

Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel (Grundlagen)

**Capacité des carrefours giratoires fortement
chargés (bases)**

**Capacity of roundabouts under saturated
conditions (basic principles)**

H.P. Lindenmann, dipl. Ing. ETH

I. Belopitov, dipl. Ing.

P. Spacek, dipl. Ing. ETH

Forschungsauftrag VSS 1998/076 auf Antrag
des Schweizerischen Verbandes der Strassen-
und Verkehrsfachleute (VSS)

Zürich, August 2004

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung / Résumé / Abstract	III
1. Einleitung	1
1.1. Ausgangslage	1
1.2. Problematik und Fragen	1
1.3. Auftrag	2
1.4. Forschungsziel	2
1.5. Vorgehen	2
1.6. Begriffe und Abkürzungen	3
1.7. Kurzübersicht über verschiedene Bemessungsverfahren zur Leistungsfähigkeit von Kreiseln	4
1.7.1. Bemessungsverfahren	4
1.7.2. Verfahren zur Bestimmung der Qualität des Verkehrsablaufes	6
2. Erhebungen und Auswertungen	7
2.1. Auswahl der Untersuchungsobjekte	7
2.2. Erhebungsmethode	8
2.3. Auswertungen	8
2.3.1. Grundsatz	8
2.3.2. Grundlagen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Einfahrten	9
2.3.3. Auswertung der Zeitlücken	11
2.3.4. Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken	12
3. Ergebnisse	13
3.1. Leistungsfähigkeit der Einfahrt	13
3.1.1. Grundsatz	13
3.1.2. Einstreifige Einfahrt / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 1/1)	13
3.1.3. Einstreifige Einfahrt + Busspur / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 1+B/1)	15
3.1.4. Zweistreifige Einfahrt / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 2/1)	17
3.1.5. Zweistreifige Einfahrt / zweistreifige Kreisfahrbahn (Typ 2/2)	23
3.2. Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt	26
3.2.1. Einstreifige Einfahrten mit Fussgängerstreifen (Typ 1/1)	26
3.2.2. Zweistreifige Einfahrten mit Fussgängerstreifen (Typ 2/1)	27
3.3. Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Ausfahrt	28
3.4. Einfluss zeichengebender Fahrzeuge beim Ausfahren auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt	28
4. Erkenntnisse	29
4.1. Grundsätzliches	29
4.2. Leistungsfähigkeit von Kreiseln	29
4.2.1. Betriebsform Typ 1/1	29
4.2.2. Betriebsform Typ 2/1	30

4.2.3. Betriebsform Typ 2/2	31
4.2.4. Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit	31
5. Folgerungen	34
6. Verzeichnisse und Quellen	35
6.1. Quellenverzeichnis	35
6.2. Abbildungsverzeichnis.....	36
6.3. Tabellenverzeichnis.....	38
Anhänge.....	39

Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel (Grundlagen) diente dazu:

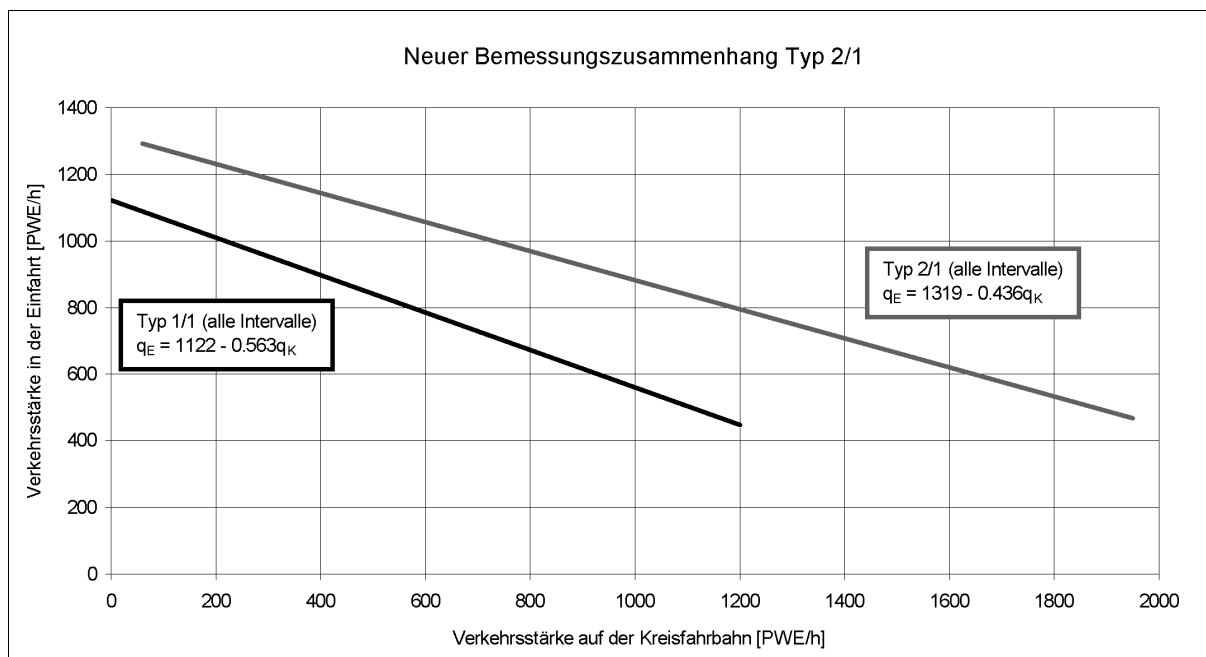
- die Bemessungsgrundlagen der VSS-Norm SN 640 024 für einstreifige Kreisel mit einstreifigen Zufahrten zu überprüfen und
- neue Bemessungsgrundlagen einerseits für die in der Schweiz häufig angewendeten einstreifigen Kreisel mit überbreiter Kreisfahrbahn und zweistreifigen Zufahrten und andererseits für zweistreifige Kreisel mit zweistreifigen Zufahrten zu erarbeiten.

Neben diesen Hauptzielsetzungen galt es, verschiedene Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit zu erfassen und zu bewerten. Namentlich ging es um die Quantifizierung der Reduktion der Leistungsfähigkeiten der Kreiselfahrt durch den Fussgängerstreifen querende Fussgänger.

Mit den Untersuchungsergebnissen liessen sich die gestellten Fragen schlüssig beantworten, mit Ausnahme der Bemessungsgrundlage für zweistreifige Kreisel mit zweistreifigen Zufahrten, für welche keine genügend grosse Stichprobe an Untersuchungsobjekten bestand.

Die Untersuchungen führten zu folgenden Hauptkenntnissen:

- *Leistungsfähigkeit einstreifiger Kreisel mit einstreifigen Zufahrten (Typ 1/1):*
Der bestehende Bemessungszusammenhang zwischen der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und der maximal möglichen Verkehrsstärke des einfahrenden Verkehrs der Zufahrt gemäss SN 640 024 konnte weitgehend bestätigt werden.
- *Leistungsfähigkeit einstreifiger Kreisel mit überbreiter Kreisfahrbahn und zweistreifiger Zufahrt (Typ 2/1):*
Diese in der Schweiz häufig angewendete und zweckmässig erscheinende Betriebsform weist wie vermutet eine höhere Leistungsfähigkeit im Vergleich mit Kreiseln ähnlicher Durchmesser und einstreifiger Kreisfahrbahn bei einstreifiger Zufahrt auf. Die anhand verschiedener Kreisel dieser Betriebsform ermittelte durchschnittliche Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Zufahrt beträgt beträchtliche 20 bis 40%. Der neu erarbeitete Bemessungszusammenhang ist aus der folgenden Abbildung ersichtlich.



- *Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Zufahrt:*

Die frühere Feststellung, wonach der Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Zufahrt mit wachsender Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn abnimmt, konnte bestätigt werden. Ab Verkehrsstärken von mehr als 800 Fahrzeugen pro Stunde auf der Kreisfahrbahn wird die Leistungsfähigkeit der Zufahrt praktisch nicht mehr reduziert.

Die Untersuchung zeigte hingegen, dass bei geringen Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn der Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Zufahrt auch bei bereits geringen Fussgängermengen deutlich grösser, nämlich etwa verdoppelt gegenüber den bisherigen Bemessungsgrundlagen, ausfällt. Dieser Einfluss wurde bisher offensichtlich, vor allem bei kleinen bis mittleren Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn, unterschätzt. Eine Anpassung der Norm SN 640 024 in diesem Bereich drängt sich auf.

Die Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchungen bilden die Grundlage für eine Ergänzung der Norm SN 640 024 im Bereich einstreifiger Kreisel mit überbreiter Kreisfahrbahn und zweistreifigen Kreiszufahrten sowie eine Anpassung der Grundlagen zur Reduktion der Leistungsfähigkeit von Kreiselfahrten aufgrund querender Fussgänger. Für die Betriebsform zweistreifige Kreisel mit zweistreifigen Zufahrten konnte noch keine Bemessungsgrundlage erarbeitet werden.

Capacité des carrefours giratoires fortement chargés (bases)

Les recherches sur la capacité des giratoires fortement chargés (bases) ont eu pour but de :

- vérifier les bases de dimensionnement des giratoires à entrées et anneau à une voie selon la norme VSS SN 640 024 et de
- redéfinir les bases de dimensionnement des giratoires - fréquents en Suisse - à une voie large à l'anneau et entrées à deux voies et celles des giratoires à entrées et anneau à deux voies.

En plus des objectifs principaux, il s'agissait de réunir et d'évaluer différents facteurs influençant la capacité et, notamment, de quantifier la réduction de capacité des entrées liée aux traversées piétonnes.

Les résultats ont permis de répondre de manière probante aux questions à une exception près. En effet, faute d'échantillonnage suffisant, la question concernant les bases de dimensionnement des giratoires à entrées et anneau à deux voies est restée en suspens.

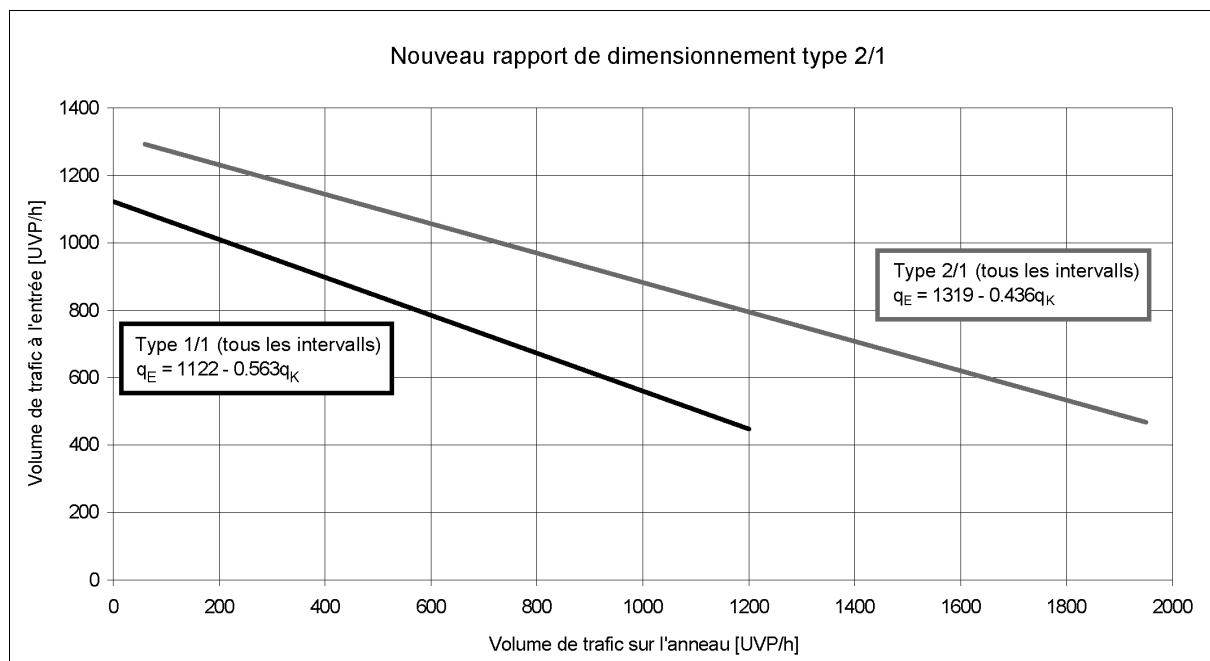
Pour l'essentiel, les enquêtes ont abouti aux résultats suivants :

- *Capacité des giratoires à entrées et anneau à une voie (type 1/1):*

Il a été en grande partie possible de confirmer le rapport entre le volume de trafic sur l'anneau et le volume maximal de trafic entrant selon la norme SN 640 024.

- *Capacité des giratoires à une voie large à l'anneau et entrées à deux voies (type 2/1):*

Comme on l'avait supposé, cette forme d'exploitation fréquente en Suisse et paraissant adéquate est plus performante que les giratoires ayant un diamètre similaire, une chaussée annulaire à une voie et des entrées à une voie. Sur la base de plusieurs giratoires du même type, l'on a enregistré une augmentation moyenne considérable, soit de 20 à 40%, de la capacité de l'entrée. Le nouveau rapport de dimensionnement figure sur le graphique ci-dessous:



- *Influence des traversées piétonnes sur la capacité de l'entrée:*

L'enquête a confirmé la constatation antérieure suivante: l'influence des traversées piétonnes sur la capacité de l'entrée diminue en fonction de l'accroissement du trafic sur l'anneau. A partir de 800 véhicules/h sur la chaussée annulaire, la diminution de capacité de l'entrée est pour ainsi dire nulle.

Il s'est avéré en revanche qu'en cas de faibles volumes de trafic sur l'anneau, l'influence sur la capacité de l'entrée est – même en présence d'un faible volume de trafic piétonnier – nettement plus marquée, soit deux fois plus importante par rapport aux bases de dimensionnement en vigueur. Il ne fait aucun doute que cette influence a été sous-estimée, en particulier pour des volumes de trafic faibles à moyens sur la chaussée annulaire. Il est indispensable d'adapter la norme SN 640 024 en conséquence.

Les résultats de cette recherche forment la base des compléments à apporter à la norme SN 640 024 dans le domaine des giratoires à une voie large à l'anneau et entrées à deux voies. Ils servent en outre à remanier les bases concernant la réduction de capacité des entrées du fait des traversées piétonnes. Aucune base de dimensionnement n'a pu être élaborée pour les giratoires à entrées et anneau à deux voies.

Capacity of roundabouts under saturated conditions (basic principles)

The investigations into the capacity of roundabouts under saturated conditions (basic principles) were undertaken for the following purposes:

- To check the dimensioning bases of VSS standard SN 640 024 for one-lane roundabouts with one-lane entries.
- To work out new dimensioning bases for one-lane roundabouts with an extra-wide circulatory roadway and two-lane entries (a design employed frequently in Switzerland), and also for two-lane roundabouts with two-lane entries.

As well as these two main aims, the investigations were also intended to measure and evaluate various influences on capacity. There was a specific focus on quantifying the reduction in the capacity of the roundabout entry caused by pedestrians using the pedestrian crossing.

The results of the investigations provided conclusive answers to the initial questions except for the one concerning the dimensioning base for two-lane roundabouts with two-lane entries. There was no adequately-sized sample of such objects available.

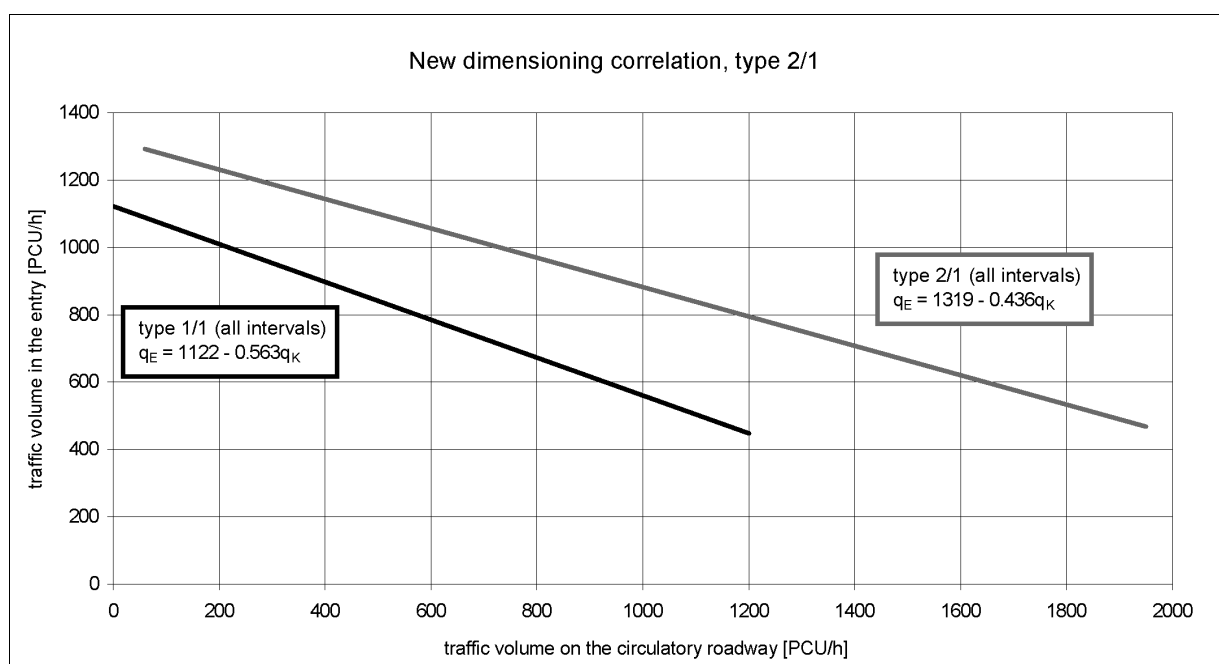
The investigations led to the following main findings:

- *Capacity of one-lane roundabouts with one-lane entries (type 1/1):*

The existing dimensioning correlation between the traffic volume on the circulatory roadway and the maximum possible traffic volume of the incoming traffic in the entry, as specified in SN 640 024, was largely confirmed.

- *Capacity of one-lane roundabouts with extra-wide circulatory roadway and two-lane entry (type 2/1):*

This evidently practical roundabout service form is used frequently in Switzerland. As expected, it was found to have a higher capacity compared to roundabouts of similar circle diameters with a one-lane circulatory roadway and one-lane entry. Calculations on the basis of various roundabouts with this service form revealed a considerable average increase in the capacity of the entry: 20 to 40%. The figure below shows the new dimensioning correlation which was worked out.



- *Influence of crossing pedestrians on the capacity of the entry:*

There was confirmation of the previous finding, according to which the influence of crossing pedestrians on the capacity of the entry declines with growing traffic volumes on the circulatory roadway. Where traffic volumes on the circulatory roadway are above 800 vehicles per hour, there is practically no reduction in the capacity of the entry.

The investigation showed, however, that if traffic volumes on the circulatory roadway are low, the capacity of the entry is influenced significantly more – about twice as much as in the existing dimensioning bases – even where pedestrian volumes are low. It appears that this influence has been underestimated until now, particularly for small to medium traffic volumes on the circulatory roadway. There is a clear need for standard SN 640 024 to be adjusted in this area.

The findings from these investigations form the basis for an amendment to standard SN 640 024 with respect to one-lane roundabouts with an extra-wide circulatory roadway and two-lane roundabout entries, and for an adjustment of the bases for the reduction in the capacity of roundabout entries caused by crossing pedestrians. It has not yet been possible to work out a dimensioning base for the service form of a two-lane roundabout with two-lane entries.

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Viele Kreisel in der Schweiz müssen heute in Verkehrsspitzenzeiten im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit betrieben werden. Die Auswirkungen sind ansteigende Wartezeiten, Rückstaus, Emissionen und erhöhter Treibstoffverbrauch. Bei der Bemessung der Kreisel resp. bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufs werden heute meistens empirisch-analytische Berechnungsverfahren verwendet. Viele dieser Verfahren führen im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit zu ungenauen und unzuverlässigen Resultaten oder sie versagen sogar. Die Erfahrung zeigt weiter, dass die Bandbreite der Berechnungsergebnisse der Leistungsfähigkeit bei Verwendung von verschiedenen Bemessungsverfahren gerade im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit eines Kreisels gross ist.

In der Schweiz wurden bisher bei Kreiseln mit verschiedenen Betriebsformen nur sehr wenige Messungen und Erhebungen zur Leistungsfähigkeit durchgeführt. Einige Messungen bildeten die Basis des VSS-Forschungsberichtes Nr. 204 [1].

Im Zentrum der vorliegenden Untersuchung standen deshalb Erhebungen und Messungen zum Fahrverhalten an Kreiseln mit verschiedenen Betriebsformen. Von besonderem Interesse war dabei der Fahrvorgang bei der Einfahrt in den Kreisel.

Im Jahr 1999 wurde die VSS-Norm SN 640 024 „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit für Knoten mit Kreisverkehr“ publiziert. Die Bemessungsverfahren für die Leistungsfähigkeit, insbesondere für mehrstreifige Kreisel sowie der Einfluss querender Fussgänger wurden weitgehend den entsprechenden Richtlinien und Quellen aus Deutschland entnommen [2].

Da für die Bemessung von Kreiseln sowohl in verschiedenen europäischen Ländern als auch z.B. in den USA und Australien jeweils eigene Grundlagen resp. Richtlinien bestehen, die mehrheitlich kleinere, teilweise aber auch grössere Unterschiede aufweisen, war eine Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für Kreisel in der Schweiz angezeigt [3].

1.2. Problematik und Fragen

Im Zusammenhang mit der Überprüfung der bestehenden Bemessungsgrundlagen gemäss SN 640 024 waren besonders folgende Probleme und Fragen zu beachten:

- Die Bemessungszusammenhänge für einstreifige Kreisel mit einstreifigen Zufahrten, im Folgenden mit Typ 1/1, und einstreifigen Zufahrten mit Busspur, im Folgenden mit Typ 1+B/1 bezeichnet, sind Ende der 1980er Jahre zu Beginn der allgemeinen Verbreitung der Kreisel anhand von nur sehr wenigen Messungen abgeleitet worden.
- In der Zwischenzeit hat sich das Fahrverhalten mit grosser Wahrscheinlichkeit, insbesondere durch die weite Verbreitung dieser Knotenform und der damit verbundenen Gewöhnung der Fahrzeuglenker an diese Knotenform, verändert.
- Die Bemessungsgrundlagen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit für die Betriebsformen 2/2 und 2/3 (Zahl der Fahrstreifen auf Kreisfahrbahn / Zahl Fahrstreifen der Zufahrt) basieren weitgehend auf den erwähnten ausländischen Grundlagen. Eine Überprüfung drängte sich deshalb auf.
- Für die in der Schweiz häufig angewendete Betriebsform 2/1 (zweistreifige Zufahrt mit überbreiter Kreisfahrbahn) war bislang kein Bemessungszusammenhang bekannt, weder im Ausland noch in der Schweiz.
- Im gleichen Zug war eine Überprüfung des Einflusses querender Fussgänger auf dem Fussgängerstreifen auf die Leistungsfähigkeit der Zufahrt nötig.
- Von Interesse war auch die Frage der Leistungsfähigkeit der Ausfahrten. Dabei stellte sich grundsätzlich die Frage der Anordnung von zweistreifigen Ausfahrten bei Kreiseln.

Neben diesen zentralen Untersuchungsgegenständen waren folgende Fragen von weiterem Interesse:

- Wie wirkt sich der Anteil zeichengebender Fahrzeuglenker (Betätigten des Blinkers) beim Ausfahren auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt aus?
- Wie gross sind die Zeitlückenverteilungen in Abhängigkeit der Verkehrsstärke in der Einfahrt? Wie gross sind die Grenzzeitlücken auf der Kreisfahrbahn?

- Welche Faktoren und Grössen haben einen Einfluss auf den Verkehrsablauf im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit bei ein- oder zweistreifigen Zufahrten und einstreifigen Kreisfahrbahnen, bei Führung des Öffentlichen Verkehrs (ÖV) im Kreisel, bei Führung des leichten Zweiradverkehrs im Kreisel?

Durch Beantwortung dieser Fragen werden neue Grundlagen erwartet, die auch für Bemessungsverfahren, welche auf der Simulationstechnik beruhen, verwendet werden können.

1.3. Auftrag

Aufgrund dieser Ausgangslage und den konkreten Fragestellungen wurde das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich mit der Durchführung der vorliegenden Untersuchung zur „Leistungsfähigkeit hochbelasteter Kreisel (Grundlagen)“ beauftragt. Zentral waren dabei die Erhebung und Analyse der relevanten Grössen des Verkehrsablaufs unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsformen an ausgewählten, hochbelasteten Kreiseln in der Schweiz.

1.4. Forschungsziel

Gemäss Forschungsauftrag bestand das generelle Forschungsziel darin, Grundlagen zur Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufs im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit von Kreiseln zu erarbeiten.

Die Bestimmung und Ermittlung der relevanten Parameter des Verkehrsablaufs war unter Berücksichtigung verschiedener Betriebsformen durchzuführen. Die Ergebnisse sollten

- zur Überprüfung der bestehenden Bemessungsverfahren (Grundlagen) dienen,
- Grundlagen für die Leistungsfähigkeit bei zweistreifigen Kreiseln liefern und
- zur Verifizierung verschiedener Parameter, welche bei Simulationsmodellen verwendet werden, dienen.

1.5. Vorgehen

Die vorliegende Untersuchung enthält zwei Hauptteile. Im ersten Teil wurden die Messungen und Erhebungen zum Fahrverhalten und zum Verkehrsablauf an den ausgewählten Kreiseln mittels Videoerfassung durchgeführt. Im zweiten Teil ging es um die Auswertung und Analyse der Messergebnisse als Basis für Gegenüberstellungen und Vergleiche mit den bestehenden Grundlagen (Norm) sowie deren Beurteilung. Der Ablauf der Untersuchung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

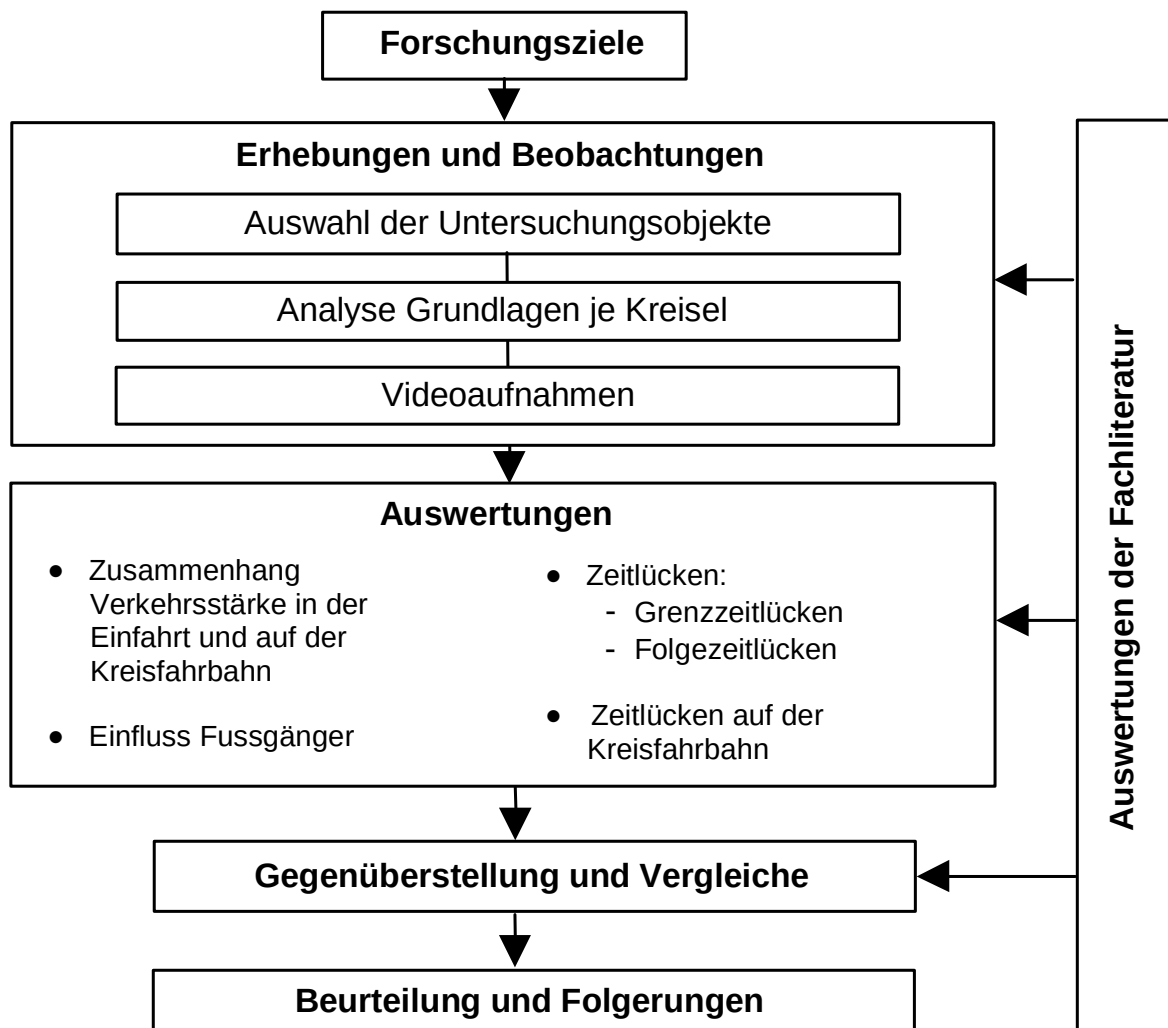


Abb. 1: Untersuchungsablauf

1.6. Begriffe und Abkürzungen

Die nachstehenden Tabellen enthalten eine Übersicht der Begriffe und Abkürzungen. Bezüglich Begriffsdefinitionen sei hier auf die VSS Normen (SN 640 016, 640 017, 640 263 und 640 024) verwiesen.

Abk.	Begriff
1/1	einstreifige Einfahrt und einstreifige Kreisfahrbahn
1+B/1	einstreifige Einfahrt + Busspur und einstreifige Kreisfahrbahn
2/1	zweistreifige Einfahrt und einstreifige Kreisfahrbahn
2/2	zweistreifige Einfahrt und zweistreifige Kreisfahrbahn
b_E	Breite des Fahrstreifens im Einfahrtsbereich in m
b_{E_l}	Breite des linken Fahrstreifens im Einfahrtsbereich in m (bei zweistreifigen Einfahrten)
b_{E_r}	Breite des rechten Fahrstreifens im Einfahrtsbereich in m (bei zweistreifigen Einfahrten)
b_K	Breite der Kreisfahrbahn in m
b_{K_a}	Breite des äusseren Fahrstreifens bei zweistreifigen Kreisfahrbahnen in m
b_{E_i}	Breite des inneren Fahrstreifens bei zweistreifigen Kreisfahrbahnen in m
D	Aussendurchmesser in m

Tab. 1: Begriffe und Abkürzungen zur Geometrie

Abk.	Begriff
Q_K	Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn auf Höhe Einfahrt in PWE/h
Q_{Ka}	Verkehrsstärke des äusseren Fahrstreifens bei zweistreifigen Kreisfahrbahnen in PWE/h
Q_{Ki}	Verkehrsstärke des inneren Fahrstreifens bei zweistreifigen Kreisfahrbahnen in PWE/h
Q_E	Verkehrsstärke in der Einfahrt in PWE/h
Q_{EI}	Verkehrsstärke des linken Fahrstreifens in der Einfahrt in PWE/h
Q_{Er}	Verkehrsstärke des rechten Fahrstreifens in der Einfahrt in PWE/h
Q_d	Verkehrsstärke des dominanten Fahrstreifens in der Einfahrt in PWE/h
L_E	Leistungsfähigkeit der Einfahrt in PWE/h
L_d	Leistungsfähigkeit des dominanten Fahrstreifens der Einfahrt in PWE/h
L_A	Leistungsfähigkeit der Ausfahrt in PWE/h
FG	Querende Fussgänger auf dem Fussgängerstreifen (Ein- / Ausfahrt) in FG/h

Tab. 2 Begriffe und Abkürzungen zur Verkehrsstärke

Abk.	Begriff	Definition
t_o	Null - Zeitlücke	Bei Regressionsgeraden (Siegloch) [4]: t_o = sogenannte Null - Zeitlücke = $t_g - t_f/2$
Δt	Zeitlücke bzw. Bruttozeitlücke	Zeitlicher Abstand, der zwischen gleichartigen Bezugspunkten aufeinanderfolgenden Fahrzeuge an einem Querschnitt auf der Kreisfahrbahn gemessen wird (HBS Deutschland) [5].
t_g	Grenzzeitlücke (mittlere)	Kleinste Zeitlücke in einem übergeordneten Strom, die im Mittel von einem wartepflichtigen Fahrzeug zur Ausführung des beabsichtigten Fahrmanövers angenommen wird (HBS Deutschland) [5].
t_f	Folgezeitlücke (mittlere)	Die Folgezeitlücke t_f ist der Mittelwert der Zeiten, die zwischen den Starts zweier aufeinanderfolgender Nebenstromfahrzeuge liegt, die in dieselbe Zeitlücke des Hauptstroms einfahren (Stuwe, B.; 1992 Bochum) [6].
n	Anzahl Fz	Anzahl Fz in der Einfahrt, welche die Δt zum Einfahren benützen.

Tab. 3: Begriffe und Abkürzungen zum Verkehrsablauf

1.7. Kurzübersicht über verschiedene Bemessungsverfahren zur Leistungsfähigkeit von Kreiseln

1.7.1. Bemessungsverfahren

Die Verfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen:

- Regressionsverfahren auf Basis der Grenzzeitlücken.
- Simulationsverfahren auf Basis von Verkehrsablaufmodellen und Simulationstechnik.

Die erste Gruppe der Verfahren enthält empirisch abgeleitete Zusammenhänge zwischen der maximal möglichen Verkehrsstärke in der Kreiseinfahrt (vortrittsbelastet) und der vorhandenen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (vortrittsberechtigt), abhängig von verschiedenen geometrischen Grössen des Kreisels unter Berücksichtigung der Verkehrszusammensetzung. Die wichtigsten geometrischen Grössen sind: Kreisdurchmesser, Breite der Einfahrt, Einfahrradius, Einfahrtswinkel, Anzahl der Fahrstreifen im Kreis und in den Einfahrten, Distanz zwischen Einfahrt und Ausfahrt, Anzahl der Arme des Kreisels u.a.m. Einzelne Bemessungsverfahren berücksichtigen zudem den Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit in der Einfahrt.

Bei dieser empirischen Ableitung werden die Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn und die Verkehrsstärken in den Kreiseinfahrten gleichzeitig gemessen und in Abhängigkeit zueinander gestellt. Die Erhebungen werden bei verschiedenen Verkehrsstärken durchgeführt, vor allem zu Verkehrsspitzenzeiten, und in der Regel in kleinen Zeitintervallen (z.B. 1 Minute) ausgewertet. Die ausgewerteten Messpunkte werden danach einer Regressionsanalyse unterzogen und dazu ein möglichst die Messpunkte gut beschreibender Zusam-

menhang gesucht. Dieser Zusammenhang ist in den meisten Untersuchungen an Kreiseln eine lineare oder exponentielle Regressionsfunktion.

Auf diese Art wurden in verschiedenen Ländern Bemessungszusammenhänge abgeleitet bzw. formuliert. Die folgende Abbildung zeigt einige Beispiele dazu in einfacher, grafischer Form.

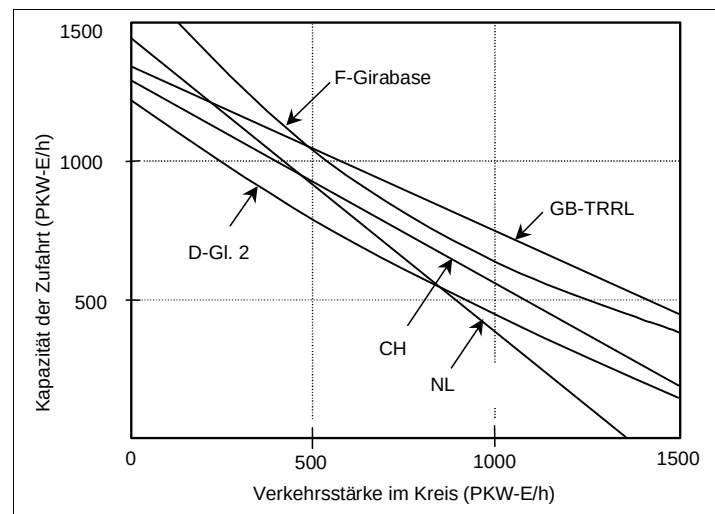


Abb. 2: Bemessungsverfahren verschiedener Länder [5] (Auswahl)

In der folgenden Tabelle ist eine Auswahl bekannter Bemessungsverfahren zusammengestellt. Anhang 1 enthält zu den einzelnen Verfahren die aus Erhebungen am Verkehrsablauf hergeleiteten, analytischen Funktionen.

Land	Autor	Jahr	Funktion
Deutschland	Tanner (Einmündung)	1962	Exponentiell
Deutschland	Harders (Einmündung)	1968	Exponentiell
Deutschland	Siegloch (Einmündung)	1973	Exponentiell
Deutschland	Jakobs (Einmündung)	1979	Exponentiell
England	Kimber (Kreisell)	1980	Linear
Frankreich	Girabase (Kreisell)	1990	Linear
Schweiz	EPFL (Kreisell)	1991	Linear
Deutschland	Stuwe (Kreisell)	1992	Exponentiell
Schweiz	VSS, Emch und Berger (Kreisell)	1992	Linear
Deutschland	Brilon, Stuwe, Drews	1993	Linear
Deutschland	Brilon, Bonzio	1996	Linear
Deutschland	Wu	1997	Exponentiell
Australien	Akcelik	1997	Linear
Australien	Troutbeck, Tracz	1997	Exponentiell
USA	HCM (Highway Capacity Manual)	1997	Exponentiell

Tab. 4: Übersicht über einschlägige Bemessungsverfahren für Kreisell

Die zweite Gruppe der Verfahren zur Bemessung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln sind die Simulationsverfahren. Sie basieren auf einer Modellierung des Verkehrsablaufes mittels verschiedener Teilmodelle (Zuflussmodell Einfahrt, Verknüpfungsmodell Einfahrt/ Kreisfahrbahn mittels Grenzzeitlücken und Folgezeitlücken, Fahrzeugfolgmodell für die Kreisfahrbahn etc.).

Dabei werden die Einzelfahrzeuge mit entsprechenden Bewegungs- und Verhaltensparametern beschrieben. Mittels Generierung des Verkehrs durch Einzelfahrzeuge und Verknüpfung anhand der Modelle ist die Basis zur Simulation des Verkehrsablaufes gelegt. Für die Simulation werden entweder zeitschritt- oder prozessschrittorientierte Methoden verwendet. Durch Modellierung und Simulation kann der Verkehrsablauf nachgebildet und die maximal möglichen, verarbeitbaren Verkehrsstärken bei den Zufahrten in Abhän-

gigkeit zur Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn bestimmt werden. Gleichzeitig lassen sich die Häufigkeitsverteilungen für Wartezeiten und Rückstaus ermitteln.

Wesentliche Vorteile ergeben sich bei diesen Verfahren in zweierlei Hinsicht: Einerseits führen die Simulationsverfahren im Grenzbereich und im Überlastungsbereich der Leistungsfähigkeit meistens noch zu zuverlässigen Ergebnissen. Andererseits ergeben sich anhand der Verteilung der Wartezeiten und Rückstaulängen deutlich aussagekräftigere Ergebnisse. Der Nachteil der Simulationsverfahren liegt naturgemäss beim grossen Aufwand für die Modellierung des Verkehrsablaufes und der komplexen Programmierung der Simulation. Bislang sind einige Entwicklungen von Simulationsverfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Kreiseln bekannt.

Bedeutender Mangel für den Einsatz und Betrieb von Simulationsverfahren für die Bemessung bzw. die Beurteilung des Verkehrsablaufes bei Kreiseln sind die zum grössten Teil fehlenden Werte für die Parameter zum Verkehrsablauf und zum Fahrverhalten (aus den Häufigkeitsverteilungen) zur Kalibrierung der Modelle.

Die folgende Tabelle gibt Hinweise über einige Simulationsmodelle für Kreisel.

Land	Hersteller	Jahr	Modellart (Programm)
Schweiz	IVT, ETH Zürich	1996	Zeitschrittorientiert
Deutschland	PTV, Karlsruhe	2004	Verhaltensorientiert (VISSIM)
Schweiz	Portmann/ FH BBS	1995	Prozessorientiert
England	TRL, Berkshire	2004	Zeitschrittorientiert (Arcady)
Spanien	TSS, Barcelona	2004	Zeitschrittorientiert (Aimsun)
USA	McTrans, Florida	2003	Zeitschrittorientiert (Corsim)

Tab. 5: Hinweise zu Bemessungsverfahren auf der Basis Simulation für Kreisel

1.7.2. Verfahren zur Bestimmung der Qualität des Verkehrsablaufes

Die Qualität des Verkehrsablaufes – interessant wiederum im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit von Kreiseln – wird in der Regel durch Wartezeiten und Rückstaulängen beschrieben. Für empirisch-analytische Bemessungsverfahren sind mehrere Berechnungsverfahren bekannt. Sie basieren einerseits ebenfalls auf empirisch hergeleiteten Formeln sowie teilweise auf statistischen Verteilungsfunktionen.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über einige Wartezeit- und Rückstauberechnungsverfahren.

Land	Autor	Jahr	Was
England	Kimber und Hollis	1979	Wartezeit
Deutschland	Brilon, Bonzio	1996	Wartezeit, Rückstau
USA	HCM, Highway Capacity Manual	2000	Wartezeit, Rückstau
Deutschland	Wu	1999	Wartezeit, Rückstau
Australien	Troutbeck	1997	Wartezeit

Tab. 6: Hinweise zu Grundlagen zur Bestimmung Wartezeiten und Rückstaus

Bei den Simulationsverfahren werden zeitschritt- bzw. prozessorientiert je Einzelfahrzeug die diskreten Einzelwartezeiten und die dabei herrschenden Rückstaulängen während des Simulationsvorgangs registriert. Damit lassen sich Wartezeitverteilungen und Verteilungen der Rückstaulängen bilden, aus welchen alle benötigten resp. gesuchten Werte, wie Mittelwerte und bestimmte Quantile (z.B. 95% Länge des Rückstaus), bestimmt werden können. Diese Verteilungen bieten ein grosses Mass an Aussagekraft bzgl. Beurteilung der Qualität des Verkehrsablaufes.

2. Erhebungen und Auswertungen

2.1. Auswahl der Untersuchungsobjekte

Bei der Auswahl der Untersuchungsobjekte waren folgende Kriterien massgebend:

- Verkehrsstärken in Verkehrsspitzenzeiten im Bereich der Leistungsgrenzen
- Geometrie der Anlage, d.h. Aussendurchmesser von 26 m bis 40 m
- Betriebsformen:
 - Einstreifige Kreisfahrbahn mit einstreifigen Einfahrten (Typ 1/1)
 - Einstreifige Kreisfahrbahn mit einstreifiger Einfahrt und separatem Busfahrstreifen (Typ 1+B/1)
 - Einstreifige Kreisfahrbahn mit zweistreifigen Einfahrten (Typ 2/1)
 - Zweistreifige Kreisfahrbahn mit zweistreifigen Einfahrten (Typ 2/2)

Aus einer Sammlung verschiedener Kreisel wurden 11 Kreisel mit 17 ein- und zweistreifigen Einfahrten und 5 Ausfahrten ausgewählt. Die wichtigsten Anlagemerkmale sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Die Situationspläne und Abbildungen (Fotos) der Zufahrten sind aus Anhang 3 ersichtlich. Dort sind auch die wichtigsten geometrischen Grössen der untersuchten Kreisel aufgelistet, welche aus den Plänen ausgewertet wurden. Die Angaben über die Verkehrsstärken wurden von den Tiefbauämtern der entsprechenden Kantone zur Verfügung gestellt.

Nr.	Ort	Kreisel Name	Kanton	Durch- messer [m]	Anz. Streifen Einfahrt/ Kreisel	Breite Innenring / Kreisfahrbahn [m]	V _{zul} [km/h]	FG- Strei- fen	Bussspur Einfahrt / Ausfahrt	Haltestelle Einfahrt / Ausfahrt
	Ein- Ausfahrt									
1	Bassersdorf:	Löwenkreuzung	ZH	29		0.50 / 6.00				
		1.1 N-Winthurstr.			1/1		50	ja	nein/nein	ja
		1.2 W-Klotenerstr.			1/1		50	ja	nein/nein	ja
2	Steffisburg:	Stuckikreuzung	BE	28		Variabel / 8.00	50			
		2.1 O-Rtg. Thun			1/1		50	ja	nein/nein	nein/nein
3	Winterthur:		ZH	35.0		2.50 / 6.00	50			
		3.1 N-Rtg. Stadt			1/1			ja	nein/nein	nein/nein
		3.2 W-Rtg. Oberwinterthur			1/1					
4	Emmenbrücke:	Sonnenplatz	LU	26/31		2.00 / 6.00	50			
		4.1 W-Rtg. Rothenburg			1+B/1			ja	ja/ja	
5	Winterthur:	Seener-/ Industriestr.	ZH	28/64		1.50 / 4.50-9.00	50			
		5.1 N-Rtg. Seen			1+B/1			ja	ja/nein	nein/nein
		5.2 W-Rtg. Stadt			1+B/1			ja	ja/nein	nein/nein
6	Bottmingen:	Mitteldorf-oval	BL	27/32.5		Variabel / 8.00	50			
		6.1 Baselstr.			2/1			ja	nein/nein	nein/nein
		6.2 O-Bruderholzstr.			2/1			ja	nein/nein	nein/nein
7	Muttenz	Warteckplatz	BL	35		1.0/ 8.00	50			
		7.1 W-St. Jakobstr.			2/1			ja	nein/nein	nein/nein
		7.2 O-Prattelerstr.			2/1			ja	nein/nein	nein/nein
8	Losone:	Rotonda di Losone	TI	40		1.50 / 8.00	50			
		8.1 O-Rtg. Centovalli			2/1			ja	nein/nein	ja
9	Ascona:	S. Materino	TI	35		1.50 / 8.00	50			
		9.1 S-Rtg. Locarno			2/1			nein	nein/nein	nein/nein
10	Sihlbrugg:	Sihlbrugg	ZH	42		2.50 / 2x5.50	60			
		10.1 Nord-Zürich			2/2			nein	nein/nein	nein/nein
11	Fribourg:	Giratoire du Bois des Morts	FR	32		Variabel / 9.00	60			
		11.1 O-Rtg. Autobahn			2/2			nein	nein/nein	nein/nein
		11.2 O-Rtg. Fribourg			2/2			nein	nein/nein	nein/nein

Tab. 7: Ausgewählte Untersuchungsobjekte

2.2. Erhebungsmethode

Die Erhebungen an den ausgewählten Kreiseln wurden mit einer Digitalvideokamera während jeweils den Verkehrsspitzen abends durchgeführt. Mit der Kamera war eine Erfassung von 24 Frames pro Sekunde möglich. Damit konnten auch die Zeitlücken in einer Auflösung von Hundertstelsekunden erfasst werden. Der Aufnahmestandort wurde so gewählt, dass die betrachteten Einfahrten sowie der Kreisverkehr erfasst werden konnte.

Die sogenannten Bezugslinien, entscheidend für die spätere Auswertung, wurden bei der Kreisfahrbahn durch aufgestellte Leitkegel an den Kreisfahrbahnrändern referenziert. Abbildung 3 zeigt schematisch die Erfassungsart und die Referenzierung mittels Bezugslinien.

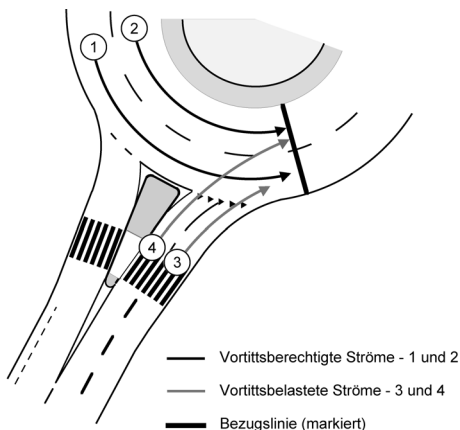


Abb. 3: Schematische Darstellung der Erfassungsmethode mit den Bezugslinien (Beispiel)

2.3. Auswertungen

2.3.1. Grundsatz

Es wurden Videoaufnahmen bei 17 Einfahrten und 5 Ausfahrten von Kreiseln durchgeführt. Dies ergab insgesamt ein Filmmaterial von ca. 28 Stunden.

Bei den Auswertungen wurden folgende Gruppen nach den verschiedenen Betriebsformen gebildet:

- Typ 1/1: einstreifige Einfahrt und einstreifige Kreisfahrbahn
- Typ 1+B/1: einstreifige Einfahrt + Busspur und einstreifige Kreisfahrbahn
- Typ 2/1: zweistreifige Einfahrt und einstreifige Kreisfahrbahn (Breite zw. 7 bis 8 m, ohne markierte Mittellinie, sogenannt überbreite Kreisfahrbahn)
- Typ 2/2: zweistreifige Einfahrt und zweistreifige Kreisfahrbahn (mit markierter Mittellinie)

Neben der Zahl von Fahrzeugen im Kreis und in der Einfahrt pro Zeitintervall wurden auch die durch die einfahrenden Fahrzeuge angenommenen und abgelehnten Zeitlücken ausgewertet. Ausserdem wurden zusätzlich Auswertungen zum Einfluss der querenden Fußgänger bei der Einfahrt und zum Einfluss der ausfahrenden (und blinkenden) Fahrzeuge auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt vorgenommen.

Die folgenden Abbildungen zeigen diese 4 Betriebsformen schematisch auf.

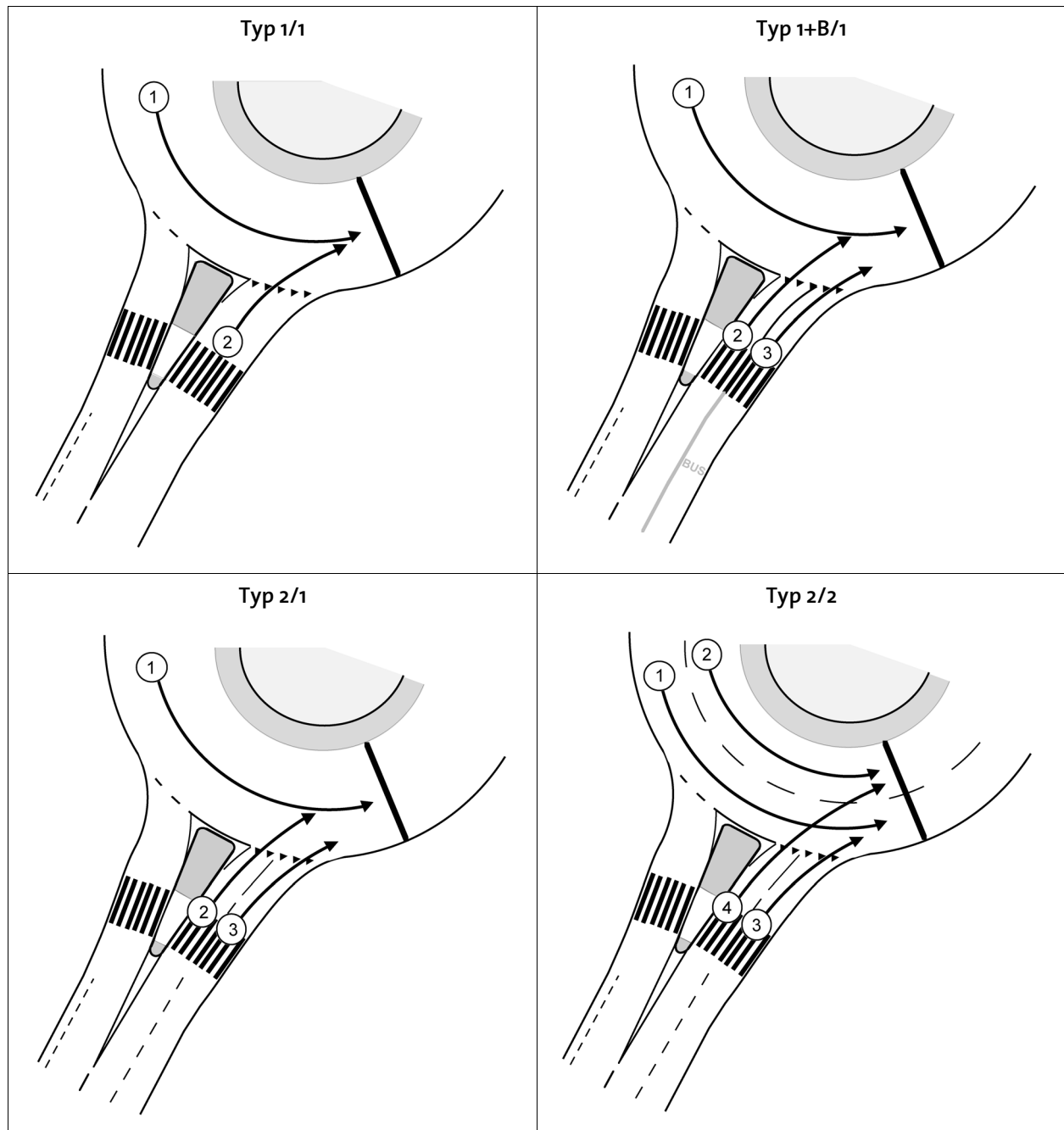


Abb. 4: Typisierung der Kreisel nach den verschiedenen Betriebsformen

2.3.2. Grundlagen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Einfahrten

Für jede Einfahrtssituation aller untersuchten Kreisel wurden vorerst die Verkehrsströme der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn beobachtet und die einzelnen Fahrzeuge ausgezählt (vgl. nachstehende Tabelle). Hierzu wurden nur 1-Minuten-Intervalle verwendet, bei denen während der ganzen Zeit bei der Einfahrt mindestens zwei Fahrzeuge aufgestaut waren. Bei zweistreifigen Einfahrten wurden jene Minutenintervalle ausgewertet, in welchen mindestens auf einem Fahrstreifen der Einfahrt Rückstau herrschte (= dominanter Fahrstreifen). Bei zweistreifigen Kreisfahrbahnen wurde zudem der Verkehr nach äusseren und inneren Fahrstreifen getrennt ausgewertet. Bei einzelnen Ein- und Ausfahrten konnten zudem die Anzahl der den Fussgängerstreifen querenden Fussgänger beobachtet und ausgezählt werden.

Die Minutenwerte (Anzahl Fahrzeuge pro Minute) wurden schliesslich zur einfacheren Handhabung in Stundenwerte umgerechnet.

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus einem Auswerteformular:

Auswerteformular "Verkehrsbelastungen"																		Typ Z2 / K1	
Messort:		Emmenbrücke		Filename:		B4_Sonn		Kreisel Nr.:		4		Sachbearbeiter:		Rol/A		Blatt Nr.:...1			
Messdatum:		31.1.2000		Messzeit:		16.50-19.50		Zufahrt Nr.:		4.1									
Intervall		Kreisel - einstreifig						Zufahrt - zweistreifig										FG	
								links					rechts						
Nr	Zeit	PW	IW	IZ	MR	ER	PW	IW	IZ	MR	ER	PW	IW	IZ	MR	ER			
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	9	10	11	12	13	15		
1	0:00:00	4				1	13				1								
2	0:01:00	8					10			1			1	1					
3	0:02:00	2			1	1	11										8		
4	0:03:00	9					10			1			1	1		1	4		
5	0:04:00	7			1		12										6		
6	0:05:00	7				2	7										8		
7	0:06:00	9					9	1									5		
8	0:07:00	5				2	12		1								6		
9	0:08:00	4					13							1			7		
10	0:09:00	5					10				1						6		
11	0:10:00	8			1	1	14			2			1						
12	0:11:00	1			1		10								1		15		
13	0:12:00	6			1		9										10		
14	0:13:00	3					15										6		
15	0:14:00	3					11										10		
16	0:15:00	7	1				10			2							1		
17	0:16:00	7			1		14							1			1		
18	0:17:00	2					14	1			1					1	3		
19	0:18:00	8					13								1	1	3		
20	0:19:00	2					8			1				1			11		

Tab. 8: Auswerteformular Verkehrsstärken, Fussgängerstärken (Beispiel)

Die folgende Tabelle zeigt den gesamten Auswertumfang anhand der Zahl der ausgewerteten Intervalle, unterteilt nach den entsprechenden Typen der verschiedenen Betriebsformen.

Anzahl Fahrstreifen Einfahrt/ Zufahrt	Typ 1/1			Typ 1+B/1		Typ 2/1				Typ 2/2	
Kreisel Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Name	Bassersdorf	Steffisburg	Winterthur	Emmenbrücke	Winterthur	Bottmingen	Muttenz	Losone	Ascona	Sihlbrugg	Fribourg
Anz. Äste	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
Anz. Intervalle (ausgelast. Fahrstreifen)	67	59	58	437	106	233	170	110	74	41	87
Alle Intervalle je Gruppe	186			546		320		184		128	
Davon Intervalle ohne FG	151			110		92		153		128	
Ausfahrt= f(FG) (nur 4, 6 und 7 ausgewertet)				126		240					
Blinkende Fz (nur 4 ausgewertet)				35							

Tab. 9: Umfang der Auswertungen bezüglich Verkehrsstärken und Fussgängerstärken

In Anhang 2 sind die entsprechenden Einzelwerte für die verschiedenen Untersuchungsobjekte zusammengestellt.

2.3.3. Auswertung der Zeitlücken

In Anlehnung an Harders [7] und Siegloch [4] wurden bei den vorliegenden Untersuchungen die Bezugslinien für die Videoauswertungen wie folgt festgelegt:

- Überquert die Vorderkante eines Fahrzeuges die entsprechende Bezugslinie (örtlich gekennzeichnet), bedeutet dies entweder den Beginn oder das Ende einer Zeitlücke.
- Für die vortrittsberechtigten Fahrzeuge bedeutet die Bezugslinie, dass bei deren Überfahren ein vortrittsbelastetes Fahrzeug der Einfahrt nicht mehr in die Kreisfahrbahn einbiegen konnte.
- Für die vortrittsbelasteten Fahrzeuge bedeutet die Bezugslinie, dass bei deren Überfahren eine Zeitlücke im Verkehrsstrom auf der Kreisfahrbahn genügend gross zum Einfädeln war, also angenommen wurde, und dass ein Passieren eines weiteren Fahrzeuges auf der Kreisfahrbahn vor dem betreffenden Fahrzeug nicht möglich war.

Die folgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt aus dem Auswerteformular für die Zeitlücken:

Auswerteformular „Zeitlücken“ Typ 2/1																
Messort: Emmenbrücke					Filename: ZL4_Sonntag					Kreisel Nr.: 4			Sachbearbeiter: Rol/A			Blatt Nr.: 1
Messdatum: 31.01.2000					Messzeit: 16:50-19:50					Zufahrt Nr.: 4.1						
	Kreisel - einstreifig				Zufahrt - zweistreifig											FG
					links					rechts						
	Zeit 1.Fz		Zeit 2.Fz		Anzahl Fz					Anzahl Fz						
	Min	F*	Min	F*	PW	LW	LZ	MR	FR	PW	LW	LZ	MR	FR		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	0:00:03	15	0:00:07	24	1											
2	0:00:07	24	0:02:01	2	1											
3	0:00:014	2	0:00:036	16	6										1	
4	0:00:36	16	0:00:40	20												
5	0:00:40	20	0:00:55	0	3			1			1					
6	0:00:55	0	0:00:57	1								1				
7	0:01:11	3	0:01:18	24	0											
8	0:01:20	24	0:01:28	24	1											
9	0:01:28	24	0:01:24	13	1											
10	0:01:33	13	0:01:38	12	1											
11	0:01:38	12	0:01:49	22	3											
12	0:01:49	22	0:01:53	21	1											
13	0:01:53	21	0:02:26	26	8	9									3	

* Nummer des ausgewerteten Frames (bei 24 Frames pro Sekunde)

Tab. 10: Auswerteformular Zeitlücken (Beispiel)

Aus der folgenden Tabelle ist der gesamte Auswertumfang (in Anzahl Fz) bzgl. Zeitlücken ersichtlich:

Anzahl Fahrstreifen Einfahrt / Zufahrt	Typ 1/1			Typ 1+B/1		Typ 2/1				Typ 2/2	
Kreisel Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Anz. Zeitlücken	490	575	-	1542	-	1484	-	-	-	-	-
Einfahrt links PW						568	-	898	478	-	261
Einfahrt rechts PW						1258	1086	470	367	-	-
mit FG	-	-	-	420	-	-	-	-	-	-	-
ohne FG	-	-	-	1122	-	-	-	-	-	-	-
nur PW	446	543	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 11: Auswertumfang bzgl. Zeitlücken

Aus Anhang 2 sind die entsprechenden Einzelwerte für die verschiedenen Untersuchungsobjekte ersichtlich.

2.3.4. Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken

Die vorliegende Forschungsarbeit dient zur Überprüfung und zur Ergänzung der Bemessungsgrundlagen in der VSS-Norm [10]. Für diesen Zweck ist die Kenntnis der Grenz- und Folgezeitlücken nicht erforderlich. Sie können jedoch als Parameter zur Kalibrierung von Simulationsmodellen eingesetzt werden.

Aus diesem Grund wird auf das Vorgehen bei der Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken in einem separaten Anhang (Anhang 5) eingegangen. Dort sind auch die wichtigsten Ergebnisse zusammengestellt.

3. Ergebnisse

3.1. Leistungsfähigkeit der Einfahrt

3.1.1. Grundsatz

Zur Ableitung des Bemessungszusammenhangs der Leistungsfähigkeit der Einfahrt wurden die aus Beobachtungen erfassten Verkehrsstärkewertepaare Einfahrt/Kreisfahrbahn (1-Minuten-intervalle, hochgerechnet auf Stundenwerte) für Zustände mit Rückstau in der Einfahrt als Basis für die Regressionsanalyse verwendet. Dabei wurden die beobachteten Fahrzeuge durch Umrechnung mit Fahrzeugäquivalenten in Personenwagen-Einheiten (PWE) berücksichtigt. Da die Längsneigungen der Zufahrten aller Kreisel dieser Untersuchung zwischen 0% und 2 % liegen, wurden die üblicherweise verwendeten Äquivalente (gemäss SN 640 024) begezogen, d.h. 1 LW = 2 PWE.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse konnten einerseits die Art des Zusammenhangs der verschiedenen Wertepaare (funktionaler Zusammenhang) und andererseits die Qualität des Zusammenhangs (Korrelation, Bestimmtheitsmass) für die einzelnen Betriebsformen untersucht werden. Dabei wurden jeweils die Ansätze linear und exponentiell geprüft und einander gegenübergestellt. Mit einem F-Wert wurde zusätzlich geprüft, ob die Variablen unabhängig voneinander sind.

Anhang 4 enthält eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Regressionsanalysen für die Betriebsformen 1/1, 1+B/1 und 2/1.

3.1.2. Einstreifige Einfahrt / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 1/1)

Zur Analyse der Leistungsfähigkeit der Einfahrten beim Typ 1/1 dienten die Mess- und Auswertergebnisse von drei Kreisel. Dabei standen insgesamt 185 Wertepaare für die Regressionsanalyse zu Verfügung.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Regressionsanalyse. In Abbildung 5 wurde ein linearer, in Abbildung 6 ein exponentieller Zusammenhang untersucht. In den Abbildungen sind alle Wertepaare enthalten.

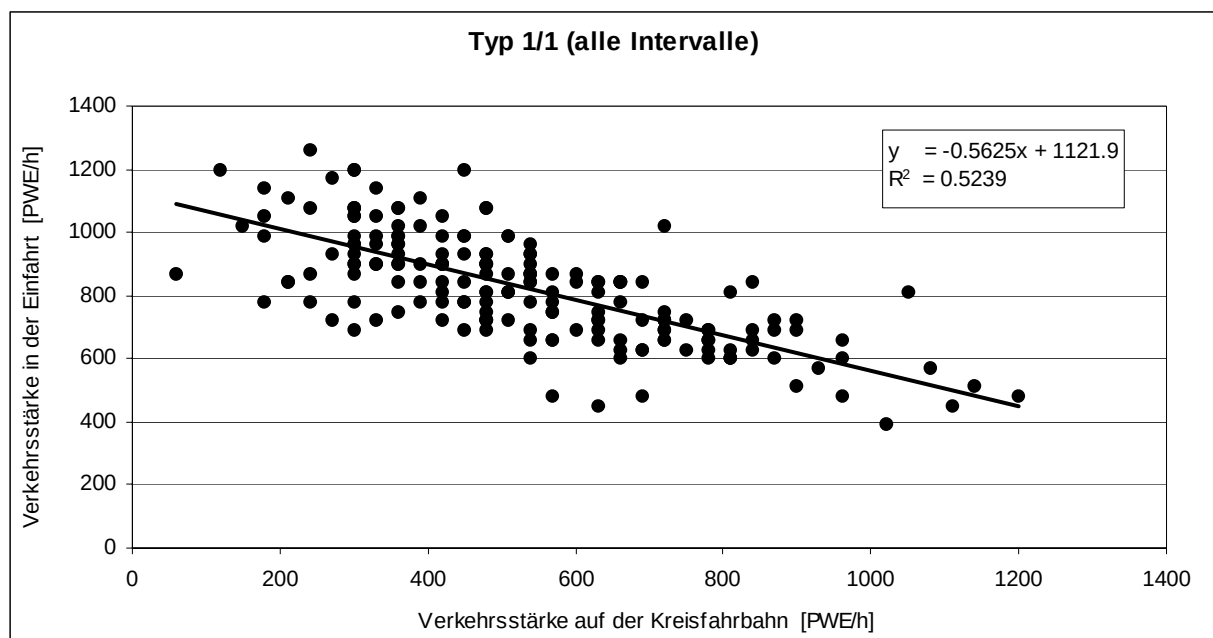


Abb. 5: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für Typ 1/1 (linear)

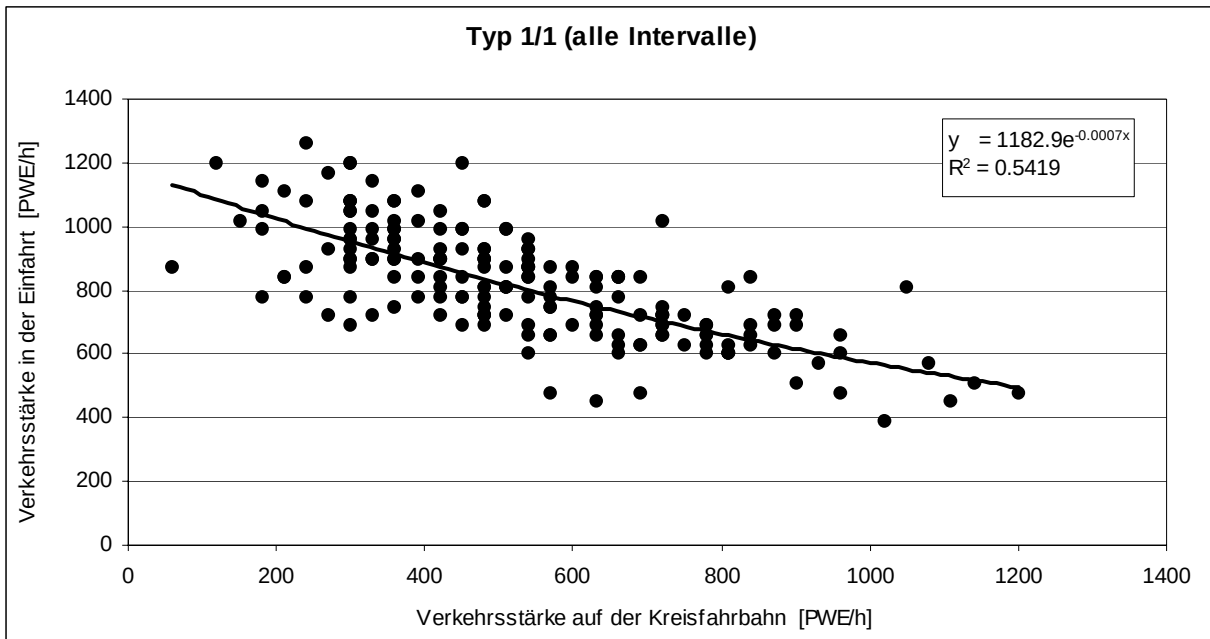


Abb. 6: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für Typ 1/1, (exponentiell)

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen:

- Zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn besteht ein Zusammenhang.
- Das Bestimmtheitsmass (R^2) zeigt, dass die Werte streuen, die Güte des Zusammenhangs kann als ausreichend angesehen werden.

In den Abbildungen 7 und 8 wurde der Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt untersucht (mit im Mittel 70 FG/h). Dabei wurde wiederum ein linearer (Abbildung 7) und ein exponentieller (Abbildung 8) Ansatz geprüft.

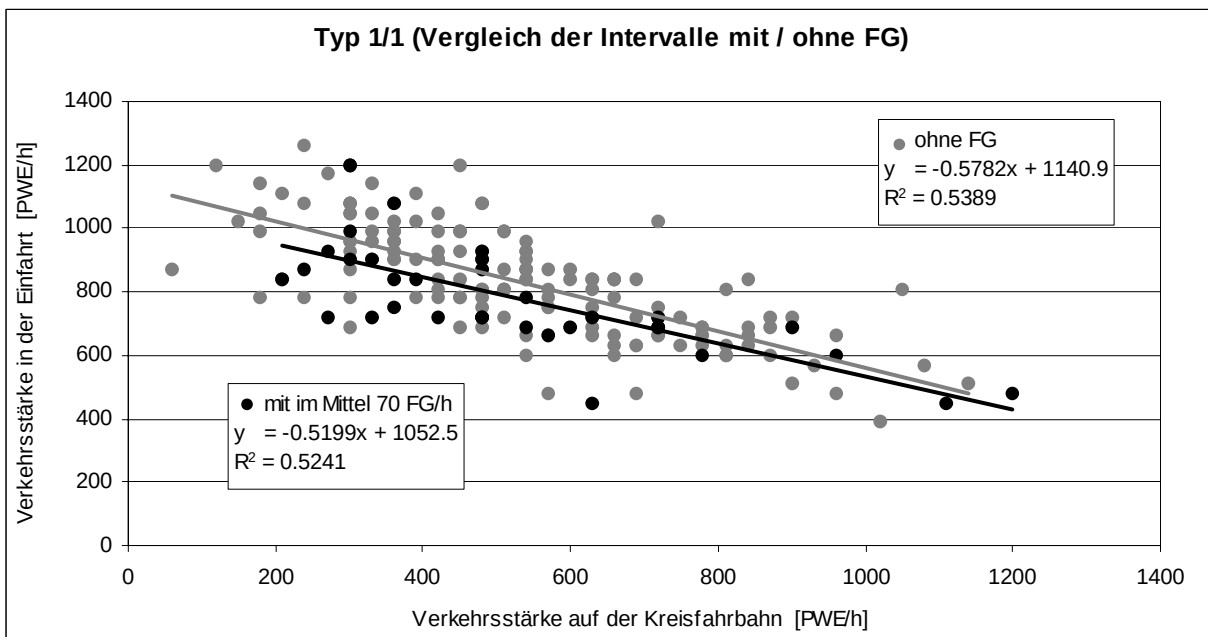


Abb. 7: Zusammenhänge mit / ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fussgänger, (linear)

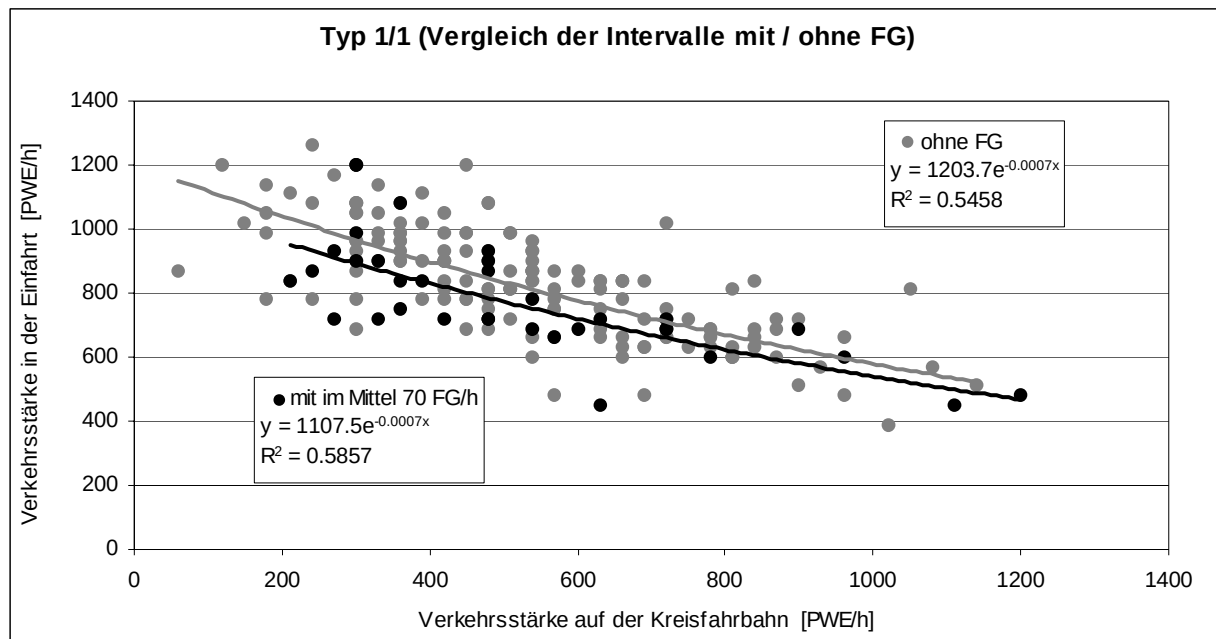


Abb. 8: Zusammenhänge mit / ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fussgänger, (exponentiell)

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen:

- Zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn besteht für beide Fälle ein Zusammenhang.
- Die Bestimmtheitsmasse für die Zusammenhänge mit und ohne Fussgänger sind ähnlich wie bei der Betrachtung aller Intervalle.
- Der Unterschied der beiden Geraden bzw. Kurven zeigt bereits bei einer relativ geringen Fussgänger- menge den Einfluss querender Fussgänger bei der Einfahrt. Mit steigender Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn nimmt der Unterschied erwartungsgemäss ab. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei hohen Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn vermehrt Lücken für querende Fussgänger durch das Warten der Fahrzeuge vor der Einfahrt bestehen, als bei geringen Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn.

3.1.3. Einstreifige Einfahrt + Busspur / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 1+B/1)

Die Ermittlung dieses Zusammenhangs basiert lediglich auf einem Kreisel (Nr. 5, bzw. 2 Einfahrten). Dabei standen 106 Wertepaare aus den Beobachtungen und Auswertungen für die Regressionsanalyse zur Verfügung.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Regressionsanalyse mit einem linearen Ansatz. Die erste Abbildung enthält alle Wertepaare, die zweite Abbildung gliedert sie in eine Gruppe von Einfahrten mit und eine Gruppe von Einfahrten ohne querende Fussgänger.

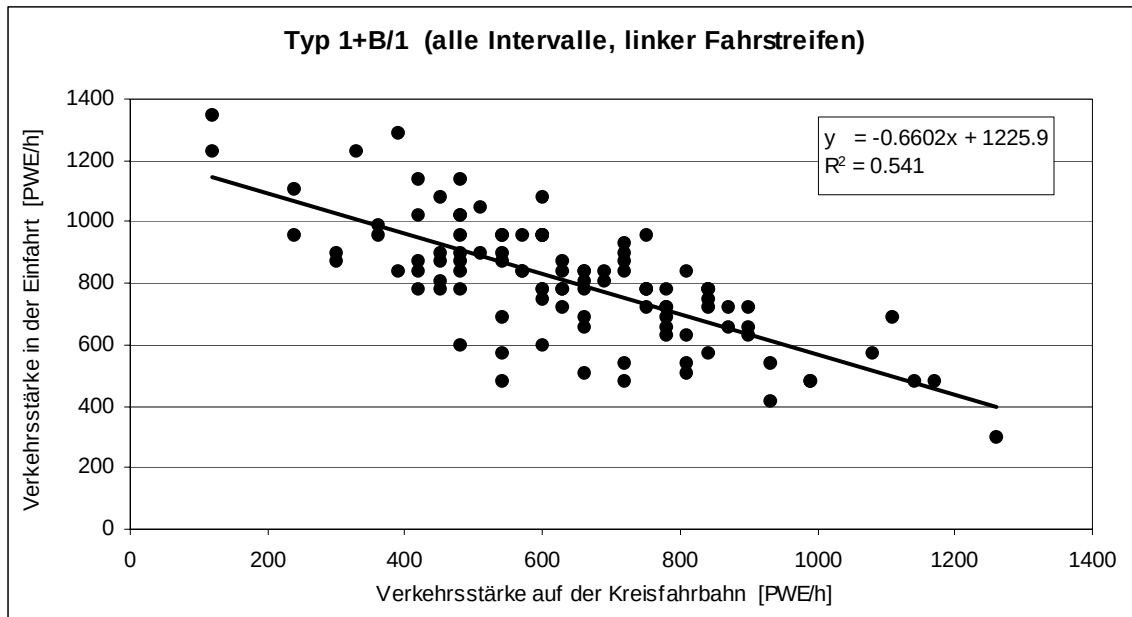


Abb. 9: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für den Typ 1+B/1 (alle Intervalle)

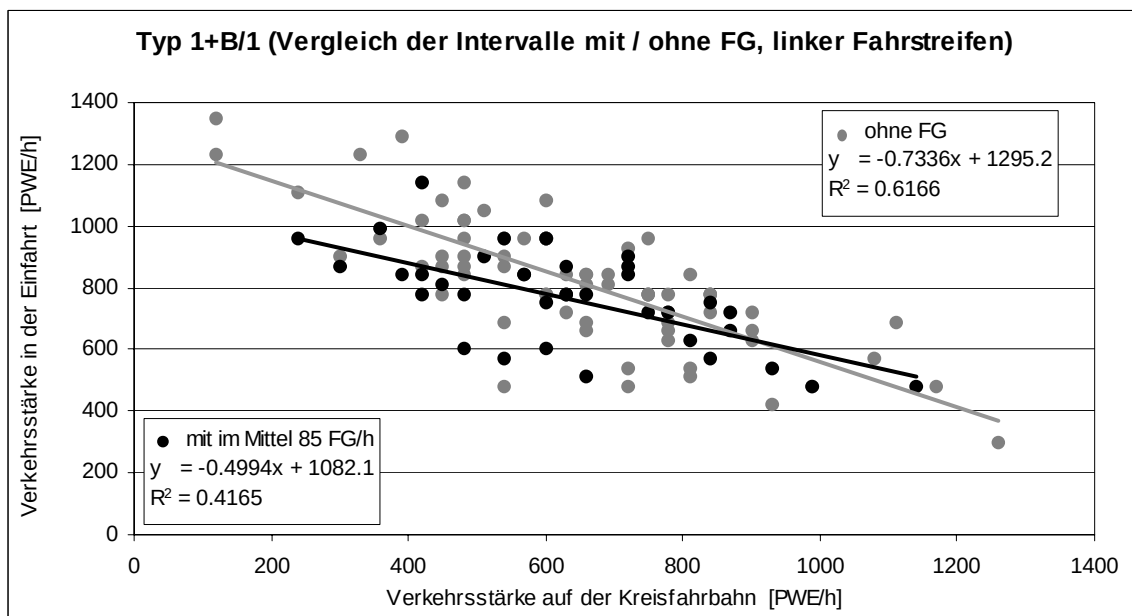


Abb. 10: Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für den Typ 1+B/1 mit / ohne Fussgängereinfluss (alle Intervalle)

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen:

- Zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn besteht ein Zusammenhang.
- Der Einfluss der Fussgänger zeigt sich in ähnlicher Art wie beim Typ 1/1.
- Da nur ein einziger Kreis mit einer Busspur untersucht wurde, dürfen die Resultate nicht verallgemeinert und auch nicht als Grundlage für die Bemessung herangezogen werden.
- Allerdings ist aus dem Vergleich der Abbildungen 5 (Typ 1/1) und 9 (Typ 1+B/1) auffallend, dass zwischen den Regressionsgeraden nur ein geringfügiger Unterschied besteht.

3.1.4. Zweistreifige Einfahrt / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 2/1) (Kreisfahrbahnbreite B = 8.0 m)

Diese Betriebsform wird in der Schweiz häufig angeordnet; im Ausland kennt man sie kaum. Zweistreifige Einfahrten werden aus zwei Gründen angewendet: Einerseits bei hohen Verkehrsbelastungen, bei starken bzw. vorherrschenden, direkten Verkehrsstärken der Eckverbindungen und andererseits bei fehlenden oder mangelnden Platzverhältnissen zur Aufnahme von Rückstaus. Im ersten Fall werden die beiden Fahrstreifen in der Regel separaten Fahrbeziehungen, oft angezeigt durch entsprechende Signalisation und Markierung, zugeordnet.

Diese Betriebsform wird vor allem in städtischen Verhältnissen, bei hohen Spitzenverkehrsbelastungen verwendet. Dabei wird eine sogenannte überbreite Kreisfahrbahn (einstreifig) zur Verbesserung der Verhältnisse beim Einfahren angeordnet.

Die Erfahrungen mit dieser Betriebsform waren bisher positiv, so dass sie mittlerweile eine weite Verbreitung gefunden hat.

Die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen den Verkehrsstärken in der Einfahrt und auf der Kreisfahrbahn basiert auf vier Kreiseln mit insgesamt über 500 ausgewerteten Wertepaaren. Diese Betriebsform wurde bisher weder im In- noch im Ausland näher untersucht, so dass hier eine entsprechend grössere Stichprobe in die Untersuchung einbezogen wurde.

Bei dieser Betriebsform galt es wiederum bei den Erhebungen zu beachten, dass zumindest ein Fahrstreifen bei der Zufahrt Rückstau aufwies, während der andere einen geringen Auslastungsgrad aufweisen konnte.

Die folgende Abbildung zeigt die unterschiedlichen Belastungsverhältnisse der beiden Fahrstreifen der Einfahrt für die vier untersuchten Kreisel.

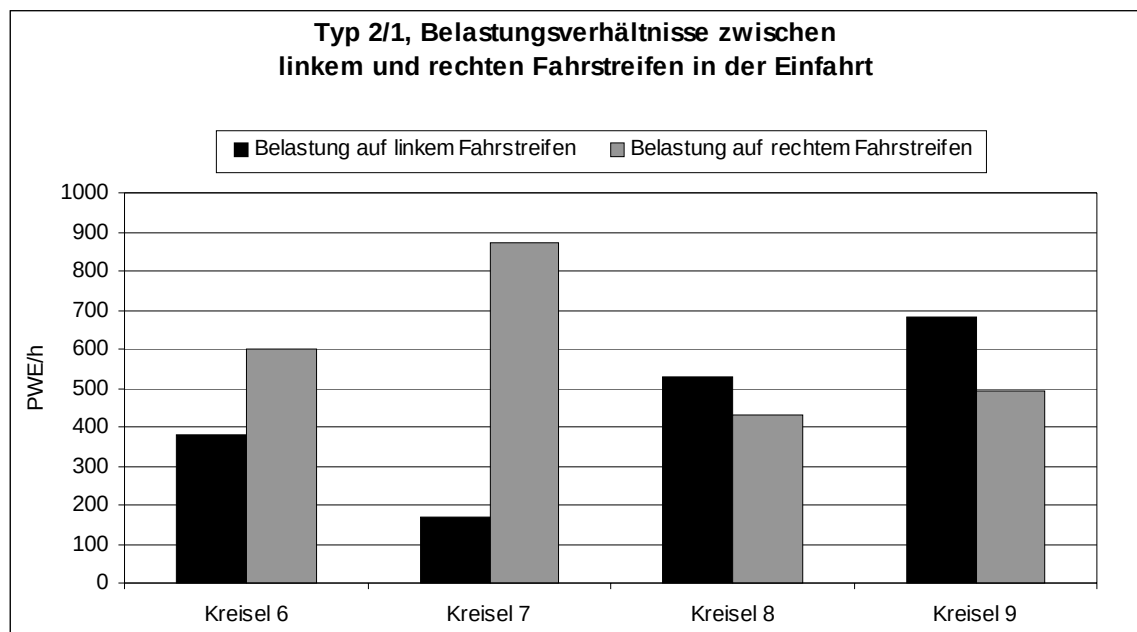


Abb. 11: Belastungsverhältnisse der ausgewerteten Intervalle

Kreisel Nr.	6		7		8		9	
	PWE/h	%	PWE/h	%	PWE/h	%	PWE/h	%
Linker FS	380	39	170	16	530	55	680	58
Rechter FS	600	61	870	84	430	45	490	42
Gesamt	980	100	1040	100	960	100	1170	100

Tab. 12: Belegung der Fahrstreifen links und rechts

Die Abbildungen 12, 13, 14, und 15 zeigen die Ergebnisse der linearen Regressionsanalyse für die einzelnen Kreisel (Nr. 6, 7, 8, und 9). In der Abbildung 16 sind die Resultate der vier Kreisel einander gegenübergestellt.

Abb. 12: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 6, alle Intervalle)

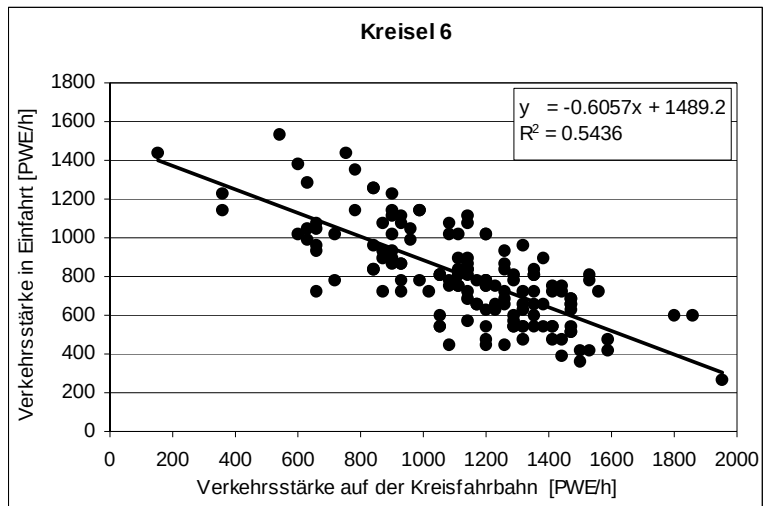


Abb. 13: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 7, alle Intervalle)

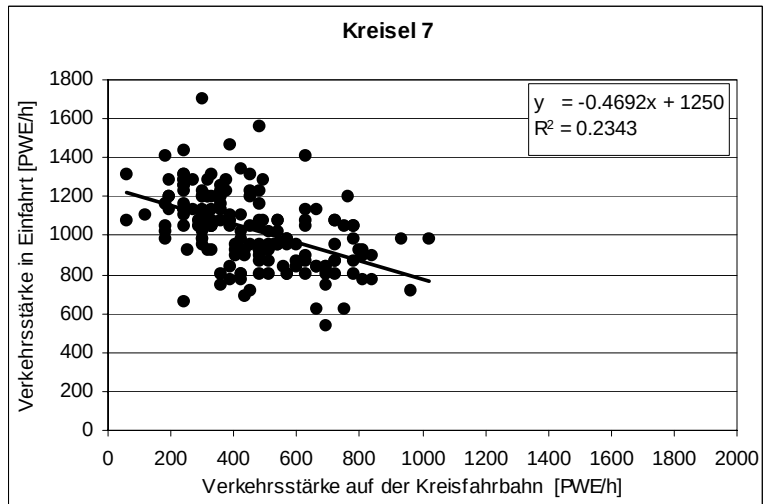


Abb. 14: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 8, alle Intervalle)

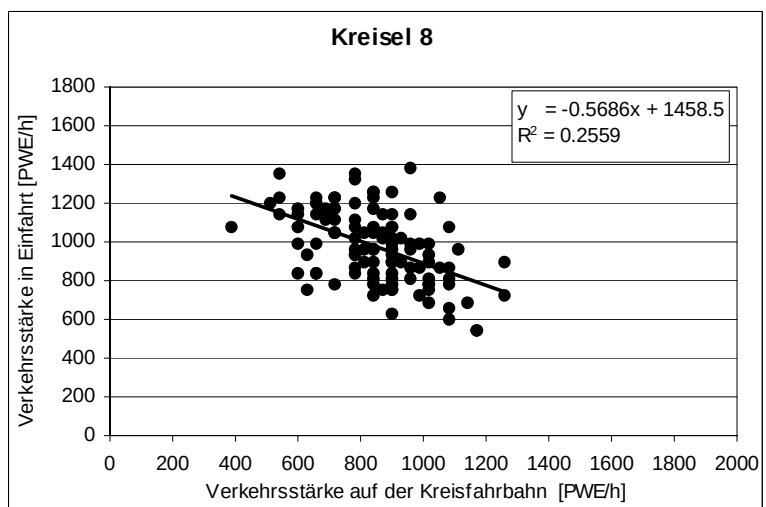


Abb. 15: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 9, alle Intervalle)

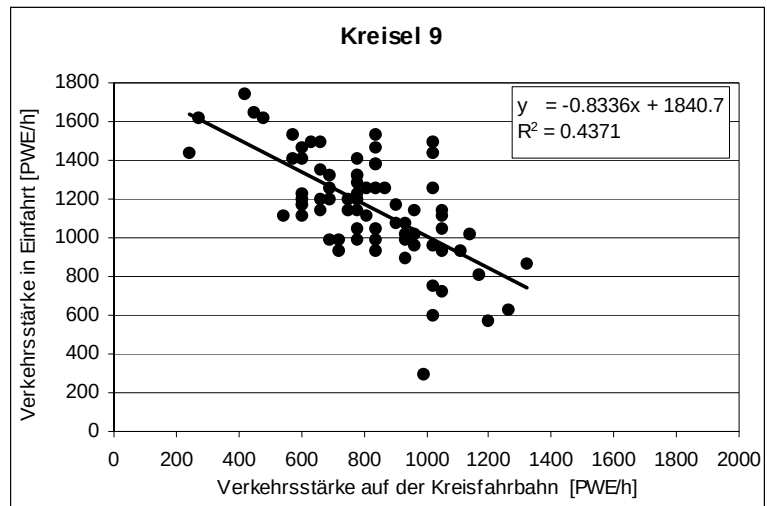
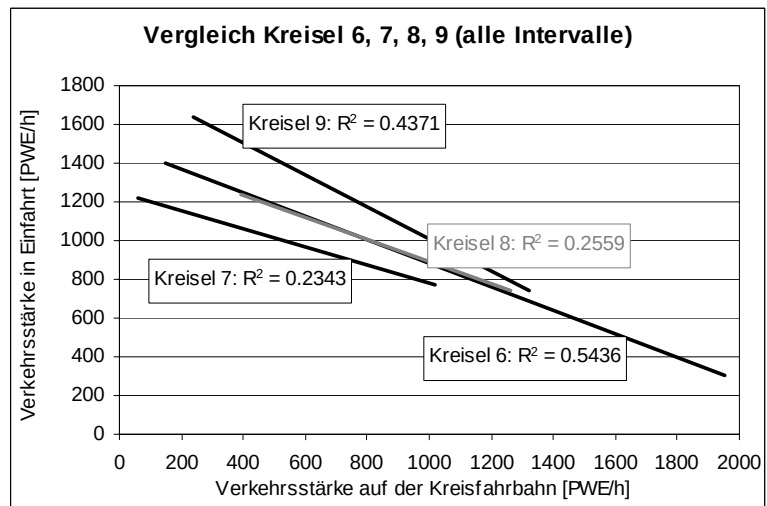


Abb. 16: Vergleich des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für die Kreisel 6, 7, 8 und 9 (alle Intervalle)



Die Abbildungen zeigen:

- Bei ausgeglichener Belegung der beiden Fahrstreifen in der Einfahrt (Kreisel Nr. 8 und 9) besteht eine höhere Leistungsfähigkeit der zweistreifigen Einfahrt als bei stärkerer Belegung des rechten Fahrstreifens (Kreisel Nr. 6 und 7) gegenüber dem linken Fahrstreifen. Die niedrigste Leistung resultiert beim Kreisel Nr. 7, der auf dem linken Fahrstreifen die mit Abstand kleinste und auf dem rechten die grösste Belastung aufweist.
- Dies bedeutet, dass die Zweistreifigkeit der Einfahrt, falls sie tatsächlich benötigt wird – und das ist vor allem bei hohen Verkehrsbelastungen häufiger der Fall – zu einer Leistungssteigerung führt, auch wenn die Kreisfahrbahn einstreifig betrieben wird.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn aufgrund der Regressionsanalysen für folgende Fälle dargestellt:

- Für die Verkehrsbelastungen beider Fahrstreifen der Zufahrt zusammen (Abbildungen 17 und 18)
- Für den dominanten Fahrstreifen (stärker belastet) der Einfahrt (Abbildungen 19 und 20)
- Für den dominanten Fahrstreifen der Einfahrt unter Berücksichtigung des Fussgängerstreifens (Abbildungen 21 und 22).

In die Auswertung wurden alle Kreisel des Typs 2/1 einbezogen.

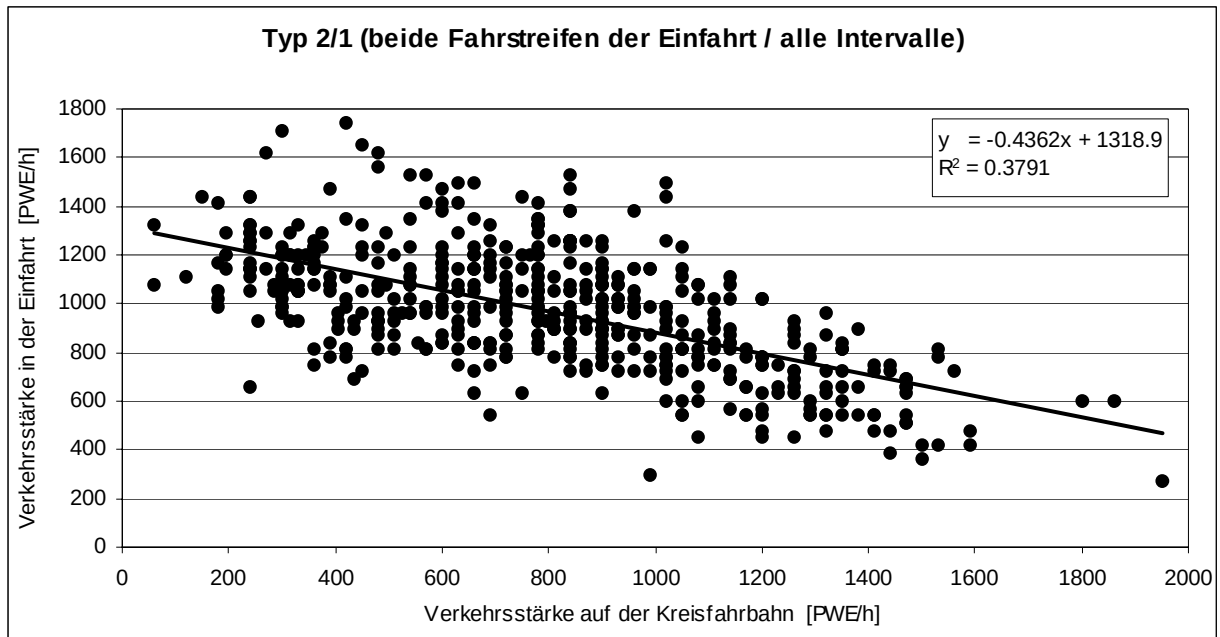


Abb. 17: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke beider Fahrstreifen der Einfahrt zusammen mit jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (linear)

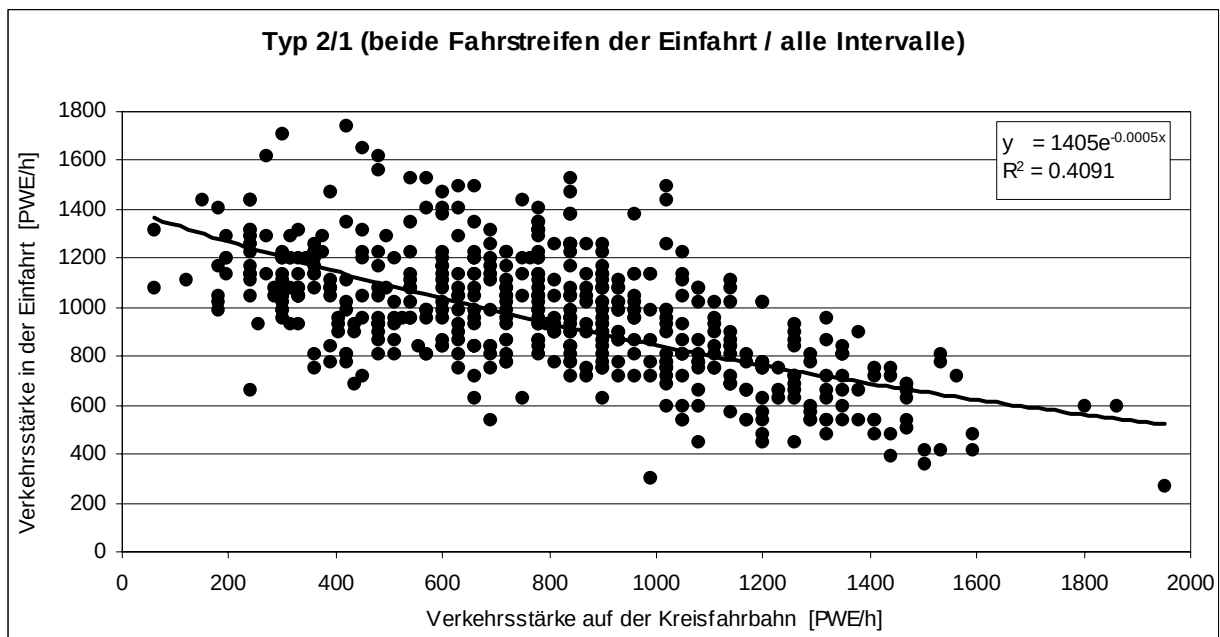


Abb. 18: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke beider Fahrstreifen der Einfahrt zusammen mit jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (exponentiell)

Die Abbildungen 17 und 18 zeigen:

- Zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn besteht ein Zusammenhang
- Die Wertepaare streuen stark
- Die Güte des Zusammenhangs kann als ausreichend angesehen werden.

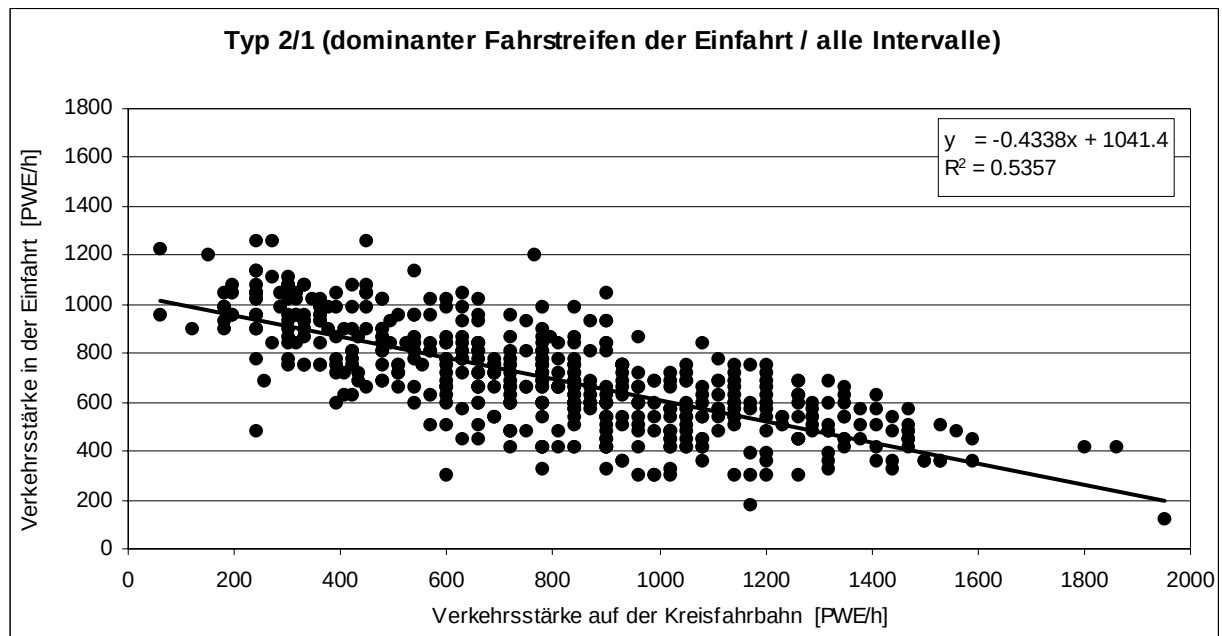


Abb. 19: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke des dominanten (stärker belasteten) Fahrstreifens der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (linear)

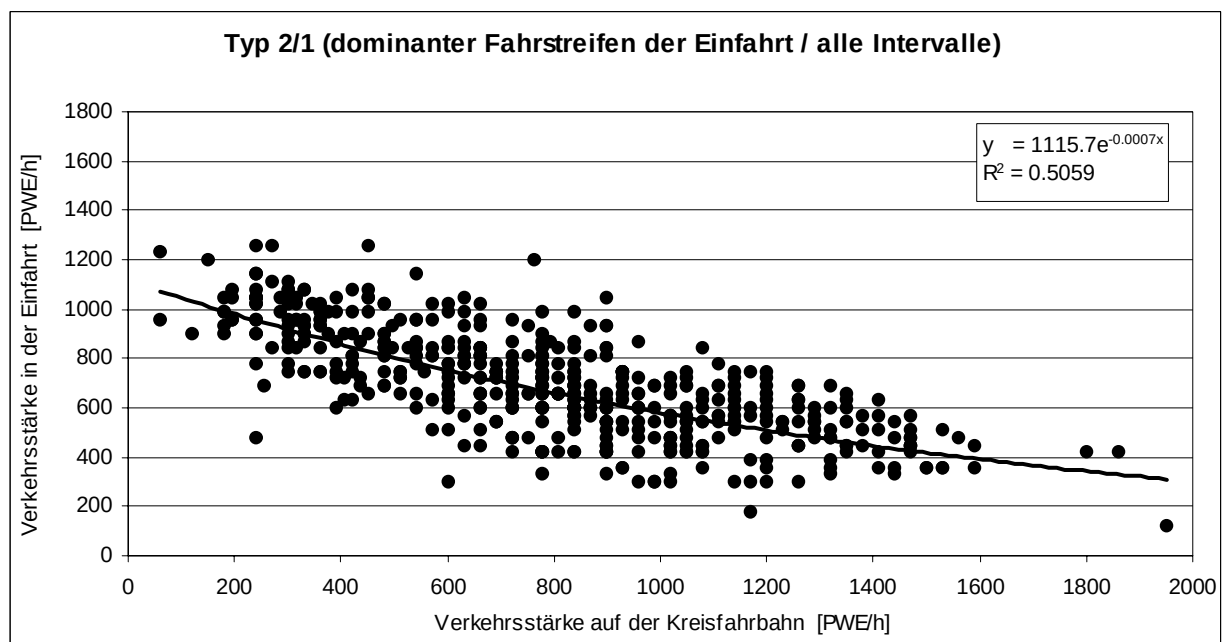


Abb. 20: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke des dominanten (stärker belasteten) Fahrstreifens der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (exponentiell)

Die Abbildungen 19 und 20 zeigen:

- Zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn besteht ein Zusammenhang.
- Die Wertepaare streuen weniger stark als beim Zusammenhang mit allen Intervallen.
- Die Güte des Zusammenhangs ist besser als beim Zusammenhang mit allen Intervallen.

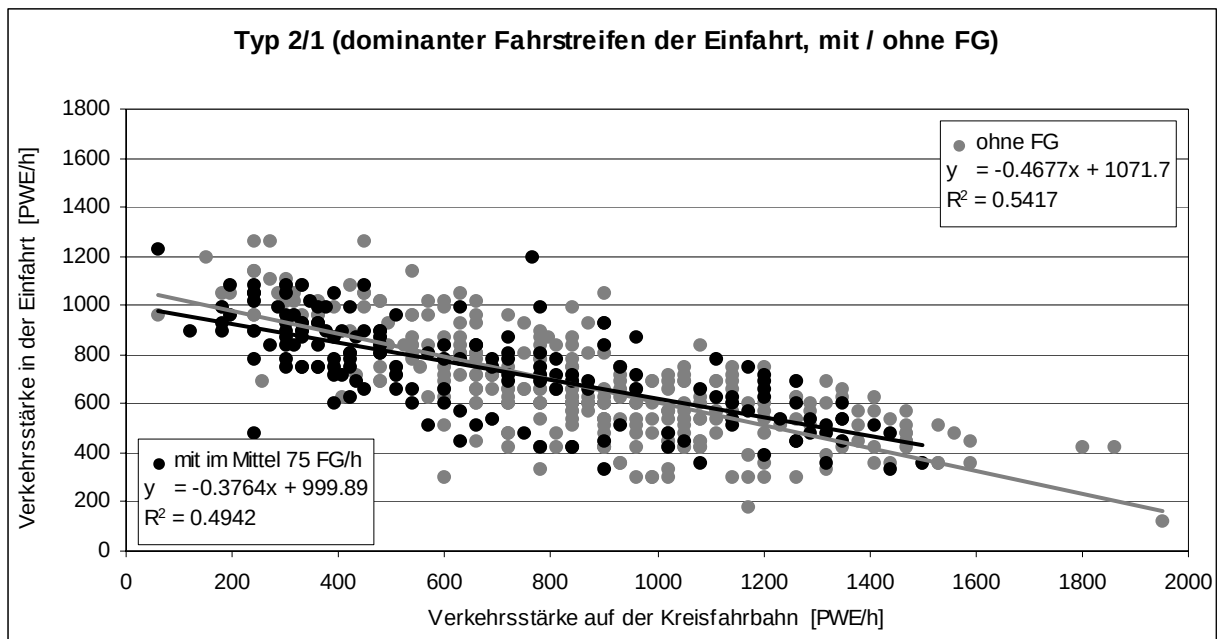


Abb. 21: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn mit / ohne Einfluss querender Fussgänger (linear)

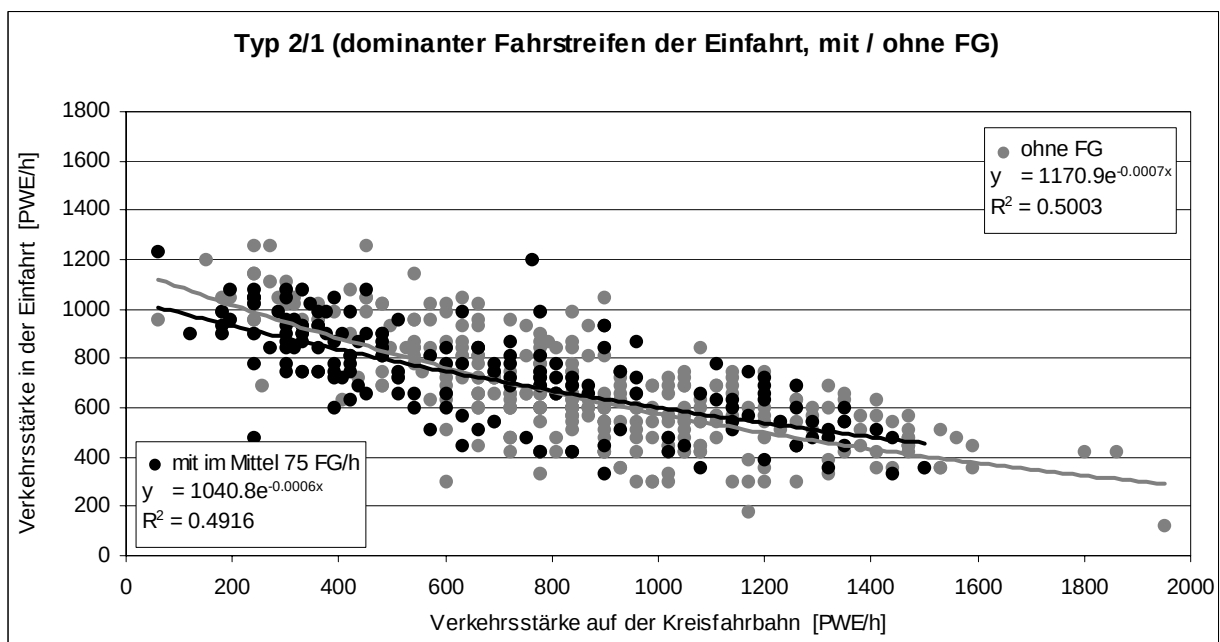


Abb. 22: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn mit / ohne Einfluss querender Fussgänger (exponentiell)

Die Abbildungen 21 und 22 zeigen:

- Der Einfluss der Fussgänger ist sehr gering, was durch die ähnlich verlaufenden Regressionskurven deutlich wird.
- Die Güte des Zusammenhangs ist ausreichend.

3.1.5. Zweistreifige Einfahrt / zweistreifige Kreisfahrbahn (Typ 2/2)

Zu dieser Betriebsform gibt es im Ausland viel Erfahrungen, vor allem in Deutschland. In der Schweiz wurden bisher einige Kreisel dieser Art gebaut und erfolgreich betrieben. Die Erfahrungen mit stark ausgelasteten Anlagen diesen Typs sind noch gering. Trotz eingehender Suche konnten Anlagen, die die in 2.1 erwähnten Kriterien erfüllen (ständiger Stau in der Einfahrt) nicht gefunden werden. Zur Leistungsfähigkeit dieser Betriebsform wurden in der Schweiz bisher keine Messungen und Erhebungen durchgeführt. Die Erhebungen der vorliegenden Untersuchungen sind neu und konnten nur an zwei Kreiseln durchgeführt werden. Die Stichprobe umfasst aber immerhin 128 Wertepaare für die Regressionsanalyse.

Bei dieser Betriebsform galt es wiederum bei den Erhebungen zu beachten, dass zumindest ein Fahrstreifen bei der Einfahrt ausgelastet war, also Rückstau aufwies, während der andere Fahrstreifen einen geringeren Auslastungsgrad aufweisen konnte. Die folgenden Abbildungen zeigen die Belastungsverhältnisse der Fahrstreifen für die beiden untersuchten Kreisel (Nr. 10 und 11).

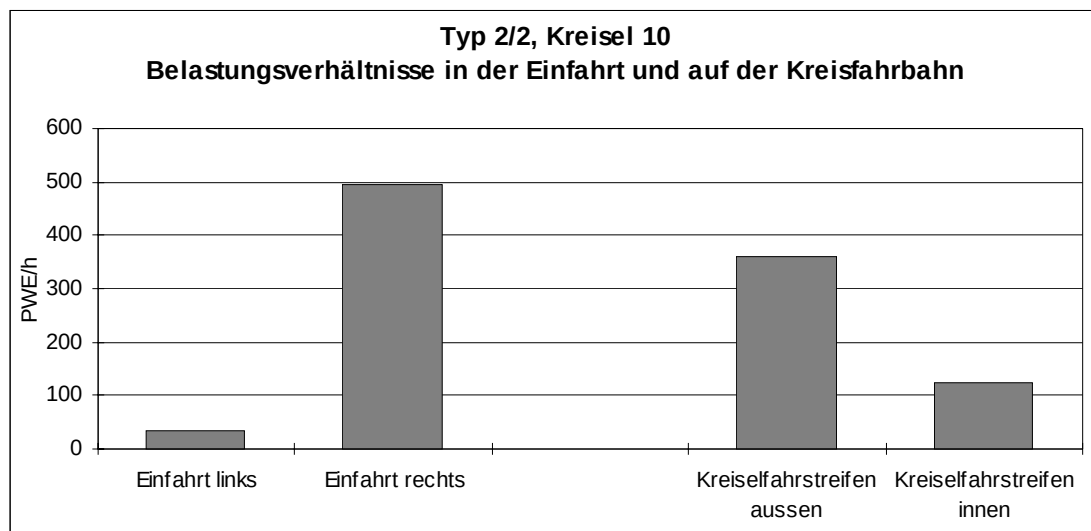


Abb. 23: Belastungsverhältnisse der ausgewerteten Intervalle für den Kreisel Nr. 10

Die Abbildung zeigt: Kreisel Nr. 10 hat einen stark belasteten rechten Fahrstreifen und zugleich einen kaum belegten linken Fahrstreifen bei der Einfahrt. Auch die Fahrstreifen der Kreisfahrbahn weisen eine unterschiedliche Auslastung auf.

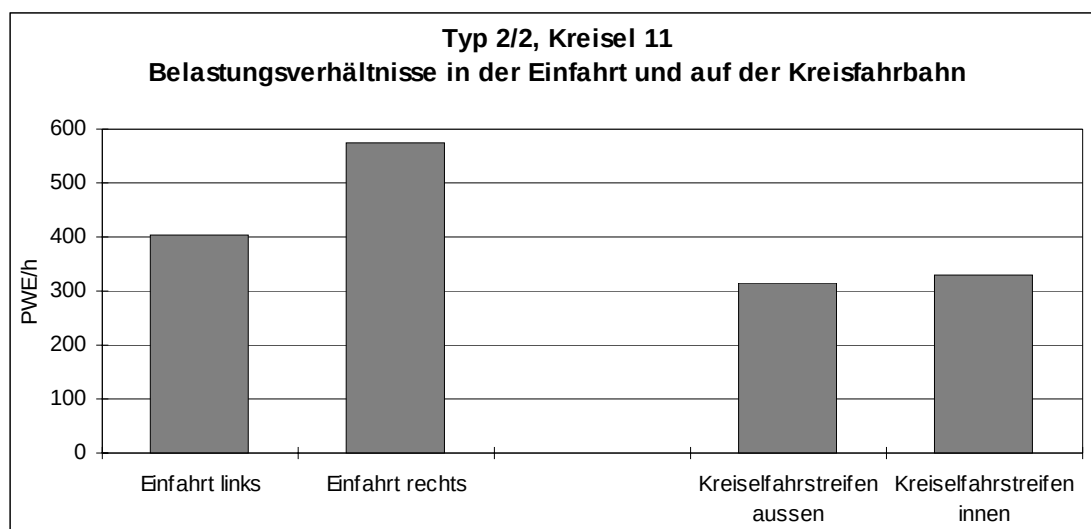


Abb. 24: Belastungsverhältnisse der ausgewerteten Intervalle für den Kreisel Nr. 11

Die Abbildung zeigt: Kreisel Nr. 11 hat einen ausgelasteten rechten Fahrstreifen und zugleich einen stark belegten linken Fahrstreifen bei der Einfahrt. Die Kreisfahrbahn weist bei beiden Kreiselfahrstreifen eine ausgeglichene Belastung auf.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Verhältnisse bzgl. Auslastung müssen im Folgenden die beiden Kreisel separat betrachtet werden.

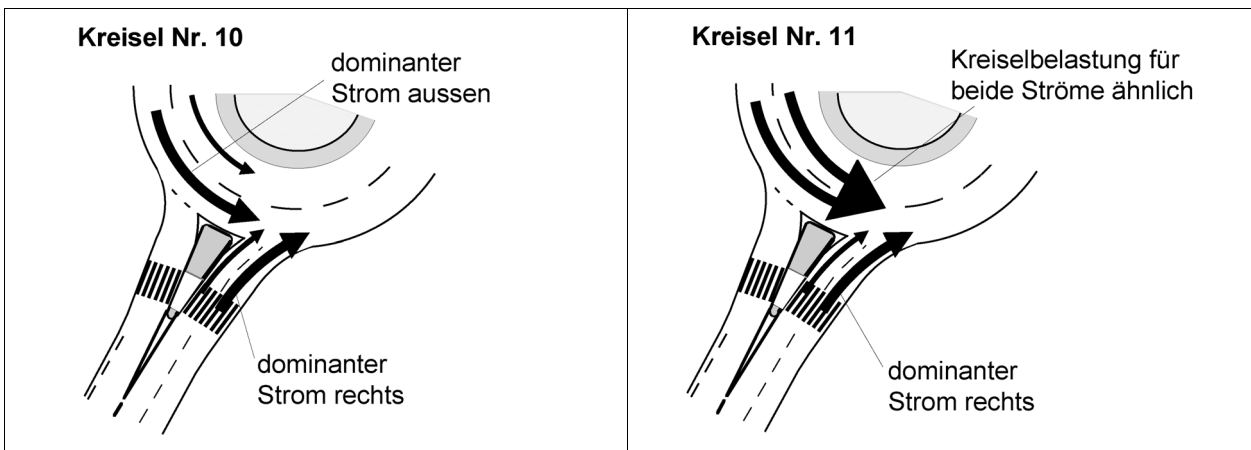


Abb. 25: Schematische Darstellung der Belastungsverhältnisse der Kreisel Nr. 10 und 11

Es stellt sich hierbei folgende Frage:

Wie beeinflusst das Belastungsverhältnis der beiden Fahrstreifen der Kreisfahrbahn die Leistungsfähigkeit der Einfahrt?

Es wäre anzunehmen, dass eine starke Belastung des äusseren Fahrstreifens der Kreisfahrbahn für die Leistungsfähigkeit der Einfahrt massgebend ist.

Im Folgenden wird anhand der beiden Kreisel Nr. 10 und 11 versucht, diese Frage zu beantworten.

Kreisel Nr. 10

Beim Kreisel Nr.10 ist die Gesamtbelastung im Kreisel relativ niedrig, wobei der rechte Fahrstreifen in der Einfahrt eine ähnliche Belastung aufweist wie Kreisel Nr. 11.

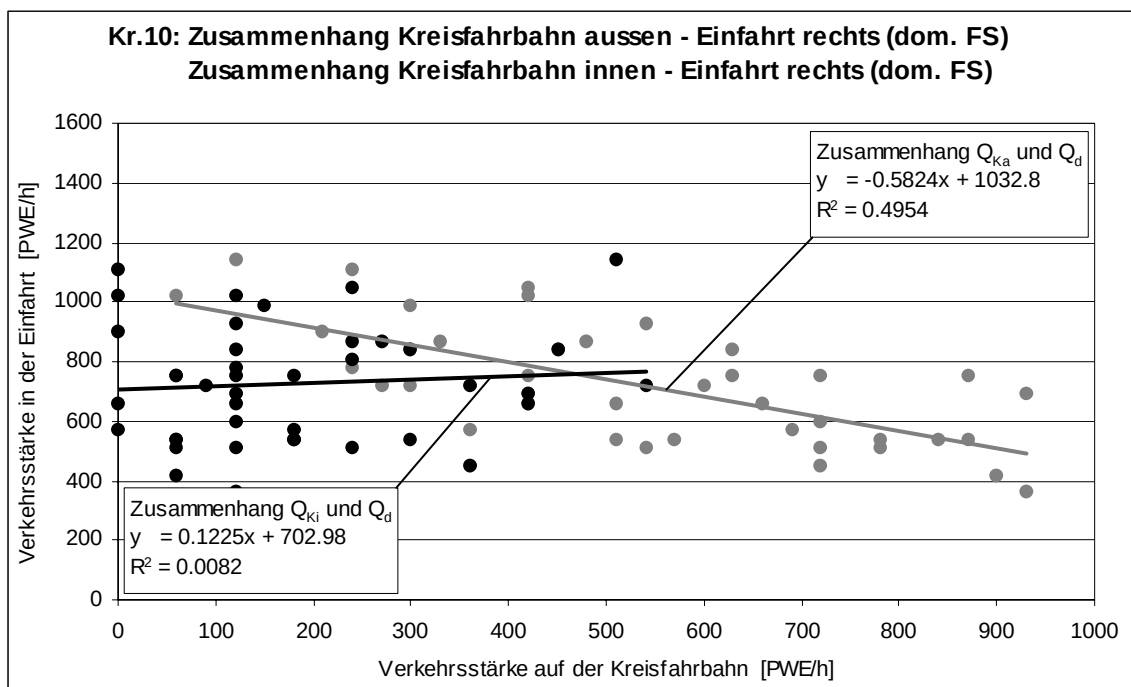


Abb. 26: Kreisel 10: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen rechts) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (äusserer Fahrstreifen (Q_{Ka}) stark belastet / innerer Fahrstreifen gering belastet (Q_{Ki}))

Abbildung 26 zeigt, dass am Kreisel Nr. 10 nur zwischen der Verkehrsstärke auf dem äusseren Fahrstreifen der Kreisfahrbahn (Q_{Ka}) und jener des dominanten Fahrstreifens in der Einfahrt (Q_d) ein Zusammenhang besteht.

Kreisel Nr. 11

Beim Kreisel Nr. 11 ist die Gesamtbelastung im Kreisel gross und ausgeglichen.

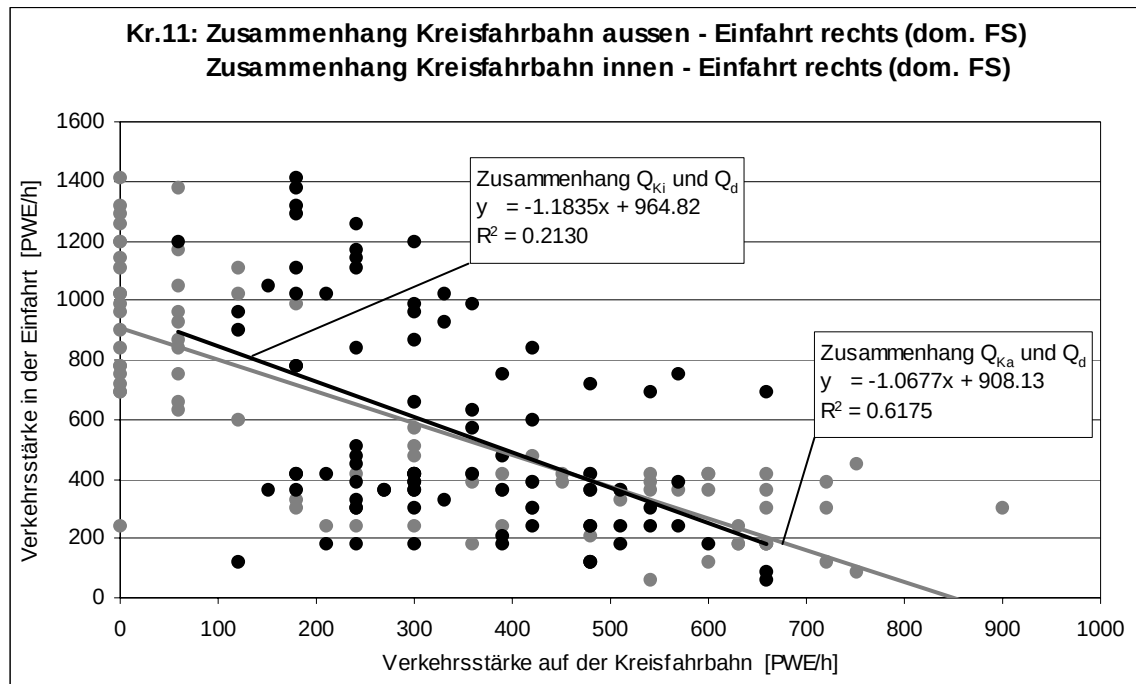


Abb. 27: Kreisel 11: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen rechts) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (äusserer / innerer Fahrstreifen ähnlich ausgelastet)

Abbildung 27 zeigt, dass – anders als beim Kreisel Nr. 10 – am Kreisel 11 ein Zusammenhang bei beiden Fahrstreifen der Kreisfahrbahn (Q_{Ka} / Q_d und Q_{Ki} / Q_d) besteht.

Vergleich der Kreisel Nr. 10 und 11

Für den Vergleich wird die Gesamtbelastung auf der Kreisfahrbahn einbezogen.

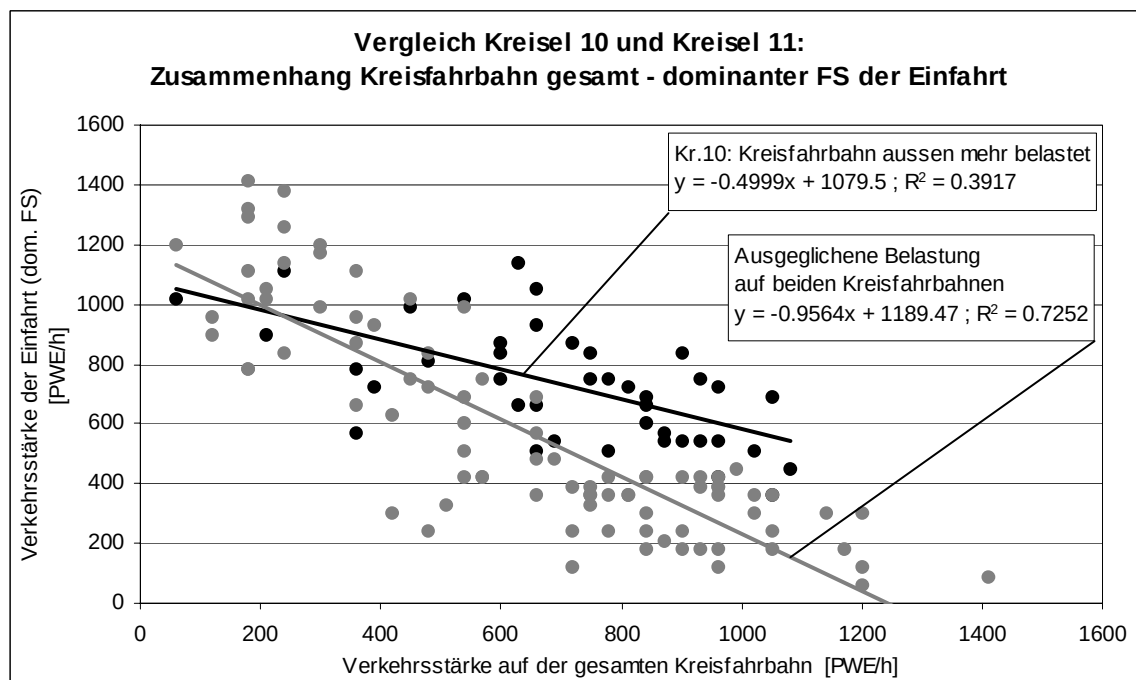


Abb. 28: Vergleich der Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (beide Fahrstreifen zusammen)

Aufgrund der geringen Zahl von nur zwei untersuchten Kreiseln mit zweistreifigen Einfahrten und zweistreifiger Kreisfahrbahn sowie sehr unterschiedlichen Belastungsverhältnissen in den Einfahrten, bei den Fahrstreifen der Kreisfahrbahn und der Gesamtbelastungen beider Kreisel, wird vorläufig auf die Darstellung des resultierenden Zusammenhangs verzichtet. Die voranstehenden Ergebnisse der Regressionsanalysen unterstützen diesen Verzicht, da sich für die zwei Kreisel sehr unterschiedliche Ergebnisse zeigten.

Dafür sprechen auch Ergebnisse einer Zusatzauswertung, in welcher der Zusammenhang zwischen Gesamtbelastung auf beiden Fahrstreifen der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt untersucht wurde. Es hat sich gezeigt, dass sich ein Funktionszusammenhang ergibt, der nur unwesentlich höher liegt als jener des Typs 1/1 und wesentlich niedriger liegt als jener, der im Anlehnung an Ergebnisse aus Deutschland [2] für den Typ 2/2 in der Norm angegeben wird. Die zuvor untersuchten Kreisel sind offensichtlich noch zu wenig belastet.

3.2. Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt

Wie bereits in Ziffer 3.1. beim Zusammenhang der Verkehrsstärke der Einfahrt und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn durch Aufgliederung der Messwerte in die Gruppe ohne Fussgängerquerungen und die Gruppe mit Fussgängerquerungen gezeigt werden konnte, ist die Leistungsfähigkeit der Einfahrt vor allem bei kleineren und mittleren Verkehrsstärken von querenden Fussgängern tiefer als ohne Fussgänger.

Der Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit wurde schon mehrmals untersucht, wobei unterschiedliche Resultate publiziert wurden [2, 9]. Diese Verfahren beruhen alle auf empirisch hergeleiteten Einflussfaktoren.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde festgestellt, dass Fussgängermengen von mehr als ca. 250 FG/h bei den untersuchten Kreiseln nicht auftraten.

3.2.1. Einstreifige Einfahrten mit Fussgängerstreifen (Typ 1/1)

Anhand der Regressionsanalyse der Messwerte für Kreisel mit Fussgängerstreifen und ohne Fussgängerstreifen liessen sich die Einflüsse querender Fussgänger bestimmen. Dabei konnten durch Aufgliederung der Messwerte in zwei Gruppen, ohne FG und 50 - 100 FG/h, die Einflüsse bestimmt werden. Die Regressionskurve mit weniger als 50 Fussgängerquerungen entspricht dabei ungefähr dem bei der ersten Analyse abgeleiteten Zusammenhang „ohne Fussgängerstreifen“. Die folgende Abbildung zeigt die Resultate der Regressionsanalysen. Darin wird die Verkehrsstärke in der Einfahrt der Leistungsfähigkeit L_E gleichgesetzt.

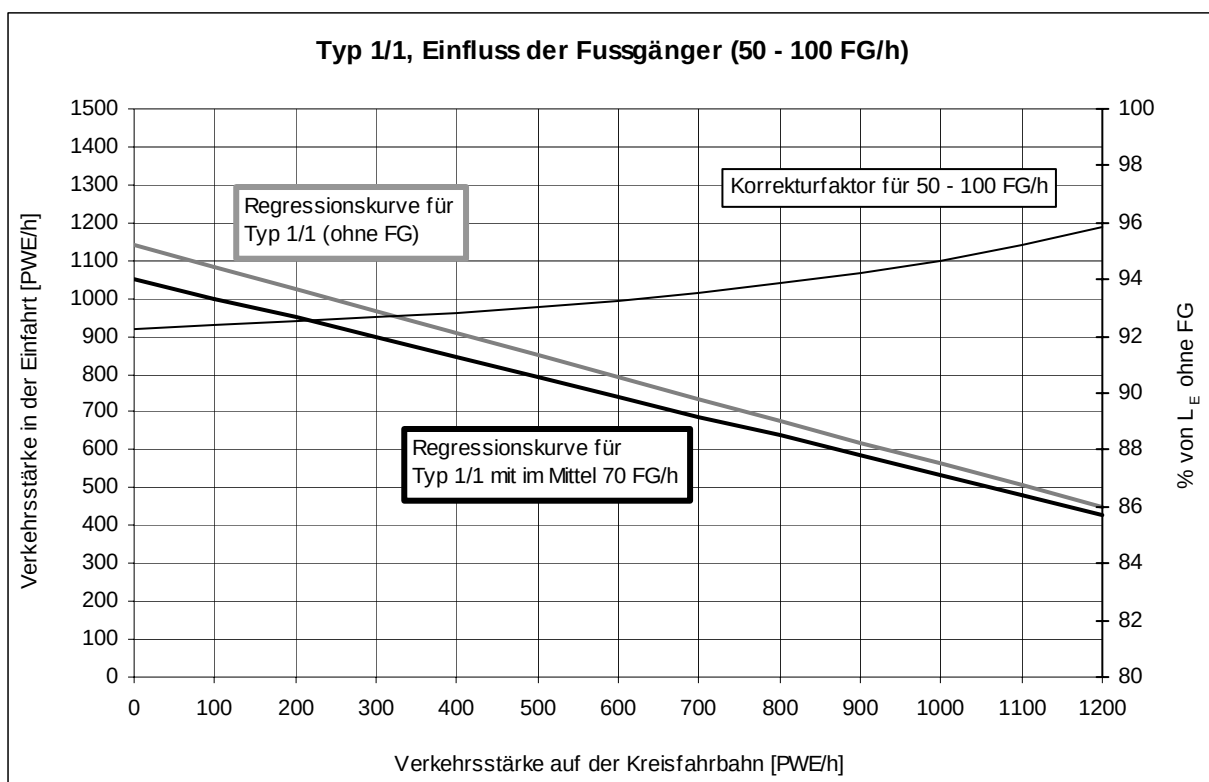


Abb. 29: Einfluss querender Fussgänger (über Fussgängerstreifen) auf die Leistungsfähigkeit der einstreifigen Einfahrt (L_E)

Die Abbildung zeigt:

- Mit wachsender Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn wird infolge der grösseren Wartezeiten und dem häufigeren Warten der Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt immer geringer.
- Bei hohen Belastungen auf der Kreisfahrbahn (> 1000 PWE/h) haben die Fussgänger nur noch einen marginalen Einfluss für die Bemessung.

3.2.2. Zweistreifige Einfahrten mit Fussgängersteifen (Typ 2/1)

Bei zweistreifigen Einfahrten müssen die Fussgänger in einem Zug die beiden Fahrstreifen überqueren. Da das Aufschliessen (Nachrücken) der in der Einfahrt bei hohen Verkehrsbelastungen gestauten Fahrzeuge wegen des nicht gleichzeitigen Wegfahrens von Fahrzeugen auf beiden Fahrstreifen an den Haltelinien unregelmässig ist, muss der Einfluss auf die Leistungsfähigkeit insgesamt etwas grösser sein als bei einstreifigen Einfahrten.

Die in gleicher Art wie bei den einstreifigen Zufahrten durchgeführten Regressionsanalysen führten für 50 - 100 FG/h zu den folgenden Ergebnissen.

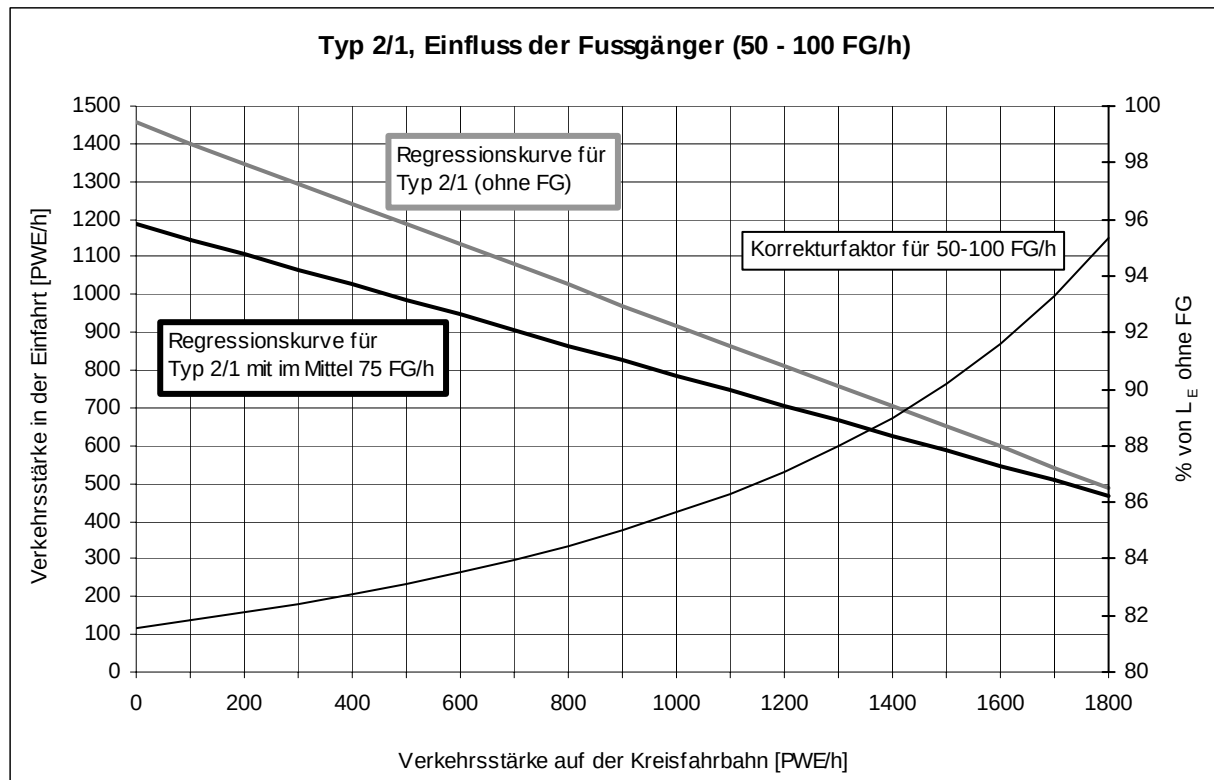


Abb. 30: Einfluss querender Fussgänger (über Fussgängerstreifen) auf die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten bei einstreifiger Kreisfahrbahn (L_E)

Die Abbildung zeigt:

- Mit wachsender Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn wird infolge der grösseren Wartezeiten und dem häufigeren Warten der Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt immer geringer.
- Die Unterschiede sind jedoch ausgeprägter als beim Typ 1/1
- Bei hohen Belastungen auf der Kreisfahrbahn (> 1600 PWE/h) haben die Fussgänger nur noch einen marginalen Einfluss auf die Bemessung.

3.3. Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Ausfahrt

Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit der Ausfahrt nicht untersucht werden, da die Stichprobe für eine Auswertung und damit allgemeine Aussage zu klein war.

Die Leistungsfähigkeit der Ausfahrt aus dem Kreisel ist deshalb stets zu gewährleisten, damit ein Rückstau auf die Kreisfahrbahn vermieden und somit die Funktionsfähigkeit des Kreisels gewährleistet wird. Neben einigen weniger bedeutenden Einflüssen wie z.B. dem Ausfahrtsradius, haben zwei Grössen einen vorherrschenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Ausfahrt, nämlich

- die Anzahl der Fahrstreifen der Ausfahrt und
- die Anzahl querender Fussgänger auf dem Fussgängerstreifen der Ausfahrt.

Diese Einflüsse wurden bisher nur vereinzelt näher untersucht, so dass wenig Vergleichsgrundlagen vorhanden sind.

Grundsätzlich zeigt sich vorläufig aufgrund von Praxiserfahrungen und anderweitig durchgeführten Untersuchungen, dass bei einstreifigen und zweistreifigen Ausfahrten die Leistungsfähigkeit der Ausfahrt mit zunehmender Stärke der Fussgänger sinkt. Weiter zeigte sich, dass breite Ausfahrten (4.5 m) gegenüber schmälere Ausfahrten (3.5 m) die Leistungsfähigkeit um rund 200 PWE/h reduzieren. Damit wird bei zweistreifigen Ausfahrten (Breite ca. 6 m) die Leistungsfähigkeit nochmals reduziert. Deshalb sowie aus Sicherheitsgründen werden zweistreifige Ausfahrten grundsätzlich gemäss Projektierungsnorm [11] nicht empfohlen. Die Praxis zeigt aber zweckmässige Anwendungen dort, wo die Fussgängerstärke gering und die ausfahrende Verkehrsstärke sehr hoch ist.

3.4. Einfluss zeichengebender Fahrzeuge beim Ausfahren auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt

Weil die Videoaufzeichnungen in der Regel bei Tageslicht durchgeführt wurden, war es äusserst schwierig, „blinkenden Fahrzeuge“ zu erkennen. Nur beim Kreisel Nr.4 wurden die Aufnahmen bei Anbruch der Dämmerung gemacht, wobei die Anzahl auswertbarer Minutenintervalle unter 100 liegt. Deswegen können die folgenden Ergebnisse lediglich eine Tendenz aufzeigen.

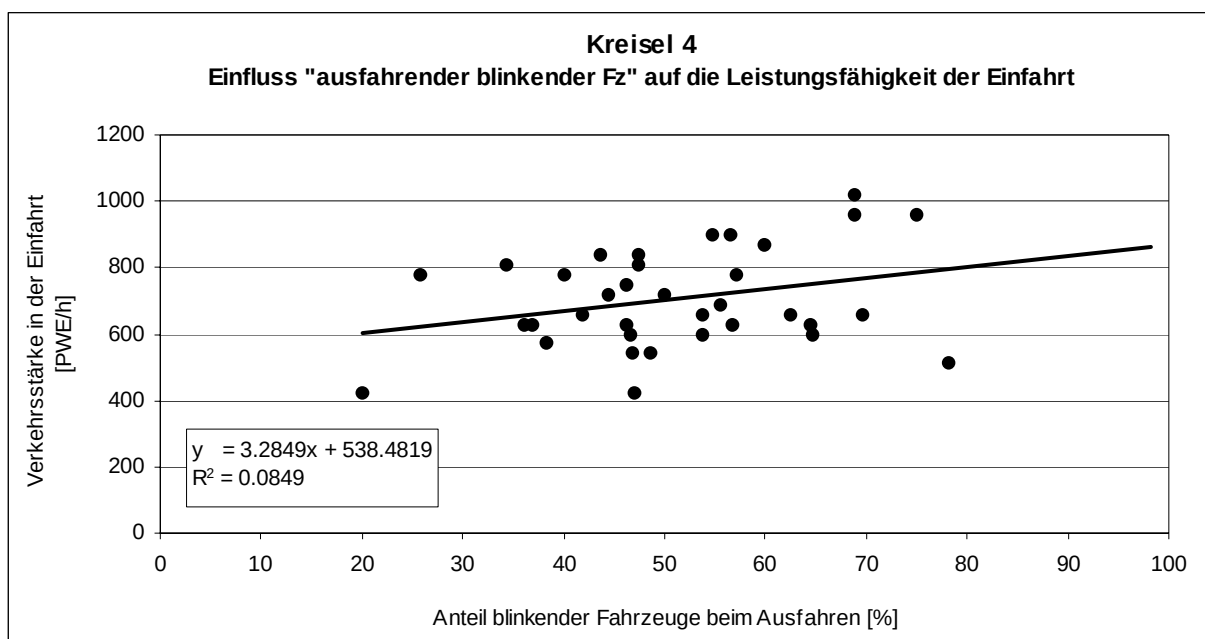


Abb. 31: Einfluss blinkender Fahrzeuge beim Ausfahren auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt

Die Abbildung zeigt:

- Tendenziell kann davon ausgegangen werden, dass sich bei einem hohem Anteil von ausfahrenden Fahrzeugen, die dies durch „Blinken“ anzeigen, die Leistungsfähigkeit der Einfahrt leicht erhöht.
- Diese Ergebnisse dürfen jedoch nicht verallgemeinert werden, da die Stichprobe sehr klein war.

4. Erkenntnisse

4.1. Grundsätzliches

Die Untersuchung des Zeitlückenverhaltens an Kreiseln erwies sich wie erwartet als sehr arbeitsintensiv. Während die Feldaufnahmen mittels Videoaufzeichnung relativ einfach zu bewerkstelligen waren, gestaltete sich die Auswertung als aufwendig, da nur jene Zeitintervalle interessierten, die hohe Auslastungen der Kreiseinfahrten aufwiesen. Es zeigte sich dabei, dass sogar in Verkehrsspitzenzeiten diese Situationen nicht sehr häufig beobachtet werden konnten, was zu einer beträchtlichen Menge an Videomaterial führte, welches zwar erhoben wurde, aber für die Auswertung keine verwertbaren Datenabschnitte lieferte. Bei der Auswertung und Analyse musste dabei das ganze Videomaterial durchkämmt werden, um die gewünschten und interessanten Videosequenzen zu lokalisieren.

Aufgrund dieser Umstände liessen sich auch in dieser Untersuchung wiederum nur eine begrenzte Zahl an Objekten einbeziehen. Die Stichprobe bei den Kreiseln des Typs 1/1 mit Erhebungen an fünf Einfahrten und beim Typ 2/1 mit 6 Einfahrten erlauben jedoch zweckmässige Aussagen zur Überprüfung resp. Ergänzung der bestehenden Grundlagen der Norm SN 640 024. Die Stichproben-Basis bei den Typen 1+B/1 und 2/2 ist gering, so dass die Erkenntnisse zu diesen beiden Betriebsformen als nicht gesichert angesehen werden müssen. Sie geben aber zumindest erste Hinweise.

Als wichtig im Rahmen der vorliegenden Untersuchung dürften die Resultate zur Betriebsform des Typs 2/1, also Kiesel mit zweistreifigen Einfahrten und einstreifiger, überbreiter Kreisfahrbahn angesehen werden. Dies deshalb, weil diese Betriebsform im Ausland kaum angeordnet wird und auch keine Untersuchungsergebnisse resp. Bemessungsgrundlagen für diese Betriebsform bekannt sind, während sie in der Schweiz verbreitet ist.

Der folgende Abschnitt zeigt die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erarbeiteten Resultate in Gegenüberstellung zur derzeit gültigen Norm SN 640 024. Dabei werden entsprechende Beurteilungen vorgenommen, welche Grundlagen für eine allfällige Normrevision darstellen.

4.2. Leistungsfähigkeit von Kreiseln

4.2.1. Betriebsform Typ 1/1

In beiden Fällen wurden sämtliche Intervalle (auch solche mit Fussgängereinfluss) berücksichtigt. Die folgende Abbildung zeigt die Gegenüberstellung des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke der einstreifigen Einfahrt (q_E) und der Verkehrsstärke der einstreifigen Kreisfahrbahn (q_K) aus dieser Untersuchung und aus der gültigen VSS-Norm.

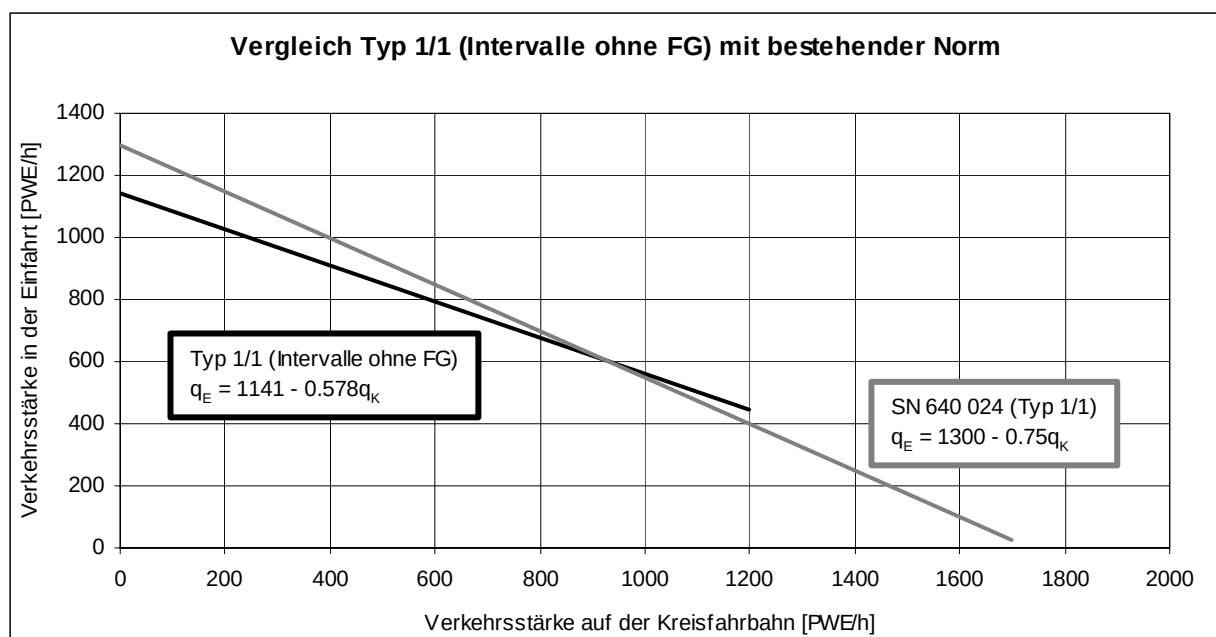


Abb. 32: Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse mit der Norm für die Betriebsform Typ 1/1

Die Abbildung zeigt:

- Die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelte Leistungsfähigkeit der Einfahrt ist geringer als jene, die die Norm ausweist.
- Die Unterschiede im Bereich grösserer Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn und damit bei höheren Gesamtbelastungen des Kreisels sind relativ klein. Wird die exponentielle Regressionskurve betrachtet, ergeben sich im gesamten Leistungsfähigkeitsbereich sehr geringe Unterschiede.
- Zu Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn von mehr als 1200 PWE/h sind aus der vorliegenden Untersuchung keine Aussagen möglich.

4.2.2. Betriebsform Typ 2/1

Zu dieser Betriebsform existierten in der Schweiz bis anhin keine vergleichbaren Bemessungsgrundlagen. Auch im Ausland wird diese Betriebsform im Allgemeinen nicht verwendet. In der Schweiz hat sich aber diese Betriebsform, die teilweise oder bei allen Zufahrten zweistreifige Einfahrten aufweist, in vielen Fällen bewährt. Allerdings muss im Gegensatz zum Typ 1/1 eine breitere Kreisfahrbahn – auch als überbreite Fahrbahn bezeichnet – angeordnet werden.

Wie zu vermuten war, ergibt sich neben dem Vorteil kürzerer Stauräume eine höhere Leistungsfähigkeit bei den zweistreifigen Einfahrten, unabhängig von der Verteilung der Verkehrsstärken auf den beiden Fahrstreifen der Einfahrten.

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke und der Gesamtverkehrsstärke der beiden Fahrstreifen der Einfahrt für den Typ 2/1 in Gegenüberstellung zum Typ 1/1.

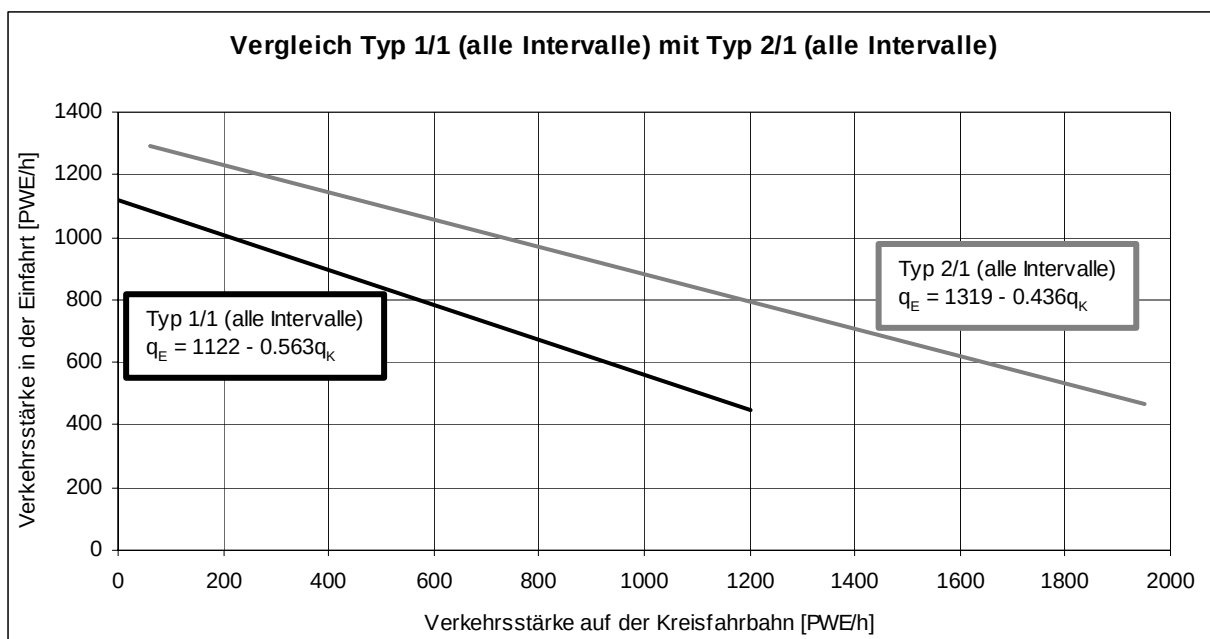


Abb. 33: Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn; Gegenüberstellung für die Typen 2/1 und 1/1

Die Abbildung zeigt:

- Zweistreifige Einfahrten bei überbreiter Kreisfahrbahn haben im Durchschnitt eine um rund 250 - 400 PWE/h grössere Leistungsfähigkeit als einstreifige Einfahrten. Dies entspricht etwa einer Steigerung um 20 bis 40 %.

Wie in 3.1.4. dargelegt, war bei den untersuchten Kreiseln jeweils nur einer der beiden Fahrstreifen der Einfahrt stark belastet (dominanter Fahrstreifen). In der Praxis könnte es in gewissen Fällen zweckmässig sein, die Beurteilung der Leistungsfähigkeit anhand der Belastung des „massgebenden“, stärker belasteten Fahrstreifens der Einfahrt vorzunehmen.

Die folgende Abbildung zeigt die Zusammenhänge für die zweistreifige Einfahrt (alle Intervalle) und für den dominanten Fahrstreifen der Einfahrt.

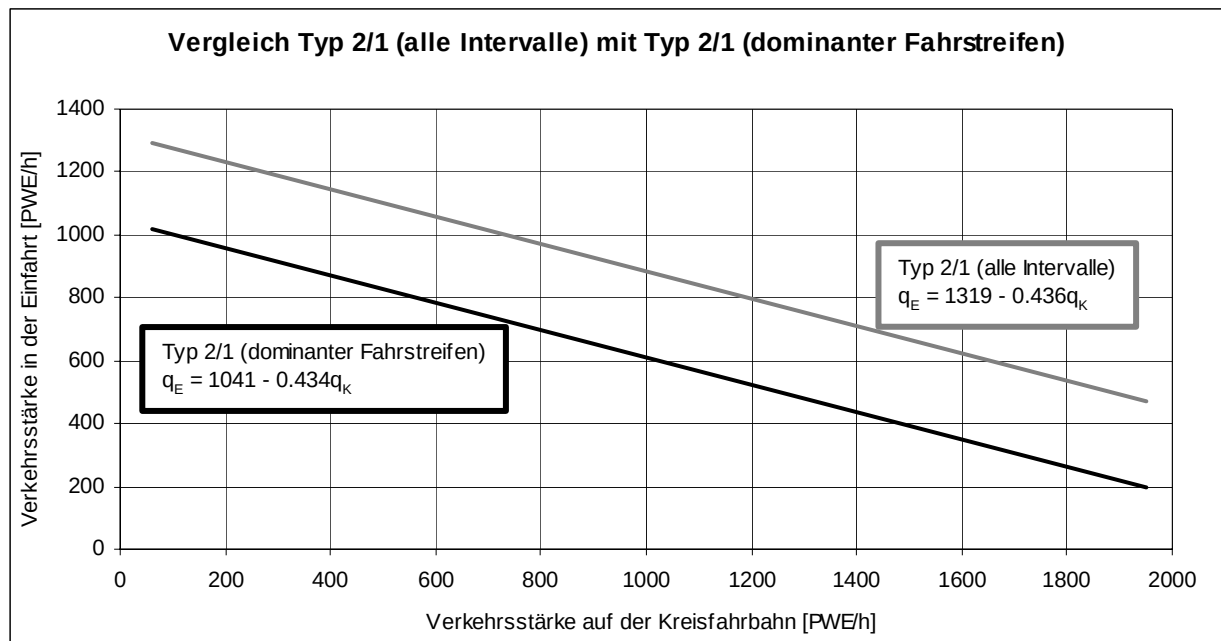


Abb. 34: Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn; Gegenüberstellung zweistreifige Einfahrt / dominanter Fahrstreifen der Einfahrt beim Typ 2/1

Die Abbildung zeigt:

- Der dominante Fahrstreifen der zweistreifigen Einfahrt bewältigt beim Typ 2/1 eine um ca. 300 PWE/h niedrigere Verkehrsstärke als die zweistreifige Einfahrt. Das bedeutet, dass ca. 60 - 75 % der Leistungsfähigkeit der gesamten Einfahrt auf diesem Fahrstreifen erbracht werden.

4.2.3. Betriebsform Typ 2/2

Die Analyse der Zusammenhänge bezüglich Leistungsfähigkeit der zweistreifigen Einfahrt bei zweistreifig ausgebildeter Kreisfahrbahn führte zu heterogenen Ergebnissen, die sich nicht verallgemeinern liessen. Aufgrund der kleinen Stichprobe von 3 Einfahrten und der fehlenden Ergiebigkeit von Situationen und Zeitabschnitten mit ausgelasteten Fahrstreifen in den Einfahrten, ist das heterogene Resultat nicht aussergewöhnlich. Es zeigt klar, dass die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel nochmals genauer und vertiefter untersucht werden sollte, um die Zusammenhänge näher zu klären.

4.2.4. Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit

Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss querender Fussgänger auf dem Fussgängerstreifen bei einstreifigen Einfahrten auf die Leistungsfähigkeit der einstreifigen Einfahrt, wie er aus der Untersuchung abgeleitet werden konnte, in Gegenüberstellung zur Norm SN 640 024.

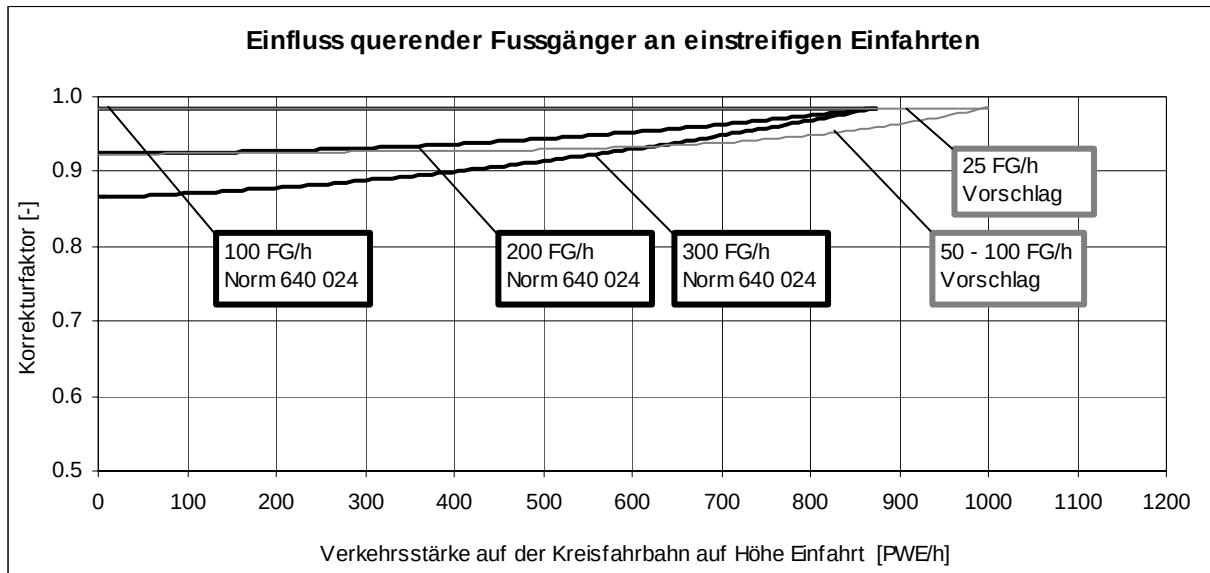


Abb. 35: Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit einstreifiger Einfahrten

Die Abbildung zeigt:

- Aufgrund der praktisch ermittelten Fussgängermengen zwischen 25 bis maximal 100 FG/h zeigt sich der Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt deutlich stärker als dies in der bestehenden Norm angegeben wird.
- Aus der Analyse ist ersichtlich, dass bereits Fussgängermengen von nur 25 FG/h die Leistungsfähigkeit der Einfahrt – wenn auch nur sehr geringfügig – reduzieren.
- Während ein Reduktionsfaktor von ca. 0.93 gemäss Norm bei geringeren bis mittleren Verkehrsstärken auf der Kreisfahrbahn bei 200 querenden Fussgängern pro Stunde besteht, zeigt sich dies aus den Untersuchungen und Analysen bereits bei 100 Fussgängern pro Stunde.
- Der Einfluss querender Fussgänger sinkt und wird sehr gering, wenn die Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn über 800 PWE/h steigt. Dies ist damit zu erklären, dass bei diesen Verkehrsbelastungen häufig genügend Zeitlücken im vorrückenden Verkehr der Einfahrt für das Queren von Fussgängern vorhanden sind.

Der Einfluss querender Fussgänger bei zweistreifigen Einfahrten wurde in vorliegender Untersuchung beim Typ 2/1 untersucht (vgl. Abb. 36).

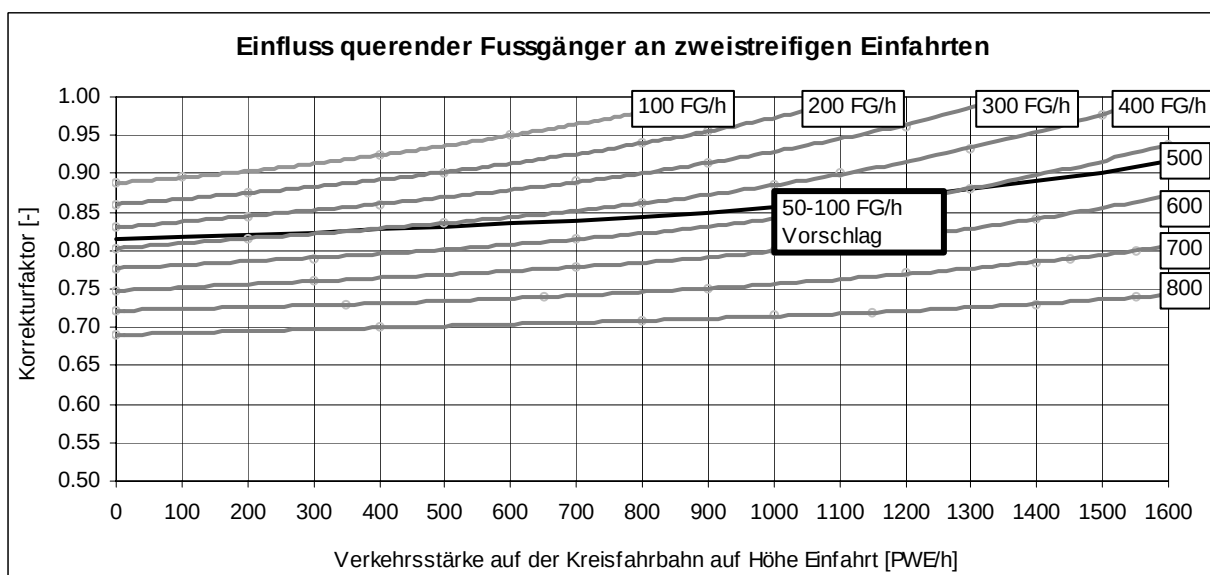


Abb. 36: Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten beim Typ 2/1 (Vorschlag) und nach bestehender Norm

Die bestehende Norm enthält ein Diagramm für Korrekturfaktoren an zweistreifigen Einfahrten (Abb. 4 in [10]). Verglichen mit der Normgrundlage ist der in dieser Untersuchung erhobene Einfluss deutlich grösser (vgl. Abb. 36). Allerdings ist zu beachten, dass die aus Deutschland stammenden Ergebnisse, die in dem erwähnten Diagramm dargestellt sind, auf Erhebungen an Kreiseln des Typs 2/2 basieren.

5. Folgerungen

Aufgrund der Beurteilung der Untersuchungsergebnisse lassen sich folgende Folgerungen ableiten bzw. angeben:

1. Aufgrund der relativ geringfügigen Unterschiede zwischen dem Bemessungszusammenhang gemäss Norm SN 640 024 für die Betriebsform 1/1 und den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung ist zu prüfen, ob dieser Zusammenhang in der bestehenden Norm anzupassen ist. Es müsste allenfalls eine geringfügige Anpassung der Leistungsfähigkeit nach unten erfolgen.
2. Der Bemessungszusammenhang für die Betriebsform 2/1 ist neu in die Norm SN 640 024 aufzunehmen. Die Grundlage ist die Abbildung 34 in Ziffer 4.2.2. des Kapitels Ergebnisse.
3. Der Zusammenhang bzgl. Leistungsfähigkeit der Einfahrt aufgrund querender Fussgänger in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn ist an die neuen Erkenntnisse dieser Untersuchung (Ziffer 4.2.4.) anzupassen.
4. Eine Folgeuntersuchung zur Leistungsfähigkeit von Kreiseln müsste sich schwergewichtig auf die Betriebsform Typ 2/2, also Kreisel mit zweistreifiger Kreisfahrbahn und zweistreifigen Einfahrten konzentrieren, da die vorliegende Untersuchung diese Frage nicht schlüssig beantworten konnte.
5. Um allgemein gültige Angaben zur Leistungsfähigkeit von Kreiselausfahrten sowie zu den Einflüssen querender Fussgänger bei den Ausfahrten ableiten zu können, bedarf es weiterer Erhebungen mit grösseren Stichproben.
6. Zur Angabe allgemein gültiger Grenz- und Folgezeitlücken sind zusätzliche Untersuchungen an Kreiseln durchzuführen und weitere Grenz- und Folgezeitlücken auszuwerten. Dies betrifft alle Betriebsformen.

In diesen Zusammenhang interessiert zudem das Zeitlückenverhalten auf der Kreisfahrbahn, ebenfalls bei verschiedenen Betriebsformen.

7. Ein Bemessungszusammenhang für die Betriebsform 1+B/1 kann nicht abschliessend angegeben werden, da einerseits keine grossen Unterschiede zur Betriebsform 1/1 festgestellt wurden und es sich beim untersuchten Kreisel um einen Sonderfall handelt.
8. Bei der Normrevision ist zudem grundsätzlich zu prüfen, ob nicht Regressionsergebnisse *ohne* Einfluss querender Fussgänger zu verwenden sind. Dies ist bei den aus Deutschland stammenden Bemessungskurven (Typen 1/2, 2/2, 2/3) der Fall. Die in der bestehenden Norm empfohlene Berücksichtigung der Korrekturfaktoren führt bei den Ergebnissen aus dieser Untersuchung zu einer Schmälerung der Leistungsfähigkeit.

6. Verzeichnisse und Quellen

6.1. Quellenverzeichnis

- [1] Simon M., Hintermeister O. et al.: „Empirische Ermittlung der Leistungsfähigkeit von innerörtlichen Kreisverkehrsplätzen“, EVED Forschungsbericht Nr. 204, 1990
- [2] Brilon W., Bonzio L., Wu N.: „Neue Forschungsergebnisse zur Kapazität von Kreisverkehrsplätzen“, Strassenverkehrstechnik Heft 6/97, Kirschbaum Verlag Köln
- [3] Brilon W., Wu N.: „Kapazität von Kreisverkehrsplätzen“, Strassenverkehrstechnik Heft 9/97, Kirschbaum Verlag Köln
- [4] Siegloch W.: „Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen“, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft Nr. 154, BMV Deutschland, 1973
- [5] HBS 2001: „Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen“, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2001
- [6] Stuwe B.: „Untersuchung der Leistungsfähigkeit an deutschen Kreisverkehrsplätzen“, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 1992
- [7] Harders J.: „Grenz- und Folgezeitlücken als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstrassen“, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft Nr. 216, BMV Deutschland, 1976
- [8] Weinert A.: „Grenz- und Folgezeitlücken an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlagen“, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, 2001
- [9] Schnabel W., Knotte Th.: „Untersuchungen zur Durchlassfähigkeit und zur Qualität des Verkehrsablaufes auf Kreisverkehrsplätzen“, Strassenverkehrstechnik Heft 4/98, Kirschbaum Verlag Köln
- [10] VSS-Norm SN 640 024: „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit für Knoten mit Kreisverkehr“, Verband der Schweizerischen Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich 1999
- [11] VSS-Norm SN 640 263: „Knoten, Knoten mit Kreisverkehr“, Verband der Schweizerischen Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich 1999
- [12] Transportation Research Board (TRB): „Traffic Flow Theory; A State-of-the Art-Report“, Chapter 8 (by Brilon W. and Troutbeck R.J.) Washington D.C., 2000
- [13] Brilon W., Bäumer H.: „Überprüfung von Kreisverkehren mit zweistreifig markierter oder einstreifig markierter, aber zweistreifig befahrbarer Kreisfahrbahn“, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft Nr. 876, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnwesen, Bonn, 2004

6.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Untersuchungsablauf.....	3
Abb. 2:	Bemessungsverfahren verschiedener Länder [5] (Auswahl).....	5
Abb. 3:	Schematische Darstellung der Erfassungsmethode mit den Bezugslinien (Beispiel)	8
Abb. 4:	Typisierung der Kreisel nach den verschiedenen Betriebsformen.....	9
Abb. 5:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für Typ 1/1 (linear)	13
Abb. 6:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für Typ 1/1, (exponentiell)	14
Abb. 7:	Zusammenhänge mit / ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fussgänger, (linear)	14
Abb. 8:	Zusammenhänge mit / ohne Berücksichtigung des Einflusses querender Fussgänger, (exponentiell).....	15
Abb. 9:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für den Typ 1+B/1 (alle Intervalle).....	16
Abb. 10:	Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für den Typ 1+B/1 mit / ohne Fussgängereinfluss (alle Intervalle)	16
Abb. 11:	Belastungsverhältnisse der ausgewerteten Intervalle.....	17
Abb. 12:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 6, alle Intervalle)	18
Abb. 13:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 7, alle Intervalle).....	18
Abb. 14:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 8, alle Intervalle)	18
Abb. 15:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn (Kreisel 9, alle Intervalle)	19
Abb. 16:	Vergleich des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn für die Kreisel 6, 7, 8 und 9 (alle Intervalle).....	19
Abb. 17:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke beider Fahrstreifen der Einfahrt zusammen mit jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (linear)	20
Abb. 18:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke beider Fahrstreifen der Einfahrt zusammen mit jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (exponentiell).....	20
Abb. 19:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke des dominanten (stärker belasteten) Fahrstreifens der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (linear).....	21
Abb. 20:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke des dominanten (stärker belasteten) Fahrstreifens der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn, alle Intervalle (exponentiell)	21
Abb. 21:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn mit / ohne Einfluss querender Fussgänger (linear)	22
Abb. 22:	Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn mit / ohne Einfluss querender Fussgänger (exponentiell) ...	22
Abb. 23:	Belastungsverhältnisse der ausgewerteten Intervalle für den Kreisel Nr. 10	23
Abb. 24:	Belastungsverhältnisse der ausgewerteten Intervalle für den Kreisel Nr. 11.....	23
Abb. 25:	Schematische Darstellung der Belastungsverhältnisse der Kreisel Nr. 10 und 11	24
Abb. 26:	Kreisel 10: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen rechts) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (äusserer Fahrstreifen(Q_{ka}) stark belastet / innerer Fahrstreifen gering belastet(Q_{ki})).....	24
Abb. 27:	Kreisel 11: Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen rechts) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (äusserer / innerer Fahrstreifen ähnlich ausgelastet)	25
Abb. 28:	Vergleich der Zusammenhänge zwischen der Verkehrsstärke in der Einfahrt (dominanter Fahrstreifen) und der Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn (beide Fahrstreifen zusammen)	25

Abb. 29: Einfluss querender Fussgänger (über Fussgängerstreifen) auf die Leistungsfähigkeit der einstreifigen Einfahrt (L_E).....	26
Abb. 30: Einfluss querender Fussgänger (über Fussgängerstreifen) auf die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten bei einstreifiger Kreisfahrbahn (L_E).....	27
Abb. 31: Einfluss blinkender Fahrzeuge beim Ausfahren auf die Leistungsfähigkeit der Einfahrt.....	28
Abb. 32: Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse mit der Norm für die Betriebsform Typ 1/1	29
Abb. 33: Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn; Gegenüberstellung für die Typen 2/1 und 1/1.....	30
Abb. 34: Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke der Einfahrt und jener auf der Kreisfahrbahn; Gegenüberstellung zweistreifige Einfahrt / dominanter Fahrstreifen der Einfahrt beim Typ 2/1.....	31
Abb. 35: Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit einstreifiger Einfahrten.....	32
Abb. 36: Einfluss querender Fussgänger auf die Leistungsfähigkeit zweistreifiger Einfahrten beim Typ 2/1 (Vorschlag) und nach bestehender Norm	32

6.3. Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Begriffe und Abkürzungen zur Geometrie.....	3
Tab. 2	Begriffe und Abkürzungen zur Verkehrsstärke.....	4
Tab. 3:	Begriffe und Abkürzungen zum Verkehrsablauf.....	4
Tab. 4:	Übersicht über einschlägige Bemessungsverfahren für Kreisel	5
Tab. 5:	Hinweise zu Bemessungsverfahren auf der Basis Simulation für Kreisel	6
Tab. 6:	Hinweise zu Grundlagen zur Bestimmung Wartezeiten und Rückstaus	6
Tab. 7:	Ausgewählte Untersuchungsobjekte.....	7
Tab. 8:	Auswerteformular Verkehrsstärken, Fussgängerstärken (Beispiel)	10
Tab. 9:	Umfang der Auswertungen bezüglich Verkehrsstärken und Fussgängerstärken	10
Tab. 10:	Auswerteformular Zeitlücken (Beispiel).....	11
Tab. 11:	Auswerteumfang bzgl. Zeitlücken.....	11
Tab. 12:	Belegung der Fahrstreifen links und rechts.....	17

Anhänge

- Anhang 1:** Übersicht über verschiedene Bemessungsverfahren für Kreisel
- Anhang 2:** Ergebnisse der Regressionsberechnungen sowie Auswertungen von Grenz- und Folgezeitlücken jeweils für die einzelnen Untersuchungsobjekte
- Anhang 3:** Situationspläne, Abbildungen und geometrische Angaben zu den einzelnen Untersuchungsobjekten
- Anhang 4:** Zusammenstellung aller Ergebnisse der Regressionsanalysen
- Anhang 5:** Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken

Übersicht über verschiedene Bemessungsverfahren für Kreisel

Methode	Autor/Jahr	Land	Formel (standardisiert)	Bemerkungen
G	Tanner, 1962	GB	$q_{E,max} = 3600 \cdot (1 - t_m \cdot q_k) \cdot q_k \cdot \frac{e^{-p(t_g - t_m)}}{1 - e^{-p \cdot t_f}}$	
G	Harders, 1968	D	$q_{E,max} = q_k \cdot \frac{e^{-p(t_g - t_f)}}{e^{-p \cdot t_f} - 1}$	Exponentieller Ansatz
G	Siegloch, 1973	D	$q_{E,max} = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-p \left(t_g - \frac{t_f}{2} \right)}$	Exponentieller Ansatz
G	Jakobs	D	$q_{E,max} = \frac{3600}{t_f} \cdot (1 - t_m \cdot p) \cdot e^{-\left(\frac{p\alpha}{1 - p \cdot t_m} \right) (t_g - t_m)}$	
R	Kimber, 1980	CH	$q_{E,max} = F - f_c \cdot q_k$	Parameter F und f_c in Funktion von verschiedenen geometrischen Parametern
R	EPF Lausanne, 1991		$q_{E,max} = 1500 - \frac{8}{9} \cdot (q_k + \phi \cdot q_A)$	
R	Stuwe, 1992	D	$q_{E,max} = 154871 \cdot e^{\left(-0.00084 \frac{q_k}{N_k} \right)} + 4802 \cdot N_k + 20843 \cdot N_z + \left(6003 \cdot \frac{D}{n} - 738 \cdot \frac{D^2}{n^2} + 0.1520 \frac{D^3}{n^3} \right) + (-9921 \cdot b + 437 \cdot b^2 - 0.047 \cdot b^3)$	Wenn $q_{z,max}$ negativ wird, $q_{z,max} = 0$ setzen
R	Emch, Berger, 1992	CH	$q_{E,max} = A - B \cdot q_k$	Bei starkem ZR-Verkehr soll zusätzlich eine Überprüfung der LF gemäss CH1 oder CH2 mit den erhöhten Fahrzeugäquivalenten für ZR durchgeführt werden: 0.2 PWE auf Zufahrt und 0.8 PWE im Kreis. Parameter A, B in Funktion von N_k und N_z
R	Brilon, Stuwe, Drews, 1993	D	$q_{E,max} = A - B \cdot q_k$	Linearer Ansatz, Parameter A, B in Funktion von N_k und N_z
R	Brilon, Bonzio 1996	D	$q_{E,max} = A - B \cdot q_k$	Geometrische Parameter haben keine wesentlichen Einfluss auf die Kapazität. Parameter A, B in Funktion von N_k und N_z
G	Wu, 1997	D	$q_{E,max} = 3600 \cdot \left(1 - \frac{t_m \cdot q_k}{N_k} \right)^{N_k} \cdot \frac{N_k}{t_f} \cdot e^{-q_k \left(t_z \frac{t_f}{2} - t_m \right)}$	
G	Brilon, Troutbeck, Tracz 1997	D, AUS	$q_{E,max} = 3600 \cdot \alpha \cdot p \cdot \frac{e^{-p(t_g - t_m)}}{1 - e^{-\left(\frac{p\alpha}{1 - p \cdot t_f} \right) t_f}}$	
G	HCM (Highway Capacity Manual), 1997		$q_{E,max} = \frac{q_k \cdot e^{-q_k \cdot \frac{t_g}{3600}}}{1 - e^{-q_k \cdot \frac{t_g}{3600}}}$	

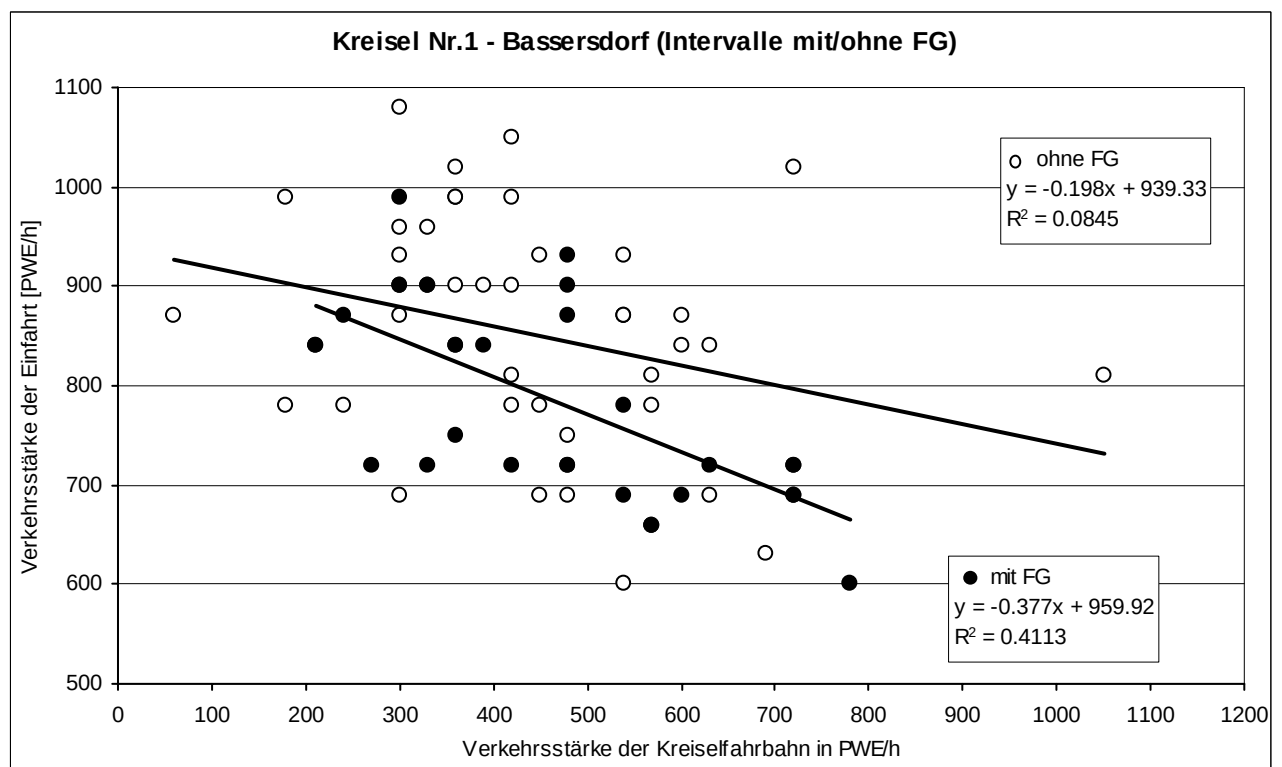
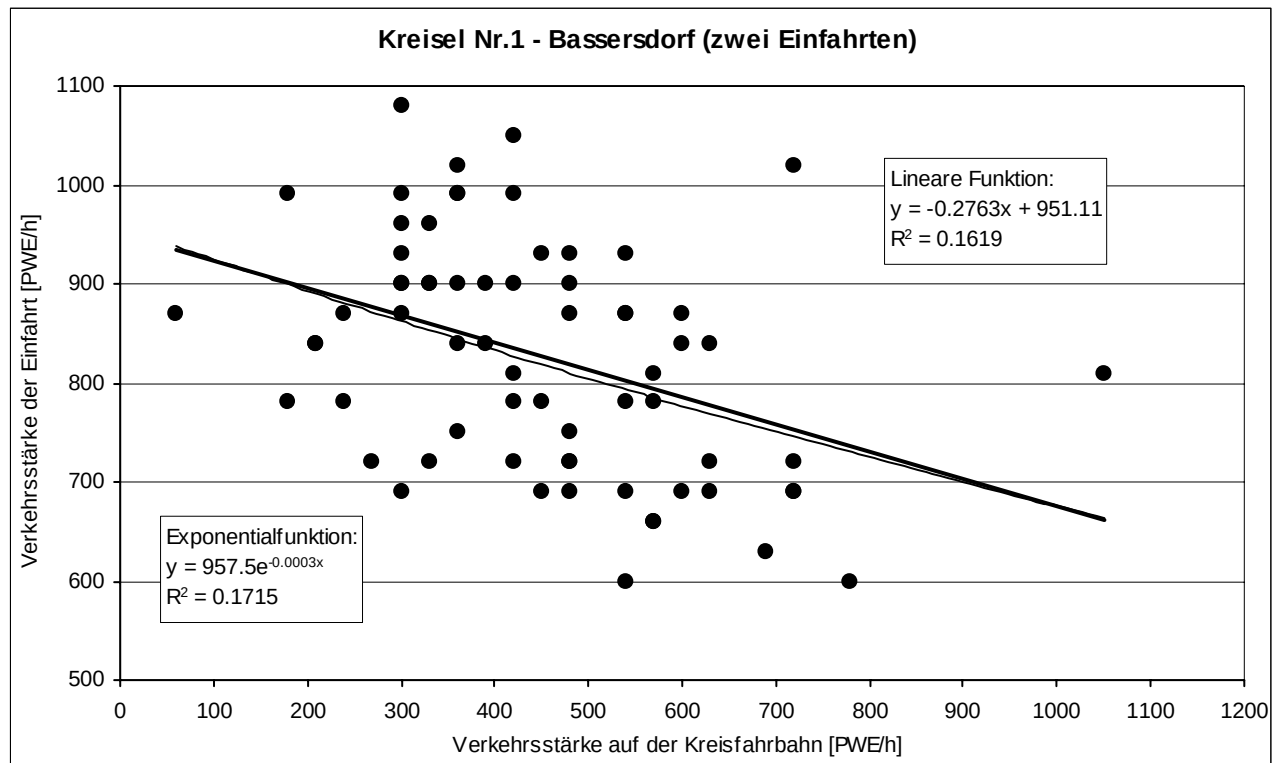
R Regressionsverfahren

G Grenzzeitlückentheorie

 α Einfahrtswinkel $P_{Fz/s}$ Verkehrsstärke des Hauptstromes N_k Anzahl Fahrstreifen im Kreis N_z Anzahl Fahrstreifen Zufahrt N_A Anzahl Fahrstreifen Ausfahrt N Anzahl der Arme des Kreisverkehrs Φ Faktor zur Berücksichtigung des ausfahrenden Verkehrs

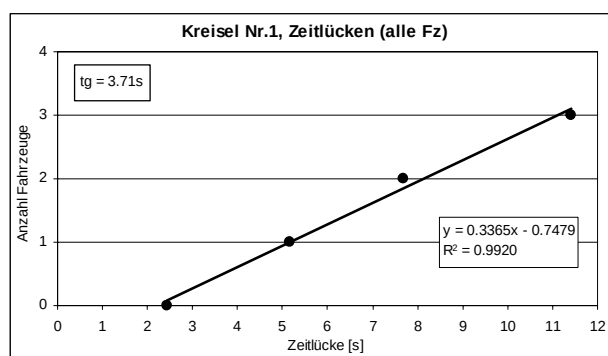
1	Bassersdorf - Löwenkreuzung	Ast 1: Klotenerstrasse Ast 2: Winterthurerstrasse
---	-----------------------------	--

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt

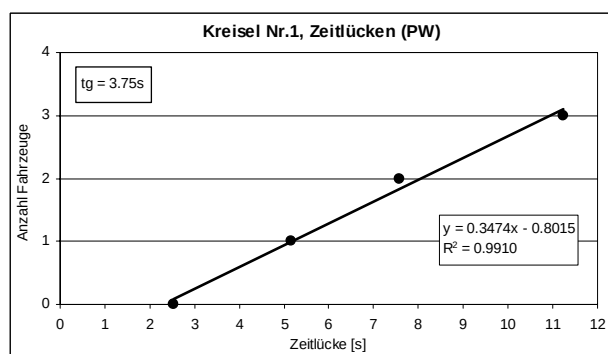


Grenz- und Folgezeitlücken

$n \leq 3$	alle Fz
$y = 0.3365x - 0.7479$	
$t_o = 2.223$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.194
Fz = 2	8.166
$t_f = 2.972$	
$t_f/2 = 1.486$	
$t_g = 3.708$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 490	

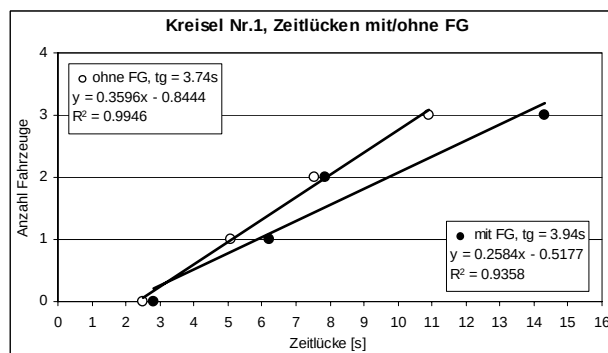


$n \leq 3$	PW
$y = 0.3474x - 0.8015$	
$t_o = 2.307$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.186
Fz = 2	8.064
$t_f = 2.879$	
$t_f/2 = 1.439$	
$t_g = 3.746$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 446	



ohne Fussgänger	
$n \leq 3$	PW
$y = 0.3596x - 0.8444$	
$t_o = 2.348$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.129
Fz = 2	7.910
$t_f = 2.781$	
$t_f/2 = 1.390$	
$t_g = 3.739$	

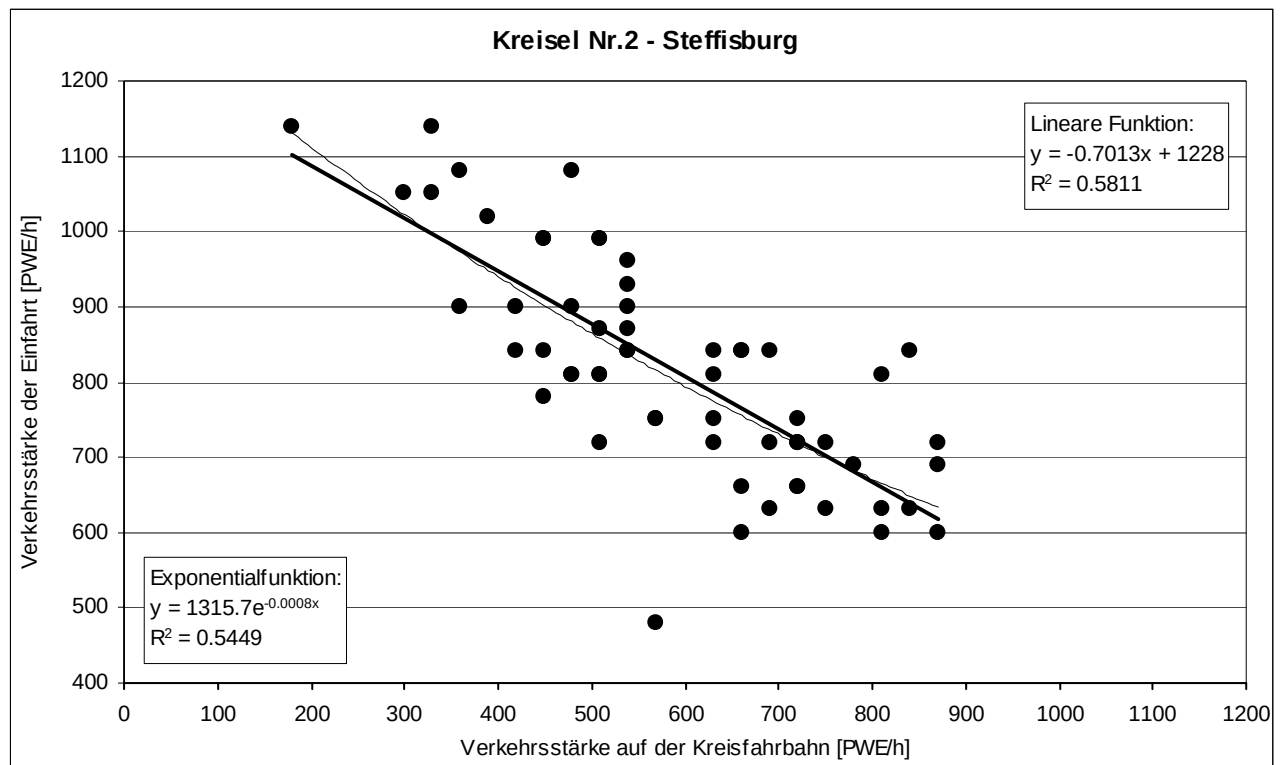
mit Fussgänger	
$n \leq 3$	PW
$y = 0.2584x - 0.5177$	
$t_o = 2.001$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.871
Fz = 2	9.741
$t_f = 3.870$	
$t_f/2 = 1.935$	
$t_g = 3.936$	



2 Steffisburg - Stuckikreuzung

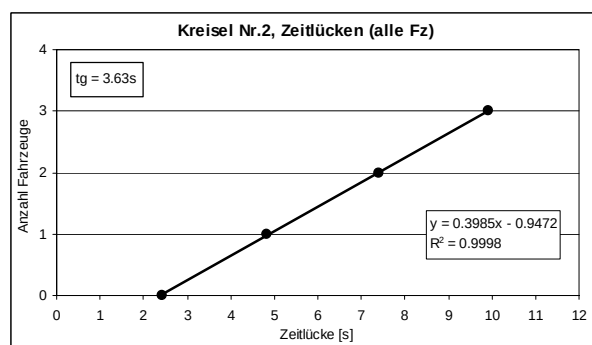
Ast 1: Richtung Thun

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt

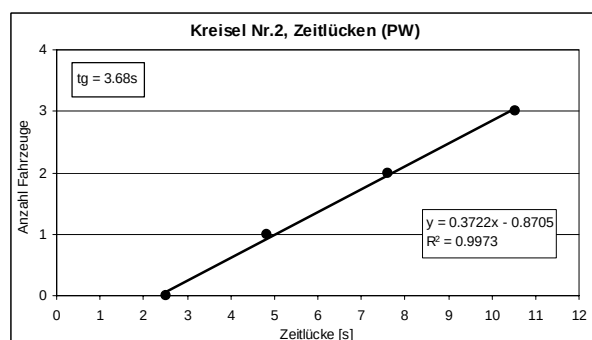


Grenz- und Folgezeitlücken

$n \leq 3$	alle Fz
$y = 0.3985x - 0.9472$	
$t_o = 2.377$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.886
Fz = 2	7.396
$t_f = 2.509$	
$t_f/2 = 1.255$	
$t_g = 3.632$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 575	



$n \leq 3$	PW
$y = 0.3722x - 0.8705$	
$t_o = 2.339$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.026
Fz = 2	7.712
$t_f = 2.687$	
$t_f/2 = 1.343$	
$t_g = 3.682$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 543	



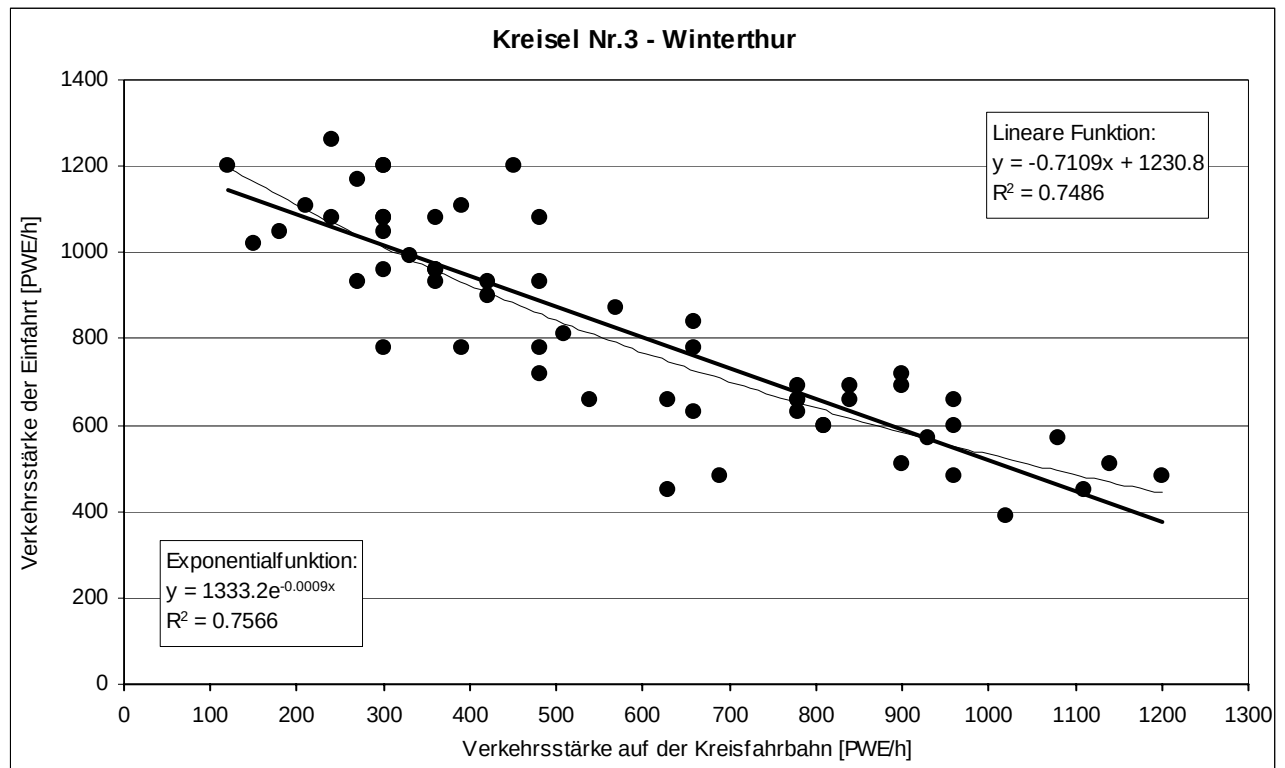
3

Winterthur – Seener-/Grüzefeldstrasse

Ast 1: Seenerstrasse-Nord

Ast 2: Grüzefeldstrasse-West

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt

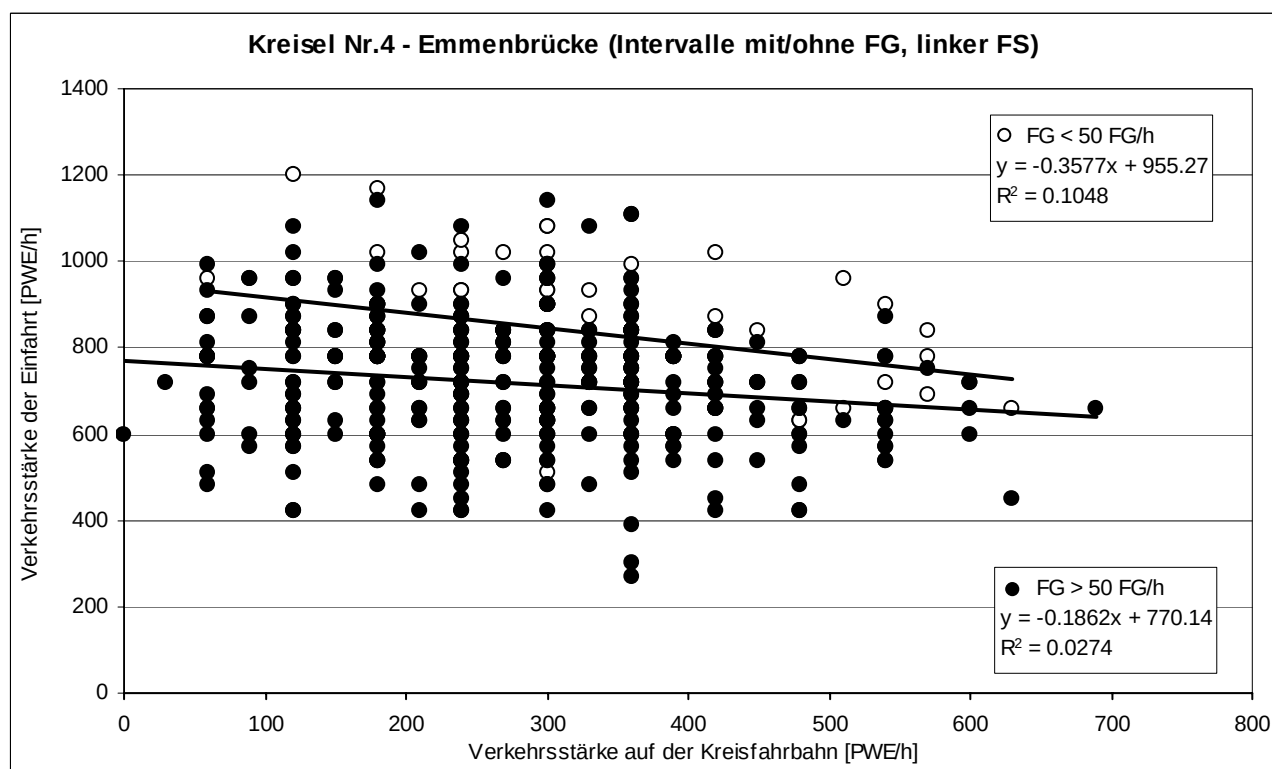
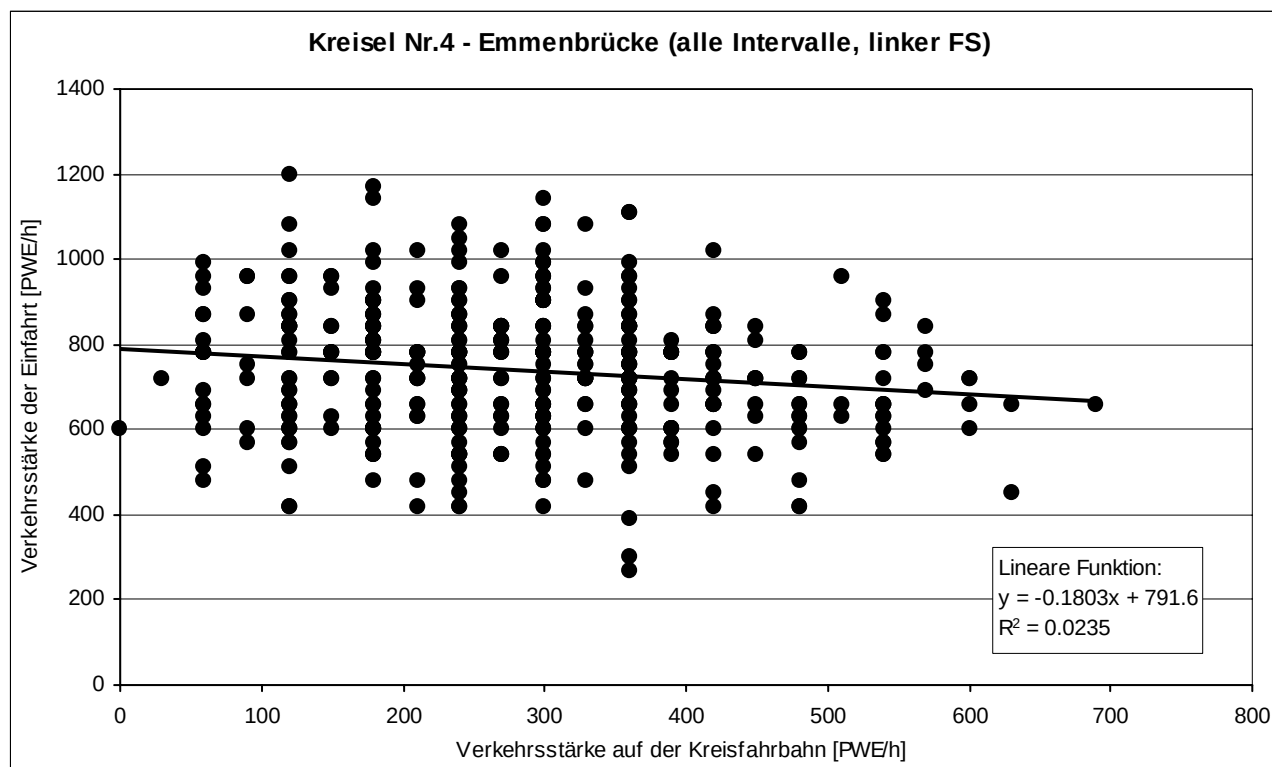


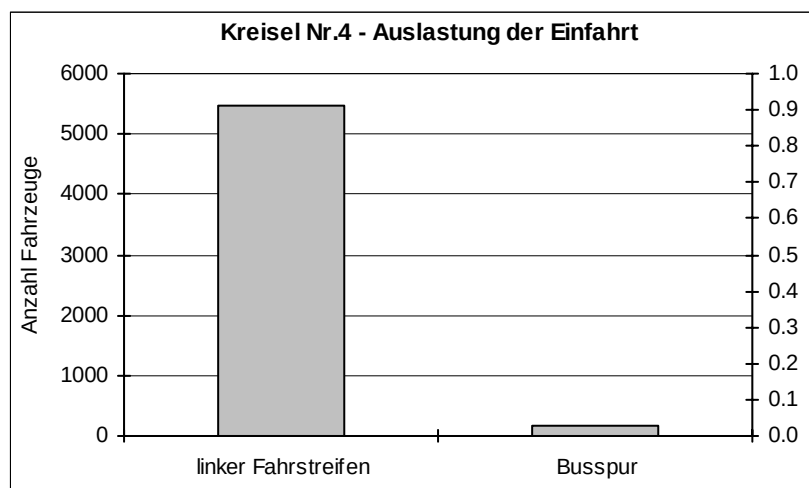
4

Emmenbrücke - *Sonnenplatz*

Ast 1: Sprengi

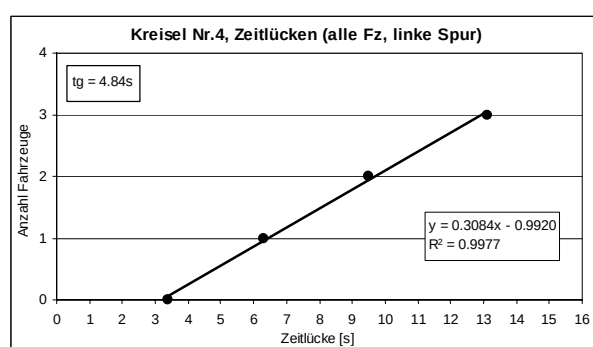
Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt



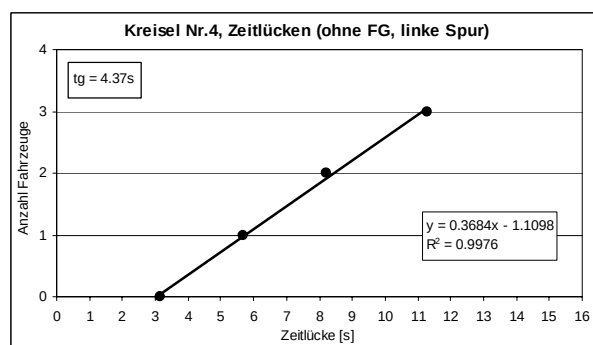


Grenz- und Folgezeitlücken

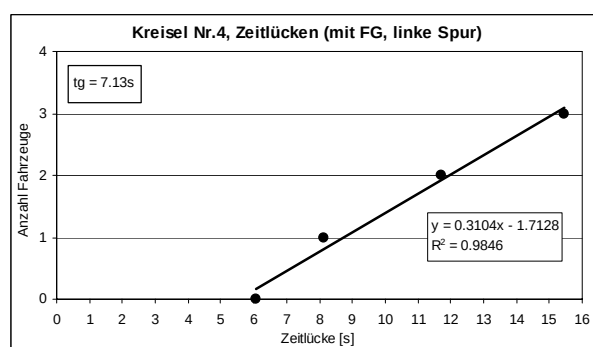
$n \leq 3$	alle Fz
$y = 0.3084x - 0.9920$	
$t_o = 3.217$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	6.459
Fz = 2	9.702
$t_f = 3.243$	
$t_f/2 = 1.621$	
$t_g = 4.838$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 1542	



$n \leq 3$	ohne FG
$y = 0.3684x - 1.1098$	
$t_o = 3.012$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.727
Fz = 2	8.441
$t_f = 2.714$	
$t_f/2 = 1.357$	
$t_g = 4.370$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 1122	



$n \leq 3$	mit FG
$y = 0.3104x - 1.7128$	
$t_o = 5.518$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	8.740
Fz = 2	11.961
$t_f = 3.222$	
$t_f/2 = 1.611$	
$t_g = 7.129$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 420	



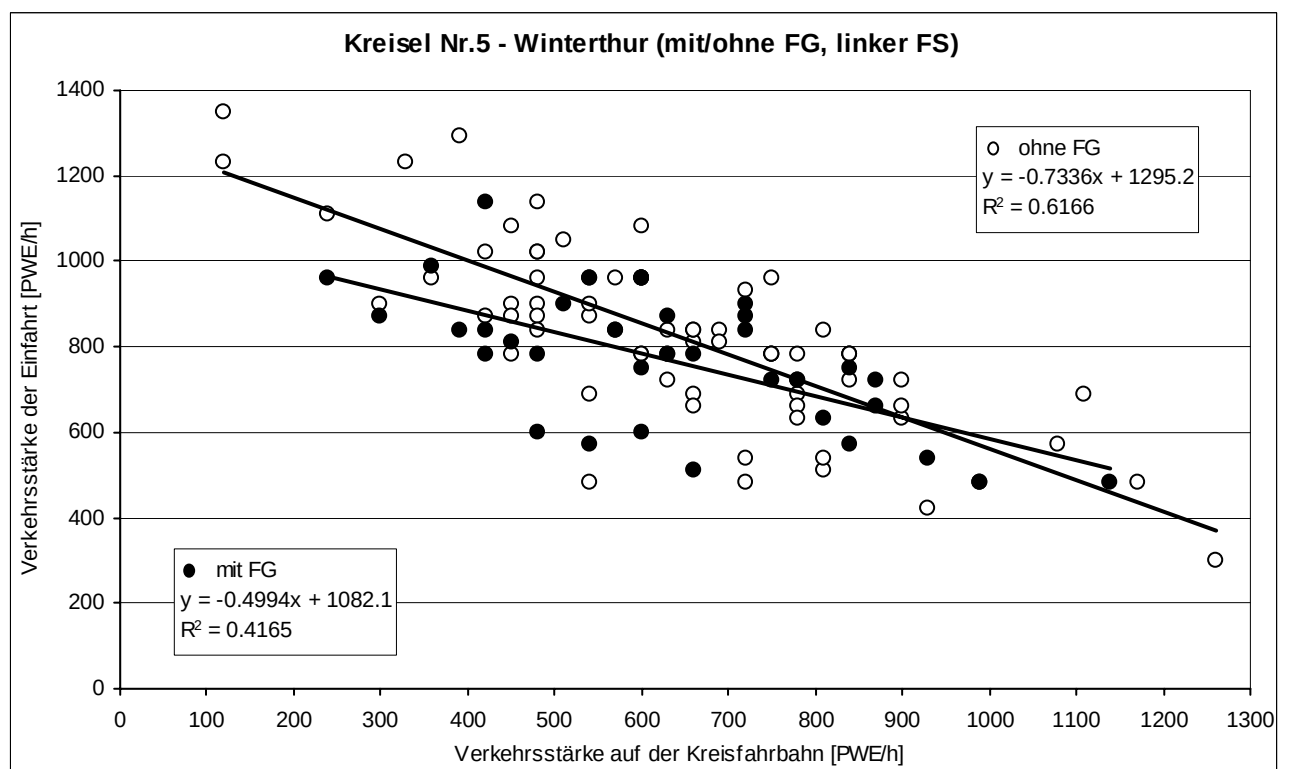
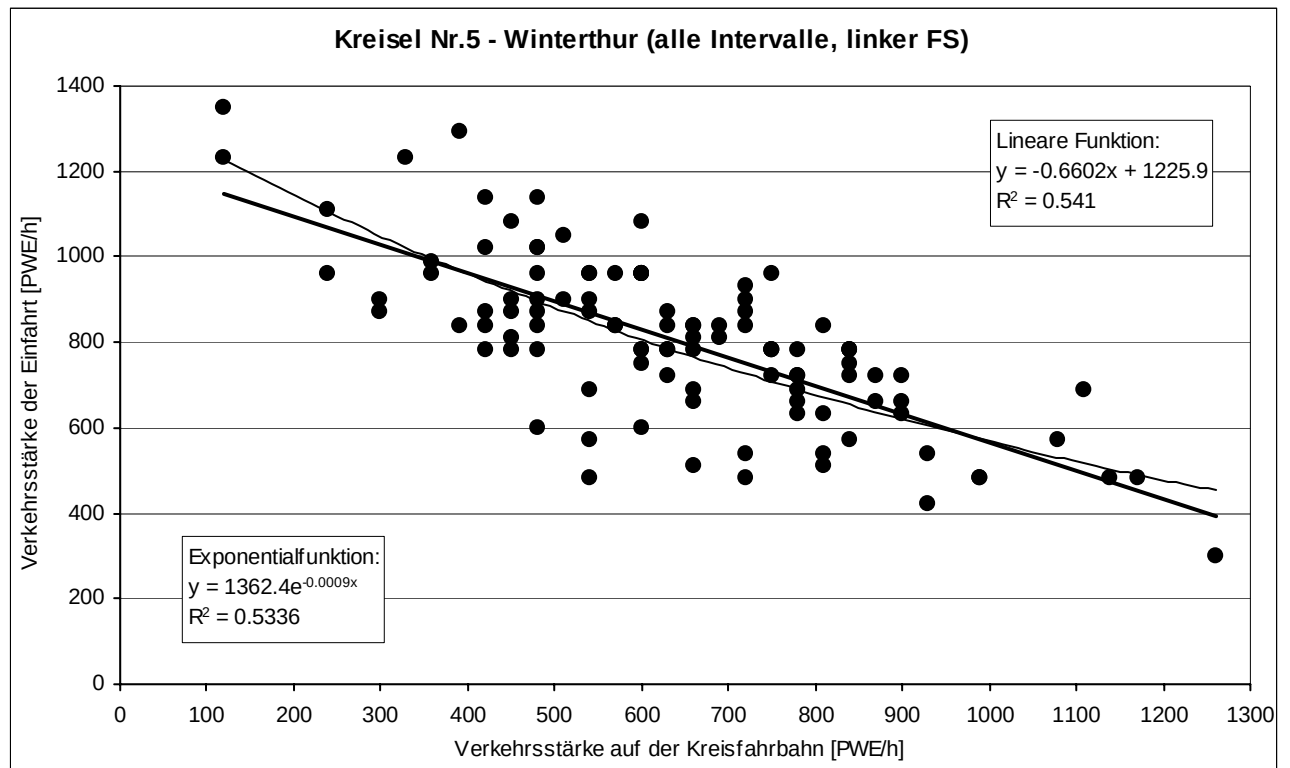
5

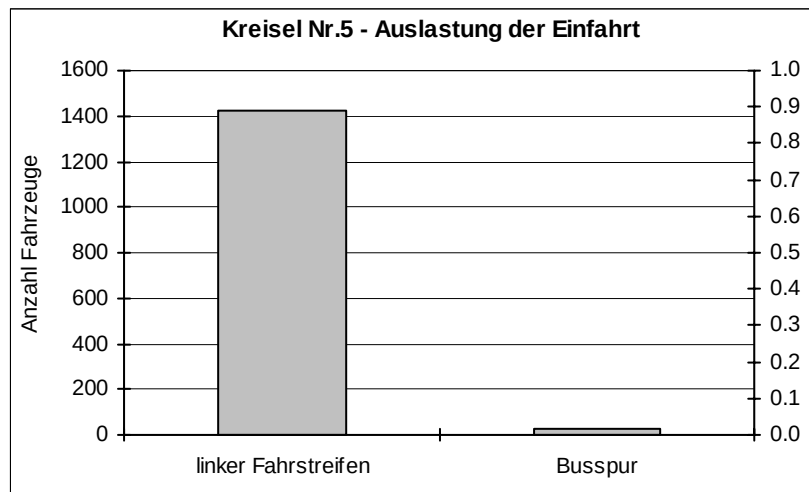
Winterthur – Seener-/Industriestrasse

Ast 1: Seenerstrasse-Nord

Ast 2: Industriestrasse-West

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt



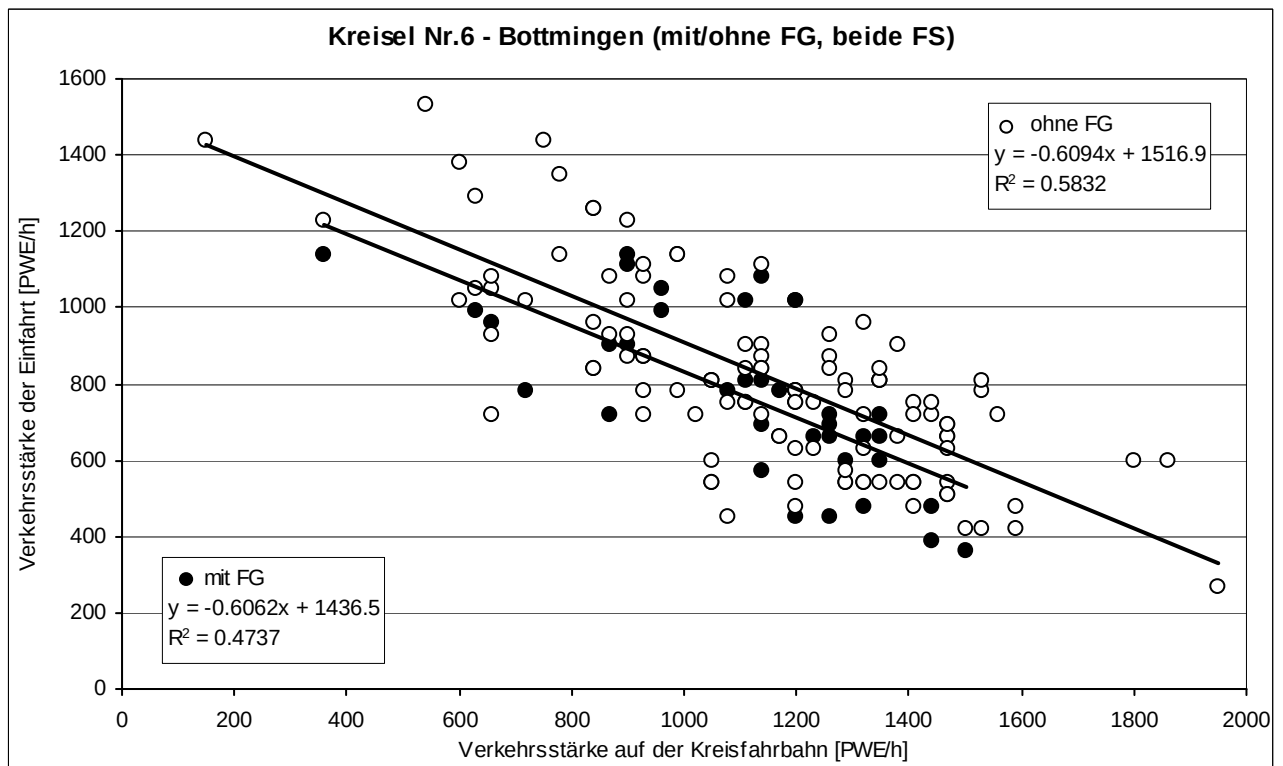
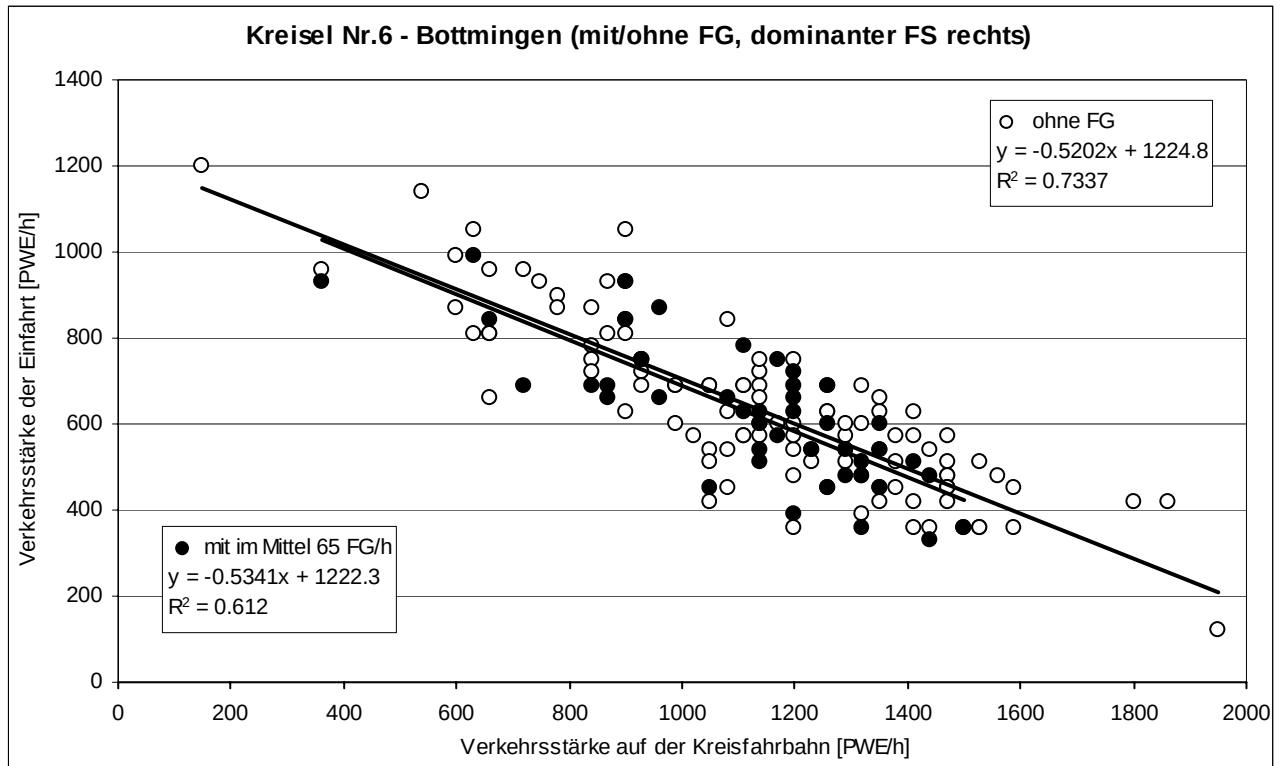


6 Bottmingen - *Mitteldorf*

Ast 1: Baslerstrasse

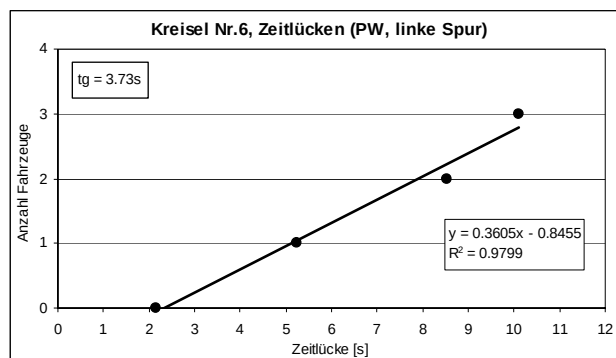
Ast 2: Bruderholzstrasse

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt

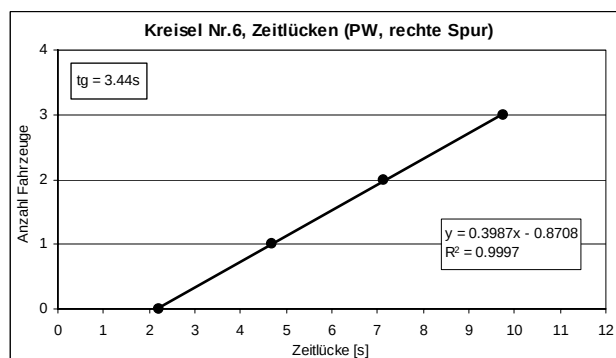


Grenz- und Folgezeitlücken

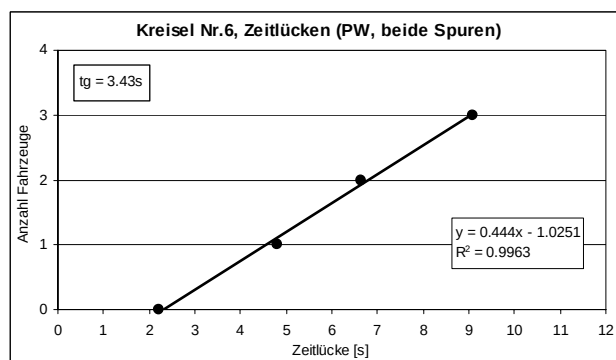
$n \leq 3$	PW links
$y = 0.3605x - 0.8455$	
$t_o = 2.345$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.119
Fz = 2	7.893
$t_f = 2.774$	
$t_f/2 = 1.387$	
$t_g = 3.732$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 568	



$n \leq 3$	PW rechts
$y = 0.3987x - 0.8708$	
$t_o = 2.184$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.692
Fz = 2	7.200
$t_f = 2.508$	
$t_f/2 = 1.254$	
$t_g = 3.438$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 1258	



$n \leq 3$	PW beide
$y = 0.4440x - 1.0251$	
$t_o = 2.309$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.561
Fz = 2	6.813
$t_f = 2.252$	
$t_f/2 = 1.126$	
$t_g = 3.435$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 1484	

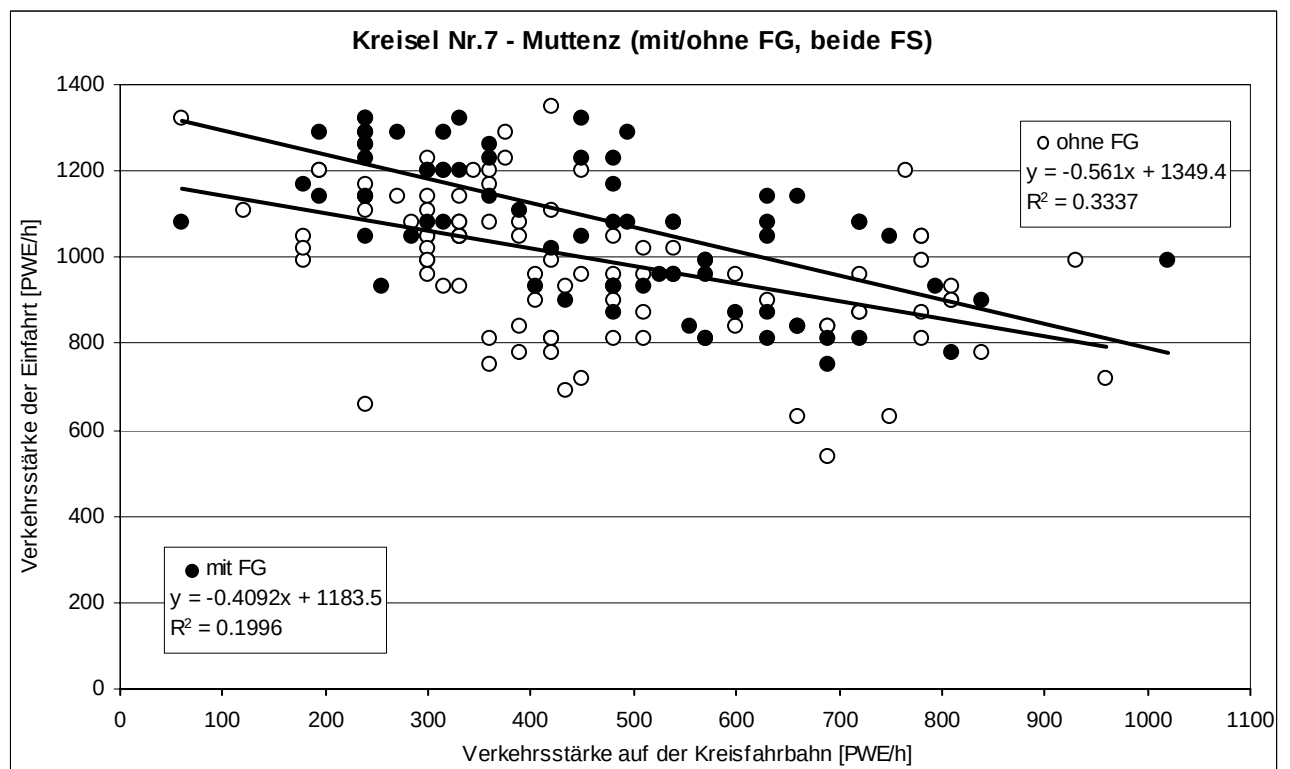
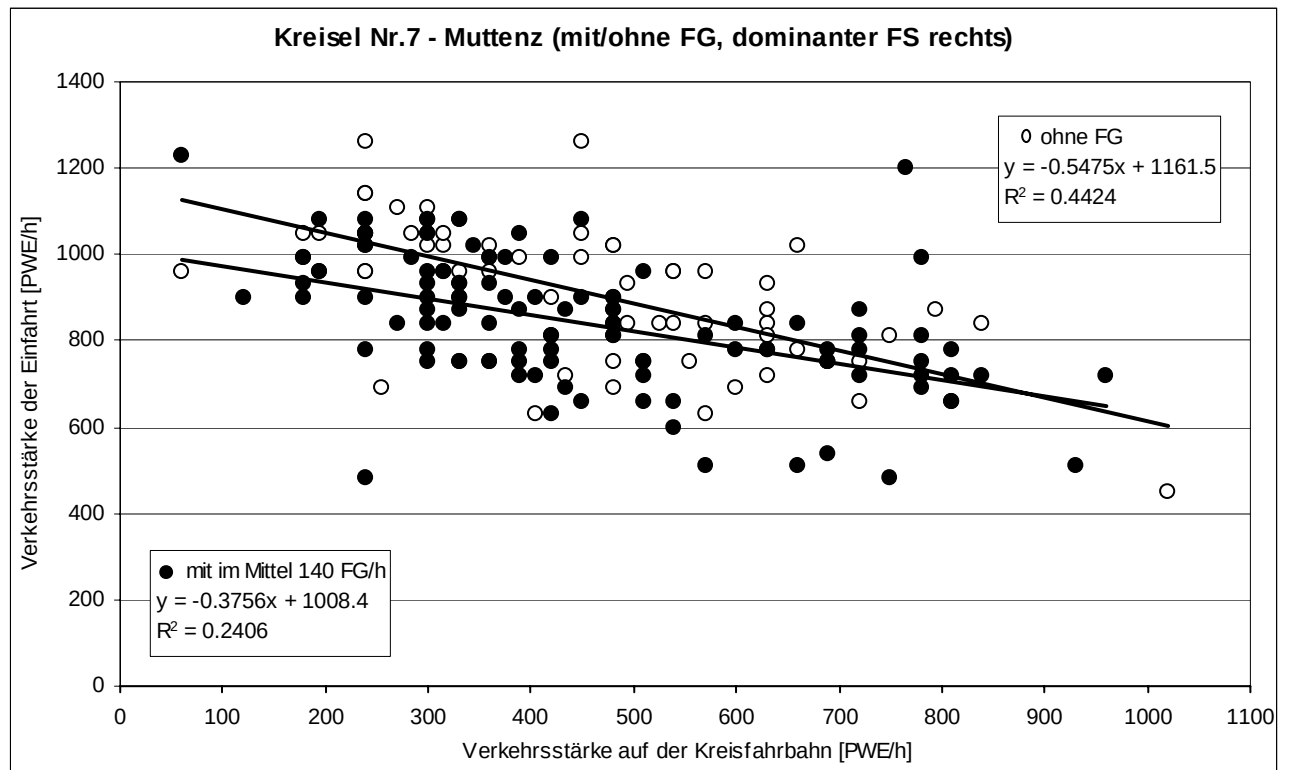


7 MuttENZ - Warteckplatz

Ast 1: St. Jakobstrasse

Ast 2: Prattelerstrasse

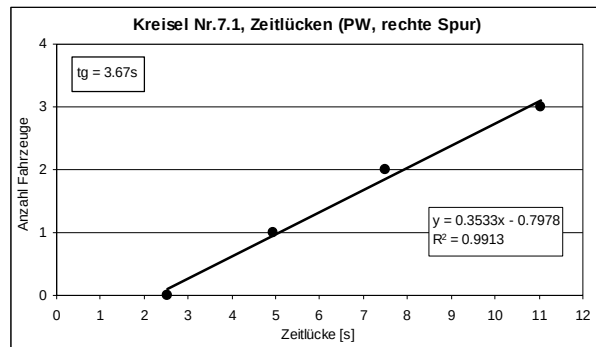
Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt



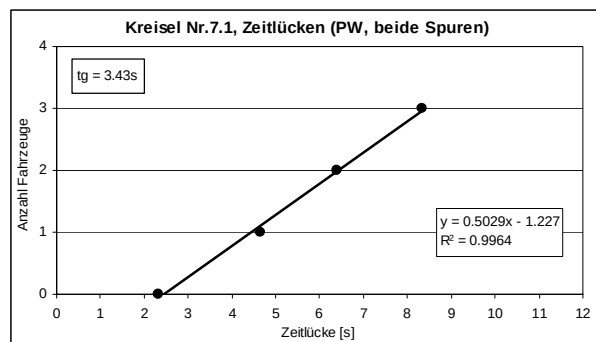
Grenz- und Folgezeitlücken

Einfahrt 7.1 „St. Jakobstrasse“

$n \leq 3$	PW rechts
$y = 0.3533x - 0.7978$	
$t_o = 2.258$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.089
Fz = 2	7.919
$t_f = 2.830$	
$t_f/2 = 1.415$	
$t_g = 3.673$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 600	

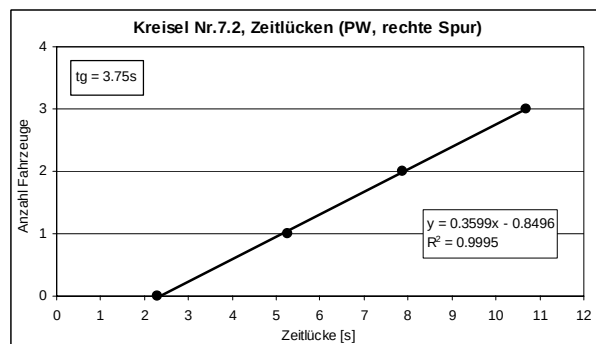


$n \leq 3$	PW beide
$y = 0.5029x - 1.2270$	
$t_o = 2.440$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.428
Fz = 2	6.417
$t_f = 1.988$	
$t_f/2 = 0.994$	
$t_g = 3.434$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 567	

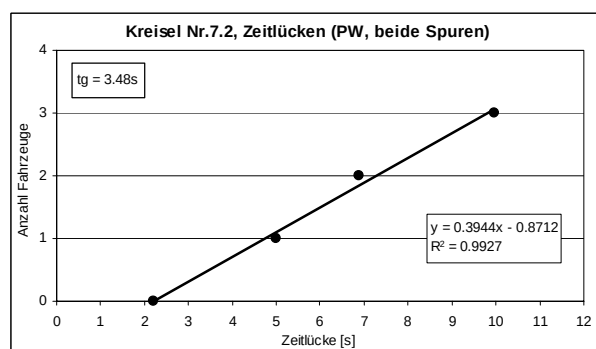


Einfahrt 7.2 „Prattelerstrasse“

$n \leq 3$	PW rechts
$y = 0.3599x - 0.8496$	
$t_o = 2.361$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.139
Fz = 2	7.918
$t_f = 2.779$	
$t_f/2 = 1.389$	
$t_g = 3.750$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 486	

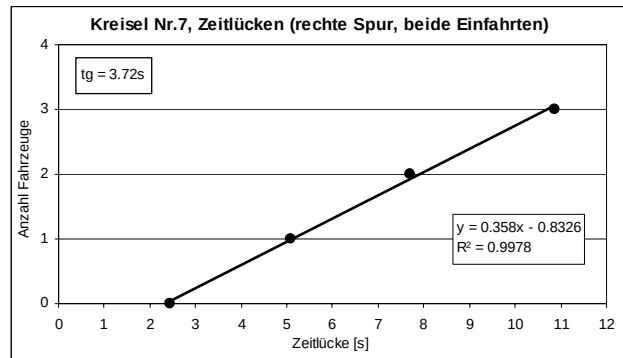


$n \leq 3$	PW beide
$y = 0.3944x - 0.8712$	
$t_o = 2.209$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.744
Fz = 2	7.280
$t_f = 2.535$	
$t_f/2 = 1.268$	
$t_g = 3.477$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 464	

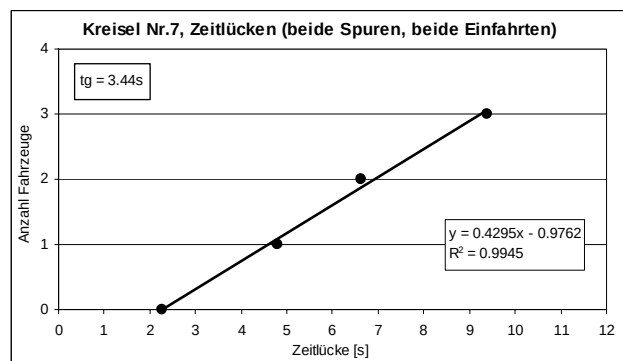


Beide Einfahrten:

$n \leq 3$	PW rechts
$y = 0.3580x - 0.8326$	
$t_o = 2.326$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.119
Fz = 2	7.912
$t_f = 2.793$	
$t_f/2 = 1.397$	
$t_g = 3.722$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 1086	

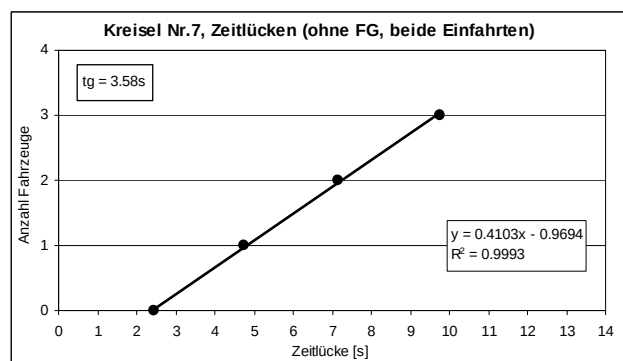


$n \leq 3$	PW beide
$y = 0.4295x - 0.9762$	
$t_o = 2.273$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.601
Fz = 2	6.929
$t_f = 2.328$	
$t_f/2 = 1.164$	
$t_g = 3.437$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 1042	

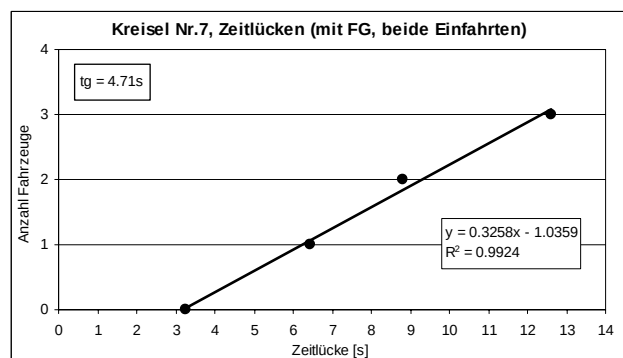


Fussgängereinfluss (beide Einfahrten):

ohne Fussgänger	
$n \leq 3$	PW
$y = 0.4103x - 0.9694$	
$t_o = 2.363$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.800
Fz = 2	7.237
$t_f = 2.437$	
$t_f/2 = 1.219$	
$t_g = 3.581$	



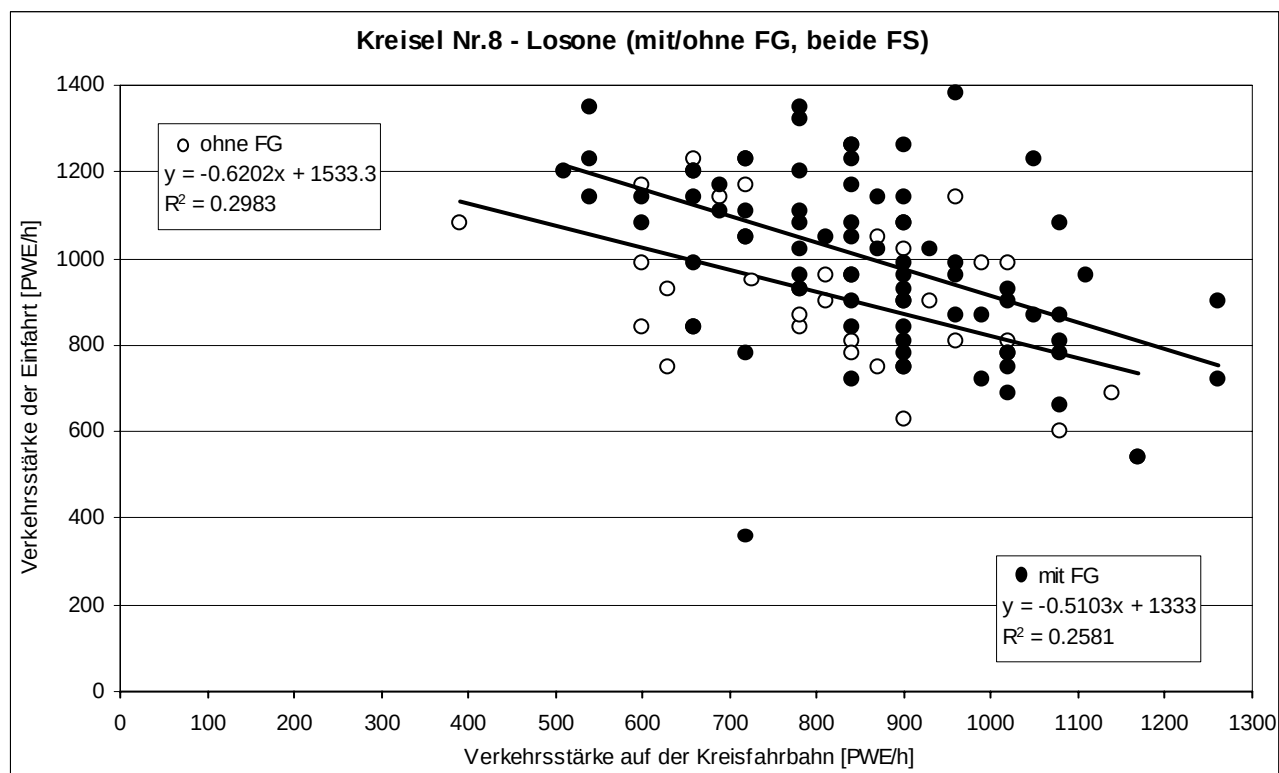
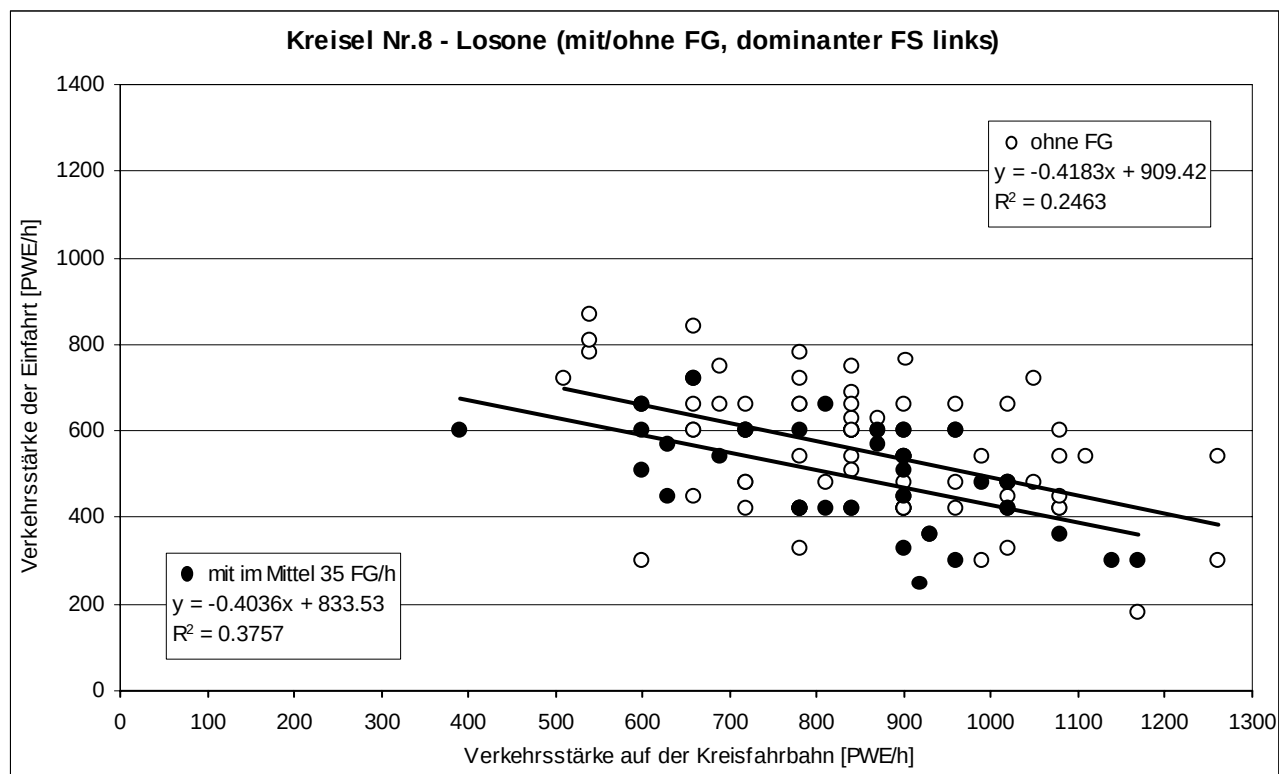
mit Fussgänger	
$n \leq 3$	PW
$y = 0.3258x - 1.0359$	
$t_o = 3.180$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	6.249
Fz = 2	9.318
$t_f = 3.069$	
$t_f/2 = 1.535$	
$t_g = 4.714$	



8 Losone – *Rotonda di Losone*

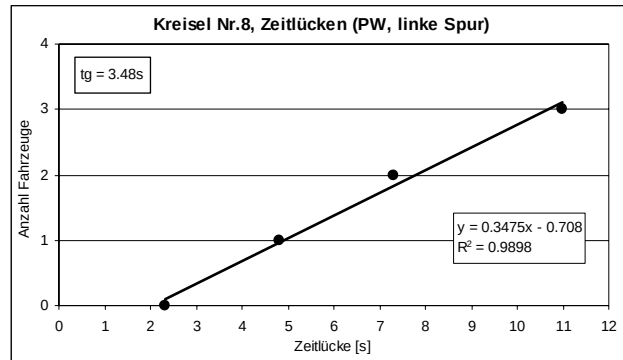
Ast 1: Centovalli

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt

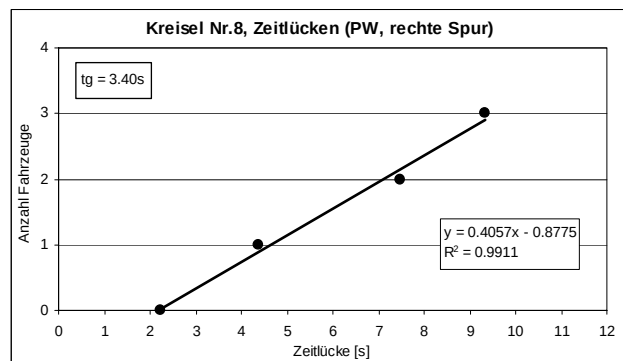


Grenz- und Folgezeitlücken

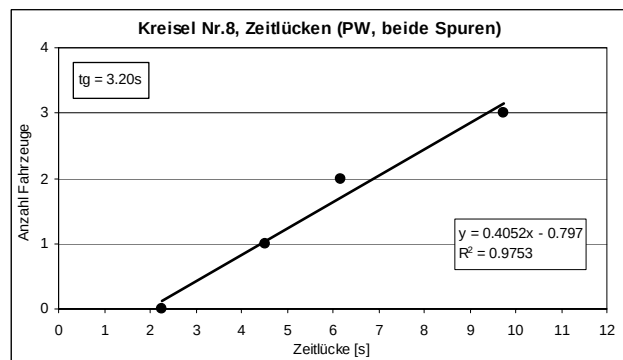
$n \leq 3$	PW links
$y = 0.3475x - 0.7080$	
$t_o = 2.037$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.915
Fz = 2	7.793
$t_f = 2.878$	
$t_f/2 = 1.439$	
$t_g = 3.476$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 898	



$n \leq 3$	PW rechts
$y = 0.4057x - 0.8775$	
$t_o = 2.163$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.628
Fz = 2	7.093
$t_f = 2.465$	
$t_f/2 = 1.232$	
$t_g = 3.395$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 470	



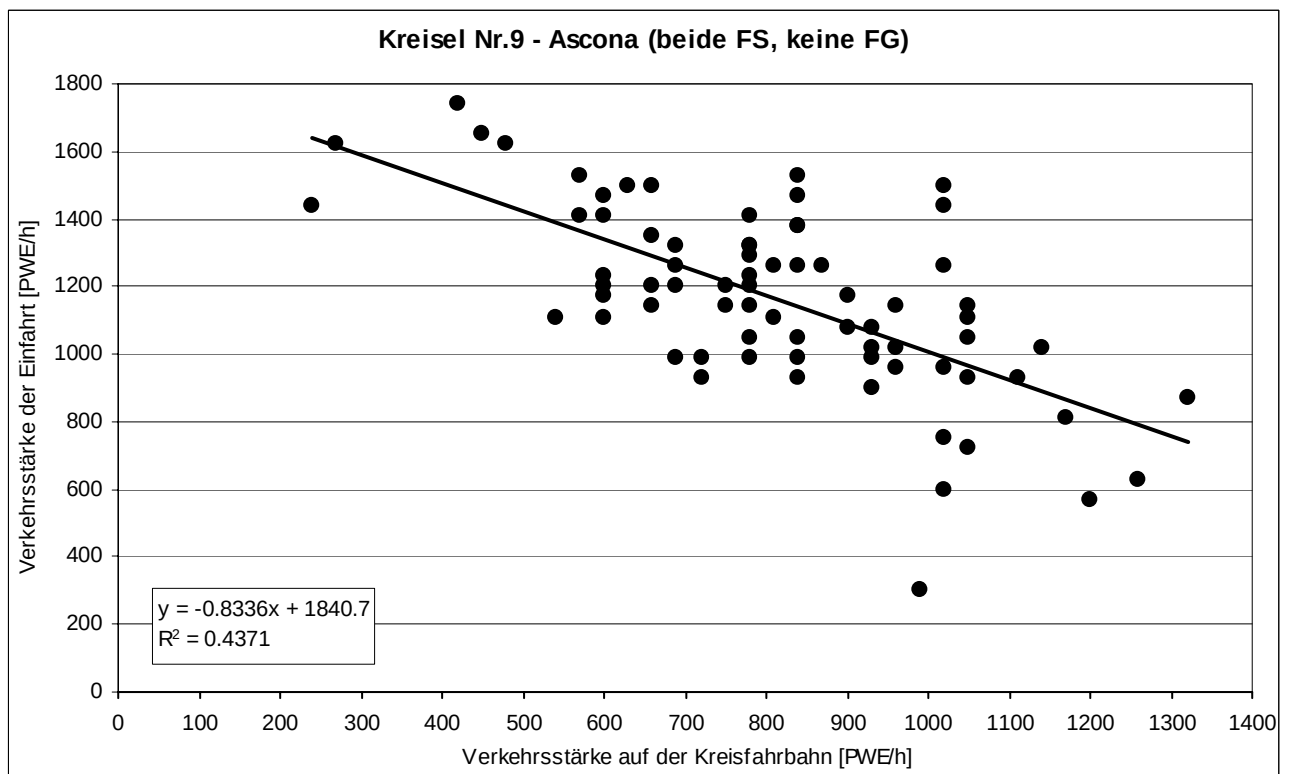
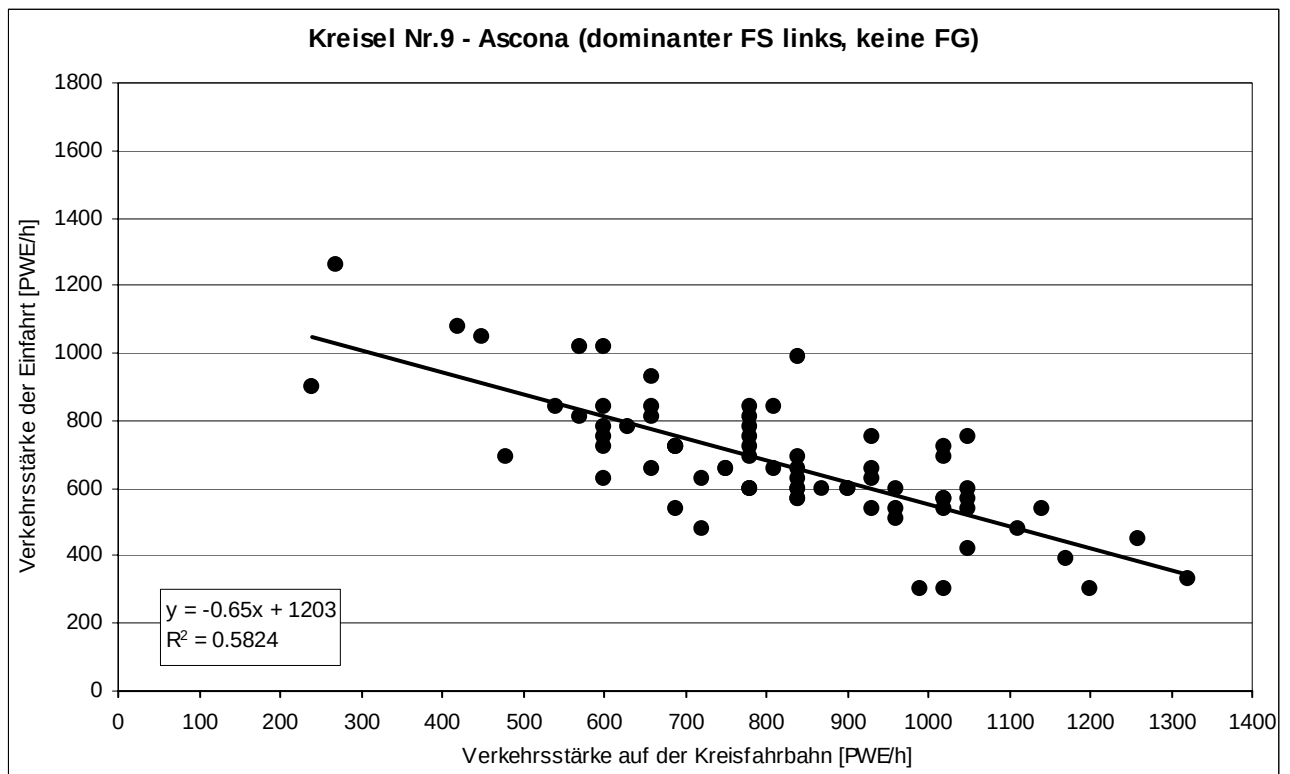
$n \leq 3$	PW beide
$y = 0.4052x - 0.7970$	
$t_o = 1.967$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.435
Fz = 2	6.903
$t_f = 2.468$	
$t_f/2 = 1.234$	
$t_g = 3.201$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 978	



9 Ascona – S. Materino

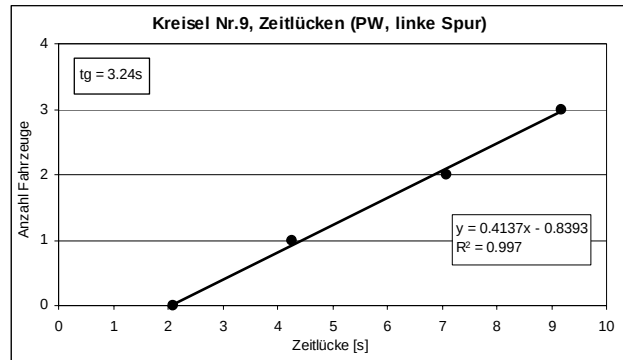
Ast 1: Locarno

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt

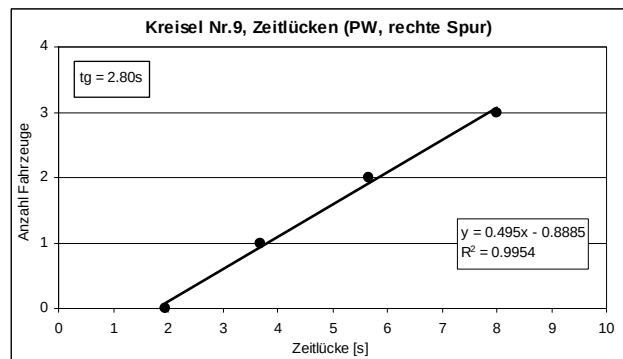


Grenz- und Folgezeitlücken

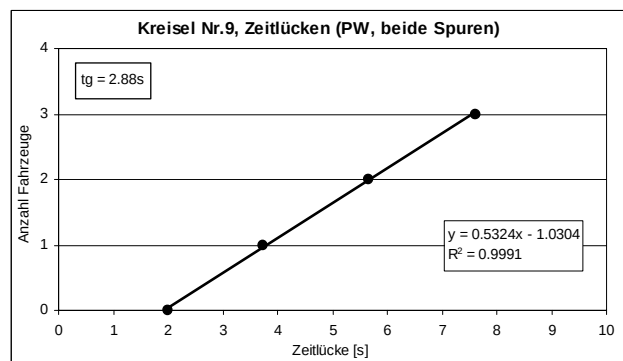
$n \leq 3$	PW links
$y = 0.4137x - 0.8393$	
$t_o = 2.029$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	4.446
Fz = 2	6.863
$t_f = 2.417$	
$t_f/2 = 1.209$	
$t_g = 3.237$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 478	



$n \leq 3$	PW rechts
$y = 0.4950x - 0.8885$	
$t_o = 1.795$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	3.815
Fz = 2	5.835
$t_f = 2.020$	
$t_f/2 = 1.010$	
$t_g = 2.805$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 367	



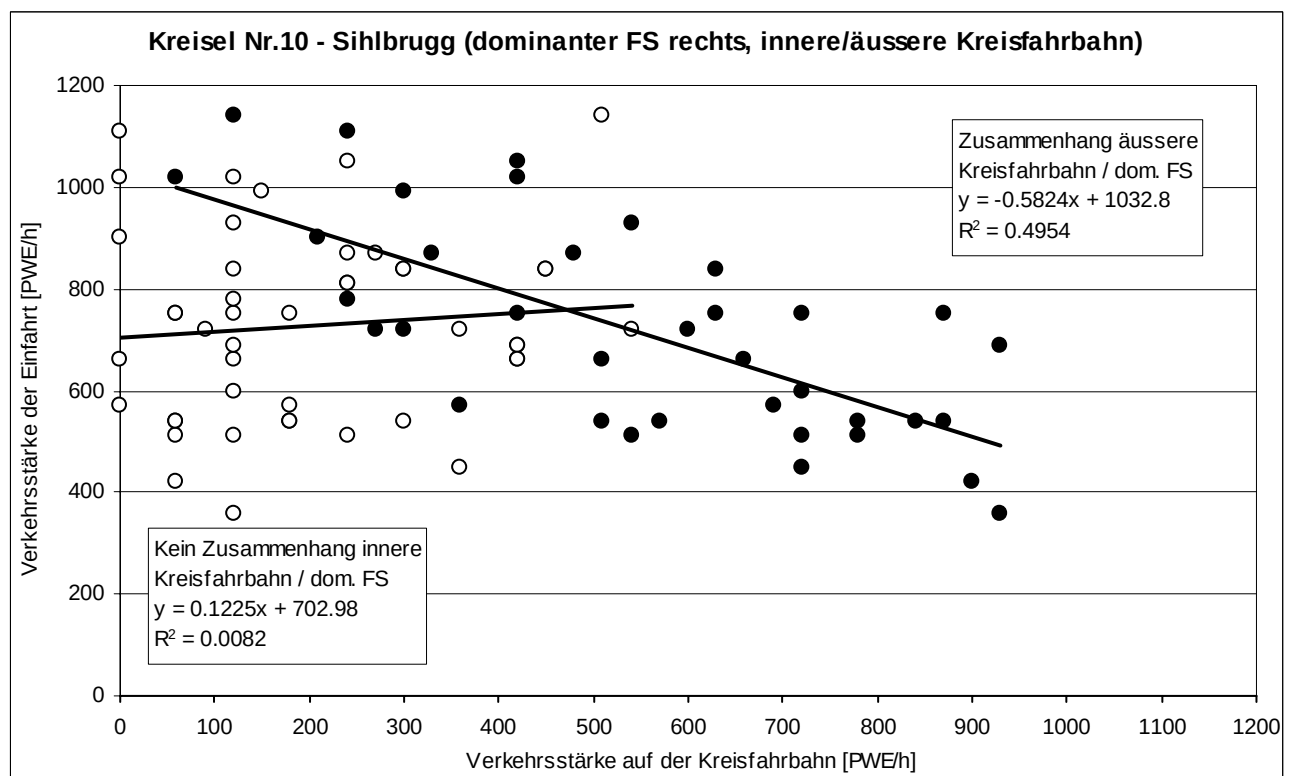
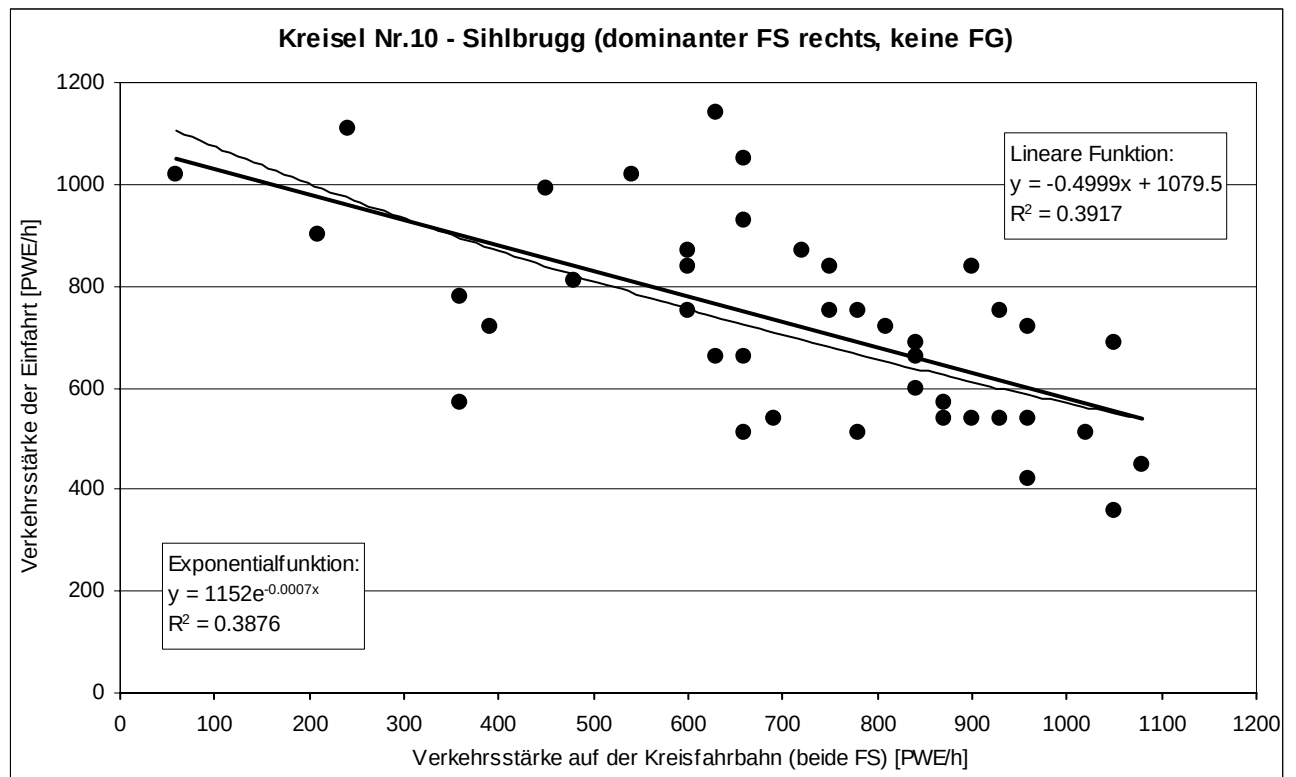
$n \leq 3$	PW beide
$y = 0.5324x - 1.0304$	
$t_o = 1.935$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	3.814
Fz = 2	5.692
$t_f = 1.878$	
$t_f/2 = 0.939$	
$t_g = 2.875$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 554	



10 Sihlbrugg – Kreisel Sihlbrugg

Ast 1: Zürich

Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt



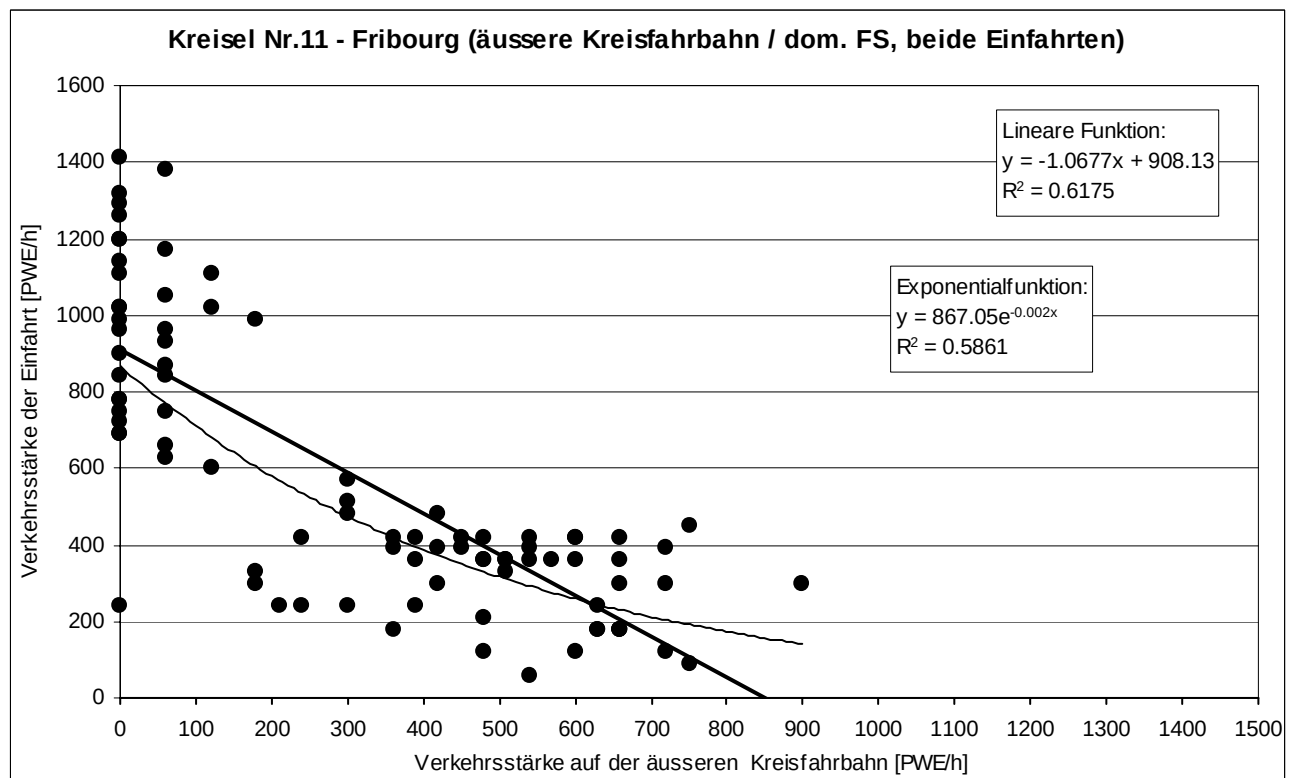
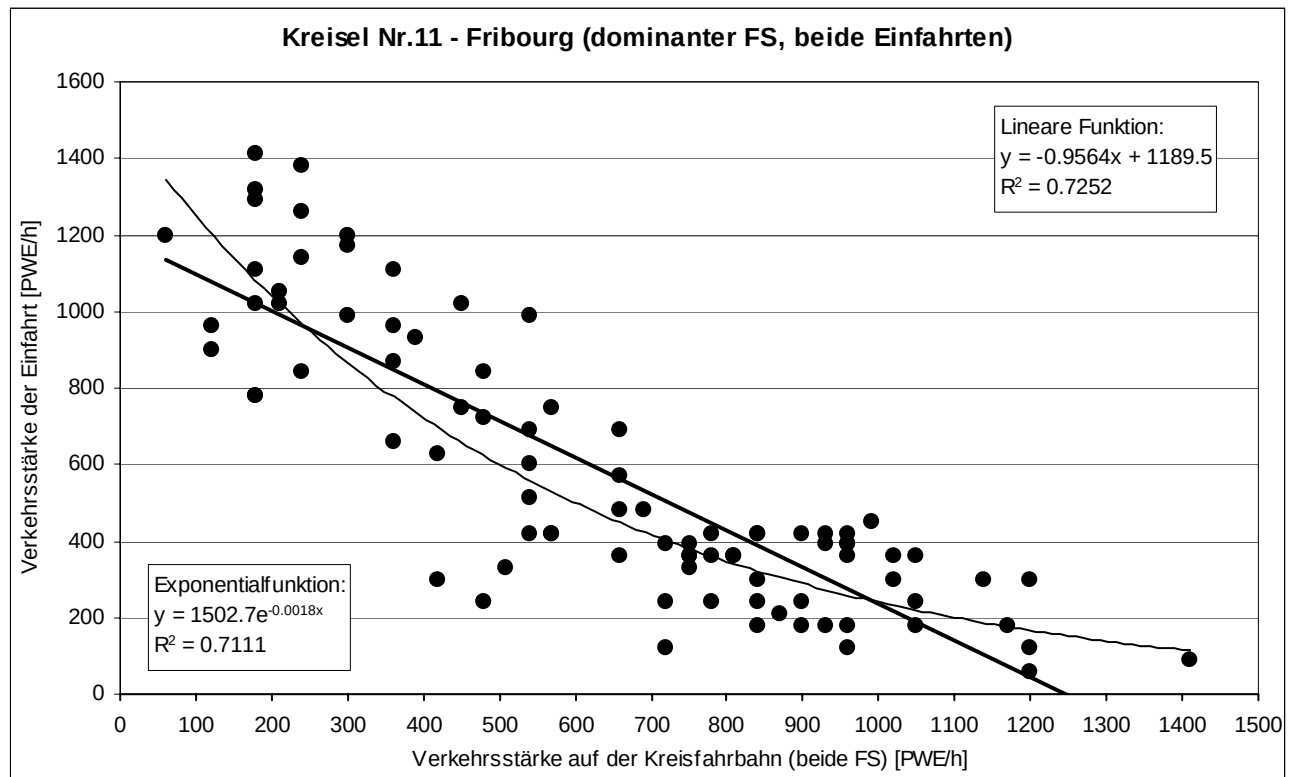
11

Fribourg – *Giratoire du Bois des Morts*

Ast 1: Autobahn

Ast 2: Fribourg

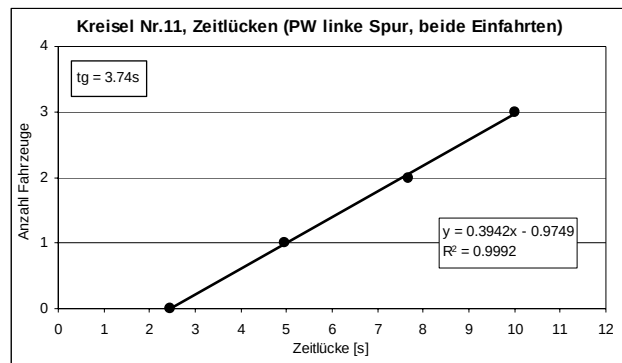
Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke auf der Kreisfahrbahn und in der Einfahrt



Grenz- und Folgezeitlücken

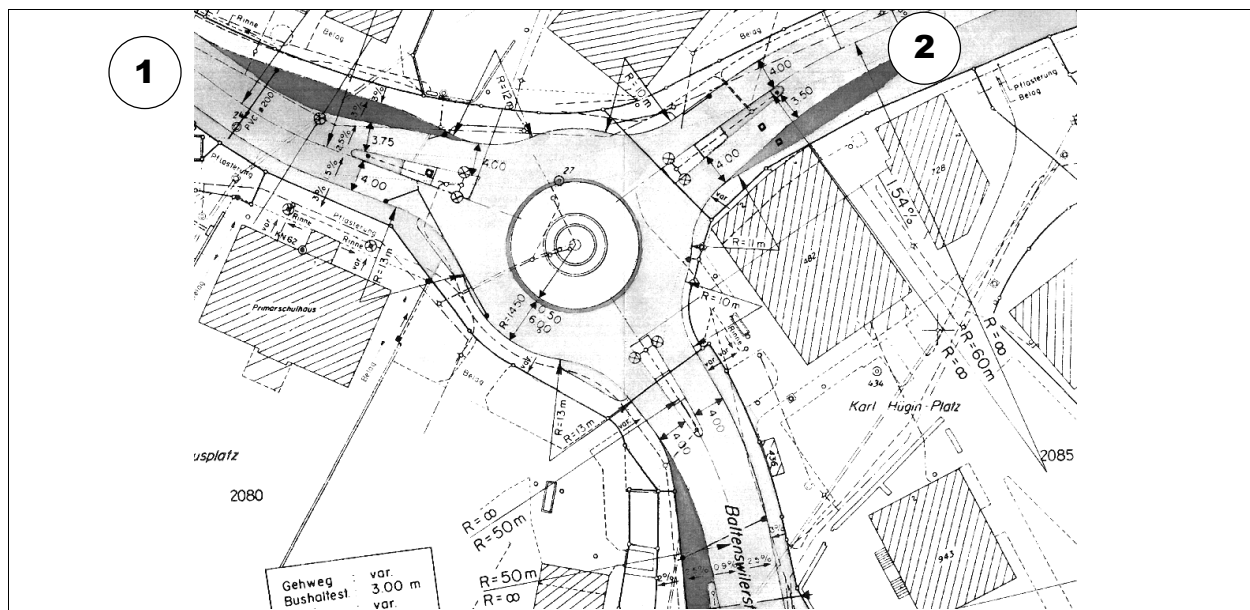
Beide Einfahrten:

$n \leq 3$	PW links
$y = 0.3942x - 0.9749$	
$t_o = 2.473$	
$t_g = t_o + t_f/2$	
Y	X
Fz = 1	5.010
Fz = 2	7.547
$t_f = 2.537$	
$t_f/2 = 1.268$	
$t_g = 3.742$	
Anzahl beobachteter Zeitlücken = 261	



1	Bassersdorf - Löwenkreuzung	Ast 1: Klotenerstrasse Ast 2: Winterthurerstrasse
---	-----------------------------	--

Situation



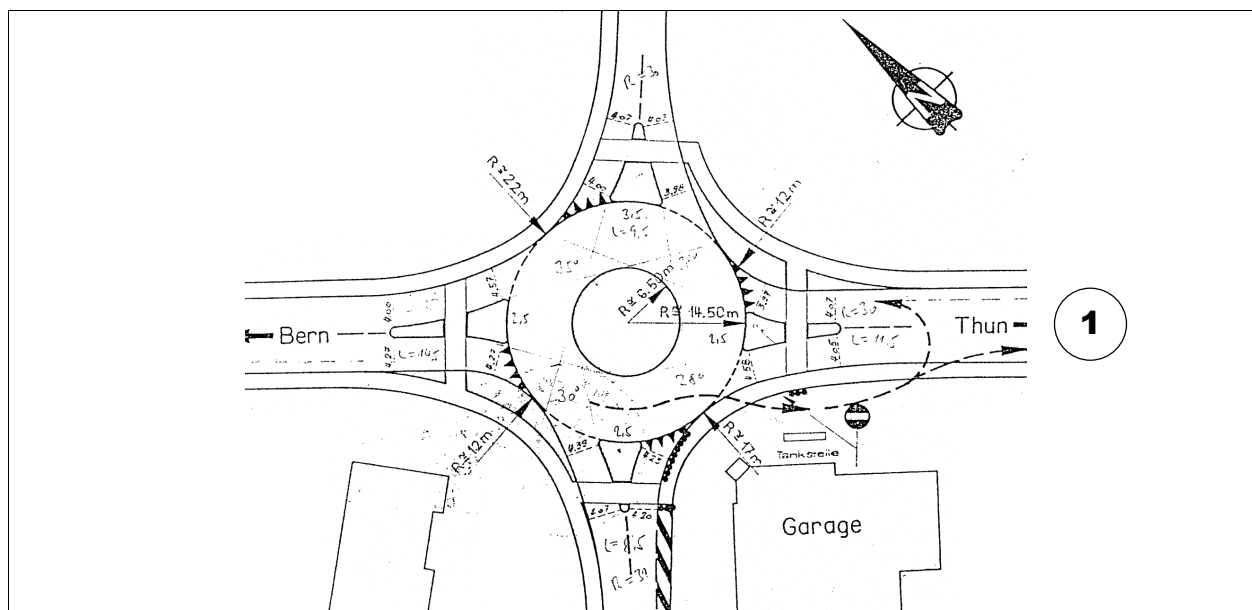
Geometrie

Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	29	kreisrund	1	6.0	0.50

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Klotenerstr.	1 / 1	4.0 / 4.0	ja	nein	nein / ja
2: Winterthurerstr.	1 / 1	4.0 / 4.0	ja	nein	nein / ja

2 Steffisburg - *Stuckikreuzung*

Ast 1: Richtung Thun

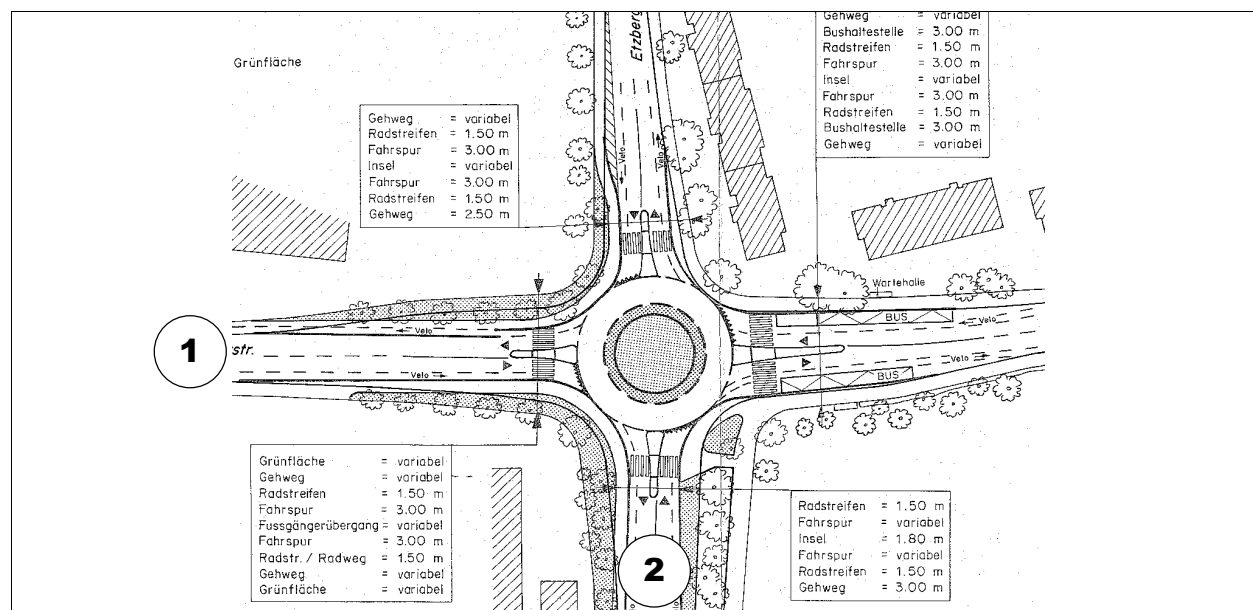
Situation**Geometrie**

Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	29	kreisrund	1	8.0	ohne

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Richtung Thun	1 / 1	4.0 / 4.0	ja	nein	nein / nein

3	Winterthur – Seener-/Grüzefeldstrasse	Ast 1: Seenerstrasse-Nord Ast 2: Grüzefeldstrasse-West
---	---------------------------------------	---

Situation



Geometrie

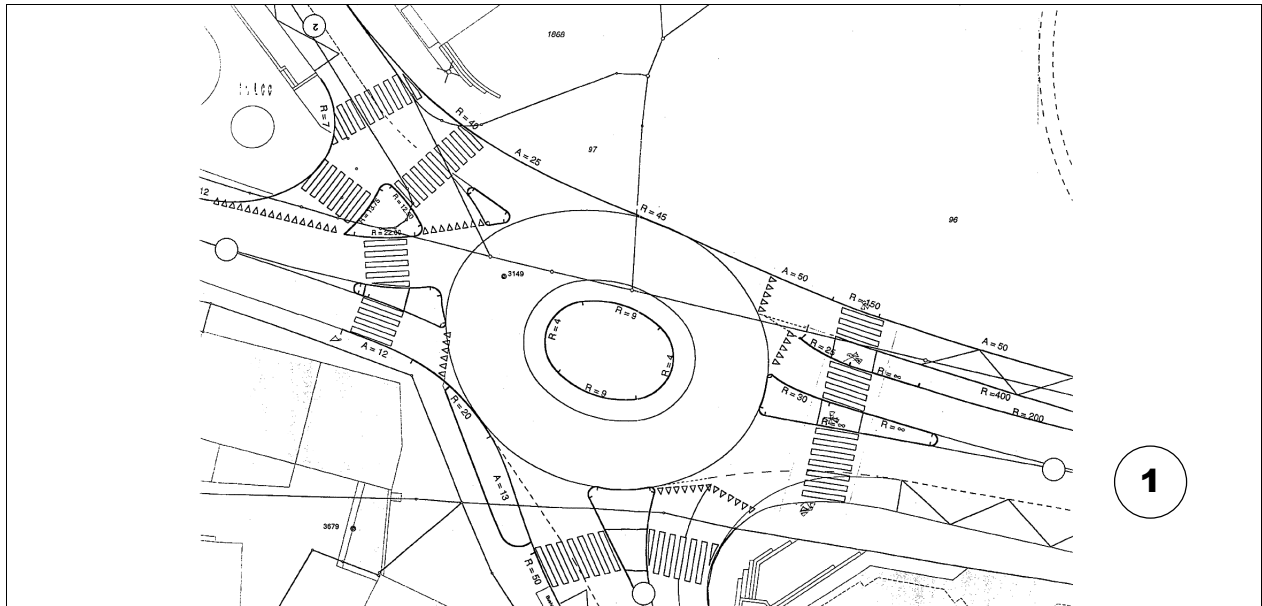
Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreis- fahrbahn [m]	Innenring
	35	kreisrund	1	6.0	2.50

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Seenerstr. Nord	1 / 1	3.0 + 1.5 Velo	ja	nein	nein / nein
2: Grüzefeldstr. W.	1 / 1	3.0 + 1.5 Velo	ja	nein	nein / nein

4 Emmenbrücke - *Sonnenplatz*

Ast 1: Sprengi

Situation



Geometrie

Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	31 / 26	oval	1	6.0	2.50

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Sprengi	1 + Bus / 1	4.0 / 4.0 + Bus	ja	ja	ja / ja

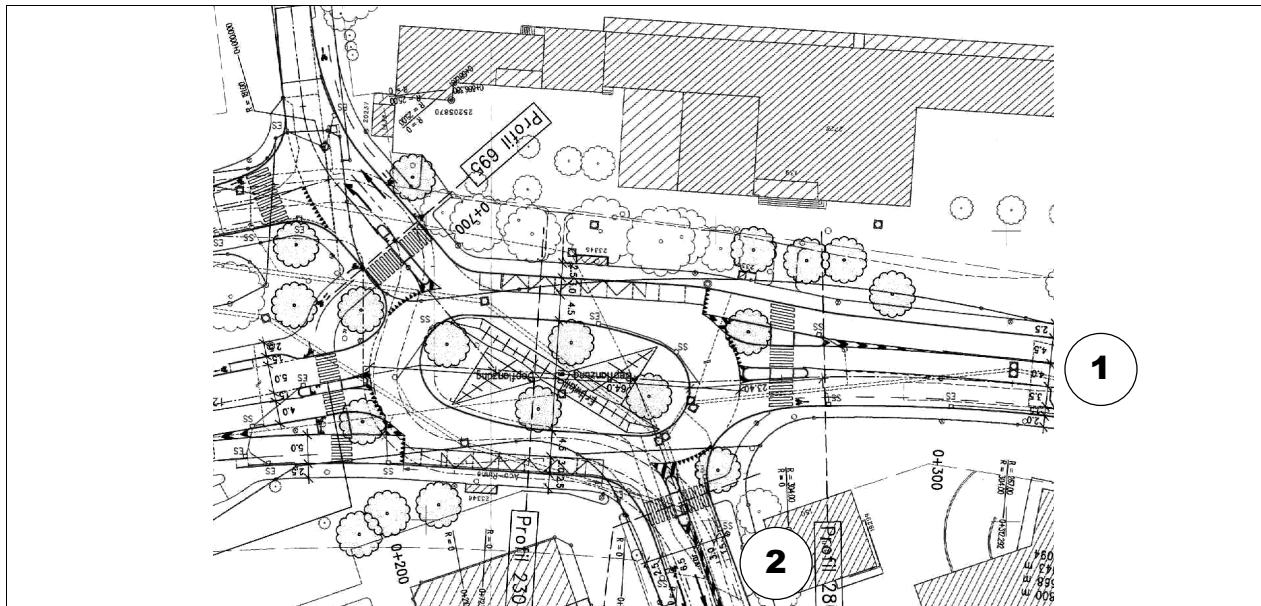
5

Winterthur – Seener-/Industriestrasse

Ast 1: Seenerstrasse-Nord

Ast 2: Industriestrasse-West

Situation



Geometrie

Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	28 - 64	oval	1	4.5 – 9.0 + 3.0 Bus	ohne

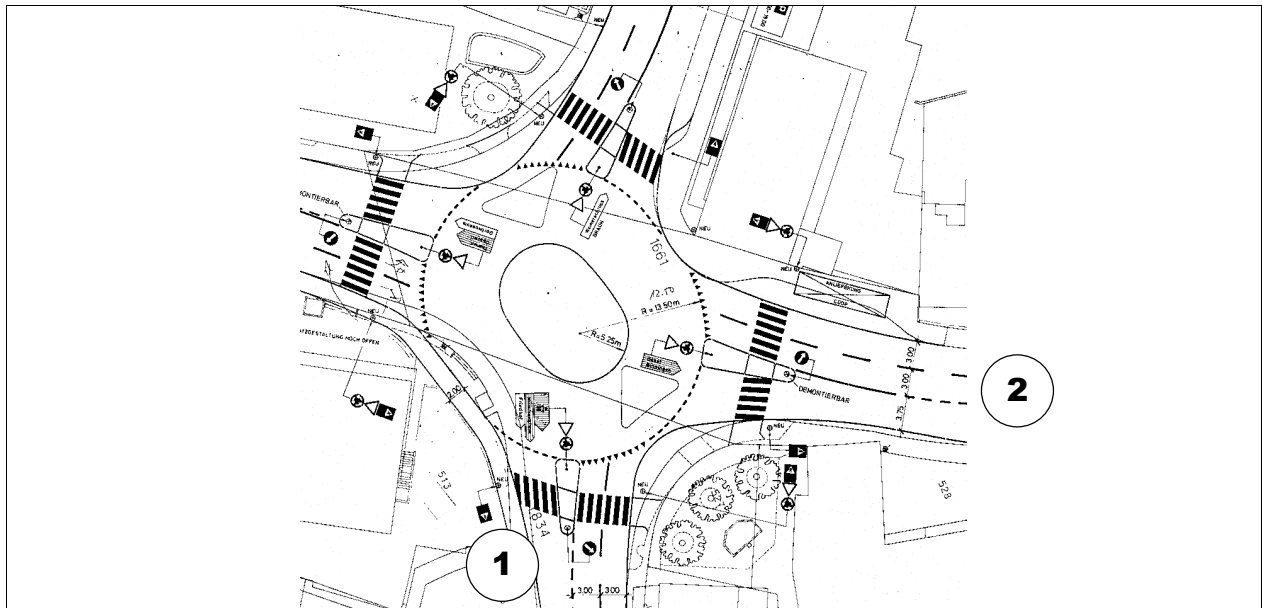
Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Seenerstr. Nord	1 + Bus / 1	3.0 + 1.5 Velo / 3.5 + 1.5 Velo	ja	ja	nein / nein
2: Industriestr. W.	1 / 1	4.0 + 4.5 Bus / 3.5 + 1.5 Velo	ja	nein	nein / nein

6 Bottmingen - Mitteldorf

Ast 1: Baslerstrasse

Ast 2: Bruderholzstrasse

Situation



Geometrie

Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	27 - 33	oval	1	8.0	ohne

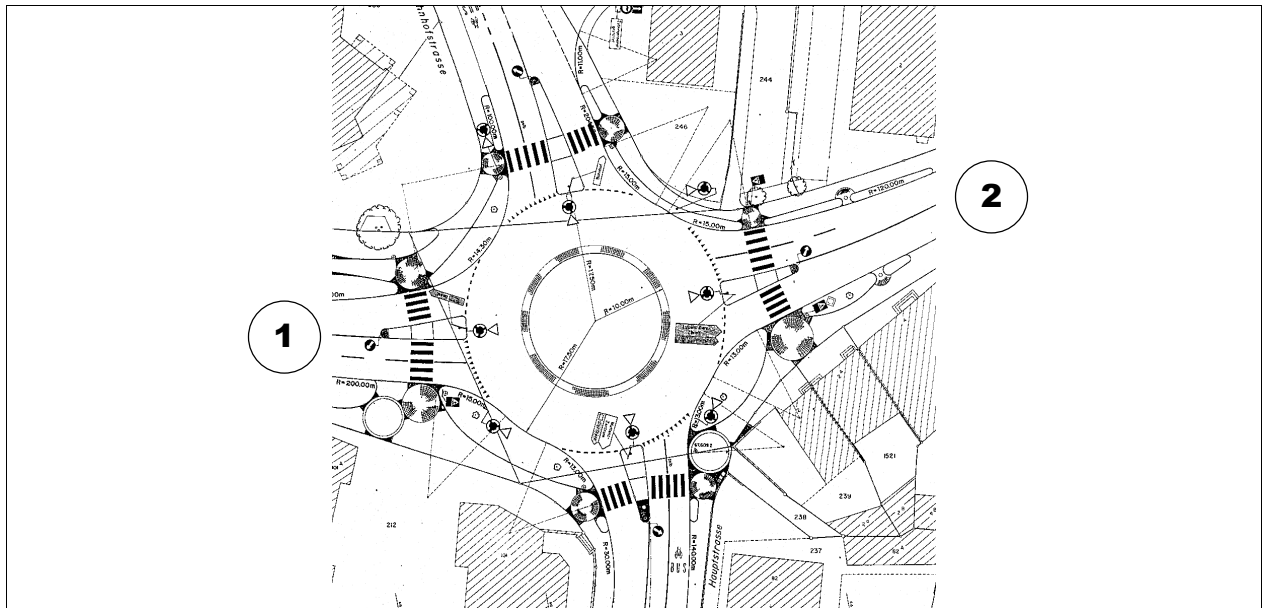
Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Bruderholzstr.	2 / 1	2 x 3.0 / 4.0	ja	nein	nein / nein
2: Baslerstr.	2 / 1	2 x 3.0 / 4.0	ja	nein	nein / nein

7 MuttENZ - Warteckplatz

Ast 1: St. Jakobstrasse

Ast 2: Prattelerstrasse

Situation



Geometrie

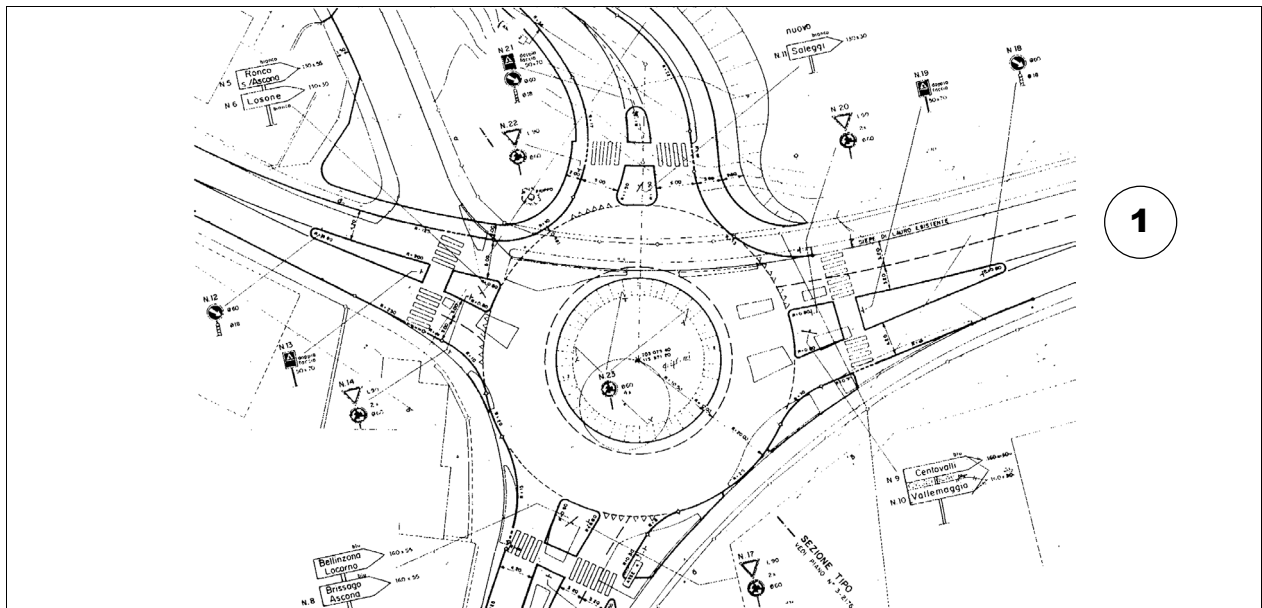
Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	35	kreisrund	1	8.0	1.50

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: St. Jakobstr.	2 / 1	2 x 3.0 / 4.5	ja	nein	nein / nein
2: Prattelerstr.	2 / 1	2 x 3.0 / 4.5	ja	nein	nein / nein

8 Losone – *Rotonda di Losone*

Ast 1: Centovalli

Situation



Geometrie

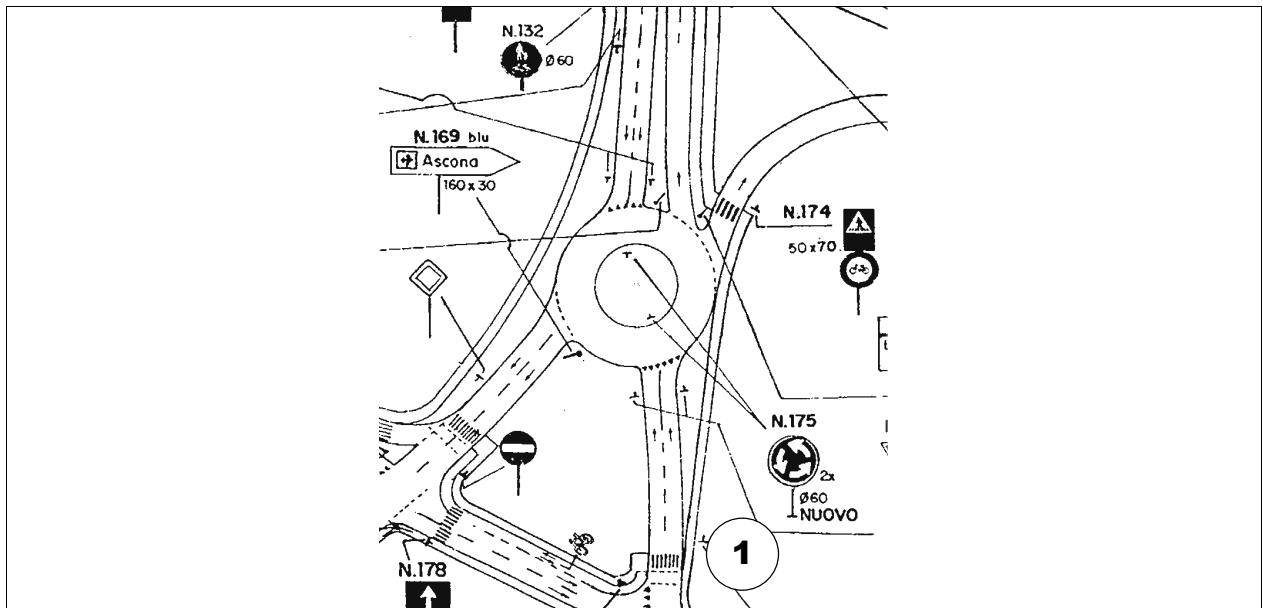
Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	40	kreisrund	1	8.0	1.50

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Centovalli	2 / 1	2 x 3.0 / 5.0	ja	nein	ja / ja

9 Ascona – S. Materino

Ast 1: Locarno

Situation



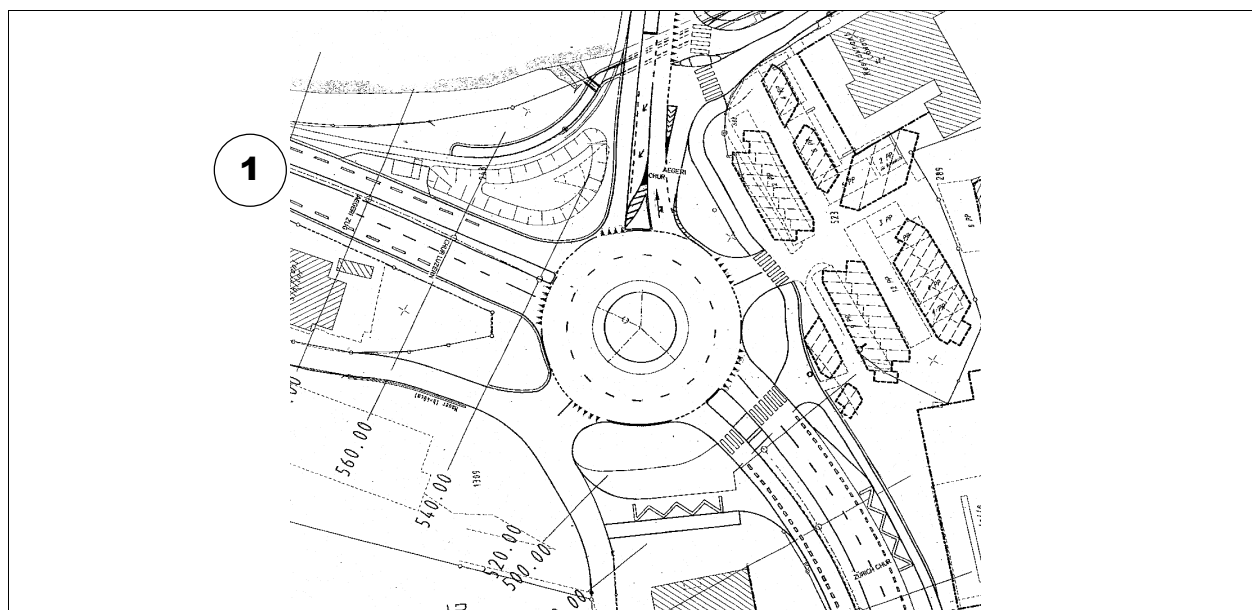
Geometrie

Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	35	kreisrund	1	8.0	1.50

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Locarno	2 / 1	2 x 3.5 / 3.5	nein	nein	nein / nein

10 Sihlbrugg – *Kreisel Sihlbrugg*

Ast 1: Zürich

Situation**Geometrie**

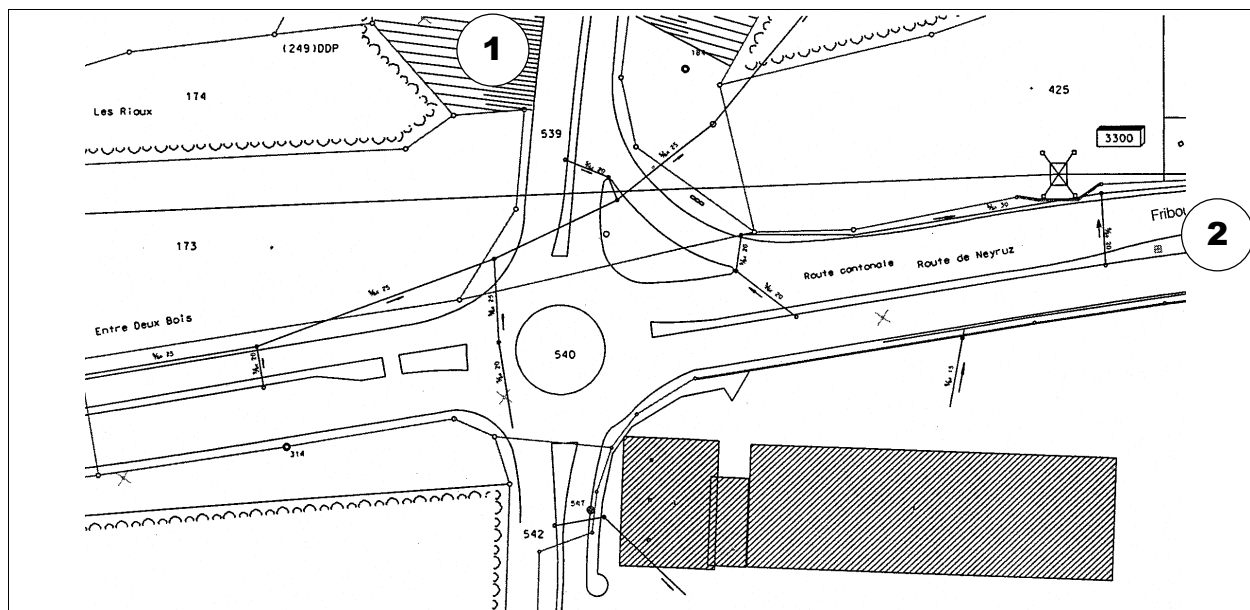
Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	42	kreisrund	2	2 x 5,50	2,50

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Zürich	2 / 1	2 x 4,25 / 5,00	nein	nein	nein / nein

11 Fribourg – *Giratoire du Bois des Morts*

Ast 1: Autobahn

Ast 2: Fribourg

Situation**Geometrie**

Kreisel	Durchmesser [m]	Form	Anzahl Fahrstreifen	Breite Kreisfahrbahn [m]	Innenring
	32	kreisrund	2	2 x 4,50	ohne

Ein-/Ausfahrt	Anzahl Fahrstreifen	Breite [m]	Fussgängerstreifen	Busspur	Haltestelle
1: Autobahn	2 / 1	2 x 3,0 / 4,0	nein	nein	nein / nein
2: Fribourg	2 + Bypass / 1	2 x 3,0 / 4,0	nein	nein	nein / nein

Zusammenstellung der Ergebnisse der Regressionsanalysen

Typ	Gruppe	Ansatz	Freiheitsgrad (n-2)	Bestimmtheits- mass ($B = R^2$)	F-Wert	F(F) = 0.95
1/1	alle Intervalle	linear	183	0.52	201	3.89
	ohne FG	linear	149	0.54	174	3.90
	mit FG	linear	32	0.52	35	4.15
	alle Intervalle	exponentiell	183	0.54	216	3.89
	ohne FG	exponentiell	149	0.54	179	3.90
	mit FG	exponentiell	32	0.58	45	4.15
1+B/1	alle Intervalle	linear	104	0.54	122	3.94
	ohne FG	linear	68	0.61	109	3.98
	mit FG	linear	34	0.42	24	4.13
	alle Int.	exponentiell	104	0.53	118	3.94
	ohne FG	exponentiell	68	0.59	99	3.98
	mit FG	exponentiell	34	0.42	25	4.13
2/1	ohne FG (beide Streifen)	linear	341	0.46	299	3.87
	mit FG (beide Streifen)	linear	158	0.46	136	3.90
	ohne FG (dom. Streifen)	linear	341	0.54	403	3.87
	mit FG (dom. Streifen)	linear	158	0.49	154	3.90
	ohne FG (beide Streifen)	exponentiell	341	0.49	322	3.87
	mit FG (beide Streifen)	exponentiell	158	0.48	148	3.90
	ohne FG (dom. Streifen)	exponentiell	341	0.50	341	3.87
	mit FG (dom. Streifen)	exponentiell	158	0.49	152	3.90

Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken

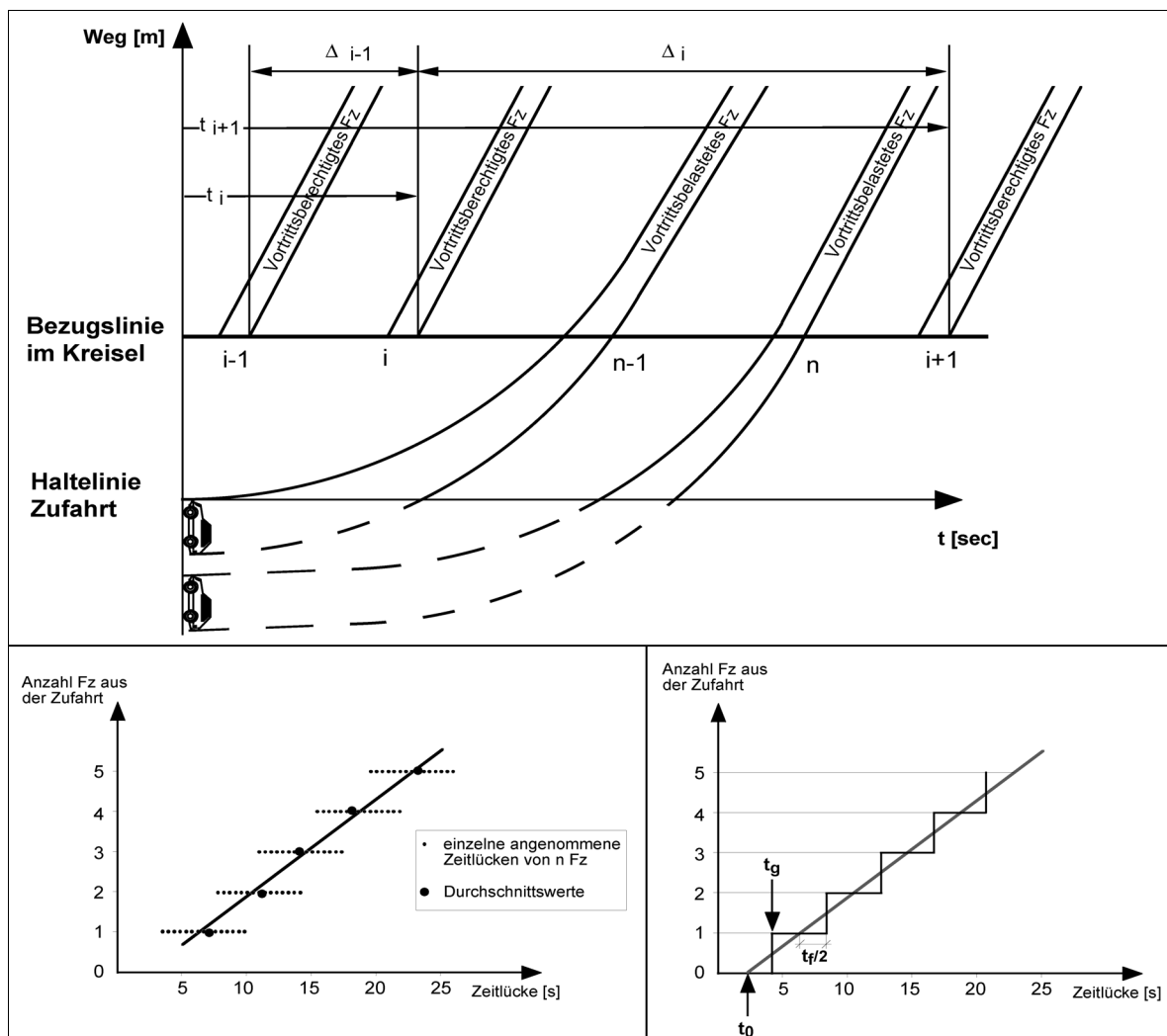
Berechnungsverfahren nach Siegloch

Die Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken erfolgte nach dem Regressionsverfahren von Siegloch [4]. Dieses Verfahren ist dann anwendbar, wenn die Einfahrten besetzt sind. 1997 wurden in einer Untersuchung [8] verschiedene Verfahren zur Ermittlung der Grenz- und Folgezeitlücken einander gegenübergestellt. Die Untersuchungen von Brilon, Stuwe, Koenig, Troutbeck, Bäumler ([6], [8], [12], [13]) ergaben, dass das Verfahren von Siegloch (Regression) die Wirklichkeit gut beschreibt und mit der Schätzung des Mittelwerts der empirischen Häufigkeitsverteilung der Zeitlücken gut übereinstimmt.

Die Grenz- und Folgezeitlücken wurde entsprechend diesem Verfahren über folgende Schritte bestimmt:

- Bestimmung aller angenommenen Zeitlücken Δt für eine diskrete Anzahl wartender Fahrzeuge n in der Einfahrt ($n = 1, 2, 3, \dots$).
- Berechnung der durchschnittlichen Zeitlücke, die von genau n Fahrzeugen angenommen wurde.
- Durchführung der Regressionsanalyse mit den Durchschnittswerten der Zeitlücken (lineare Regression). Der Δx -Wert der Neigung der Geraden entspricht dem Wert der Folgezeitlücke t_f , der Achsabstand auf der x-Achse (Zeitachse) dem Wert der Nullzeitlücke t_0 (vgl. Abbildung).
- Die Grenzzeitlücke ergibt sich wie folgt: $t_g = t_0 + t_f/2$
- Für die Bestimmung der Regressionsgeraden sind die Werte $n = 1$ bis 3 massgebend, weil die Werte $n \geq 4$ nur noch einen geringen Einfluss haben [6].

Die folgende Darstellung zeigt die Methode der Bestimmung der Grenz- und Folgezeitlücken nach Siegloch schematisch auf.



In die Zeitlückenauswertung wurden nur Zeiträume mit ständigem Rückstau in der betrachteten Einfahrt einbezogen, sodass die Voraussetzung für die Anwendung der Regressionstechnik, wie sie von Siegloch [4] vorgeschlagen wurde, gegeben ist.

Mit dem Aufkommen von Simulationsverfahren zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit und der Qualität des Verkehrsablaufs werden auch Kalibrierungsparameter benötigt. Zu diesen gehören auch die im realen Verkehrsablauf ermittelten Grenz- und Folgezeitlücken.

Die Ergebnisse der nach dem obigen Verfahren ermittelten Grenz- und Folgezeitlücken für ausgewählte Kreiselzufahrten sind nachfolgend zusammengestellt.

• Einstreifige Einfahrt / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 1/1)

Die folgende Tabelle zeigt die Auswerteergebnisse der Grenz- und Folgezeitlücken für die Betriebsform Typ 1/1. Es wurden drei Einfahrten an zwei Kreiseln ausgewertet.

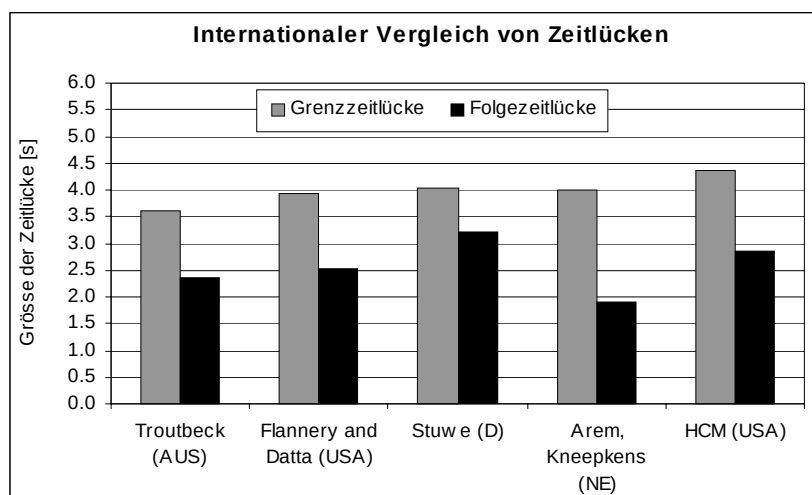
Kreisel Nr.	Einfahrt	Art	n	t_g [s]	t_f [s]
1	zwei Einfahrten	alle Fz	490	3.71	2.97
		nur PW	446	3.75	2.88
2	eine Einfahrt	alle Fz	575	3.63	2.51
		nur PW	543	3.68	2.69
Typ 1/1	gewichteter Mittelwert	alle Fz		3.67	2.72
		nur PW		3.71	2.78

Die Tabelle zeigt:

- Grenz- und Folgezeitlücken variieren nicht stark (hier allerdings bei einer beschränkten Zahl untersuchter Objekte).
- Zwischen den Grenz- und Folgezeitlücken für Personenwagen und für alle Fahrzeuge bestehen nur geringe Unterschiede.
- Die Resultate dürfen aufgrund der kleinen Stichprobe nicht verallgemeinert werden.

Zu Vergleichszwecken zeigt die folgende Abbildung Werte für die Grenz- und Folgezeitlücken aus ausländischen Untersuchungen. Daraus ist ersichtlich, dass sich die aus dieser Untersuchung ermittelten Werte in etwa auf dem Niveau ausländischer Ergebnisse bewegen.

Die Werte aus ausländischen Untersuchungen liegen für t_g im Bereich von ca. 3.6 bis 4.3 s, in vorliegender Untersuchung bei ca. 3.7 s. Bei t_f bewegt sich der Bereich von ca. 1.8 bis 3.2 s, in vorliegender Untersuchung ca. 2.7 bzw. 2.8 s.



• Zweistreifige Einfahrt / einstreifige (überbreite) Kreisfahrbahn (Typ 2/1)

Die folgende Tabelle zeigt die Auswerteergebnisse der Grenz- und Folgezeitlücken für die Betriebsform Typ 2/1. Es wurden 6 Einfahrten an 4 Kreiseln ausgewertet:

Kreisel Nr.	Einfahrt	Art	n	t_g [s]	t_f [s]
6	zwei Einfahrten	PW rechts	1258	3.44	2.51
		PW links	568	3.73	2.77
		PW beide	1484	3.44	2.25
7	Einfahrt 7.1	PW rechts	600	3.67	2.83
		PW beide	567	3.43	1.99
	Einfahrt 7.2	PW rechts	486	3.75	2.78
		PW beide	464	3.47	2.54
8	Einfahrt 8.1	PW links	898	3.48	2.88
		PW rechts	470	3.40	2.47
		PW beide	978	3.20	2.47
9	Einfahrt 9.1	PW links	478	3.24	2.42
		PW rechts	367	2.80	2.02
		PW beide	554	2.88	1.88
Typ 2/1	gewichteter Mittelwert	PW linker FS		3.49	2.73
		PW rechter FS		3.45	2.55
		PW Einfahrt		3.31	2.25

Die Tabelle zeigt:

- Grenz- und Folgezeitlücken variieren nicht sehr stark.
- Grenz- und Folgezeitlücken weisen zwischen den Fahrstreifen links und rechts nur geringe Unterschiede, vor allem bei den Grenzzeitlücken, auf.
- Im Vergleich zur Betriebsform Typ 1/1 sind die Grenz- und Folgezeitlücken bei dieser Betriebsform kleiner.

Bei der Gruppe der zweistreifigen Zufahrten wurde zusätzlich auch der Kreisel Nr.4 mit einstreifiger Zufahrt und Busstreifen ausgewertet (Typ 1+B/1, vgl. folgende Tabelle). Diese Auswertung zeigt, dass die Zeitlücken deutlich grösser sind als jene in der vorherigen Tabelle.

Die Resultate dürfen jedoch nicht verallgemeinert werden, da nur ein Untersuchungsobjekt ausgewertet wurde und es sich bei der Anlage um einen Sonderfall handelt. Bei dieser Zufahrt sind Fahrstreifen und Busstreifen durch eine Insel getrennt und der Busstreifen weist zusätzlich eine Haltestelle im unmittelbaren Kreisbereich auf.

Kreisel Nr.	Einfahrt	Art	n	t_g [s]	t_f [s]
4	eine Einfahrt	alle Zeitlücken	1542	4.84	3.24
		ohne FG	1122	4.37	3.01
		mit FG	420	7.13	3.22

• Zweistreifige Zufahrt / zweistreifige Kreisfahrbahn (Typ 2/2)

Die folgende Tabelle zeigt die Auswerteergebnisse der Grenz- und Folgezeitlücken für die Betriebsform Typ 2/2. Es wurden 3 Einfahrten an 2 Kreiseln ausgewertet.

Kreisel Nr.	Einfahrt	Art	n	t_g [s]	t_f [s]
10	eine Einfahrt	PW rechts Kreisel aussen	53	4.88	2.77
11	zwei Einfahrten	PW links Kreisel aussen	261	3.74	2.54
		PW rechts Kreisel aussen	keine Auswertung		

Die Ergebnisse dürfen nicht verallgemeinert werden, da nur drei Einfahrten an zwei Kreiseln untersucht wurden.

Zusammenfassung

Die folgende Tabelle zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der Auswertungen der Grenz- und Folgezeitlücken für die verschiedenen Betriebsformen. Da die Stichproben bei der Betriebsform Typ 1/1 mit 3 Einfahrten und bei der Betriebsform Typ 2/1 mit 6 Einfahrten relativ gering sind, gelten die angegebenen Werte lediglich als Hinweise und dürfen nicht verallgemeinert werden.

Betriebsform	Anzahl Einfahrten	Fz-Typ	n	t_g [s]	t_f [s]
Typ 1/1	3	alle Fz	1065	3.67	2.72
		PW	989	3.71	2.78
Typ 2/1	6	PW linker FS	1866	3.49	2.73
		PW rechter FS	2181	3.45	2.55
		PW beide FS	4047	3.31	2.25

Überprüfung der Grenzzeitlücken

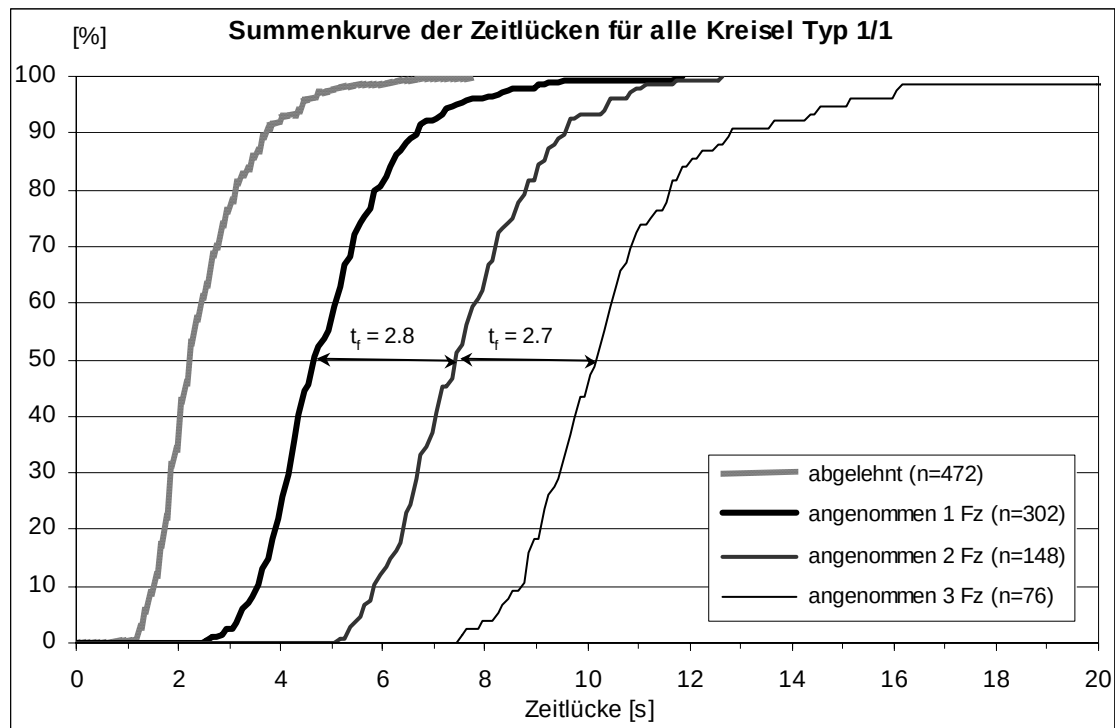
Ein Vergleich mit den neuesten Ergebnissen von Brilon W., Bäumer H., 2004 [13] hat gezeigt, dass beim Kreiseltyp 2/1 in Deutschland grössere *Grenzzeitlücken* resultieren (angegeben werden in [13] 4.1 s) als in der obigen Tabelle angegeben. Demgegenüber ergab sich bei den Folgezeitlücken eine gute Übereinstimmung.

Es stellte sich also die Frage, ob die vorliegende Ableitung der Richtwerte (Regressionsverfahren von Siegloch [4]) nicht *verfahrensbedingt* verfälscht sei. Zu diesem Zweck wurden die Verteilungen der empirisch ermittelten Zeitlücken untersucht.

• Einstreifige Einfahrt / einstreifige Kreisfahrbahn (Typ 1/1)

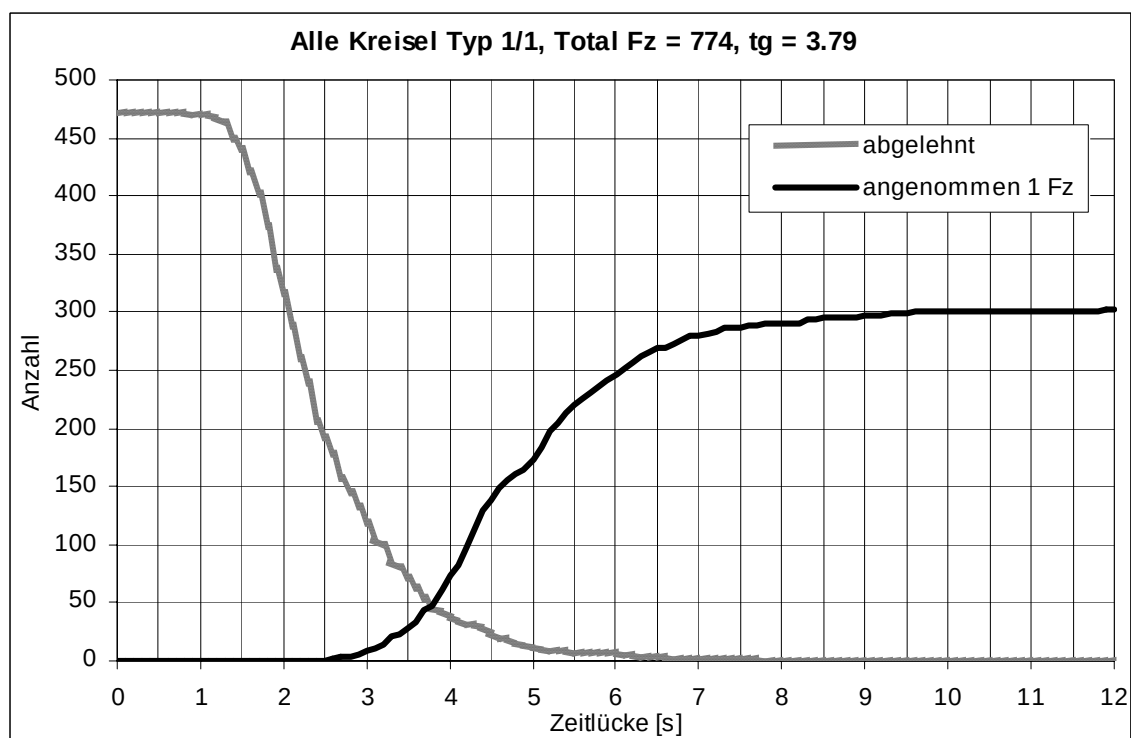
Bei diesem Typ wurden in einem ersten Schritt die Folgezeitlücken überprüft. Sie können bei Normalverteilung der Zeitlücken (vgl. folgende Abbildung) am Erwartungswert abgelesen werden und zwar als Differenzbeträge zwischen den Verteilungskurven, welche das Einfahren in die jeweils vorhandene Zeitlücke auf der Kreisfahrbahn durch 1, 2 und 3 Fz repräsentieren.

In der Abbildung ergaben sich für die mittleren Folgezeitlücken 2.80 s. Dieser Wert ist praktisch identisch mit dem Ergebnis nach dem Regressionsverfahren von Siegloch (vgl. obige Tabelle).



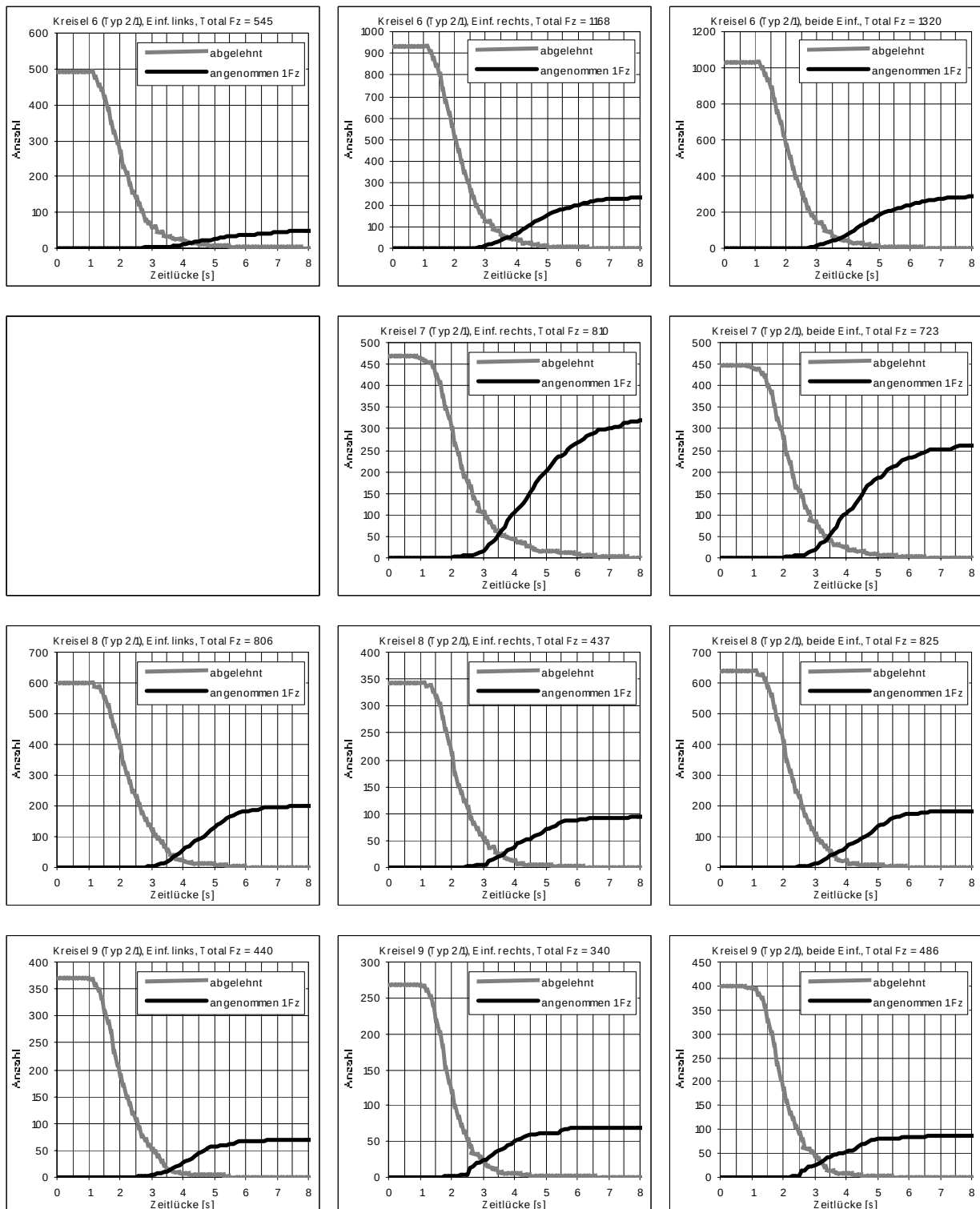
In einem zweiten Schritt wurden die Grenzzeitlücken überprüft. Dazu wurden die Zeitlücken nach ihrer Grösse sortiert. Die mittlere Grenzzeitlücke wird als Schnittpunkt definiert, zwischen den Verteilungen der von Fahrzeugenkern abgelehnten Zeitlücken (kein Fz eingefahren) und angenommenen Zeitlücken (ein Fz eingefahren).

Aus der Verteilung in der folgenden Abbildung ergab sich die Grenzzeitlücke zu 3.79 s. Beim Verfahren von Siegloch resultierten 3.67 s bzw. 3.71 s (vgl. Tabelle in der Zusammenfassung, Typ 1/1). Die Anwendbarkeit des Regressionsverfahrens von Siegloch kann somit bei den 1-streifigen Kreisel als zweckmässig erachtet werden.



- **Zweistreifige Einfahrt / einstreifige (überbreite) Kreisfahrbahn (Typ 2/1)**

Bei diesem Typ erfolgte die Überprüfung der Grenzzeitlücken. Dazu wurden die Verteilungen an den einzelnen Kreiseln für den jeweils linken und rechten sowie für die beiden Einfahrtstreifen untersucht. Die Ergebnisse sind auf der folgenden Seite zusammengestellt.



Die resultierenden Grenzzeitlücken sind in folgender Tabelle zusammengestellt. Ergänzend sind dort die aus dem Regressionsverfahren resultierenden Werte in Kursivschrift angegeben. Aus dem Vergleich ist ersichtlich, dass die aus der empirischen Verteilung ermittelten Grenzzeitlücken grundsätzlich grösser sind als jene nach dem Verfahren von Siegloch. Die Unterschiede bei den einzelnen Kreiseinfahrten betragen zwischen ca. 0.2 und 0.6 s. Die Ausnahme bildet Kreisel Nr. 7, bei welchem jedoch mangels Auslastung keine Auswertung des linken Einfahrtstreifens vorgenommen werden konnte.

Kreisel Nr.	Anz. Einfahrten	Art	n	t_g [s]	Regressions- verfahren
6	2	PW links	545	4.30	3.73
		PW rechts	1168	3.79	3.44
		PW beide	1320	3.77	3.44
7	2	PW links	-	-	-
		PW rechts	810	3.54	3.67 / 3.75
		PW beide	723	3.40	3.43 / 3.47
8	1	PW links	806	3.72	3.48
		PW rechts	437	3.62	3.40
		PW beide	825	3.57	3.20
9	1	PW links	440	3.61	3.24
		PW rechts	340	2.98	2.80
		PW beide	486	3.19	2.88
Typ 2/1	gewichteter Mittelwert	PW linker FS		3.87	3.49
		PW rechter FS		3.59	3.45
		PW Einfahrt		3.56	3.31

Die aufgrund der empirischen Verteilung ermittelten Mittelwerte für die Betriebsform Typ 2/1 sind zwischen 0.14 und 0.38 s grösser als jene nach dem Regressionsverfahren. Sie liegen somit näher zum deutschen Richtwert von 4.1 s aus [13]. Bei diesem Vergleich ist jedoch zu beachten dass in [13] Anlagen mit deutlich grösseren Aussendurchmessern einbezogen wurden (ca. 45 – 70 m) als in vorliegender Untersuchung (ca. 32 – 40 m). Neben den allfälligen Unterschieden im Einfahrtsverhalten der Fahrzeuglenker, könnten auch die grösseren, krümmungsbedingten Fahrgeschwindigkeiten auf den Kreisel in [13] für die Unterschiede verantwortlich sein.