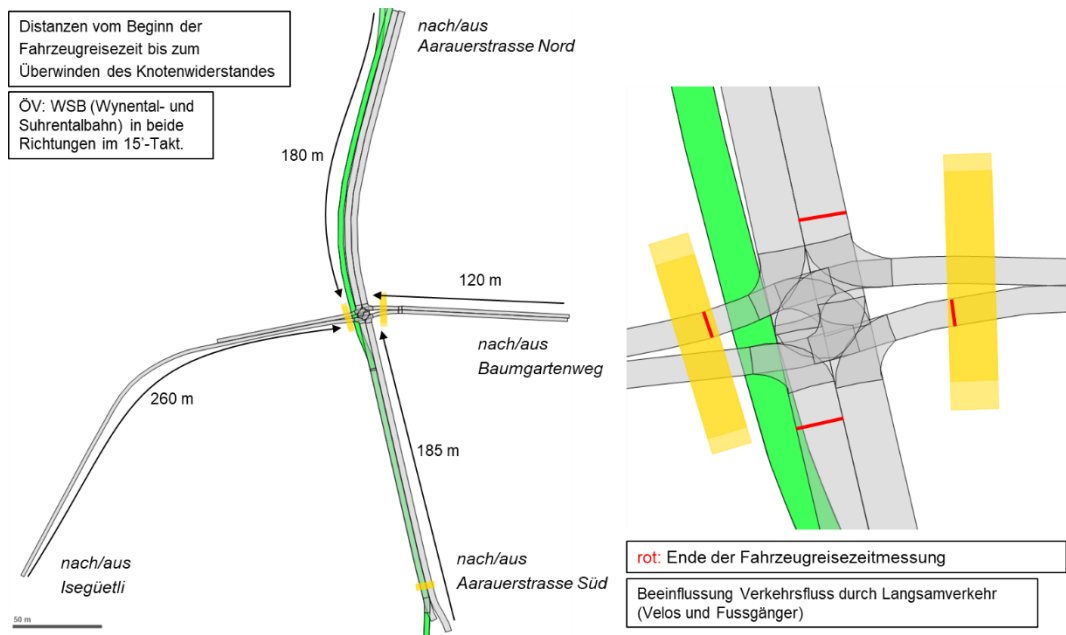


Abb. 33 Knoten RK-48: Ausgestaltung.

I.17 Knoten RK-52: Oberentfelden AG (ungeregelt)

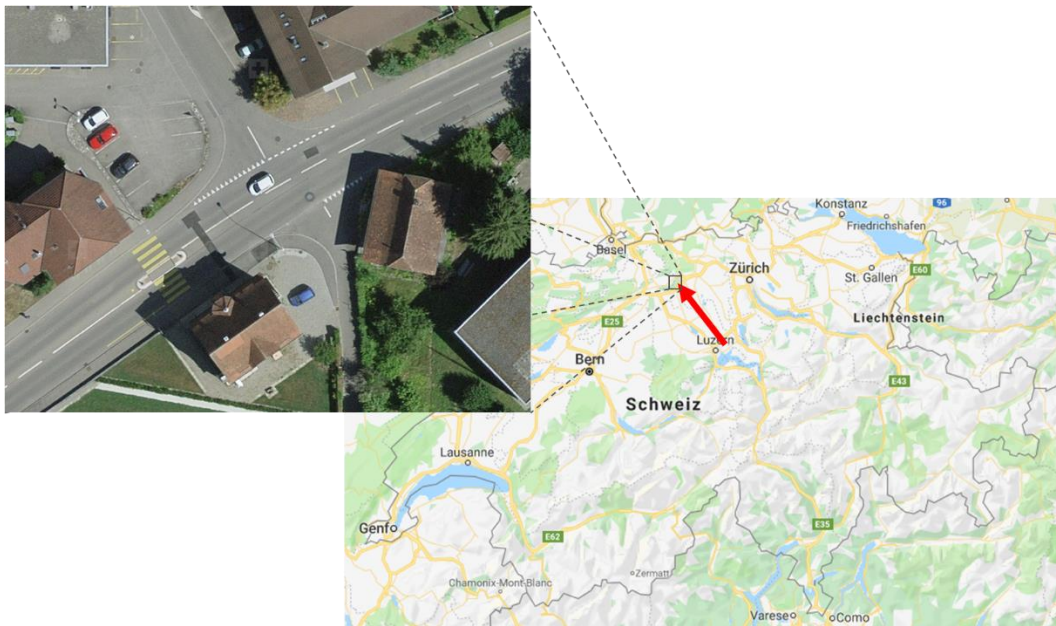


Abb. 34 Knoten RK-52: Lage.

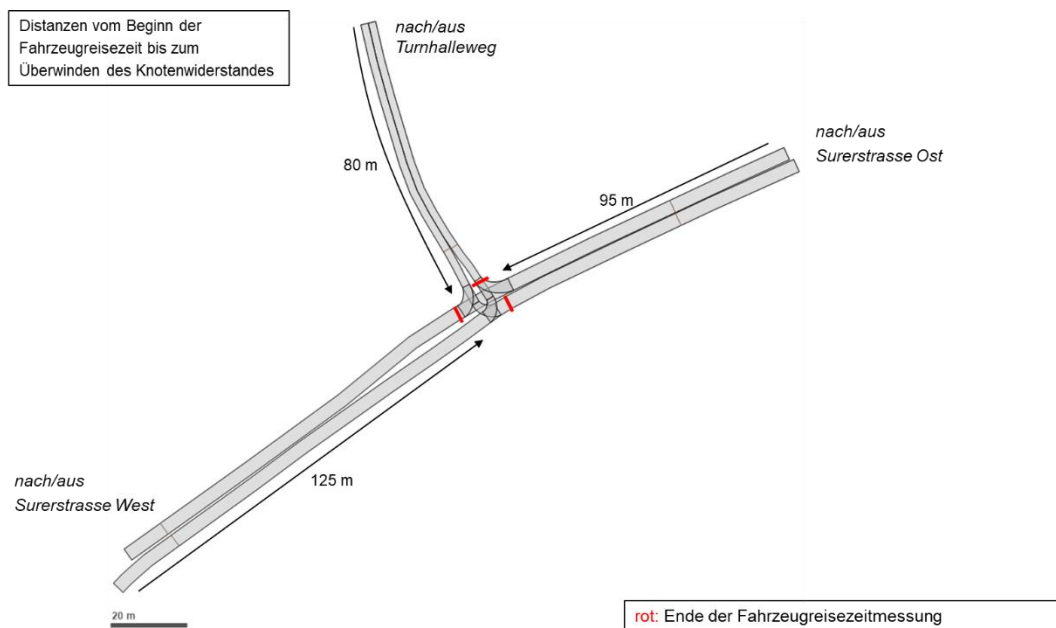


Abb. 35 Knoten RK-52: Ausgestaltung.

I.18 Knoten RK-56: Pratteln BL (Kreisel)



Abb. 36 Knoten RK-56: Lage.

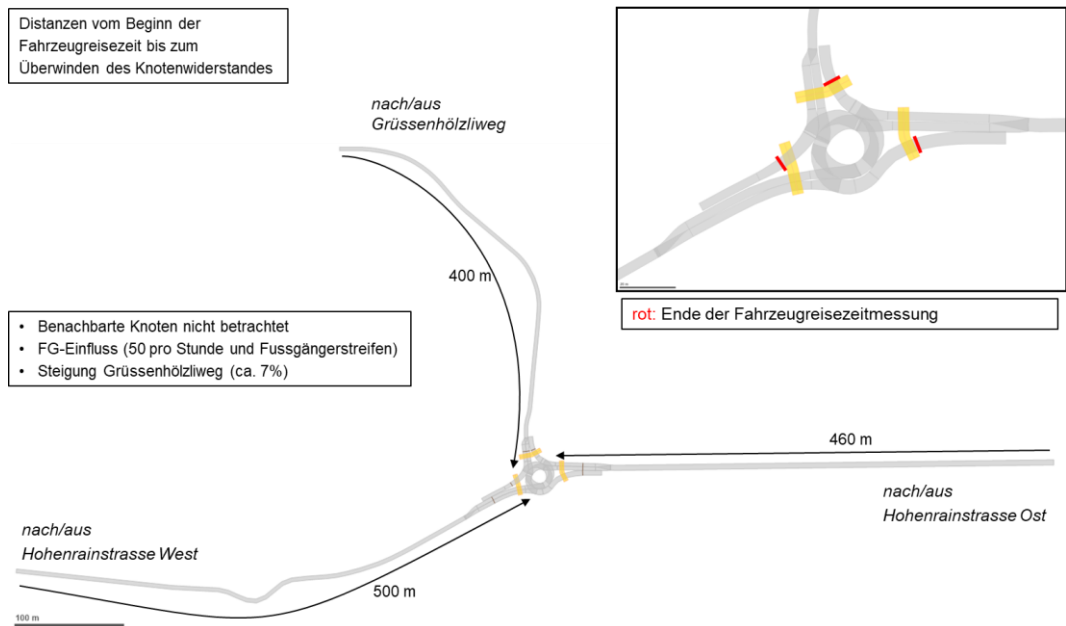


Abb. 37 Knoten RK-56: Ausgestaltung.

I.19 Knoten RK-71: Aarau AG (Kreisel)



Abb. 38 Knoten RK-71: Lage.

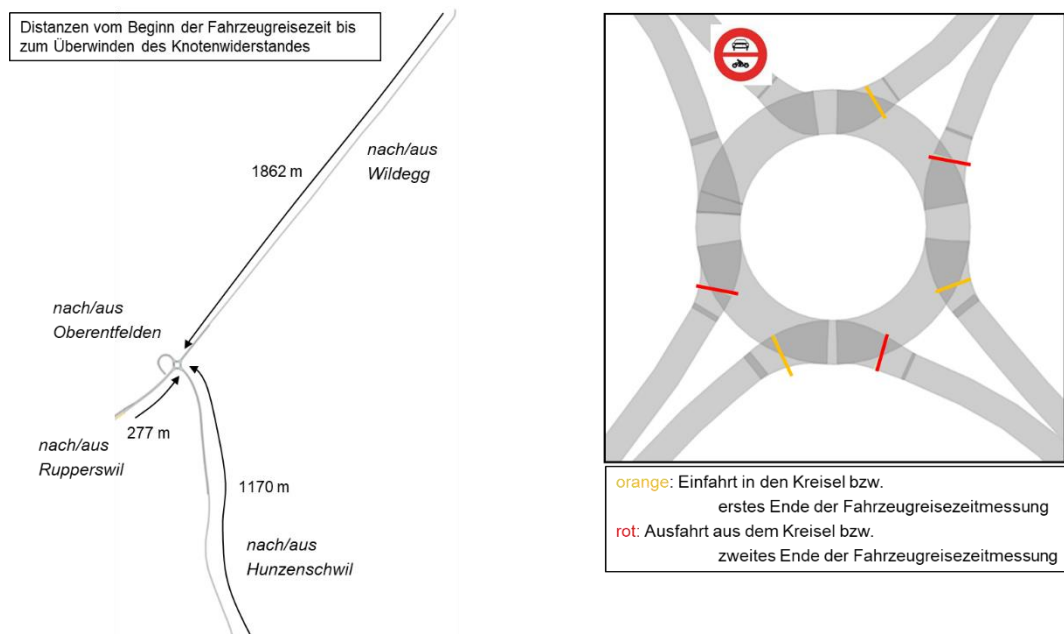


Abb. 39 Knoten RK-71: Ausgestaltung.

I.20 Knoten RK-72: Baden AG (LSA)



Abb. 40 Knoten RK-72: Lage.

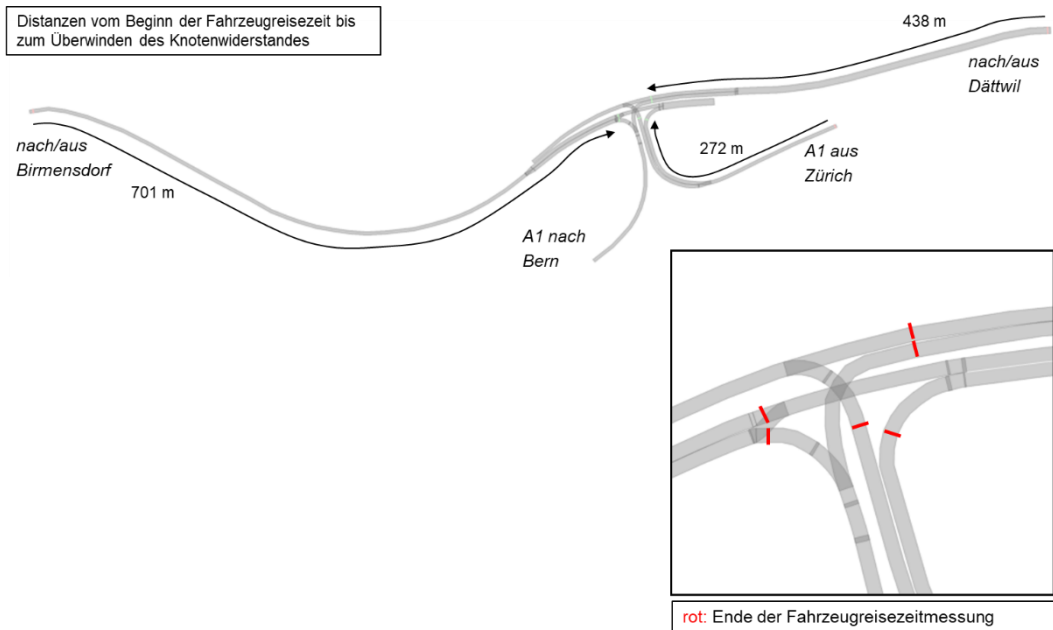


Abb. 41 Knoten RK-72: Ausgestaltung.

I.21 Knoten RK-74: Mägenwil AG (Kreisels)



Abb. 42 Knoten RK-74: Lage.

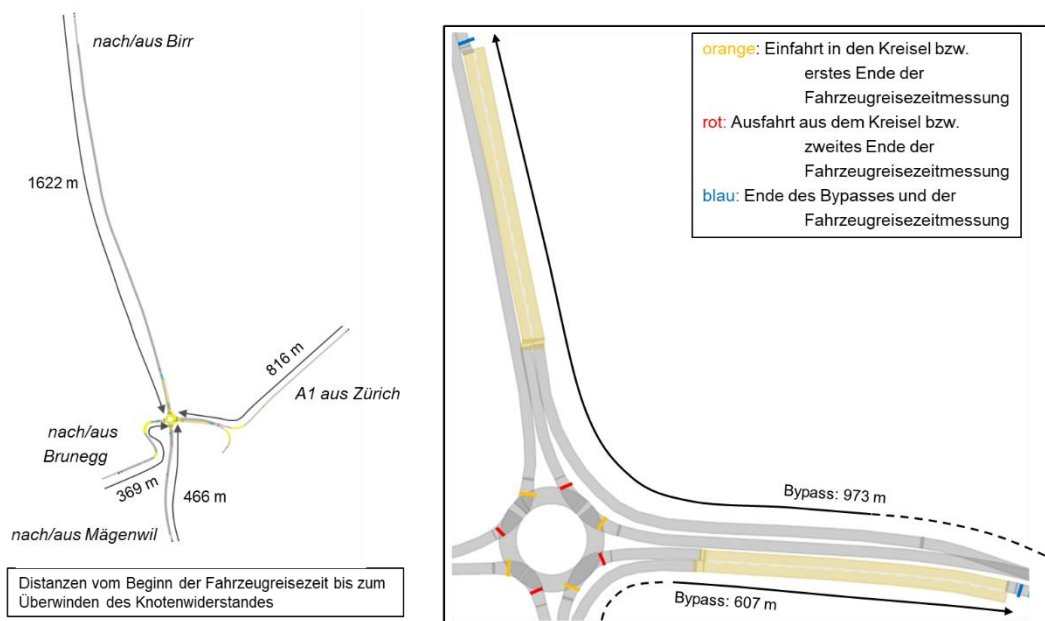


Abb. 43 Knoten RK-74: Ausgestaltung.

I.22 Knoten RK-75: Mägenwil AG (Kreisel)



Abb. 44 Knoten RK-75: Lage.

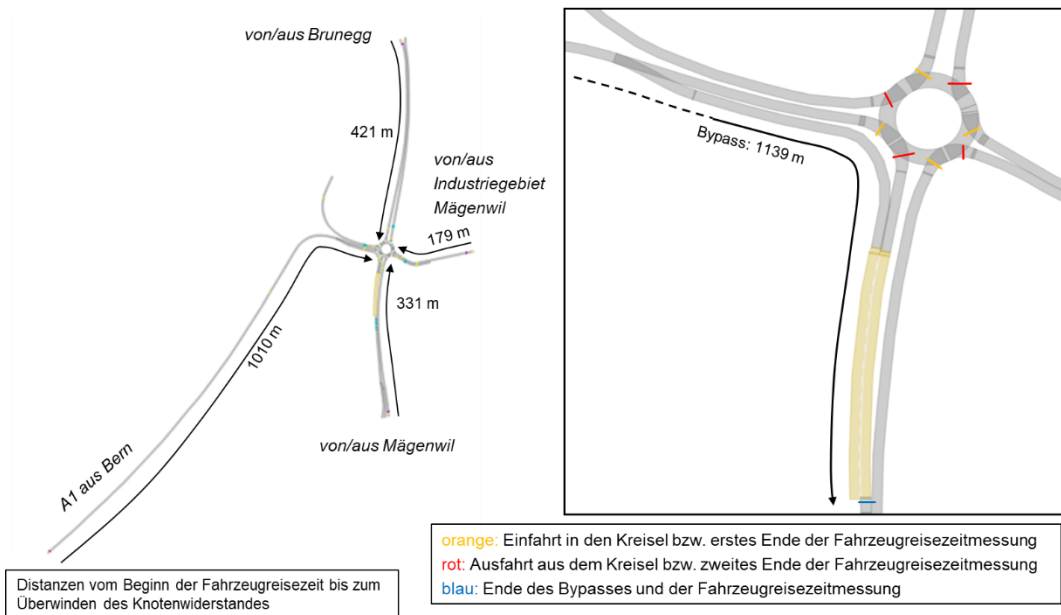


Abb. 45 Knoten RK-75: Ausgestaltung.

I.23 Knoten RK-76: Mägenwil AG (Kreisels)

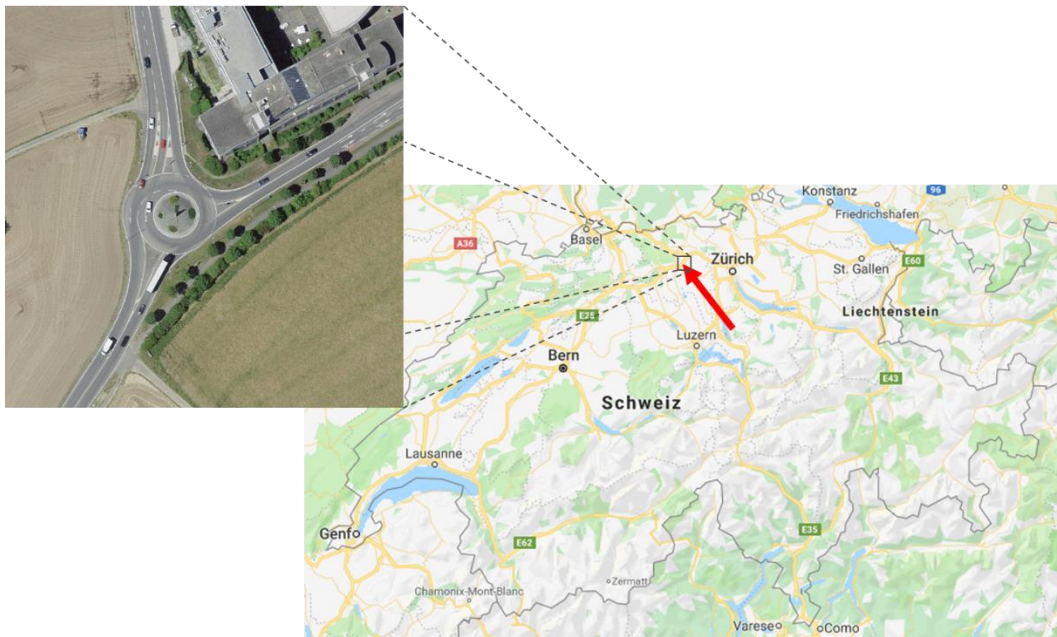


Abb. 46 Knoten RK-76: Lage.

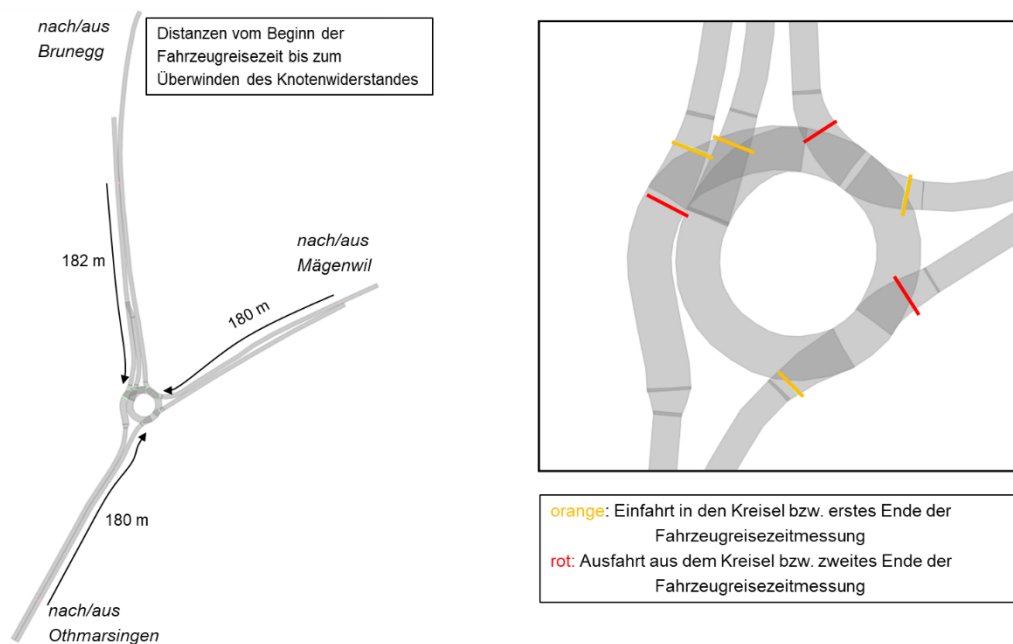


Abb. 47 Knoten RK-76: Ausgestaltung.

Glossar

Begriff	Bedeutung
ASP	Abendspitzenstunde
ASTRA	Bundesamt für Strassen
CR	<i>Capacity Restraint</i> , Einfluss der Kapazitätsauslastung auf die Fahrtzeit
DWV	Durchschnittlicher Werktagsverkehr
GVM ZH	Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich
LSA	Lichtsignalanlage
MSP	Morgenspitzenstunde
SVI	Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

-
- Acelik, R. (1988) The Highway Capacity Manual delay formula for signalized intersections, *ITE Journal*.
-
- Amt für Verkehr des Kantons Zürich (2014) Reisezeitenmonitoring (RZM) Kanton Zürich für den MIV - Dokumentation der vorbereitenden Arbeiten, AfV, VWD, Zürich.
-
- Arendt Consulting (2015) Gesamtverkehrsmodell der Region Basel 2012, Endbericht (9. Überarbeitung vom 25.1.2015), Binningen.
-
- Armitage, D.J. und M. McDonald (1974) Roundabout capacity, *Traffic Engineering & Control*, **15** (18) 812-815.
-
- Ashworth, R. (1969) The capacity of priority-type intersections with a non-uniform distribution of critical acceptance gaps, *Transportation Research*, **3** (2) 273-278.
-
- Caliper (2018) *Travel Demand Modeling with TransCAD*, Caliper Corporation, Newton MA.
-
- Chubukov, A., V. Kapitanov, O. Monina, V. Silyanov und U. Brannolte (2017) Calculation of traffic capacity of signalised intersections, *Transportation Research Procedia*, **20**, 125-131.
-
- Dumba, S., L.D. Vassileva und T. Gumbo (2017) Methodological issues in modelling signalised intersection capacity under informal public transport operations: Case study, Harare, Zimbabwe, *Transportation Research Procedia*, **25**, 4891-1915.
-
- Helbing, D. (2009) Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow, *The European Physical Journal B*, **70** (2), 229–241.
-
- IBM (2016) *IBM SPSS Statistics 24 Command Syntax Reference*, IBM, Armonk, NY.
-
- Ilgın Guler, S. und M. Menendez (2016) Methodology for estimating capacity and vehicle delays at unsignalized multimodal intersections, *International Journal of Transportation Science and Technology*, **5** (4) 257-267.
-
- Kimber, R.M. und P.N. Daly (1979) Time-dependent queueing at road junctions: Observation and prediction, *Transportation Research Part B: Methodological*, **20** (3) 187-203.
-
- Kucharski, R. und A. Drabicki (2017) Estimating macroscopic volume delay functions with the traffic density derived from measured speeds and flows, *Journal of Advanced Transportation*, **2017**.
-
- Lindenmann H.P., I Belopitov und P. Spacek (2004), Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisell, Schlussbericht VSS 1998/076, *Schriftenreihe*, **1092**, UVEK, Ittigen.
-
- Menendez, M., S. Ilgın Guler und E. Puffe (2015) Verkehrsablauf an ungesteuerten Knoten innerorts unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten: Ermittlung repräsentativer Richtwerte und Zusammenhänge, Schlussbericht VSS 2011/308, *Schriftenreihe*, **1528**, UVEK, Ittigen.
-
- Moses, R., E. Mtoi, S. Ruegg und H. McBean (2013) Development of speed models for improving travel forecasting and highway performance evaluation, *Florida Department of Transportation*, Tallahassee.
-
- Ordon, C. (2016) Reisezeiten-Monitoring Strasse, *Infoblatt*, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich, Zürich.
-
- Pitzinger, P. und P. Spacek (2009) Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren, Schlussbericht VSS 2008/301, *Schriftenreihe*, **1287**, UVEK, Ittigen.
-
- Perret, F., T. Dittrich, B. Tasnády, S. Birchmeier und R. Straumann (2015) Ergebnisse der Nummernschilderhebung Aarau, *Technischer Bericht*, EBP, Zürich.
-
- Prasetijo, J. und H. Ahmad (2012) Capacity analysis of unsignalized intersection under mixed traffic conditions, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, **43**, 135-147.
-
- PTV (2018a) *PTV Vissim 18 Handbuch*, PTV AG, Karlsruhe.
-
- PTV (2018b) *PTV Visum 18 Handbuch*, PTV AG, Karlsruhe.
-
- Rapp H.J. (1954) Die Leistungsfähigkeit von ungesteuerten Verkehrsknotenpunkten, *Dissertation*, ETH Zürich, Zürich.
-
- Schnabel, W. und D. Lohse (2011) *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 1 – Straßenverkehrstechnik*, Beuth, Berlin.
-
- Suh, S., C. Park und T.J. Kim (1990) A highway capacity function in Korea: Measurement and calibration, *Transportation Research Part A*, **24** (3) 177-186.
-
- Tørholm, L., P. Andersen, T. Kathmann, S. Roggendorf und R. Schildknecht (2016), Reisezeitenmonitoring (RZM) Kanton Zürich für den MIV, AfV, Zürich.
-
- Transportation Research Board (2016), *Highway Capacity Manual, Sixth Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*, Transportation Research Board, Washington.
-
- Transportation Research Board (2017), Proceedings for 5th International Conference on Roundabouts, <http://teachamerica.com/RAB17/>.
-

Vrtic, M. (2005) Mehrwegumlegung, *Materialien zur Vorlesung Verkehrsplanung*, IVT, ETH Zürich, Zürich.

Vrtic, M., P. Fröhlich und C. Weis (2015) Gesamtverkehrsmodell des Kantons Zürich: Modellaktualisierung 2013, AfV, Zürich.

Vrtic, M., C. Weis, G. Rindsfuser und W. Matthews (2018) Kalibrierung von Capacity-Restraint-Funktionen, Schlussbericht VSS 2015/113, *Schriftenreihe*, **1628**, Bundesamt für Strassen, UVEK, Ittigen.

Vrtic, M. C. Weis, P. Fröhlich, R. Pohlner, J. Pillat, B. Bodenmann, P. Bürki und C. Philipp (2019) Neues Verkehrsmodell Kanton Aargau, AVK, Aarau.

VSS (1999) Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit Knoten ohne Lichtsignalanlagen, **SN 640 022**, VSS, Zürich.

VSS (2006) Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit Knoten mit Kreisverkehr, **SN 640 024a**, VSS, Zürich.

VSS (2008) Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit Knoten mit Lichtsignalanlagen, **SN 640 023a**, VSS, Zürich.

Wu, N. (1997) Verteilung der Rückstaulängen an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen, *Straßenverkehrstechnik*, **41** (8).

Zhaowei, Q. D. Yuzhou und H. Hongyu (2014) Capacity and delay estimation for roundabouts using conflict theory, *The Scientific World Journal*, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4005140>.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 03.09.2020

Grunddaten

Projekt-Nr.: SVI 2017/007
 Projekttitel: Knoten in makroskopischen Verkehrsmodellen
 Enddatum: 30.09.2020

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im vorliegenden Forschungsprojekt konnte erstmals eine Kalibrierung von Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen auf Basis von aus der Empirie abgeleiteten Daten durchgeführt werden. Angesichts der Plausibilität der Verläufe der Funktionen und deren guter Passgenauigkeit an die Daten kann die Modellschätzung als zielführend bewertet werden. Künftig können für alle gängigen Typen von Verkehrsknoten flexible, auslastungsabhängige Widerstände modelliert werden, was zu einem realistischeren Routenwahlverhalten insbesondere im kleinräumigen Bereich führen dürfte.

Die neu geschätzten Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen führen grossmehrheitlich zu einer Verbesserung der in den Modellen abgebildeten Fahrtzeiten, vor allem im belasteten Netz (wo die CR-Funktionen ihre Wirkung entfalten). Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Fahrtzeiten bestehen weiterhin – tendenziell werden die Reisezeiten im Modell insbesondere im innerstädtischen Bereich eher unterschätzt. Grund dafür sind vermutlich die Einflüsse weiterer Faktoren wie ÖV-Haltestellen, Fussgängerstreifen etc.

Die hier neu geschätzten Parameter für die Knoten- und CR-Funktionen können von Erstellern und Anwendern vor allem neuer Verkehrsmodelle direkt übernommen werden. Insbesondere deren Zusammenwirkung mit den in der VSS-Forschungsarbeit 2017/119 ermittelten Strecken-CR-Funktionen bietet Potential für eine verbesserte Abbildung der Fahrtzeiten und der Routenwahl im Gesamtnetz.

Eine weitere Differenzierung der Knoten und Abbieger, z.B. räumlich oder nach deren Topologie, könnte zu einer nochmaligen Verbesserung der hier erzielten Ergebnisse führen. Für die entsprechenden Modellschätzungen wäre aber eine substanziell grössere Datengrundlage vonnöten, um die statistische Signifikanz der ermittelten Effekte sicherzustellen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Im vorliegenden Forschungsprojekt konnte erstmals eine Kalibrierung von Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen auf Basis von aus der Empirie abgeleiteten Daten durchgeführt werden. Angesichts der Plausibilität der Verläufe der Funktionen und deren guter Passgenauigkeit an die Daten kann die Modellschätzung als zielführend bewertet werden. Künftig können für alle gängigen Typen von Verkehrsknoten flexible, auslastungsabhängige Widerstände modelliert werden, was zu einem realistischeren Routenwahlverhalten insbesondere im kleinräumigen Bereich führen dürfte.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die hier neu geschätzten Parameter für die Knoten- und CR-Funktionen können von Erstellern und Anwendern vor allem neuer Verkehrsmodelle direkt übernommen werden. Insbesondere deren Zusammenwirkung mit den in der VSS-Forschungsarbeit 2017/119 ermittelten Strecken-CR-Funktionen bietet Potential für eine verbesserte Abbildung der Fahrtzeiten und der Routenwahl im Gesamtnetz.

Publikationen:

-

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Weis

Vorname: Claude

Amt, Firma, Institut: TransOptima GmbH

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die vorliegende Forschungsarbeit liefert einen Beitrag für eine verbesserte makroskopische Modellierung von Knotenpunkten in makroskopischen Verkehrsmodellen. Mit den empfohlenen Knoten- und Abbieger-CR-Funktionen und den dazugehörigen Parametern liegen praktikable Inputdaten vor, welche gegenüber den heute oftmals verwendeten pauschalen Knotenzuschlägen eine Verbesserung der Modellgüte ermöglichen. Der Fokus für die konkrete Umsetzung liegt dabei auf der in der Schweiz mehrheitlich eingesetzten Software VISUM. Die mit diesem Forschungsprojekt formulierten Ziele sind damit erreicht.

Umsetzung:

Der Einsatz von VISSIM zur Generierung der relevanten Kenngrössen (als Alternative zu Messungen) stellte sich als alternativer Lösungsansatz heraus und lieferte die benötigten Inputdaten zur Schätzung der Parameter. Das vorliegende Set an CR-Funktionen und deren Parameter, differenziert nach Knoten- und Abbiegetyp, bildet zusammen mit den Ergebnissen der VSS-Forschungsarbeit 2017/119 (Strecken-CR-Funktionen) die Möglichkeit für eine Verbesserung der Abbildung der Fahrtzeiten und der Routenwahl und können bei der Aktualisierung und dem Aufbau von makroskopischen Verkehrsmodellen Anwendung finden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Weiterer Forschungsbedarf besteht in einer zusätzlichen Differenzierung der Knotenpunkte und Abbieger, beispielsweise räumlicher Art oder nach deren Topologie. Dies würde einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der hier erzielten Ergebnisse leisten. Für die entsprechenden Modellschätzungen wären aber eine signifikant grössere Datengrundlage notwendig.

Einfluss auf Normenwerk:

Direkt: keinen Einfluss auf die bestehenden Normen
Indirekt: Erhöhung der Qualität der Modelldaten (bspw. Reisezeiten) für KNA-Anwendungen oder verkehrstechnische Berechnungen

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Richner

Vorname: Marco

Amt, Firma, Institut: Gruner AG, Basel

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen* → *Arbeitshilfen, Formulare, Merkblätter* → *Formulare*) heruntergeladen werden.

SVI Publikationsliste

Die Liste kann bei der [SVI](#) bezogen werden.