Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Alternative Methoden zur Messung lokaler Verkehrssicherheit

Méthodes alternatives pour mesurer la sécurité du trafic local

Alternative methods for measuring local traffic safety

verkehrsteiner AG
Rolf Steiner
Jakob Leitner

Zürcher Hochschule für angewandte Wisschenschaften ZHAW,
Departement Angewandte Psychologie
Markus Hackenfort
Gisela Benedek

BFH Burgdorf, Institut für Siedlungsentwicklung und Infrastruktur
Marion Doerfel

photrack AG
Beat Lüthi

Forschungsprojekt SVI 2018/002 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

April 2023 **1746**

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

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

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

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.
Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Alternative Methoden zur Messung lokaler Verkehrssicherheit

Méthodes alternatives pour mesurer la sécurité du trafic local

Alternative methods for measuring local traffic safety

verkehrsteiner AG
Rolf Steiner
Jakob Leitner

Zürcher Hochschule für angewandte Wisschenschaften ZHAW,
Departement Angewandte Psychologie
Markus Hackenfort
Gisela Benedek

BFH Burgdorf, Institut für Siedlungsentwicklung und Infrastruktur
Marion Doerfel

photrack AG
Beat Lüthi

Forschungsprojekt SVI 2018/002 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

April 2023 **1746**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Rolf Steiner

Mitglieder
Gisela Benedek
Marion Doerfel
Markus Hackenfort
Jakob Leitner
Beat Lüthi

Begleitkommission

Präsident
Stevan Skeledzic

Mitglieder
Toralf Dittrich
Thomas Dreher
Christian Ferres
Heidi Meyer
Steffen Niemann
Aschi E. Schmid

Antragsteller

Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum **4**
Zusammenfassung **7**
Résumé **11**
Summary **15**

1 Einleitung **17**
1.1 Ausgangslage 17
1.2 Stand der Forschung und Ziele der Forschungsarbeit 18
1.3 Vorgehen 20
1.3.1 Zusammenstellen der Grundlagen und Literatur 20
1.3.2 Indikatorendefinition & Methodenentwicklung 20
1.3.3 Durchführung von Feldversuchen und Validierung 21

2 Methodenentwicklung **23**
2.1 Begriffsdefinitionen 23
2.2 Sicherheitsindikatoren 23
2.2.1 Tatsächliches Unfallgeschehen 23
2.2.2 Konflikte anhand standardisierter Kriterien 23
2.2.3 Konfliktunabhängige Indikatoren anhand standardisierter Kriterien 24
2.2.4 Weitere Sicherheitsindikatoren 24
2.3 Herkömmliche Methoden und alternative Ansätze 24
2.3.1 Unfalldaten und Black Spot Management 25
2.3.2 Anforderungen und Erwartungen an die alternative Methode 26
2.3.3 Mögliche Erhebungsmethoden für alternative Ansätze 28
2.4 Konkretisierung der Methode eines bildbasierten Ansatzes 29
2.4.1 Sicherheitsindikatoren für automatisierte Videoanalysen 29
2.4.2 Erhebungstechnik 32
2.4.3 Rechercheergebnisse zu verfügbaren Analyseverfahren 33
2.5 Ausgewählte Anwendungen 36
2.5.1 Anwendung 1: «datafromsky» 36
2.5.2 Anwendung 2: «TrafxSafe» 37

3 Methodentestung / Feldversuche **39**
3.1 Versuchsaufbau 39
3.1.1 Untersuchungsorte 39
3.1.2 Vorgehenskonzept der Methodentestung 41
3.2 Durchführung der Erhebungen 41
3.2.1 Videoerhebung 41
3.2.2 Begleiterhebungen 42
3.3 Durchführung der Videoauswertungen 44
3.3.1 Automatisierte Auswertungen 44
3.3.2 Auswertung «Manuelle Konfliktanalyse» 45
3.4 Resultate «01 - Kilchberg» 48
3.4.1 Ort und Ausgangslage 48
3.4.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 1) 50
3.4.3 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) – erste Videoerhebung 56
3.4.4 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) – zweite Videoerhebung 65
3.4.5 Manuelle Konfliktanalyse 67
3.5 Resultate «02 - Bachenbülach» 69
3.5.1 Ort und Ausgangslage 69
3.5.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) 71
3.5.3 Manuelle Konfliktanalyse 78
3.6 Resultate «03 – Dietikon, Schönenwerdkreuzung» 80
3.6.1 Ort und Ausgangslage 80

3.6.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) 82
3.6.3 Manuelle Konfliktanalyse 88
3.7 Resultate «04 – Luzern, Staechenrain» 90
3.7.1 Ort und Ausgangslage 90
3.7.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) 92
3.7.3 Manuelle Konfliktanalyse 101
3.8 Resultate «06 – Sursee, Schlottermilch» 103
3.8.1 Ort und Ausgangslage 103
3.8.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) 105
3.8.3 Manuelle Konfliktanalyse 114
3.9 Resultate «07 – Luzern, Waldegg» 116
3.9.1 Ort und Ausgangslage 116
3.9.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) 118
3.9.3 Manuelle Konfliktanalyse 125
3.10 Resultate «08 – Luzern, Freigleis» 127
3.10.1 Ort und Ausgangslage 127
3.10.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) 129
3.10.3 Manuelle Konfliktanalyse 134
3.11 Resultate «09 – Luzern, Zürichstrasse/Wesemlinstrasse» 136
3.11.1 Ort und Ausgangslage 136
3.11.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) 138
3.11.3 Manuelle Konfliktanalyse 145

4 Beurteilung der Messergebnisse / Validierung 147
4.1 Vorgehen bei der Beurteilung der Messergebnisse 147
4.2 Messergebnisse der alternativen Methode im Quervergleich 147
4.2.1 Messergebnisse ohne Nachbearbeitung 147
4.2.2 Messergebnisse, nachbearbeitet (Definition kritische Begegnung) 148
4.2.3 Messergebnisse, nachbearbeitet (Berechnung Risikoindex) 156
4.2.4 «01_Kilchberg» - Gegenüberstellung der Resultate der beiden Messungen 158
4.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse (alternative Methode / Begleituntersuchungen) 163
4.3.1 Vorbemerkung und Ergebnisse der manuellen Konfliktanalyse im Überblick 163
4.3.2 Ergebnisse der Begleitbefragungen 165
4.3.3 Gegenüberstellung der Resultate 166
4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse (alternative Methode / Unfallgeschehen) 168
4.4.1 Vorbemerkung und Ergebnisse der Analysen des Unfallgeschehens im Überblick 168
4.4.2 Gegenüberstellung der Resultate 171
4.4.3 Detailbetrachtung Unfalltypen «01_Kilchberg» 173
4.4.4 Detailbetrachtung Unfalltypen «07_Luzern_Waldegg» 174

5 Synthese 177
5.1 Forschungsfragen 177
5.2 Geeignete messbare Sicherheitsindikatoren 177
5.3 Alternative Ansätze und Methoden 177
5.4 Erkenntnisse aus den Feldversuchen 178
5.5 Empfehlungen hinsichtlich Anwendbarkeit 180
5.6 Weiterentwicklung der getesteten Methode 184
5.7 Forschungsbedarf 185

Anhänge 187
Glossar 193
Literaturverzeichnis 195
Projektabschluss 197

Zusammenfassung

Bislang wird die lokale Verkehrssicherheit in der Schweiz im Wesentlichen anhand des tatsächlichen Unfallgeschehens beurteilt. Statistisch betrachtet kommen Unfallereignisse in Relation zum gesamten Verkehrsaufkommen nur selten vor und deshalb liegt dieser Methode eine gewisse Unschärfe zugrunde. Zusätzlich kann die Analyse erst im Nachhinein erfolgen und lässt nicht immer konkrete Rückschlüsse auf die Defizite der Infrastruktur zu.

Um dem Ziel einer objektiven Bewertung der Sicherheit von beispielsweise einer Strasse, Kreuzung oder Querungsstelle näher zu kommen, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes nach Sicherheitsindikatoren und Methoden zu deren Messung recherchiert. Schliesslich wurde eine geeignete Methode definiert, welche anschliessend in Feldversuchen an insgesamt acht Untersuchungsorten mit unterschiedlichen Eigenschaften getestet wurde. Die Messergebnisse der angewendeten alternativen Methode (Videoanalyse) wurden einer objektiven Prüfung unterzogen und den Resultaten der Begleituntersuchungen sowie der Unfallanalysen gegenübergestellt. Das methodische Vorgehen ist in diesem Bericht ebenso dokumentiert wie die Möglichkeiten und Limitationen der Methode sowie die aus den Erkenntnissen der Feldversuche ableitbaren Empfehlungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit.

Im Zuge der Methodenentwicklung wurden Recherchen zu möglichen Sicherheitsindikatoren und Messverfahren durchgeführt. Sie haben ergeben, dass vor allem jene Indikatoren grosses Potenzial haben, die Begegnungen von Verkehrsteilnehmenden beschreiben können und auf standardisierten Kriterien bzw. Messungen in Raum und Zeit beruhen. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Messverfahren wurden schliesslich die Indikatoren «Time To Collision» (TTC)[1] sowie «Post Encroachment Time» (PET)[2] als besonders geeignet identifiziert. Im Hinblick auf die gewünschten Anforderungen und Erwartungen an die alternative Methode, hat sich der videobasierte Ansatz als zweckmässigster Methodenansatz herauskristallisiert. Der Ansatz hat neben seinen günstigen Eigenschaften (u.a. Flexibilität der Einsatzmöglichkeit, hoher Informationsgehalt von Videodaten, Nachvollziehbarkeit, etc.) auch den Vorzug, dass bereits automatisierte Analyseverfahren zur Verfügung standen, welche Messungen der genannten Sicherheitsindikatoren auf Basis von extrahierten Bewegungstrajektorien der Verkehrsteilnehmenden beinhalten. Basierend auf einer Beurteilung von verfügbaren Anwendungen konnten zwei kommerzielle Softwarelösungen ausgewählt werden, mit welchen die Methode im Rahmen der Feldversuche getestet wurde. Für die Erhebung der benötigten Videodaten wurde ein auf die Anforderungen der Anwendungen sowie die angestrebte Aufnahmedauer abgestimmtes Equipment zusammengestellt.

Aus den durchgeführten Feldversuchen konnten zusammenfassend folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Videodaten konnten in der benötigten Qualität und über längere Zeiträume erhoben werden, wobei die Wahl des Erhebungsstandortes sowie die Aufnahmeperspektive für die nachgelagerten Analysen von grosser Bedeutung sind.
- Äussere Rahmenbedingungen wie Wetterbedingungen oder Lichtverhältnisse (sofern künstliche Beleuchtung vorhanden und während der Nachtstunden durchgehend in Betrieb ist) wirken sich weniger als erwartet auf die Qualität der Resultate der automatisierten Videoanalyse aus.

[1] Der Indikator TTC beschreibt die Zeit bis zu einer potenziellen Kollision zweier Verkehrsteilnehmer (unabhängig vom Zeitpunkt einer allfälligen Korrekturhandlung).

[2] Der Indikator PET beschreibt den Zeitunterschied zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden bezogen auf einen gemeinsamen räumlichen Bereich, den beide nacheinander aus unterschiedlichen Richtungen befahren (unabhängig einer potenziellen Kollision).

- Die mittels automatisierter Auswertung erfolgte Trajektorienextraktion, also die Erfassung von Objekten im Videobild sowie auch deren Klassifizierung, brachte zum Teil gute Resultate. Die Verkehrsmengen liessen sich – mit Abstrichen beim Fuss- und Veloverkehr sowie Schwerverkehr – in der Regel gut bestimmen.
- Die Messbarkeit der Sicherheitsindikatoren wird durch die eingesetzten Anwendungen limitiert. Insbesondere der Indikator TTC bedingt eine hohe Genauigkeit der extrahierten Trajektorien sowie deren Umlegung in ein Koordinatensystem. Diese Genauigkeit konnte mit dem angewandten Versuchsaufbau nicht immer im erforderlichen Mass erreicht werden. In diesem Zusammenhang haben sich die Aufnahmen aus der Schrägperspektive als nachteilig erwiesen. Die Aufnahmeperspektive wurde gewählt, um mit machbarem Aufwand über genügend lange Zeiträume Erhebungen durchführen zu können.
- Der Indikator PET hat den Nachteil, dass der Indikatorwert allein nur bedingt geeignet ist, das Sicherheitsniveau zu beschreiben. Die Berücksichtigung weiterer Kriterien wie beispielsweise die Geschwindigkeit der beteiligten Verkehrsteilnehmenden sowie andere Merkmale der jeweiligen Begegnungssituation ist hilfreich, das Risiko der ermittelten Begegnungen besser zu beschreiben. Für detailliertere Analysen ist es möglich und sinnvoll, nach Konflikttypen (Definition in Anlehnung an die Unfalltypen gemäss Unfallprotokollierung) zu unterscheiden.
- Fehldetektionen und Ungenauigkeiten, die im Resultat der automatisierten Analysen enthalten sind, erfordern grundsätzlich eine kritische Prüfung und Nachbearbeitung der Resultate.
- Die im Nachbearbeitungsschritt anhand der als relevant definierten PET-Konflikttypen und ihrer Parameter (insbesondere Geschwindigkeit) ermittelten Kenngrössen zur Sicherheitsbeurteilung, stellen einen ersten Versuch dar, das Sicherheitsniveau der untersuchten Orte mit den zur Verfügung stehenden Mitteln bestmöglich zu beschreiben. In der Gegenüberstellung der Resultate dieses Schrittes mit den Ergebnissen der Begleituntersuchung (manuelle Konfliktanalyse) waren allerdings erhebliche Abweichungen festzustellen. Die Gründe hierfür liegen neben methodischen Differenzen der beiden Methoden auch darin, dass auch die manuelle Konfliktanalyse mit Schwächen behaftet ist. Auch anhand des tatsächlichen Unfallgeschehens war eine Validierung der Resultate nur eingeschränkt möglich. Dies liegt primär an der statistisch betrachtet geringen Anzahl an Unfällen der Untersuchungsorte. Zumindest konnten in der Detailbetrachtung Übereinstimmungen von Ausprägungen hinsichtlich Unfalltypen und Konflikttypen nachgewiesen werden.

Insgesamt ist festzuhalten, dass im für die Feldversuche gewählten Versuchsaufbau der Methodentestung die automatisierten Auswertungen nicht die erhoffte Qualität erreichen konnten. Dieses Qualitätsniveau wäre nötig, um valide Messergebnisse der definierten Sicherheitsindikatoren und weiterer wesentlicher Parameter zur gesamthaften Beurteilung der Verkehrssicherheit einer Infrastrukturanlage zu erhalten. Das grösste Defizit besteht in der perspektivischen Verzerrung der erhobenen Videobilder bei deren Umlegung ins Koordinatensystem und den damit verbundenen fehlerbehafteten Distanz- und Geschwindigkeitsmessungen. Ebenfalls ein grosses Defizit sind die Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung der im Videobild erfassten Objekte durch die Auswertesoftware. Auch die Nutzbarkeit der ermittelten Sicherheitskenngrössen ist vor dem Hintergrund fraglich. Die getestete Methode liefert aber erste Anhaltspunkte für Auffälligkeiten in den Verkehrsabläufen, die mittels qualitativer Analysen überprüft werden müssen.

Für die Empfehlungen hinsichtlich der Anwendbarkeit der Methode ergeben sich aus den Erkenntnissen der durchgeführten Methodentestung, dass der Ansatz unter bestimmten Voraussetzungen geeignet sein kann, die analytische Verkehrssicherheitsarbeit zu unterstützen. Anknüpfend an die bestehenden Sicherheitsinstrumente (ISSI) zur Verkehrssicherheit in der Schweiz liegen mögliche Anwendungsfälle in der zeitnahen Überprüfung von besonderen Neubauprojekten (unter Umständen als Empfehlung aus einem Road Safety Audit), im Rahmen einer Road Safety Inspektion, eines Black Spot Managements oder eines Einzelunfallmanagements sowie insbesondere auch für Wirkungsanalysen von realisierten Massnahmen im Sinne eines Vorher-Nachher-Vergleichs. Wesentlich für die Eignung der Methode sind die örtliche Situation und die bestehenden Rahmenbedingungen.

Dazu zählen etwa die Dimension der zu untersuchenden Anlage und deren Ausstattung (insbesondere Beleuchtung), vorhandene Befestigungsmöglichkeiten für Aufnahmegeräte, allfällige Sichteinschränkungen sowie die Verkehrszusammensetzung. Weitere Empfehlungen, die hinsichtlich Methodeneinsatz abgeleitet werden konnten, betreffen das Vorgehen bei der Durchführung von Erhebungen sowie die Prüfung und Nachbearbeitung der Resultate der automatisierten Auswertungen.

Die Forschungsarbeit hat gezeigt, dass seitens automatisierter Auswertetechnologien noch grosser Weiterentwicklungsbedarf besteht. Dies einerseits, um die Qualität der erzielbaren Messresultate allgemein zu steigern und anderseits, um die Berechnung von Sicherheitsindikatoren im Speziellen und deren Anwendbarkeit zu erleichtern. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach neuen Erhebungstechniken, die beispielweise Aufnahmen aus einer geeigneten Perspektive auch über einen längeren Zeitraum möglich machen. Forschungsbedarf besteht ausserdem im Bereich der Entwicklung geeigneter Kenngrössen zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus, die auf Basis von automatisiert messbaren Indikatoren und Parametern ermitteln werden sollen.

Résumé

Jusqu’à présent, la sécurité routière locale en Suisse est essentiellement évaluée sur la base des accidents réels. D’un point de vue statistique, les événements accidentels ne se produisent que rarement par rapport au volume total de trafic et cette méthode repose donc sur une certaine imprécision. De plus, l'analyse ne peut se faire qu'a posteriori et ne permet pas toujours de tirer des conclusions concrètes sur les déficits de l'infrastructure.

Afin de se rapprocher de l'objectif d'une évaluation objective de la sécurité, par exemple d'une route, d'un carrefour ou d'une traversée, des indicateurs de sécurité et une méthode pour les mesurer ont été recherchés dans le cadre de ce projet. Puis une méthode appropriée (analyse vidéo) a été définie pour être ensuite testée sur le terrain à au total huit sites d'étude, présentant des caractéristiques différentes. Les résultats de mesure de cette méthode alternative ont été soumis à un examen objectif et comparés aux résultats des études d'accompagnement et des analyses d'accidents. La procédure méthodologique est documentée dans le présent rapport, tout comme les possibilités et les limites de la méthode alternative ainsi que les recommandations concernant son applicabilité qui peuvent être déduites des résultats des essais sur le terrain.

Les recherches effectuées au cours du développement de la méthode sur les indicateurs de sécurité et les méthodes de mesure possibles ont montré que les indicateurs présentant un grand potentiel sont surtout ceux qui présentent des caractéristiques similaires aux accidents réels et qui reposent sur des critères ou des mesures standardisés dans l'espace et le temps. Compte tenu des méthodes de mesure disponibles, les indicateurs "Time To Collision" (TTC)[3] et "Post Encroachment Time" (PET)[4] ont finalement été identifiées comme particulièrement appropriées. En ce qui concerne les exigences et les attentes souhaitées pour la méthode alternative, une approche basée sur la vidéo s'est avérée être l'approche méthodologique la plus adéquate. Outre ses caractéristiques favorables (notamment la flexibilité d'utilisation, le contenu informatif élevé des données vidéo, la traçabilité, etc.), cette approche avait l'avantage de déjà disposer de méthodes d'analyse automatisées. Ces procédures automatisées comprennent la réalisation de mesures des indicateurs de sécurité mentionnés sur la base de trajectoires extraites de déplacement des usagers de la route. En se basant sur une évaluation des applications disponibles, deux solutions logicielles commerciales ont pu être sélectionnées, avec lesquelles la méthode a été testée dans le cadre des essais sur le terrain. Pour la collecte des données vidéo nécessaires, un équipement adapté aux exigences des applications et à la durée d'enregistrement visée a été assemblé.

En résumé, les essais sur le terrain ont permis de tirer les enseignements suivants :

- Les données vidéo ont pu être collectées avec la qualité requise et sur une longue période, le choix du site de collecte et la perspective de prise de vue étant toutefois d’une grande importance pour les analyses en aval.
- Les conditions extérieures telles que les conditions météorologiques ou la luminosité (si un éclairage artificiel est disponible et fonctionne en continu pendant les heures nocturnes) ont moins d'impact qu’excompté sur la qualité des résultats de l'analyse vidéo automatisée.
- L'extraction des trajectoires, correspondant à la saisie d'objets dans l'image vidéo et à leur classification et réalisée au moyen d'une analyse automatisée, a apporté en partie

[3] L'indicateur TTC décrit le temps qui s'écoule jusqu'à une collision potentielle entre deux usagers de la route (indépendamment du moment d’une éventuelle action corrective).

[4] L’indicateur PET décrit la différence de temps entre deux usagers de la route par rapport à une zone spatiale commune qu’ils traversent successivement depuis des directions différentes (indépendamment d'une collision potentielle).

de bons résultats. En règle générale, le volume de trafic a pu être déterminé correctement, à quelques exceptions près pour les piétons, les cyclistes et les poids lourds.

- La mesurabilité des indicateurs de sécurité est limitée par les applications utilisées. L'indicateur TTC, en particulier, requiert une grande précision des trajectoires extraites ainsi que de leur transposition dans un système de coordonnées. Cette précision n'a pas toujours pu être atteinte dans la mesure requise avec le dispositif expérimental utilisé. Dans ce contexte, les prises de vue en perspective oblique se sont avérées désavantageuses. Cette perspective de prise de vue a été choisie afin de pouvoir effectuer des relevés sur des périodes suffisamment longues et avec un coût total acceptable.
- L'indicateur PET présente l'inconvénient que la valeur de l'indicateur à elle seule n'est que partiellement appropriée pour décrire le niveau de sécurité. La prise en compte d'autres critères, tels que la vitesse des usagers impliqués ainsi que d'autres caractéristiques propres aux situations d'interaction concernées, est utile pour mieux décrire le risque des interactions identifiées. Pour des analyses plus détaillées, il est possible et judicieux de distinguer les types de conflits (définition basée sur les types d'accidents selon le protocole des accidents).
- Les erreurs de détection et les imprécisions contenues dans les résultats des analyses automatisées nécessitent en principe un examen critique et un traitement ultérieur des résultats.
- Les paramètres d'évaluation de la sécurité déterminés lors de l'étape de post-traitement sur la base des types de conflits PET définis comme pertinents et de leurs paramètres (notamment la vitesse) constituent une première tentative de décrire au mieux le niveau de sécurité des sites étudiés avec les moyens disponibles. En comparant les résultats de cette étape avec ceux de l'étude d'accompagnement (analyse manuelle des conflits), des écarts considérables ont toutefois été constatés. Les raisons en sont, outre des différences méthodologiques entre les deux méthodes, le fait que l'analyse manuelle des conflits possède également des faiblesses. De même, la validation des résultats sur la base des accidents réels n'a été possible que de manière limitée. Cela est dû en premier lieu au nombre statistiquement faible d'accidents sur les sites étudiés. L'analyse détaillée a au moins permis de mettre en évidence des concordances entre les caractéristiques relatives aux types d'accidents et de conflits.

De manière générale, on constate que dans le dispositif expérimental choisi pour tester la méthode alternative les analyses automatisées n'a pas pu atteindre la qualité espérée. Ce niveau de qualité serait nécessaire pour obtenir des résultats de mesure valides pour les indicateurs de sécurité définis et d'autres paramètres essentiels pour l'évaluation globale de la sécurité routière d'une installation d'infrastructure. Le principal déficit réside dans la distorsion de perspective des images vidéo collectées lors de leur transfert dans le système de coordonnées et dans les mesures de distance et de vitesse erronées qui en découlent. Les imprécisions lors de la détermination de la position des objets saisis dans l'image vidéo par le logiciel d'analyse constituent également un déficit important. Dans ce contexte, l'utilisabilité des paramètres de sécurité définis est également discutable. La méthode testée fournit toutefois des premiers indices d'anomalies dans le déroulement du trafic, qui doivent être vérifiés au moyen d'analyses qualitatives.

En ce qui concerne les recommandations relatives à l'applicabilité de la méthode, il ressort des conclusions du test méthodique effectué que cette approche peut, dans certaines conditions, être appropriée pour soutenir le travail analytique portant sur la sécurité routière. En s'appuyant sur les instruments de sécurité existants (ISSI) pour la sécurité routière en Suisse, les cas d'application possibles sont le contrôle en temps réel de nouveaux projets de construction spécifiques (dans certaines circonstances comme recommandation issue d'un audit de sécurité routière (Road Safety Audit), dans le cadre d'une inspection de sécurité routière (Road Safety Inspection), d'une gestion (Black Spot Management) ou de la gestion des lieux d'accidents isolés. Elle peut également être utilisée pour analyser l'impact de mesures réalisées dans le sens d'une comparaison avant / après. La situation locale et les conditions-cadres existantes sont essentielles pour déterminer si la méthode est appropriée. Il s'agit par exemple des dimensions de l'installation à examiner et de son équipement (en particulier l'éclairage), des possibilités de fixation existantes pour les appareils

d'enregistrement, des éventuelles restrictions de visibilité ainsi que de la composition du trafic. D'autres recommandations concernant l'utilisation de la méthode ont pu être déduites et concernent la procédure à suivre lors de la collecte des données ainsi que le contrôle et le traitement ultérieur des résultats des analyses automatisées.

Le travail de recherche a montré qu'un développement du côté des technologies d'analyse automatisées est nécessaire. Ceci, d'une part, pour améliorer la qualité générale des résultats de mesure obtenus et, d'autre part, pour faciliter le calcul d'indicateurs de sécurité en particulier ainsi que leur application. Dans ce contexte, se pose également la question des nouvelles techniques qui, par exemple, permettent de prendre des enregistrements vidéo d'une perspective optimisée sur une plus longue période de temps. Des recherches sont également nécessaires dans le domaine du développement de paramètres appropriés pour décrire le niveau de sécurité qui doivent être déterminés sur la base d'indicateurs et de paramètres mesurables de manière automatisée.

Summary

Up to now, local road safety in Switzerland has been assessed mainly on the basis of actual accident occurrences. From a statistical point of view, accidents occur only rarely in relation to the total volume of traffic and therefore this method is based on a certain degree of imprecision. In addition, the analysis can only be carried out retrospectively and does not always allow concrete conclusions to be drawn about the deficits of the infrastructure.

To meet the goal of an alternative objective assessment of the safety of, for example, a road, intersection or crossing point, safety indicators and a method for measuring them have been searched within this research project. A suitable method (video analysis) was defined to be subsequently tested in field trials at a total of eight investigation sites with different characteristics. The measurement results of the selected method were subjected to an objective examination and compared with the results of the accompanying investigations and the accident analyses. The methodological procedure is documented in this report, as are the possibilities and limitations of the alternative method and the recommendations regarding its applicability that can be derived from the findings of the field tests.

In the course of developing the methods, research was conducted on possible safety indicators and measurement procedures. They showed that especially those indicators have great potential, that can describe road user interactions and are based on standardised criteria or measurements in space and time.

Taking into account the available measurement methods, the indicators "Time To Collision" (TTC)[5] and "Post Encroachment Time" (PET)[6] were finally identified as particularly suitable. Regarding the desired requirements and expectations of the alternative method, the video-based approach emerged as most appropriate. In addition to its favourable characteristics (including flexibility of it's application, high information content of video data, traceability, etc.), the approach also has the advantage that automated analysis procedures were already available which include measurements of the mentioned safety indicators based on extracted movement trajectories of road users. Based on an assessment of available applications, two commercial software solutions were selected with which the method was tested in the field trials. For the collection of the required video data, equipment was assembled that was adapted to the requirements of the applications and the desired recording duration.

In summary, the following findings were obtained from the conducted field tests:

- Video data could be collected in the required quality and over longer periods of time, whereby the choice of the survey location as well as the recording perspective are of great importance for the following analyses.
- External conditions such as weather conditions or lighting conditions (if artificial lighting is available and in continuous operation during the night hours) have less impact on the quality of the results of the automated video analysis than expected.
- The trajectory extraction, i.e. the detection of objects in the video image and their classification, carried out by means of automated analysis, produced good results in some cases. The traffic volumes could generally be determined well - with some exceptions for pedestrian and bicycle traffic as well as heavy vehicles.
- The measurability of the safety indicators is limited by the applications used. The TTC indicator in particular requires a high accuracy of the extracted trajectories and their transformation into a coordinate system. This accuracy could not always

[5] The TTC indicator describes the time remaining until a potential collision between two road users, independent of the time of a possible corrective action.

[6] The indicator PET describes the time difference between two road users regarding a common spatial area, which both travel in succession from different directions (regardless of a potential collision).

be achieved to the required extent with the applied experimental setup. In this context, the recordings from the oblique perspective proved to be disadvantageous. The recording perspective was chosen to be able to carry out elicitation over sufficiently long periods of time with feasible effort.

- The indicator PET has the disadvantage that the indicator value alone is only suitable to describe the safety level to a limited extent. Taking other criteria into account, such as the speed of the road users involved and other characteristics of the respective encounter situation is helpful in better describing the risk of the identified encounters. For more detailed analyses, it is possible and useful to differentiate encounters according to conflict types (definition based on the accident types used in accident records).
- As false detections and inaccuracies are contained in the results of automated analyses a critical examination and post-processing of the data is always required.
- The parameters for safety assessment determined in the post-processing step on the basis of the PET conflict types defined as relevant and their parameters (in particular speed) represent a first attempt to describe the safety level of the investigated sites with the available means as best as possible. However, when comparing the results of this step with the results of the accompanying investigation (manual conflict analysis), significant deviations were found. The reasons for this are not only methodological differences between the two methods, but also the fact that the manual conflict analysis is also fraught with weaknesses. A validation of the results on the basis of the actual accident was also limited. This is primarily due to the statistically small number of accidents at the study sites. At least, in the detailed analysis, correspondences of characteristics regarding accident types and conflict types could be proven.

Overall, it should be noted that in the chosen trial setup for the testing of the alterative method, the automated analysis could not achieve the hoped-for quality. A higher level of quality would be necessary to obtain valid measurement results of the defined safety indicators and other essential parameters for the overall assessment of the road safety of an infrastructure facility. The greatest deficit lies in the perspective distortion of the collected video images when they are converted into the coordinate system (georeferenced) and the associated erroneous distance and speed measurements. Another major deficit is the inaccuracy in determining the position of the objects captured in the video image by the applications used. The usability of the determined safety parameters is also questionable under the given circumstances. However, the tested method provides initial indications of conspicuities in the traffic flows, which must be verified by means of qualitative analyses.

For the recommendations regarding the applicability of the method, the findings of the method testing carried out indicate that the approach may be suitable for supporting analytical road safety work under certain conditions. Following on from the existing safety instruments (ISSI) for road safety in Switzerland, possible cases of application lie in the timely review of newly built infrastructure with specific interest (possibly as a recommendation from a Road Safety Audit), within a Road Safety Inspection, a Black Spot Management or an Individual Accident Management as well as to analyse the effects of realised measures in the sense of a before-and-after study. It needs to be pointed out that the local situation and the existing framework conditions are essential for the suitability of the method. These include, for example, the dimensions of the facility to be investigated and its equipment (especially lighting), existing mounting options for recording devices, any visual restrictions, and the traffic composition. Further recommendations that could be derived regarding the use of methods concern the procedure for conducting surveys as well as the examination and post-processing of the results of the automated evaluations.

The research has shown that there is still a great need for further development of automated evaluation technologies both to increase the quality of the achievable measurement results in general and to facilitate the calculation of safety indicators and their applicability. In this context, there is also the question of new survey techniques to be raisen, that allow capturing of video data from a more suitable perspective over a longer period of time. There is also a need for research in developing suitable parameters for describing the safety level, which are to be determined based on automatically measurable indicators and parameters.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Eines der wichtigsten Ziele des Strassenentwurfs und -betriebs ist es, ein hohes Mass an Sicherheit zu gewährleisten. Dies betrifft sowohl die Anlagensicherheit als auch die betriebliche Sicherheit. Dementsprechend relevant ist die Frage nach Möglichkeiten zur Objektivierbarkeit in der Bewertung, ob beispielsweise eine Strasse, Kreuzung oder Querungsstelle sicher ist oder Sicherheitsdefizite bestehen sowie hinsichtlich der Wirkungsbeurteilung von umgesetzten Massnahmen. Bislang erfolgt die Messung von lokaler Verkehrssicherheit in der Schweiz neben präventiven Methoden wie die Road-Safety-Inspection (RSI) oder Gefahrenanalysen im Wesentlichen anhand des tatsächlichen Unfallgeschehens bzw. der Unfallstatistik wie dem Black Spot Management (BSM), das zum Identifizieren, Analysieren und Beheben von Unfallschwerpunkten dient. Aufgrund der Tatsache, dass Unfallereignisse statistisch betrachtet sehr selten vorkommen und zudem auch nur jene Unfälle in diese Statistik einfliessen, die auch polizeilich registriert wurden, liegt dieser herkömmlichen Methode eine gewisse Unschärfe zugrunde, die im ungünstigsten Fall bis zur Zufälligkeit reichen kann. Ausserdem lassen die registrierten Unfälle nicht immer konkrete Rückschlüsse auf infrastrukturelle Defizite zu. Hinzu kommt der erhebliche Nachteil, dass die Analyse auf Basis des Unfallgeschehens ausschliesslich im Nachhinein erfolgen kann und über mehrere Jahre andauern muss, um schliesslich zum Teil wenig belastbare Aussagen treffen zu können.

Bei der Identifikation von Unfallschwerpunkten wird anhand des tatsächlichen Unfallgeschehens in drei Jahren ein Berechnungswert für einen definierten Suchperimeter ermittelt, wobei nur Personenschadensunfälle herangezogen werden, die im Berechnungsverfahren jeweils gemäss der Unfallschwerekategorie gewichtet werden. Ein Unfallschwerpunkt wird als solcher identifiziert, wenn der ermittelte Berechnungswert den definierten Grenzwert erreicht oder überschreitet.

Unfallschwerpunkte sind meist stark verkehrsbelastete Strassen und insbesondere Knotenpunkte, wo Verkehrsteilnehmende verstärkt in Interaktion treten. Im Falle von Knotenpunkten kann davon ausgegangen werden, dass Unfälle vermehrt dort auftreten, wo diese Interaktion aus den unterschiedlichsten Gründen häufig nicht optimal und somit konflikthaft ablaufen. Weiter zeigt Hydén [18] mit seinem Pyramidenmodell auf, dass die an einem Ort gehäuft auftretenden Unfälle nur «die Spitze des Eisberges» bilden und daneben eine Vielzahl an konflikthaften Interaktionen passieren. Letztere sind in der Regel nicht dokumentiert, können allerdings mithilfe von videobasierten Konfliktanalysen aufgezeigt werden. Die Forschungsstelle hat solche Analysen selbst mehrfach durchgeführt (z.B. Analyse zweier Unfallschwerpunkte in Ostermundigen bei Bern bzw. in Langenthal durch verkehrsteiner), welche die oben genannte Aussage untermauern. Im Rahmen des Forschungsprojektes SVI 2011/023 [14] wurde die Methode der Verkehrskonfliktanalyse umfangreich angewandt, wobei im Quervergleich der Fallbeispiele grosse Unterschiede bei den Resultaten (breite Streuung bei der Konfliktchance) festgestellt wurden. Hierbei ist anzumerken, dass bei allen untersuchten Fallbeispielen fast ausschliesslich leichte Konflikte, kaum schwere Konflikte und keine Unfälle zu beobachten waren. Gleichzeitig waren die Unfallzahlen gemäss Unfallstatistik über alle Fallbeispiele hinweg sehr gering oder waren zum Analysezeitpunkt noch nicht verfügbar. Eine Gegenüberstellung der Konfliktanalyse zur Unfallstatistik konnte somit nicht erfolgen. Hinsichtlich alternativer Methoden zur Messung von lokaler Verkehrssicherheit war es daher wichtig, im Rahmen der Forschung konkrete Unfallschwerpunkte zu untersuchen, welche es allenfalls ermöglichen, die Ausprägung der Korrelation von Konfliktanzahl und –schwere zu den effektiven Unfällen zu beschreiben.

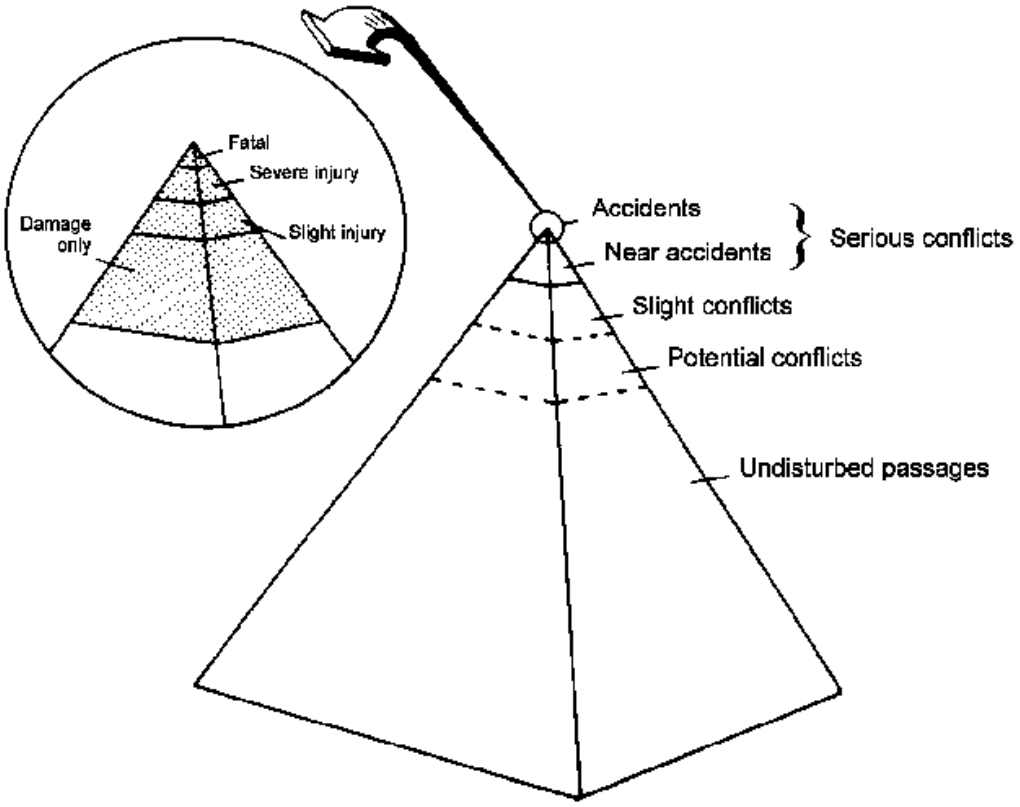


Abb.1 *Pyramidenmodell von Hydén (1987) [18]*

Mit der fortschreitenden Digitalisierung erschliessen sich vermehrt alternative Messverfahren wie videobasierte Verkehrsanalysen, mit deren Hilfe Einschätzungen zur Verkehrssicherheit gegeben werden können, bevor der untersuchte Ort möglicherweise Jahre später als Unfallschwerpunkt in Erscheinung tritt. Bislang erfordert beispielsweise die videobasierte Konfliktbeobachtung aber im Vergleich zur reinen Unfallanalyse relativ hohen Aufwand, weshalb die Analysen meist nur kurze Zeiträume von wenigen Stunden oder Tagen umfassten. Durch Fortschritte in den Bereichen Aufnahmetechnik sowie Automatisierung von Videoanalyseverfahren, ergeben sich immer mehr neue Möglichkeiten für die Quantifizierung verkehrssicherheitsrelevanter Parameter über längere Zeiträume, um die Verkehrssicherheit abseits der Unfallstatistik besser messbar zu machen.

1.2 Stand der Forschung und Ziele der Forschungsarbeit

Um die Problematik der Beurteilung der Verkehrssicherheit aufgrund von Unfalldaten zu umgehen, wurden in der Vergangenheit einige Verkehrskonfliktanalysetechniken entwickelt (vgl. [18], [36]), welche mehrheitlich auf dem Konzept der Beinahe-Unfälle (vgl. [18], [27]) basieren. Solche Beinahe-Unfälle resp. Konflikte sind häufiger als Unfälle (vgl. [36]) und ermöglichen somit das Sammeln von mehr Daten in kürzerer Zeit. Kaparias et al. [25], [26] entwickelten zudem eine Verkehrskonfliktanalysemethode (mit den Indikatoren «Time to Collision», Umfang und Komplexität der Korrekturhandlung sowie der Distanz bis zur potenziellen Kollision), wobei auch der Aspekt der unterschiedlichen Verhaltensweisen von Verkehrsteilnahmegruppen im Strassenverkehr berücksichtigt ist.

Mittlerweile liegen Erfahrungen aus der Praxis vor, in denen diese Verkehrskonfliktanalysetechniken als empirische Methoden zum Einsatz kamen und plausible Ergebnisse lieferten. Besonders umfangreich wurde die Methode beispielsweise im Rahmen des Forschungsprojektes SVI 2011/023 [14] eingesetzt.

Hinsichtlich einer Automatisierung solcher Konfliktanalysen wurden wissenschaftliche Versuchsreihen durchgeführt, wobei vor allem versucht wurde, die sich im Videobild bewegenden Objekte und ihre Trajektorien erfassen und beschreiben zu können, was sich offenbar als grosse Herausforderung darstellt (vgl. [22], [23], [29], [31], [34]). Beispielsweise beschreiben Ismail et al. [22] Schwierigkeiten bei der präzisen und dauerhaften Objekterfassung und Kategorisierung, insbesondere von Zufussgehenden aufgrund ihrer komplexen Verhaltensweisen sowie beim Auftreten mehrerer Objekte, die sich zeitgleich im Videobild bewegen. Problematisch sind zudem Einflüsse, die ebenso wie Objekte «Bewegungen» im Bild auslösen können wie Beleuchtung und Licht-Schatten-Effekte. Dementsprechend waren auch die Resultate der Konfliktanalyse dieser Studie, in welcher übrigens die Indikatoren gemäss [25] zur Anwendung gelangten mit teilweise erheblichen Ungenauigkeiten verbunden.

Ähnliche Probleme und nachteiligen Auswirkungen auf die Qualität der Analyseergebnisse beschreibt Laureshyn [29], der sich in den beiden in [29] durchgeführten Feldstudien jeweils konkreten Beispielen zur Radverkehrssicherheit widmete und dabei beispielsweise die Schwierigkeit der Unterscheidung von Zufussgehenden und Velofahrenden zu einer im Schnitt um 85% erhöhten Messung führte. Darüber hinaus wurden z.T. relevante Konfliktsituationen vom Algorithmus nicht als solche erkannt, weil ein in den Konflikt involvierter Verkehrsteilnehmer erst gar nicht erfasst werden konnte. Laureshyn [29] weist hinsichtlich der Qualität automatisierter Videokonfliktanalysen auf die grosse Bedeutung der Kameraposition (Entfernung und Blickwinkel) sowie den Untersuchungsort selbst und dessen Eigenschaften hin, wobei die für eine möglichst genaue Ermittlung der Position und Geschwindigkeit der sich bewegenden Objekte ideale Aufnahmeposition (gerade über dem Geschehen und den gesamten Untersuchungsort erfassend) nur in den seltensten Fällen zur Verfügung stehen.

Dennoch ist festzustellen, dass insbesondere videobasierte Ansätze grosse Potenziale aufweisen und davon auszugehen ist, dass auch technologische Fortschritte hinsichtlich Automatisierungstechnik erzielt werden konnten, allerdings automatisierte Verkehrskonfliktanalysen immer noch in einer relativ frühen Phase der Entwicklung stehen.

Der Forschungsbedarf umfasst vor allem die Fragen, welche objektiven Indikatoren abseits von Unfallzahlen herangezogen werden können, um lokale Verkehrssicherheit überhaupt valide messbar zu machen, welche heute zumindest in Ansätzen verfügbaren Methoden für die Messung geeignet sein könnten, und welche Anforderungen sich daraus an die Erhebungstechnik sowie Analysetools ergeben

Nachstehend sind die aus Sicht der Forschungsstelle zentralen Leitfragen zusammengestellt, auf welche die Forschung eine Antwort geben soll.

- Welche Indikatoren können geeignet sein, um lokale Verkehrssicherheit zu messen?
- Welche Ansätze und Methoden existieren bereits? Welche Einsatzmöglichkeiten und Potenziale haben diese? In welchen Bereichen weisen sie Schwächen auf, wo bestehen Einsatzgrenzen?
- Können die definierten Indikatoren mit der/den im Feld getesteten Methode/n gemessen werden? Welche Messgenauigkeit wird für die verschiedenen Indikatoren unter unterschiedlichen Bedingungen (Verkehrssituation, Wetterbedingungen, Lichtverhältnisse, etc.) erreicht?
- Welche Rückschlüsse ergeben sich für die praktische Anwendbarkeit (örtliche Rahmenbedingungen, Voraussetzungen, begünstigende/erschwerende Faktoren, Einsatzgrenzen, etc.) der Methode?
- Welche Anforderungen ergeben sich hinsichtlich Erhebungs- und Auswertetechniken, insbesondere in Abhängigkeit der Analysezeiträume?

1.3 Vorgehen

Um in der Forschungsfrage nach alternativen Methoden zur Messung lokaler Verkehrssicherheit einen entscheidenden Schritt weiterzukommen, bedurfte es im Rahmen der Forschungsarbeit:

- einer Definition von messbaren Indikatoren,
- der Entwicklung einer oder mehrerer Messmethoden,
- deren Prüfung durch Feldversuche sowie
- einer Validierung durch herkömmliche Methoden.

Die Arbeiten erfolgten in unterschiedlichen Arbeitsschritten, die nachfolgend genauer erläutert sind. Ausgehend von der Grundlagenerarbeitung und Literatursynthese wurden zunächst die möglichen Indikatoren definiert und die Methoden entwickelt. Die Methodentestung erfolgte im Rahmen von umfangreichen Feldversuchen und anschliessender Auswertung und Validierung der Messergebnisse. Die in Kapitel 1.2 dargelegten Leitfragen steuerten dabei das Vorgehen in jedem Arbeitsschritt.

1.3.1 Zusammenstellen der Grundlagen und Literatur

In einem ersten Arbeitsschritt wurden relevante Grundlagen wie Normen, Grundlagen zur Unfallstatistik, Informationen über Erhebungstechniken und Auswertetools, relevante Literatur und wissenschaftliche Publikationen sowie gut dokumentierte Projektbeispiele zusammengetragen. Der Arbeitsschritt diente insbesondere dazu, Kenntnisse über Indikatoren und Messmethoden zu gewinnen, die für die Forschungsfrage von Bedeutung sein können. Die Recherchen nach Ansätzen und Methoden umfassten dabei neben den Möglichkeiten der Videoanalyse, die schliesslich weiterverfolgt wurde, auch andere Stossrichtungen.

1.3.2 Indikatorendefinition & Methodenentwicklung

Der Einsatz einer vielfältigen Methodik (Kombination von Verkehrskonfliktanalyse, Verkehrstechnischer Untersuchungen, Befragungen und Blickverhaltensanalysen) zur Beurteilung der Verkehrssicherheit von flächigem Queren in Ortszentren, hat sich bewährt (vgl. [14]). Jedoch erfüllt diese nicht die Anforderung einer niederschwelligen und vor allem längerfristig einzusetzenden Vorgehensweise, da insbesondere die dieser Methode zugrunde liegende manuelle Bewertung von Begegnungssituationen sehr aufwendig ist. Aufgrund der positiven Erfahrungen dieser Studie, wurde bei der Indikatorendefinition und der Methodenentwicklung jedoch ein besonderer Fokus auf Verkehrskonflikte bzw. Beinahe-Unfälle gelegt. In Anlehnung an die herkömmliche, unfallbasierte Methode wurde darüber hinaus aber auch darauf geachtet, dass neben dem eigentlichen Sicherheitsindikator auch möglichst viele weitere Daten mit der alternativen Methode erhoben werden können. Dies insbesondere für eine bessere Interpretation und Beurteilung der Ergebnisse.

Die zu entwickelnde Methode sollte möglichst auf eine auf Sicherheitsaspekte beruhende Erfassung des Verkehrsgeschehens hinsichtlich der Benutzung der Anlage durch die verschiedenen Verkehrsteilnehmergruppen abzielen. Konkret sollten mit der Methode die Verkehrsabläufe dahingehend analysiert werden, um die zuvor definierten sicherheitsrelevanten Indikatoren messen zu können. Der Fokus wurde dabei auch darauf gelegt, eine möglichst effiziente Methode zu entwickeln, die es erlaubt, die Verkehrssicherheit eines spezifischen Ortes beurteilen zu können. Die Recherche nach methodischen Ansätzen wurde anfänglich breit angelegt. Besondere Aufmerksamkeit erhielt schliesslich die Weiterverfolgung des Ansatzes einer möglichst automatisierten Analysemethode, welche in der Lage ist, relevante Verkehrssituationen (z.B. Begegnungen zweier Verkehrsteilnehmender, die miteinander in Interaktion treten müssen) im Sinne einer Vorselektion zu identifizieren und, wenn möglich, sogar die Trajektorien und deren Parameter (z.B. Geschwindigkeitsanpassungen, Korrekturhandlungen, etc.) zu speichern, um diese im Anschluss anhand von in

Frage kommenden Sicherheitsindikatoren auswerten und quantifizieren zu können. Gemäss den unter Beizug der Begleitkommission formulierten Anforderungen, welche die alternative Methode möglichst erfüllen sollte, wurde in weiterer Folge der bildbasierte Ansatz (automatisierte Analyse von Videoaufnahmen) für die Vertiefung und Testung im Rahmen dieses Projektes ausgewählt. Anhand der Rechercheergebnisse zu Software-Anwendungen konnten die Produkte von zwei kommerziellen Anbietern in die engere Auswahl genommen werden. Beiden Anwendungen ist gemeinsam, dass die Auswertungen der Videodaten zu grossen Teilen automatisiert erfolgen und Algorithmen zur Ermittlung von Sicherheitsindikatoren beinhalten.

1.3.3 Durchführung von Feldversuchen und Validierung

Im Rahmen von Feldversuchen wurde die alternative Methode unter realen Bedingungen und über einen längeren Zeitraum hinweg getestet. Die konkrete Versuchsanordnung sowie der räumliche und zeitliche Umfang der Tests konnten erst im Zuge der Methodenentwicklung definiert werden. Die Forschungsstelle konnte Feldversuche an verschiedenen Orten durchführen, um die Methode an unterschiedlichen Infrastrukturen und zu verschiedenen Bedingungen testen zu können. Die Testung über einen längeren Zeitraum wurde schliesslich auf einen einzelnen ausgewählten Ort beschränkt.

Die Versuchsanordnung wurde in drei Phasen unterteilt.

Phase 1 umfasste zunächst Pre-Tests (im Rahmen der Methodenentwicklung) anhand bereits bestehendem Videomaterial. Ziel dieser Phase war es, erste Erfahrungen in der Anwendung von in Frage kommender Softwaretools zu sammeln. Dieser Schritt diente insbesondere zur Definition des Vorgehenskonzeptes der weiteren Feldversuchsphasen.

In Phase 2 wurden umfangreiche Feldversuche durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Testung unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen, d.h. verschiedene Infrastrukturanlagen bzw. Anlagen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Folgende Rahmenbedingungen wurden bei der Definition dieser Feldversuchsreihe in Betracht gezogen, wobei bei Wahl der Orte auf das Wissen und das Interesse innerhalb der Begleitkommission zurückgegriffen wurde:

- Lage im räumlichen Kontext (ausserorts/innerorts)
- Art der Infrastrukturanlage (Strecke/Knoten/LSA-Knoten/Kreisverkehr/Querungsstelle)
- Nutzungsintensität (hohes/geringes Verkehrsaufkommen sowie Zusammensetzung des Verkehrs)
- Geschwindigkeitsregime (Signalisation/tatsächliches Geschwindigkeitsniveau - V85)

Um möglichst viele strukturelle Rahmenbedingungen in die Studie integrieren zu können, wurde in dieser Phase der zeitliche Umfang der Tests auf einen Zeitraum von drei Tagen pro Standort beschränkt. Ziel dieser Phase war es, Erkenntnisse darüber zu gewinnen, unter welchen Rahmenbedingungen die Methode besser oder weniger gut funktioniert respektive wo möglicherweise Einsatzgrenzen der Methode vorliegen.

Neben der zu testenden neuen Methode wurden in Phase 2 Begleituntersuchungen, allen voran manuelle Konfliktanalysen durchgeführt, um die Messergebnisse nachträglich besser beurteilen zu können. Sie dienen ausserdem zur Validierung der Messergebnisse.

In Phase 3 wurde ein ausgewählter Untersuchungsort ein weiteres Mal, über den Zeitraum von einer Woche untersucht. Ziel dieser Phase war es, die Zuverlässigkeit der Datenerhebung sowie die Stabilität der Messergebnisse zu überprüfen.

Die Validierung der alternativen Methode erfolgte anhand qualitativer Überprüfungen unter Beizug der Ergebnisse der verkehrstechnischen Begleituntersuchungen (Qualitätsprüfung allgemein) sowie anhand der Ergebnisse der manuellen Konfliktanalyse und der Unfalldaten (Gegenüberstellung der Sicherheitskenngrösse).

2 Methodenentwicklung

2.1 Begriffsdefinitionen

Im Zuge der Methodenentwicklung wurden die Rechercheergebnisse zu möglichen Methodenansätzen einer Beurteilung unterzogen. Dabei wurden folgende vier Themenbereiche berücksichtigt, welche zum besseren Verständnis nachfolgend erläutert sind.

- **Sicherheitsindikatoren**
  = Grössen, die für die Beurteilung des Sicherheitsniveaus herangezogen werden.

- **Erhebungsdaten**
  = Daten, die mittels geeigneter Erhebungsmethoden aufgezeichnet werden können. Diese umfassen den/die eigentlichen Sicherheitsindikator/en bzw. die für deren Ermittlung nötige Grössen sowie weitere für die Beurteilung des Sicherheitsniveaus hilfreiche Daten.

- **Gütekriterien**
  = Kriterien, welche die Messung bzw. den Datenumfang und die Datenqualität beeinflussen.

- **Erhebungsmethoden**
  = Methoden zur Messung der Erhebungsdaten.

2.2 Sicherheitsindikatoren

Als herkömmliche Sicherheitsindikatoren zur Messung lokaler Verkehrssicherheit dienen heute primär die Anzahl und Schwere von polizeilich registrierten Unfällen. Zu den vielversprechendsten alternativen Sicherheitsindikatoren zählen Beinahe-Unfälle und Konflikte, da diese sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen wie die tatsächlichen Unfälle. Darüber hinaus existieren aber auch konfliktunabhängige Indikatoren, welche ebenfalls Rückschlüsse auf das Sicherheitsniveau zulassen können.

2.2.1 Tatsächliches Unfallgeschehen

Unfallereignisse gelten als über Jahrzehnte bewährter und zuverlässig einsetzbarer Sicherheitsindikator zur Messung und Beurteilung von Verkehrssicherheit. Als primärer Indikator gilt das polizeilich registrierte Unfallereignis bzw. in weiterer Folge die Anzahl registrierter Unfälle, welche sich innerhalb eines definierten Zeitraumes an einem definierten Ort ereignet haben. Darüber hinaus werden weitere Ausprägungen der Unfallereignisse, welche als Erhebungsdaten im Zuge der Unfallprotokollierung erfasst werden, einbezogen, um den Sicherheitsindikator zu verfeinern. Typischstes Beispiel ist die Unterteilung in Sachschadensunfälle und Unfälle mit Personenschaden sowie deren Kategorisierung in Unfälle mit Leichtverletzten, Schwerverletzten sowie Getöteten oder aber auch die Unterscheidung nach Unfalltypen.

2.2.2 Konflikte anhand standardisierter Kriterien

Konflikte können auf unterschiedliche Weise gemessen werden. Häufig werden beobachtete Verkehrssituationen (Beobachtungen vor Ort oder manuelle Auswertung von Videoaufnahmen), in der Regel Interaktionen von zwei oder mehreren Verkehrsteilnehmenden, anhand von Kriterien einer Beurteilung unterzogen. Diese Kriterien umfassen zeitliche und räumliche Komponenten wie Zeit und Distanz bis zu einer potenziellen Kollision sowie den

Umfang und die Komplexität von Korrekturhandlungen, welche von Beteiligten zur Vermeidung einer Kollision gesetzt werden. Die Interaktionen können somit unterschieden werden in konfliktfreie Begegnungen, leichte und schwere Konflikte bis hin zu tatsächlichen Kollisionen. Der Ansatz, Konflikte anhand von Videoaufnahmen, anstatt manuell, automatisiert mittels einer geeigneten Software auszuwerten, wird bereits seit einigen Jahren verfolgt. Waren es bis vor kurzem noch ausschliesslich wissenschaftliche Studien, werden mittlerweile auch kommerzielle Lösungen auf dem Markt angeboten. Die gängigsten dabei verwendeten Indikatoren sind:

- Time To Accident (TTA)
  Zeit bis zu einer potenziellen Kollision zweier Verkehrsteilnehmer, die zum Zeitpunkt des Beginns einer Korrekturhandlung (z.B. Bremsen) noch verbleibt
- Time To Collision (TTC), siehe auch *Abb.2* auf Seite 31
  Zeit bis zu einer potenziellen Kollision zweier Verkehrsteilnehmer, unabhängig vom Zeitpunkt einer allfälligen Korrekturhandlung (kontinuierliche Messung)
- Umfang und Komplexität von Korrekturhandlungen (z.B. Bremsmanöver oder Ausweichmanöver)

2.2.3 Konfliktunabhängige Indikatoren anhand standardisierter Kriterien

Im Unterschied zu Konflikten, wo die Begegnung bzw. Interaktion von zwei oder mehreren Verkehrsteilnehmenden vorausgesetzt wird, existieren auch konfliktunabhängige Indikatoren, welche für die Beurteilung der Verkehrssicherheit herangezogen werden können. Häufig werden auch diese mittels Beobachtung des Verkehrsgeschehens vor Ort oder manuelle Auswertung von Videoaufnahmen ermittelt. Diese Indikatoren finden aber ebenfalls vermehrt Anwendung in automatisierten Verfahren und kommerziellen Lösungen. Die gängigsten verwendeten konfliktunabhängigen Indikatoren sind:

- Post Encroachment Time (PET), siehe auch *Abb.3* auf Seite 32
  Zeitunterschied zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden bezogen auf einen gemeinsamen räumlichen Bereich, den beide nacheinander aus unterschiedlichen Richtungen befahren (unabhängig einer potenziellen Kollision).
- Gap Acceptance
  Zeitliche Lücken, die für das Ein- bzw. Abbiegen oder Queren von nicht vortrittsberechtigten Verkehrsteilnehmenden genutzt werden
- Verkehrsregelverletzungen wie beispielsweise Häufigkeit und Umfang von Geschwindigkeitsübertretungen, ordnungswidrige Benutzung von Verkehrsanlagen, Nichtbeachtung von Lichtsignalen (Rotlichtmissachtung).

2.2.4 Weitere Sicherheitsindikatoren

Weitere Sicherheitsindikatoren stammen überwiegend aus dem Bereich der subjektiven Sicherheitsbeurteilung. Mittels Befragungen kann beispielsweise ermittelt werden, ob sich Verkehrsteilnehmende an einem bestimmten Ort sicher fühlen bzw. eine Infrastrukturanlage als gefährlich eingeschätzt wird. Typischerweise erfolgt die Ermittlung des sogenannten «Gefährlichkeitsurteils» anhand eines umfassenderen Fragebogens, der nicht nur Fragen zu einer konkreten Verkehrsanlage, die untersucht wird, beinhaltet.

2.3 Herkömmliche Methoden und alternative Ansätze

Die klassische herkömmliche Methode der Analyse von Unfalldaten hat den Vorteil, dass sie flächendeckend und unabhängig von örtlichen oder infrastrukturellen Eigenschaften einsetzbar ist. Mittels Unfallprotokoll werden im Ereignisfall (durch die Polizei) einerseits Daten zur Unfallstelle sowie zum Unfallhergang und anderseits zu den am Unfall Beteiligten erfasst. Diese etablierte Form der Datenerfassung schafft eine landesweite Datengrundlage für die Verkehrssicherheitsarbeit. Innerhalb der in der Schweiz zur Anwendung

entwickelten Infrastruktur-Sicherheitsinstrumente ISSI hat die Unfallanalyse ihren wichtigsten Stellenwert im sogenannten Black Spot Management (BSM) zur Identifizierung, Analyse und Sanierung von Unfallschwerpunkten.

Da Analysen anhand des Unfallgeschehens, wie bereits in der Ausgangslage beschrieben, wesentliche Nachteile aufweisen, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gezielt alternative Ansätze gesucht, welche diese Methode ergänzen können und insbesondere auch proaktiv anwendbar sind.

2.3.1 Unfalldaten und Black Spot Management

Meldepflichtige Verkehrsunfälle sowie, wenn ein an einem Unfall Beteiligter dies verlangt, werden durch die Polizei aufgenommen. Die Erfassung aller relevanten Informationen erfolgt mittels dem vom ASTRA erlassenen Unfallaufnahmeprotokoll. Die erfassten Unfalldaten werden in weiterer Folge in das Informationssystem Strassenverkehrsunfälle eingepflegt, wo diese zusammen mit Daten aus anderen Quellen zur Analyse und für statistische Zwecke gespeichert werden.

Das Unfallaufnahmeprotokoll 2018 (UAP2018) besteht aus drei getrennten Formularblättern. Nachfolgend sind die wesentlichen Erhebungsdaten dieser Blätter zusammengestellt.

Formularblatt «Unfall»

- Ort (exakte Verortung sowie Unterscheidung nach innerorts/ausserorts/Autobahn und weitere Angaben mit Ortsbezug)
- Zeitpunkt (Datum und Zeit)
- Verkehrsaufkommen (schwach / normal / stark / Kolonne)
- Witterung (schön / bedeckt / Regen / Schneefall /…)
- Strassenzustand (trocken / feucht / nass / schneebedeckt /…)
- Strassenbeleuchtung (keine / ausser Betrieb / in Betrieb
- Beschrieb des Unfallhergangs und Skizzenzeichnung (Bewegungsrichtungen und Art der Bewegungen der Beteiligten Personen/Objekte, Kollisionspunkt) -> insbesondere auch für die Zuordnung zu einem Unfalltyp wichtig

Formularblatt «Objekt»

- Angaben zum Objekt (Fahrzeug / Zufussgehende / FäG)
- Hauptverursacher (ja / nein)
- Anprall auf anderes Objekt (Elemente des Strassenraums od. Seitenraums / Tier)
- Angaben zum Fahrzeug (Fahrzeugart / Kontrollschild / Anhänger /…)
- Angaben zu Lenkenden bzw. Zufussgehenden
  - Fahr- bzw. Gehzweck / Führerausweis / Alkohol, Arzneimittel, Betäubungsmittel)
  - Alter und Geschlecht
  - Unfallfolgen (nicht, leicht, erheblich oder lebensbedrohlich verletzt / unmittelbar oder innert 30 Tagen gestorben /…)
  - Schutzsystem (kein / Sicherheitsgurt / Helm /…)

Formularblatt «Mitfahrende»

- Angaben zu Mitfahrenden
  - Alter und Geschlecht
  - Unfallfolgen (nicht, leicht, erheblich oder lebensbedrohlich verletzt / unmittelbar oder innert 30 Tagen gestorben /…)
  - Schutzsystem (kein / Sicherheitsgurt / Helm /…)

Die gemäss Unfallaufnahmeprotokoll erfassten Erhebungsdaten bilden einen wichtigen Orientierungsrahmen bei der Entwicklung von alternativen Methoden im Bereich der Erhebung von Informationen, die zusätzlich zum konkreten Sicherheitsindikator für die Beurteilung von Bedeutung sein können.

Am Beginn des Black Spot Managements steht zunächst die Identifizierung von Unfallschwerpunkten anhand der registrierten Einzelunfälle. Dabei wird innerhalb eines definierten Suchperimeters (abhängig von der Strassenart und Ortslage) die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden über die Schwerekategorien gewichtet und folglich ein sogenannter Berechnungswert ermittelt, welcher wiederum einem entsprechenden Grenzwert gegenübergestellt wird. Ein Unfallschwerpunkt liegt dann vor, wenn der Berechnungswert grösser oder gleich dem Grenzwert ist.

Wichtige statistische Kenngrössen der Unfallforschung bilden insbesondere die Unfallziffer sowie die Verletztenziffer, wobei die Anzahl der Unfälle respektive die bei Unfällen verletzten Personen bei diesen Grössen anhand des Verkehrsaufkommens relativiert sind. Sie sind zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus einer Verkehrsanlage grundsätzlich besser geeignet als der nicht relativierte Berechnungswert des Black Spot Managements und folglich auch für eine Gegenüberstellung zu alternativen Messungen eher einsetzbar.

Der Annahme folgend, dass ein alternativer Indikator in gewisser Weise in Verbindung zum tatsächlichen Unfallgeschehen steht, indem über den Indikator Hinweise auf ein potenzielles Unfallrisiko abgeleitet werden könnten, war es auch hinsichtlich der Validierung naheliegend, ein Konzept für die mittels alternativer Indikatoren zu ermittelnden sicherheitsrelevanten Ereignissen zu entwickeln, welches das Verletzungsrisiko berücksichtigt. Diese Einschätzung ergab sich auch aus den Besprechungen innerhalb der Begleitkommission.

2.3.2 Anforderungen und Erwartungen an die alternative Methode

Für die Auswahl eines geeigneten Methodenansatzes und die Entwicklung der konkreten Methode wurden unter Beteiligung der Begleitkommission dieses Forschungsprojektes die Anforderungen und Erwartungen an die alternative Methode diskutiert. Hinsichtlich Erhebungsdaten zeigte sich, dass ein ausgeprägtes Bedürfnis besteht, neben dem eigentlichen Sicherheitsindikator, möglichst auch weitere Erhebungsdaten miterfassen zu können. In Zusammenhang mit Erhebungsdaten wurden folgende Daten als besonders wichtig genannt (Wichtigkeit gemäss Reihenfolge):

1. Geschwindigkeiten
2. Bewegungslinien (Trajektorien)
3. Verkehrsmengen und Zusammensetzung des Verkehrs
4. Erfassung aller Verkehrsteilnehmenden (inkl. Fussverkehr, FäG)

Verkehrsregelverletzung, individuelle Faktoren von Objekten (Fahrzeugen / Personen) sowie äussere Verhältnisse (Witterung, Strassenzustand, Beleuchtung) wurden hingegen für weniger relevant befunden.

Diese Daten können einerseits wichtiger Bestandteil respektive ergänzendes Kriterium bei der Definition des Sicherheitsindikators oder im Hinblick auf die Beurteilung (z.B. Exposition / Unfallrisiko) relevant sein. Andererseits können sie grundsätzlich auch für spätere, detaillierter Analysen (z.B. zur Ableitung von massgebenden Sicherheitsdefiziten und Bestimmung von Massnahmen) sowie für andere Zwecke dienlich sein.

Nebst konkreten Erhebungsdaten wurden zudem auch Gütekriterien, welche die alternative Methode erfüllen soll/muss, anhand folgender konkreter Fragen diskutiert:

- Untersuchungsperimeter:
  Soll ein grösserer Untersuchungsraum abdeckbar sein oder soll eher ein lokal begrenzter Raum im Fokus stehen?
  Diskussionsergebnis: Lokal begrenzte Untersuchungsperimeter werden gegenüber grösseren Perimetern bevorzugt. Dies insbesondere vor dem Hintergrund, dass überwiegend punktuelle Stellen wie Knoten, Einmündungen oder Querungsstellen hinsichtlich Verkehrssicherheit zu beurteilen sind.

- Flexibilität des Einsatzgebietes:
  Ist es ausreichend, wenn nur bestimmte Anlagen/Infrastrukturtypen respektive nur bestimmte Lagen untersucht werden können?
  Diskussionsergebnis: Die Methode soll möglichst flexibel einsetzbar sein und ein möglichst breites Spektrum an Untersuchungssituationen abdecken können. In diesem Zusammenhang wird auch der Einbezug des nicht motorisierten Verkehrs thematisiert, der als wichtig erachtet wird.

- Untersuchungszeitraum:
  Wie wichtig sind lange Untersuchungszeiträume? Wie sind die Zielvorstellungen hinsichtlich der zeitlichen Dauer?
  Diskussionsergebnis: Der Untersuchungszeitraum soll nicht zu kurz, muss aber auch nicht zwingend sehr lange sein. Eine vollständige Woche wird als sinnvolle und ausreichende Analysedauer erachtet.

- Tageszeitraum:
  Soll die Methode auch nachts (bei Dunkelheit) einsetzbar sein?
  Diskussionsergebnis: Zu diesem Thema liess sich aus der kontroversen Diskussion kein Votum ableiten. Es wird darauf hingewiesen, dass mehrheitlich eine Strassenbeleuchtung vorhanden sein wird.

- Aufwand / Kosten:
  Wie wichtig ist es, dass die Datenerhebung und -auswertung möglichst einfach und kostengünstig erfolgen kann?
  Diskussionsergebnis: Aufwand / Kosten werden als wichtiges Kriterium betrachtet. Nur wenn sich Aufwand und Kosten in vertretbarem Rahmen bewegen, wird die Methode auch tatsächlich eingesetzt werden können.

- Rekonstruierbarkeit:
  Wie wichtig ist der Bezug zum Unfallgeschehen?
  Diskussionsergebnis: Dass ein Bezug zum Unfallgeschehen herstellbar ist, wird als essenziell erachtet. Mit der Methode erhobenen Informationen sollen jenen aus der Unfallanalyse gegenübergestellt werden können.

- Nachvollziehbarkeit:
  Wie wichtig ist es, dass der Sicherheitsindikator selbst bestimmt bzw. eingestellt (situationsabhängig z.B. hinsichtlich eines zu definierenden Grenzwertes angepasst) werden kann bzw. die «Wertermittlung» nachvollziehbar ist?
  Diskussionsergebnis: Die Nachvollziehbarkeit ist ein wesentliches Kriterium, da die Methode und die erzielten Resultate Diskussionen standhalten und deshalb entsprechend nachvollziehbar sein müssen. Die Bestimmung von Sicherheitsindikatoren bzw. Kenngrössen ist in diesem Zusammenhang zu sehen.

2.3.3 Mögliche Erhebungsmethoden für alternative Ansätze

Zentrales methodisches Element für eine alternative Messmethode von Verkehrssicherheit stellt die Datenerhebung dar. Anhand der zu diesem Thema durchgeführten Recherchen, können drei unterschiedliche Gruppen gebildet werden.

- Technische Erfassung (von Ereignissen) durch Sensoren
- Manuelle Erfassung (von Ereignissen) durch Rapportierung
- Nutzung/Auswertung von Sekundärdaten

Zur ersten Gruppe der Erfassung durch Sensoren zählen sämtliche Arten von technischen Erhebungsformen, die Rohdatenerfassungen respektive Messungen mithilfe technischer Hilfsmittel zulassen. Typische Anwendungsbeispiele aus der Verkehrsdatenerhebung und dem Verkehrsmanagement sind Schläuche oder Platten (Drucksensor), Schlaufen oder Radar (elektromagnetisch) sowie Lichtschranken, Laserscanner oder Videokameras (optische Sensoren) bis hin zu Wärmebildkameras (Temperatur -> transformiert zu Bildinformation). Diese technischen Erhebungsmethoden haben den grossen Vorteil, dass sie in verschiedenen Bereichen zum Einsatz kommen und weitgehend erprobt sind, dementsprechend verfügbar sind und ein standardisiertes Erhebungsverfahren, weitgehend unabhängig von äusseren Rahmenbedingungen und lückenlose Datenerhebungen über längere Zeiträume weitgehend garantieren können. Der Detailierungsgrad ist tendenziell höher (insbesondere bei Bildinformation), hingegen ist der Untersuchungsraum methodisch bedingt begrenzt.

Bei der manuellen Erfassung durch Rapportierung stehen verschiedene Submethoden zur Verfügung. Zum Beispiel können Erhebungen durch geschultes Personal im Rahmen von Beobachtungen vor Ort durchgeführt werden. Ein auf dem Themengebiet der Verkehrssicherheitsarbeit typisches Anwendungsbeispiel hierfür ist die Konfliktbeobachtung. Diese zeichnet sich durch einen geringen Einsatz technischer Hilfsmittel aus, erfordert allerdings eine hohe Aufmerksamkeit und Konzentration der beobachtenden Personen auf das Verkehrsgeschehen für die Datenerhebung (Erkennen eines Konflikts und Erfassen aller relevanten Information wie das Dokumentieren der beteiligten Verkehrsteilnehmenden, der Abschätzung von Geschwindigkeit, Distanz oder Ausweichhandlungen) in Echtzeit. Beobachtungen dieser Art sind deshalb nur in einem beschränkten zeitlichen Rahmen von wenigen Stunden (mit Unterbrechung für Pausen für die beobachtenden Personen) durchführbar. Zudem erfordern komplexere Infrastrukturanlagen den Einsatz mehrerer Personen gleichzeitig. Im Hinblick auf die Reliabilität ist die Schulung des eingesetzten Personals von sehr grosser Bedeutung, um Unterschiede in der Konfliktbewertung zwischen den beobachtenden Personen möglichst gering zu halten. Eine andere Möglichkeit der Datenerhebung besteht über den Einsatz von Probanden, die über einen längeren Zeitraum sicherheitsrelevante Informationen wie beispielsweise selbst erlebte oder beobachtete Konfliktsituationen auf ihren Alltagswegen (mit dem Motorfahrzeug, Velo oder zu Fuss) rapportieren. Eine weitere Methode ist die Durchführung von Befragungen, wobei bei diesen eher die subjektive Einschätzung bzw. das Sicherheitsempfinden im Fokus steht.

Bei der dritten Gruppe der Sekundärdaten erfolgt keine eigene, direkt zum Zweck der Verkehrssicherheitsmessung abzielende Datenerhebung, sondern es wird auf Daten zurückgegriffen, die aus anderen Motiven heraus erhoben werden. Hierzu zählen zum Beispiel Mobilfunk-Netzdaten oder On-Board-Fahrzeugdaten. Insbesondere On-Board-Fahrzeugdaten haben ein gewisses Potenzial, hinsichtlich Verkehrssicherheit relevante Informationen zu beinhalten. Die neuesten Entwicklungen auf diesem Gebiet zielen darauf ab, dass durch Nutzung einer App oder eines im Fahrzeug installierten Sensors umfassende Daten, unter anderem auch zum Fahrverhalten gespeichert werden. Die Daten werden von den jeweiligen Vertragspartnern wie Fahrzeugwerkstätten, Tankstellenbetreibern Versicherungsunternehmen etc. für deren Zwecke genutzt. Die Vorteile einer solchen Erhebungsmethode sind vor allem die dauerhafte Datenerhebung ohne eigenen Erhebungsaufwand. Von Nachteil sind die Beschränkung auf den Motorfahrzeugverkehr, die eingeschränkte Transparenz hinsichtlich Methodik und Datenqualität sowie die Datenzugänglichkeit (Möglichkeit und Kosten der Datennutzung).

2.4 Konkretisierung der Methode eines bildbasierten Ansatzes

Unter Berücksichtigung der Inputs aus der Begleitkommission zu den Themen Erhebungsdaten und Gütekriterien wurde der gemeinsame Entschluss gefasst, einen bildbasierten Ansatz vertieft weiterzuverfolgen und die Methode dahingehend zu konkretisieren.

Konkret wird unter «bildbasiertem Ansatz» die Erhebung, Auswertung und Analyse von Videoaufnahmen verstanden. Für die weitere Methodenentwicklung wird das Prinzip verfolgt,

- mittels möglichst automatisierter Auswerteverfahren die Trajektorien der unterschiedlichen Verkehrsteilnehmenden aus Videodaten zu extrahieren,
- diese in ein räumliches Koordinatensystem zu übertragen (Georeferenzierung),
- um schliesslich nachgelagerte Analyseverfahren wie Messungen auf Basis der Trajektorien (zeitlich und räumlich) durchführen zu können, die wesentlich für mögliche Sicherheitsindikatoren sind.

Bezugnehmend auf die mit der Begleitkommission diskutierten Anforderungen und Erwartungen, welche die zu entwickelnde Methode idealerweise erfüllen kann, weist die Videoanalyse gegenüber anderen Ansätzen folgende günstige Eigenschaften auf:

- Aus Videodaten kann über die Extraktion von Trajektorien der sich im Raum bewegenden Objekte ein breites Spektrum an Informationen gewonnen werden, allen voran verkehrlich relevante Informationen.
- Durch zumindest zwischenzeitliche Speicherung der Videodaten respektive relevanter Sequenzen, ist eine hohe Nachvollziehbarkeit gewährleistet.
- Aufwand und Kosten können durch automatisierte Auswerteprozesse reduziert werden.
- Der Untersuchungsperimeter ist lokal begrenzt.
- Es kann in Anbetracht der theoretisch einsetzbaren Sicherheitsindikatoren eine gute Rekonstruierbarkeit (z.B. hinsichtlich eines Bezugs zu Unfalldaten) erwartet werden.
- Es darf von einer relativ hohen Flexibilität der Einsatzmöglichkeiten ausgegangen werden, wobei dies in Abhängigkeit von erhebungstechnischen Anforderungen steht.
- Die Länge des Untersuchungszeitraums sowie ein tageszeitunabhängiger Einsatz stehen ebenfalls in Abhängigkeit von erhebungstechnischen Fragen.

2.4.1 Sicherheitsindikatoren für automatisierte Videoanalysen

Für die Suche nach möglichen Sicherheitsindikatoren für automatisierte Videoanalysen wurde eine vertiefte Literaturrecherche unternommen, wobei unter anderem nach allgemeinen Begriffen wie «Videoanalyse», «Sicherheitsindikatoren», «Trajektorien», «Unfallrisikoabschätzung» oder «Verkehrskonflikte» sowie nach bereits bekannten Indikatoren wie «Time to Accident», «Time To Collision» oder «Post Encroachment Time» gesucht wurde. Dabei konnte auch eine Metastudie ausfindig gemacht werden, die im Rahmen des internationalen Forschungsprojektes «InDeV: In-Depth understanding of accident causation for Vulnerable road users» [19] durchgeführt wurde. Diese Metastudie [21] sowie weitere Publikationen zu alternativen Beurteilungsmöglichkeiten der Verkehrssicherheit wie beispielsweise [24] oder [35] geben einen guten Überblick über Sicherheitsindikatoren und deren Validität. Sie enthalten ausserdem die weiterführenden Verweise auf die jeweils einbezogenen Studien.

Die in [21] durchgeführte Recherche über den Einsatz alternativer Sicherheitsindikatoren, welche theoretisch anhand von extrahierten Trajektorien aus Videodaten ermittelt werden können, ergab folgende drei am häufigsten in Studien verwendete Indikator-Gruppen:

- Time To Collision (TTC)
- Post Encroachment Time (PET)
- Bremsmanöver

Insbesondere TTC und PET konnten bereits als valide einsetzbare Indikatoren bestätigt werden. Die Autoren von [21] merken in diesem Zusammenhang allerdings an, dass es für TTC nur wenige Validierungsstudien mit Bezug zum tatsächlichen Unfallgeschehen gibt. Ausserdem gilt es zu berücksichtigen, dass TTC nicht direkt anhand extrahierter Trajektorien berechnet werden kann, sondern zur Ermittlung des Indikatorwertes den Einsatz eines Berechnungsmodells für die Bewegungsprognose (motion prediction) erfordert. Dies ist nötig, um überhaupt einen möglichen Kollisionskurs, der als Grundvoraussetzung bei TTC gilt, ermitteln zu können. Bisher werden hierfür meist einfache Modelle verwendet, bei denen die zukünftige Position eines Objektes anhand der zum jeweiligen Zeitpunkt messbaren Bewegungsrichtung und der Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitsveränderungen abgeleitet wird. Dies resultiert pro Berechnungsschritt in einem einzigen konkreten Prognosepfad. Hinsichtlich der Validität haben sich diese einfachen Modelle nur für weniger komplexe Begegnungssituationen wie beispielsweise «Beinahe Auffahrsituationen» mit Beteiligung zweier Objekte in gleicher Fahrtrichtung als geeignet erwiesen. Für die TTC-Berechnung in komplexeren Begegnungssituationen scheinen Experimente mit probabilistischen Modellen der Bewegungsprognose, bei denen je Berechnungsschritt mehrere Prognosepfade und deren Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, zu valideren Ergebnisse zu führen. Zu diesen Modellen wird noch weiter geforscht.

Die nachfolgende Abbildung zeigt anhand eines einfachen Beispiels einer Begegnungssituation das Grundprinzip des Sicherheitsindikators TTC. Über die gesamte Dauer der Begegnungssituation (solange ein möglicher Kollisionskurs besteht) wird die noch verbleibende Zeit bis zur Kollision laufend berechnet. Massgebend ist schliesslich der in der gesamten Sequenz ermittelte tiefste Indikatorwert (TTC_{Min}).

Als Grenzwerte für sicherheitsrelevante TTC-Begegnungssituationen werden häufig 1.5s, 2s und 3s verwendet, wobei grundsätzlich gilt: Je tiefer der Indikatorwert TTC, desto kritischer die jeweilige Situation.

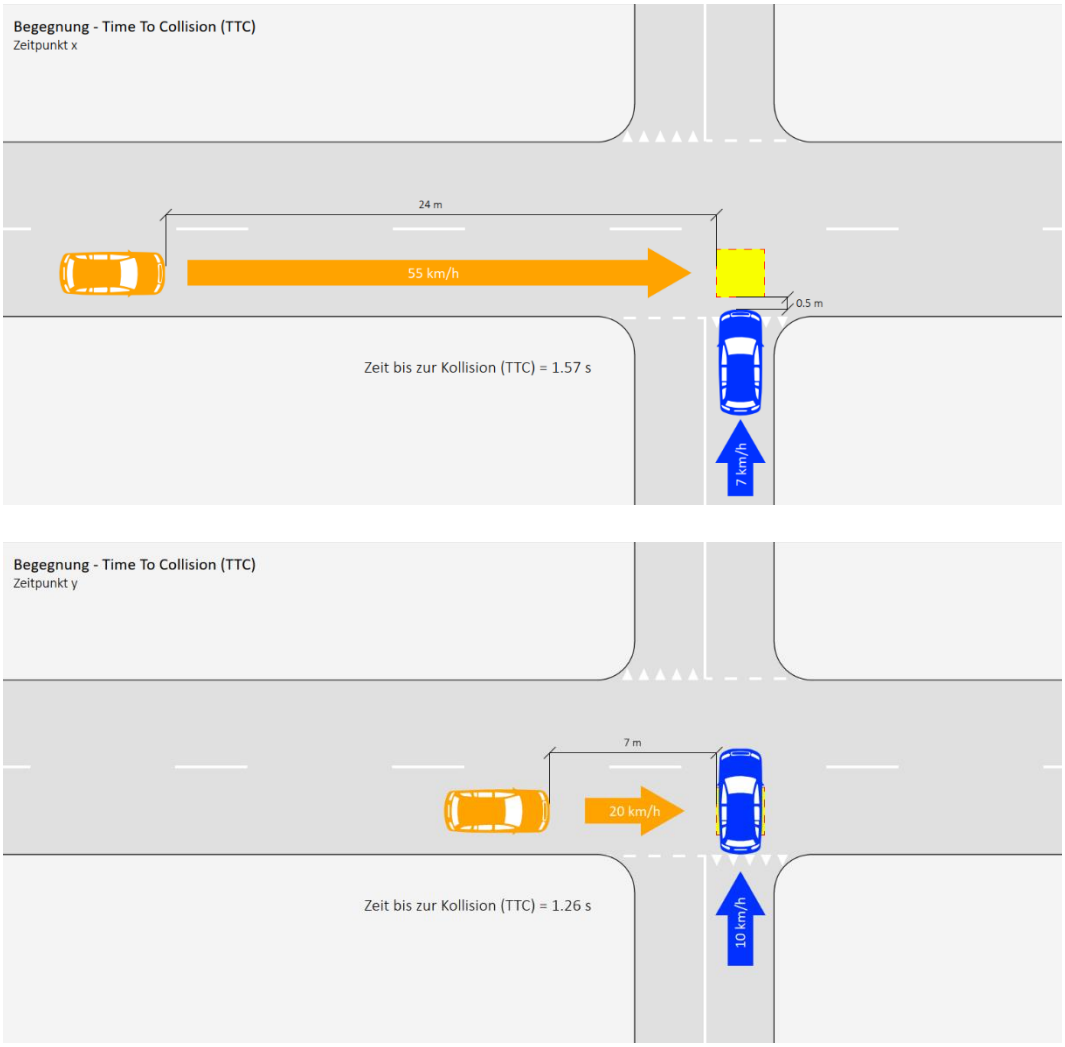


***Abb.2** Sicherheitsindikator Time To Collision (TTC), eigene Darstellung in Anlehnung an Archer (2005) [13]*

Im Vergleich zum Indikator TTC existieren gemäss [21] zum Indikator PET mehr Validierungsstudien mit Bezug zum Unfallgeschehen. Wenngleich Verbindungen zwischen dem Indikator PET und Unfalldaten nachgewiesen werden konnten, so waren sie entweder nicht stark ausgeprägt oder nicht immer konsistent. Bessere Resultate konnten erzielt werden, wenn neben dem Indikatorwert, der im Wesentlichen ein Mass für die Unfallwahrscheinlichkeit darstellt, zusätzliche Parameter zur Beschreibung der potenziellen Unfallschwere (z.B. Geschwindigkeit, Masse oder Begegnungswinkel der Beteiligten) hinzugezogen wurden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt anhand eines einfachen Beispiels einer Begegnungssituation das Grundprinzip des Sicherheitsindikators PET. Gemessen wird die Zeit zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden, die einen gemeinsam räumlichen Bereich passieren. Im Gegensatz zu TTC erfordert eine PET-Begegnung nicht zwingend einen Kollisionskurs. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die Trajektorien der Beteiligten kreuzen.

In den meisten in [21] ausgewerteten Studien wurden häufig alle ermittelten PET-Begegnungen berücksichtigt, da diese ein gutes Mass für die Exposition darstellen. Zur Unterscheidung von kritischen und weniger kritischen Begegnungen sind Grenzwerte allerdings sinnvoll, wobei sich diese im Bereich der auch für TTC üblichen 1 bis 3s bewegen. Auch bei PET gilt der Grundsatz: Je tiefer der Indikatorwert, desto kritischer die Situation.

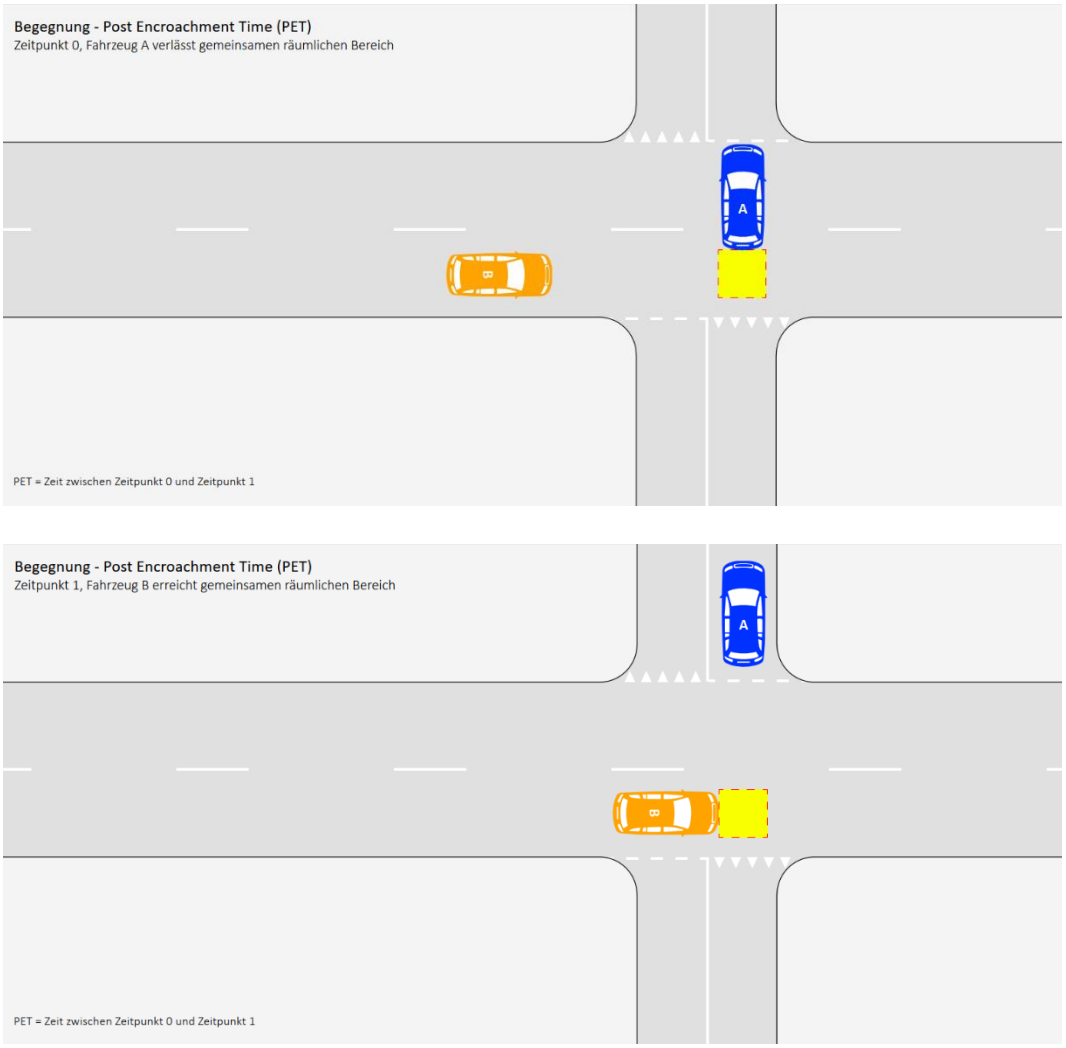


***Abb.3** Sicherheitsindikator Post Encroachment Time (PET), eigene Darstellung in Anlehnung an Archer (2005) [13]*

Zur dritten Gruppe «Bremsmanöver» zählen Sicherheitsindikatoren, die auf die häufigste Art bewusster Korrekturhandlungen zur Vermeidung einer Kollision abzielen. Als Resultat ihrer Recherchen beschreiben die Autoren von [21], dass mit Geschwindigkeitsreduktion als Sicherheitsindikator allein offenbar kaum valide Ergebnisse im Bezug zum tatsächlichen Unfallgeschehen erreicht werden können. Der Indikator kann aber in Kombination mit anderen Indikatoren hilfreich sein, beispielsweise als zusätzlicher Parameter bei der Ermittlung der Schwere sicherheitsrelevanter Begegnungen.

2.4.2 Erhebungstechnik

Im Bereich der Erhebungstechnik besteht ein sehr breites Angebot an unterschiedlichen Lösungen, auf die an dieser Stelle nur in sehr vereinfachter Form eingegangen wird. Die Möglichkeiten reichen von fest installierten Kamerasystemen bis zu Aufnahmen aus der Luft mittels Drohnen. Im Bereich des Bildverfahrens kann grob zwischen der klassischen optischen Bildaufnahmen (RGB) und Wärmebildaufnahmen unterschieden werden. Optische Bildverfahren haben ihre Vorteile in der guten Nachvollziehbarkeit, vergleichsweise geringen Anschaffungskosten und den höheren möglichen Bildauflösungen. Nachteile bestehen insbesondere in der eingeschränkteren Anwendbarkeit bei Dunkelheit, Sensitivitäten auf Sonneneinstrahlung und allfällige Reflexionseffekte, Störeinflüsse durch Licht-Schatteneffekte sowie hinsichtlich des Datenschutzes (allfällige Erkennbarkeit von Personen oder Fahrzeugkennzeichen bei höherer Auflösung).

Thermalkameras wiederum sind unabhängig von den (tageszeitlichen) Lichtverhältnissen einsetzbar. Ebenso haben Licht-Schatteneffekte keinen nachteiligen Einfluss auf die Aufnahmequalität. Auch hinsichtlich des Datenschutzes sind Wärmebildaufnahmen vorteilhaft, da keine Gesichter von Personen oder Kennzeichen erkennbar sind. Von Nachteil sind die höheren Anschaffungskosten, geringere Bildauflösung und ihre eingeschränkte Anwendbarkeit bei heissen Wetterverhältnissen (erhitzten Oberfläche).

Unabhängig vom Bildverfahren ist zudem die Frage der Aufnahmeperspektive entscheidend, da diese einen erheblichen Einfluss auf die Analysemöglichkeiten und die Qualität der Ergebnisse haben kann. Im Hinblick auf die angestrebten Messungen mit Raumbezug sind Erhebungen aus grösserer Höhe insofern vorteilhaft, da die für solche Messungen nötige Georeferenzierung grundsätzlich präziser erfolgen kann (geringere Verzerrung des Videobildes bei der Umlegung in ein Koordinatensystem). Zudem ist eine bessere Positionserfassung von Objekten möglich, was insgesamt eine höhere Genauigkeit der Trajektorien erwarten lässt. Weitere Vorzüge liegen darin, dass auch grössere Infrastrukturanlagen mit nur einem Gerät aufgezeichnet werden können, perspektivisch bedingte Verdeckungen von Objekten untereinander vermieden werden können und schliesslich auch bezüglich Datenschutzes (auch bei höherer Auflösung), indem die Erkennbarkeit von Gesichtern und Kennzeichen einfacher vermieden werden kann. Erhebungen aus grösserer Höhe sind allerdings nur durch Aufnahmen aus der Luft (z.B. mittel Drohnen) flexibel möglich, wobei auch hierfür gesetzlich vorgeschriebene Einsatzbeschränkungen bestehen. Darüber hinaus sind Drohnenaufnahmen in ihrem zeitlichen Rahmen begrenzt und erfordern einen nicht unerheblichen Aufwand in der Durchführung sowie auch in der Nachbearbeitung (Bildstabilisierung). Möglichkeiten zur

Fixinstallation einer Kamera (z.B. auf einem Gebäudedach), um Aufnahmen aus grösserer Höhe realisieren zu können werden nur in seltenen Fällen zur Verfügung stehen.

Für Aufnahmen aus einer Schrägperspektive aus einer Höhe von wenigen Metern bedarf es hingegen für eine fixe Installation keiner grossen Anforderungen in Bezug auf das Umfeld. In der Regel genügt eine Befestigungsmöglichkeit für eine Kamera an einem Kandelaber oder Signalpfosten, welche üblicherweise im Strassenraum vorhanden sind. Somit ergeben sich trotz Fixinstallation sehr flexible Einsatzmöglichkeiten. Eine fest installierte Erhebungstechnik bringt ausserdem Vorteil hinsichtlich der Bildstabilität sowie bezüglich der Erhebungsdauer. Der wesentlichste Nachteil von Aufnahmen aus der Schrägperspektive liegt insbesondere in der grösseren Bildverzerrung bei der Georeferenzierung und den damit verbundenen negativen Auswirkungen auf die Trajektorienqualität. Zudem kann es zu perspektivisch bedingten Verdeckungen von Objekten untereinander kommen und es kann aufgrund der Perspektive und einer geringeren Distanz zu Personen und Objekten die Erfüllung von Datenschutzbestimmungen eine grössere Herausforderung darstellen.

2.4.3 Rechercheergebnisse zu verfügbaren Analyseverfahren

Im Bereich der (teil-)automatisierten Videoanalytik hat sich dank technologischer Entwicklungen auf vielen Ebenen und Errungenschaften in der Digitalisierung in den letzten Jahren eine grosse Dynamik gezeigt. Auch für Anwendungszwecke in der Verkehrsstatistik wurden und werden laufend videobasierte Lösungen entwickelt und weiterentwickelt. Neben Opensource-Programmen bzw. einzelnen Codes oder Algorithmen, welche meist im Rahmen von wissenschaftlichen Projekten programmiert wurden, sind mittlerweile auch kommerzielle Softwarelösungen verfügbar. Die nachfolgenden Rechercheergebnisse zu frei verfügbaren und kommerziellen Analyseverfahren, die für das Erreichen der mit diesem Forschungsprojekt verfolgten Ziele geeignet sein können, bilden den Wissensstand von Mitte 2019 ab. Sie geben nur einen groben Querschnitt über vorhandene Anwendungen und erheben folglich keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Folgende Kriterien sind in die Suche nach Anwendungen eingeflossen sowie wurden später für die Beurteilung der Eignung als im Rahmen dieses Projektes einsetzbares Verfahren herangezogen.

- Die Trajektorienextraktion soll automatisiert erfolgen können.
- Die Qualität der extrahierten Trajektorien muss möglichst hoch sein, damit auch nachgelagerter Verfahren in entsprechender Qualität möglich sind.
- Eine Georeferenzierung muss einfach möglich sein.
- Die Objektklassifizierung soll automatisiert erfolgen und sowohl Fahr- als auch Fussverkehr berücksichtigen.
- Bereits implementierte Analysetools (allenfalls sogar konkrete Sicherheitsindikatoren) sind sehr erwünscht.
- Die Programmanwendung soll möglichst einfach und zuverlässig sein.

Opensource Programme

Bei Opensource Programmen handelt es sich überwiegend um Programmcodes, die im Rahmen von wissenschaftlichen Projekten entwickelt wurden. Ausgangspunkt der Recherche bildete das als Ergebnis des InDev-Projektes [19] herausgegebene Handbuch [20]. In Kapitel 4 dieses Handbuchs werden unter anderem Videoanalysetools vorgestellt, die in dem genannten Projekt angewendet wurden.

Die Programme «T-Analyst» und «RUBA» werden als semi-automatisierte Verfahren beschrieben, wobei jeweils keine automatisierte Trajektorienextraktion möglich ist. «RUBA», das an einer dänischen Universität entwickelt wurde, kann mehr als «Detektor» für potenziell konflikthafte Begegnungssituationen im Sinne einer Präselektion sicherheitsrelevanter Sequenzen verstanden werden. In der Benutzung der Anwendung werden Detektor-Felder gesetzt und mit bestimmten Funktionen (Bewegungsrichtung, Aufenthalt, etc.) ausgestattet. So können beispielsweise Situationen in Zusammenhang mit abbiegenden Fahrzeugen und deren Begegnung mit anderen Verkehrsteilnehmenden auf den potenziell konflikthaften Verkehrsströmen aus Videorohdaten gefiltert werden. Die Anwendung «T-Analyst» wiederum ist ein Tool zur vertieften Analyse von Begegnungen (inkl. Sicherheitsindikatoren TTC und PET), das in Schweden entwickelt wurde. Die für die Berechnung der Sicherheitsindikatoren benötigten Trajektorien müssen im Programm allerdings manuell generiert werden, was mit entsprechend hohem Aufwand verbunden ist.

«TIP» (Traffic Intelligence Project) und «STRUDL» (Surveillance Tracking Using Deep Learning) zielen hingegen konkret auf die automatisierte Extraktion von Trajektorien der Verkehrsteilnehmenden ab. «TIP» ist als Basis für eine offene Programmskript-Sammlung zu verstehen, die es Entwicklern ermöglicht, aufbauend auf den bestehenden Funktionen, eigene Programmiercodes zu schreiben. Die Anwendung «STRUDL» verfügt über eine webbasierte Benutzeroberfläche und benötigt somit theoretisch weniger Programmierkenntnisse. Sie verfügt neben der Trajektorienextraktion und Objektklassifizierung auch über eine Funktion zur Umrechnung der extrahierten Trajektorien in ein Koordinatensystem (Georeferenzierung).

Als weiteres Open Source Programm wurde noch «OpenDataCam» in der Betrachtung berücksichtigt. Die OpenDataCam ist ein experimenteller Prototyp (Hard- und Software), der zum Recherchezeitpunkt allerdings auf die Funktionen Objekt-Tracking und Objektklassifizierung beschränkt war.

***Tab. 1** Rechercheergebnisse und Beurteilung – Opensource Programme (2019)*

	T-Analyst	RUBA	TIP	STRUDL	OpenDataCam
Trajektorien-extraktion	manuell	nein	automatisiert	automatisiert	automatisiert
Geo-referenzierung	ja	nein	?	ja	nein
Objekt-klassifizierung	manuell	nein	ja	automatisiert	automatisiert
Fussgänger-erfassung	manuell	ja	ja	ja	ja
Sicherheits-analysetools	ja (TTC, PET)	nein	?	nein	nein
Einfachheit der Anwendung	einfach, aber zeit-aufwendig	einfach	komplex (via Pro-grammskripte)	komplex	?
Nachvollzieh-barkeit	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch

Gemäss Beurteilung wurde «STRUDL» als am ehesten im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes einsetzbares Opensource Programm zunächst weiterverfolgt. Beim Versuch, das Programm anzuwenden, zeigte sich allerdings bald, dass es doch einem gewissen Knowhow im Bereich Programmierung bedarf. Zudem ist mit der Trajektorienextraktion erst der erste Schritt getan und eine Lösung für weitere Analyseverfahren hätte erst gefunden bzw. entwickelt werden müssen. Aufgrund der hierfür fehlenden Ressourcen wurde entschieden, dass kein Opensource Programm in der Methodentestung im Rahmen der Feldversuche angewendet wird.

Kommerzielle Softwarelösungen

Die durchgeführten Recherchen zu kommerziellen Lösungen zeigten, dass es eine Vielzahl an kommerziellen Anbietern im Bereich Videoanalyse gibt, verkehrliche Anwendungen mit integrierten Sicherheitsanalysetools aber eher die Ausnahme darstellen. Das Spektrum reicht von sehr einfachen Anwendungen (stellvertretend wurde die Software «Picomixer» betrachtet), die keine vertiefte Analysen anhand extrahierter Trajektorien beinhaltet über Anbieter, welche zumindest die Trajektorienextraktion und Objektklassifizierung automatisiert durchführen (z.B. «Flowity» und «Viscando») bis hin zu Anwendungen mit bereits integrierten, anspruchsvolleren Sicherheitsanalysetools. Zu Letzteren gehören die beiden Lösungen «datafromsky» und «TrafxSAFE», die gemäss Beurteilung als die beiden Anwendungen mit dem grössten Potenzial eingestuft und deshalb für die Methodentestung im Rahmen der Feldversuche ausgewählt wurden. Die Anwendungen und ihre Funktionen werden im nachfolgenden Kapitel genauer beschrieben

***Tab. 2** Rechercheergebnisse und Beurteilung – Kommerzielle Softwarelösungen (2019)*

	Picomixer	Flowity	Viscando	datafromsky	TrafxSAFE
Trajektorien-extraktion	nein	automatisiert	automatisiert	automatisiert	automatisiert
Geo-referenzierung	nein	ja	ja	ja	ja
Objekt-klassifizierung	ja (eingeschränkt)	automatisiert	automatisiert	automatisiert	automatisiert
Fussgänger-erfassung	nein	ja	ja	ja	ja
Sicherheits-analysetools	ja (Regel-verstösse)	nein	ja (Regel-verstösse)	ja (TTC, PET, «heavy breaking»)	ja (TTC, PET, Ge-schwindigkeits-übertretungen)
Einfachheit der Anwendung	einfach	?	?	eher einfach	eher einfach
Nachvollzieh-barkeit	?	?	?	hoch	eher hoch

2.5 Ausgewählte Anwendungen

Für die Methodentestung wurden die nachfolgenden als geeignet befundenden Anwendungen ausgewählt. Beide Anwendungen funktionieren vom Grundprinzip ähnlich, indem Videodaten mit der jeweiligen Software ausgewertet werden, wobei Trajektorienexktraktion und Objektklassifizierung vollautomatisiert erfolgen und anhand dieser Informationen nachgelagerte Analysen (inkl. bereits implementierter Sicherheitsanalyseverfahren) möglich sind. Die beiden ausgewählten Anwendungen unterscheiden sich in erster Linie dadurch, dass «datafromsky» als Resultat die automatisiert extrahierten Trajektorien (inkl. Objektklassifizierung) zur Verfügung stellt, welche vom Benutzer mithilfe eines vom Anbieter entwickelten Analyseprogramms selbständig weiterbearbeitet (z.B. Georeferenzierung) und analysiert werden können, wohingegen mit «TrafxSAFE» die Schritte Trajektorienextraktion, Objektklassifizierung, Georeferenzierung als auch Trajektorienanalyse im Wesentlichen durch den Anbieter erfolgen und bereits aufbereitete Ergebnisse via Dashboard zur Verfügung gestellt werden.

2.5.1 Anwendung 1: «datafromsky»

Die Anwendung «datafromsky» der Firma RCE Systems hat ihren Ursprung in der Analyse von Videodaten, die mittels Drohne aus der Luft aufgenommen wurden. Um bestehenden Bedürfnissen mehr Rechnung zu tragen, die insbesondere den Bereich der Verkehrsanalyse betreffen, wurde vom Anbieter der Anwendung eine Adaptierung für fix installierte Kamerasysteme entwickelt. Diese Adaptierung (Light-Version) zielt allerdings primär auf die Erfassung zum Zweck der Verkehrszählung und einfachere Analysen ab. Analyseverfahren, die auf Distanzmessungen beruhen, wie die im Programm implementierten Sicherheitsanalysen, wurden grundsätzlich für Drohnenaufnahmen entwickelt. Dieser Umstand stellte von vornherein eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Qualität der erzielbaren Resultate mit dem im Rahmen der Feldversuche gewählten Versuchsaufbau dar. Hervorzuheben ist bei dieser Anwendung, dass der Benutzer sämtliche, der automatisierten Trajektorienauswertung und Objektklassifizierung nachgelagerte Analyseschritte mithilfe des vom Anbieter zur Verfügung gestellten Analyseprogramms selbst durchführen kann. Somit hat der Anwender eine grosse Einflussmöglichkeit auf die Qualität der Resultate, die wiederum in hohem Mass nachvollziehbar sind.

Die Auswertung und Analyse von Videodaten mit der Anwendung erfolgen in den nachfolgenden Arbeitsschritten:

1. Automatisierte Auswertung der Videorohdaten (Trajektorien, Objektklassifzierung)
2. Weiterbearbeitung der ausgewerteten Trajektorien (im Analyseprogramm), u.a.
    - Georeferenzierung
    - Möglichkeiten zur manuellen Korrektur von Trajektorieninformation (z.B. Objektklasse)
3. Analyse (mittels Analyseprogramm), u.a.
    - Definieren und Kalibrieren von Zähllinien zur Analyse der Verkehrsströme
    - Einstellung und Berechnung der Sicherheitsindikatoren wie TTC und PET (Sicherheitsanalyse)
4. Nachbearbeitung der ausgewerteten Informationen, u.a.
    - Vertiefte Untersuchung der über die Sicherheitsanalyse detektierten Begegnungssituationen (z.B. Filterung, Typisierung, etc.)
    - Ergebnisaufbereitung

2.5.2 Anwendung 2: «TrafxSafe»

TrafxSAFE ist ein Produkt der Firma Transoft Solutions, das gezielt für Sicherheitsanalysen im Verkehrsbereich entwickelt wurde. Aufnahmen aus der Schrägperspektive stellen für diese Anwendung einen normalen Anwendungsfall dar, was im Hinblick auf den Einsatz im Rahmen dieses Forschungsprojektes von vornherein vorteilhaft war. Bei TrafxSAFE übernimmt der Anbieter den Grossteil der Verfahrensschritte von der Georeferenzierung und Kalibrierung der Auswertung bis hin zur Ergebnisaufbereitung. Die Resultate werden via Dashboard zur Verfügung gestellt, wo sie der Benutzer aufrufen und interpretieren kann. Zudem besteht die Möglichkeit eines Datenexports für vertiefende Analysen. Aufgrund der weitgehenden Übernahme der wesentlichen Verfahrensschritte durch den Anbieter stellen für den Nutzer manche Bereiche eine «Blackbox» dar. Trotzdem ist die Nachvollziehbarkeit als hoch einzustufen, nicht zuletzt durch die Datenexportmöglichkeit sowie durch im Dashboard bereitgestellte Videosequenzen der als besonders sicherheitsrelevant eingestuften Begegnungssituationen, welche gewisse Möglichkeiten der Überprüfung der Ergebnisse zulassen.

Die Auswertung und Analyse von Videodaten mit der Anwendung erfolgen wie nachstehend beschrieben:

1. Automatisierte Auswertung der Videorohdaten (Trajektorien, Objektklassifizierung, Georeferenzierung, Definition und Ermittlung der Verkehrsströme, Kalibrierung und Berechnung der Sicherheitsindikatoren TTC und PET sowie deren Typisierung in «Szenarien», etc.).
2. Ergebnislieferung via Dashboard, u.a.
    - Allgemeine Informationen zum Standort
    - Resultate zu Verkehrsmengen und Knotenströmen
    - Ergebnisse der Sicherheitsanalyse mit Bewertung des Sicherheitsniveaus (Detailergebnisse zu Szenarien, Videosequenzen von besonders sicherheitsrelevanten Ereignissen, etc.)
    - Filterungsmöglichkeiten
    - Berichtsfunktion, Datenexportfunktion
3. Nachbearbeitung der ausgewerteten Informationen, u.a.
    - Vertiefte Untersuchung der über die Sicherheitsanalyse detektierten Begegnungssituationen (z.B. Filterung, Typisierung, etc.)
    - Ergebnisaufbereitung

3 Methodentestung / Feldversuche

3.1 Versuchsaufbau

3.1.1 Untersuchungsorte

Die Methodentestung erfolgte im Rahmen von Feldversuchen, wobei bis zu zehn Untersuchungsorte angestrebt wurden, die aus verkehrssicherheitsrelevanten Gesichtspunkten (z.B. Kenntnis über Defizite, Konflikte oder Unfälle) interessant sind und möglichst unterschiedliche der folgenden Eigenschaften aufweisen sollten:

- Infrastrukturtyp: unterschiedliche Knotenformen, Querungsstellen des Fussverkehrs, spezifische Velolösungen
- Lage im räumlichen Kontext: ausserorts / innerorts
- Temporegime: zulässige Höchstgeschwindigkeiten ab Tempo 30
- Vortrittsregelung: Rechtsvortritt, konkret signalisierte Vortrittsbelastung oder Lichtsignalanlage
- Nutzungsintensität: Verkehrsaufkommen hoch / gering
- Verkehrszusammensetzung: homogen / heterogen
- Unfallgeschehen: auffällig (Unfallschwerpunkt) / unauffällig

Mögliche Untersuchungsorte wurden seitens der Begleitkommission vorgeschlagen und durch die Forschungsstelle hinsichtlich folgender Kriterien geprüft:

- Befestigungsmöglichkeit für Kamerainstallation im öffentlichen Strassenraum oder Zugänglichkeit von unmittelbar angrenzenden Gebäuden (v.a. Dachterrassen oder Ähnliches) sowie Erfassbarkeit des Verkehrsgeschehens aus geeigneter Perspektive
- Vorhandensein von Strassenbeleuchtung
- Möglichst wenig Bepflanzung oder andere Elemente, welche die Sicht einschränken
- Eignung hinsichtlich der Durchführung von Begleituntersuchungen (insbesondere Befragungen)

Schliesslich wurden folgende Untersuchungsorte für die Methodentestung ausgewählt. Von den insgesamt zehn ausgewählten Orten konnten allerdings zwei in weiterer Folge nicht mehr berücksichtigt werden, womit für insgesamt acht Untersuchungsorte Testresultate vorliegen.

***Tab. 3** ausgewählte Untersuchungsorte für die Methodentestung*

Nr.	Standortbezeichnung	Infrastrukturtyp	Lage	Temporegime	Anmerkung
01	**ZH, Kilchberg, Seestrasse/Hornhaldenstrasse**	Knoten/Einmündung	innerorts	2020: Tempo 60 2022: Tempo 50	Erhebung 11/2020 und 05/2022
02	**ZH, Bachenbülach, Zürichstr./Oberglatterstr.**	Knoten/Einmündung	innerorts	Tempo 50	Erhebung 11/2020
03	**ZH, Dietikon, Schoenenwerdkreuzung**	LSA-Knoten mit spezifischer Veloführung	innerorts	Tempo 50	Erhebung 11/2020
04	**LU, Stechenrain**	Knoten/Einmündung	ausserorts	Tempo 80	Erhebung 03/2021
05	**LU, Sursee, Zeughausstr./Moosgasse/Allmendstr.**	Knoten/Einmündung	innerorts	Tempo 50	Erhebung 05/2021 Videos nicht verwertbar
06	**LU, Sursee, Schlottermilch/Ringstr./Surentalstr.**	Kreisverkehr	innerorts	Tempo 60	Erhebung 06/2021
07	**LU, Luzern, Waldegg**	Kreisverkehr	innerorts	Tempo 50	Erhebung 06/2021
08	**LU, Luzern, Horwerstrasse/Freigleis**	Querungsstelle	innerorts	Tempo 50	Erhebung 06/2021
09	**LU, Luzern, Zürichstrasse/Wesemlinstrasse**	Knoten/Einmündung	innerorts	Tempo 50	Erhebung 06/2021
10	**AG, Oberentfelden, Suhrentalstr./Muhenstr.**	Knoten/Einmündung	ausserorts	Tempo 80	Erhebung konnte nicht durchgeführt werden

3.1.2 Vorgehenskonzept der Methodentestung

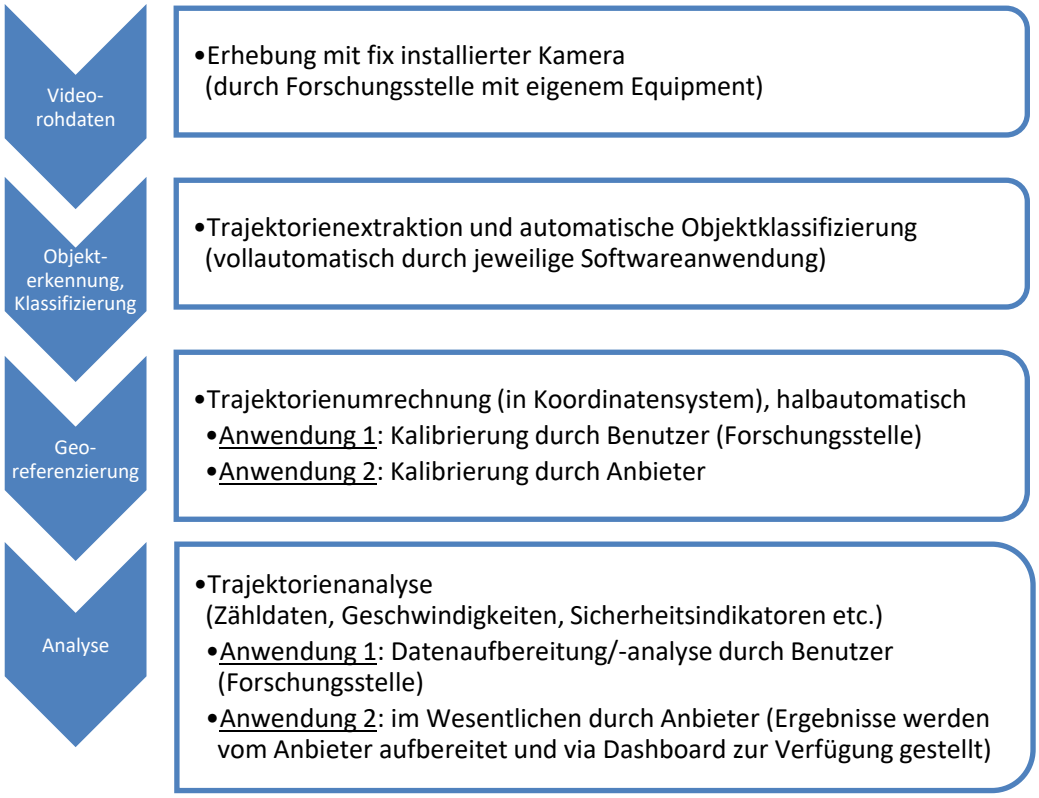


***Abb.4** Vorgehen Methodentestung*

3.2 Durchführung der Erhebungen

3.2.1 Videoerhebung

Das Equipment, welches im Rahmen der Feldversuche eingesetzt wurde, bestand aus einer Kamera, die auf einem eigenen Teleskopmast in einer Höhe von 5-7 Metern über dem Boden angebracht war. Der Teleskopmast selbst wurde an einem Kandelaber oder Signalpfosten montiert. In einer auf dem Boden ebenfalls am Kandelaber oder dem Signalpfosten befestigten Box befand sich die Steuerungseinheit der Kamera inkl. Medium zur lokalen Speicherung der Videodaten sowie eine leistungsstarke Batterie. Für die Durchführung der längeren Aufnahme am Standort Kilchberg wurde ein Solarpanel eingesetzt, das tagsüber (bei entsprechend Sonnenschein) zusätzliche Energie lieferte. Bei optimalen Bedingungen (Tage mit vielen Sonnenstunden) konnte dank dem Solarpanel zwischenzeitlich ein vollständiges Wiederaufladen der Batterie erreicht werden.

Am Standort «06 - Sursee Schlottermilch/Ringstr./Surentalstr.» konnte die Kamera auf einer Dachterrasse in ca. 14m Höhe befestigt und mittels Stromanschluss mit Energie versorgt werden.

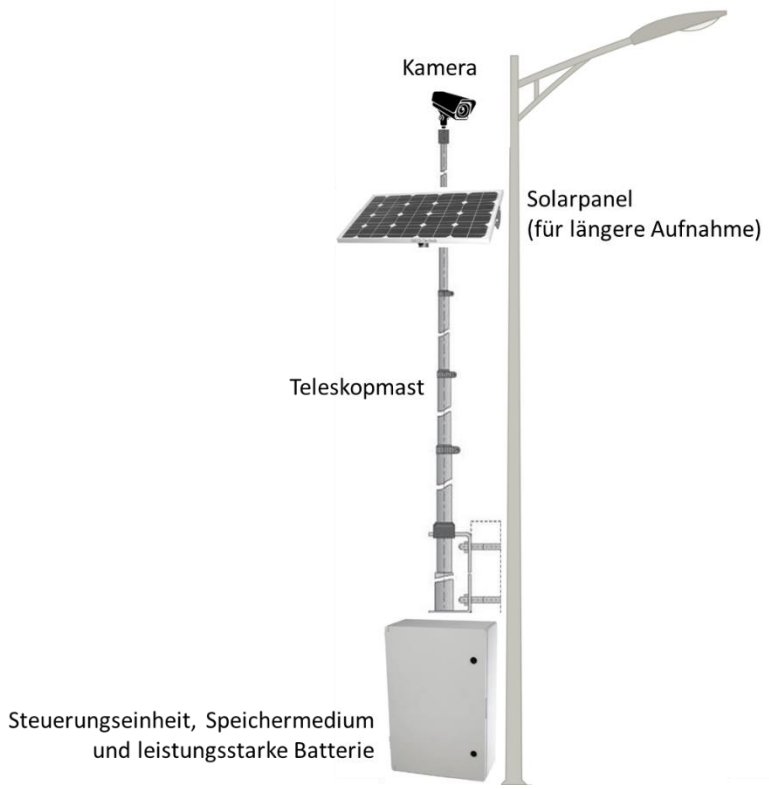


***Abb.5** Erhebungsequipment*

3.2.2 Begleiterhebungen

Zusätzlich zu den Videoerhebungen wurden an den beiden Standorten «01 - Kilchberg» und «02 - Bachenbülach» Seitenradarmessungen durchgeführt. Die Messdaten dienten zur Validierung der Resultate der automatisierten Auswertungen hinsichtlich Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten.

***Abb.6** Seitenradarmessung am Standort "02, Bachenbülach"*

Nebst den verkehrstechnischen Erhebungen erfolgten im Juli 2021 Befragungen vor Ort an folgenden ausgewählten Standorten, die für derartige Erhebungen als geeignet eingestuft wurden.

- 06_Sursee, Schlottermilch/Ringstr./Surentalstr
- 07_Luzern, Waldegg
- 08_Luzern, Horwerstrasse/Freigleis
- 09_Luzern, Zürichstrasse/Wesemlinstrasse

Passantinnen und Passanten wurden direkt auf den Gehwegen in unmittelbarer Nähe der Untersuchungsorte angesprochen und mithilfe eines standardisierten Fragebogens in deutscher Sprache befragt. Die Befragungstage wurden in zeitlichem Zusammenhang mit den Videoerhebungen durchgeführt, überschnitten sich aber bewusst nicht mit den Aufzeichnungszeiträumen der Videoerhebungen.

Im Folgenden werden die erhobenen soziodemografischen Angaben sowie die verkehrspsychologischen Konstrukte näher beschrieben:

Soziodemographische Angaben

Abgesehen von den üblichen Angaben zum Geschlecht und Alter wurde die Verkehrsteilnahmeart zum Zeitpunkt der Befragungen (Zufussgehend, Velo, Auto), der Führerscheinbesitz (ja/ nein/ Lehrfahrausweis), die Führerscheinbesitzdauer in Jahren und die Fahrleistung getrennt für Autofahrende („Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich pro Jahr mit dem Auto?“) und Velofahrende („Wie viele Minuten sind Sie pro Tag mit dem Velo unterwegs“) abgefragt (vgl. [14]).

Selbstberichtete Exposition

Die Häufigkeit, mit der sich die Befragten im jeweiligen Verkehrsbereich bewegten, wurde auf einer 6-stufigen Likert-Skala von sehr selten bis sehr häufig abgefragt („Wie häufig durchqueren Sie diesen Bereich“) (vgl. [14]).

Unfallerfahrung

Mit der Frage „Wie viele Unfälle haben Sie selbst oder in Ihrem Freundes- oder Bekanntenkreis schon erlebt?“ wurde die Unfallerfahrung erhoben. Die offene Definition eines Unfalls wurde dabei bewusst gewählt, damit die Befragten selbst entscheiden, ob es sich bei ihrem erinnerten Ereignis um einen Unfall handelte oder nicht (vgl. [16], [14]).

Subjektives Gefährlichkeitsurteil

Das subjektive Gefährlichkeitsurteil wurde in Anlehnung an Slovic, Fischhoff & Lichtenstein (1982) [33] und Hackenfort (2008; 2013) [15], [17] in den vier Dimensionen: (1) Kenntnis des individuellen und (2) generellen Unfallrisikos („Für wie wahrscheinlich halten Sie es, dass in diesem Bereich im Allgemeinen ein Unfall geschieht?“ bzw. „Für wie wahrscheinlich halten Sie es, dass Ihnen selbst in diesem Bereich ein Unfall geschieht?“), (3) Schadenshöhe („Wie schlimm könnte im Normalfall der Schaden sein, falls ein Unfall geschieht?“) und (4) Vermeidbarkeit („Falls Sie diesen Bereich durchqueren: Inwieweit fühlen Sie sich in der Lage, einen allfälligen Unfall vermeiden zu können?“) auf 6-stufigen Likert-Skalen erhoben, wobei diese von 1 „sehr unwahrscheinlich“, „sehr niedrig“ bzw. „überhaupt nicht“ bis 6 „sehr wahrscheinlich“, „sehr hoch“ bzw. „vollständig“ reichten (vgl. [14]).

3.3 Durchführung der Videoauswertungen

3.3.1 Automatisierte Auswertungen

Die automatisierten Videoauswertungen erfolgten wie in *Abb.4* dargestellt. Die Videorohdaten mussten zunächst in ein passendes Format konvertiert werden um sie anschliessend auf der jeweiligen Upload-Plattform des Anwendungsanbieters hochzuladen. Für den Upload wurden jeweils Videodateien à drei Aufnahmestunden vorbereitet.

Bei Anwendung 1 beschränkt sich die automatisierte Auswertung auf die Extraktion der Trajektorien und die Objektklassifizierung. Für jede einzeln hochgeladene Videodatei liegt dann innert weniger Stunden als Resultat eine Trajektoriendatei vor, welche im Nachgang mit dem vom Anbieter zur Verfügung gestellten Programm geöffnet und mit diesem die Trajektorienumrechnung ins Koordinatensystem sowie die Trajektorienanalysen durchgeführt werden können. Die vom Nutzer selbst durchzuführenden Schritte erfordern Kenntnisse in der Anwendung des Programms und den zugrundliegenden Verfahren und sind mit einem nicht unerheblichen Aufwand (Personaleinsatz) sowie z.T. mit aufwendigen Computerrechenleistungen verbunden. Um aus den Trajektorien Zähldaten unterschieden nach den verschiedenen Fahrbeziehungen zu generieren, müssen entsprechende Zähllinien («Gates») definiert und kalibriert werden. Für die Ermittlung der Geschwindigkeiten sowie für die Sicherheitsanalysen ist die Umlegung in ein Koordinatensystem erforderlich, was ebenfalls durch die Softwareanwendung vom Benutzer selbst vorgenommen werden kann. Durch das Setzen von Referenzpunkten im Videobild und Angabe der jeweiligen Koordinaten eines auswählbaren Koordinatensystems wird das Videobild georeferenziert. Die Auswertung der Sicherheitsindikatoren PET und TTC erfolgt über die im Softwaretool implementierte Sicherheitsanalyse. Der Benutzer der Anwendung hat dabei nur limitierte Einstellungsmöglichkeiten, um die Berechnung zu steuern. Der Indikator PET kann lediglich hinsichtlich des Grenzwerts eingestellt werden, für den Indikator TTC kann neben dem festzulegenden Grenzwert zwischen zwei Methoden der Berechnung der Extrapolation der Objektbewegung («motion prediction») im Hinblick auf einen möglichen Kollisionspunkt ausgewählt werden und es muss eine Mindestgeschwindigkeitsdifferenz («speed-dif.») zwischen den involvierten Beteiligten definiert werden. Die auf Basis der Sicherheitsindikatoren ermittelten Ereignisse können als Datentabelle exportiert werden. Darin ist jedes Ereignis mit dem Indikatorwert (PET, TTC) und zusätzlichen Angaben wie Zeit (Image ID) und Koordinaten sowie Informationen zu den beiden involvierten Objekte (ID, Klasse) unterschieden nach Reihenfolge des Passierens des Ereignisbereichs (bei PET) aufgelistet. Die Integration von weiteren Informationen (z.B. Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten der Beteiligten) müssen mittels Verknüpfung zu den jeweils separat zu exportierenden Datensätzen («movement dynamics» bzw. «gate crossing») hergestellt werden.

Bei Anwendung 2 sind neben den Videorohdaten noch zusätzliche Angaben zum Untersuchungsort, zur Kameraposition und -ausrichtung sowie hinsichtlich der Sicherheitsanalyse hilfreiche Informationen bereitzustellen. Letztere betreffen beispielsweise bestimmte Fahr- bzw. Gehbeziehungen, die definiert werden sollen, um entsprechende separate Resultate hierzu zu erhalten. Die Auswertung mit Anwendung 2 beinhaltet neben der Trajektorienextraktion und Objektklassifizierung auch die Trajektorienumrechnung sowie -analysen, wobei mit einer Dauer von mehreren Wochen gerechnet werden muss, bis die Ergebnisse vorliegen. Sämtliche Resultate werden in aufbereiteter Form via Dashboard zur Verfügung gestellt. Zudem besteht für ausgewählte Daten die Möglichkeit eines Exports. Der Benutzer der Anwendung hat per se keine Möglichkeiten, die Berechnung der Sicherheitsindikatoren zu steuern. Die beiden Sicherheitsindikatoren PET und TTC werden jeweils per Definition für bestimmte Begegnungssituationen angewendet. Bei PET sind es Begegnungen von zwei Objekten mit unterschiedlicher Bewegungsrichtung. TTC wird hingegen ausschliesslich für Situationen mit Beteiligten, die sich hintereinander in gleicher Bewegungsrichtung bewegen, angewendet. Die exportierten Daten mit den ermittelten sicherheitsrelevanten Ereignissen beinhalten nebst dem gemessenen Indikatorwert weitere Informationen wie Zeit, Objekt ID, Klasse, Reihenfolge der Beteiligten und deren Geschwindigkeit zum Messzeitpunkt sowie das jeweils zugeordnete «Szenario» (Jedes Ereignisse wird von der Anwendung gemäss definierter Fahr-/Gehbeziehung einem Szenario zugeordnet).

Detailliertere Beschreibungen zu den automatisierten Auswertungen können den Berichtskapiteln zu den Resultaten je Untersuchungsort (insbesondere «01 – Kilchberg») entnommen werden.

3.3.2 Auswertung «Manuelle Konfliktanalyse»

Parallel zur automatisierten Videoanalyse wurde anhand der erhobenen Videodaten eine manuellen Konfliktanalyse durchgeführt. Diese erfolgte völlig unabhängig und gemäss eigenständiger Methodik in Anlehnung an Kaparias et al. (2013) [26]. Diese Methode basiert auf der Beurteilung von Begegnungssituationen und deren Beurteilung als Konflikt mit entsprechendem Schweregrad durch geschulte Personen. Aufgrund des hohen Aufwandes in der Anwendung wurden von den je 72 Aufnahmestunden je Untersuchungsort jeweils die ersten 15 Minuten jeder vollen Stunde ausgewertet, in der Annahme, dass diese repräsentativ sind. Einzig am Standort «03_Dietikon» wurden die gesamten 72h ausgewertet, worauf später noch eingegangen wird.

Begegnungen

Als Begegnungen wurden Situationen gewertet, in denen sich die Bewegungstrajektorien mindestens zweier Verkehrsteilnehmenden überschneiden, z.B. an Zebrastreifen, bei Kreuzungen oder an Kreisverkehren. Folgefahrten wurden somit nicht betrachtet. Ebenso wurden Situationen ausgeschlossen, bei denen Verkehrsteilnehmende hintereinanderher fuhren und die gemeinsame Fahrtrichtung durch das Abbiegen oder den Spurwechsel verliessen. Sich kreuzende Bewegungstrajektorien wurden hingegen auch dann als Begegnung gewertet, wenn einer der beiden Verkehrsteilnehmenden zunächst wartet und sich erst später wieder bewegt– z.B. an einer Haltelinie, beim Beachten des Vortritts oder um den Vortritt einem anderen Verkehrsteilnehmenden zu überlassen.

Konflikte

Bei konflikthaften Begegnungen, die in dieser Studie kurz als Konflikte bezeichnet werden, handelt es sich um Begegnungen, bei denen mindestens eine Person im Strassenverkehr eine Ausweichhandlung ausführt, um eine mögliche Kollision mit einer anderen Person zu verhindern. Nicht als Konflikte gewertet wurde, wenn Verkehrsteilnehmende offensichtlich bewusst (im Videobild erkennbar) auf ihren Vortritt verzichteten, um beispielsweise das Ein- oder Abbiegen zu ermöglichen. Bei diesen Situationen wurde allerdings der Stillstand des vortrittsbelasteten Verkehrsteilnehmenden vorausgesetzt, um als konfliktfreie Begegnung gewertet zu werden.

Ausweichhandlungen

Als Ausweichhandlungen gelten Geschwindigkeitsveränderungen und Richtungsänderungen, welche ausgeführt werden, um eine mögliche Kollision zu vermeiden. Bei Velofahrenden kommt das zeitgewinnende Schlenkern hinzu, bei dem die Person auf dem Velo balanciert, damit sie nicht absteigen muss, und bei Zufussgehenden das abrupte Stehenbleiben.

Auswertungsschema.

Sämtliche Begegnungen wurden als Summe pro Zeitabschnitt protokolliert. Die Konflikte wurden darüber hinaus mit Hilfe eines standardisierten Bewertungsschemas in Anlehnung an Kaparias et al. (2013) [26] anhand der vier folgenden Bewertungsskalen analysiert und in vier Schweregrade separiert.

Skala A. Zeit bis zur Kollision: Zeit in Sekunden vom Beginn der sichtbaren Ausweichhandlung bis zur potenziellen Kollision zweier Verkehrsteilnehmender, sofern Geschwindigkeit und Kurs beibehalten worden wären

1 – lang (> 2 Sekunden)

2 – moderat (1-2 Sekunden)

3 – kurz (< 1 Sekunde)

Skala B. Umfang der Ausweichhandlung: Für Zufussgehende gelten die Abstufungen "stehen [0 m/s], gehen [1-2.5m/s], joggen [2.5-4m/s], rennen [4-5.5m/s], sprinten [>5.5m/s]"

1 – leicht (leichte, kontrollierte Geschwindigkeitsveränderung)

2 – mittel (moderate, kontrollierte Geschwindigkeitsveränderung)

3 – stark (scharfe, wenig kontrolliere Geschwindigkeitsveränderung, oft mit Richtungsänderung)

4 – notfallmässig (plötzliche, unkontrollierte Geschwindigkeitsveränderung, oft mit Richtungsänderung)

Skala C. Komplexität der Ausweichhandlung:

1 – einfach (nur Geschwindigkeitsveränderung oder Richtungsänderung > 45°)

2 – nicht definiert

3 – komplex (kombinierte Handlung aus Geschwindigkeitsveränderung und Richtungsänderung > 45°)

Skala D. Distanz bis zur Kollision: zwischen Verkehrsteilnehmenden bei Einsetzen der Ausweichhandlung

1 – weit (> 2 Fahrzeuglängen [> 10m]; am Fussgängerstreifen 1 Fahrzeuglänge [ca. 5m])

2 – mittel (1-2 Fahrzeuglängen [ca. 5-10m]; am Fussgängerstreifen 0.5-1 Fahrzeuglänge [ca. 2.5-5m])

3 – kurz (< 1 Fahrzeuglänge [< 5m]; am Fussgängerstreifen < 0.5 Fahrzeuglängen [< 2.5m])

Jedem Konflikt wurde unter Anwendung des Auswertungsschemas (vgl. Anhang I.1) ein Schweregrad auf den Stufen 1 bis 4 zugeordnet. Dazu wurde ein Algorithmus erstellt, welcher die einzelnen Werte aus den vier Skalen zu einem Gesamtwert verrechnet. Ein leichter Konflikt (Grad 1) resultierte beispielsweise aus einer kurzen Zeit bis zur Kollision (3), einer moderaten Ausweichhandlung (2), einer komplexen Ausweichhandlung (3) und einer weiten Distanz bis zur Kollision (1). Um einen Grad-4-Konflikt handelt es sich hingegen, wenn eine komplexe Ausweichhandlung bei kurzer Distanz bis zur Kollision erfolgt.

Ergänzende Informationen zur Durchführung der manuellen Auswertung

Verkehrsteilnehmende

In die Analyse wurden alle Personen im Strassenverkehr aufgenommen, welche die aufgezeichnete Verkehrssituation innerhalb der genannten Zeitabschnitte passierten und dabei mindestens eine Begegnung oder einen Konflikt hatten. Situationen, die auf dem Videomaterial nicht klar zu erkennen waren, wurden nicht in die Analyse aufgenommen. Dies war beispielsweise dann der Fall, wenn sich das eigentliche Ereignis im Bildrandbereichen abspielte oder ein Teil des relevanten Bildbereichs verdeckt war.

In der Auswertung wurde zwischen PWs, LKWs, Velos, Zufussgehenden und Motorrädern unterschieden. Wurde das Velo gestossen, wurde es als Zufussgehende erfasst. E-Roller-Fahrende und motorisierte FäGs wiederum wurden zu den Velofahrenden gezählt, wenn sie den Veloweg benutzten. FäGs wie Rollerblades und Skateboards wurden als Zufussgehende erfasst, wenn sie die Gehwege benutzten. Wenn Verkehrsteilnehmende, wie z.B. ein PW, mehrere Begegnungen an einem Fussgängerstreifen hatte, wurden alle Begegnungen gezählt. Dies war der Fall, wenn beispielsweise ein PW vor einem Fussgängerstreifen hielt und mehrere Personen querten. Dann wurde jede Begegnung zwischen dem PW und den einzelnen Personen summiert. Wenn es bei der ersten Begegnung um einen Konflikt handelte, wurde nur diese als Konflikt aufgenommen. Wenn zwei Zufussgehende nebeneinandergehend querten, wurde dies als nur eine Begegnung erfasst. Das Gleiche gilt für Erwachsene mit Kindern an der Hand oder mit Kinderwagen.

Spezialregeln

Für die manuelle Videoanalyse wurde ein Konfliktanalyseschema angelehnt an Kaparias et al. (2013) [26] verwendet. Zum einen passen allerdings die bestehenden Grundregeln nicht auf sämtliche potenziell konflikthaften Begegnungssituationen aller Untersuchungsorte. Zum anderen ist auf dem Videomaterial in manchen Situationen nur schwer erkennbar, ob die Bedingungen für eine gewisse Grundregel vorhanden sind oder nicht. Aus diesen Gründen wurde das Konfliktanalyseschema durch Spezialregeln mit eigenen Bedingungen ergänzt und Grundregeln durch neue Bedingungen erweitert. Diese Spezialregeln und dessen Bedingungen bzw. die zusätzlichen Bedingungen der Grundregeln sind alle auf die spezifischen Standorte angepasst und dadurch nicht ohne weiteres übertragbar.

Um die Standardisierung der Analyse zu erhöhen und den Personen, die die Aufnahmen analysierten, gleichzeitig die Aufgabe zu erleichtern, wurde für jeden Standort vorab definiert, welche potenziell konflikthaften Begegnungssituationen berücksichtigt werden sollen.

Weitere Spezialregeln betreffen unter anderem den Umgang mit Ausweichhandlungen in Situationen, wo das zweite beteiligte Objekt stillsteht sowie die Beurteilung von Situationen der Vortrittsgewährung.

3.4 Resultate «01 - Kilchberg»

3.4.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort befindet sich südlich der Stadtgrenze von Zürich in der Gemeinde Kilchberg. Es handelt sich um die Einmündung Hornhaldenstrasse in die übergeordnete Seestrasse. Der Knoten weist im Zeitraum (2011-2019) ein ausgeprägtes Unfallgeschehen auf und wurde deshalb für die Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen. Einen besonderen Anteil an den registrierten Unfällen haben Ein- und Abbiegeunfälle mit Beteiligung von Velos. Der Radstreifen im Einmündungsbereich wurde erst rund ein Jahr vor der durchgeführten Videoerhebung mit einer Roteinfärbung versehen.

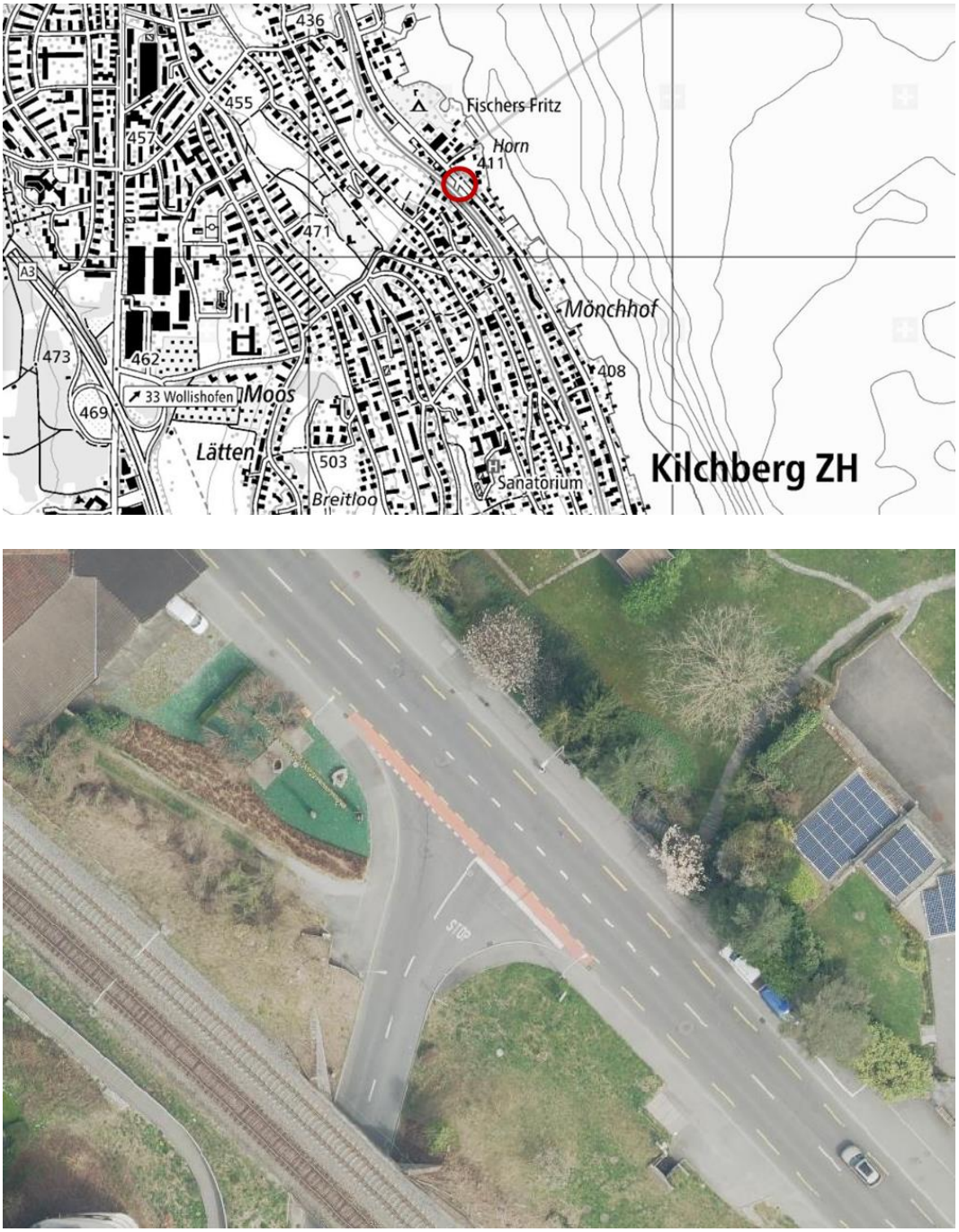


Abb.7 *Lage und Orthofoto des Standorts "01 - Kilchberg" (geoadmin.ch / maps.zh.ch)*

***Tab. 4** Untersuchungsort «01 – Kilchberg, Seestrasse/Hornhaldenstrasse»*

Anlage	**3-arminger Knoten**
Strassentyp	Seestrasse: Hauptverkehrsstrasse Hornhaldenstrasse: Regionale Verbindungsstrasse
Umgebungsnutzung	Primär Wohnnutzung
Temporegime	Seestrasse: Tempo 60 / 50 (Seestrasse) Hornhaldenstrasse: Tempo 50
Vortrittsregelung	Seestrasse vortrittsberechtigt ggü. Hornhaldenstrasse
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	Seestrasse: Trottoir und Radstreifen beidseitig Hornhaldenstrasse: Trottoir nur im unmittelbaren Einmündungsbereich, keine Veloinfrastruktur
Öffentlicher Verkehr	Zwei Buslinien, davon eine abbiegend in Hornhaldenstrasse
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Einmündungstrichter, STOP-Signal, Roteinfärbung Radstreifen im Einmündungsbereich
Weitere Merkmale	Hornhaldenstrasse: Längsneigung und Kurve sowie Bahnunterführung in Zufahrt
Verkehrsdaten	
DTV (Stand 2016)	Seestrasse 14'000 – 17'000 Hornhaldenstrasse: bis 5'000
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 2-3%
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: gering Veloverkehr: mittel
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen (2011-2019)	14 Unfälle mit Personenschaden, davon 6 mit schwerer Verletzungsfolge
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	Ein-/Abbiegeunfälle Beteiligung Velos
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	ja
Weitere Merkmale / Themen	
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebungen	Aufnahme aus Höhe von ca. 6m 3 Tage à 24h (10.-12. November 2020) 7 Tage à 24h (Mai 2022)
Begleiterhebungen	Seitenradarmessung 3 Tage à 24h (10.-12. November 2020)

3.4.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 1)

Das Resultat der automatisierten Trajektorienextraktion der 3-Tage-Videoerhebung wurde in einem ersten Schritt zunächst einer Grobprüfung unterzogen, um vorgängig eine Einschätzung über allfällige allgemeine Limitationen hinsichtlich der Qualität der Ergebnisse vornehmen zu können. Dabei konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden.

- Die Objekterkennung durch die Software funktionierte nahezu vollständig. Vereinzelt wurden grössere Fahrzeuge (z.B. Gelenkbusse) nicht registriert, insbesondere, wenn diese den Grossteil des Bildausschnitts ausfüllten. Ebenso wurden von der Software vereinzelt Zufussgehende und Velofahrende nicht erfasst. Umfangreiche Ausfälle wurden in den Nachtstunden bei inaktiver Strassenbeleuchtung verzeichnet.
- Die Objektklassifizierung erreichte eine hohe Genauigkeit, wobei die Einteilung in die verschiedenen Kategorien von Transportfahrzeugen Inkonsistenzen aufweist. Auch die Unterscheidung zwischen Motorrädern und Velos scheint für die Software eine gewisse Herausforderung darzustellen, da Velos (v.a. E-Bikes) zum Teil sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen wie Motorräder.
- Die Trajektorienqualität scheint auf den ersten Blick gut, weist aber auch Schwachpunkte auf:
  - Positiv ist, dass Trajektorien kaum unterbrochen sind. Das heisst, das sogenannte «Tracking» der Objekte funktioniert weitestgehend lückenlos.
  - Allgemeine Ungenauigkeiten betreffen vor allem die Bildrandbereiche.
  - Unabhängig vom Bildbereich weisen die Trajektorien von grösseren Fahrzeugen grosse Ungenauigkeiten auf.
  - Im Falle von Objekten, die einander aufgrund der Aufnahmeperspektive im Videobild teilweise verdecken, kann dies die Positionsbestimmung durch die Software beeinträchtigen, was sich wiederum nachteilig auf die Trajektorienqualität auswirkt.
  - In Bildrandbereichen kann es vorkommen, dass ein Objekt, welches den Perimeter verlässt und ein zeitgleich in den Perimeter einfahrendes Objekt nicht unterschieden werden können und somit die Bewegung beider Objekte in einer einzigen Trajektorie resultiert. Im Ergebnis beschreibt diese Trajektorie ein «Wendemanöver» im Bildrandbereich, welches nie stattgefunden hat.
- In Zusammenhang mit der «Umlegung» der Objektdimensionen und Positionierung zeigt sich, dass die Anwendung für die Auswertung von Aufnahmen aus der Vogelperspektive (Drohnenvideos) entwickelt wurde. Bei Aufnahmen aus der Schrägperspektive ergeben sich in diesem Punkt grosse Defizite, deren Auswirkungen sich bei der Georeferenzierung durch die zusätzlichen Verzerrungseffekte noch verstärken sollten.

In einem weiteren Schritt wurden anhand der ausgewerteten Trajektorien Analysen der Verkehrsmengen und Fahrgeschwindigkeiten anhand des vom Anbieter zur Verfügung gestellten Softwareprogramms vorgenommen. Zusammenfassend sind folgende Erkenntnisse festzumachen.

- Die Verkehrsmengen konnten auf allen Verkehrsbeziehungen und den meisten Kategorien relativ präzise bestimmt werden. Die erreichte Genauigkeit betreffend das Gesamtverkehrsaufkommen liegt bei rund 95%, was für derartige Analyseverfahren einen Wert im Maximalbereich darstellt. Aufgrund der oben beschriebenen Inkonsistenzen bei der Klassifizierung von Transportfahrzeugen lässt sich allerdings der Schwerverkehrsanteil nicht mit einer zufriedenstellenden Qualität bestimmen.
- Bezüglich der Ermittlung der Geschwindigkeiten aus dem Videobild zeigt sich ein differenziertes Bild. Die Resultate werden stark beeinflusst durch die Umlegung des Videobildes in das Koordinatensystem. Bedingt durch die Aufnahmeperspektive kommt es zu sehr unterschiedlichen Verzerrungen des Videobildes. Dies führt wiederum dazu, dass Geschwindigkeitsmessung nur in bestimmten Bildbereichen (mit geringerer Verzerrung) belastbare Ergebnisse bringen. Die besten Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der begleitenden Seitenradarmessungen konnten durch Wahl einer kurzen Messstrecke in zentralen Bildbereichen erreicht werden.

Punktuelle Messungen sind hingegen wenig belastbar, wie auch anhand der beobachteten Geschwindigkeitsveränderung von einzelnen Fahrzeugen über die im Videobild zurückgelegte Fahrlinie abgeleitet werden kann. Je nach Position im Videobild und Bewegungsrichtung sind erhebliche Unterschiede in der punktuellen Messung feststellbar, wobei die Abweichungen sowohl nach oben als auch nach unten ausschlagen. Diese Unterschiede konnten konkret bei Objekten beobachtet werden, die offensichtlich keine Geschwindigkeitsanpassungen vornahmen. Nebst den erwähnten Verzerrungseffekte sind hierfür auch die oben genannten Ungenauigkeiten in der Umlegung der Objektposition verantwortlich.

Sicherheitsindikator PET

Die Auswertung des Sicherheitsindikators PET über die im Softwaretool implementierte Sicherheitsanalyse kann vom Benutzer der Anwendung lediglich hinsichtlich des Grenzwertes eingestellt werden. Dieser wurde mit 5 Sekunden gesetzt. Andere Parameter zur Einstellung der Berechnung stehen nicht zur Verfügung.

Im Ergebnis zeigt sich, dass in den 72 ausgewerteten Aufnahmestunden insgesamt ca. 5'500 Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden von der Software ermittelt wurden. Der Blick auf die räumliche Verteilung im Videobild macht sofort deutlich, dass es sich dabei offensichtlich um eine Vielzahl FALSCH-positiver Detektionen handelt, die sich insbesondere in Bildrandbereichen konzentrieren. Hingegen wurden in der Bildmitte, in der sich der unmittelbare Einmündungsbereich befindet, weniger Begegnungssituationen detektiert als zu erwarten wären.

Abb.8 *Räumliche Verteilung ausgewerteter Begegnungssituationen (PET bis 5s)*[7]

Durch Überprüfung einiger der in Bildrandbereichen detektierten Situationen, bestätigt sich, dass es sich um «FALSCH-Positive» handelt, die auf die oben erwähnten Schwächen in der Trajektorienextraktion in Zusammenhang mit der von der Software ermittelten Objektposition und Ausrichtung sowie deren annäherungsweise bestimmte Objektdimensionierung zurückzuführen sind. Die Problematik besteht darin, dass von der Software ein vermeintlicher gemeinsamer räumlicher Bereich ermittelt wird, der nacheinander von zwei

[7] Jede detektierte Begegnungssituation wird als Pfeilpaar an der Stelle im Bild angezeigt, an der sich die Bewegungstrajektorien kreuzen. Die mehrheitlich im Bild unten links haben sich gemäss stichprobenhafter Überprüfung als FALSCH-positive Detektionen erwiesen.

Verkehrsteilnehmenden mit vermeintlich transversalen Bewegungsrichtungen beansprucht würde, obwohl es diesen gemeinsamen Bereich effektiv nicht gibt und auch die Bewegungsrichtung (des ins Bild einfahrenden Objektes) an dieser Stelle nicht korrekt ist. In der nachfolgenden Abbildung ist die Bildfolge einer Begegnungssituation mit PET = 0.4 Sekunden dargestellt.

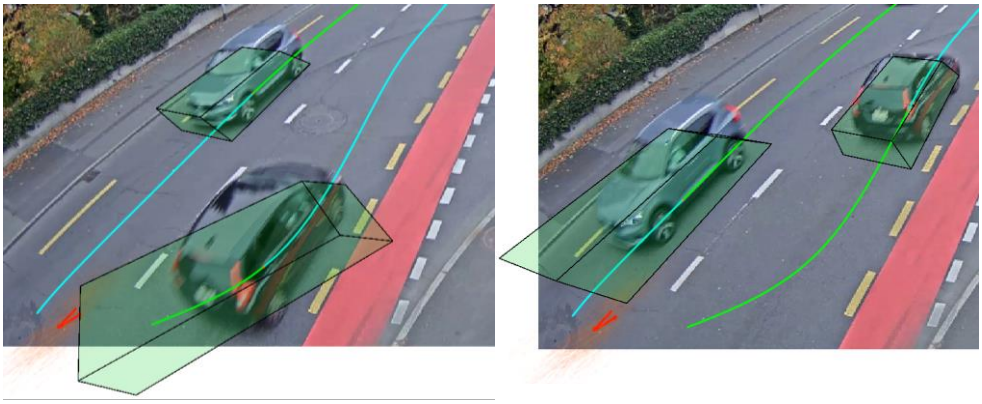


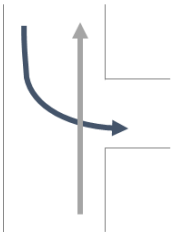
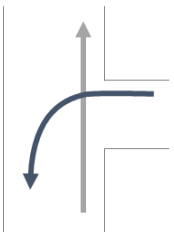
Abb.9 *Ungenauigkeiten der ermittelten Objektposition, -ausrichtung und -dimension*

Um FALSCH-positive Detektionen soweit möglich aus dem Gesamtresultat zu exkludieren, ohne dabei korrekt ermittelte sicherheitsrelevante Begegnungssituationen auszuschliessen, erfolgte der Versuch einer gezielten Filterung der Resultate. Zwei Möglichkeiten bzw. deren Kombination kamen hierfür in Frage:

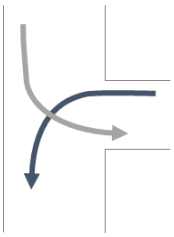
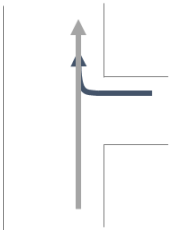
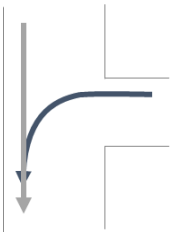
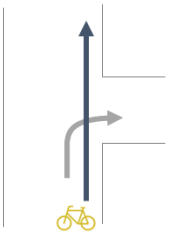
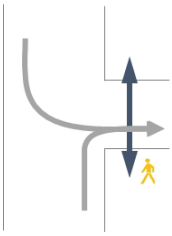
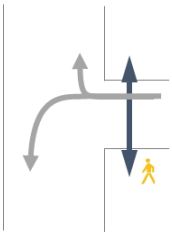
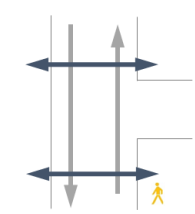
- Filterung nach «Konflikttypen», das heisst gemäss der Trajektorienrichtung bzw. Fahrbeziehungen sowie nach Kategorien der beteiligten Verkehrsteilnehmenden.
- Räumliche Abgrenzung auf einen bestimmten Bereich, in welchem die Begegnungssituation stattfinden muss.

Gemäss dem oben beschriebenen Vorgehen wurden die nachfolgend dargestellten Konflikttypen definiert und geprüft.

Tab. 5 *Anwendung 1, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
30		Fahrbeziehung Kategorie	323 Begegnungen davon 43, wo abbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
40		Fahrbeziehung Kategorie	73 Begegnungen davon 27, wo einbiegendes Fz zuerst	nur Begegnungen mit einbiegenden Einspurigen Fz gut detektiert; Begegnungen mit Motorfahrzeugen de facto nicht detektiert

***Tab. 5** Anwendung 1, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
45		Fahrbeziehung Kategorie	3 Begegnungen davon 2, wo einbiegen- des Fz zuerst	Begegnungen de facto nicht detektiert
41		Fahrbeziehung Kategorie	kein Resultat	Begegnungen nicht de- tektiert
43		Fahrbeziehung Kategorie	kein Resultat	Begegnungen nicht de- tektiert
32		Fahrbeziehung Kategorie Definition Bereich	kein Resultat	Begegnungen nicht de- tektiert
8x		Fahr-/Gehbeziehung Kategorie	17 Begegnungen davon 12, wo querende Person zuerst	Begegnungen häufig nicht detektiert
8x		Fahr-/Gehbeziehung Kategorie	73 Begegnungen davon 34, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detek- tiert
8x		Fahr-/Gehbeziehung Kategorie	5 Begegnungen davon 3, wo querende Person zuerst	Begegnungen teilweise detektiert

Im Ergebnis der Konflikttypenprüfung zeigt sich, dass zwar die Exklusion FALSCH-positiver Detektionen sehr gut möglich ist. Allerdings machte dieser Analyseschritt auch deutlich, dass mit den in der Sicherheitsanalyse der Software hinterlegten und vom Nutzer nicht veränderbaren Einstellungen die festgestellten Nachteile von Aufnahmen aus der gewählten Schrägperspektive ebenfalls zum Tragen kommen. Zahlreiche, als relevante Begegnungen erwartete Situationen wurden von der Software offenbar deshalb nicht detektiert. Die Softwareeinstellungen sind nämlich so definiert, dass sich die Trajektorien zweier Verkehrsteilnehmenden in einem bestimmten Winkel zueinander befinden müssen. Hinzu kommt, dass jeweils die Position des ersten beteiligten Objektes zum Zeitpunkt des Verlassens des Bereichs sowie die Position des zweiten Objektes bei der Ankunft herangezogen wird. Je nach Konflikttyp und Abfolge (welches Objekt zuerst den Bereich passiert) führt dies dazu, dass in vielen Situationen die Bedingung des Winkels nicht erfüllt ist, wie nachfolgende Abbildung verdeutlicht.

Abb.10 *Sicherheitsindikator PET: Detektion abhängig vom Trajektorienwinkel*[8]

Auch durch gezielte Filterung ist es in nur sehr eingeschränktem Umfang gelungen, brauchbare Resultate zu sicherheitsrelevanten Begegnungssituationen über den Sicherheitsindikator PET mit Anwendung 1 auf Basis des erhobenen Videomaterials zu erzielen.

Sicherheitsindikator TTC

Die Auswertung des Sicherheitsindikators TTC über die im Softwaretool implementierte Sicherheitsanalyse kann vom Benutzer der Anwendung hinsichtlich des Grenzwertes eingestellt werden. Dieser wurde zunächst auf 2 Sekunden gesetzt, da aufgrund der Erfahrungen mit dem vergleichsweise einfachen Indikator PET und der deutlich komplexeren Berechnung des Indikators TTC von einer höheren Rechenleistung ausgegangen wurde. Andere Parameter zur Einstellung betreffen die Methode der Berechnung der Extrapolation der Objektbewegung («motion prediction») im Hinblick auf einen möglichen Kollisionspunkt sowie das Setzen einer Mindestgeschwindigkeitsdifferenz («speed-dif.») zwischen den involvierten Beteiligten. Bei diesen beiden Parametern wurde mit den Standardeinstellungen der Software operiert («motion prediction»: Ackerman Steering, «speed-dif.»: 9.98 km/h).

Im Ergebnis zeigt sich, dass in den 72 ausgewerteten Aufnahmestunden insgesamt über 40'000 Begegnungssituationen mit einem TTC-Wert bis 2 Sekunden von der Software er-

[8] Das Bild zeigt ein einbiegendes Fahrzeug, das am Ende des Querens der ersten Fahrspur der Hauptachse noch im erforderlichen Winkel positioniert ist, um für PET-Situationen bei Begegnung mit einem auf dieser Spur fahrenden Fahrzeuges detektiert werden zu können. Da die im rechten Bild dargestellten blauen Trajektorien linksabbiegender Fahrzeuge hingegen von der Fahrlinie des abgebildeten Fahrzeugs mehrheitlich abweichen und in einem geringeren Winkel zu den roten Trajektorien auf der Hauptachse stehen, wurden entsprechende Begegnungssituationen mehrheitlich nicht detektiert.

mittelt wurden. Bereits die Anzahl sowie die räumliche Verteilung im Videobild liessen vermuten, dass das Ergebnis eine hohe Zahl FALSCH-Positive Detektionen enthält. Dies hat sich durch qualitative Überprüfung einiger Situationen im Videobild bestätigt.

***Abb.11** Räumliche Verteilung der ausgewerteten Begegnungssituationen (TTC bis 2s)* [9]

Die bereits im Zuge der Grobprüfung festgestellten Ungenauigkeiten in den Trajektorien sowie die Schwierigkeiten der Software betreffend Objektposition, -ausrichtung und -dimension haben bei der Ermittlung von TTC-Begegnungen besonders grosse Auswirkungen auf die Qualität des Ergebnisses. Hinzu kommt mit der Extrapolation der Objektbewegung ein zusätzliches Element in der Berechnung, das sehr sensibel auf diese Ungenauigkeiten ist. Das nachfolgende Beispiel zeigt eine FALSCH-positive Detektion einer Begegnung mit TTC=1.34s, bei der bedingt durch die «Welle» in der Trajektorie des roten Fahrzeugs (im grün dargestellten Teil der Trajektorie) eine Kurvenbewegung im Sinne eines vermeintlichen Linksabbiegemanövers extrapoliert wird, woraus sich ein Konfliktpunkt mit einem einmündenden Fahrzeug errechnet, obwohl das rote Fahrzeug ohne jegliche Fahrlinienanpassung in der gesamten Sequenz geradeaus fährt.

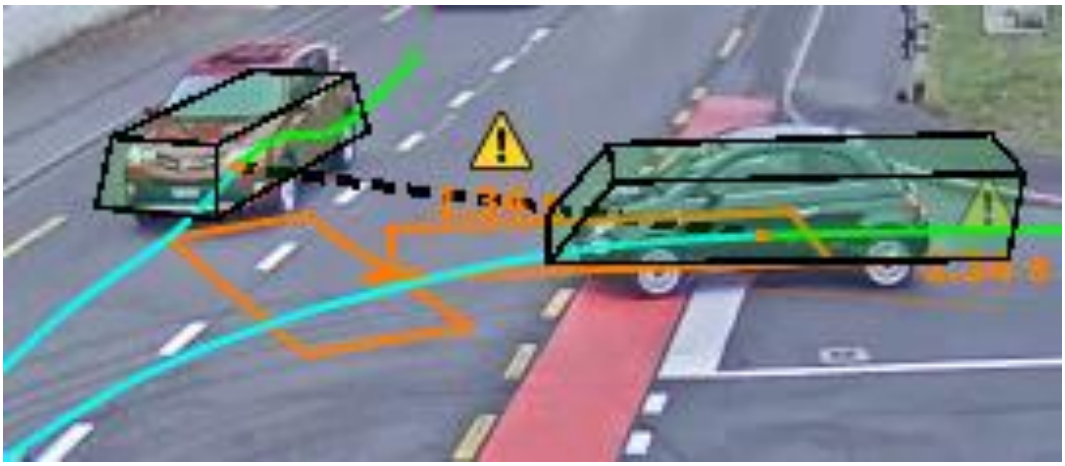


***Abb.12** Beispiel einer FALSCH-positiven Begegnungssituation (TTC bis 2s)*

[9] Jede Begegnungssituation wird als Pfeilpaar an der Stelle im Bild angezeigt, an der sich die potenzielle Kollision ereignen würde. Gemäss stichprobenhafter Überprüfung hat sich die Mehrheit als FALSCH-positive Detektionen erwiesen.

Da die Berechnung von TTC-Begegnungen auf Basis des erhobenen Videomaterials an sich bereits problematisch erscheint und sich die Probleme nicht nur auf bestimmte Bereiche beschränken, erschien auch eine nachgelagerte Filterung (z.B. über Trajektorienrichtung und Fahrbeziehungen / Beteiligten, die räumliche Abgrenzung eines Konfliktbereichs oder die Dauer der Begegnungssituation) nicht zielführend.

Da die festgestellten Schwierigkeiten von grundsätzlicher Natur sind und nicht im Rahmen des Projektes zu lösen, wurde entschieden, Anwendung 1 für die sicherheitsanalytische Auswertung der weiteren Untersuchungsorte nicht weiterzuverfolgen. Den Aufwand für die am Beispiel «01 - Kilchberg» durchgeführten Analysen bei der als gering einzuschätzenden Erfolgsaussichten auch für andere der erhobenen Untersuchungsorte zu leisten, war nicht gerechtfertigt. Eine Variante abseits der Softwareanwendung, anhand der ausgewerteten Trajektorienrohdaten durch einen eigenen Programmiercode zu verwertbaren Resultaten zu gelangen, ist ein möglicher Ansatz, der aber mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen der Forschungsstelle nicht bewältigbar war.

3.4.3 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) – erste Videoerhebung

Die Ergebnisse der automatisierten Auswertung werden vom Anbieter der Anwendung in Form eines «Dashboards» zur Verfügung gestellt. Über das «Dashboard» sind sämtliche ausgewertete Informationen abrufbar, welche sich grob in die Bereiche «Verkehrsanalyse» und «Sicherheitsanalyse» unterteilen lassen. Die Resultate können anhand des «Dashboards» mit den zur Verfügung gestellten Auswahl- und Darstellungsfunktionen analysiert werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, ausgewählte Daten zu exportieren, um anhand dieser, vertiefte Analysen vorzunehmen. Die bereits in aufbereiteter Form gelieferten Daten wurden, soweit möglich, ebenfalls zunächst auf allgemeine Limitationen und hinsichtlich der Qualität überprüft. Diese Grobprüfung hat zusammenfassend folgende Erkenntnisse gebracht.

- Die Objekterkennung durch die Software ist insgesamt als gut zu beurteilen. Allerdings wurden gemäss Resultat der Verkehrsströme auf einer Relation nur etwa ein Drittel der effektiv gefahrenen Velos gezählt. Umfangreiche Ausfälle wurden in den Nachtstunden bei inaktiver Strassenbeleuchtung verzeichnet.
- Die Objektklassifizierung erreichte eine hohe Genauigkeit. Selbst die zum Teil schwierige Unterscheidung zwischen Motorrädern und Velos wurde von der Software gut gemeistert.
- Die Trajektorienqualität scheint auf den ersten Blick gut, weist aber auch gewisse Schwachpunkte auf (kann bei dieser Anwendung nur anhand eines Beispielbildes geprüft werden):
  - Trajektorien von Fahrzeugen scheinen durchgängig (ohne Lücke) zu sein, Trajektorien von Zufussgehenden sind hingegen z.T. unterbrochen.
  - Dass Trajektorien in Bildrandbereichen Ungenauigkeiten aufweisen, konnte zwar nicht geprüft werden, gilt aber sehr wahrscheinlich.
  - Trajektorien von grösseren Fahrzeugen sowie von Zufussgehenden weisen eher Ungenauigkeiten auf als die übrigen Kategorien.
  - In Bildrandbereichen kann es vorkommen, dass ein Objekt, welches den Perimeter verlässt und ein zeitgleich in den Perimeter einfahrendes Objekt nicht unterschieden werden können und somit die Bewegung beider Objekte in einer einzigen Trajektorie resultiert. Im Ergebnis beschreibt diese Trajektorie ein «Wendemanöver» im Bildrandbereich, welches nie stattgefunden hat.
- Die «Umlegung» der Objektdimensionen und Positionierung konnte nicht geprüft werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass aufgrund der erhobenen Perspektive die Georeferenzierung Verzerrungseffekte mit Auswirkungen auf nachgelagerte Analyseverfahren (z.B. Geschwindigkeitsberechnung) nach sich zieht.

Anschliessend wurden die ausgewerteten Daten bezüglich Verkehrsmengen und Fahrgeschwindigkeiten untersucht. Zusammenfassend sind folgende Erkenntnisse festzumachen.

- Die Verkehrsmengen konnten auf allen Verkehrsbeziehungen und den meisten Kategorien relativ präzise bestimmt werden. Die erreichte Genauigkeit betreffend das Gesamtverkehrsaufkommen liegt bei rund 95%, was für derartige Analyseverfahren einen Wert im Maximalbereich darstellt. Lediglich in der Kategorie Velos weist eine Fahrbeziehung eine hohe Abweichung vom effektiven Aufkommen auf, indem nur etwa ein Drittel der Velos gezählt wurde.
- Die ermittelten Geschwindigkeiten liegen als Medianwert jedes Objektes (gemessen über die Strecke, die das Objekt im Videobild erfasst wurde) vor. Der Abgleich mit den Ergebnissen der begleitenden Seitenradarmessungen anhand von Fahrzeugen, die ohne Aufenthalt den Untersuchungsbereich durchfahren haben, zeigt, dass eine gute Übereinstimmung erreicht wurde. Bedingt durch die Aufnahmeperspektive kommt es bei der Georeferenzierung allerdings zu sehr unterschiedlichen Verzerrungen des Videobildes. Geschwindigkeitsmessungen im Videobild sind generell in Bildbereichen mit geringerer Verzerrung belastbarer als in Bildrandbereichen. Die Auswertungen mit Angaben der punktuellen Geschwindigkeit (z.B. in den ausgewerteten sicherheitsrelevanten Begegnungssituationen) sind deshalb von unterschiedlicher Qualität, da die Messung wesentlich vom Standort innerhalb des Videobildes abhängt. Die Überprüfung anhand exemplarischer Videosequenzen hat gezeigt, dass im Bildhintergrundbereich die Geschwindigkeitsangaben durchfahrender Fahrzeuge um mehr als 10 km/h zu hoch ausfallen.

Sicherheitsanalyse

In Anwendung 2 erfolgt die Auswertung grundsätzlich entsprechend vordefinierten «Szenarien», die sich anhand potenziell konflikthafter Verkehrsströme bzw. den Beteiligten Fahrzeugen oder Personen ergeben. Ausgewertet wird dabei je Szenario entweder der Sicherheitsindikator PET (bei überkreuzenden, transversalen Trajektorien der Beteiligten) oder der Sicherheitsindikator TTC (bei gleichgerichteten Trajektorien). Standardmässig werden in den PET-Szenarien alle Begegnungssituationen mit PET bis 10 Sekunden ermittelt. Bei den TTC-Szenarien sind es Situationen mit TTC bis 5 Sekunden.

Sicherheitsindikator PET

Im Ergebnis wurden über alle PET-Szenarien hinweg in den 72 ausgewerteten Aufnahmestunden der ersten Videoerhebung insgesamt ca. 9'300 Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 10 Sekunden (davon ca. 3'700 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) durch Anwendung 2 ermittelt. Aufgrund der vom Anbieter durchgeführten Kalibrierung ist zu berücksichtigen, dass das via Dashboard zur Verfügung gestellte Resultat keinen Rohstatus hat. Über die Definition sogenannter «Szenarien» erfolgt nämlich bereits eine Eingrenzung der auszuwertenden Begegnungen und der dabei berücksichtigen Bildbereiche.

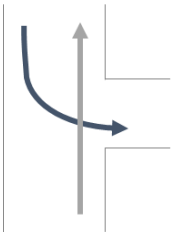
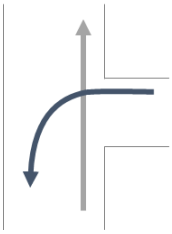
Gemäss erster Sichtung fällt auf, dass FALSCH-positiv-Detektionen vermutlich durch die Kalibrierung an diesem Untersuchungsort weitgehend vermieden werden konnten. In Zusammenhang mit «FALSCH-Positiven» ist lediglich festzustellen, dass einzelne Szenarien mit Ergebnissen vorliegen, die es in dieser Form nicht geben kann, weil die Trajektorien der Beteiligten keinen gemeinsamen Schnittpunkt haben sollten. Dies kann bedingt durch die Aufnahmeperspektive vorkommen, insbesondere, wenn grössere Fahrzeuge beteiligt sind, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt ist.

Abb.13 *Beispiel einer FALSCH-positiven Detektion (PET bis 5s)*

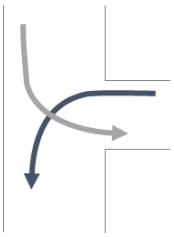
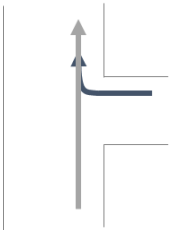
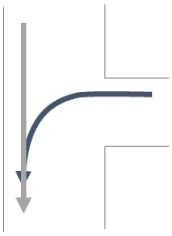
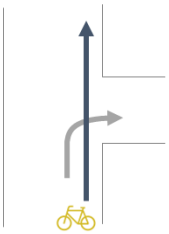
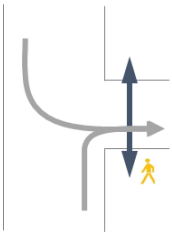
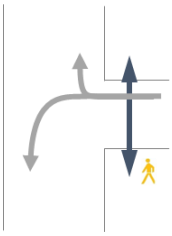
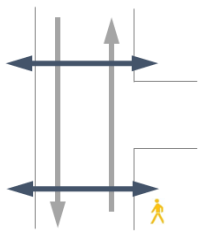
Szenarien, welche ausschliesslich FALSCH-positive-Detektionen beinhalten, können schnell identifiziert werden, um sie als nicht relevant später nicht weiter zu berücksichtigen.

Folgende relevante PET-Szenarien (Konflikttypen) wurden einer Detailbetrachtung unterzogen, wobei Szenarien zum Teil (anhand der exportierten Daten) aggregiert wurden. Die Unterscheidung, welches beteiligte Objekt zuerst den Bereich passiert hat, erfolgte ebenfalls nachträglich in der Detailanalyse. Zudem wurden in nachfolgender Auswertung nur Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden berücksichtigt.

Tab. 6 *Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
30		Szenarien	209 Begegnungen davon 44, wo abbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
40		Szenarien	1’147 Begegnungen davon 333, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert

***Tab. 6** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
45		Szenarien	22 Begegnungen davon 10, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
41		Szenarien	207 Begegnungen davon 60, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert; Geschwindigkeit in diesem Bildbereich ungenau (zu hohe Messwerte)
43		Szenarien	1’850 Begegnungen davon 629, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
32		Szenarien, Kategorie	112 Begegnungen davon 30, wo abbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
8x		Szenarien	84 Begegnungen davon 45, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
8x		Szenarien	41 Begegnungen davon 24, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
8x		Szenarien	12 Begegnungen davon 5, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert

Die Prüfung der Konflikttypen ergab, dass die Begegnungen insgesamt gut detektiert wurden. Die Software liefert für jeden Konflikttyp ein Resultat und die Verteilung der detektierten Begegnungen auf die verschiedenen Konflikttypen liegt unter Berücksichtigung der Verkehrsmengen der unterschiedlichen Ströme in einem plausiblen Verhältnis.

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konflikttypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

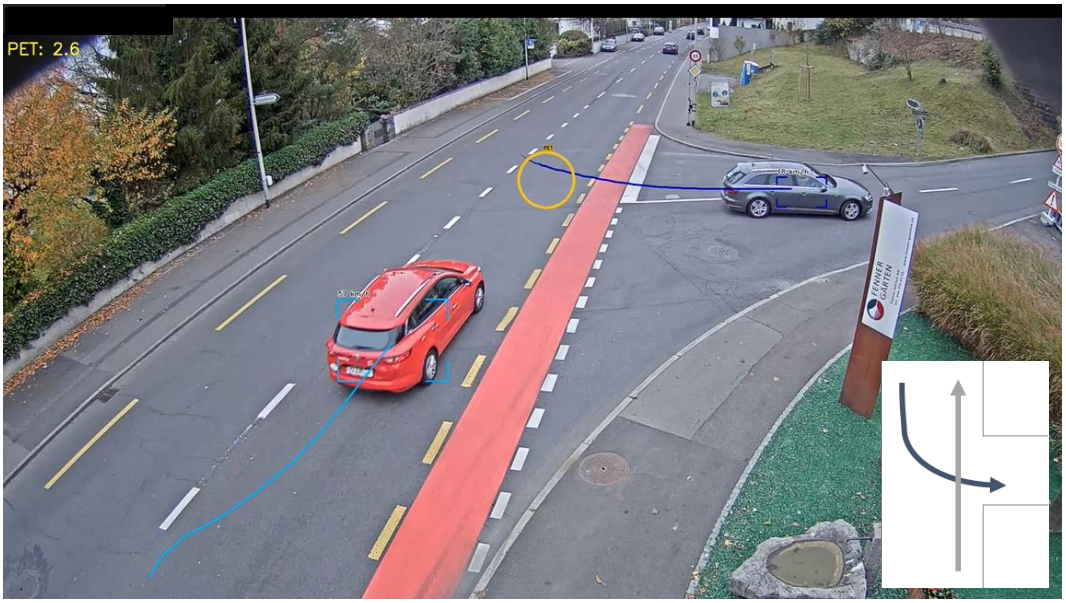


Abb.14 *Konflikttyp 30: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

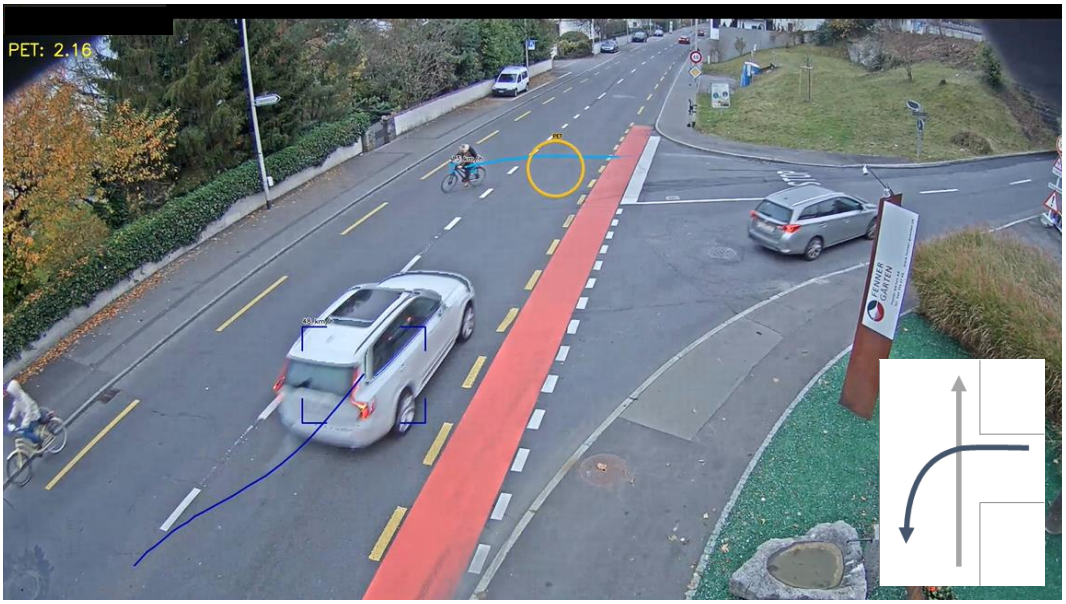


Abb.15 *Konflikttyp 40: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

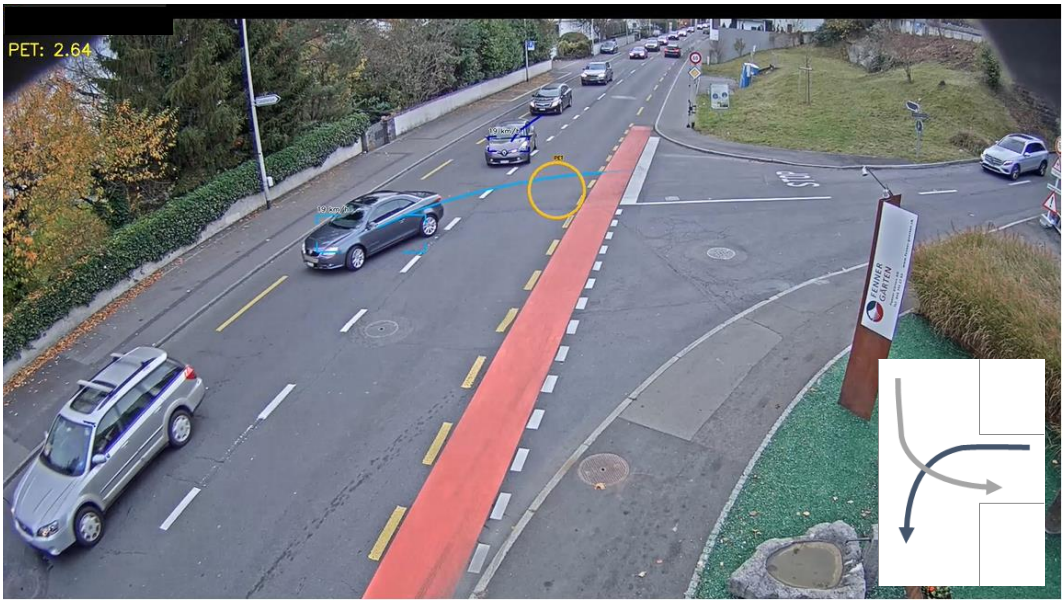


Abb.16 *Konflikttyp 45: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

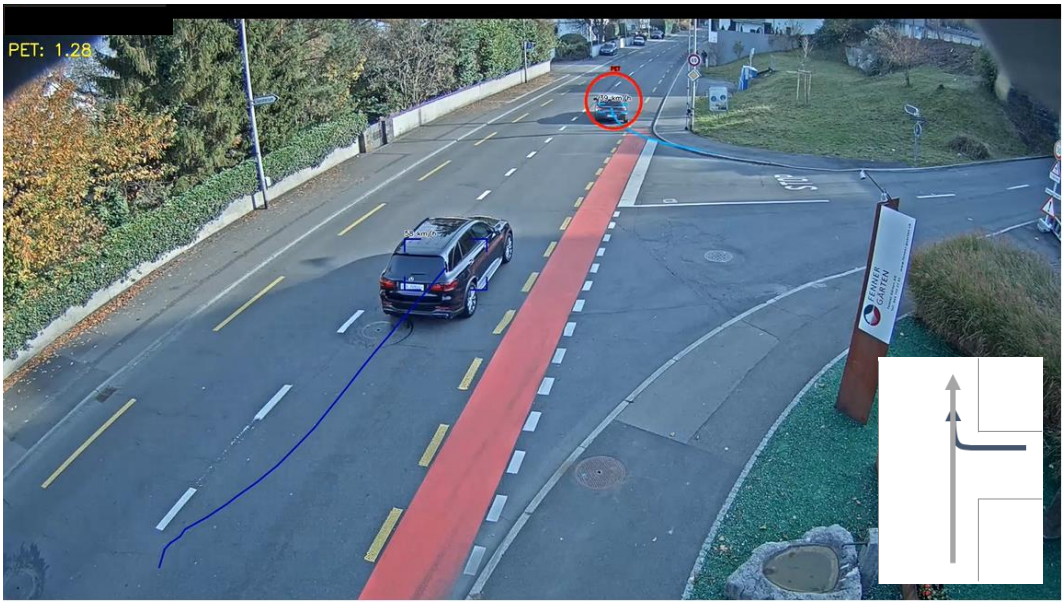


Abb.17 *Konflikttyp 41: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.18 *Konflikttyp 43: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

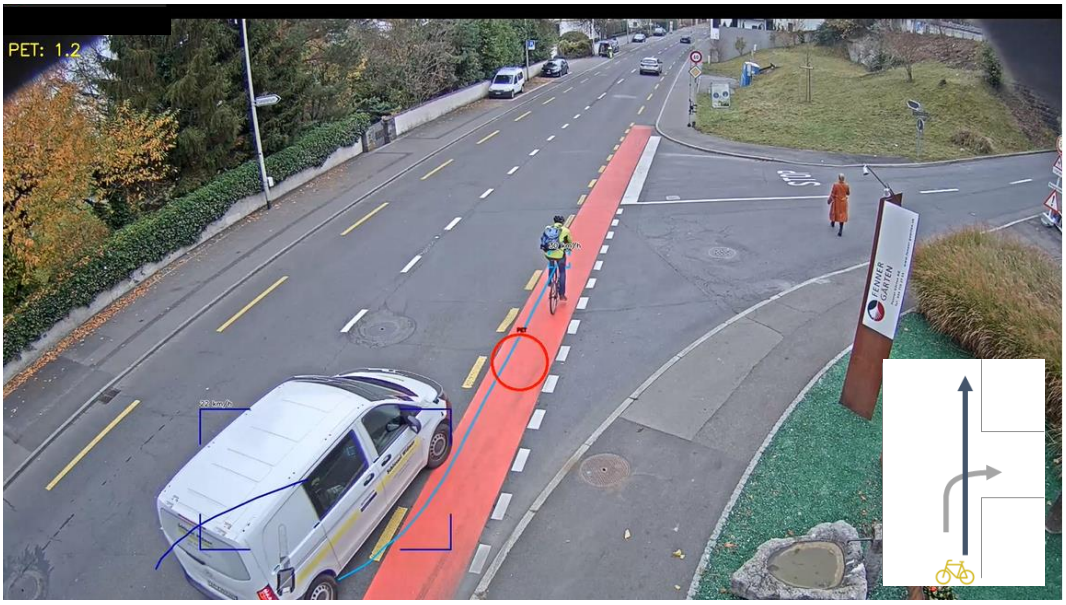


Abb.19 *Konflikttyp 32: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

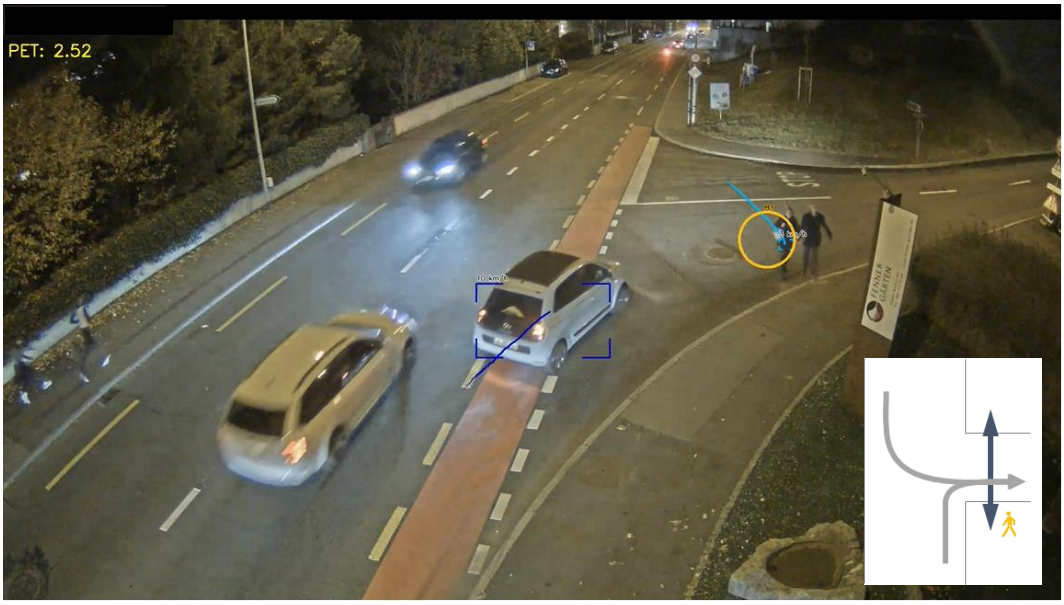
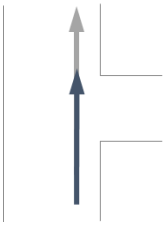
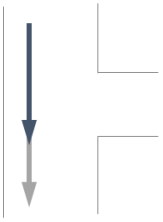


Abb.20 *Konflikttyp 8x: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Sicherheitsindikator TTC

Im Ergebnis wurden von der Software insgesamt 105 Situationen mit einem Indikatorwert TTC bis 5 Sekunden im Untersuchungszeitraum von 72h ermittelt. Diese teilen sich auf die zwei untersuchten Szenarien entlang der vortrittsberechtigten Seestrasse auf (Begegnungen im Sinne von Beinahe-Auffahrsituationen in Fahrtrichtung Süden bzw. Norden). Gemäss Überprüfung von Situationen anhand von Videosequenzen wurden ausschliesslich Begegnungssituationen von Motorfahrzeugen untereinander berücksichtigt. Es zeigte sich nämlich, dass perspektivisch bedingte einzelne FALSCH-positive Begegnungen in Zusammenhang mit dem Überholen von Velofahrenden im Resultat enthalten waren. Die nachfolgend dargestellten Resultate der untersuchten Konflikttypen basieren auf einer entsprechenden Filterung.

Tab. 7 *Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	5 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	97 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert (überwiegend Situationen im Kolonnenverkehr bei sehr tiefen Geschwindigkeiten)

Nachfolgend sind zwei Beispiele von TTC-Begegnungssituationen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

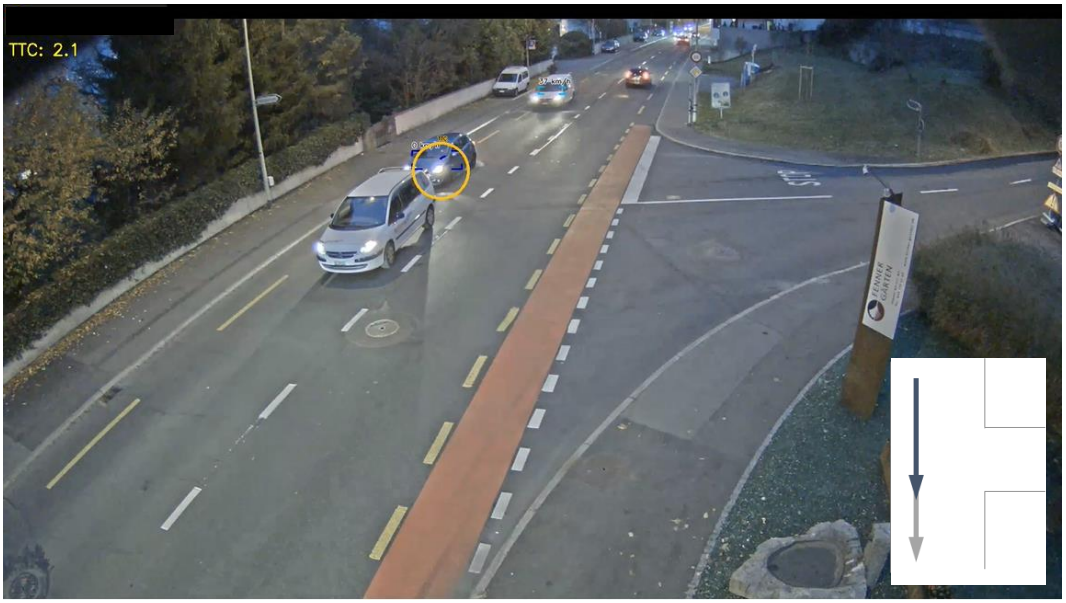


Abb.21 *Konflikttyp 2x: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

Abb.22 *Konflikttyp 2x: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung bei Kolonnenverkehr*

3.4.4 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2) – zweite Videoerhebung

Die automatisierte Auswertung der Videodaten der zweiten Erhebung am Untersuchungsort Kilchberg erfolgte mit der gleichen Version der Anwendung wie die Erstanalyse. Damit sollte sichergestellt werden, dass eine gute Vergleichbarkeit der Resultate gewährleistet werden kann. Aufgrund der erforderlichen neuerlichen Kalibrierung sowie der anbieterseitig durchzuführenden Qualitätskontrolle können sich dennoch systematische Unterschiede in den Resultaten zwischen erster und zweiter Messung ergeben. Die Resultate der zweiten Messung über einen Zeitraum von rund einer Woche (180h) wurden analog der ersten Messung (Zeitraum von drei Werktagen) ausgewertet und aufbereitet sowie in diesem Zusammenhang geprüft. Dabei konnten folgende wesentlichste Qualitätsunterschiede festgestellt werden, die in Zusammenhang mit der vom Anbieter durchgeführte Kalibrierung und Qualitätskontrolle stehen dürften.

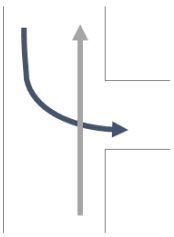
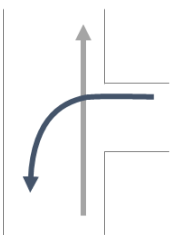
- Unterschiede in der Objekterkennung und -klassifzierung auf einzelnen Relationen, z.B. betreffend die Erfassung von grösseren Fahrzeugen (insbesondere Gelenkbussen) sowie teilweise von Velos und Zufussgehenden
- Veränderte Vorfilterung von FALSCH-Positiven «Szenarien» bzw. von FALSCH-positiven Detektionen innerhalb einzelner «Szenarien»

Neben den oben genannten methodischen Aspekten sind beim Vergleich der beiden Auswertezeiträume zudem die veränderten Rahmenbedingungen zu berücksichtigen, die Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen haben können. Konkret sind dies die im Mai 2022 im Vergleich zu November 2020 veränderte Pandemiesituation, die Jahreszeit mit den anderen Licht- und Witterungsverhältnissen sowie ein in der Zwischenzeit umgesetztes neues Tempo-50-Regime (Im Jahr 2020 waren entlang der Seestrasse noch 60 km/h als zulässige Höchstgeschwindigkeit signalisiert).

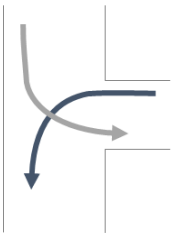
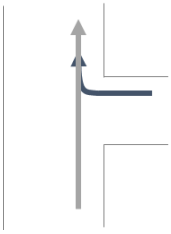
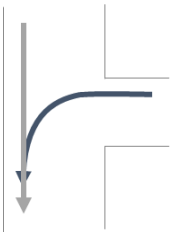
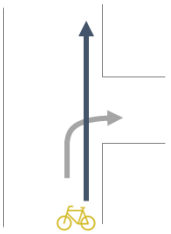
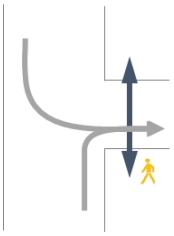
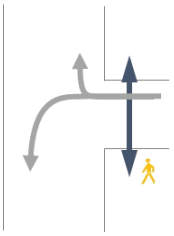
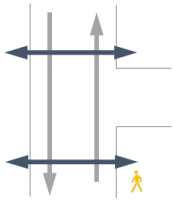
Sicherheitsindikator PET

Für die relevanten PET-Konflikttypen, die einer Detailbetrachtung unterzogen wurden, konnten folgende Ergebnisse der Auswertung von Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden erzielt werden. Gemäss Prüfung sowie entsprechendem dem Verhältnis zwischen der Anzahl detektierter Begegnungen und dem Auswertezeitraum wurden die Begegnungen wie in der Erstanalyse gut detektiert. Einzig bei Querungen über die Seestrasse konnte festgestellt werden, dass im Resultat einige falsch zugeordnete Detektionen enthalten sind (insbesondere abbiegende Velofahrende, die fälschlicherweise als Zufussgehende klassifiziert wurden).

***Tab. 8** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 180h	Anmerkung
30		Szenarien	1’837 Begegnungen davon 445, wo abbiegendes Fz zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse
40		Szenarien	1’329 Begegnungen davon 579, wo einbiegendes Fz zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse

***Tab. 8** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 180h	Anmerkung
45		Szenarien	295 Begegnungen davon 43, wo einbiegendes Fz zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse
41		Szenarien	1'641 Begegnungen davon 556, wo einbiegendes Fz zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse
43		Szenarien	7'945 Begegnungen davon 2'823, wo einbiegendes Fz zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse
32		Szenarien, Kategorie	579 Begegnungen davon 187, wo abbiegendes Fz zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse
8x		Szenarien	331 Begegnungen davon 193, wo querende Person zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse
8x		Szenarien	182 Begegnungen davon 101, wo querende Person zuerst	Detektion gemäss Erstanalyse
8x		Szenarien	39 Begegnungen davon 14, wo querende Person zuerst	Zahlreiche Detektionen, die anderem Typ zuzuordnen wären aufgrund fehlerhafter Klassifizierung (insbesondere abbiegende Velos, die falsch als querende Zufussgehende erfasst wurden)

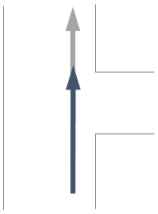
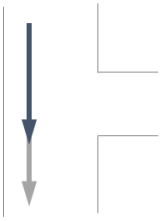
Sicherheitsindikator TTC

Für die beiden nach Fahrtrichtung unterschiedenen TTC-Konflikttypen liefert die Auswertung die in der nachfolgenden Tabelle enthaltenen Resultate, wobei wiederum ausschliesslich Begegnungssituationen von Motorfahrzeugen untereinander berücksichtigt wurden. Hierbei zeigen sich deutlichere Unterschiede zur Erstanalyse als bei den PET-Konflikttypen.

Das Ergebnis für Fahrtrichtung Süden enthält überwiegend FALSCH-positive Detektionen, die auf bereits in Kapitel 3.4.3 beschriebene Messungenauigkeiten in Bildhintergrundbereichen (bei Aufnahmen aus der Schrägperspektive) zurückzuführen sind. Dass FALSCH-Positiven dieser Art nur in der Zweitanalyse in ausgeprägtem Umfang im Resultat enthalten sind, liegt womöglich an der Definition des Messbereiches, welcher in der Erstanalyse offenbar den betreffenden Bildbereich nicht beinhaltete.

TTC-Begegnungen in Fahrtrichtung Norden konnten gemäss Prüfung in der Zweitanalyse hingegen hinsichtlich sicherheitsrelevanter Begegnungen treffsicherer ausgewertet werden, indem kaum Situationen im Kolonnenverkehr im Resultat enthalten sind. Der überwiegende Teil der Begegnungen in Fahrtrichtung Norden betrifft Begegnungen in Zusammenhang mit linksabbiegenden Fahrzeugen und dem Anpassen der Fahrgeschwindigkeit von nachfolgenden Fahrzeugen.

Tab. 9 *Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 180h	Anmerkung
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	1’182 Begegnungen	Übererfassung aufgrund von FALSCH-positiven Detektionen im Bildhintergrundbereich (in Erstanalyse wurden TTC-Begegnungen in diesem Bildbereich offenbar nicht ausgewertet)
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	321 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert (ggü. Erstanalyse kaum Situationen im Kolonnenverkehr bei sehr tiefen Geschwindigkeiten)

3.4.5 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt 2'481 Begegnungen innerhalb der Auswertezeiträume (jeweils erste 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden) analysiert. Begegnungen betrafen primär Situationen in Zusammenhang mit Fahrzeugen beim Ein- bzw. Abbiegen. Insbesondere einbiegende Fahrzeuge hatten häufig Wartezeiten und folglich mehrere, in der Regel konfliktfreie Begegnungen, bevor die Einfahrt in den Knoten möglich wurde. Typische konflikthafte Situationen ergaben sich meist dann, wenn einbiegende Fahrzeug (z.T. unter Missachtung des Stopp-Signal) in den Knoten einfuhren und dadurch eine Anpassungshandlung (Bremsen oder Ausweichen) eines anderen Verkehrsteilnehmenden erforderlich machten. Als Situationen mit gewissem Konfliktpotenzial haben sich an diesem Ort auch Begegnungen in Zusammenhang mit Fussgängerquerungen gezeigt.

Mit 2'430 Beobachtungen wurde der Grossteil der Begegnungen gemäss Auswerteschema als konfliktfrei bewertet. Die konflikthaften Situationen waren 48 Grad-1-Konflikte sowie 3 Grad-2-Konflikte.

Tab. 10 *manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
02_Kilchberg	2’481	2’430	48	3

ausgewertet wurden jeweils die ersten 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden

Abb.23 *Beispiel eines Grad-1-Konflikts durch «Erzwingen der Einfahrt»*

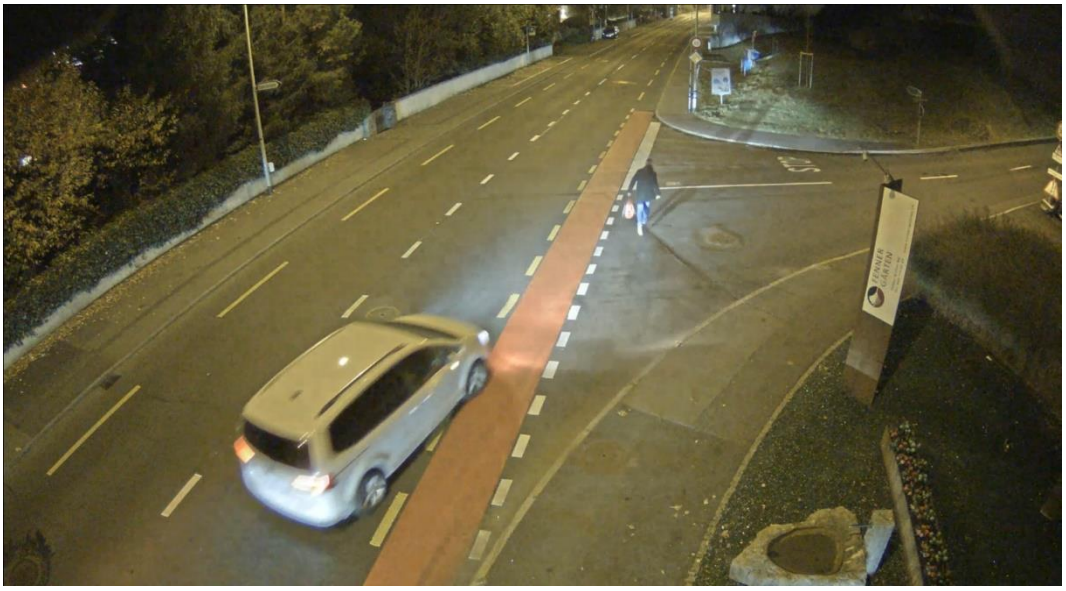
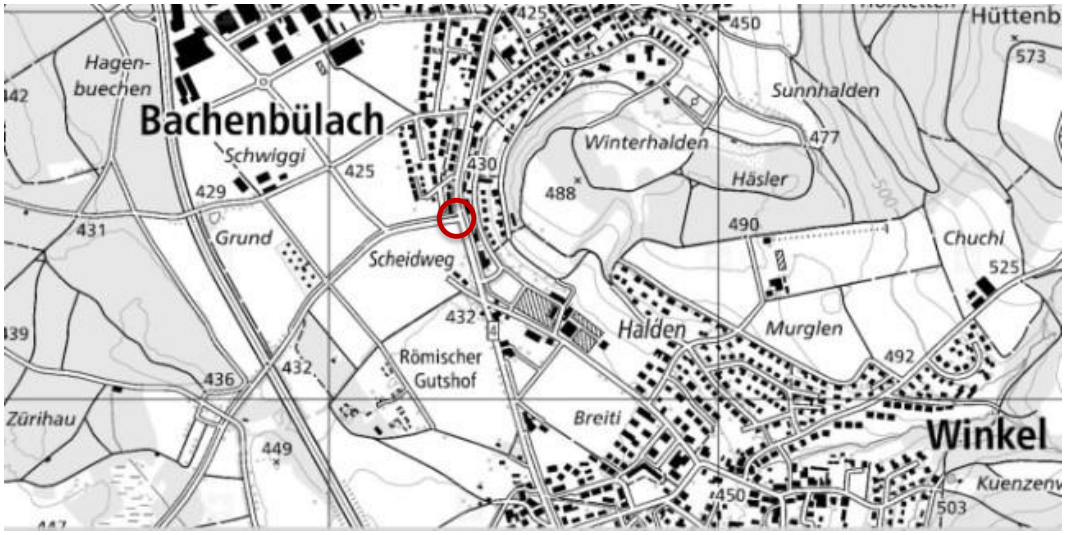


Abb.24 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts in Zusammenhang mit einer Fussgängerquerung*

3.5 Resultate «02 - Bachenbülach»

3.5.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort befindet sich am südlichen Ortsrand der Gemeinde Bachenbülach. Es handelt sich um die Einmündung Oberglatterstrasse in die Zürichstrasse, die beide als regionale Verbindungsstrasse klassiert sind. Der Knoten weist im Zeitraum (2011-2019) ein überschaubares Unfallgeschehen mit Verletzungsfolge auf, offenbar kommt es allerdings regelmässig zu Konflikten. Der Knoten wurde deshalb für die Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen.



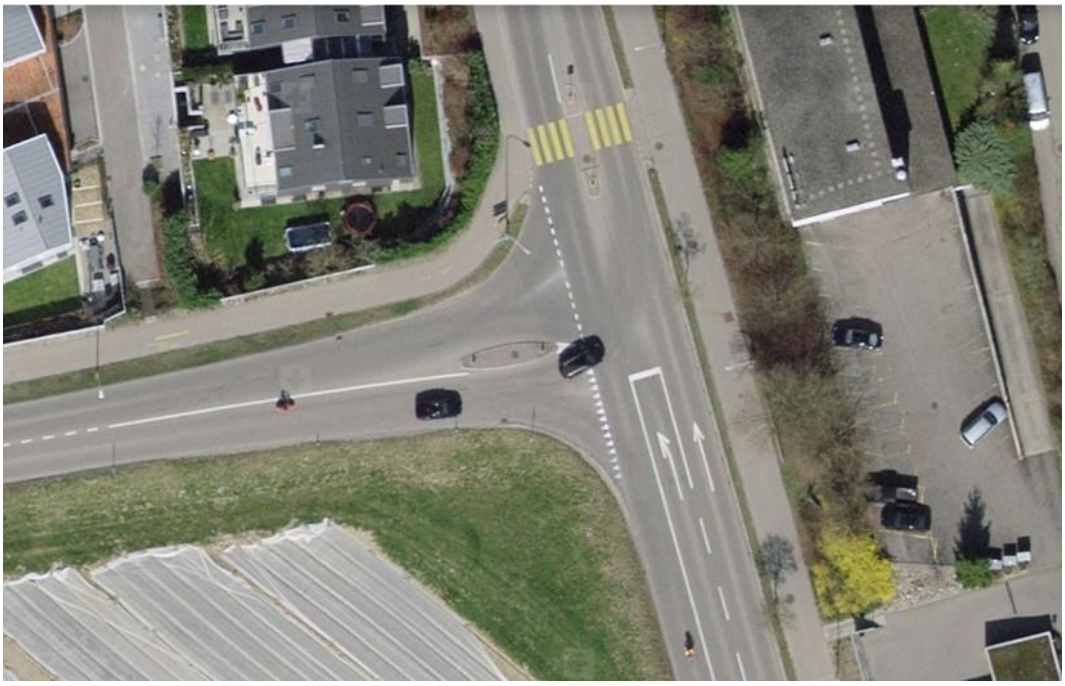


***Abb.25** Lage und Orthofoto des Standorts "02 - Bachenbülach" (geoadmin.ch)*

***Tab. 11** Untersuchungsort «02 – Bachenbülach, Zürichstrasse/Oberglatterstrasse»*

Anlage	**3-arminger Knoten**
Strassentyp	Zürichstrasse: Regionale Verbindungsstrasse Oberglatterstrasse: Regionale Verbindungsstrasse
Umgebungsnutzung	Primär Wohnnutzung / keine Bebauung
Temporegime	Tempo 50
Vortrittsregelung	Zürichstrasse vortrittsberechtigt ggü. Oberglatterstrasse
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	Zürichstrasse u. Oberglatterstrasse: gemeinsamer Fuss-/Radweg (einseitig) Fussgängerstreifen und Velofurt mit Mittelinsel über die Zürichstrasse
Öffentlicher Verkehr	Zwei Buslinien entlang der Zürichstrasse
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Einmündungstrichter, Verkehrsinsel (Oberglatterstrasse), separate Linksabbiegespur (Zürichstrasse)
Weitere Merkmale	-
Verkehrsdaten	
DTV (Stand 2016)	Zürichstrasse ca. 12'000 Oberglatterstrasse: ca. 8'000
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 2-4%
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: gering Veloverkehr: gering
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen (2011-2019)	6 Unfälle mit Personenschaden mit leichter Verletzungsfolge
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	Ein-/Abbiegeunfälle Auffahrunfälle
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	nein
Weitere Merkmale / Themen	
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebung	Aufnahme aus Höhe von ca. 6m 3 Tage à 24h (17.-19. November 2020)
Begleiterhebungen	Seitenradarmessung 3 Tage à 24h (17.-19. November 2020)

3.5.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2)

Die im «Dashboard» zur Verfügung gestellten Ergebnisse der automatisierten Auswertung wurden wieder anhand von Teilresultaten und Beispielsequenzen einer Grobprüfung hinsichtlich der Qualität unterzogen. Diese Grobprüfung bestätigt weitgehend die am Untersuchungsbeispiel «01, Kilchberg» gewonnenen Erkenntnisse.

- Die ermittelten Verkehrsströme auf allen Relationen und Verkehrsarten decken sich gut mit den effektiven Werten. Dank durchgängig aktiver Strassenbeleuchtung sind keine Ausfälle zu verzeichnen.
- Die Objektklassifizierung erreichte eine hohe Genauigkeit.
- Die Trajektorienqualität scheint auf den ersten Blick gut, dürfte aber auch die gleichen Schwachpunkte aufweisen, wie am Untersuchungsbeispiel «01_Kilchberg» dargelegt. (konnte nur anhand eines Beispielbildes geprüft werden). Auffällig ist, dass es häufiger vorkommt, dass Objekte, die den Bildbereich via Oberglatterstrasse verlassen bei zeitglich auf dieser Achse in den Bildbereich einfahrendem Objekt häufiger in einer Trajektorie resultieren.
- Aufgrund der erhobenen Perspektive ist wiederum von gewissen Verzerrungseffekten bei der Umlegung ins Koordinatensystem mit Auswirkungen auf nachgelagerte Analyseverfahren (z.B. Geschwindigkeitsberechnung) auszugehen.

Anschliessend wurden die ausgewerteten Daten im Bereich «Verkehrsanalyse» (Verkehrsmengen und Fahrgeschwindigkeiten) untersucht. Zusammenfassend sind folgende Erkenntnisse festzumachen.

- Die Verkehrsmengen konnten von der Software auf allen Verkehrsbeziehungen und den meisten Kategorien relativ präzise bestimmt werden. Die erreichte Genauigkeit betreffend das Gesamtverkehrsaufkommen liegt bei rund 95%. Auch in der Kategorie «Velos» ist die Genauigkeit der automatisierten Videoanalyse auf hohem Niveau.
- Bezüglich Geschwindigkeiten zeigt der Abgleich mit den Ergebnissen der begleitenden Seitenradarmessungen anhand von Fahrzeugen, die ohne Aufenthalt den Untersuchungsbereich durchfahren haben, dass eine gute Übereinstimmung erreicht wurde.

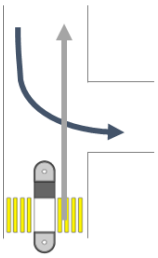
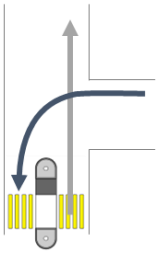
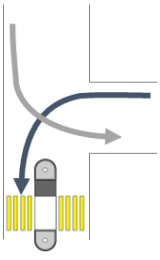
Sicherheitsindikator PET

Im Ergebnis wurden über alle PET-Szenarien hinweg in den 72 ausgewerteten Aufnahmestunden insgesamt ca. 28'300 Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 10 Sekunden (davon ca. 12'400 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) durch die Anwendung ermittelt. Die Szenarienprüfung hinsichtlich FALSCH-positiver Detektionen ergab neben einfach identifizierbaren Szenarien (perspektivisch bedingte fehlerhafte Überlagerung von Trajektorien auf Fahrbeziehungen ohne transversale Bewegungslinien) auch einen auffälligen Anteil FALSCH-Positiver in einem Szenario mit transversalen Bewegungslinien. Grund dafür ist der oben beschriebene Effekt der Bildung einer Trajektorie aus zwei unterschiedlichen Objekten. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine solche FALSCH-positive Detektion, bei dem aus der Bewegung des rechtsabbiegenden Fahrzeugs (linkes Bild) zusammen mit jener des im Bildrandbereich in Richtung Knoten fahrenden Fahrzeugs (rechtes Bild) eine gemeinsame Trajektorie bildet. Aufgrund der Tatsache, dass letztgenanntes Fahrzeug anschliessend im Knoten linksabbiegt, wird zusammen mit der Trajektorie des Motorrads (linkes Bild) auf Höhe des Fussgängerstreifens ein FALSCH-positiver PET-Indikatorwert ermittelt. Derartige FALSCH-Positive können leider nicht anhand Filterung ausgeschlossen werden und verbleiben somit im Resultat.

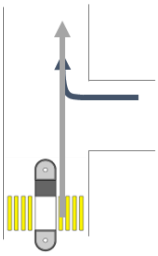
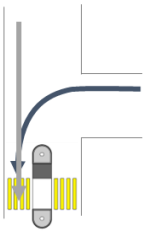
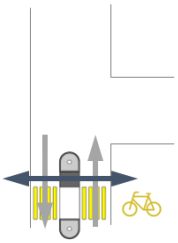
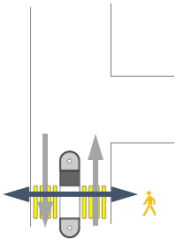
Abb.26 *Beispiel einer FALSCH-positiven Detektion (PET bis 5s)*

Folgende relevante PET-Szenarien (Konflikttypen) wurden einer Detailbetrachtung unterzogen, wobei Szenarien zum Teil (anhand der exportierten Daten) aggregiert wurden. Die Unterscheidung, welches beteiligte Objekt zuerst den Bereich passiert hat, erfolgte ebenfalls nachträglich in der Detailanalyse. Zudem wurden in nachfolgender Auswertung nur Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden berücksichtigt.

Tab. 12 *Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
30		Szenarien	3’436 Begegnungen davon 687, wo abbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
40		Szenarien	1’408 Begegnungen davon 453, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert. FALSCH-Positive (ca. 10-20%) aufgrund Fehlzuweisung der Bewegungsrichtung
45		Szenarien	1’098 Begegnungen davon 139, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert

***Tab. 12** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
41		Szenarien	2'917 Begegnungen davon 874, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
43		Szenarien	1'677 Begegnungen davon 614, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
80 V		Szenarien, Kategorie	440 Begegnungen davon 218, wo querendes Velo zuerst	Begegnungen gut detektiert
80 F		Szenarien, Kategorie	194 Begegnungen davon 117, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert

Die Prüfung der Konflikttypen ergab, dass die Begegnungen insgesamt gut detektiert wurden. Die Software liefert für jeden Konflikttyp ein Resultat und die Verteilung der detektierten Begegnungen auf die verschiedenen Typen liegt unter Berücksichtigung der Verkehrsmengen der unterschiedlichen Ströme in einem plausiblen Verhältnis.

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konflikttypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

Abb.27 *Konflikttyp 30: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

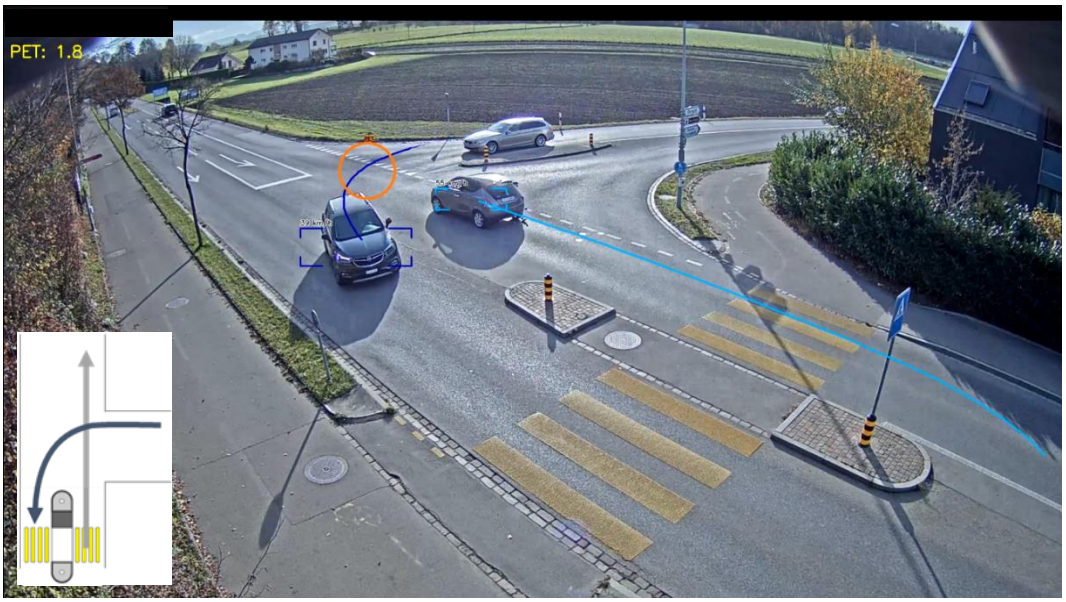


Abb.28 *Konflikttyp 40: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.29 *Konflikttyp 45: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.30 *Konflikttyp 41: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.31 *Konflikttyp 43: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.32 *Konflikttyp 80 V: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

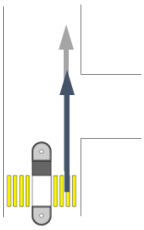
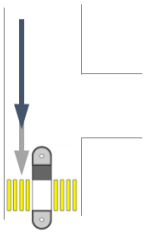
Abb.33 *Konflikttyp 80 F: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Sicherheitsindikator TTC

Von der Software wurden insgesamt nur 11 Situationen mit einem Indikatorwert TTC bis 5 Sekunden im Untersuchungszeitraum von 72h ermittelt. Die einzige ermittelte Situation in Fahrtrichtung Süden entlang der Zürichstrasse konnte als FALSCH-positiv identifiziert werden. Die übrigen 10 Situationen betrafen die Fahrtrichtung Norden entlang der Zürichstrasse und lagen im höheren Wertebereich 3-5 Sekunden. Dies lässt vermuten, dass die Fahrzeuge entlang der Zürichstrasse in der Regel flüssig durch den Perimeter fahren können und es kaum zu Beeinträchtigungen (abgesehen von Begegnungen mit ein- oder abbiegenden Fahrzeugen, welche aber per Definition nicht als TTC-Begegnungen erfasst werden) kommt. Eine weitere Erklärung wäre, dass allenfalls die festgestellten Ungenauigkeiten in der Geschwindigkeitsermittlung zu einer Untererfassung von TTC-Begegnungen führen könnten, was nicht bestätigt werden konnte.

Auf eine vertiefte Analyse der TTC-Begegnungen an diesem Untersuchungsbeispiel wurde aufgrund der geringen Anzahl ermittelter Situationen verzichtet. Dass eine systematische Untererfassung von TTC-Begegnungen der Grund für die geringe Anzahl an Detektionen ist, kann jedenfalls ausgeschlossen werden.

***Tab. 13** Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x S		Szenarien Kategorie (nur MFz)	1 Begegnungen	FALSCH-positive Detektion
2x N		Szenarien Kategorie (nur MFz)	10 Begegnungen	

Nachfolgend ist ein Standbild der einzigen TTC-Begegnung (FALSCH-positive Detektion), zu der eine Videosequenz im Dashboard der Anwendung vorlag, abgebildet.

***Abb.34** Konflikttyp 2x S: FALSCH-positiv TTC-Begegnung*

3.5.3 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt 4'273 Begegnungen innerhalb der Auswertezeitraume (jeweils erste 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden) analysiert. Ähnlich wie am Standort «01_Kilchberg» betrafen Begegnungen auch hier primär Situationen in Zusammenhang mit Fahrzeugen beim Ein- bzw. Abbiegen. Konflikte ergaben sich vor allem, wenn einbiegende Fahrzeug in den Knoten einfuhren und dadurch eine Anpassungshandlung eines anderen Verkehrsteilnehmenden erforderlich machten. Die Beurteilung, welche Begegnungen als Konflikte gelten, erfolgte analog dem Vorgehen wie am Beispiel «01_Kilchberg» erläutert.

Mit 4'273 Beobachtungen wurde der Grossteil der Begegnungen gemäss Auswerteschema als konfliktfrei bewertet. Unter den insgesamt nur wenigen konflikthaften Situationen waren kaum Gard-1-Konflikte (5), hingegen aber 12 kritischere Konflikte (ab Grad 2).

***Tab. 14** manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
02_Bachenbülach	2’481	2’430	5	12

ausgewertet wurden jeweils die ersten 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden

***Abb.35** Beispiel eines Grad-2-Konflikts beim Rechtseinbiegen*

***Abb.36** Beispiel eines Grad-2-Konflikts beim Linkseinbiegen*

3.6 Resultate «03 – Dietikon, Schönenwerdkreuzung»

3.6.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort ist Teil der im Jahr 2018 in Betrieb genommen neuen Schönenwerdkreuzung in Dietikon bei Zürich. Untersucht wurde der Zufahrtsbereich zur Einmündung Zürcherstrasse/Bernstrasse (Knoten Zürcherstrasse/Spitalstrasse mit dem anschliessenden Vorsortierungsbereich) mit besonderem Fokus auf die dortige Veloverkehrsführung. Der Bereich wurde aufgrund der allenfalls konflikthaften Spurwechsel des motorisierten Fahrverkehrs für die Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen.

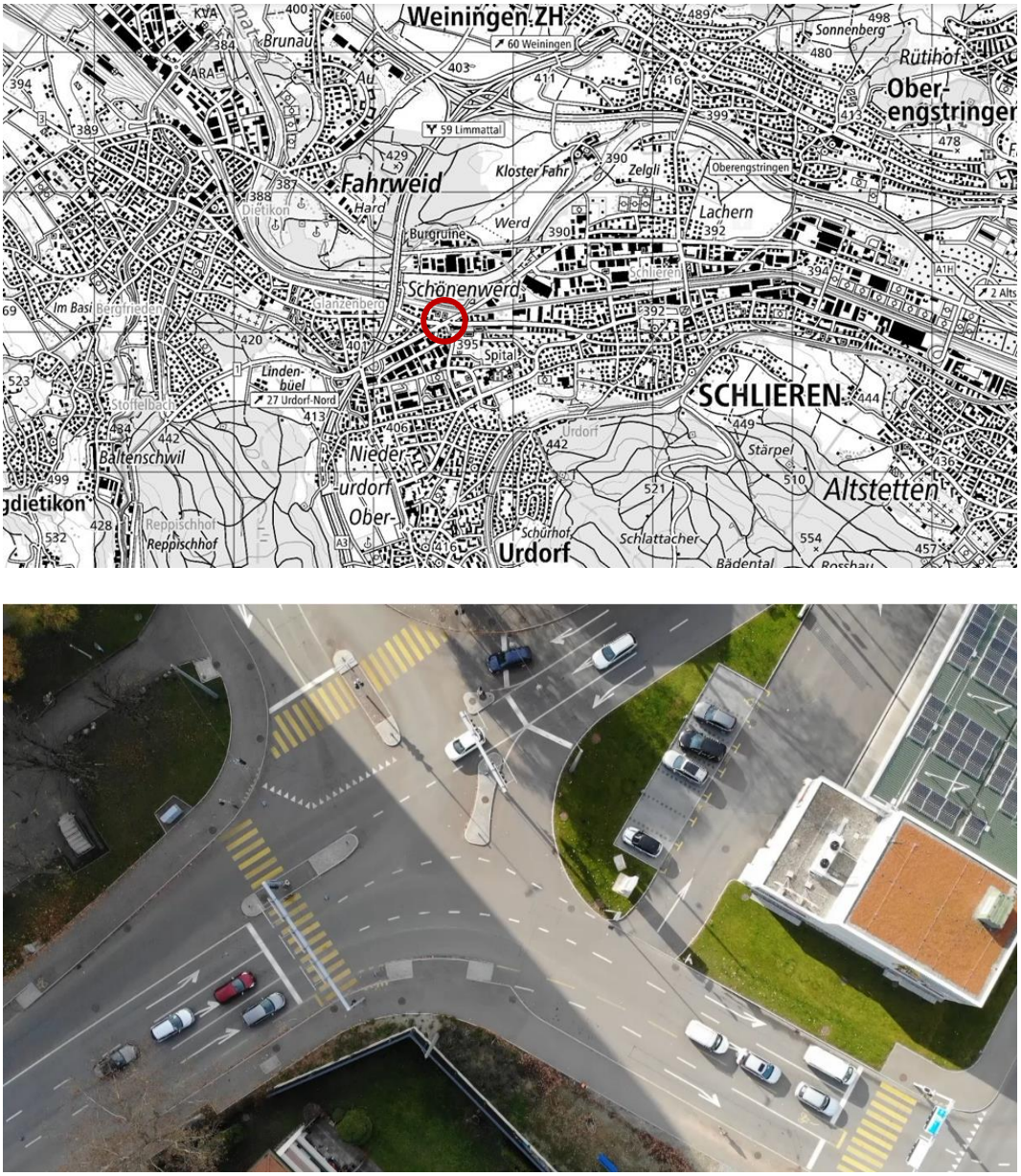


Abb.37 *Lage und Orthofoto des Standorts "03 - Dietikon" (geoadmin.ch / eigene Drohnenaufnahme)*

***Tab. 15** Untersuchungsort «03 – Dietikon, Schönenwerdkreuzung»*

Anlage	**LSA-Knoten**
Strassentyp	Zürcherstrasse: Regionale Verbindungsstrasse
Umgebungsnutzung	Wohnnutzung / Gewerbe
Temporegime	Tempo 50
Vortrittsregelung	Lichtsignalanlage Besonderheit: Vortrittsbelastung Veloverkehr bei Rückführung auf Fahrbahn (Radstreifen)
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	gemeinsamer Fuss-/Radweg (einseitig) Radstreifen (Vorsortierungsabschnitt) Fussgängerstreifen und Velofurt im Knoten
Öffentlicher Verkehr	eine Buslinie (für Untersuchung nicht relevant)
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Vorsortierungsabschnitt mit zwei Linksabbiegespuren (MIV) und einer Linksabbiegespur (Velo) sowie einer Rechtsabbiegespur (MIV) Veloführung im unmittelbaren Knotenbereich auf Trottoirniveau und anschliessende Rückführung auf Fahrbahn/Radstreifen
Weitere Merkmale	Zufahrt Tankstelle
Verkehrsdaten	
DTV Zürcherstrasse Querschnitt (Stand 2016) DTV Vorsortierungsbereich eigene Schätzung	Zürcherstrasse: ca. 14'000 – 17'000 DTV auf untersuchtem Abschnitt (Vorsortierungsbereich): ca. 8'000 DTV
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 4%
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: gering Veloverkehr: gering
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen	-
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	-
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	-
Weitere Merkmale / Themen	allenfalls kritische Spurwechsel in Zusammenhang mit Veloverkehrsführung
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebung	Aufnahme aus Höhe von ca. 6m 3 Tage à 24h (24.-26. November 2020)
Begleiterhebungen	-

3.6.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2)

Sicherheitsindikator PET

Insgesamt liefert die automatisierte Videoanalyse für diesen Sicherheitsindikator etwas mehr als 8'300 Begegnungen mit einem PET-Wert bis 10 Sekunden (davon knapp 2'600 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) in 72 ausgewerteten Aufnahmestunden.

Die Grobprüfung der im Dashboard zur Verfügung gestellten Ergebnisse der automatisierten Auswertung ergab folgende spezifische Erkenntnisse.

Wie die nachfolgende Abbildung verdeutlicht, weist die Trajektorienqualität von grossen Fahrzeugen (in diesem Fall primär von linksabbiegenden Linienbussen) insbesondere im Bildvordergrund erhebliche Ungenauigkeiten auf. Im konkreten Beispiel wirkt sich die Fahrzeugdimension hier deshalb besonders nachteilig aus, da Objekte auf der genannten Fahrbeziehung nie vollständig im Bild erscheinen. Aus diesem Grund hat die Software erhebliche Schwierigkeiten bei der Verortung des Objektes. Beim Blick auf die nach Bewegungsrichtungen farblich dargestellten Trajektorien ist ersichtlich, dass eine feine Unterteilung vorliegt, die zum Teil auch die Spurwahl gemäss Vorsortierung berücksichtigt. Die Unterteilung ist nötig, um Spurwechselmanöver mit dem Sicherheitsindikator PET auswerten zu können, da die Anwendung für die Ermittlung von PET-Begegnungen voraussetzt, dass die Trajektorien der Beteiligten unterschiedlichen Bewegungsrichtungen zugeordnet sind. Die Tankstellenzufahrt wurde allerdings nicht als separate Bewegungsrichtung, sondern zusammen mit dem linken Vorsortierstreifen erfasst. Ebenso wurden auch die am rechten Bildrand dargestellten Bewegungslinien von rechtsabbiegenden Velofahrenden auf der Veloinfrastruktur und jene von Motorfahrzeugen auf der Fahrbahn, welche in weiterer Folge den Radstreifen queren nicht unterschieden. Beide sind im gleichen hellgrünen Farbton dargestellt und somit derselben Bewegungsrichtung zugeordnet. Dieser Umstand hat zur Folge, dass relevante Begegnungssituationen von Velos und parallel einfahrenden und den Radstreifen querenden Motorfahrzeugen wie in *Abb.39* ersichtlich von der Software nicht detektiert werden konnten.

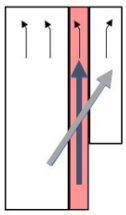
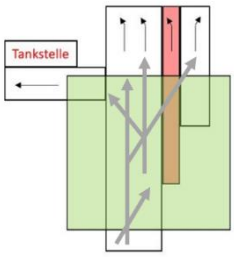
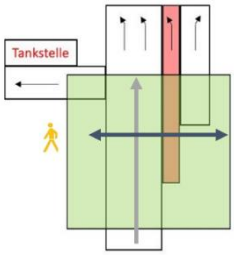
Abb.38 *Trajektorien nach Bewegungsrichtungen*

Abb.39 *Relevante Begegnungssituation, die von der Software nicht identifiziert wurde*

Im Zuge der Prüfung der einzelnen Szenarien des Dashboards wurde offensichtlich, dass die Zuordnung nach Bewegungsrichtungen zum Teil Fehler aufweist, was wiederum Inkonsistenzen in der Szenarienzuweisung der Begegnungssituationen nach sich zieht. Ausserdem können hinsichtlich Spurverhalten aus den Daten keine direkten Rückschlüsse darauf gezogen werden, welches Fahrzeug innerhalb des Untersuchungsbereichs die Spur wechselt. Folglich wurde entschieden, bei der Unterscheidung nach Konflikttypen auf eine feine Unterteilung zu verzichten und stattdessen für Begegnungen von Motorfahrzeugen untereinander infolge von Spurwechselmanövern Aggregationen vorzunehmen.

Für die weitere Analyse wurden schliesslich drei verschiedene Konflikttypen gebildet. Weitere, im Dashboard-Resultat enthaltene Szenarien, welche insbesondere Begegnungssituationen im Zusammenhang mit linksabbiegenden Fahrzeugen am linken unteren Bildrand betrafen, wurden nicht berücksichtigt, da der Bereich nicht vollständig erfasst wurde.

***Tab. 16** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
1x V		Szenarien	18 Begegnungen davon 6, wo Velo zuerst	Begegnungen gut detektiert, sofern Objekte unterschiedliche Bewegungsrichtungen zugeordnet sind. Untererfassung, da relevante Begegnungen von zwei Objekten bei gleicher Bewegungsrichtung nicht detektiert wurden.
1x M		Szenarien (nur MFz)	2'422 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert. Keine Unterscheidung möglich, ob spurwechselndes Fz zuerst
80		Szenarien	18 Begegnungen davon 1, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert. Untererfassung aufgrund Nichterfassung einzelner querenden Personen

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konflikttypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

Abb.40 *Konflikttyp 1x V: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

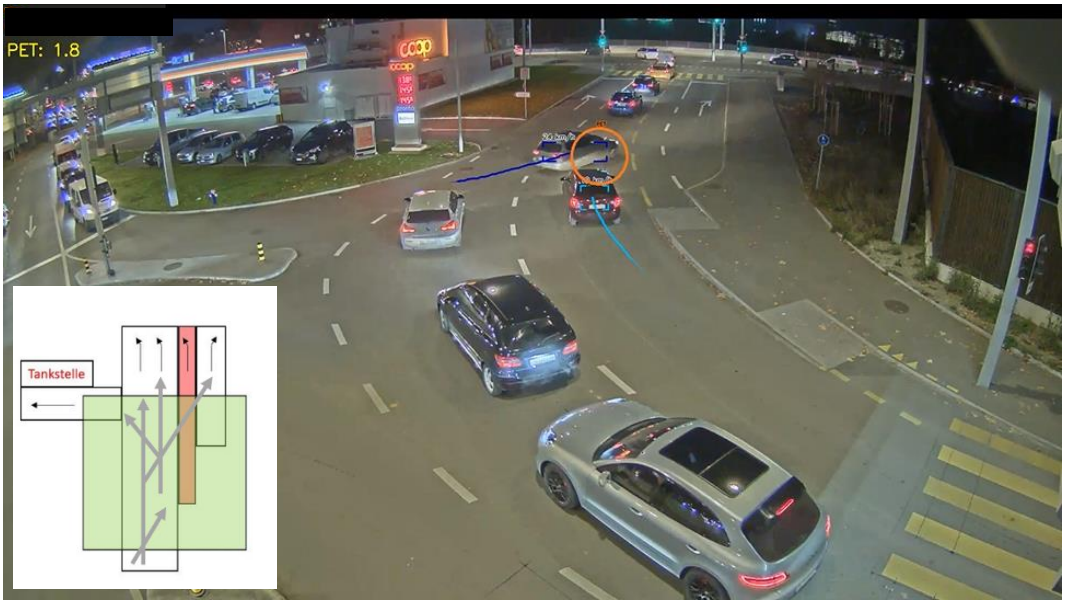


Abb.41 *Konflikttyp 1x M: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.42 *Konflikttyp 1x M: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

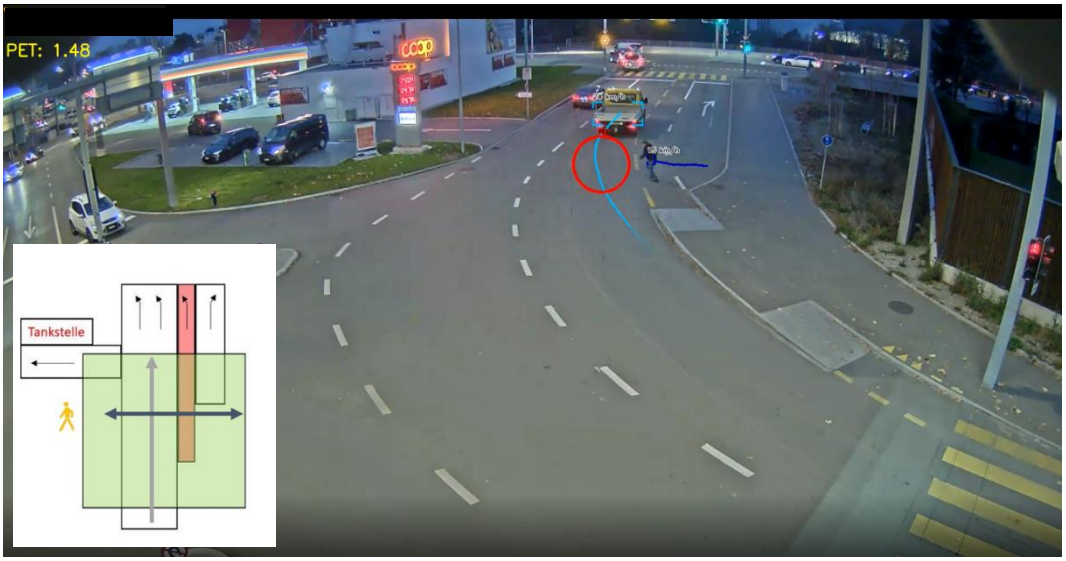


Abb.43 *Konflikttyp 80: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Sicherheitsindikator TTC

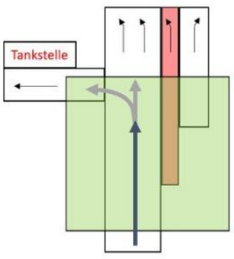
Für den Sicherheitsindikator TTC liefert die automatisierte Analyse insgesamt rund 1'400 Begegnungen mit einem Indikatorwert TTC bis 5 Sekunden.

Die im Resultat der automatisierten Auswertung vorliegende Unterteilung nach Bewegungsrichtungen erforderte auch hinsichtlich der mit dem Sicherheitsindikator TTC detektierten Begegnungssituationen eine Aggregierung. Hinzu kommt, dass sich im Zuge der Prüfung mehrere im Dashboard-Resultat enthaltene Szenarien als nicht relevant herausstellten. Bei diesen Szenarien mit ausschliesslich FALSCH-positiven Detektionen handelt es sich, wie im nachfolgenden Beispiel dargestellt, um Vorbeifahrten an parallel stehenden Fahrzeugen im Vorsortierbereich.

Abb.44 *FALSCH-positive Detektion einer TTC-Begegnung im Vorsortierbereich*

Die als relevant verbliebenen Szenarien des Dashboard-Ergebnisses wurden vollständig aggregiert, da eine Unterscheidung nach Bewegungsrichtung aus den gleichen Gründen wie bei der Bildung der PET-Konflikttypen und unter Berücksichtigung der geringen Anzahl an detektierten Begegnungssituationen in einzelnen Szenarien nicht sinnvoll erschien.

Tab. 17 *Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	286 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert, allenfalls Unterer-fassung aufgrund

Nachfolgend ist ein Beispiel einer TTC-Begegnungssituation dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenz im Dashboard zur Verfügung gestellt wurde.

Abb.45 *Konflikttyp 2x: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

3.6.3 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt nur 76 Begegnungen innerhalb des Auswertezeitraums registriert (aufgrund der geringen Anzahl Begegnungen wurden an diesem Standort die gesamten 72 Aufnahmestunden ausgewertet).

45 Beobachtungen wurden gemäss Auswerteschema als konfliktfreie Begegnungen bewertet. Im Verhältnis zur geringen Anzahl ausgewerteter Begegnungen stellen die 24 Gard-1-Konflikte und 7 kritischeren Konflikte (ab Grad 2) relative hohe Werte dar.

Tab. 18 *manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
03_Dietikon	76	45	24	7

ausgewertet wurden die gesamten 72 Aufnahmestunden

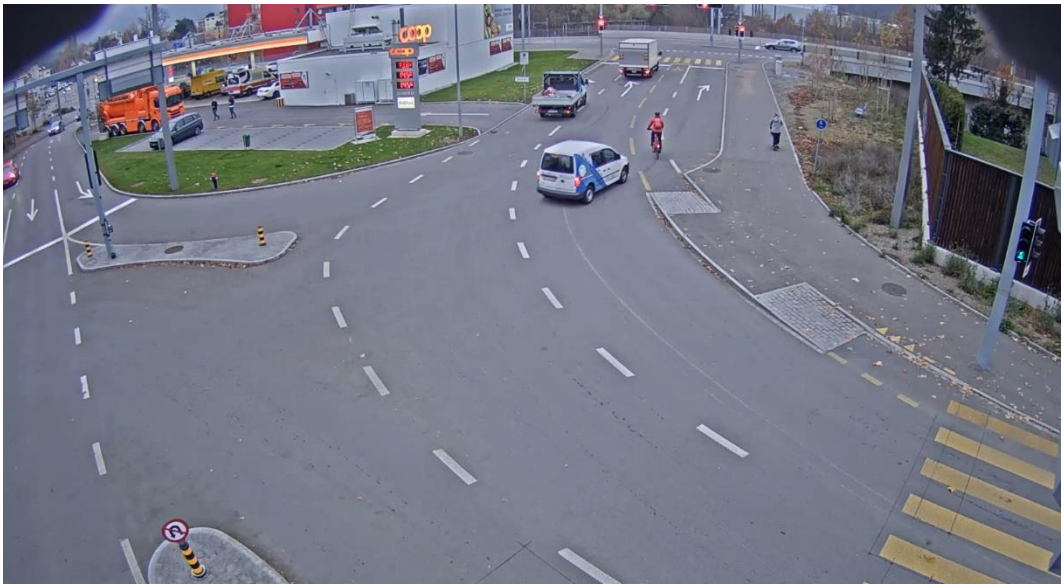


Abb.46 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts im Bereich des Radstreifens*

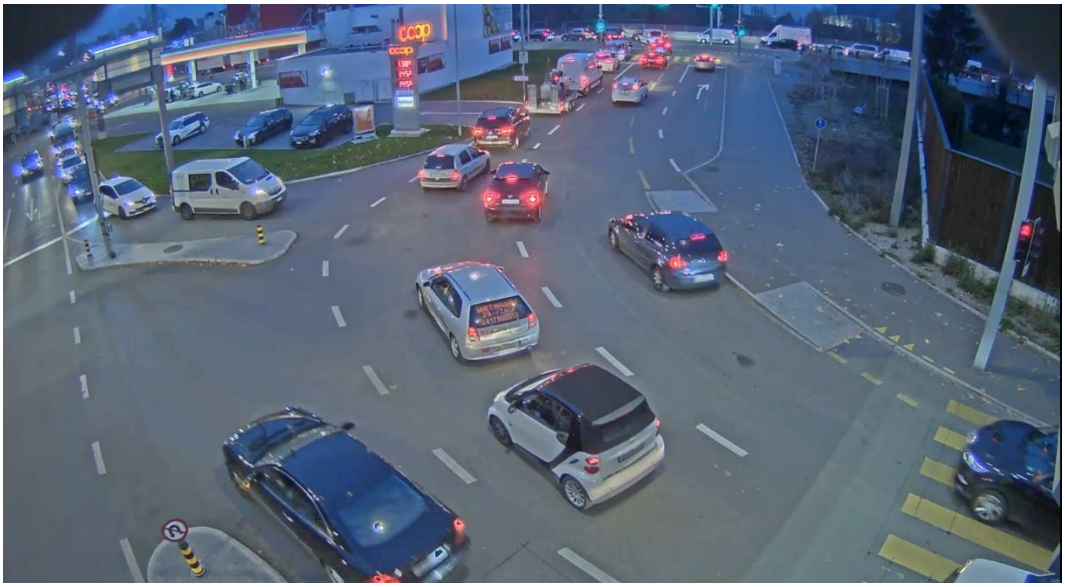


Abb.47 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts beim Spurwechsel*

3.7 Resultate «04 – Luzern, Staechenrain»

3.7.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort befindet sich im Bereich des zur Stadt Luzern gehöhrenden Weiler auf der Hellbühlstrasse. Es handelt sich um den vierarmigen Knoten, der durch die Einmündungen zweier untergeordneter Strassen an dieser Stelle entsteht, wobei der südliche Knotenast aufgrund der Erschliessung einer nahegelegenen Deponie verkehrlich bedeutsamer ist. Die im unmittelbaren Knotenbereich befindliche Bushaltestelle (Busbuchten) ist eine weitere Besonderheit dieses Untersuchungsortes. Ausserdem ist es der einzige Ort mit Tempo-80-Regime, der im Rahmen dieses Projektes untersucht wurde. Der Knoten wurde insbesondere auch aufgrund des Unfallgeschehens zur Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen.

Abb.48 *Lage und Orthofoto des Standorts "04 - Staechenrain" (geoadmin.ch)*

***Tab. 19** Untersuchungsort «03 – Luzern, Stechenrain (Hellbühlstrasse/Ober-Stächenrain»*

Anlage	**Knoten ausserorts**
Strassentyp	Hellbühlstrasse: Regionale Verbindungsstrasse Einmündende Strassen: Erschliessungsstrassen
Umgebungsnutzung	Landwirtschaft
Temporegime	Tempo 80
Vortrittsregelung	Hellbühlstrasse vortrittsberechtigt gegenüber einmündenden Strassen
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	Hellbühlstrasse: gemeinsamer Fuss- und Veloweg (einseitig) ansonsten keine weiteren Anlagen für den Fuss- und Veloverkehr
Öffentlicher Verkehr	zwei Buslinien
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Haltestellen (Busbuchten) im unmittelbaren Knotenbereich
Weitere Merkmale	Hofladen (Selbstbedienung)
Verkehrsdaten	
DTV	Hellbühlstrasse ca. 8'000 -10'000 DTV Ober-Stächenrain: ca.800 - 1'000 DTV
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 6-8% (Schätzung)
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: sehr gering Veloverkehr: sehr gering
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen (2011-2019)	8 Unfälle mit Personenschaden im unmittelbaren Knotenbereich, davon 1 Unfall mit schwerer Verletzungsfolge weitere 4 Unfälle mit Personenschaden im Nahbereich des Knotens, davon 2 Unfälle mit schwerer Verletzungsfolge
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	Ein-/Abbiegeunfälle
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	ja
Weitere Merkmale / Themen	
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebung	Aufnahme aus Höhe von ca. 6m 3 Tage à 24h (23.-25. März 2021)
Begleiterhebungen	-

3.7.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2)

Sicherheitsindikator PET

Die automatisierte Analyse liefert im Ergebnis insgesamt etwas weniger als 4'400 Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 10 Sekunden (davon knapp 1'900 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) für den ausgewerteten Zeitraum von 72 Aufnahmestunden.

Die Prüfung der im Dashboard zur Verfügung gestellten Resultate lässt auf eine gute Qualität der Trajektorien sowie eine sehr zuverlässige Objektklassifizierung schliessen. Es bestätigt sich allerdings die Problematik in Zusammenhang mit der Erfassung grösserer Objekte hinsichtlich Ungenauigkeiten in der Trajektorienermittlung. Im konkreten Beispiel sind es insbesondere Lkw (in der nachfolgenden Abbildung in violetter Farbe dargestellt), deren Trajektorien vor allem auf der Abbiegebeziehung kaum geradlinige Verläufe aufweisen. Hinsichtlich der Zuweisung der Bewegungsrichtung kommt es auch bei der Auswertung der Aufnahmen dieses Untersuchungsorts zu Fehlzuweisungen der Bewegungsrichtung aufgrund von falsch detektierten Wendemanövern.

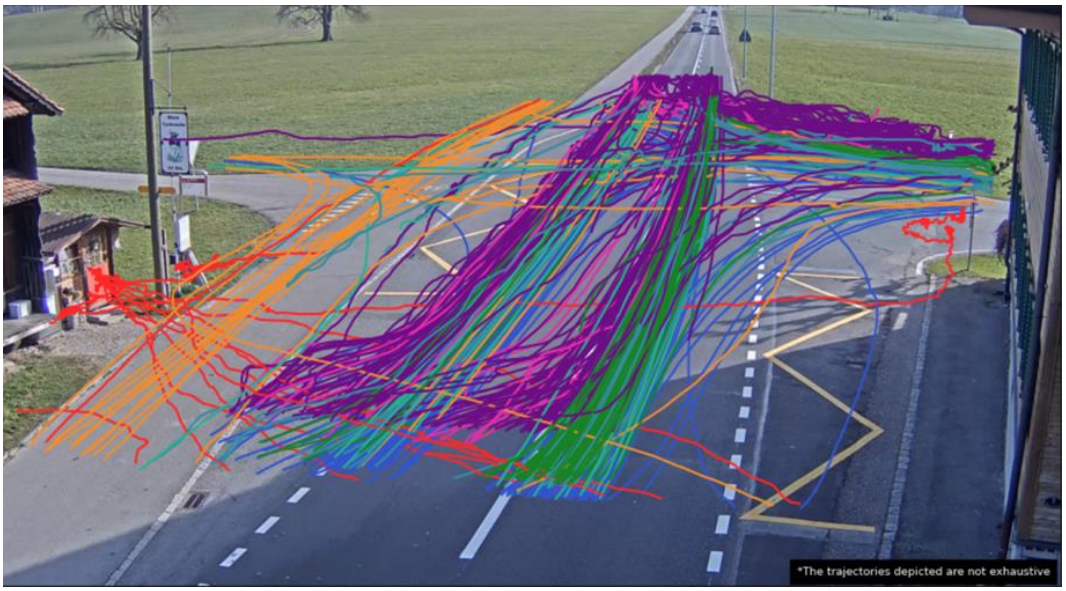
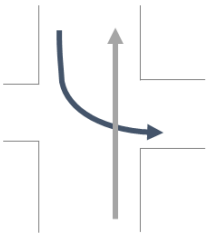
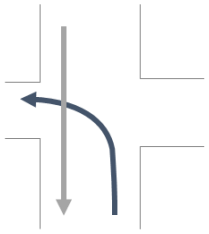
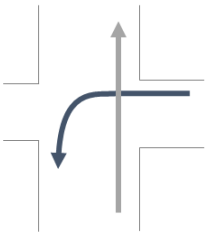
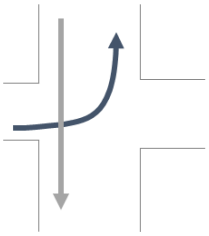
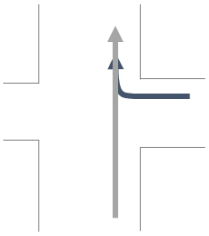
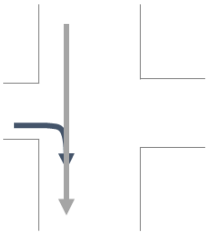
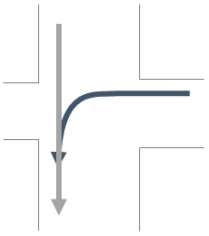


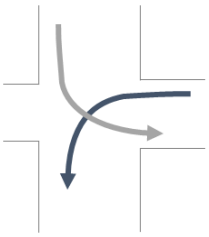
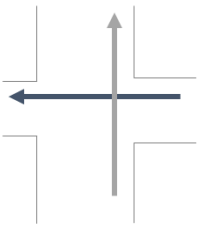
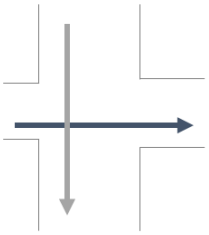
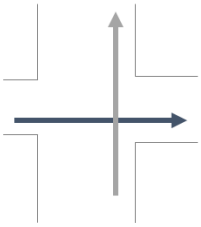
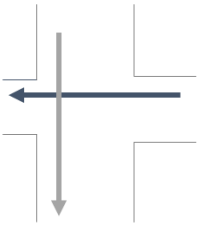
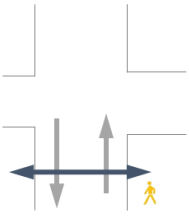
Abb.49 *Trajektorien nach Objektkategorien*

Wie in anderen untersuchten Beispielen, sind einzelne Szenarien des Dashboards als nicht relevant zu deklarieren, da sie entweder durchwegs FALSCH-positive Detektionen beinhalten (z.B. zweier Fahrbeziehungen ohne gemeinsamen potenziellen Konfliktbereich, wo die Detektion primär auf die Perspektive des Videobildes und der daraus resultierenden ermittelten Lage der Trajektorien zueinander zurückzuführen sind) oder keine Resultate mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden ermittelt wurden. Nachfolgende relevante Konflikttypen wurden in der weiteren Untersuchung berücksichtigt.

***Tab. 20** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
30		Szenarien	679 Begegnungen davon 144, wo abbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
30		Szenarien	4 Begegnungen davon 0, wo abbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert (sehr gering nachgefragte Verkehrsbeziehung)
40		Szenarien	197 Begegnungen davon 53, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
40		Szenarien	1 Begegnungen davon 0, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert (sehr gering nachgefragte Verkehrsbeziehung)
41		Szenarien	700 Begegnungen davon 156, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert. Begegnungen des Typs 30 vereinzelt diesem Konflikttyp zugeordnet aufgrund Fehlzuweisung der Bewegungsrichtung
41		Szenarien	3 Begegnungen davon 0, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert (sehr gering nachgefragte Verkehrsbeziehung)
43		Szenarien	165 Begegnungen davon 35, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert

***Tab. 20** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
45		Szenarien	10 Begegnungen davon 0, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
50		Szenarien	9 Begegnungen davon 3, wo überquerendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert (sehr gering nachgefragte Verkehrsbeziehung)
50		Szenarien	7 Begegnungen davon 2, wo überquerendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert (sehr gering nachgefragte Verkehrsbeziehung)
51		Szenarien	8 Begegnungen davon 2, wo überquerendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert (sehr gering nachgefragte Verkehrsbeziehung)
51		Szenarien	7 Begegnungen davon 2, wo überquerendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert (sehr gering nachgefragte Verkehrsbeziehung)
80		Szenarien	76 Begegnungen davon 19, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert

Die PET-Begegnungen wurden über alle untersuchten Konflikttypen hinweg von der Software gut detektiert. Das Ergebnis hinsichtlich der Anzahl der erfassten Begegnungen spiegelt die Verkehrsmengen auf den verschiedenen Fahrbeziehungen sehr gut wider. Die geringe Anzahl von Begegnungen bei bestimmten Konflikttypen ist durch die zum Teil sehr tiefe Nachfrage auf einzelnen Verkehrsbeziehungen und die damit einhergehende geringe Wahrscheinlichkeit einer Begegnung zu erklären.

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konfliktypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

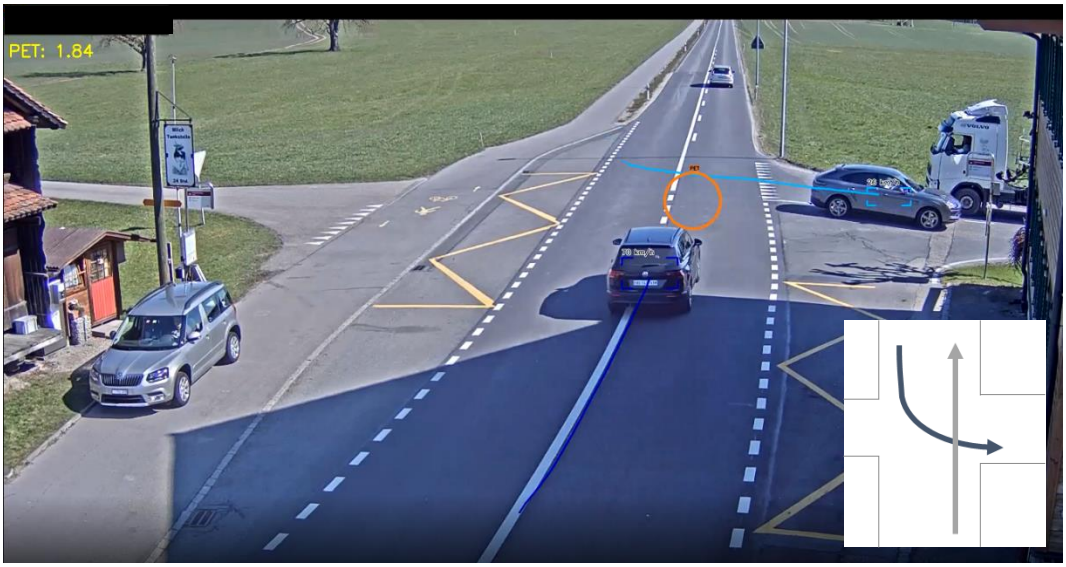


Abb.50 *Konflikttyp 30: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

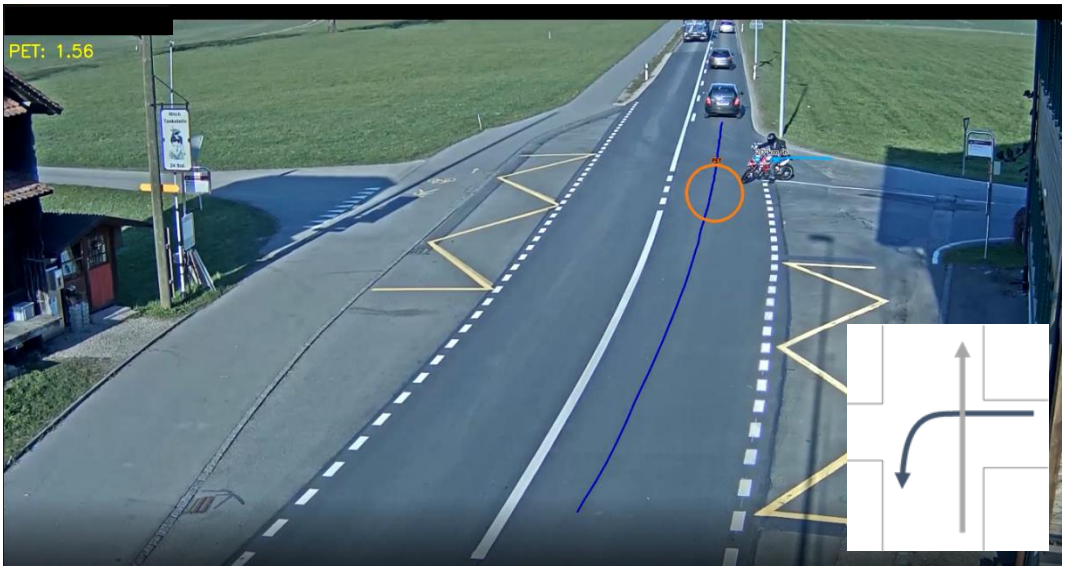


Abb.51 *Konflikttyp 40: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.52 *Konflikttyp 41: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

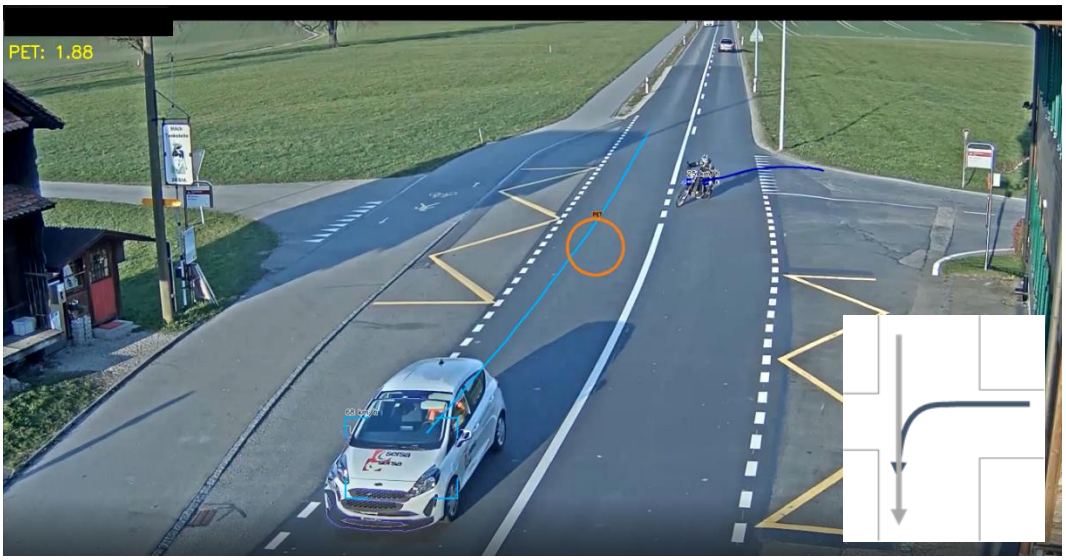


Abb.53 *Konflikttyp 43: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

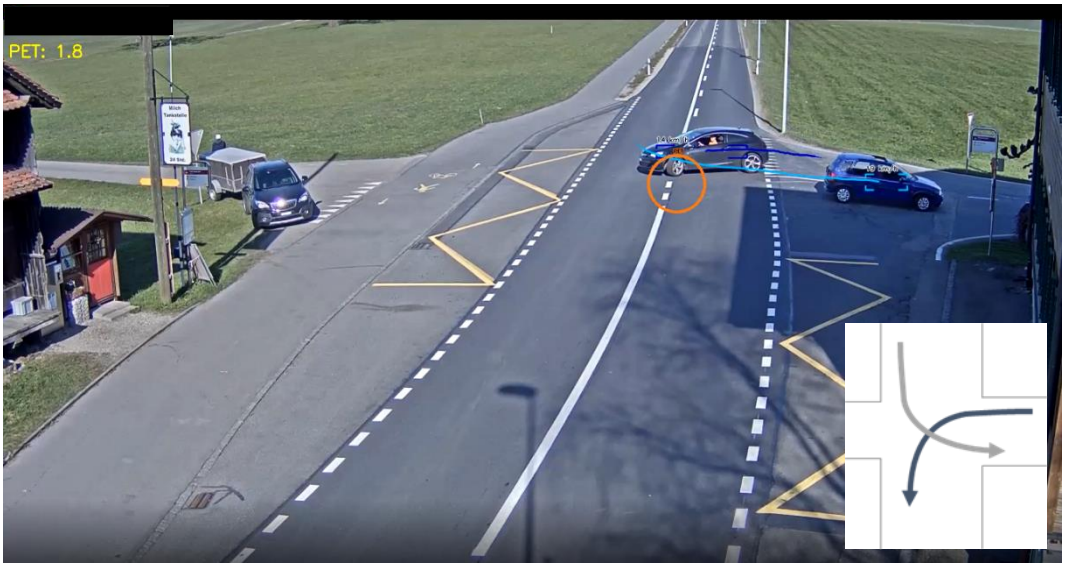


Abb.54 *Konflikttyp 45: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

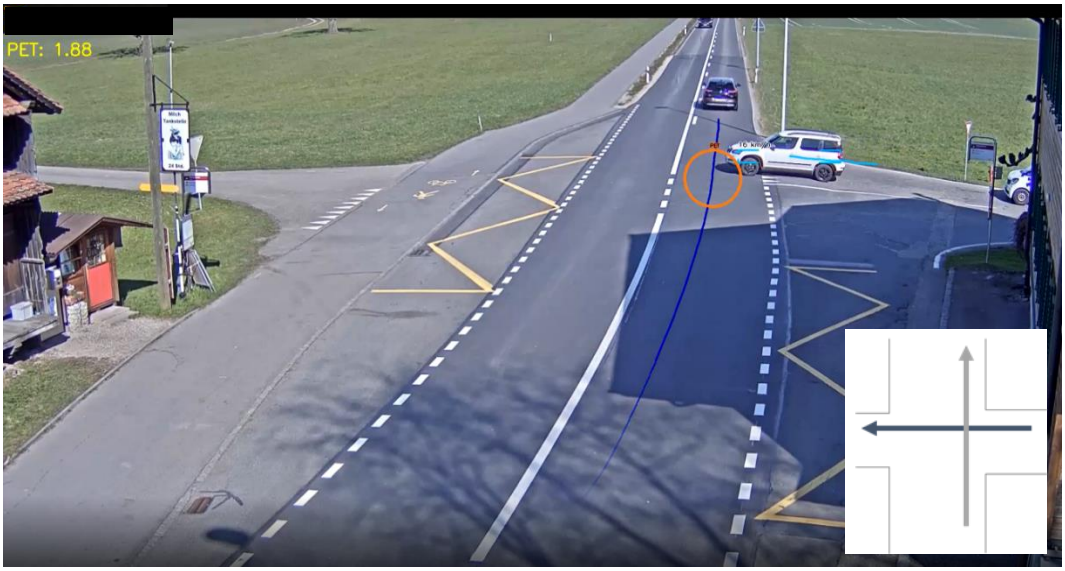


Abb.55 *Konflikttyp 50: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

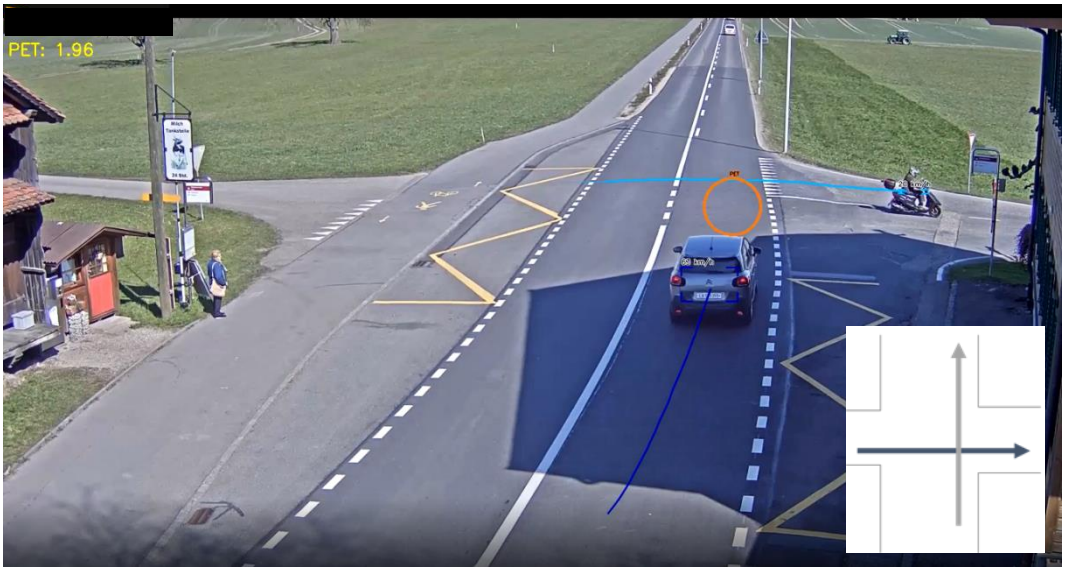


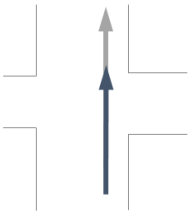
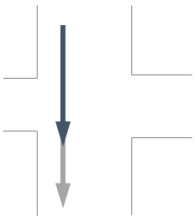
Abb.56 *Konflikttyp 51: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.57 *Konflikttyp 80: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Sicherheitsindikator TTC

Für den Sicherheitsindikator TTC liefert die automatisierte Videoanalyse weniger als 100 Begegnungen. Ohne Berücksichtigung von Szenarien mit ausschliessliche FALSCH-positiven Detektionen, verbleiben die beiden nachfolgenden relevanten Konflikttypen. Das Ergebnis zu den untersuchten Konflikttypen enthält nur Begegnungen von Motorfahrzeugen, da sich die wenigen Situationen mit Velobeteiligung allesamt als FALSCH-Positive identifizieren liessen.

***Tab. 21** Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	31 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	53 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert

Die Überprüfung der Videosequenzen von erfassten TTC-Begegnungen ergab, dass Begegnungen insgesamt gut detektiert wurden. Es gilt allerdings zu beachten, dass im Resultat mehrheitlich Situationen enthalten sind, wo zwei Fahrzeuge mit geringem Abstand hintereinanderfuhren, und dies auch ohne erkennbare Geschwindigkeitsanpassung als TTC-Begegnung erfasst wurde. Die Ungenauigkeiten in der Geschwindigkeitsbestimmung über die Strecke hinweg, die von den beteiligten Fahrzeugen im Messbereich zurückgelegt wird, dürfte bei der Detektion der TTC-Begegnung eine gewisse Rolle spielen.

Nachfolgend sind zwei Beispiele von TTC-Begegnungen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

Abb.58 *Konflikttyp 2x Ost: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

Abb.59 *Konflikttyp 2x West: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

3.7.3 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt 1'213 Begegnungen innerhalb der Auswertezeitraume (jeweils erste 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden) analysiert. Die Begegnungen betrafen fast ausschliesslich Situationen in Zusammenhang mit dem Ein- bzw. Abbiegen von Fahrzeugen. Zu Konflikten kam es in erster Linie, wenn ein- oder abbiegende Fahrzeuge eine Anpassungshandlung eines anderen Verkehrsteilnehmenden erforderlich machten.

Mit 1'114 Beobachtungen wurde der Grossteil der Begegnungen gemäss Auswerteschema als konfliktfrei bewertet. Von den konflikthaften Situationen wurden 88 als Gard-1-Konflikte bewertet, 11 Konflikte waren kritischer (ab Grad 2).

***Tab. 22** manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
04_Staechenrain	1’213	1’114	88	11

ausgewertet wurden jeweils die ersten 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden

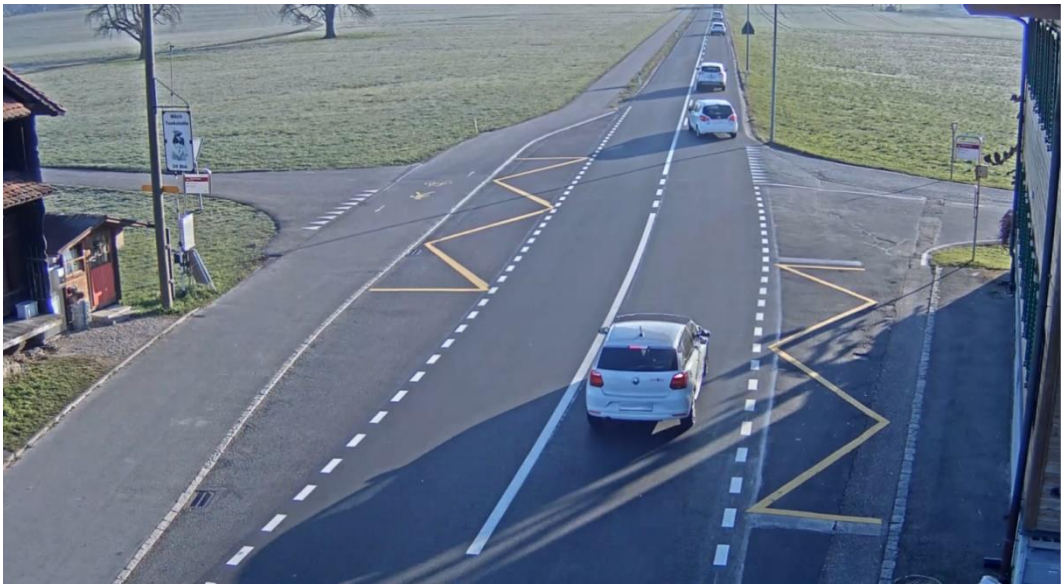


***Abb.60** Beispiel eines Grad-1-Konflikts beim Rechtseinbiegen*

Abb.61 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts beim Linksabbiegen eines Velos*

3.8 Resultate «06 – Sursee, Schlottermilch»

3.8.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort befindet sich nördlich des Zentrums von Sursee. Es handelt sich um den zweispurigen Kreisverkehr an der Ringstrasse, wo die Surentalstrasse, welche die Verbindung zur Autobahn A2 herstellt auf die Ringstrasse trifft. Die Zweispurigkeit der Kreisfahrbahn und Knotenzufahrten sowie die Führung des Fuss- und Veloverkehrs über die Knotenäste stellen Besonderheiten dar. Der Knoten wurde deshalb zur Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen.

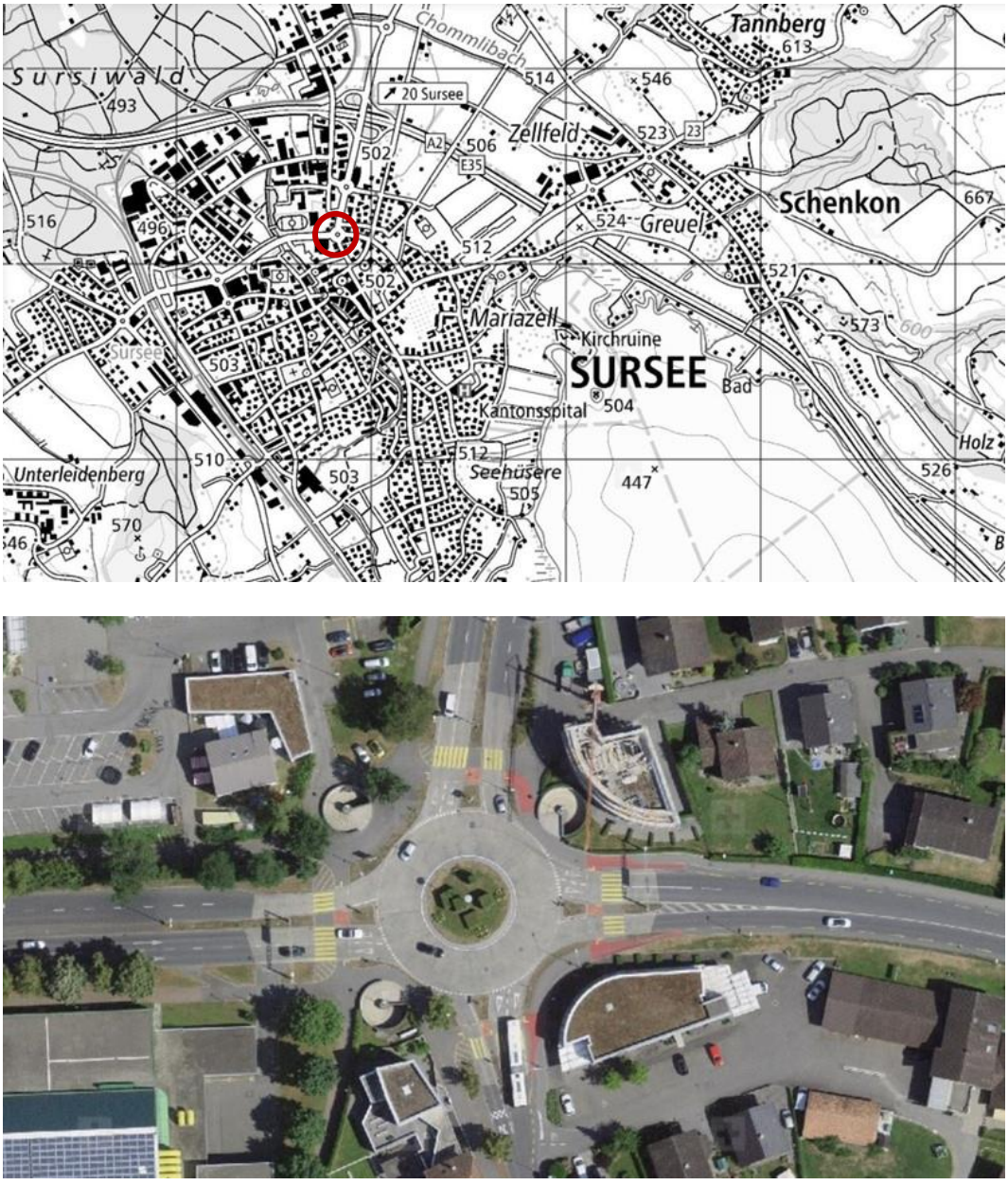


***Abb.62** Lage und Orthofoto des Standorts "06 – Sursee, Schlottermilch" (geoadmin.ch)*

***Tab. 23** Untersuchungsort «06 – Sursee, Schlottermilch»*

Anlage	**Kreisverkehr**
Strassentyp	Ringstrasse und Surentalstrasse: Hauptverkehrsstrasse Schlottermilch: Erschliessungsstrasse
Umgebungsnutzung	Wohnen, Gewerbe, Sportsanlage, Industrie
Temporegime	Ringstrasse und Surentalstrasse: Tempo 60 Schlottermilch: Tempo-30-Zone
Vortrittsregelung	Kreisverkehr
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	Im Knotenbereich Zweirichtungsradweg (gemeinsam mit Fussverkehr), Veloführung auf Knotenästen z.T. auf Radstreifen, z.T. im Mischverkehr, teils gemeinsam mit Fussverkehr Velofurten zur Querung der Knotenästen parallel zu Fussgängerstreifen
Öffentlicher Verkehr	eine Buslinie
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Zweispurige Knotenzufahrten und zweispurige Befahrbarkeit des Kreisels markierte Vorankündigung der Wartelinie Roteinfärbung der Zufahrtsbereiche zur Velofurt sowie der Mittelinsel
Weitere Merkmale	Knotenzufahrten: Fussgängerstreifen und Velofurten über zwei gleichgerichtete Fahrspuren
Verkehrsdaten	
DTV	Kontenbelastung ca. 35'000 – 40'000 DTV
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 2-4% (Schätzung)
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: mittel Veloverkehr: mittel
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen (2011-2019)	10 Unfälle mit Personenschaden, davon 1 Unfall mit schwerer Verletzungsfolge
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	Auffahrunfälle
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	nein
Weitere Merkmale / Themen	-
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebung	Aufnahme aus Höhe von ca. 14m 3 Tage à 24h (15.-17. Juni 2021)
Begleiterhebungen	-

3.8.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2)

Dank der Möglichkeit der Kamerainstallation auf der Terrasse eines Gebäudes, erfolgte die Aufnahme aus etwas grösserer Höhe (ca. 14m), gleichzeitig aber auch aus etwas weiterer Entfernung zur untersuchten Infrastrukturanlage. Einerseits konnte aus dieser Perspektive der gesamte Kreisverkehrsplatz erfasst werden. Anderseits gilt es auch an diesem untersuchten Objekt die Nachteile der Schrägaufnahme zu berücksichtigen. Darüber hinaus ergeben sich gewisse Einschränkungen hinsichtlich der Auswertungsmöglichkeiten und erwartbare Qualitätsunterschiede der Trajektorien im Bildvordergrund gegenüber Trajektorien im Bildhintergrund, welche bei kleineren und weniger komplexen Anlagen weniger ins Gewicht fallen. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt der von der Anwendung ausgewerteten Trajektorien unterschieden nach Bewegungsrichtungen. Die Abbildung verdeutlicht die Qualitätseinbussen (insbesondere verkürzte bzw. unterbrochene Trajektorien) im Bildhintergrund im Bereich der westlichen und südlichen Knotenzufahrt im Vergleich zum Bildvordergrund (östliche und nördliche Zufahrt).

Abb.63 *Trajektorien nach Bewegungsrichtungen*

Abgesehen von den erwähnten Defiziten hinsichtlich der Trajektorienqualität ergab die Prüfung, dass die Objekterkennung und -klassifzierung auch bei diesem Erhebungssetting bezogen auf den Motorfahrzeugverkehr gut funktionierte. Bezüglich der Unterscheidung zwischen den Kategorien Fuss- und Veloverkehr hat die Software offenbar bei der gewählten Aufnahmehöhe und -perspektive gewisse Schwierigkeiten, indem zahlreiche Velofahrende als Zufussgehende bzw. teilweise auch umgekehrt klassiert wurden.

Sicherheitsindikator PET

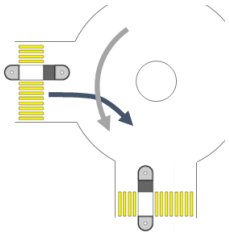
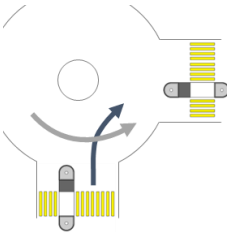
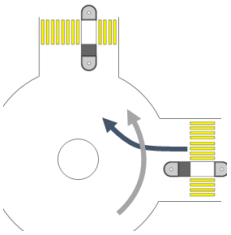
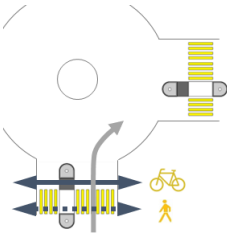
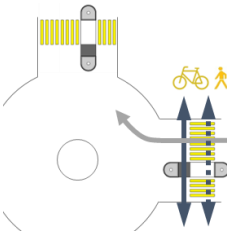
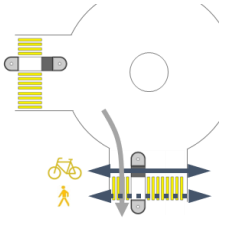
Die automatisierte Analyse liefert im Ergebnis an diesem stark befahrenen Verkehrsknotenpunkt insgesamt über 190'000 Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 10 Sekunden (davon rund 82’000 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) für den ausgewerteten Zeitraum von 72 Aufnahmestunden.

Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Einschränkungen bei der aus nur einer Perspektive erhobenen grossen Infrastrukturanlage können bestimmte Konflikttypen (z.B. Begegnungen auf der Kreisfahrbahn im Bereich der westlichen Zufahrt) nicht ausgewertet werden bzw. wurden einzelne Szenarien des Dashboards nicht weiter berücksichtigt. Bei

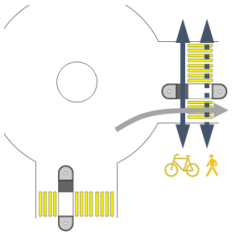
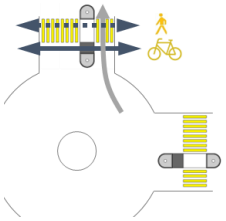
Konflikttypen mit querendem Fuss- und Veloverkehr wurde aufgrund der festgestellten Zuordnungsschwierigkeiten keine Unterscheidung nach der Kategorie gemacht.

Für die verbleibenden PET-Konflikttypen, die einer Detailbetrachtung unterzogen wurden, konnten folgende Ergebnisse der Auswertung von Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden erzielt werden.

***Tab. 24** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
41 S		Szenarien	7'377 Begegnungen davon 3'717, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
41 O		Szenarien	18'856 Begegnungen davon 8'432, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
41 N		Szenarien	11'208 Begegnungen davon 5'355, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
8x O		Szenarien	196 Begegnungen davon 105, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert. Unterscheidung zwischen Zufussgehenden u. Velos nicht möglich. Untererfassung, weil Fussgängerstreifen nicht vollständig erfasst wurde.
8x N		Szenarien	1'834 Begegnungen davon 1090, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert. Unterscheidung zwischen Zufussgehenden u. Velos nicht möglich
8x O		Szenarien	167 Begegnungen davon 119, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert. Unterscheidung zwischen Zufussgehenden u. Velos nicht möglich. Untererfassung, weil Fussgängerstreifen nicht vollständig erfasst wurde.

***Tab. 24** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
8x N		Szenarien	2’545 Begegnungen davon 1’468, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert. Unterscheidung zwischen Zufussgehenden u. Velos nicht möglich
8x W		Szenarien	665 Begegnungen davon 304, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert. Unterscheidung zwischen Zufussgehenden u. Velos nicht möglich. Untererfassung aufgrund der Perspektive (Bildhintergrund)

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konflikttypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

***Abb.64** Konflikttyp 41 S: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

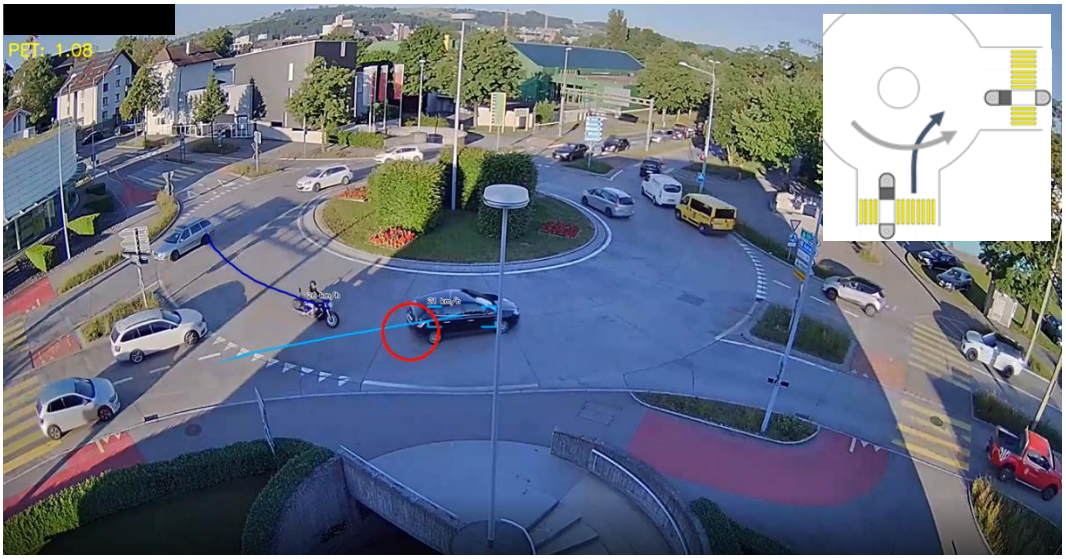


Abb.65 *Konflikttyp 41 O: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

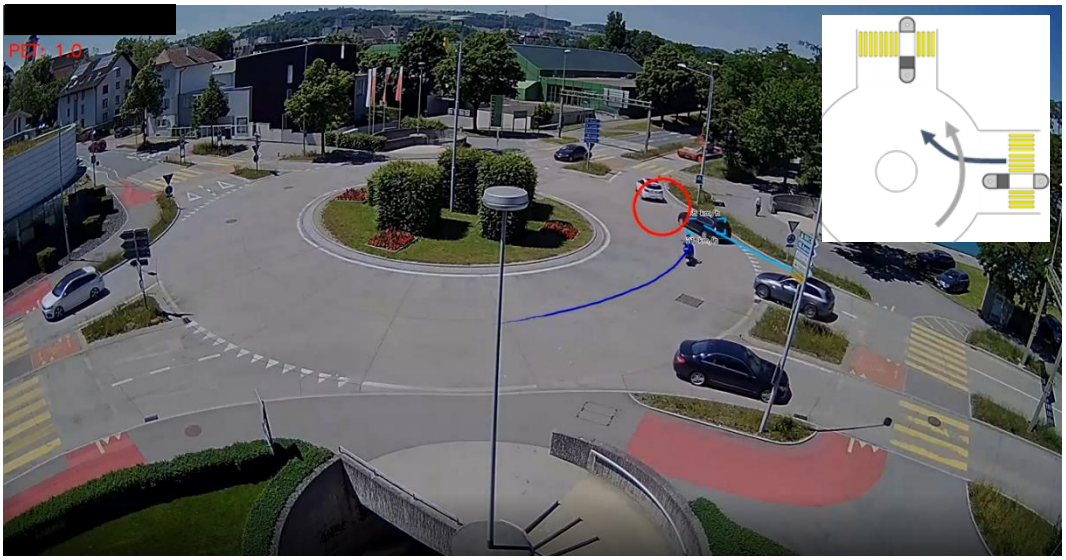


Abb.66 *Konflikttyp 41 N: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

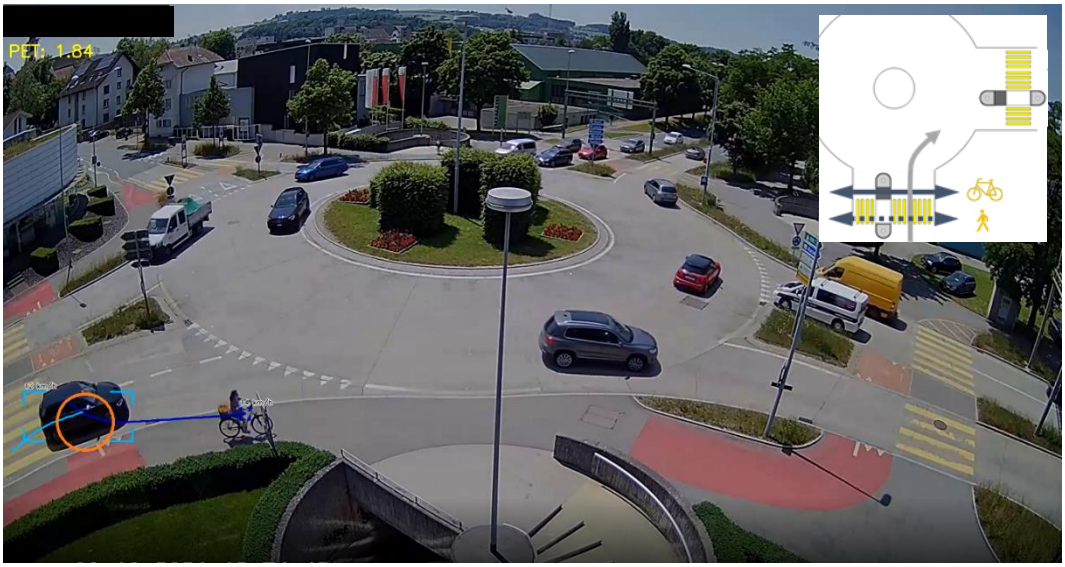


Abb.67 *Konflikttyp 8x O: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

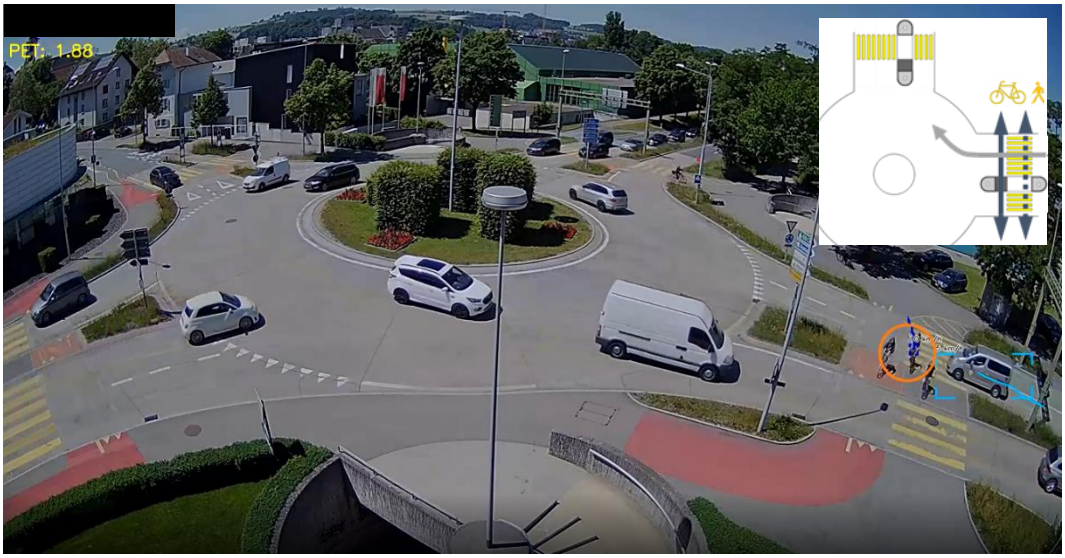


Abb.68 *Konflikttyp 80 N: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.69 *Konflikttyp 81 O: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.70 *Konflikttyp 81 N: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

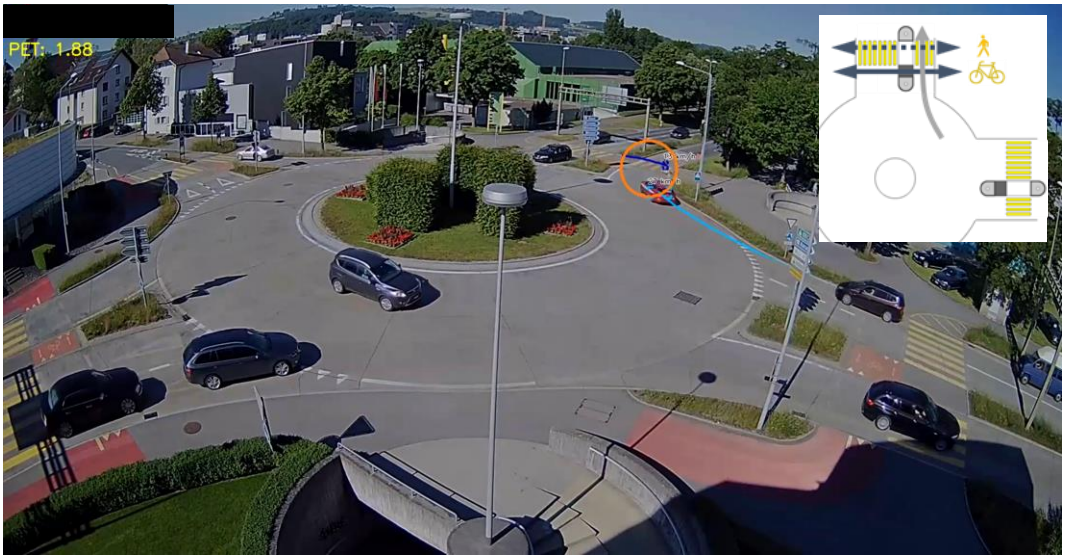


Abb.71 *Konflikttyp 81 W: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Sicherheitsindikator TTC

Für den Sicherheitsindikator TTC liefert die automatisierte Videoanalyse etwas mehr als 500 Begegnungen mit einem TTC-Wert bis 5 Sekunden für den ausgewerteten Zeitraum von 72 Aufnahmestunden. Gemäss den im Dashboard zur Verfügung gestellten Resultaten teilen sich die detektierten Ereignisse auf folgende vier Konflikttypen auf. Bei diesen nach der Fahrtrichtung unterschiedenen Konflikttypen konnte nicht weiter differenziert werden, ob die Begegnung im Bereich der Zufahrt, innerhalb der Kreisfahrbahn oder im Ausfahrtsbereich stattfindet. Anhand der im Dashboard ersichtlichen Sequenzen sind im Resultat auch vereinzelt FALSCH-positive Detektionen enthalten, die nicht nachträglich herausgefiltert werden können.

Das nachfolgende Ergebnis zu den untersuchten Konflikttypen enthält nur Begegnungen von Motorfahrzeugen.

Tab. 25 *Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Fahrtrichtung	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x N	Richtung Norden	Szenarien Kategorie (nur MFz)	46 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert
2x O	Richtung Osten	Szenarien Kategorie (nur MFz)	172 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert; Untererfassung aufgrund verdeckter Bildbereiche bzw. Kreiselzufahrt zu weit im Bildhintergrund
2x S	Richtung Süden	Szenarien Kategorie (nur MFz)	151 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert, Untererfassung aufgrund verdeckter Bildbereiche
2x W	Richtung Westen	Szenarien Kategorie (nur MFz)	150 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert

Nachfolgend sind einige Beispiele von TTC-Begegnungen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

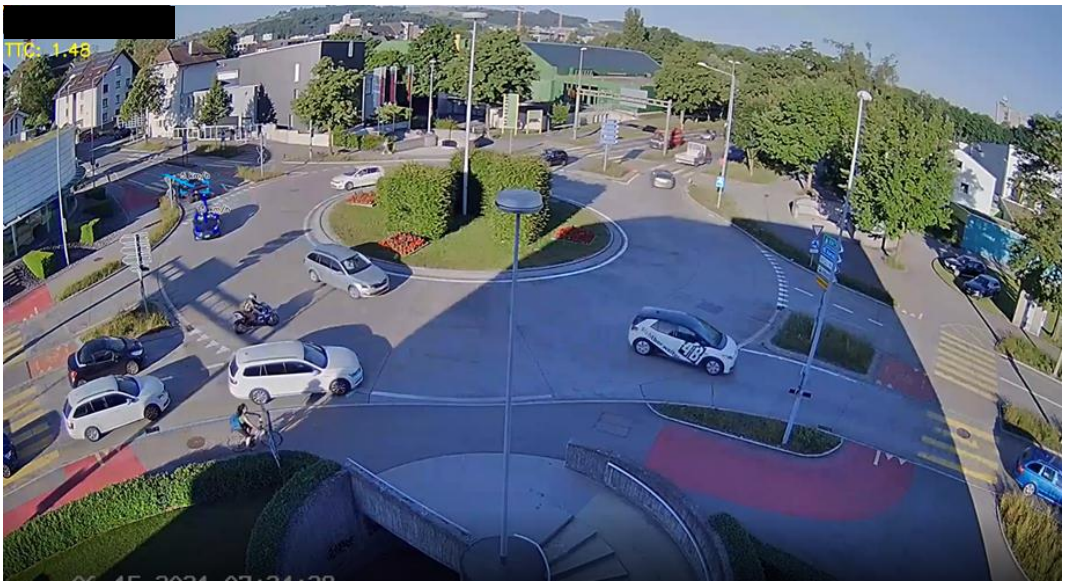


Abb.72 *Konflikttyp 2x N: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

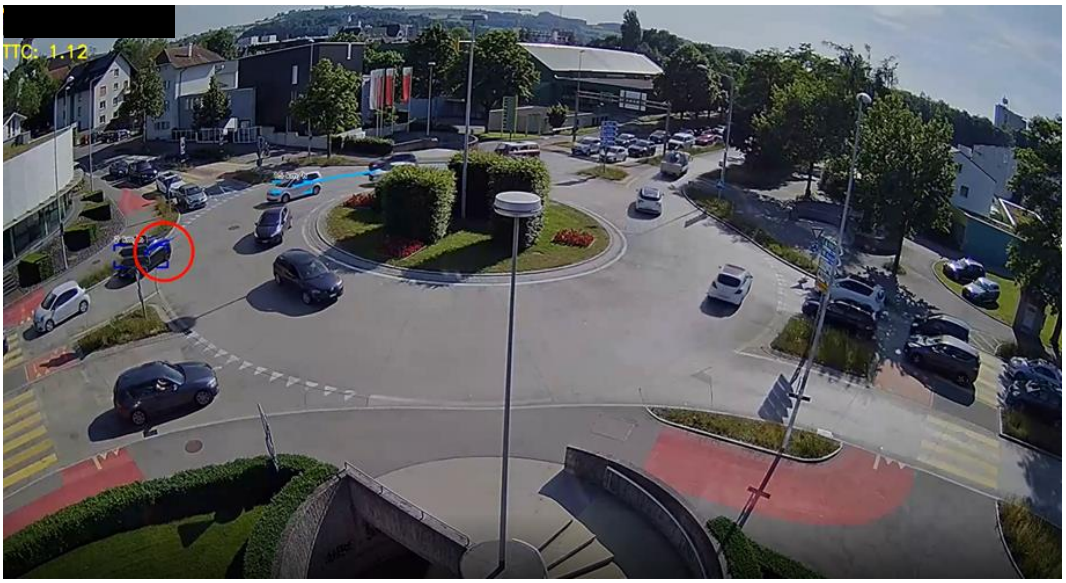


Abb.73 *Konflikttyp 2x O: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

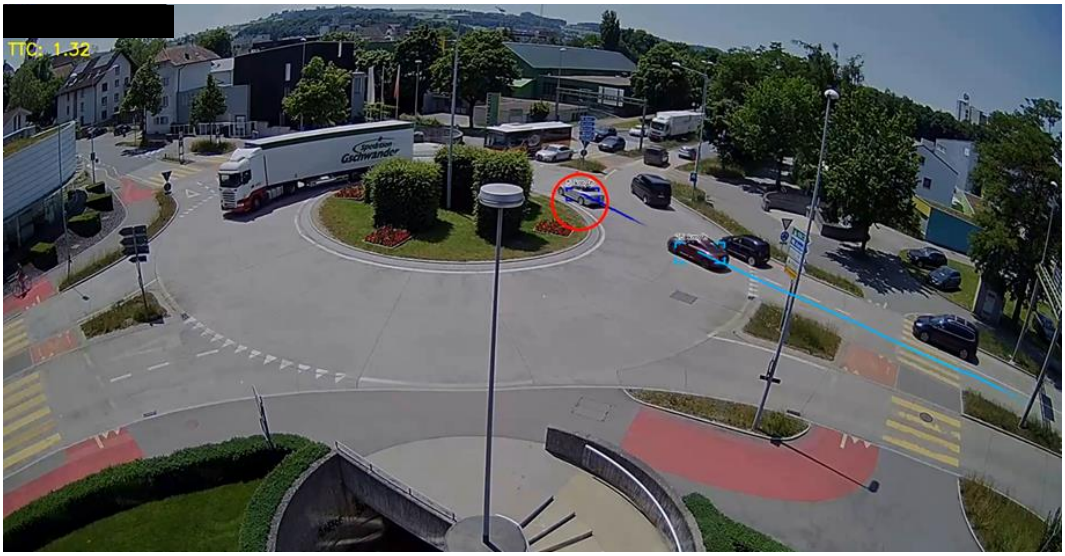


Abb.74 *Konflikttyp 2x S: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

Abb.75 *Konflikttyp 2x W: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

3.8.3 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt 13'254 Begegnungen innerhalb der Auswertezeiträume (jeweils erste 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden) analysiert. Die Begegnungen betrafen insbesondere Situationen in den ausgewerteten Einfahrtsbereichen aber auch Ausfahrtsbereichen innerhalb des Kreisels (bedingt durch die zweispurige Befahrbarkeit der Kreisfahrbahn und allfällige Spurwechselmanöver) sowie Situationen in Zusammenhang mit querenden Zufussgehenden und Velofahrenden. Zu Konflikten kam es in erster Linie, wenn ein in den Kreisverkehr einfahrendes Fahrzeug oder ein aus der inneren Kreisfahrspur ausfahrendes Fahrzeug eine Anpassungshandlung eines anderen auf der Kreisfahrbahn befindlichen Verkehrsteilnehmenden erforderlich machten sowie Abbremsmanöver vor querenden Velos an den Velofurten.

Mit 12'229 Beobachtungen wurde der überwiegende Teil der Begegnungen gemäss Auswerteschema als konfliktfrei bewertet. Entsprechend dem Verkehrsaufkommen wurden aber auch über 1’000 konflikthafte Situationen beobachtet, von denen 900 als Gard-1-Konflikte und 125 Konflikte kritischer (ab Grad 2) bewertet wurden.

***Tab. 26** manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
06_Sursee_Schlottermilch	13’254	12’229	900	125

ausgewertet wurden jeweils die ersten 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden

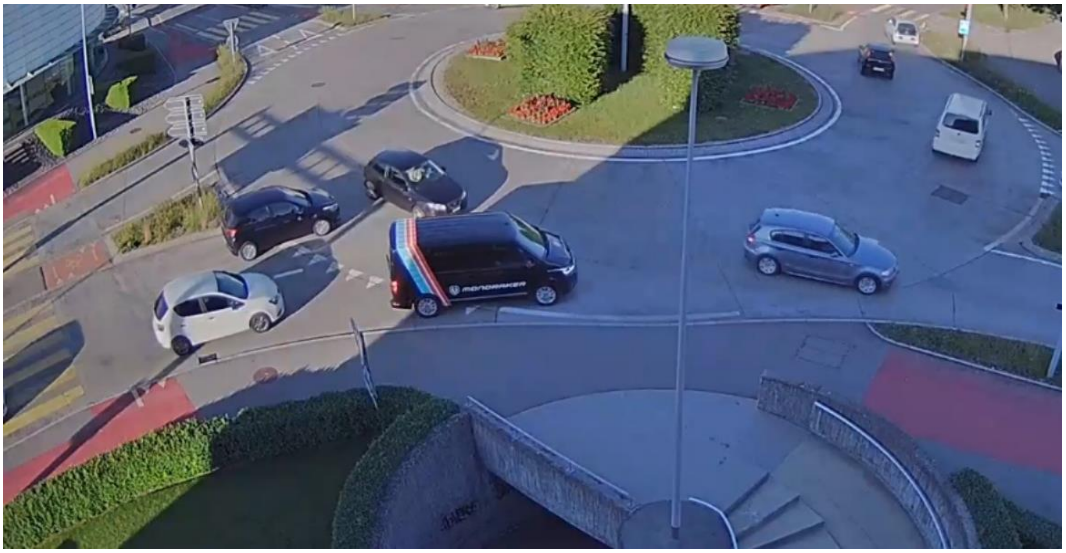


***Abb.76** Beispiel eines Grad-3-Konflikts beim Einbiegen im Einfahrtsbereich Ost*

Abb.77 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts im Bereich der Velofurt Nord*

3.9 Resultate «07 – Luzern, Waldegg»

3.9.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort befindet sich im Süden der Stadt Luzern in der Nähe der Grenze zur Gemeinde Horw. Es handelt sich um den Kreisverkehr, an dem die Ringstrasse in die Horwerstrasse einmündet. An dem Kreisverkehr steht dem Veloverkehr in Nord-Süd-Richtung ein separater Zweirichtungsradweg zur Verfügung. Allerdings muss für die Nutzung des Radweges in Fahrtrichtung Süden die Horwerstrasse zwei Mal gequert werden, weshalb auf dieser Relation der Grossteil der Velofahrenden auf der Kreisfahrbahn fährt. Auf der Kreisfahrbahn kommt es regelmässig zu Konflikten zwischen dem Motorfahrzeug- und dem Veloverkehr, was sich auch im Unfallgeschehen niederschlägt. Der Knoten wurde deshalb zur Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen.

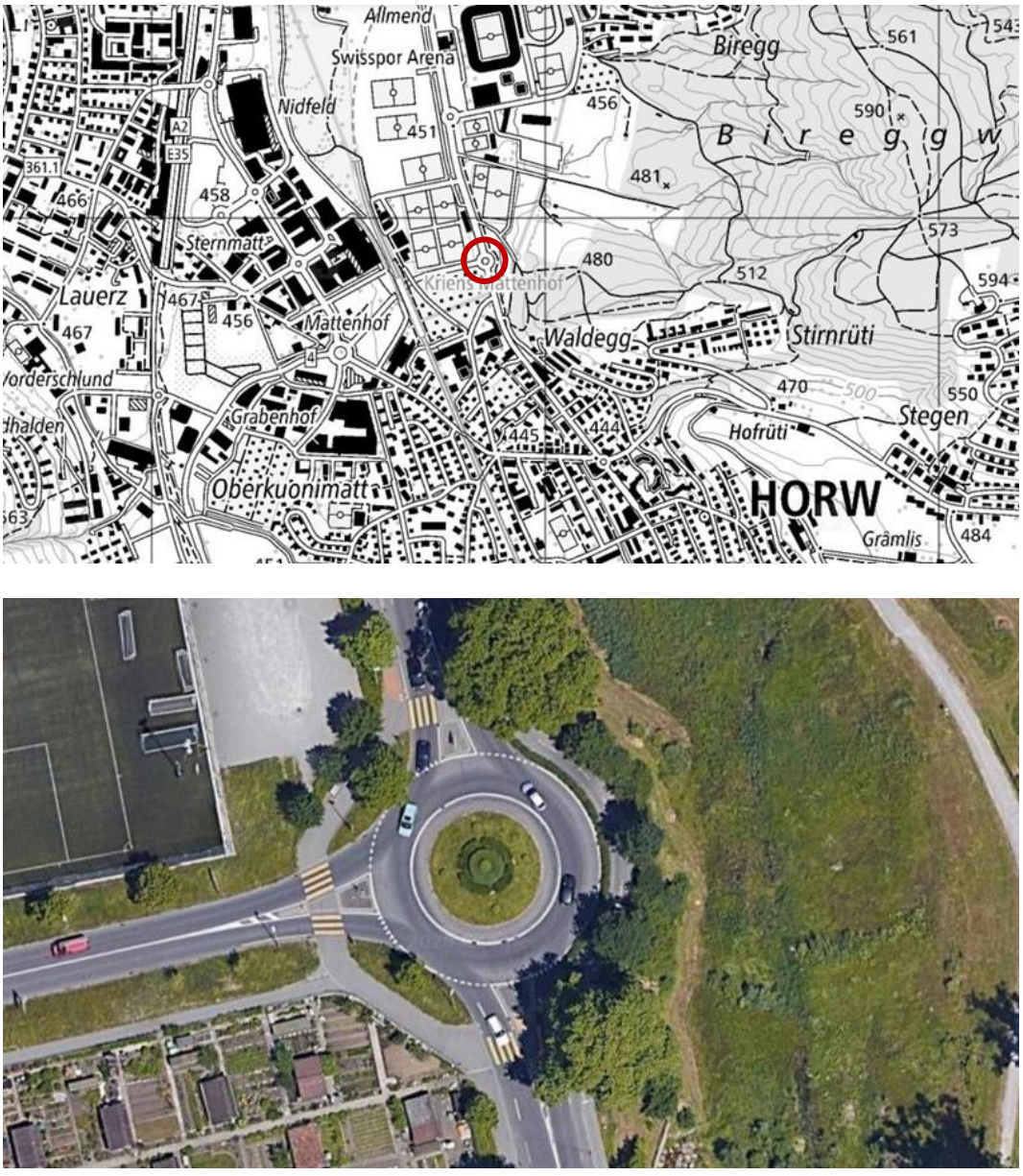


Abb.78 *Lage und Orthofoto des Standorts "07 – Luzern, Waldegg" (geoadmin.ch)*

***Tab. 27** Untersuchungsort «07 – Luzern, Waldegg»*

Anlage	**Kreisverkehr**
Strassentyp	Ringstrasse und Horwerstrasse Nord: Hauptverkehrs-strassen Horwerstrasse Süd: Verbindungsstrasse
Umgebungsnutzung	Sportsanlage, Schrebergarten, Naherholung
Temporegime	Tempo 50
Vortrittsregelung	Kreisverkehr
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	Fussgängerstreifen mit Mittelinsel auf allen drei Ästen Zweirichtungsradweg im unmittelbaren Kreisverkehrs-bereich (Nord-Süd), Veloführung auf Knotenästen z.T. auf Radstreifen, z.T. im Mischverkehr bzw. Trottoir für Veloverkehr zugelassen Velofurten zur Querung der Knotenästen Nord u. Süd parallel zu Fussgängerstreifen
Öffentlicher Verkehr	eine Buslinie
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Roteinfärbung der Zufahrtsbereiche zur Velofurt
Weitere Merkmale	
Verkehrsdaten	
DTV	Kontenbelastung ca. 17'000 DTV
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 4% (Schätzung)
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: gering Veloverkehr: hoch
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen (2011-2019)	18 Unfälle mit Personenschaden, davon zwei Unfälle mit schwerer Verletzungsfolge
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	Einbiegeunfälle mit Fahrradbeteiligung
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	ja
Weitere Merkmale / Themen	Konflikte MIV-Velo, trotz guter Sicht
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebung	Aufnahme aus Höhe von ca. 5m 3 Tage à 24h (15.-17. Juni 2021)
Begleiterhebungen	Befragung

3.9.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2)

An diesem Untersuchungsort wurde die Kameraposition so gewählt, dass die südliche Zufahrt mit dem Fussgängerstreifen und der Velofurt im Bildvordergrund sichtbar ist und gleichzeitig die Kreisfahrbahn bestmöglich erfasst ist. Aufgrund des Baumbestandes konnte die Kamera nur in einer Höhe von knapp 5m über Boden platziert werden. Die Perspektive weicht etwas vom Setting der anderen untersuchten Orte (ohne «06 – Sursee, Schlottermilch») ab, die aus einer Höhe von ca. 6m über Boden aufgezeichnet wurden. Zudem befinden sich beim Waldegg-Kreisel in Luzern grosse Teile der Infrastrukturanlage im Bildhintergrund. Bei der Qualitätsprüfung der im Dashboard zur Verfügung gestellten Resultate bzw. der späteren Auswahl der Konflikttypen für die vertieften Analysen gilt es die allgemeinen Nachteile der Schrägaufnahme sowie die besonderen Eigenschaften der Aufnahmeperspektive zu berücksichtigen. Wie am Beispiel «06 – Sursee, Schlottermilch» ergeben sich daraus gewisse Einschränkungen hinsichtlich der Auswertungsmöglichkeiten und erwartbare Qualitätseinbussen der Trajektorien (verkürzte bzw. unterbrochene Trajektorien), insbesondere den Bildbereich mit der Kreisfahrbahn betreffend.

Abgesehen von den erwähnten Defiziten hinsichtlich der Trajektorienqualität ergab die Prüfung, dass die Objekterkennung und -klassifzierung bei diesem Erhebungssetting insgesamt gut funktionierte. Auch die Unterscheidung zwischen den Kategorien Fuss- und Veloverkehr konnte von der Software gut bewerkstelligt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt ausgewertete Trajektorien nach Objektkategorien. Neben den oben erwähnten perspektivisch bedingten allgemeinen Qualitätseinbussen im Bildhintergrund fällt unabhängig von der Einschätzung der Trajektorienqualität auf, dass Velofahrende entlang der Horwerstrasse in Fahrtrichtung Süden mehrheitlich die Kreisfahrbahn benutzen.

Abb.79 *Trajektorien nach Objektkategorien (orange = Velos)*

Sicherheitsindikator PET

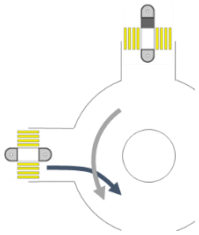
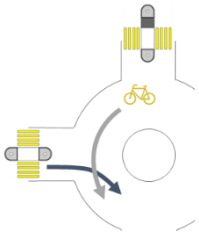
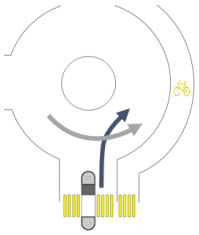
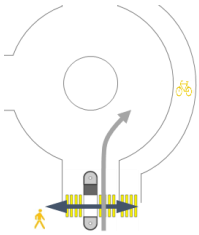
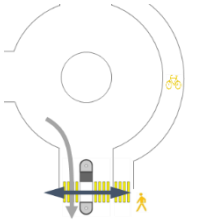
Die automatisierte Analyse liefert im Ergebnis insgesamt knapp 46'000 Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 10 Sekunden (davon rund 20’000 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) für den ausgewerteten Zeitraum von 72 Aufnahmestunden.

Aufgrund der oben beschriebenen Einschränkungen, die sich aus der gewählten Aufnahmeperspektive ergeben, konnte der Bereich der nördlichen Zufahrt von vornherein nicht hinsichtlich sicherheitsrelevanter Begegnungen ausgewertet werden. Der Grossteil der im Dashboard vorliegenden Szenarien konnte weiter berücksichtigt werden, wobei zum Teil Aggregationen bezogen auf die Bewegungsrichtungen vorgenommen wurden. Nicht weiter

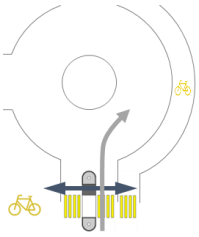
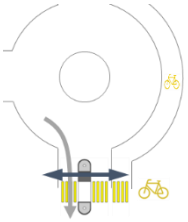
Berücksichtigung fanden Szenarien mit Begegnungssituationen von querendem Fussverkehr und dem Fahrverkehr an der westlichen Kreiselzufahrt. Aufgrund der Auffälligkeiten im Unfallgeschehen auf der Kreisfahrbahn im Bereich der westlich Knotenzufahrt mit Beteiligung von Velos wurde für Begegnungen dieser Art ein eigener Konflikttyp gebildet. Ebenso wurden jeweils separate Konflikttypen für unterschiedliche Konstellation in Zusammenhang mit Querungen von Zufussgehenden und Velofahrenden im Bereich der südlichen Knotenzufahrt gebildet.

Für die verbleibenden PET-Konflikttypen, die einer Detailbetrachtung unterzogen wurden, konnten folgende Ergebnisse der Auswertung von Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden erzielt werden.

***Tab. 28** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
41 W		Szenarien	11’659 Begegnungen davon 4’387, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
41 W_V		*Szenarien, Kategorie*	*4’089 Begegnungen davon 1’531, wo einbiegendes Fz zuerst*	*Detailauswertung von Konflikttyp 41W*
41 S		Szenarien	7’461 Begegnungen davon 2’978, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert, aber Trajektorien kreuzen häufig erst im Verlauf der Kreisfahrbahn
8x S_F		Szenarien, Kategorie	155 Begegnungen davon 102, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
8x S_F		Szenarien, Kategorie	200 Begegnungen davon 129, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert

***Tab. 28** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
8x S_V		Szenarien, Kategorie	175 Begegnungen davon 99, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
8x S_V		Szenarien, Kategorie	109 Begegnungen davon 60, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konflikttypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

***Abb.80** Konflikttyp 41 W: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.81 *Konflikttyp 41 Wv: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

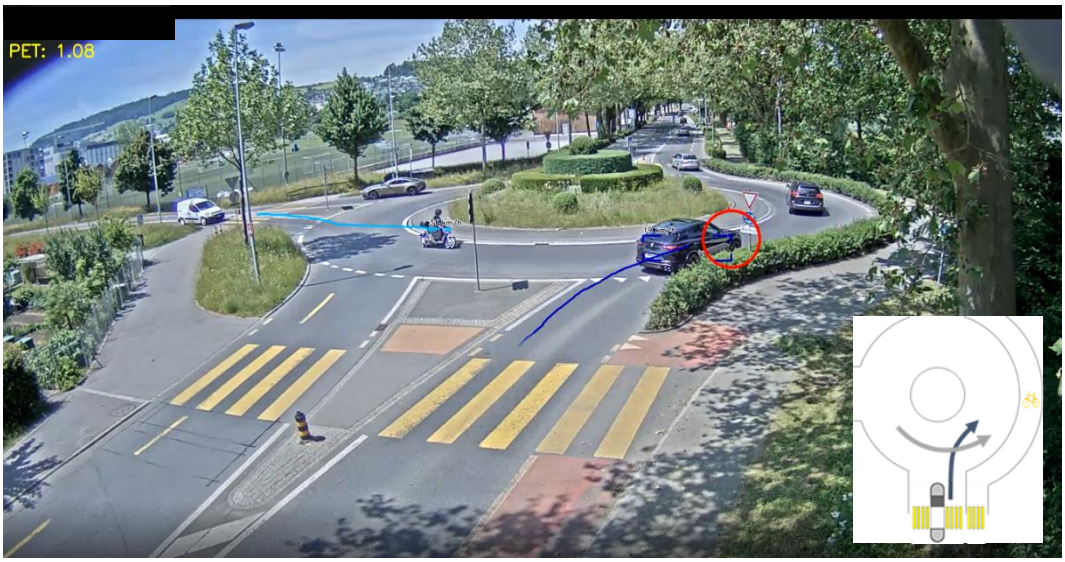


Abb.82 *Konflikttyp 41 S: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

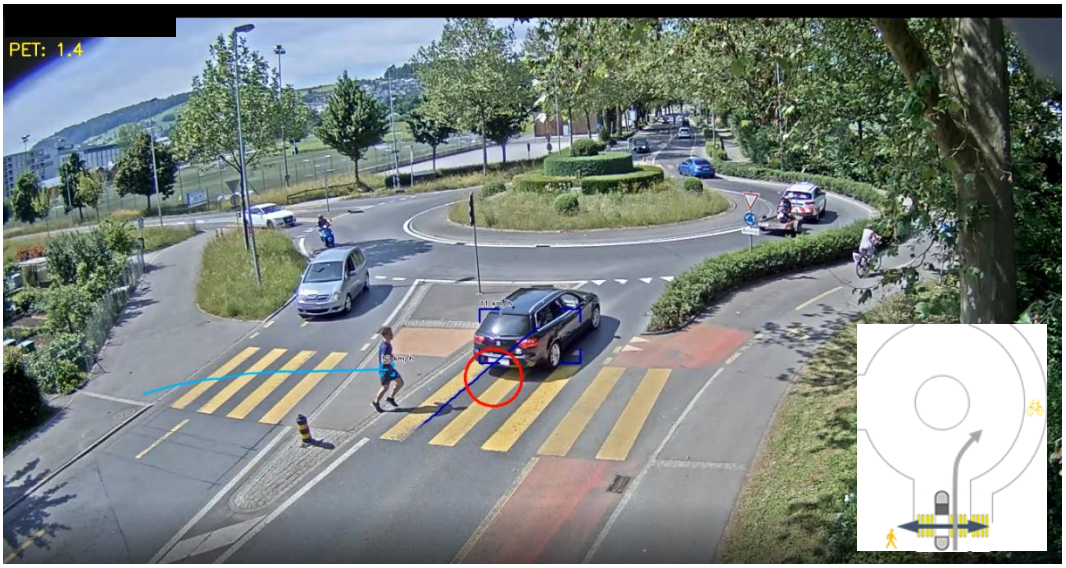


Abb.83 *Konflikttyp 8x S_F: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.84 *Konflikttyp 81 S_F: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

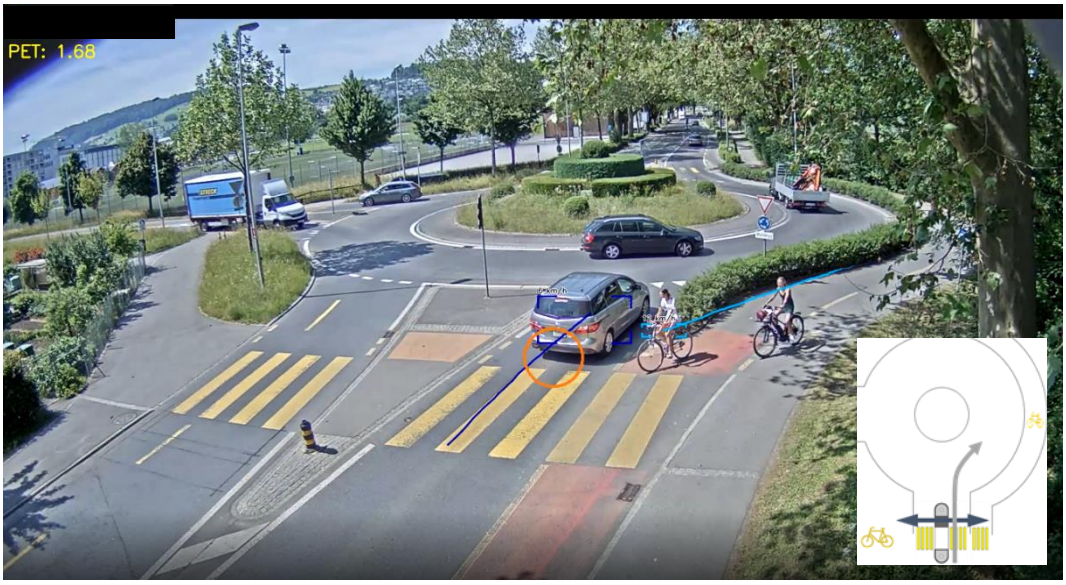


Abb.85 *Konflikttyp 8x S_V: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

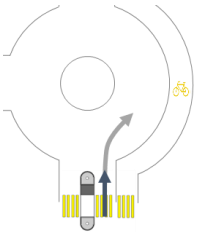
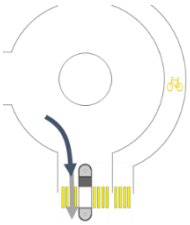
Abb.86 *Konflikttyp 81 S_V: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Sicherheitsindikator TTC

In Summe liefert die automatisierte Videoanalyse für den Sicherheitsindikator TTC (bis 5 Sekunden) rund 2'200 Begegnungen in 72 ausgewerteten Aufnahmestunden. Im Dashboard liegen Resultate nur für den Ein- bzw. Ausfahrtsbereich Süd vor, weil nur dieser im Videobild ausreichend sichtbar und somit für die Anwendung auswertbar war. Die detektieren Begegnungen betreffen fast ausschliesslich den Zufahrtsbereich. Auf den Ausfahrtsbereich entfallen nur sehr wenige Detektionen.

Das nachstehende Ergebnis zu den beiden untersuchten Konflikttypen enthält ausschliesslich Begegnungen von Motorfahrzeugen.

Tab. 29 *Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	2'189 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	29 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert

Nachfolgend sind zwei Beispiele von TTC-Begegnungen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

Abb.87 *Konflikttyp 2x N: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

Abb.88 *Konflikttyp 2x S: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung*

3.9.3 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt 3'033 Begegnungen innerhalb der Auswertezeiträume (jeweils erste 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden) analysiert. Die Begegnungen betrafen mehrheitlich Situationen in den ausgewerteten Einfahrtsbereichen, insbesondere den Einfahrtsbereich West. Zu Konflikten kam es in erster Linie, wenn ein in den Kreisverkehr einfahrendes Fahrzeug eine Anpassungshandlung eines auf der Kreisfahrbahn befindlichen Verkehrsteilnehmenden erforderlich machte.

Mit 3'026 Beobachtungen wurde der Grossteil der Begegnungen gemäss Auswerteschema als konfliktfrei bewertet. Unter den insgesamt nur wenigen konflikthaften Situationen waren 2 Grad-1-Konflikte und 5 kritischere Konflikte (ab Grad 2).

Tab. 30 *manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
07_Luzern_Waldegg	3’033	3’026	2	5

ausgewertet wurden jeweils die ersten 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden

Abb.89 *Beispiel eines Grad-3-Konflikts beim Einbiegen im Einfahrtsbereich Süd*

Abb.90 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts beim Einbiegen im Einfahrtsbereich West*

3.10 Resultate «08 – Luzern, Freigleis»

3.10.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort befindet sich im Süden der Stadt Luzern. Es handelt sich um das ehemalige Freigleis, das zum Fuss-/Veloweg umgebaut wurde und an der untersuchten Stelle die Horwerstrasse quert. Die Querungsstelle ist als Fussgängerstreifen Velofurt gestaltet. Die Anlage wurde 2017 realisiert. Folglich lagen keine langjährigen Erkenntnisse zum Unfallgeschehen vor. Der Knoten wurde aufgrund der hohen Querungsfrequenzen einer Hauptstrasse bei unterschiedlichen Vortrittsregelungen für Fuss- und Veloverkehr zur Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen.

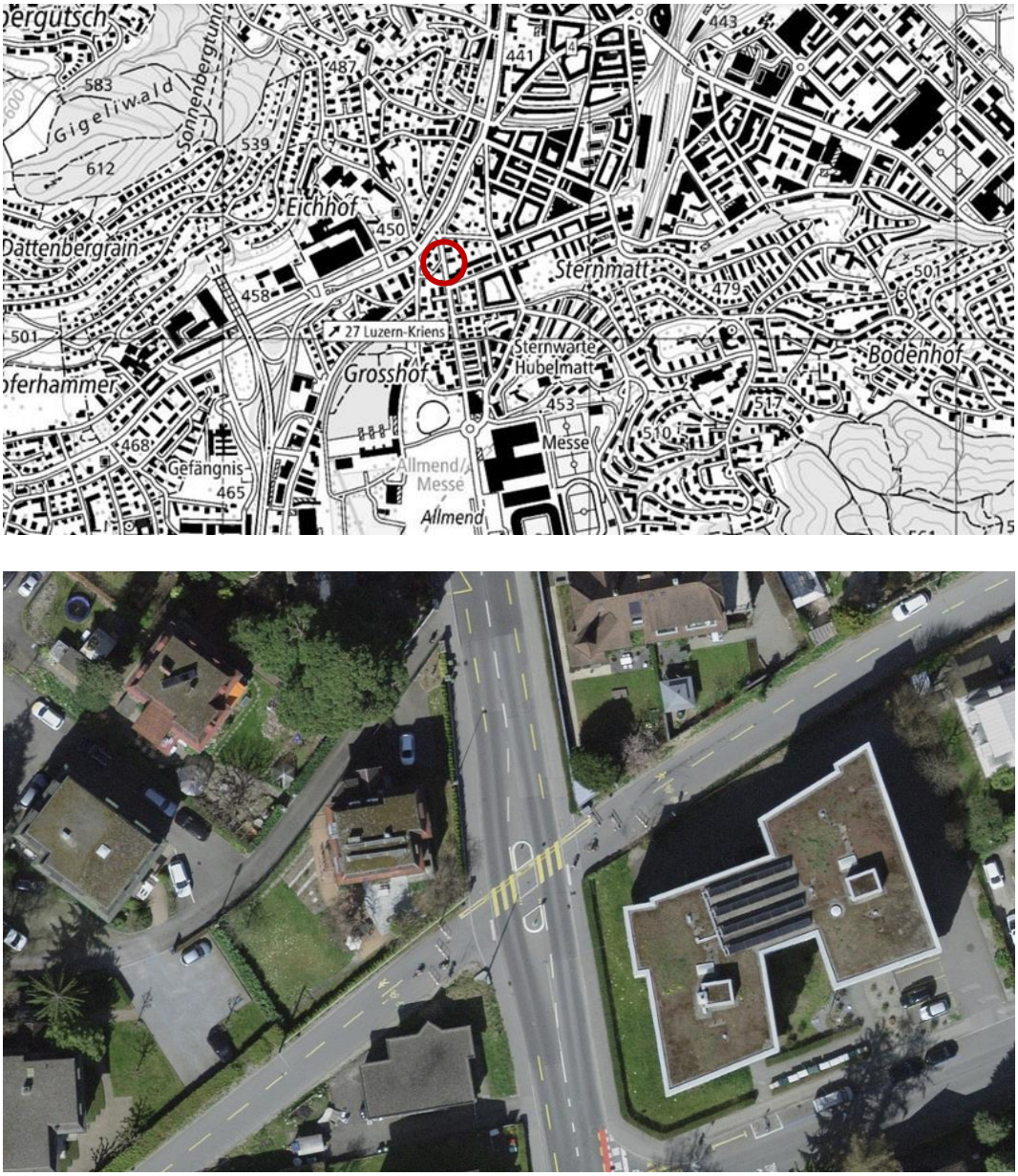


Abb.91 *Lage und Orthofoto des Standorts "08 – Luzern, Freigleis" (geoadmin.ch)*

***Tab. 31** Untersuchungsort «08 – Luzern, Freigleis»*

Anlage	**Querungsstelle Fuss/Velo**
Strassentyp	Horwerstrasse: Hauptverkehrsstrasse Freigleis: Fuss-/Veloweg
Umgebungsnutzung	Wohnen
Temporegime	Tempo 50
Vortrittsregelung	Fussgängervortritt Fahrverkehr entlang der Horwerstrasse vortrittsberechtigt gegenüber querendem Veloverkehr
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	Fussgängerstreifen mit Mittelinsel und Velofurt
Öffentlicher Verkehr	eine Buslinie
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Umlaufsperre auf Freigleis (beidseits der Querungsstelle) Taktil-visuelle Markierungen für Sehbehinderte
Weitere Merkmale	
Verkehrsdaten	
DTV	Kontenbelastung ca. 10’000 DTV Freigleis: ca. 1'500 Velos DTV
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 4% (Schätzung)
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: hoch Veloverkehr: hoch
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen (2011-2019)	-
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	-
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	nein
Weitere Merkmale / Themen	-
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebung	Aufnahme aus Höhe von ca. 6m 3 Tage à 24h (22.-24. Juni 2021)
Begleiterhebungen	Befragung

3.10.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2)

Von allen untersuchten Orten ist die Situation am Untersuchungsort «Luzern, Freigleis» jene mit dem geringsten Komplexitätsgrad. Einerseits ist der Untersuchungsperimeter von geringer räumlicher Ausdehnung, andererseits sind nur wenige Bewegungsrichtungen zu unterscheiden, was wiederum eine geringe Anzahl unterschiedlicher Interaktionen bedeutet. Die Kameraposition konnte so gewählt werden, dass sich die Querungsstelle (Fussgängerstreifen mit Velofurt) möglichst in der Bildmitte befindet und auch beide Richtungsfahrbahnen entlang der Horwerstrasse gut erfasst werden konnten. Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass die von der Anwendung extrahierten Trajektorien eine hohe Qualität aufweisen. Auch die Objektklassifizierung ist von hoher Qualität.

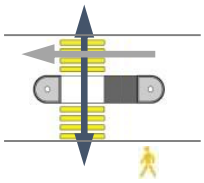
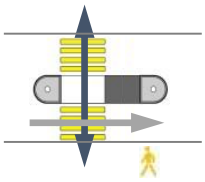
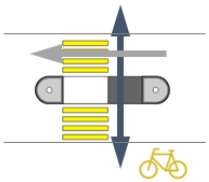
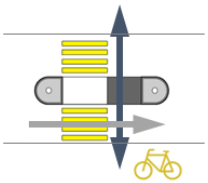
Abb.92 *Trajektorien nach Objektkategorien (orange = Velos, rot= Zufussgehende)*

Sicherheitsindikator PET

Die automatisierte Analyse liefert in Summe insgesamt knapp 27'000 Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 10 Sekunden (davon etwas mehr als 11’000 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) für den ausgewerteten Zeitraum von 72 Aufnahmestunden.

Die im Dashboard der Anwendung zur Verfügung gestellten Resultate teilen sich auf zwei Szenarien auf, indem lediglich zwischen Begegnungen von querenden Personen (Zufussgehende und Velofahrende zusammen) und dem Fahrverkehr entlang der Horwerstrasse nach Fahrtrichtung unterschieden wurde. Bei der Definition der relevanten Konflikttypen wurde deshalb eine zusätzliche Filtereinstellung vorgenommen, um Querungen von Zufussgehenden und Velofahrenden separat auszuwerten. Für diese Konflikttypen, die in weiterer Folge einer Detailbetrachtung unterzogen wurden, konnten folgende Ergebnisse der Auswertung von Begegnungssituationen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden erzielt werden.

***Tab. 32** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
80, N_F		Szenarien, Kategorie	1'187 Begegnungen davon 724, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
80, S_F		Szenarien, Kategorie	1'526 Begegnungen davon 937, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
80, N_V		Szenarien, Kategorie	3'076 Begegnungen davon 1'437, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
80 S_V		Szenarien, Kategorie	4'458 Begegnungen davon 2'030, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konflikttypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

Abb.93 *Konflikttyp 80 N_F: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

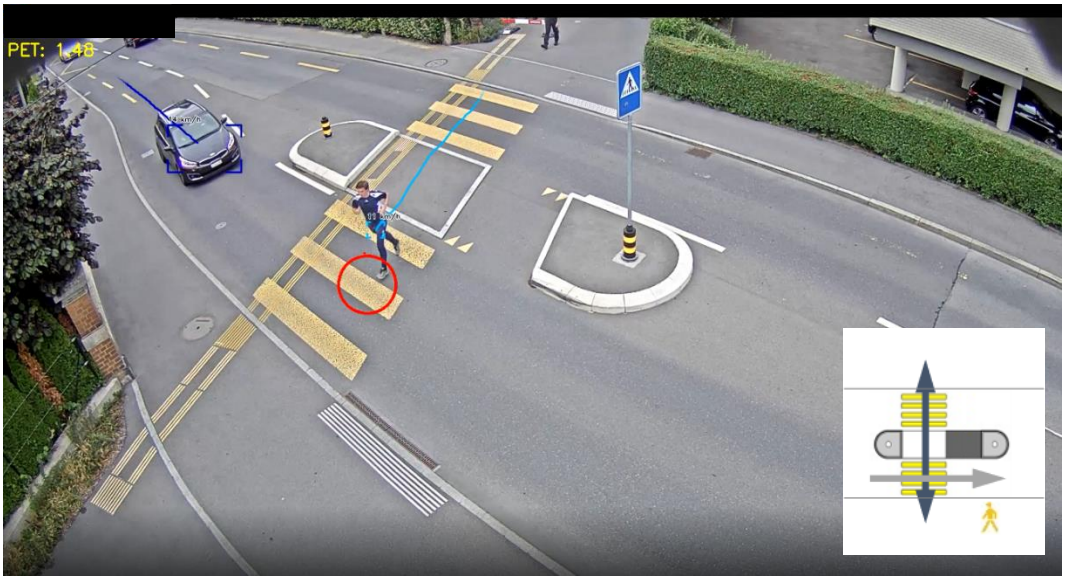


Abb.94 *Konflikttyp 80 S_F: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

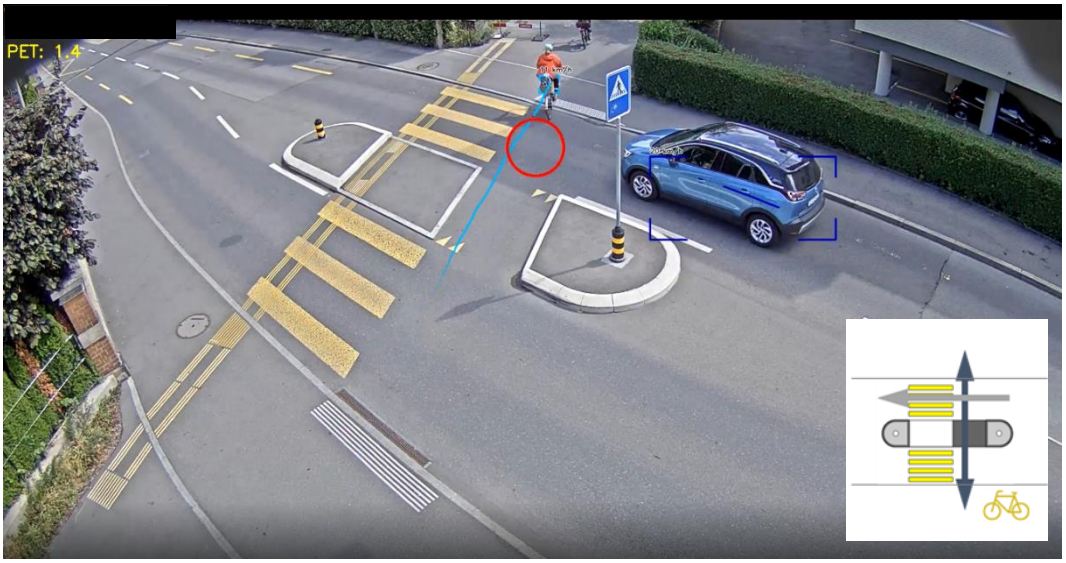


Abb.95 *Konflikttyp 80 N_V: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

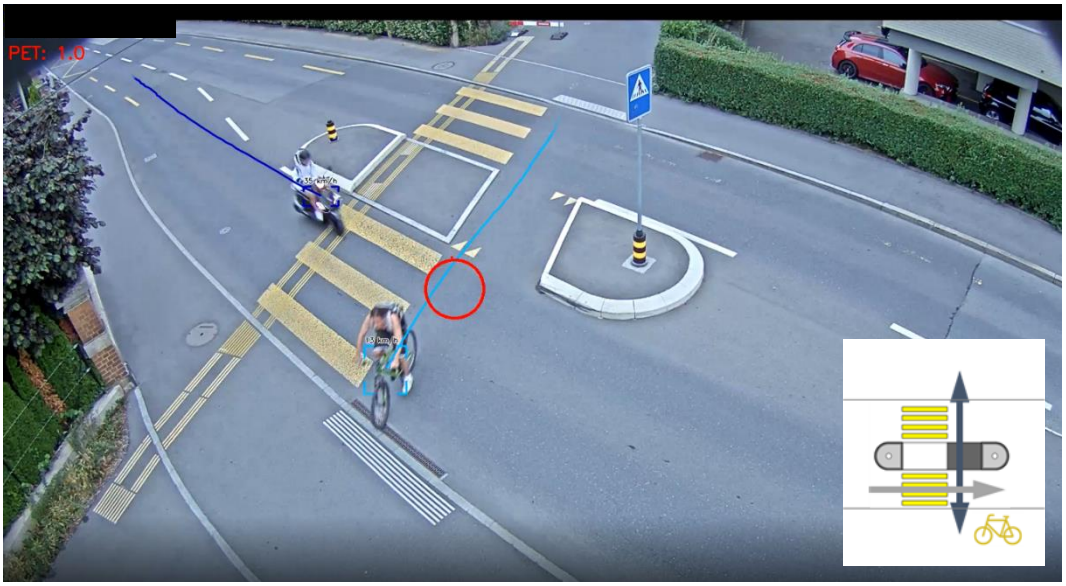


Abb.96 *Konflikttyp 8x S_V: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

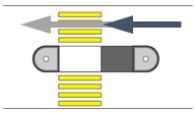
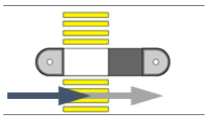
Sicherheitsindikator TTC

Die automatisierte Videoanalyse ergibt für den Sicherheitsindikator TTC (bis 5 Sekunden) etwas über 1'000 Begegnungen in 72 ausgewerteten Aufnahmestunden, wobei nach den beiden Fahrtrichtungen entlang der Horwerstrasse unterschieden wurde. Darin enthalten sind auch einige Überholsituationen Motorfahrzeugen/Velos (FALSCH-Positive). Die detektierten Begegnungen betreffen fast ausschliesslich die Fahrtrichtung Süden. Auf Fahrtrichtung Norden entfallen verhältnismässig wenige Begegnungen. Gemäss Prüfung betreffen Letztere ausschliesslich Situationen im Bildrandbereich (abseits des Fussgängerstreifens), die im Einfluss des nahegelegenen lichtsignalgeregelten Knoten stehen. Begegnungen in Zusammenhang mit der Querungsstelle entlang des «Freigleises» wurden von der

Anwendung nicht detektiert. Sowohl der erfasste Bereich (Bild der Videoaufnahme) sowie der im Zuge der Kalibrierung durch den Anbieter definierte Bereich der Trajektorienauswertung waren offenbar für die Detektion von TTC-Begegnungen in der Zufahrt in Fahrtrichtung Norden unzureichend.

Das nachfolgende Ergebnis zu den beiden untersuchten Konflikttypen enthält ausschliesslich Begegnungen von Motorfahrzeugen.

***Tab. 33** Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	57 Begegnungen	Die detektierten Begegnungen betreffen ausschliesslich den Bildrandbereich abseits des Fussgängerstreifen im Einflussbereich des nahegelegenen Knotens. Begegnungen im Einflussbereich der Querungsstelle wurden nicht detektiert.
2x		Szenarien Kategorie (nur MFz)	899 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert

Nachfolgend sind zwei Beispiele von TTC-Begegnungen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

***Abb.97** Konflikttyp 2x N: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung (beeinflusst durch nahegelegenen lichtsignalgeregelten Knoten)*

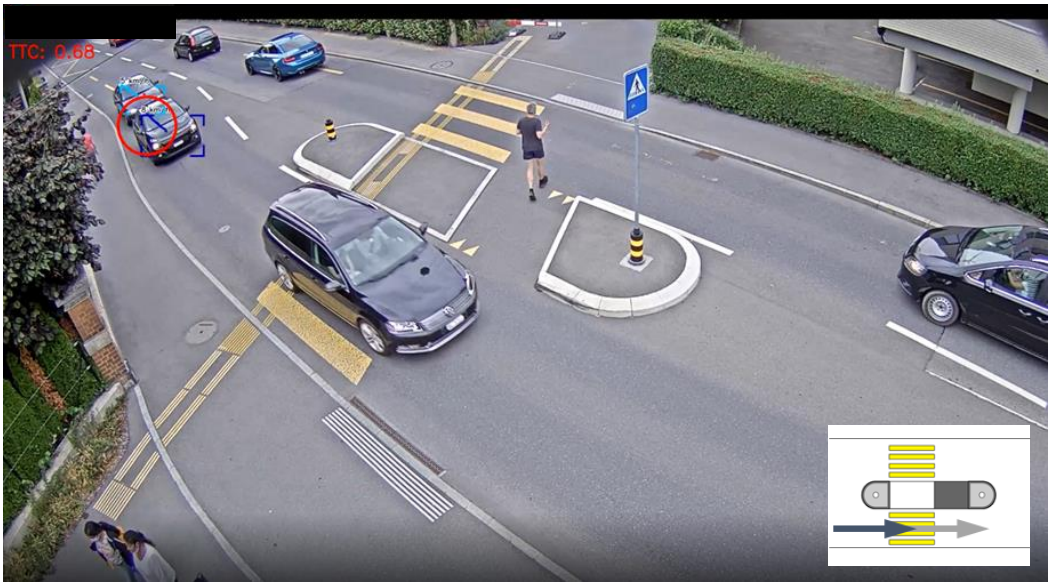


Abb.98 *Konflikttyp 2x S: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung in Zusammenhang mit einer Fussgängerquerung*

3.10.3 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt 1'997 Begegnungen innerhalb der Auswertezeitraume (jeweils erste 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden) analysiert. Die Begegnungen betrafen mehrheitlich Situationen mit querenden Velofahrenden. Zu Konflikten kam es vor allem dann, wenn Velofahrende den Vortritt missachteten und dadurch eine Anpassungshandlung eines anderen Verkehrsteilnehmenden erforderlich wurde. Konflikte mit Fussgängerbeteiligung waren hingegen vergleichsweise selten.

Mit 1'773 Beobachtungen wurde zwar die Mehrzahl der Begegnungen gemäss Auswerteschema als konfliktfrei bewertet. Demgegenüber stehen aber auch über 200 konflikthafte Situationen, von denen 211 als Grad-1-Konflikte und 13 Konflikte kritischer (ab Grad 2) bewertet wurden.

Tab. 34 *manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
08_Luzern_Freigleis	1’997	1’773	211	13

ausgewertet wurden jeweils die ersten 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden

Abb.99 *Beispiel eines Grad-3-Konflikts nach Vortrittsmissachtung durch Velofahrenden*

Abb.100 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts in Zusammenhang mit einer Fussgängerquerung*

3.11 Resultate «09 – Luzern, Zürichstrasse/Wesemlinstrasse»

3.11.1 Ort und Ausgangslage

Der Untersuchungsort befindet sich nördlich des Stadtzentrums von Luzern. Es handelt sich um den Einmündungsbereich der Wesemlinstrasse in die Zürichstrasse. Zur Querung der Zürichstrasse besteht südlich der Einmündung ein Fussgängerstreifen, der ohne Mittelinsel ausgestaltet ist. Insbesondere stadteinwärts kam es in der Vergangenheit zu mehreren Unfällen in diesem Bereich, weshalb die Stelle als Unfallschwerpunkt eingestuft und aus diesem Grund auch zur Untersuchung im Rahmen der Feldversuche vorgeschlagen wurde.

Abb.101 *Lage und Orthofoto des Standorts "09 – Luzern, Zürichstrasse/Wesemlinstrasse" (geoadmin.ch)*

***Tab. 35** Untersuchungsort «09 – Luzern, Zürichstrasse/Wesemlinstrasse»*

Anlage	**Querungsstelle Fuss/Velo**
Strassentyp	Zürichstrasse: Hauptverkehrsstrasse Wesemlinstrasse: Erschliessungsstrasse
Umgebungsnutzung	Wohnen, Gewerbe
Temporegime	Zürichstrasse: Tempo 50 Wesemlinstrasse: Tempo-30-Zone
Vortrittsregelung	Zürichstrasse vortrittsberechtigt ggü. Wesemlinstrasse Fussgängervortritt (Fussgängerstreifen Zürichstrasse bzw. Trottoirüberfahrt Wesemlinstrasse)
Fussgänger- und Veloinfrastruktur	Trottoir beidseits auf allen Ästen, Trottoirüberfahrt, Fussängerstreifen ohne Mittelinsel Radstreifen einseitig (Zürichstrasse bergwärts)
Öffentlicher Verkehr	zwei Buslinien
Besonderheiten (baulich, Markierungen)	Trottoirüberfahrt mit Schachbrettmarkierung, Parkplatzausfahrt via Fussgängerstreifen
Weitere Merkmale	vierter Knotenast (Steinenstrasse) als Einbahn und Begegnungszone signalisiert
Verkehrsdaten	
DTV	Zürichstrasse: ca. 20'000 DTV Wesemlinstrasse: ca. 1'000 DTV (Schätzung)
Verkehrszusammensetzung Motorfahrzeugverkehr	Schwerverkehrsanteil ca. 4% (Schätzung)
Fuss- und Veloaufkommen (Grobeinschätzung)	Fussverkehr: hoch Veloverkehr: sehr hoch
Verkehrssicherheit	
Unfallgeschehen (2011-2019)	10 Unfälle mit Personenschaden mit leichter Verletzungsfolge
Auffälligkeiten im Unfallgeschehen	Auffahrunfälle
Bereits als Unfallschwerpunkt identifiziert	ja
Weitere Merkmale / Themen	-
Erhebungen Feldversuche	
Videoerhebung	Aufnahme aus Höhe von ca. 6m 3 Tage à 24h (29. Juni-01. Juli 2021)
Begleiterhebungen	Befragung

3.11.2 Automatisierte Videoanalyse (Anwendung 2)

Bedingt durch die örtlichen Gegebenheiten sowie die eingeschränkten Standortoptionen für die Befestigung der Kamera, konnte der Knoten nicht vollständig im Videobild erfasst werden. Wie in nachfolgender Abbildung ersichtlich ist, konnten deshalb rechtseinbiegende Fahrzeuge aus der Wesemlinstrasse nicht ausgewertet werden. Folglich beinhaltet auch das Resultat der nachgelagerten Analysen, welche auf Basis der Trajektorien erfolgt, keine Begegnungssituationen mit Verkehrsteilnehmenden dieser Relation. Die übrigen Relationen konnten hingegen gut erfasst und ausgewertet werden. Neben den Verkehrsströmen im Knoten sowie den Fussgängerquerungen wurde ausserdem die auf Höhe des Fussgängerstreifens befindliche Parkplatzausfahrt einbezogen. Insgesamt weisen die von der Anwendung extrahierten Trajektorien eine gute Qualität auf. Ebenso von hoher Qualität ist die Objektklassifizierung, die stichprobenhaft überprüft wurde.

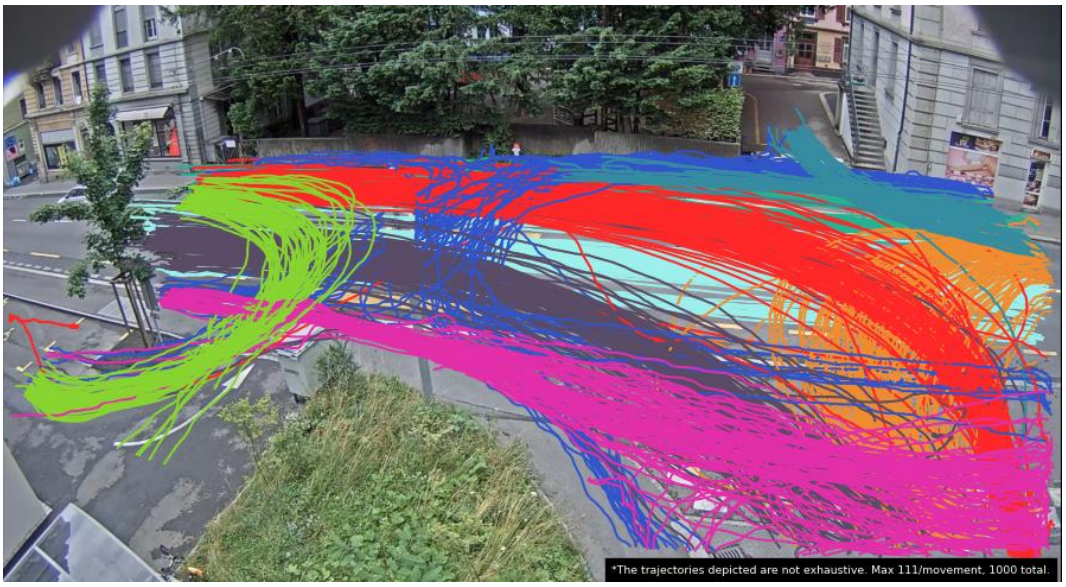


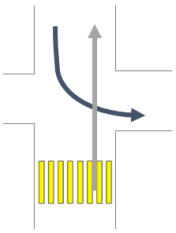
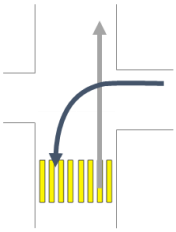
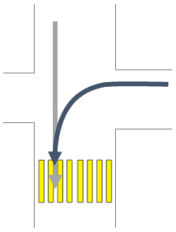
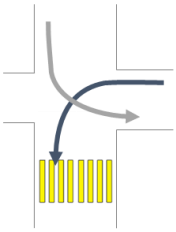
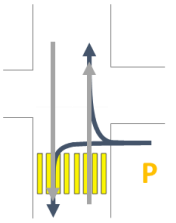
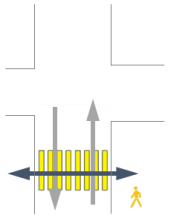
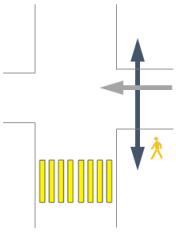
Abb.102 *Trajektorien nach Bewegungsrichtungen*

Sicherheitsindikator PET

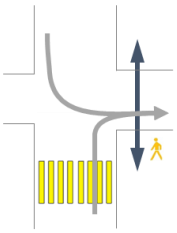
Insgesamt wurden von der Anwendung ca. 15'500 Begegnungssituationen mit eine PET-Wert bis 10 Sekunden (davon etwas mehr als 6’000 mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden) für den ausgewerteten Zeitraum von 72 Aufnahmestunden detektiert.

Nach Sichtung der im Dashboard der Anwendung zur Verfügung gestellten Szenarien und Resultate wurden die in nachfolgender Tabelle aufgelisteten Konflikttypen einer Detailbetrachtung unterzogen. Einzelne Szenarien wurden nicht berücksichtigt, wenn diese (perspektivisch bedingt) ausschliesslich FALSCH-positive Detektionen beinhalteten. Wie oben erwähnt, fehlen Konflikttypen mit rechtseinbiegenden Fahrzeugen aus der Wesemlinstrasse, da diese Fahrbeziehung nicht im Videobild erfasst und ausgewertet werden konnte. Die nachfolgende Auflistung enthält wiederum nur Begegnungen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden.

***Tab. 36** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
30		Szenarien	1’862 Begegnungen davon 572, wo abbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
40		Szenarien	968 Begegnungen davon 452, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
43		Szenarien	1’211 Begegnungen davon 535, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
45		Szenarien	124 Begegnungen davon 49, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
49		Szenarien	56 Begegnungen davon 22, wo einbiegendes Fz zuerst	Begegnungen gut detektiert
80, 82		Szenarien	1'750 Begegnungen davon 982, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert
80		Szenarien	6 Begegnungen davon 5, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert, Untererfassung aufgrund der nicht vollständig erfassten Einmündung

***Tab. 36** Anwendung 2, Sicherheitsindikator PET: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (PET ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
81, 82		Szenarien	33 Begegnungen davon 24, wo querende Person zuerst	Begegnungen gut detektiert

Nachfolgend sind ausgewählte sicherheitsrelevante Beispielsituationen von Begegnungen einiger analysierter Konflikttypen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

***Abb.103** Konflikttyp 30: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.104 *Konflikttyp 40: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.105 *Konflikttyp 43: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.106 *Konflikttyp 45: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.107 *Konflikttyp 49: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

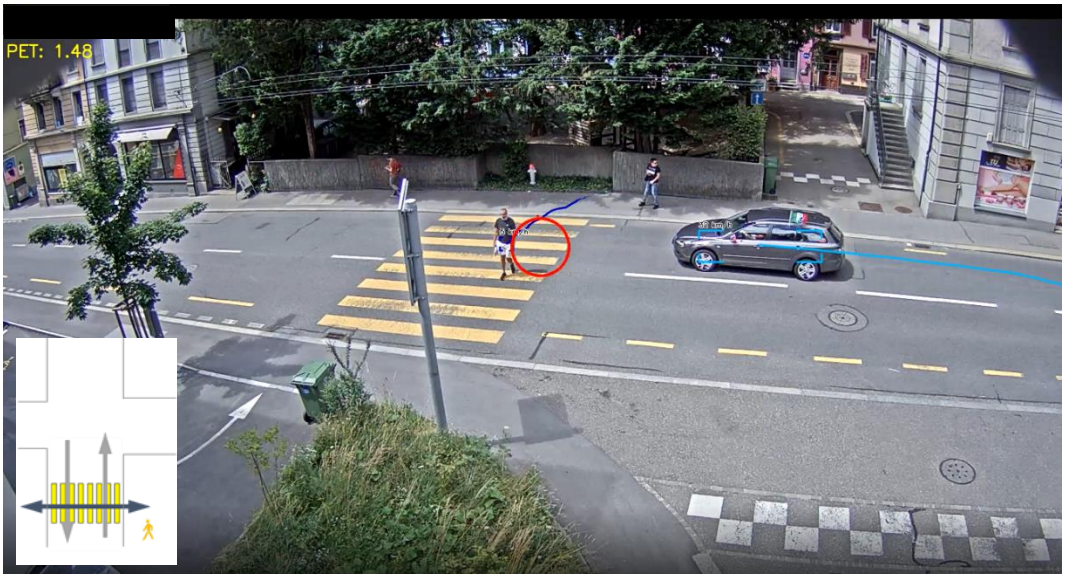


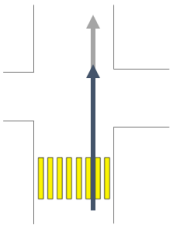
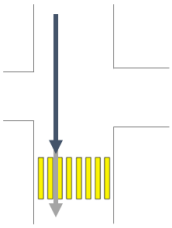
Abb.108 *Konflikttyp 80 S: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Abb.109 *Konflikttyp 80 O: Beispiel einer detektierten sicherheitsrelevanten PET-Begegnung*

Sicherheitsindikator TTC

Für den Sicherheitsindikator TTC (bis 5 Sekunden) wurden von der Anwendung insgesamt knapp 1'300 Begegnungssituationen detektiert. Darunter finden sich allerdings auch zahlreiche FALSCH-Positive, die in Zusammenhang mit Velo-Überholsituationen stehen. Nach Filterung der Begegnungen mit Velobeteiligung ergibt sich das in nachfolgender Tabelle dargestellte Resultat für die beiden untersuchten Konflikttypen. Gemäss Prüfung betreffen TTC-Begegnungen in Richtung Norden häufig Situationen, die im Einfluss des nahegelegenen lichtsignalgeregelten Knoten stehen (Rückstau bis zum untersuchten Knoten), was die im Vergleich zur Richtung Süden höhere Anzahl an Detektion erklärt.

***Tab. 37** Anwendung 2, Sicherheitsindikator TTC: untersuchte Konflikttypen*

Nr.	Skizze	Filtereinstellungen	Anzahl Begegnungen (TTC ≤ 5s) in 72h	Anmerkung
2x N		Szenarien Kategorie (nur MFz)	530 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert
2x S		Szenarien Kategorie (nur MFz)	160 Begegnungen	Begegnungen gut detektiert

Nachfolgend sind zwei Beispiele von TTC-Begegnungen dargestellt, welche von der Anwendung detektiert und als Videosequenzen im Dashboard zur Verfügung gestellt wurden.

***Abb.110** Konflikttyp 2x N: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung (beeinflusst durch nahegelegenen lichtsignalgeregelten Knoten)*

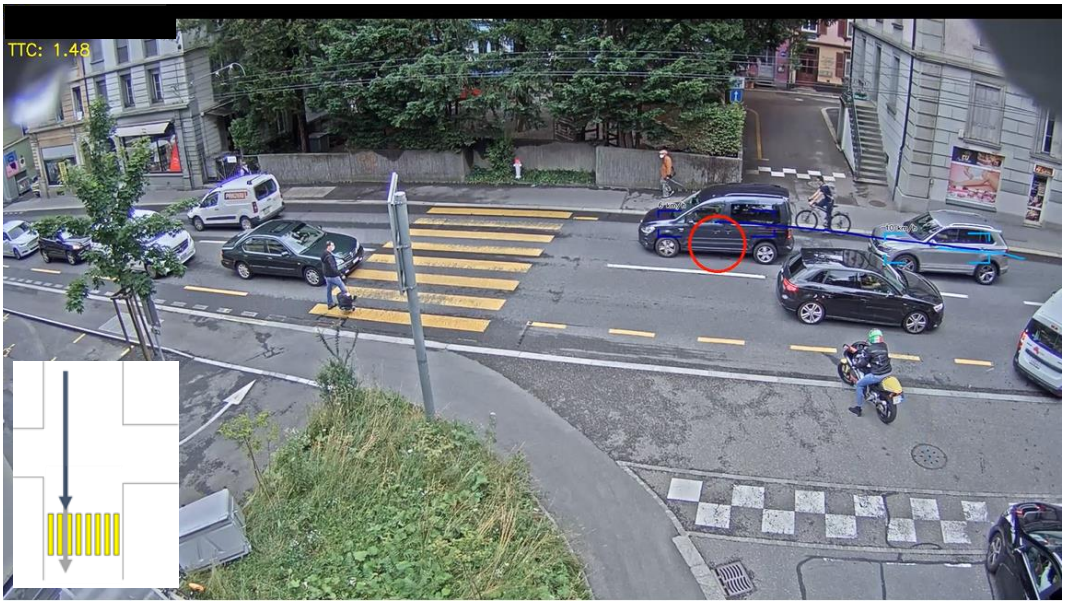


Abb.111 *Konflikttyp 2x S: Beispiel einer detektierten TTC-Begegnung in Zusammenhang mit einer Fussgängerquerung*

3.11.3 Manuelle Konfliktanalyse

Im Rahmen der manuellen Konfliktanalyse wurden an diesem Untersuchungsort insgesamt 3'938 Begegnungen innerhalb der Auswertezeiträume (jeweils erste 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden) analysiert. Die Begegnungen betrafen mehrheitlich Situationen in Zusammenhang mit Ein- und Abbiegemanövern. Zu Konflikten kam es vor allem dann, wenn durch ein- oder abbiegende Fahrzeuge, andere Verkehrsteilnehmende zu einer Anpassungshandlung gezwungen wurden. Konflikte am Fussgängerstreifen waren selten.

Mit 3'868 Beobachtungen wurde die Mehrzahl der Begegnungen gemäss Auswerteschema als konfliktfrei bewertet. Von den konflikthaften Situationen wurden 41 als Grad-1-Konflikte bewertet, 29 Konflikte waren kritischer (ab Grad 2).

Tab. 38 *manuellen Konfliktanalyse: Anzahl ausgewerteter Begegnungen und Konflikte*

	Begegnungen	**Begegnungen**	**Konflikte**	
Untersuchungsort	gesamt	konfliktfrei	Grad 1	ab Grad 2
09_Luzern_Wesemlinstrasse	3’938	3’868	41	29

ausgewertet wurden jeweils die ersten 15 Minuten der 72 Aufnahmestunden

Abb.112 *Beispiel eines Grad-3-Konflikts beim Rechtseinbiegen*

Abb.113 *Beispiel eines Grad-2-Konflikts in Zusammenhang mit einer Fussgängerquerung*

4 Beurteilung der Messergebnisse / Validierung

4.1 Vorgehen bei der Beurteilung der Messergebnisse

Die Prüfung der Resultate der einzelnen Untersuchungsorte, welche mit Anwendung 2 hinsichtlich der beiden Indikatoren PET und TTC erzielt wurden, ergab, dass im vom Anbieter der Anwendung übermittelten Resultat teilweise systematische Fehldetektionen enthalten sind oder auch Ungenauigkeiten die Resultate beeinflussen können. Letztere betreffen primär Positionsbestimmungen und Geschwindigkeitsmessungen. Der komplexere Indikator TTC, der in der Anwendung 2 nur für bestimmte Begegnungen (die involvierten Beteiligten müssen sich in gleicher Fahrtrichtung bewegen) ermittelt wird, ist davon stärker betroffen als der Indikator PET. Zudem ist der Grenzwert für die automatisierte Auswertung von Begegnungssituationen mit 10 Sekunden für PET sehr grosszügig vorgegeben. Vor diesem Hintergrund ist eine Nachbearbeitung im Sinne einer Selektion nach Konflikttypen bzw. Filterung nach Kategorien sowie die Anpassung des Grenzwertes sehr angezeigt. Im nachfolgenden Quervergleich der Messergebnisse wird aber bewusst auch das Resultat ohne Nachbearbeitung (basierend auf allen detektierten PET-Begegnungen bis 10s zusammen mit allen detektieren TTC-Begegnungen bis 5s) berücksichtigt, um die Unterschiede zu den nachbearbeiteten Resultaten aufzeigen zu können. Mit der Nachbearbeitung sollte einerseits das Messergebnis optimiert werden und andererseits wurde versucht, auf Basis der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, geeignete Kenngrössen zu bilden, mit welchen das Sicherheitsniveau (unter Berücksichtigung der potenziellen Unfallschwere) gut beschrieben werden kann.

Die Beurteilung der Messergebnisse erfolgte in drei Stufen.

Zunächst wurden in der ersten Stufe die Messergebnisse der alternativen Methode (Anwendung 2) im Quervergleich der Untersuchungsorte betrachtet, wobei in diesem Schritt einerseits die Ergebnisse zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus ohne Nachbearbeitung Berücksichtigung finden. Andererseits wurden, gemäss den Erkenntnissen der Vorprüfung sowie unter Berücksichtigung von Empfehlungen zur Anwendung der ermittelten Indikatoren aus der Literatur (u.a. [21], [24], [32]), die Resultate nachbearbeitet sowie weitere Kenngrössen zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus berechnet. Die eigenen Berechnungen erfolgten auf Basis der automatisiert ausgewerteten PET-Begegnungen und dienten auch zur Vorbereitung der Gegenüberstellung zu den Resultaten der manuellen Konfliktanalyse. TTC-Detektionen wurden aufgrund der festgestellten Unzulänglichkeiten im Nachbearbeitungsschritt bewusst nicht berücksichtigt. In der ersten Beurteilungsstufe werden ausserdem die Ergebnisse der beiden am Untersuchungsort «01_Kilchberg» durchgeführten Messungen miteinander verglichen und beurteilt.

In der zweiten Stufe wurden die nachbearbeiteten Messergebnisse der alternativen Methode den Ergebnissen der manuellen Konfliktanalyse gegenübergestellt.

In der dritten Stufe erfolgte schliesslich noch die Gegenüberstellung der nachbearbeiteten Messergebnisse der alternativen Methoden zum tatsächlichen Unfallgeschehen.

4.2 Messergebnisse der alternativen Methode im Quervergleich

4.2.1 Messergebnisse ohne Nachbearbeitung

Das Messergebnis ohne Nachbearbeitung basiert auf sämtlichen mittels Anwendung 2 detektierten Begegnungen (PET bis 10s und TTC bis 5s). Die nachfolgende Tabelle enthält die Gesamtanzahl detektierter Begegnungen (im Dashboard der Anwendung als «Safety Related Events» bezeichnet – übersetzt: «sicherheitsrelevante Ereignisse») sowie die durchschnittliche Anzahl pro Stunde je Untersuchungsort. Als wichtigster Wert ist in der Tabelle die sogenannte «Critical Conflict Rate» (CCR-S) enthalten, eine Kennzahl, die zur

Beschreibung des Sicherheitsniveaus dient und nach welcher die dargestellte Rangfolge gebildet wurde. Dieser Wert beschreibt den Anteil der «kritischen Ereignissen» (Definition unter Anwendung des Konfliktdiagramms gemäss «Schwedischer Konflikttechnik», vgl. *Abb.114*) am jeweiligen Gesamtergebnis (alle Detektionen, wobei nach Auskunft des Anbieters dabei auch sogenannte «undisturbed passages», also Durchfahrten ohne Begegnungen in der Kalkulation mitberücksichtigt werden). Die Ermittlung der Kenngrösse erfolgt direkt im Dashboard der Anwendung und kann vom Benutzer nicht angepasst werden.

Im Ergebnis ohne Nachbearbeitung gilt der Untersuchungsort «02_Bachenbülach» als jener mit dem höchsten Anteil «kritischer Ereignisse». 3.30% aller Detektionen werden gemäss dem ermittelten Resultat an diesem Ort als kritisch eingestuft. An zweiter Stelle liegt «01_Kilchberg» mit einem Anteil von 2.59%, gefolgt von «04_Staechenrain» (1.35%) und «03_Dietikon» (0.94%). Die übrigen untersuchten Orte weisen deutliche tiefere Werte (unter 0.2%) bei dieser Kennzahl auf.

Im Zuge der Nachbearbeitung der Resultate (siehe Kapitel 4.2.2) wurde festgestellt, dass das Resultat für den Untersuchungsort «04_Staechenrain» betreffend die Kennzahl der «Critical Conflict Rate» (CCR-S) hinterfragt werden muss, da es erhebliche Abweichungen zur von der Forschungsstelle ermittelten Anzahl «kritischer Begegnungen» gibt. Ob hierbei die bei der Berechnung berücksichtigten «undisturbed passages» allein entscheidend sind, oder allenfalls auch andere Faktoren eine Rolle spielen, konnte auf Nachfrage vom Anbieter leider bis zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nicht abschliessend geklärt werden.

Tab. 39 *Quervergleich – Rangfolge (PET und TTC ohne Nachbearbeitung)*

Rang	Untersuchungsort	**SRE* gesamt** (PET bis 10s u. TTC bis 5s)	**SRE* pro h** (PET bis 10s u. TTC bis 5s)	**CCR-S**** (PET bis 10s u. TTC bis 5s)
1	02_Bachenbülach	28’319	393	3.30%
2	01_Kilchberg	9’394	130	2.59%
3	04_Staechenrain	4’453	62	1.35%
4	03_Dietikon	9’711	135	0.94%
5	08_Luzern_Freigleis	28’031	389	0.18%
6	06_Sursee_Schlottermilch	191’771	2’663	0.07%
7	07_Luzern_Waldegg	48’173	669	0.04%
8	09_Luzern_Wesemlinstrasse	16’802	233	0.04%

*SRE = Safety Related Events (sicherheitsrelevante Ereignisse, alle),
**CCR-S = Critical Conflict Rate (Anteil kritischer Ereignisse unter Anwendung des Konfliktdiagramms gemäss «Schwedischer Konflikttechnik»)

4.2.2 Messergebnisse, nachbearbeitet (Definition kritische Begegnung)

Dank der Exportfunktion können die Resultate der mittels automatisierten Videoauswertung ermittelten sicherheitsrelevanten Ereignissen (inkl. aller gespeicherten Informationen zu jedem Ereignis) jedes untersuchten Ortes in Tabellenform für weitere Nachbearbeitungen aus dem Dashboard geladen werden. Auf Basis dieser Datentabelle wurden bereits im Zuge der Vorprüfung Auswertungen, wie beispielsweise zu den in Kapitel 3 beschriebenen Konflikttypen, je Untersuchungsort gemacht.

Die Nachbearbeitung umfasste zunächst die bereits erwähnte Zuordnung zu den relevanten Konflikttypen, welche im Zuge der weiteren Berechnungen berücksichtigt werden sollen. Aufgrund der Tatsache, dass gemäss Vorprüfung nur PET-Ereignisse an allen Untersuchungsorten mehrheitlich gut detektiert werden konnten, beschränkt sich die Nachbearbeitung auf die Konflikttypen, welche auf diesem Indikator basieren. Zudem wurden nur PET-Werte bis 5 Sekunden betrachtet, da bei höheren Zeitunterschieden zwischen zwei einander kreuzenden Objekten kaum mehr von einer durch Verkehrsteilnehmende wahrnehmbaren Begegnung gesprochen werden kann. In zahlreichen der in [21] genannten Studien werden eben diese 5 Sekunden als oberer Grenzwert empfohlen, um «Begegnungen» als solche zu definieren und diese als geeignete Expositionsgrösse heranzuziehen.

Die Definition einer «kritischen Begegnung» erfolgte in Anlehnung an die «Schwedische Verkehrskonflikttechnik», wobei die Ermittlung von der Forschungsstelle selbst anhand der exportierten Daten der Anwendung durchgeführt wurde. Dabei wurden alle detektierten Begegnungen anhand des Indikatorwertes (im vorliegenden Fall des PET-Wertes) und der gemessenen Geschwindigkeit» (bei PET: die Geschwindigkeit des jeweils schnelleren Objekts zum Zeitpunkt, zu welchem der Bereich der kreuzenden Trajektorien passiert wurde) gemäss nachfolgender Abbildung in «kritischere» und «weniger kritische» Situationen (im weiteren als übrige Begegnungen bezeichnet) unterteilt.

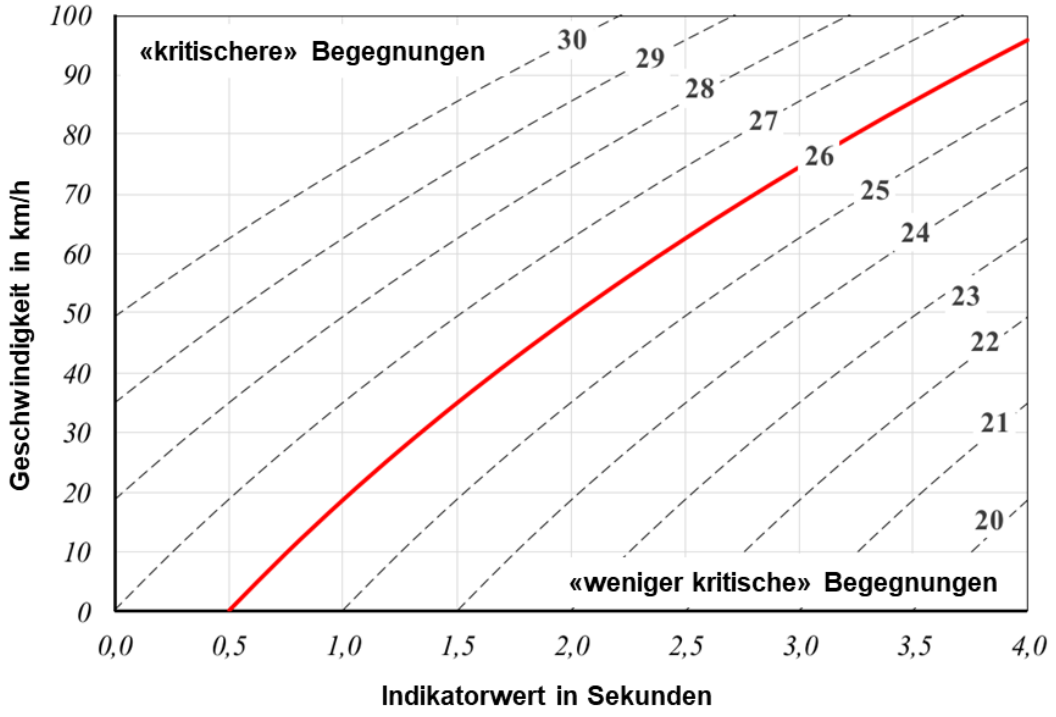


Abb.114 *Konfliktdiagramm gemäss «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik» ([30])*

In Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik» wurden für alle Untersuchungsorte entsprechende Diagramme erstellt, welche die detektierten PET-Begegnungen (bis 5 Sekunden) der jeweils relevanten Konflikttypen (gemäss Kapitel 3) enthalten. Die einzelnen Begegnungen sind nach «a-Konflikttypen» und «b-Konflikttypen» unterschieden. Hierfür wurden alle detektierten PET-Begegnungen jedes Konflikttyps anhand des Kriteriums der Reihenfolge, in welcher die beiden Objekte den Bereich der Trajektorienkreuzung passieren, entsprechend zugeordnet.

Zur Gruppe «a» wurden alle Begegnungen beim Ein- und Abbiegen bzw. Überqueren (Konflikttypen 3X., 4X bzw. 5X) gezählt, bei denen das vortrittsbelastete Fahrzeug zuerst fuhr und somit eine Vortrittsverletzung angenommen werden kann. Hinzu kommt, dass bei

diesen Begegnungen eher von einem höheren Unfallpotenzial auszugehen ist, da nebst einem wahrscheinlichen Regelverstoss häufiger auch ein Objekt mit höherer Geschwindigkeit auf ein langsameres Objekt folgt. Aufgrund dieses Geschwindigkeitsunterschiedes und der höheren Vulnerabilität wurden die Begegnungen in Zusammenhang mit querenden Zufussgehenden und Velofahrenden (Konflikttypen 8X), bei denen die querende Person zuerst den Bereich passiert, ebenfalls der Gruppe «a» zugeordnet (unabhängig der Vortrittsverhältnisse).

Zur Gruppe «b» wurden im Gegenzug Begegnungen beim Ein- und Abbiegen bzw. Überqueren (Konflikttypen 3X., 4X bzw. 5X) gezählt, bei denen das vortrittsberechtigte Fahrzeug zuerst fuhr und somit keine Vortrittsverletzung angenommen werden kann. Ebenfalls der Gruppe «b» zugeordnet wurden Begegnungen in Zusammenhang mit querenden Zufussgehenden und Velofahrenden (Konflikttypen 8X), bei denen jeweils nach der Durchfahrt eines Fahrzeugs gequert wurde (unabhängig der Vortrittsverhältnisse).

Als nicht sinnvoll zuordenbar stellten sich Begegnungssituationen aufgrund von Spurwechselmanöver (Konflikttyp 1X) dar, wie sie für den Untersuchungsort «03_Dietikon» typisch sind. Diese Situationen wurden vollständig der Gruppe «b» zugeordnet. In der Gruppe «a» finden sich an diesem Ort deshalb nur die wenigen Begegnungen mit Zufussgehenden und Velofahrenden, bei denen die querende Person zuerst den Bereich passiert.

Die für jeden Untersuchungsort erstellten Diagramme enthalten alle relevanten PET-Begegnungen bis 5 Sekunden, wobei jene links bzw. oberhalb der dargestellten Grenzlinie befindlichen PET-Begegnungen als «kritischere» Begegnungen gelten.

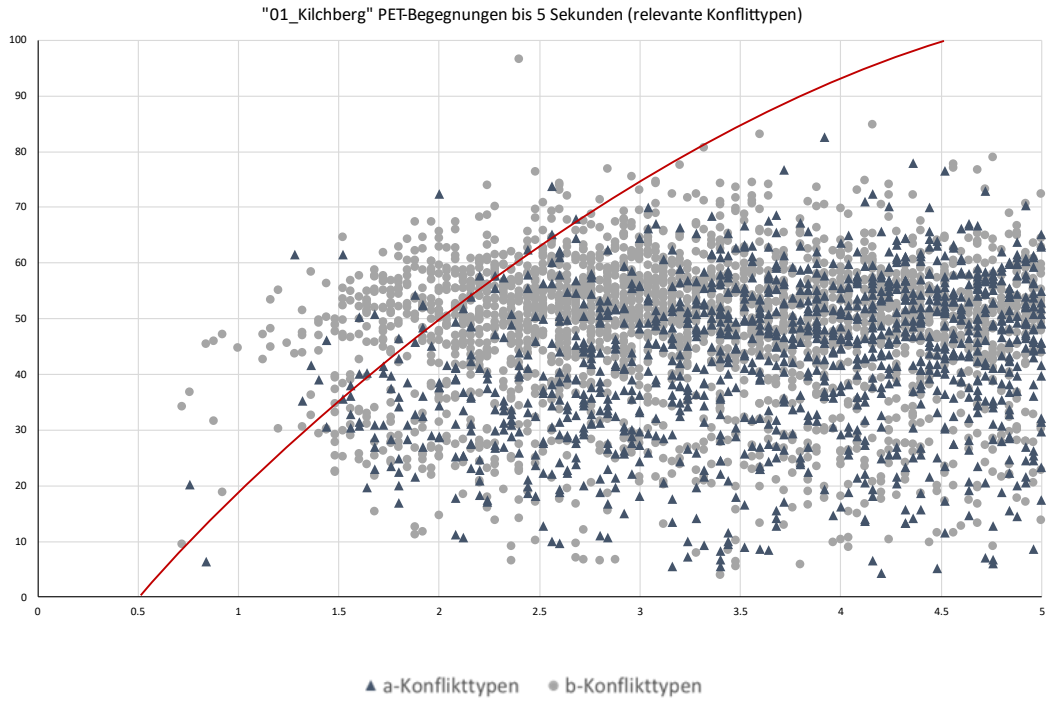


Abb.115 *Diagramm «01_Kilchberg» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)

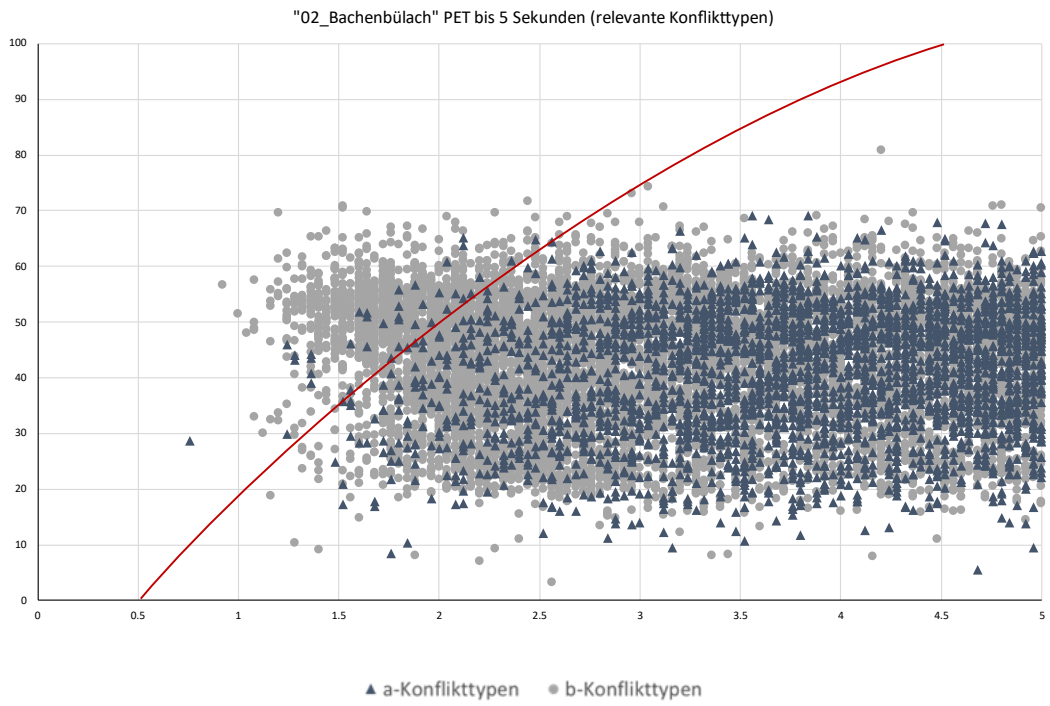


Abb.116 *Diagramm «02_Bachenbülach» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)

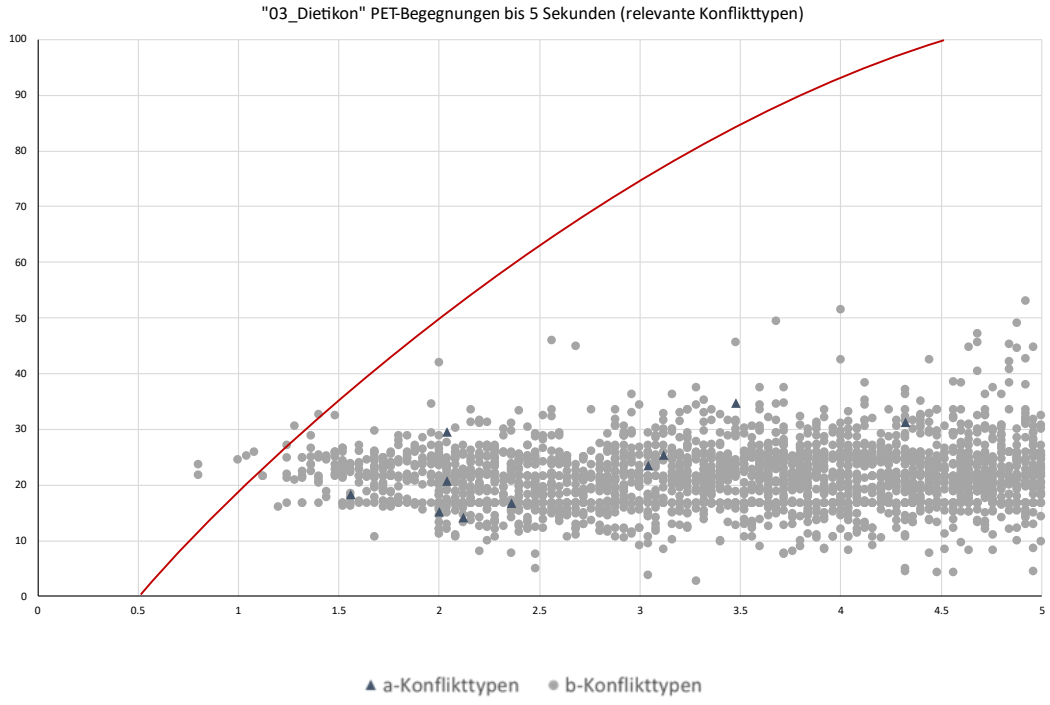


Abb.117 *Diagramm «03_Dietikon» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)
**a-Konflikttypen konnten an dem Ort nur für die Typen «1x V» u. «80» gebildet werden*

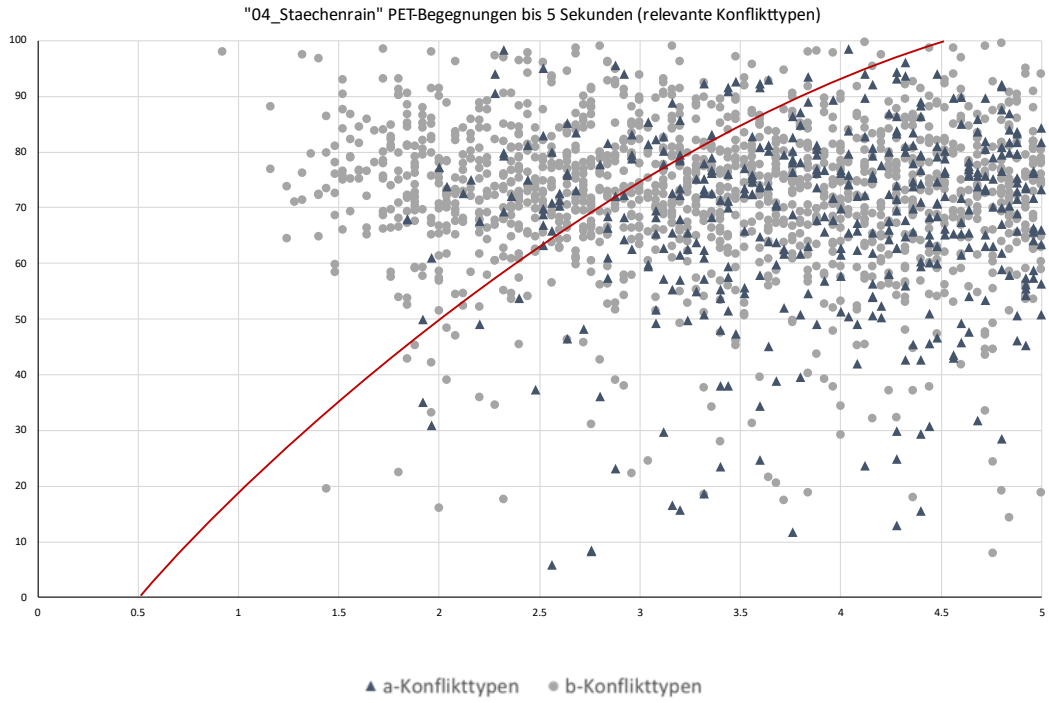


Abb.118 *Diagramm «04_Staechenrain» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)

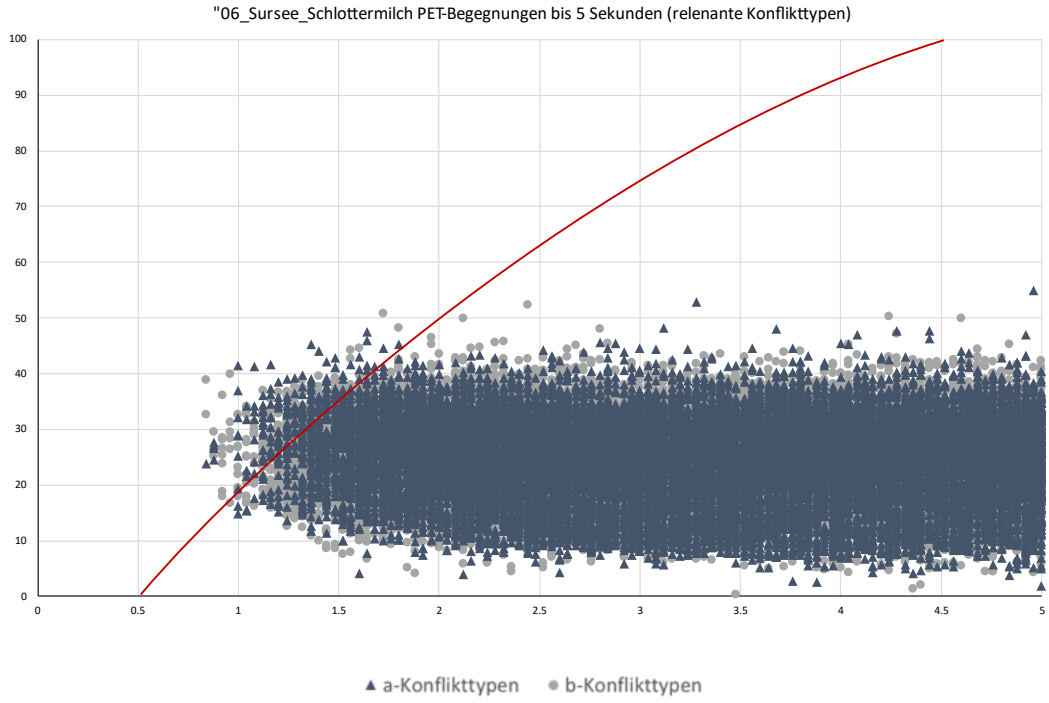


Abb.119 *Diagramm «06_Sursee_Schlottermilch» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)

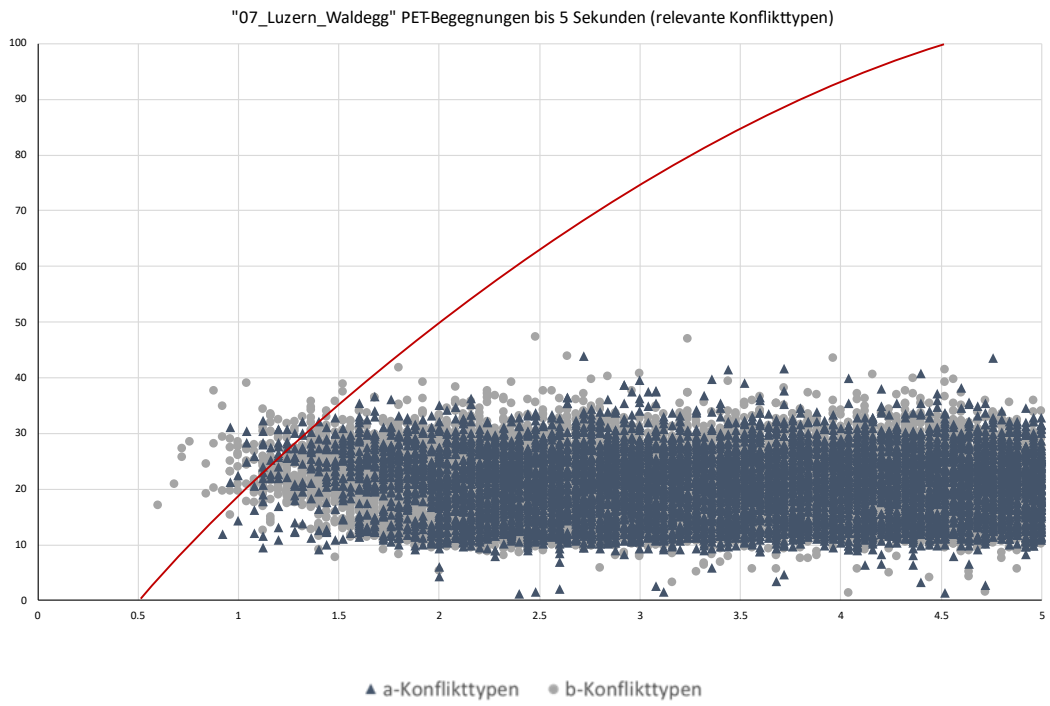


Abb.120 *Diagramm «07_Luzern_Waldegg» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)

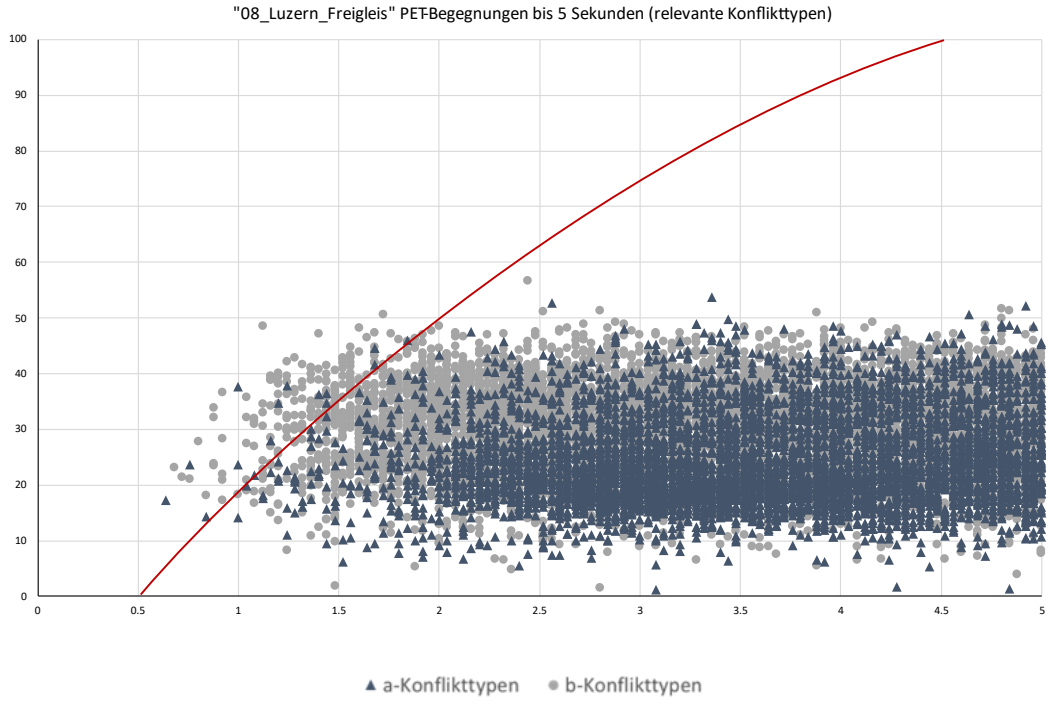


Abb.121 *Diagramm «08_Luzern_Freigleis» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)

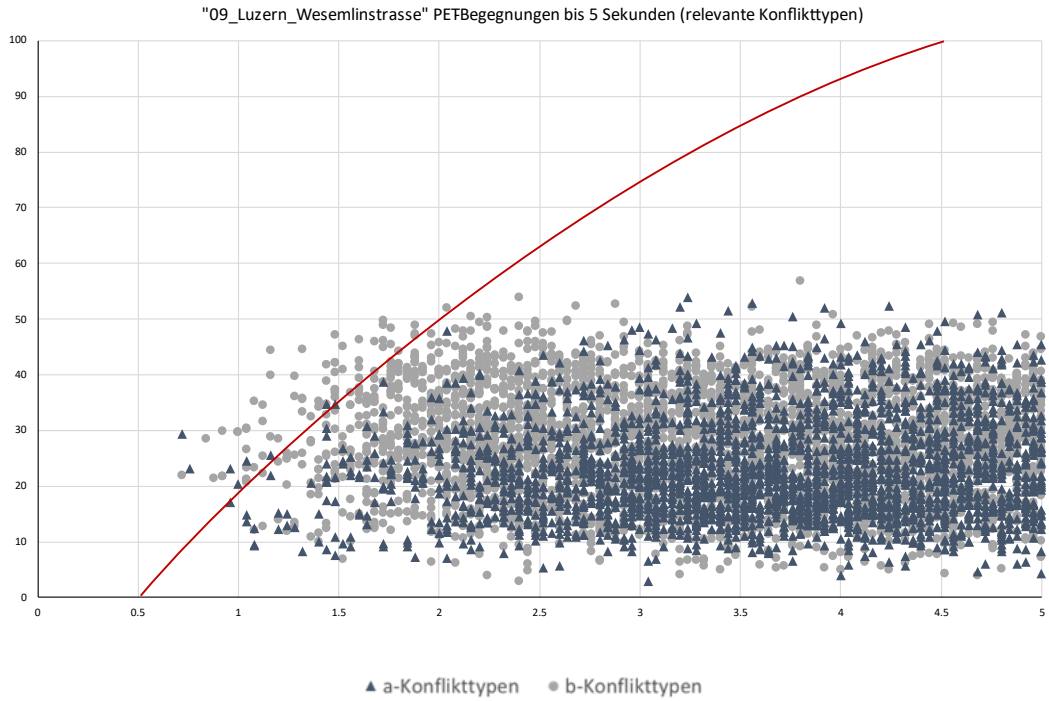


Abb.122 *Diagramm «09_Luzern_Wesemlinstrasse» in Anlehnung an das Konfliktdiagramm nach «Schwedischer Verkehrskonflikttechnik»*
(x-Achse: PET in Sekunden, y-Achse: Geschwindigkeit in km/h)

Das Resultat dieses Nachbearbeitungsschrittes ergibt bezogen auf den Anteil kritischer Begegnungen (kB) an allen relevanten Begegnungen die in der nachfolgenden Tabelle dargestellte Rangfolge der Untersuchungsorte im Quervergleich. Deutlich am höchsten ist der ermittelte Wert für «04_Staechenrain», wo mehr als ein Drittel der relevanten Begegnungen gemäss dem gewählten Vorgehen als kritisch eingestuft wurden. Mit beträchtlichem Abstand dahinter folgen «02_Bachenbülach» und «01_Kilchberg» mit jeweils einem Anteil kritischer Begegnungen von knapp unter 10%. Für alle übrigen Orte wurden Anteile kritischer Begegnungen von unter 2% ermittelt.

Bei Betrachtung der Rangfolge wird offensichtlich, was auch die einzelnen Diagrammdarstellungen offenbaren: Das Geschwindigkeitsniveau stellt methodisch bedingt einen wesentlichen Faktor dar. Die Orte «04_Staechenrain» (Tempo 80), «01_Kilchberg» (zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung Tempo 60) sowie «02_Bachenbülach» (Tempo 50, Nahe zu Tempo 80-Abschnitt) sind jene Untersuchungsorte mit – im Vergleich zu den anderen Orten – höheren gemessenen Geschwindigkeiten. Es ist folglich logisch, dass genau diese Orte in Bezug auf die Sicherheitsbeurteilung als «unsicherer» gelten müssen. Vom Grundsatz her ist dies auch nicht völlig falsch, da auch das Risiko eines schweren Unfalls im Falle einer Kollision mit der Geschwindigkeit zunimmt.

Tab. 40 *Quervergleich – Rangfolge (PET ≤5s, Anteil kritische Begegnungen)*

Rang	Untersuchungsort	**SRE* gesamt** (PET bis 5s)	**SRE* pro h** (PET bis 5s)	**Anteil kB**** (PET bis 5s)
1	04_Staechenrain	1’868	26	34.69%
2	02_Bachenbülach	11’174	155	9.89%
3	01_Kilchberg	3’691	51	8.24%
4	08_Luzern_Freigleis	11’423	159	1.61%
5	09_Luzern_Wesemlinstrasse	6’073	84	1.23%
6	06_Sursee_Schlottermilch	42’870	595	1.18%
7	07_Luzern_Waldegg	19’853	276	0.64%
8	03_Dietikon	2’464	34	0.37%

*SRE = Safety Related Events (sicherheitsrelevante Ereignisse, relevante Konflikttypen), **Anteil kB = Anteil kritische Begegnungen (Definition «kritische Begegnung» in Anlehnung an «Schwedische Konflikttechnik»)

Im Vergleich zum unbearbeiteten Resultat, bei welchem alle detektierten PET-Begegnungen (bis 10s) sowie alle TTC-Begegnungen (bis 5s) berücksichtigt wurden, ergibt sich im nachbearbeiteten Resultat über die ermittelten kritischen PET-Begegnungen eine etwas veränderte Rangfolge.

- Auffällig ist, dass «04_Staechenrain» als mit Abstand «unsicherster» Ort ermittelt wurde. Dass mit absolut über 600 kritischen Begegnungen in 72h über die eigene Berechnung offensichtlich deutlich mehr Detektionen als kritisch gelten als dies über die vordefinierte Berechnung der Anwendung der Fall ist, lässt sich anhand der seitens Anbieter zur Verfügung gestellten Informationen zur Methodik nicht nachvollziehen. Auf die erfolgte Nachfrage beim Anbieter zu dieser Abweichung konnte bis zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichts keine abschliessend klärende Antwort gegeben werden.
- Ausserdem fällt auf, dass im nachbearbeiteten Resultat der Untersuchungsort «03_Dietikon» als im Quervergleich sicherster Ort ermittelt wurde, was ebenfalls eine Abweichung zum unbearbeiteten Resultat bedeutet. An diesem Ort sind hierfür sowohl die Selektion der relevanten PET-Konflikttypen sowie die Nicht-Berücksichtigung der TTC-Begegnungen bei der Nachbearbeitung entscheidend.

Zusätzlich wurde das Verhältnis zwischen kritischen Begegnungen und den übrigen Begegnungen (Ratio kb/üb) gebildet. Dieser Wert wurde später auch für die Gegenüberstellung mit den Resultaten der manuellen Konfliktanalyse herangezogen, da bei der Methode der manuellen Konfliktanalyse in der Regel ebenfalls ein Verhältniswert zwischen konfliktbehafteten Begegnungen (Grade-Begegnungen) zu übrigen Begegnungen zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus angewendet wird. Das Ergebnis hat keinen Einfluss auf die Rangfolge.

Tab. 41 *Quervergleich – Rangfolge (PET ≤5s, Ratio kritische / übrige Begegnungen)*

Rang	**Untersuchungsort**	**SRE* gesamt** (PET bis 5s)	**SRE* pro h** (PET bis 5s)	**Ratio kB/üB**** (PET bis 5s)
1	04_Staechenrain	1’868	26	0.531
2	02_Bachenbülach	11’174	155	0.110
3	01_Kilchberg	3’691	51	0.090
4	08_Luzern_Freigleis	11’423	159	0.016
5	09_Luzern_Wesemlinstrasse	6’073	84	0.013
6	06_Sursee_Schlottermilch	42’870	595	0.012
7	07_Luzern_Waldegg	19’853	276	0.006
8	03_Dietikon	2’464	34	0.004

*SRE = Safety Related Events (sicherheitsrelevante Ereignisse, relevante Konflikttypen),
**Ratio kB/üB = Verhältnis kritischere Begegnungen / übrige Begegnungen (Definition «kritische Begegnung» in Anlehnung an «Schwedische Konflikttechnik»)

4.2.3 Messergebnisse, nachbearbeitet (Berechnung Risikoindex)

In Zusammenhang mit aus Videodaten messbaren Indikatoren wird häufig darauf hingewiesen, dass der PET-Wert allein nicht ausreichend aussagekräftig ist, insbesondere wenn es um die Frage der Beurteilung des Schweregrades geht. Die Berücksichtigung der Geschwindigkeit und Einteilung der ermittelten Begegnungssituationen in Anlehnung an die schwedische Konflikttechnik [30] in zwei Kategorien ist ein erster guter Ansatz. Dieser hat aber den Nachteil, dass zunächst die Zuordnung zu einer der beiden Kategorien anhand einer scharfen Trennlinie erfolgt und zudem keine weitere Unterscheidung hinsichtlich der Beurteilung des Schweregrades vorgenommen wird. Darüber hinaus ist die Integration zusätzlicher Kriterien bei dieser Methode schwierig. Es wurde deshalb eine zweite Kenngrösse berechnet, bei der das Kollisionsrisiko und das Verletzungsrisiko für jede ermittelte Begegnungssituationen als sogenannter Risikoindexwert bestimmt wird. Diese Methode wurde in einer Studie zur Diagnose und Evaluation von Massnahmen zur Erhöhung der Fussverkehrssicherheit angewendet [32]. Der Risikoindexwert wird mit Hilfe des natürlichen Logarithmus berechnet, sodass jede Begegnungssituation relativ zu allen anderen als vergleichsweise mehr oder weniger «risikobehaftet» beurteilt werden kann. Für den Quervergleich wurde der ermittelte MEDIAN-Wert je Untersuchungsort herangezogen, was in der in untenstehender Tabelle enthaltenen Rangfolge resultiert.

Tab. 42 *Quervergleich – Rangfolge (PET ≤5s, Risikoindex)*

Rang	Untersuchungsort	SRE* gesamt (PET bis 5s)	SRE* pro h (PET bis 5s)	Ri MEDIAN** (PET bis 5s)
1	04_Staechenrain	1’868	26	3.031
2	01_Kilchberg	3’691	155	2.631
3	02_Bachenbülach	11’174	51	2.556
4	06_Sursee_Schlottermilch	42’870	159	2.065
5	08_Luzern_Freigleis	11’423	84	2.056
6	09_Luzern_Wesemlinstrasse	6’073	595	1.982
7	07_Luzern_Waldegg	19’853	276	1.859
8	03_Dietikon	2’464	34	1.831

*SRE = Safety Related Events (sicherheitsrelevante Ereignisse, relevante Konflikttypen),
**Ri MEDIAN = MEDIAN-Wert des Risikoindex (Risikoindex = Ln(Vmax/PET))

Die nachfolgende Abbildung stellt die sich aus den kumulierten Risikoindexwerten der einzelnen Untersuchungsorte (in %) ergebenden Kurven gegenüber. Die dargestellten Kurven verdeutlichen die Unterschiede in Bezug auf diese Kenngrösse zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus. Logischerweise zeigt sich auch hier der entsprechend grosse Einfluss der Geschwindigkeiten, indem beispielsweise am Standort «04_Staechenrain» in erster Linie bedingt durch das Geschwindigkeitsniveau kaum Begegnungen mit einem Risikoindexwert unter 2.5 ermittelt wurden.

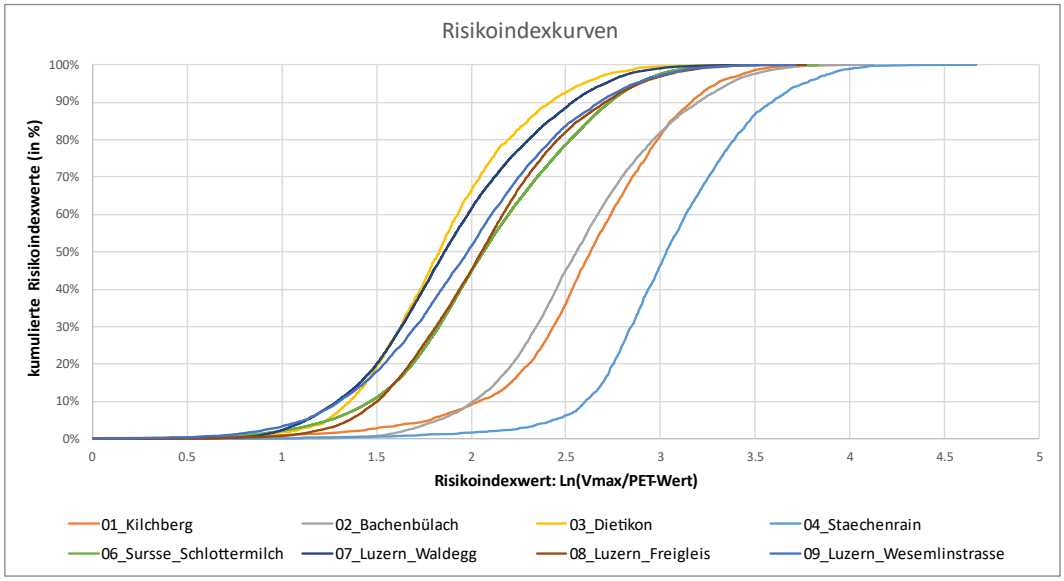


Abb.123 *Quervergleich – Risikoindexkurven (PET ≤5s, Risikoindex = Ln(Vmax/PET))*

Schliesslich wurde noch eine vertiefende Betrachtung der Resultate dahingehend vorgenommen, dass der Risikoindex ausschliesslich anhand der als a-Konflikttypen definierten PET-Begegnungen, die als tendenziell riskanter einzuschätzen sind, ermittelt wurde.

Für den Quervergleich wurde wiederum der ermittelte MEDIAN-Wert je Untersuchungsort herangezogen. Im Ergebnis ergibt sich für diese Detailbetrachtung nach a-Konflikttypen die in nachfolgender Tabelle dargestellte Rangfolge. Es zeigt sich, dass die ermittelten MEDIAN-Werte des Risikoindex an fast allen Orten etwas tiefer ausfallen als im Gesamtergebnis der Betrachtung aller relevanten PET-Konflikttypen und auch die Rangfolge gleich ist. Einzige Ausnahme bildet der Untersuchungsort «03_Dietikon», bei dem wie bereits erläutert nur sehr wenige Begegnungen in die Detailbetrachtung einfliessen konnten und deshalb auch das Resultat für diesen Ort wenig aussagekräftig ist.

Tab. 43 *Quervergleich – Rangfolge (PET a-Konflikttypen ≤5s, Risikoindex)*

Rang	Untersuchungsort	**SRE* gesamt** (PET bis 5s)	**SRE* pro h** (PET bis 5s)	**Ri MEDIAN**** (PET bis 5s)
1	04_Staechenrain	417	6	2.870
2	01_Kilchberg	1’183	16	2.494
3	02_Bachenbülach	3’104	43	2.396
4	03_Dietikon***	7	<1	2.099
5	06_Sursee_Schlottermilch	20’608	286	2.024
6	08_Luzern_Freigleis	5’727	80	1.890
7	09_Luzern_Wesemlinstrasse	2’668	37	1.812
8	07_Luzern_Waldegg	7’811	108	1.798

*SRE = Safety Related Events (sicherheitsrelevante Ereignisse, relevante Konflikttypen),
**Ri MEDIAN = MEDIAN-Wert des Risikoindex (Risikoindex = Ln(Vmax/PET))
***a-Konflikttypen konnten an dem Ort nur für die Typen «1x V» u. «80» gebildet werden

4.2.4 «01_Kilchberg» - Gegenüberstellung der Resultate der beiden Messungen

Der Untersuchungsort «01_Kichberg» wurde nach Phase 2 der Feldversuche als einziger Ort ein zweites Mal untersucht. Im Gegensatz zur ersten Messung, die drei Werktage (72 ausgewertete Videostunden) umfasste, war die Dauer der zweiten Messung ca. eine Woche (insgesamt wurden 180 Videostunden ausgewertet). Anhand einer Gegenüberstellung der beiden Messresultate sollte beurteilt werden, inwiefern die Methode stabile Resultate über die Zeit hinweg liefert. Gemäss der durchgeführten Prüfung der ausgewerteten Ergebnisse wurden gewisse Qualitätsunterschiede festgestellt. Hinzu kommt, dass auch die Rahmenbedingungen während beiden Untersuchungszeiträume unterschiedlich waren.

Bevor die Resultate hinsichtlich Sicherheitsbeurteilung gegenübergestellt betrachtet werden, wird zunächst ein Überblick über die Unterschiede der verkehrsstatistischen Messwerte der beiden Zeiträume gegeben. Die nachfolgende Tabelle enthält die Verkehrsmengen (Durchschnittswerte der Werktage Dienstag-Donnerstag) sowie die Geschwindigkeiten (V_{85} anhand der zur Verfügung stehenden MEDIAN-Werte der entlang der Seestrasse über den Knoten hinweg geradeausfahrenden Pkw) gemäss der automatisierten Videoauswertungen der eingesetzten Anwendung 2.

Tab. 44 *01_Kilchberg: Resultate der Messung im November 2020 und jener im Mai 2022 (Verkehrsstatistik, Werte gemittelt und gerundet)*

	Messung vom November 2020	**Messung vom Mai 2022**
Verkehrsmenge Werktags Di-Do (Knoten gesamt, inkl. Velos)	15'300 Fz in 24h	17'500 Fz in 24h
Verkehrsmengen Werktags Di-Do (Querschnitt Seestr. Nord, inkl. Velos)	14'900 Fz in 24h	16'800 Fz in 24h
Verkehrsmengen Werktags Di-Do (Querschnitt Seestr. Süd, inkl. Velos)	13'400 Fz in 24h	14'000 Fz in 24h
Verkehrsmengen Werktags Di-Do (Querschnitt Hornhaldenstr., inkl. Velos)	1'900 Fz in 24h	4'100 Fz in 24h
Veloverkehr Werktags Di-Do (Knoten gesamt)	500 Velo in 24hs	1’000 Velos in 24h
Querender Fussverkehr Werktags Di-Do (Knoten gesamt)	150 FG in 24h	200 FG in 24h
Geschwindigkeit V_{85} Werktags Di-Do (Durchfahrt Seestr. FR Nord)	61 km/h	36 km/h
Geschwindigkeit V_{85} Werktags Di-Do (Durchfahrt Seestr. FR Süd)	61 km/h	32 km/h

Gemäss der in der Tabelle aufgelisteten Messwerte wurden im Messzeitraum 2022 um ca. 15% höhere Verkehrsmengen im Knoten gemessen als im Messzeitraum 2020. Auffällig ist zudem die mehr als doppelt so hohe Verkehrsmenge im Querschnitt der vortrittsbelasteten Hornhaldenstrasse. Das insgesamt höhere Aufkommen sowie insbesondere die im Vergleich zur Erstanalyse höheren Verkehrsmengen der Hornhaldenstrasse sind vor allem auch in Bezug auf die Sicherheitsanalyse relevant, da aus den vermehrten Ein- und Abbiegemanövern im Messzeitraum 2022 auch verhältnismässig mehr Begegnungen resultieren müssten. Hinzu kommt, dass auch der Velo- und Fussverkehr ausgeprägter war als im Messzeitraum 2020. Die veränderten Verkehrsmengen sind aus Gründen der anderen Rahmenbedingung (insbesondere Pandemiesituation sowie Jahreszeit bzw. Witterung) nachvollziehbar.

Besonders bemerkenswert sind die Unterschiede im ermittelten Geschwindigkeitsniveau. Aufgrund des Umstandes, dass Angaben zu Geschwindigkeiten der im Videobild erfassten Objekte lediglich als MEDIAN-Werte vorliegen, wurden bewusst nur die entlang der vortrittsberechtigten Seestrasse geradeausfahrenden Fahrzeuge und dabei ausschliesslich Pkw berücksichtigt. Die ermittelten V_{85}-Werte lagen im Messzeitraum 2022 auf den betrachteten Relationen nur noch bei 32 km/h bzw. 36 km/h, wo im Messzeitraum 2020 noch V_{85}-Werte von 61 km/h ermittelt wurden. Dass die Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h auf 50 km/h zusammen mit den höheren Verkehrsmengen einen derart grossen Einfluss auf das tatsächliche Geschwindigkeitsniveau hat, erscheint unplausibel. Der zusätzliche Einfluss einer methodischen Komponente (z.B. durch die Kalibrierung bzw. Abgrenzung des Messbereichs) ist naheliegend und konnte auf Nachfrage auch seitens des Anbieters nicht ausgeschlossen werden. Unabhängig von der Frage, ob sich die Geschwindigkeiten nun tatsächlich in dem anhand der Messdaten ermittelten Umfang reduziert haben, sind die gemessenen Unterschiede im Geschwindigkeitsniveau auch in Bezug auf die Sicherheitsanalyse von grosser Relevanz und bei der Interpretation der sicherheitsbezogenen Resultate zu berücksichtigen.

Nachfolgend sind die Resultate der Messung vom Mai 2022 jenen vom November 2020 bezüglich Sicherheitsbeurteilung gegenübergestellt. Die Nachbearbeitung der Ergebnisse

erfolgte dabei nach demselben Vorgehen wie es in den Kapiteln 4.2.2 sowie 4.2.3 beschrieben ist.

Bereits im Messergebnis ohne Nachbearbeitung zeigen sich deutliche Unterschiede. Einerseits unterscheiden sich die Ergebnisse hinsichtlich der Anzahl detektierter Ereignisse, indem in der Messung 2022 etwa doppelt so viele Ereignisse pro Stunde als in der Messung 2020 ermittelt wurden, und andererseits auch hinsichtlich der Sicherheitsbeurteilung gemäss dem ermittelten Anteil der «kritischen Ereignissen» am jeweiligen Gesamtergebnis (CCR-S). Letzterem Zufolge bedeutet das, dass der Untersuchungsort anhand der Messung 2022 als wesentlich sicherer einzuschätzen wäre als auf Basis der Messung 2020. Die auf derselben Datengrundlage beruhenden nachbearbeiteten Resultate weisen Unterschiede in ähnlicher Ausprägung auf. Auch bei ausschliesslicher Betrachtung der als relevant eingestuften PET-Konflikttypen mit einem PET-Wert bis 5 Sekunden ergeben sich für den Messzeitraum 2022 im Schnitt doppelt so viele Detektionen als für den Zeitraum 2020 und die ermittelten Kenngrössen zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus lassen den Untersuchungsort auf Basis der Messung 2022 ebenfalls als wesentlich «sicherer» erscheinen als es anhand des Resultats der Messung 2020 der Fall ist.

Die höhere Anzahl detektierter sicherheitsrelevanter Ereignisse ist in direktem Zusammenhang mit den höheren Verkehrsmengen, insbesondere auch bezüglich der vermehrten Ein- und Abbiegemanöver zu sehen. Die Steigerung um rund 100% überrascht auf den ersten Blick. Es konnten aber im Rahmen der durchgeführten Resultatprüfung keine Hinweise auf relevante Unterschiede betreffend die Messung der PET-Werte zwischen den beiden Messzeiträumen gefunden werden, weshalb die Ergebnisse in diesem Punkt bezüglich der Qualität als gleichwertig einzuordnen sind.

Anders stellt sich die Beurteilung der Messergebnisse hinsichtlich der Sicherheitskenngrössen bzw. den dargestellten Sicherheitskurven dar. Wie bereits mehrfach erwähnt, führen höhere Geschwindigkeiten zu einem erhöhten Risiko, bei einer potenziellen Kollision verletzt zu werden, weshalb die Geschwindigkeit als wesentlicher Parameter in die Beurteilung der detektierten Begegnungen einfliesst. Folglich fällt die Sicherheitsbeurteilung bei einem tieferen Geschwindigkeitsniveau in der Regel besser aus als bei höheren Geschwindigkeiten. Aufgrund der Einschätzung, dass die Unterschiede in den Ergebnissen der Geschwindigkeitsmessung der beiden Messungen höchstwahrscheinlich zu einem gewissen Grad auch methodische Gründe haben, sind auch die ermittelten Sicherheitskenngrössen mit diesem «Fehler» behaftet.

Tab. 45 *01_Kilchberg: Resultate der Messungen vom November 2020 und vom Mai 2022 (Sicherheitsanalyse ohne Nachbearbeitung und nachbearbeitet)*

	Messung 2020 (72h)	**Messung 2022** (180h)
Messergebnis ohne Nachbearbeitung		
SRE* gesamt (PET bis 10s u. TTC bis 5s)	9’394	48’340
SRE* pro h (PET bis 10s u. TTC bis 5s)	130	269
CCR-S** (PET bis 10s u. TTC bis 5s)	2.59%	0.13%
Messergebnis, nachbearbeitet		
SRE* gesamt	3’691	18’448

Tab. 45 *01_Kilchberg: Resultate der Messungen vom November 2020 und vom Mai 2022 (Sicherheitsanalyse ohne Nachbearbeitung und nachbearbeitet)*

	Messung 2020 (72h)	**Messung 2022** (180h)
(PET bis 5s)		
SRE* pro h (PET bis 5s)	51	102
MEDIAN PET-Wert (PET bis 5s)	3.4	3.4
Anteil kB*** (PET bis 5s)	8.24%	0.27%
Ratio kB/üB**** (PET bis 5s)	0.090	0.027
Ri MEDIAN***** (PET bis 5s)	2.631	2.327

*SRE = Safety Related Events (sicherheitsrelevante Ereignisse),
**CCR-S = Critical Conflict Rate (Anteil kritischer Ereignisse gemäss «Schwedischer Konflikttechnik»)
***Anteil kB = Anteil kritische Begegnungen (Definition «kritische Begegnung» in Anlehnung an «Schwedische Konflikttechnik»)
****Ratio kB/üB = Verhältnis kritischere Begegnungen / übrige Begegnungen (Definition «kritische Begegnung» in Anlehnung an «Schwedische Konflikttechnik»)
****Ri MEDIAN = MEDIAN-Wert des Risikoindex (Risikoindex = Ln(Vmax/PET))

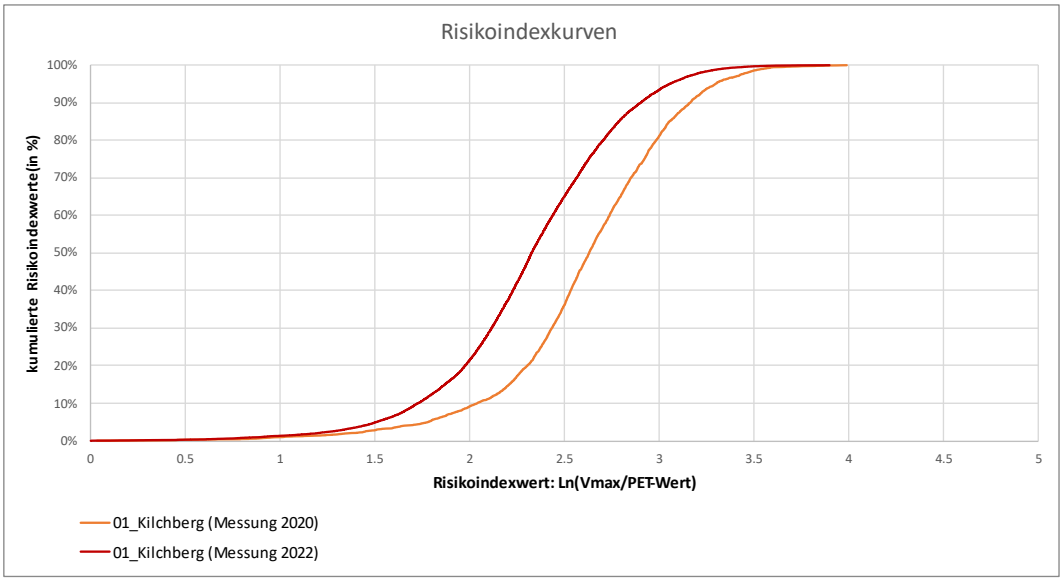


Abb.124 *«01_Kilchberg» – Risikoindexkurven der beiden Messungen 2020 und 2022 (PET ≤5s, Risikoindex = Ln(Vmax/PET))*

Werden ausschliesslich die ermittelten PET-Werte aller detektieren Ereignisse der relevanten Konflikttypen beider Messungen betrachtet, ergibt sich eine nahezu identische Verteilung auf die gebildeten Klassen. Dies zeigt, dass die Messung der PET-Werte in beiden Messzeiträumen stabile Ergebnisse brachte.

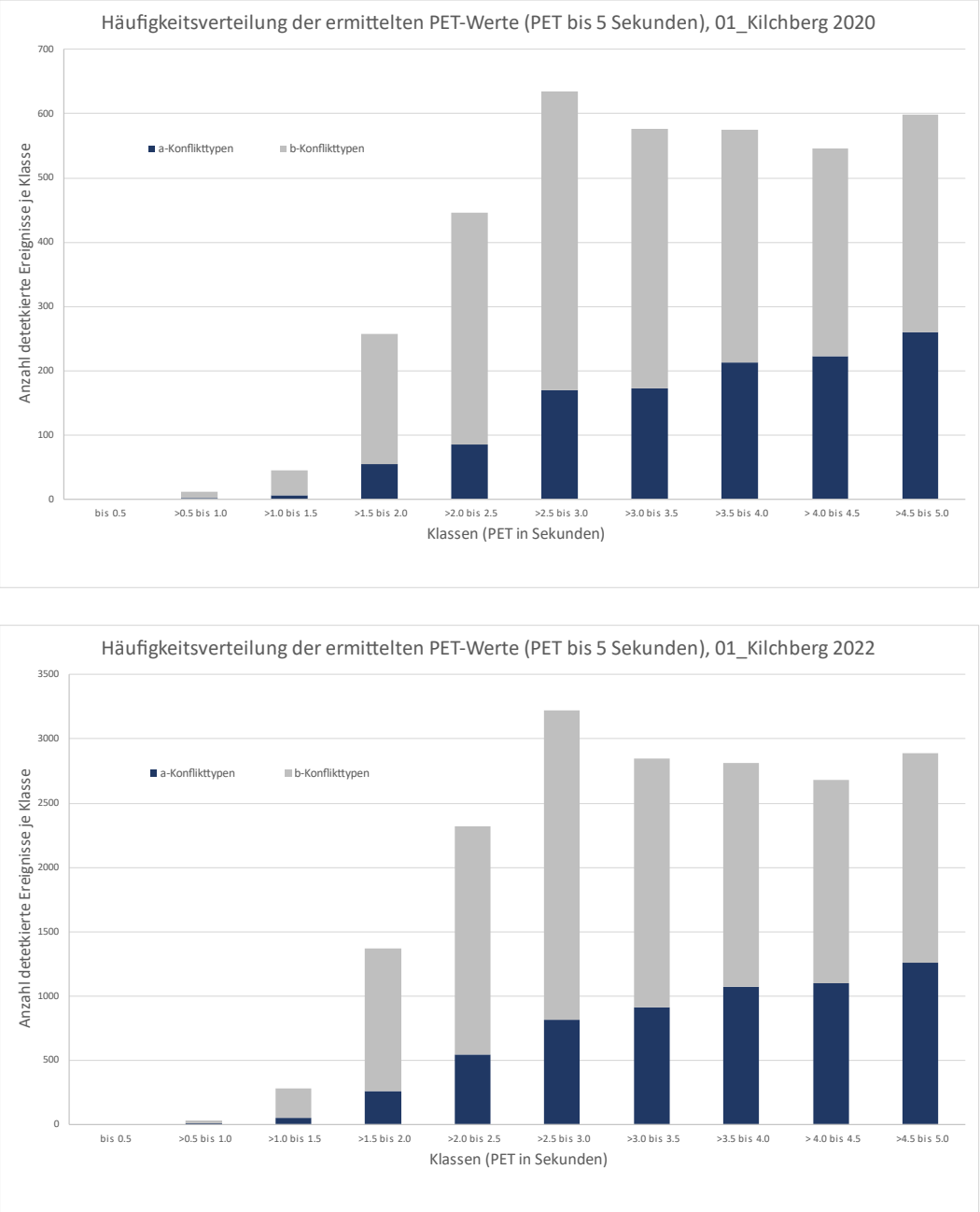


Abb.125 *«01_Kilchberg» – Häufigkeitsverteilungen nach PET-Klassen (relevante Konflikttypen, PET ≤5s), Messungen 2020 (oben) und Messung 2022 (unten)*

4.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse (alternative Methode / Begleituntersuchungen)

4.3.1 Vorbemerkung und Ergebnisse der manuellen Konfliktanalyse im Überblick

Aufgrund der methodischen Differenzen, auf die später noch eingegangen wird, ist eine direkte Validierung der Messergebnisse der alternativen Methode mit den Ergebnissen der manuellen Konfliktanalyse anhand der ausgewerteten Einzelereignisse nicht ratsam. Konkret bedeutet das, dass von vornherein erwartet werden konnte, dass die als «kritischer» eingestuften Begegnungen der alternativen Methode nicht in hohem Mass mit den Grad-2-Konflikten der manuellen Konfliktanalyse übereinstimmen, da die der jeweiligen Methode zugrundeliegenden Beurteilungskriterien erhebliche Unterschiede aufweisen. Hinsichtlich der Gesamtbewertung der Untersuchungsorte im Quervergleich durfte allerdings sehr wohl davon ausgegangen werden, dass beide Methoden zu ähnlichen Ergebnissen führen.

Methodische Differenzen zwischen der alternativen Methode und der manuellen Konfliktanalyse, welche gegen eine direkte Validierung anhand ausgewerteter Einzelereignisse sprechen:

- Konfliktunabhängiger Indikator <-> Konfliktabhängiger Indikator
  Der Indikator PET der alternativen Methode setzt als konfliktunabhängiger Indikator keinen Kollisionskurs sowie Anpassungshandlungen voraus. Voraussetzung sind allerdings transversale (also sich kreuzende) Trajektorien. Bei der manuellen Konfliktanalyse muss hingegen ein Kollisionskurs vorliegen und auch eine entsprechende Anpassungshandlung gilt als Grundbedingung, um Begegnungssituationen als Konflikte zu identifizieren.
- Unterschiede hinsichtlich der Beurteilungskriterien
  Als Beurteilungskriterium für kritischere und übrige Begegnungen werden bei der angewendeten alternativen Methode lediglich der gemessene PET-Wert (Zeit) sowie die Geschwindigkeit des jeweils schnelleren beteiligten Verkehrsteilenehmenden herangezogen. Die Beurteilung, ob eine Begegnung konflikthaft ist sowie der Grad der Konfliktschwere werden bei der manuellen Konfliktanalyse anhand der Einschätzung von Zeit, Distanz sowie der Intensität und Komplexität einer gesetzten Anpassungshandlung vorgenommen. Die Geschwindigkeit ist nur indirekt in den vier Beurteilungsfaktoren enthalten.
- Konkreter Messzeitpunkt/-ort <-> Betrachtung eines Zeitraums/Bereichs
  Bei der alternativen Methode erfolgt die Messung des Indikatorwertes zusammen mit der Geschwindigkeitsmessung zu einem konkreten Messzeitpunkt am Ort der Trajektorienkreuzung. In der manuelle Konfliktanalyse wird hingegen jeweils der gesamte Ablauf einer Begegnung über den entsprechenden Zeitraum und örtlichen Bereich hinweg betrachtet.
- Messung (mit Ungenauigkeiten und Fehlern) <-> möglichst objektivierte subjektive Einschätzung, die ebenfalls nicht über alle Zweifel erhaben ist.
  Die alternative Methode beruht auf Messungen, die zwar gemäss Definition Begegnungen objektiv detektieren vermag, z.T. aber methodisch bedingte Ungenauigkeiten und auch Fehlmessungen beinhalten können. Demgegenüber steht eine möglichst objektivierte aber immer noch subjektive Einschätzung von Kriterien zur Identifizierung von Begegnungen und Konflikten, wobei es passieren kann, dass Situationen übersehen werden oder Beurteilungskriterien je Untersuchungsort respektive mit Fortdauer der Analyse unterschiedlich eingeschätzt werden.

Zur Beschreibung des Sicherheitsniveaus wurde für jeden Untersuchungsort die statistische «Chance» berechnet, im Falle einer Begegnung einen Konflikt (ab Grad 2) zu haben. Dazu wurde die Anzahl ermittelter Konflikte (ab Grad 2) durch die Anzahl der übrigen Begegnungen (konfliktfreie Begegnungen und Grad-1-Konflikte) geteilt. Grad-1-Konflikte wurden bewusst zusammen mit den konfliktfreien Begegnungen als Expositionsgrösse herangezogen, da bei den Grad-1-Konflikten gewisse Unsicherheiten über die verschiedenen Untersuchungsorte (insbesondere hinsichtlich Ausweichhandlungen) sowie die jeweils beurteilenden Personen (subjektiv geprägte Interpretation der Kriterien) festgestellt wurden. Grad-2-Konflikte erwiesen sich hingegen als stabilerer Indikator über alle Untersuchungsorte hinweg.

Die nachfolgende Tabelle enthält das Resultat der manuellen Konfliktanalyse hinsichtlich der Konfliktchance im Quervergleich.

***Tab. 46** Resultate der manuellen Konfliktanalyse im Quervergleich*

Rang	**Untersuchungsort**	**Begegnungen gesamt**	**Konflikte** (ab Grad 2)	**Konfliktchance** (ab Grad 2)
1	03_Dietikon*	76	7	0.1015
2	06_Sursee_Schlottermilch	13’254	125	0.0095
3	04_Staechenrain	1’213	11	0.0092
4	09_Luzern_Wesemlinstrasse	3’938	29	0.0074
5	08_Luzern_Freigleis	1’997	13	0.0065
6	02_Bachenbülach	4’273	12	0.0028
7	07_Luzern_Waldegg	3’033	5	0.0017
8	01_Kilchberg	2’481	3	0.0012

*gesamte 72 Aufnahmestunden ausgewertet

Mit Blick auf die Ergebnisse der manuellen Konfliktanalyse lässt sich folgern, dass am Untersuchungsort «03_Dietikon» eine im Vergleich zum zweiplatzierten Ort «06_Surseee_Schlottermilch» 10-fach höhere Chance eines Konflikts ab Stufe 2 existiert. Ähnlich grosse Unterschiede zum nächstfolgenden Rangplatz finden sich an den übrigen Orten zwar nicht, dennoch sind die Unterschiede zwischen den relativ «sichersten» Orten (Ränge 6-8 gemäss *Tab. 46*) gegenüber den relativ «unsichersten» Orten (Ränge 1-3 gemäss *Tab. 46*) mit Faktor 21 sehr deutlich. Liesse man «03_Dietikon» aufgrund der geringen Anzahl detektierter Begegnungen und der möglicherweise damit verbundenen hohen Zahl an Konflikten ausser Acht, läge das Verhältnis immer noch bei Faktor 4.9.

Selbst wenn absolute und objektivierte Kriterien zur Beurteilung der Sicherheit der einzelnen Orte fehlen – das heisst, dass keine Aussage über die absolute Gefährlichkeit möglich ist – konnte die manuelle Konfliktanalyse die verschiedenen Orte voneinander differenzieren und zumindest im Quervergleich sicherheitsrelevante Aspekte quantifizieren.

4.3.2 Ergebnisse der Begleitbefragungen

Um festzustellen, wie Personen aus der Umgebung der jeweiligen Orte die Gefährlichkeit einschätzen und als weiterer Indikator für die Definition der objektivierten Sicherheit wurden an einem Teil der Orte Begleitbefragungen durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst sind.

Stichprobe

Insgesamt wurden an den vier Untersuchungsorten 332 Personen befragt, die sich wie folgt verteilen:

- 06_Sursee_Schlottermilch: n=22
- 07_Luzern_Waldegg: n=39
- 08_Luzern_Freigleis: n=158
- 09_Luzern_Wesemlinstrasse: n=113

Mit 91%-97% wurden mit Abstand am häufigsten Zufussgehende befragt. Bei den verbleibenden 3%-9% je Standort handelte es sich um Velofahrende, am Ort «08_Luzern_Freigleis» wurden weniger als 1% Autofahrende befragt. Das Geschlechterverhältnis ist mit 50/50 bei «06_Sursee_Schlottermilch» bis 60/40 bei «08_Luzern_Freigleis» mit einem leichten Mehr an Frauen relativ ausgeglichen. Mit durchschnittlich 43.9 Jahren stellte «06_Sursee_Schlottermilch» die jüngste und «07_Luzern_Waldegg» mit 57.2 Jahren die älteste Teilstichprobe ($p = 0.04$). Das damit zusammenhängende $Eta^2 = 0.03$ entspricht einem kleinen Effekt. Die selbstberichtete Exposition (Häufigkeit mit der sich die Befragten im konkreten Verkehrsbereich bewegen) liegt über alle Teilstichroben hinweg zwischen 4.10 («07_Luzern_Waldegg») und 4.82 («06_Sursee_Schlottermilch»), was keinem signifikanten Effekt entspricht ($p = 0.31$). Mit einem Anteil von 73%-84%, besassen die meisten Befragten einen gültigen Fahrausweis. Bei «06_Sursee_Schlottermilch» gaben 5% und bei «08_Luzern_Freigleis» 1% der Befragten an, einen Lehrfahrausweis zu besitzen.

Statistische Analyse

Für die statistische Analyse wurden für die vier verkehrspsychologischen Konstrukte je eine ANOVA berechnet, um die nach Angaben der Befragten subjektiv gefährlichsten Orte zu identifizieren. Um die Interpretierbarkeit der Skalen zu gewährleisten, mussten die Fragen zur Unfallvermeidbarkeit vor der weiteren Analyse gedreht werden. Dass bedeutet, dass neu 1 «vollständig vermeidbar» und 6 «überhaupt nicht vermeidbar» bedeutet. Dieser Schritt führte dazu, dass nun alle Skalen gleich ausgerichtet sind und somit hohe Werte auf allen Skalen eine hohe Gefährlichkeitseinschätzung bedeuten (vgl. [14]).

Ergebnisse

Mit einem Mittelwert von 4.23 auf der Skala von 1 bis 6 wurde die generelle Unfallwahrscheinlichkeit bei «06_Sursee_Schlottermilch» signifikant am höchsten ($p = 0.01$, $Eta^2 = 0.03$, kleiner Effekt) und bei «07_Luzern_Waldegg» mit einem Mittelwert von 3.05 am geringsten eingeschätzt. Die Orte «08_Luzern_Freigleis» und «09_Luzern_Wesemlinstrasse» liegen mit 3.63 und 3.56 dazwischen. Hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit eigener Unfälle gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen allen Orten ($p = 0.23$). Mit Werten zwischen 1.90 («07_Luzern_Waldegg») und 2.50 («06_Sursee_Schlottermilch») liegen die Mittelwerte bei allen vier Orten jedoch deutlich tiefer als die Einschätzung der generellen Unfallwahrscheinlichkeit, was die – häufig vorkommende – Vermutung einer Selbstüberschätzung stützt.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Orten sind hinsichtlich der eingeschätzten Schadenshöhe ($p = 0.77$), der Vermeidbarkeit von Unfällen ($p = 0.14$) und der Unfallerfahrung ($p = 0.08$) nicht signifikant.

Betrachtet man die vier Elemente der psychometrischen Risikowahrnehmung gemeinsam – also die Einschätzung der (eigenen) Unfallwahrscheinlichkeit, Schadenshöhe und Vermeidbarkeit –, so sind knapp keine signifikanten Unterschiede (p=.091) bei einem kleinen Effekt ($Eta^2 = 0.02$) zu identifizieren. Dieses Ergebnis ist wenig überraschend, da von den vier integrierten Variablen nur eine in der Einzelbetrachtung signifikante Ergebnisse brachte.

Auf Basis der Befragungen ist zusammenfassend somit festzustellen, dass «06_Sursee_Schlottermilch» eine exponierte Position im Vergleich zu den anderen Orten dahingehend erhält, dass dort die generelle Unfallwahrscheinlichkeit am höchsten eingeschätzt wird. Im Gegensatz dazu schätzten die Befragten für «07_Luzern_Waldegg» eine deutlich geringere Wahrscheinlichkeit genereller Unfälle ein.

Die Resultate der manuellen Konfliktanalyse stützen vom Grundsatz her das Befragungsergebnis der hohen (wahrgenommenen) Unfallhäufigkeit am Ort «06_Sursee_Schlottermilch» im Vergleich zu «07_Luzern_Waldegg», der wiederum eher als wenig gefährlich wahrgenommen wird und auf Basis der manuellen Konfliktanalyse tatsächlich auch sicherer zu sein scheint.

Ein detaillierter Vergleich ist nicht möglich, da Befragungen nicht an allen Orten durchgeführt werden konnten. Im Nachhinein betrachtet, wären insbesondere für «03_Dietikon» Befragungsergebnisse zur Prüfung der hohen Konfliktchance von Interesse gewesen. Darüber hinaus lassen die nicht vorhandenen signifikanten Differenzen zwischen «08_Luzern_Freigleis» und «09_Luzern_Wesemlinstrasse» keinen eindeutigen Vergleich zur manuellen Konfliktanalyse zu – trotz der Tatsache, dass beide Orte auch dort nah beieinander liegen.

Aus diesem Grund bleibt abschliessend festzuhalten, dass obwohl die Befragung die wesentlichen Feststellungen der manuellen Konfliktanalyse bestätigt, sie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt wird, da eine Gegenüberstellung aller acht Orte nicht möglich ist. Für die Zukunft allerdings bieten sich Befragungen weiterhin an, da hiermit Befunde weiterer Methoden validiert und darüber hinaus Einblicke in die Risikowahrnehmung als mögliche Ursache von Fehlverhaltensweisen gewonnen werden können.

4.3.3 Gegenüberstellung der Resultate

In der nachfolgenden Tabelle sind die Rangfolgen der Untersuchungsorte bezogen auf die ermittelten Konfliktchance der manuellen Konfliktanalyse sowie die ermittelten Rangfolgen der automatisierten Sicherheitsanalysen einander gegenübergestellt. Offensichtlich weicht das Ergebnis der manuellen Konfliktanalyse in Bezug auf die Rangfolge erheblich vom Ergebnis der automatisierten Sicherheitsanalyse ab. Der Untersuchungsort «03_Dietikon», der im Quervergleich der Resultate der automatisierten Analyse als Ort mit dem geringsten Sicherheitsrisiko gilt, ist der Ort mit der höchsten Konfliktchance gemäss manueller Konfliktanalyse. Auch «06_Sursee_Schlottermilch», ein Ort, welcher im Ergebnis der automatisierten Analyse im Mittelfeld landete, weist eine hohe Konfliktchance auf und nimmt Rang 2 in der Reihung nach dem Resultat der manuellen Analyse ein. Konträr dazu gelten die beiden Einmündung «01_Kilchberg» und «02_Bachenbülach», denen gemäss automatisierter Analyse ein im Quervergleich höheres Sicherheitsrisiko attestiert wird, in Bezug auf die Konfliktchance der manuellen Analyse als vergleichsweise «sicher».

Tab. 47 *Rangfolgen der manuellen Konfliktanalyse (Konfliktchance ab Grad 2) im Vergleich zu Rangfolgen der automatisierten Sicherheitsanalyse (kB/üB bzw. Risikoindex)*

Untersuchungsort	***im Quervergleich ermittelte Ränge gemäss:***		
	Konfliktchance ab Grad 2*	**Ratio kB/üB****	**Risikoindex MEDIAN******
01_Kilchberg	8	3	2
02_Bachenbülach	6	2	3
03_Dietikon	1	8	8
04_Staechenrain	3	1	1
06_Sursee_Schlottermilch	2	6	4
07_Luzern_Waldegg	7	7	7
08_Luzern_Freigleis	5	4	5
09_Luzern_Wesemlinstrasse	4	5	6

*Konfliktchance ab Grad 2 = Verhältnis Grad-2-Konflikte / übrige Begegnungen (inkl. Grad-1-Konflikte)
**Ratio kB/üB = Verhältnis kritischere Begegnungen / übrige Begegnungen (Definition «kritische Begegnung» in Anlehnung an «Schwedische Konflikttechnik»)
***Ri MEDIAN = MEDIAN-Wert des Risikoindex (Risikoindex = Ln(Vmax)/Ln(PET))

Dass die Resultate der beiden Methoden derart voneinander abweichen, wurde in dieser Form nicht erwartet. Daraus den Rückschluss zu ziehen, dass die getestete alternative Methode keine brauchbaren Ergebnisse liefern würde, wäre aber zu kurz gegriffen, da einerseits die methodischen Unterschiede womöglich einen grossen Einfluss haben und zudem auch die manuelle Konfliktanalyse in der angewendeten Methodik Schwächen und Limitationen aufweist, welche je nach Untersuchungsort z.T. relevante Auswirkungen auf die Ergebnisse haben können.

Bei genauerer Betrachtung der Methodik sowie der ausgewerteten Begegnungs- und Konfliktsituationen der manuellen Konfliktanalyse lassen sich über die grundsätzlichen methodischen Unterschiede zur automatisierten Sicherheitsanalyse hinaus, folgende wesentliche Erklärungen, für die in Bezug auf die Sicherheitsbeurteilung festgestellten Abweichungen finden.

- Unterschiedliche Expositionsgrössen innerhalb der manuellen Konfliktanalyse

  Die der manuellen Konfliktanalyse je Untersuchungsort angewendeten Auswerteregeln führen dazu, dass sich die Expositionsgrössen je Untersuchungsort unterscheiden. Beispielsweise werden an einer vortrittsbelasteten Einmündung im Zuge des Wartens eines Fahrzeuges auf eine Lücke im vortrittsberechtigten Verkehrsstrom mehrere in der Regel konfliktfreie Begegnungen erfasst, bis das wartende Fahrzeug ein- bzw. abbiegt. Die Untersuchungsorte «01_Kilchberg» und «02_Bachenbülach», wo bedingt durch die Verkehrsmengen beim Ein- bzw. Abbiegen häufiger gewartet werden muss, sind Beispiele mit einer dementsprechend höheren Anzahl erfasster Begegnungen (grössere Expositionsgrösse), was die Konfliktchance entsprechend verringert. Ganz anders stellt sich die Situation am Beispiel «03_Dietikon» dar, wo sich die Auswertung ausschliesslich auf Begegnungen in Zusammenhang mit Spurwechselmanövern bezieht, wobei das nacheinander Einspuren von Motorfahrzeugen, welche vom selben Knotenast innerhalb einer Lichtsignalphase kommend unterwegs sind, nicht als Begegnung erfasst wurde. Folglich ergibt sich eine kleinere Expositionsgrösse, was die ermittelte Konfliktchance erhöht.

- Einschätzung von Geschwindigkeit und Distanz
  Die für die Bewertung von Begegnungssituationen im Zuge der manuellen Konfliktanalyse nötige Einschätzung von Geschwindigkeit und Distanz anhand eines Videobildes stellt grundsätzlich eine Herausforderung dar. Perspektive und Ort im Videobild einer auszuwertenden Begegnungs- bzw. Konfliktsituation können die Einschätzung zusätzlich erschweren. Dies kann dazu führen, dass insbesondere der Faktor Geschwindigkeit unzureichend in die Gesamtbewertung der Konflikte einfliesst. Die Konsequenz daraus ist, dass Konflikten bei niedrigeren Geschwindigkeiten womöglich eher ein höherer Schweregrad zugewiesen wird, da bei niedrigeren Geschwindigkeiten auch die Distanzen und die Zeit bis zur Kollision in der Regel kürzer sind. Hinzu kommt, dass auch Geschwindigkeitsveränderungen als Anpassungshandlungen im Videobild zum Teil schwer erkennbar sind, wobei die Erkennbarkeit und Einschätzung bei höheren Geschwindigkeiten tendenziell schwieriger ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die manuelle Konfliktanalyse und die automatisierte Sicherheitsanalyse zu unterschiedlichen Resultaten geführt haben. Aufgrund der methodischen Unterschiede sowie der Schwächen und Limitationen beider Methoden, lässt sich aus der Gegenüberstellung kaum eine Aussage dahingehend ableiten, inwieweit die getestete alternative Methode zu einer validen Beurteilung des Sicherheitsniveaus führt. Gleiches gilt dementsprechend (in der angewendeten Methodik) aber auch für die manuelle Konfliktanalyse.

4.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse (alternative Methode / Unfallgeschehen)

4.4.1 Vorbemerkung und Ergebnisse der Analysen des Unfallgeschehens im Überblick

Eingangs ist festzuhalten, dass das tatsächliche Unfallgeschehen respektive die Unfalldaten nur sehr eingeschränkt für die Validierung der Messresultate der alternativen Methode geeignet sind, da Unfälle an sich seltene Ereignisse darstellen. Hinzu kommt, dass zwangsläufig Daten aus unterschiedlichen Betrachtungszeiträume gegenübergestellt werden müssen. Bezüglich Unfalldaten werden die Ereignisse mehrerer Jahre herangezogen, die Messresultate der alternativen Methoden basieren hingegen auf Videoaufnahmen von wenigen Tagen (innerhalb einer konkreten Erhebungswoche). Dennoch kann - unter der Annahme, dass die alternative Methode als Instrument für die Messung von Verkehrssicherheit geeignet ist - davon ausgegangen werden, dass sich gewisse Ausprägungen des tatsächlichen Unfallgeschehens auch in den Messergebnissen der alternativen Methode zeigen müssten. Um diese Ausprägungen zu identifizieren, wurden die Unfalldaten der einzelnen Untersuchungsorte der vergangenen fünf Jahre (2017-2021) einer Analyse bezüglich Unfallschwerpunktbestimmung, Unfallkenngrössen, sowie hinsichtlich Häufungen von Unfalltypen unterzogen. Der Untersuchungsort «03_Dietikon» wurde dabei nicht berücksichtigt, da die Anlage zum Zeitpunkt der Analyse noch keine fünf Jahre in Betrieb war.

Unfallschwerpunktbestimmung

Unter Anwendung der Berechnungsmethode gemäss SN 641724 [9] wurde jeweils ermittelt, ob der Untersuchungsort auf Basis der Unfalldaten des Zeitraums 01.01.2017 bis 31.12.2021 als Unfallschwerpunkt gilt. Bei der Identifizierung wurden die 3-Jahres-Zeiträume (gleitend) herangezogen (2017-2019, 2018-2020 sowie 2019-2021). Das nachfolgend dargestellte Resultat zeigt, dass von den sieben analysierten Orten zuletzt vier als Unfallschwerpunkte zu identifizieren waren. «01_Kilchberg» und «07_Luzern_Waldegg» gelten jeweils bezogen auf die beiden früheren 3-Jahres-Perioden als Unfallschwerpunkt, nicht aber bezogen auf die Periode 2019-2021. «04_Staechenrain» und «09_Luzern_Wesemlinstrasse» gelten hingegen bezogen auf alle drei Perioden als Unfallschwerpunkte. Bezüglich dem Untersuchungsort «09_Wesemlinstrasse» ist darauf hinzuweisen, dass sich ein Grossteil der Unfälle im Jahr 2019 ereignete.

***Tab. 48** Unfallschwerpunktbestimmung*

Untersuchungsort	Berechnungswert (3 Jahre, gleitend)	Lage	Such-perimeter	Grenzwert
01_Kilchberg	5 (2017-2019) 6 (2018-2020) 3 (2019-2021)	innerorts	50m	5
02_Bachenbülach	3 (2017-2019) 1 (2018-2020) 1 (2019-2021)	innerorts	50m	5
04_Staechenrain	5 (2017-2019) 11 (2018-2020) 8 (2019-2021)	ausserorts	150m	5
06_Sursee_Schlottermilch	2 (2017-2019) 2 (2018-2020) 2 (2019-2021)	innerorts	50m	5
07_Luzern_Waldegg	11 (2017-2019) 8 (2018-2020) 3 (2019-2021)	innerorts	50m	5
08_Luzern_Freigleis	1 (2017-2019) 0 (2018-2020) 4 (2019-2021)	innerorts	50m	5
09_Luzern_Wesemlinstrasse	7 (2017-2019) 8 (2018-2020) 6 (2019-2021)	innerorts	50m	5

Unfallkenngrössen Unfallziffer und Verletztenziffer

Die Ermittlung der Unfallkenngrössen erfolgte gemäss VSS-41824 [6]. Aus dieser Quelle stammen auch die in den nachfolgenden Tabellen dargestellten Vergleichswerte, welche sich jeweils als schweizweite Durchschnittswerte des jeweiligen Knotentyps verstehen. Berechnungsgrundlagen bildeten die registrierten Unfälle/Verletzte im Zeitraum vom 01.01.2017 bis 31.12.2021 sowie die als Nebenprodukt der automatisierten Auswertungen ermittelten Knotenzähldaten. Die nachfolgende Tabelle enthält die ermittelten Kenngrössen mit den entsprechenden Vergleichswerten.

***Tab. 49** Unfallkenngrössen*

Untersuchungsort	**Unfall-ziffer***	**Vergleichs-wert Uz*****	**Verletzten-ziffer ****	**Vergleichs-wert Vz*****
01_Kilchberg	0.57	1.46	24.97	81.93
02_Bachenbülach	0.49	1.46	17.79	81.93
04_Staechenrain	0.67	1.54	50.16	86.26
06_Sursee_Schlottermilch	0.25	1.52	4.48	58.60
07_Luzern_Waldegg	0.39	0.74	36.74	24.54
08_Luzern_Freigleis	0.18	1.54	23.06	86.26
09_Luzern_Wesemlinstrasse	0.24	1.54	22.69	86.26

*Unfallziffer (Uz) = Unfälle pro 10^6 Fahrzeuge
**Verletztenziffer (Vz) = Verletzte pro 10^8 Fahrzeuge
***Vergleichswerte gemäss VSS 41824

Der Untersuchungsort «04_Staechenrain» weist mit 0.67 die höchste Unfallziffer aller untersuchten Orte auf. Es folgen «01_Kilchberg» und «02_Bachenbülach» mit Werten von 0.57 bzw. 0.49 sowie «07_Luzern_Waldegg» mit 0.39. Die Orte mit tieferen Unfallziffern liegen bezogen auf diesen Wert nahe beisammen.

Bei der Verletztenziffer, ist ebenfalls «04_Staechenrain» jener Ort mit dem insgesamt höchsten Wert. Der zweithöchste Wert wurde bei dieser Kennzahl für «07_Luzern_Waldegg» ermittelt. Die nachfolgenden Orte «01_Kilchberg», «08_Luzern_Freigleis» und «09_Luzern_Wesemlinstrasse» liegen sehr nahe beisammen. «02_Bachenbülach» nimmt mit einer vergleichsweise tiefen Verletztenziffer die sechste Stelle ein. Besonders tief ist die Verletztenziffer von «06_Sursee_Schlottermilch».

Hinsichtlich der Vergleichswerte ist festzustellen, dass alle Untersuchungsorte unterdurchschnittliche Unfallziffern aufweisen und somit bezogen auf diese Kennzahl als vergleichsweise sicher zu beurteilen wären. Ähnliches gilt auch in Bezug auf die Verletztenziffer, wobei mit «07_Luzern_Waldegg» ein Untersuchungsort eine überdurchschnittliche Verletztenziffer aufweist. Die ermittelte Verletztenziffer von «04_Staechenrain» liegt etwas unterhalb des Durchschnittswertes. Alle anderen Orte weisen deutlich unterdurchschnittliche Werte auf, die bezogen auf diese Kennzahl somit ebenfalls als relativ sicher einzustufen wären.

4.4.2 Gegenüberstellung der Resultate

Bei der Gegenüberstellung der Resultate ist darauf zu achten, dass möglichst vergleichbare Grössen herangezogen werden. Ob ein Ort als Unfallschwerpunkt gilt, wird ausschliesslich anhand der absoluten Anzahl der bei Unfällen mit Personenschaden verletzten bzw. getöteten Personen und einer entsprechenden Gewichtung über die Schwerekategorien ermittelt. Eine Relativierung über das Verkehrsaufkommen ist dabei gemäss SN 641724 [9] nicht vorgesehen. Vor diesem Hintergrund ist eine Gegenüberstellung zu den relativierten Grössen der alternativen Methode (kB/üB und Risikoindex) wenig geeignet. Nachfolgend ist deshalb der Berechnungswert der Unfallschwerpunktermittlung der absoluten Zahl der ermittelten «kritischeren» Begegnungen gegenübergestellt.

Tab. 50 *Berechnungswerte gemäss Unfallschwerpunktermittlung und absolute Anzahl der mittels alternativer Methode ermittelten «kritischeren» Begegnungen*

Untersuchungsort	Berechnungswerte USP	Anzahl «kritischere» Begegnungen (in 72h)
01_Kilchberg	5 / 6 / 3	304
02_Bachenbülach	3 / 1 / 1	1’105
04_Staechenrain	5 / 11 / 8	66
06_Sursee_Schlottermilch	2 / 2 / 2	508
07_Luzern_Waldegg	11 / 8/ 3	128
08_Luzern_Freigleis	1 / 0 / 4	184
09_Luzern_Wesemlinstrasse	7 / 8 / 6	75

Die vier Untersuchungsorte, welche in den drei Betrachtungsperioden mindestens einmal als Unfallschwerpunkte in Erscheinung getreten sind, weisen hinsichtlich der mittels der alternativen Methode ermittelten absoluten Anzahl «kritischere» Begegnungen (in 72h) im Quervergleich der Untersuchungsorte Werte im mittleren bis tiefen Bereich auf. Daraus Rückschlüsse auf die Validität der Messresultate zu ziehen, ist insbesondere auch bedingt durch die «statistische Schwäche» der Unfalldaten nicht möglich.

Die Unfallkennzahlen, welche über das Verkehrsaufkommen relativiert werden, sind hingegen für eine Gegenüberstellung zu den über die ebenfalls relativierten Grössen der alternativen Methoden (kB/üB und Risikoindex) erzielten Resultate grundsätzlich besser geeignet.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Rangfolgen der Untersuchungsorte bezogen auf die ermittelten Unfallkennzahlen sowie die ermittelten Rangfolgen der automatisierten Sicherheitsanalysen enthalten. Es zeigt sich, dass die ersten drei Positionen nach Unfallziffer in der gleichen Reihenfolge von jenen Untersuchungsorten belegt, die auch in der Rangfolge des anhand des Sicherheitsindikators PET (bis 5 Sekunden) und der Geschwindigkeit errechnete Risikoindex diese Positionen einnehmen. Die vierte Stelle nimmt «07_Luzern_Waldegg» ein.

Bezogen auf die Rangfolge nach Verletztenziffer, ist ebenfalls «04_Staechenrain» jener Ort mit dem insgesamt höchsten Wert. Die zweite Position wird bei dieser Kennzahl von «07_Luzern_Waldegg» eingenommen und an dritter Stelle liegt «01_Kilchberg», dicht gefolgt von «08_Luzern_Freigleis» und «09_Luzern_Wesemlinstrasse». «02_Bachenbülach» nimmt mit einer vergleichsweise tiefen Verletztenziffer nur die sechste Stelle ein.

Tab. 51 *Rangfolgen Kenngrössen Unfall- bzw. Verletztenziffer im Vergleich zu Rangfolgen der automatisierten Sicherheitsanalyse (kB/üB bzw. Risikoindex)*

Untersuchungsort	***im Quervergleich ermittelte Ränge gemäss:***			
	Unfall-ziffer*	**Verletzten-ziffer ****	**Ratio kB/üB*****	**Risikoindex MEDIAN********
01_Kilchberg	2	3	3	2
02_Bachenbülach	3	6	2	3
04_Staechenrain	1	1	1	1
06_Sursee_Schlottermilch	5	7	6	4
07_Luzern_Waldegg	4	2	7	7
08_Luzern_Freigleis	7	4	4	5
09_Luzern_Wesemlinstrasse	6	5	5	6

*Unfallziffer (Uz) = Unfälle pro 10^6 Fahrzeuge
**Verletztenziffer (Vz) = Verletzte pro 10^8 Fahrzeuge
***Ratio kB/üB = Verhältnis kritischere Begegnungen / übrige Begegnungen
(Definition «kritische Begegnung» in Anlehnung an «Schwedische Konflikttechnik»)
****Ri MEDIAN = MEDIAN-Wert des Risikoindex (Risikoindex = Ln(Vmax)/Ln(PET))

Obwohl die ermittelten Unfallkennzahlen insbesondere aufgrund der statistisch betrachtet geringen Anzahl Unfallereignisse nur sehr eingeschränkt für die Validierung der Messresultate der alternativen Methode geeignet sind, zeigt sich, dass jene Orte mit einem ausgeprägteren Unfallgeschehen (zumindest bezogen auf die Unfallziffer) auch im Resultat der alternativen Methode vergleichsweise «schlechter» abschneiden. Eine Ausnahme bildet allerdings der Untersuchungsort «07_Luzern_Waldegg», der bei beiden Kennzahlen (Unfallziffer und Verletztenziffer) im Vergleich zu anderen Untersuchungsorten eher höhere Werte aufweist, hingegen im Gesamtresultat der alternativen Methode deutlich «besser» klassiert ist. Der Untersuchungsort «07_Luzern_Waldegg» wurde in der Folge einer detaillierteren Betrachtung unterzogen, da an diesem Ort ein bestimmter Unfalltyp massgebend ist. Als weiterer Untersuchungsort für eine detailliertere Betrachtung wurde «01_Kilchberg» herangezogen, an dem ebenfalls bestimmte Unfalltypen ausgeprägter auftreten.

4.4.3 Detailbetrachtung Unfalltypen «01_Kilchberg»

Anhand der Detailbetrachtung am Beispiel «01_Kilchberg» wurde überprüft, ob sich Besonderheiten im Unfallgeschehen (häufig auftretende Unfalltypen) auch in den Messresultaten der alternativen Methoden wiederfinden lassen.

Aus den Unfalldaten der Jahre 2017 bis 2021 geht hervor, dass acht der zwölf Unfälle, welche sich im unmittelbaren Knotenbereich ereigneten, zwei konkreten Unfalltypen zugeordnet werden können. Dabei handelt es sich um vier Unfälle des Typs 30 «Kollision beim Abbiegen mit Gegenverkehr» (alle mit leichter Verletzungsfolge) sowie um vier Unfälle des Typs 40 «Kollision beim Linkseinbiegen mit von links kommendem Fahrzeug» (davon ein Unfall mit schwerer Verletzungsfolge und drei Sachschadensunfälle).

Abb.126 *Detailbetrachtung «01_Kilchberg»: Konflikttyp 30 (l.) u. Konflikttyp 40 (r.)*

Unter der Annahme, dass diese Unfälle am untersuchten Ort einer gewissen Systematik unterliegen, müssten demzufolge auch die Messungen mittels automatisierter Videoanalyse eine gewisse Ausprägung bei den korrespondierenden Konflikttypen aufweisen. Werden nun die beiden ausgewerteten Konflikttypen 30 und 40 hinsichtlich der detektieren sicherheitsrelevanten Ereignisse bzw. der ermittelten Werte «Ratio kB/üB» sowie «Risikoindex» gesondert betrachtet, zeigt sich folgendes Bild:

- Insgesamt wurden im ersten Messzeitraum 209 Begegnungen (PET bis 5s) in 72h detektiert. Begegnungen dieses Typs sind somit eher selten.
- Konflikttyp 30 weist mit einem Ratio kB/üB (PET bis 5s) von ca. 0.22 einen im Vergleich zu allen anderen Konflikttypen des Untersuchungsortes deutlich höheren Wert auf. Nur Typ 41 (entspricht dem Unfalltyp 41 «Kollision beim Rechtseinbiegen mit von links kommendem Fahrzeug») folgt mit einem Wert von 0.18 knapp dahinter, wobei für diesen Konflikttyp die von der Anwendung ermittelten Fahrgeschwindigkeiten, welche das Resultat entsprechend beeinflussen, systematisch zu hoch gemessen wurden. Für alle übrigen ausgewerteten PET-Konflikttypen für Begegnungen von zwei Fahrzeugen wurden Werte unter 0.10 ermittelt.
- Der für Konflikttyp 30 ermittelte Risikoindexwert beträgt 2.72. Einen höheren Wert weist mit 2.91 lediglich der Typ 41 auf, der allerdings bedingt durch die systematisch zu hohe Geschwindigkeitsmessung als zu hoch einzuschätzen ist.
- Begegnungen des Typs 40 sind im Vergleich zu anderen Konflikttypen vergleichsweise häufig. Die insgesamt 1'147 Detektionen in 72h entsprechen knapp einem Drittel aller relevanten PET-Begegnungen (PET bis 5s).
- Der ermittelte Ratio kB/üB-Wert ist mit rund 0.07 nicht besonders auffällig. Die absolute Zahl der als «kritischer» klassifizierten Situationen beträgt 71, was etwa einem doppelt so hohen Wert entspricht, wie beispielsweise Konflikttyp 30
- Der für Konflikttyp 40 ermittelte Risikoindexwert beträgt 2.67, was nach Konflikttyp 30 den zweithöchsten Wert ausmacht (wird vom fehlerbehafteten Wert für den Konflikttyp 41 abgesehen, der aufgrund systematisch zu hoher Geschwindigkeitsmessung den höchsten Risikoindex hat).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein gewisser Zusammenhang zwischen den Messergebnissen betreffend ausgewählter Konflikttypen der alternativen Methode und den am häufigsten auftretenden Unfalltypen am Beispiel «01_Kilchberg» abgeleitet werden kann. Für Typ 30 gilt, dass Begegnungen zwar relativ selten, diese aber eher kritischer einzustufen sind. Bezogen auf Konflikttyp 40 ist es vor allem die Häufigkeit von Begegnungen insgesamt und die dabei ermittelte absolute Anzahl der als «kritischer» einzustufenden Situationen.

4.4.4 Detailbetrachtung Unfalltypen «07_Luzern_Waldegg»

Anhand der Detailbetrachtung am Beispiel «07_Waldegg» wurde überprüft, ob sich die Besonderheit im Unfallgeschehen hinsichtlich eines bestimmten Unfalltyps, der massgebend an diesem Untersuchungsort ist, auch gemäss Messresultaten der alternativen Methode zeigt.

Die Analyse der Unfalldaten der Jahre 2017 bis 2021 ergibt, dass an diesem Untersuchungsort ein bestimmter Unfalltyp als massgebend in Erscheinung trat. Von den insgesamt neun relevanten Unfällen des Betrachtungszeitraums entfallen sechs Unfälle auf den Typ 41 «Kollision beim Rechtseinbiegen mit von links kommendem Fahrzeug» im Bereich der westlichen Knotenzufahrt, wobei zudem jeweils ein einbiegendes Motorfahrzeug mit einem Velo kollidierte. Alle registrierten Unfälle dieses Typs waren Unfälle mit leichter Verletzungsfolge. Anzumerken ist hierbei noch, dass sich alle registrierten Unfälle zwischen 2017 und 2019 ereigneten und in den Jahren 2020 und 2021, also auch im Bezugsjahr der Videoerhebung keine Unfälle registriert wurden.

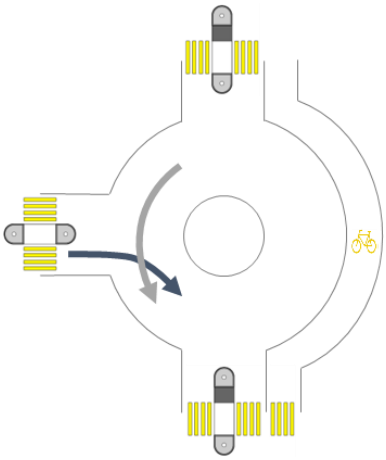


Abb.127 *Detailbetrachtung «07_Waldegg»: Konflikttyp 41 (Zufahrt West)*

Die Messresultate der automatisierten Videoanalyse wurden nun bezüglich des entsprechenden Konflikttyps 41 hinsichtlich der detektieren sicherheitsrelevanten Ereignisse bzw. der ermittelten Werte «Ratio kB/üB» sowie «Risikoindex» detailliert betrachtet:

- Grundsätzlich ist an einem Kreisverkehr typischerweise Konflikttyp 41 der am häufigsten auftretende Typ. Auch am untersuchten Waldegg-Kreisel wurden mit der automatisierten Analyse insgesamt über 19'000 Begegnungssituationen (PET bis 5s) dieses Typs in 72h ermittelt, wobei nur zwei der drei Zufahrten ausgewertet wurden. Etwas mehr als 60% der detektierten Situationen entfallen auf den Zufahrtsbereich West, was soweit das Verkehrsmengenverhältnis der jeweils potenziell konflikthaften Verkehrsströme widerspiegelt.

- Das ermittelte Ratio kB/üB beträgt für den Konflikttyp 41 im Bereich der Zufahrt West 0.01, wobei in absoluten Zahlen betrachtet, 125 als «kritischer» eingestufte Situationen ca. 11'500 übrige Begegnungen gegenüberstehen. Im Bereich der Zufahrt Süd wurde hingegen nur eine einzige «kritischere» Begegnungssituation ermittelt und das ermittelte Ratio kB/üB beträgt folglich fast 0.
- Bezogen auf den Risikoindex zeigt sich der Unterschied zwischen den beiden Zufahrtsbereichen ebenfalls. Konflikttyp 41 weist für den Zufahrtsbereich West einen Risikoindexwert von 2.06 auf. Für den Zufahrtsbereich Süd liegt dieser Wert bei 1.58.
- Werden nur Situationen mit Velobeteiligung betrachtet, ergibt das ermittelte Ratio kB/üB für den westlichen Zufahrtsbereich 0.02. Absolut liegen dem berechneten Wert 91 «kritischere» und ca. 4'000 übrigen Begegnungen zugrunde. Bezugnehmend auf die oben erwähnten 125 als «kritischer» eingestufte Detektionen gesamt, entfallen somit mehr als drei Viertel auf Begegnungen mit Velobeteiligung.
- Der Risikoindexwert des Konflikttyps 41 für Situationen mit Velobeteiligung im westlichen Zufahrtsbereich beträgt 2.02 und liegt somit etwas tiefer als der Wert für alle ausgewerteten Begegnungen des Typs 41 im Bereich der Zufahrt West.

Die Detailbetrachtung des Untersuchungsortes «07_Luzern_Waldegg» offenbart die Schwierigkeit der Validierung der Messergebnisse der alternativen Methode anhand des tatsächlichen Unfallgeschehens. Aufgrund der Häufigkeit von Begegnungssituationen des mit dem massgebenden Unfalltyp korrespondierenden Konflikttyps sowie dem generell eher tiefen Geschwindigkeitsniveau fällt die relative Sicherheitsbeurteilung mittels alternativer Methode verhältnismässig positiv aus. Bezogen auf das ermittelte Ratio kB/üB lassen sich dennoch gewisse Zusammenhänge zum Unfallgeschehen aufzeigen, indem «kritischere» Begegnungen fast ausschliesslich den Zufahrtsbereich betreffen, an dem sich auch die registrierten Unfälle konzentrieren, und es sich zudem bei den ermittelten «kritischeren» Begegnungen zu einem hohen Anteil um Situationen mit Velobeteiligung handelt. Aus dem ermittelten Risikoindexwert lässt sich der Zusammenhang zur Häufigkeit von Unfällen mit Velobeteiligung hingegen nicht ableiten.

5 Synthese

5.1 Forschungsfragen

- Welche Indikatoren können geeignet sein, um lokale Verkehrssicherheit zu messen?
- Welche Ansätze und Methoden existieren bereits? Welche Einsatzmöglichkeiten und Potenziale haben diese? In welchen Bereichen weisen sie Schwächen auf, wo bestehen Einsatzgrenzen?
- Können die definierten Indikatoren mit der/den im Feld getesteten Methode/n gemessen werden? Welche Messgenauigkeit wird für die verschiedenen Indikatoren unter unterschiedlichen Bedingungen (Verkehrssituation, Wetterbedingungen, Lichtverhältnisse, etc.) erreicht?
- Welche Rückschlüsse ergeben sich für die praktische Anwendbarkeit (örtliche Rahmenbedingungen, Voraussetzungen, begünstigende/erschwerende Faktoren, Einsatzgrenzen, etc.) der Methode?
- Welche Anforderungen ergeben sich hinsichtlich Erhebungs- und Auswertetechniken, insbesondere in Abhängigkeit der Analysezeiträume?

5.2 Geeignete messbare Sicherheitsindikatoren

Als besonders vielversprechende alternative Sicherheitsindikatoren konnten jene Indikatoren identifiziert werden, die Begegnungen von Verkehrsteilnehmenden beschreiben und auf standardisierten Kriterien bzw. Messungen in Raum und Zeit beruhen. Im Fokus stehen dabei Interaktionen bzw. Begegnungen von zwei Verkehrsteilnehmenden mit Risikopotenzial für einen Unfall. Von den in Frage kommenden Indikatoren wurden unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Messverfahren schliesslich die Indikatoren «Time To Collision» (TTC) aus der Gruppe der konfliktabhängigen sowie «Post Encroachment Time» (PET) aus der Gruppe der konfliktunabhängigen Indikatoren als besonders geeignet eingeschätzt. In beiden Fällen wird «Zeit» als bestimmende Grösse gemessen. Bei TTC ist es die Zeit, die bis zu einer potenziellen Kollision zweier Verkehrsteilnehmenden noch verbleibt, wohingegen es bei PET der Zeitunterschied zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden ist, welche sich in unterschiedlicher Richtung über einen gemeinsamen räumlichen Bereich bewegen.

5.3 Alternative Ansätze und Methoden

Die Suche nach zur Verfügung stehenden alternativen Ansätzen und Methoden hat gezeigt, dass diese insbesondere über die Art der Datenerhebung zu unterscheiden sind. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen (technische Erfassung durch Sensoren, manuelle Rapportierung/Befragung sowie Nutzung von Sekundärdaten), die wiederum unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten und Potenziale sowie Limitationen aufweisen. Die technischen Erhebungsformen haben gegenüber einer manuellen Rapportierung oder Befragung ihre grössten Vorteile in der standardisierten Durchführung von effektiven Messungen, die relativ unabhängig von äusseren Bedingungen auch über längere Zeiträume hinweg, lückenlose Datenerhebungen ermöglichen. Insbesondere bildbasierte Ansätze wie die Datenerhebung mittels Videoaufnahmen weisen einen hohen Detailierungsgrad auf und schliessen alle Verkehrsarten mit ein. Durch die Nutzung von Sekundärdaten (z.B. Onboard-Fahrzeugdaten) kann zwar ein umfangreicher Untersuchungsraum abgedeckt werden, allerdings beschränken sich die Aussagen auf den Motorfahrzeugverkehr, der mit entsprechenden Sensoren eines bestimmten Anbieters ausgestattet ist. Weitere Nachteile dieser Methodik betreffen die Transparenz hinsichtlich Methodik und Datenqualität sowie die Zugänglichkeit der Daten.

Unter Berücksichtigung der gewünschten Anforderungen und Erwartungen an die alternative Methode gemäss Inputs der Begleitkommission, hat sich der videobasierte Ansatz als geeignetster Methodenansatz herauskristallisiert. Der Ansatz hat neben seinen günstigen Eigenschaften auch den Vorzug, dass bereits automatisierte Analyseverfahren zur Verfügung stehen, welche Messungen von geeigneten Sicherheitsindikatoren beinhalten.

5.4 Erkenntnisse aus den Feldversuchen

Im Zuge des Arbeitsschrittes der Methodenentwicklung wurde die Methode hinsichtlich möglicher Sicherheitsindikatoren, Erhebungstechnik sowie einsetzbare Anwendungen zur Auswertung der erhobenen Videodaten (Analyseverfahren) konkretisiert und schliesslich im Rahmen der Feldversuche zum Einsatz gebracht.

Das eigens für dieses Projekt zusammengestellte Erhebungsequipment hat sich als praktikabel erwiesen, Videodaten in der erforderlichen Qualität zu erheben. Aufnahmen konnten an unterschiedlichen Infrastrukturanlagen zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt werden. Bedingt durch die Kamerainstallation auf eigenem Stativ, stellten sich Witterungsverhältnisse mit starkem Wind (und Regen) als limitierender Faktor für die Erhebungstechnik heraus. Die Aufnahmen am Standort «05_Sursee_Zeughausstrasse» wurden unter anderem aus diesem Grund als unzureichend befunden und konnten nicht ausgewertet werden. Hinsichtlich Aufnahmedauer konnte, die in Abstimmung mit der Begleitkommission angestrebte Zielgrösse von mindestens einer Woche dank des Einsatzes eines Solarpanels erreicht werden.

Die erhobenen Videorohdaten wurden anschliessend mit den beiden ausgewählten Anwendungen der automatisierten Videoanalyse ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die Trajektorienextraktion, also die Erfassung von Objekten im Videobild sowie auch deren Klassifizierung weitgehend gute Resultate lieferte. Die extrahierten Trajektorien von grösseren Fahrzeugen sowie von Zufussgehenden und Velofahrenden wiesen zum Teil allerdings Qualitätsdefizite auf. Die Verkehrsmengen liessen sich – mit gewissen Abstrichen beim Fuss- und Veloverkehr – in der Regel gut bestimmen.

Für die auf Basis der extrahierten Trajektorien nachgelagerten Analyseverfahren (Messungen) bedarf es der Umlegung in ein Koordinatensystem. Hierfür haben sich die erhobenen Aufnahmen aus der Schrägperspektive als nachteilig erwiesen, da die perspektivischen Verzerrungen des Videobildes, Messungenauigkeiten zur Folge haben. Einerseits ergeben sich vor allem in Bildrandbereichen ungenaue Distanzmessungen. Anderseits sind die perspektivischen Verzerrungen auch für festgestellte Ungenauigkeiten in der Positionsbestimmung von Objekten verantwortlich. Dies führt dazu, dass Abstandsmessungen zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden sowie auch Geschwindigkeitsmessungen je nach Position der Messung im Videobild mehr- oder weniger fehlerbehaftet sind.

In Bezug auf die Sicherheitsanalysen haben sich die Aufnahmen aus der Schrägperspektive für die Anwendung 1 als ungeeignet herausgestellt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Sicherheitsanalyse-Tools der Anwendung 1 explizit für Videoaufnahmen von Drohnen, also Aufnahmen aus der Vogelperspektive entwickelt wurden. Die Auswertung für die Indikatoren TTC und PET führte auch bedingt durch in der Software hinterlegte, nicht veränderbare Einstellungen dazu, dass Begegnungssituationen mehrheitlich nicht korrekt erfasst wurden. Auf der einen Seite waren es FALSCH-positive TTC-Detektionen aufgrund der oben beschriebenen Messungenauigkeiten. Auf der anderen Seite wurden PET-Begegnungen nicht detektiert, weil eine wesentliche, in der Softwareeinstellung hinterlegte Bedingung (Winkel, in dem sich die Trajektorien zweier Verkehrsteilnehmende zueinander befinden) in zahlreichen Situationen nicht erfüllt war. Da die festgestellten Schwierigkeiten von grundsätzlicher Natur sind und nicht im Rahmen des Projektes zu lösen waren, musste entschieden werden, Anwendung 1 auf Basis der Erkenntnisse am ersten Untersuchungsort nicht weiter einzusetzen. Mit Anwendung 2 konnten hingegen in Bezug auf die Sicherheitsanalyse verwertbare Ergebnisse erzielt werden, wenngleich sich auch hierbei die Nachteile der Aufnahmeperspektive zeigten und es zu systematischen

Fehl-Detektionen kommen kann. Der Indikator TTC ist davon stärker betroffen, da bei diesem die Distanzen der Objekte zueinander sowie die Geschwindigkeiten eine wesentliche Rolle spielen. PET-Messungen sind diesbezüglich weniger anfällig. Insbesondere die Geschwindigkeit beteiligter Fahrzeuge ist aber auch für die spätere Beurteilung der ermittelten PET-Begegnungen ein wichtiges Kriterium.

Die Prüfung der für alle analysierten Untersuchungsorte mit Anwendung 2 erzielten Ergebnisse hat ergeben, dass systematische Fehl-Detektionen im Resultat enthalten sein können. Diese können über die Definition relevanter Konflikttypen zum Teil gut herausgefiltert werden, ein gewisser Teil, der nicht mittels Filterung behandelt werden kann, verbleibt aber im Resultat. Eine kritische Prüfung und Nachbearbeitung der Resultate sind deshalb, aber auch im Hinblick auf eine möglichst treffsichere Beurteilung des Sicherheitsniveaus essenziell. Die ungeprüfte Verwendung des Ergebnisses der Sicherheitsanalyse der Anwendung, birgt die Gefahr einer unbestimmten Verzerrung des Resultats.

Der in Anwendung 2 nur sehr eingeschränkt angewendete Indikator TTC war in der gewählten Versuchsanordnung teilweise stark von Messungenauigkeiten betroffen. Gemäss Überprüfung anhand der im Dashboard der Anwendung zur Verfügung gestellten Videosequenzen, konnte zumindest bestätigt werden, dass TTC theoretisch ein geeigneter Indikator sein kann. Die bestehenden Unsicherheiten bezüglich Fehldetektionen und Messungenauigkeiten, führten aber zu der Entscheidung, die TTC-Resultate nicht für die Beurteilung des Sicherheitsniveaus (mit Nachbearbeitung) einzubeziehen.

Die im Nachbearbeitungsschritt anhand der relevanten PET-Konflikttypen und ihrer Parameter definierten Kenngrössen zur Sicherheitsbeurteilung stellen einen Versuch dar, ein möglichst valides Messergebnis zu erhalten, das geeignet ist, das Sicherheitsniveau der untersuchten Standorte mit den zur Verfügung stehenden Mitteln bestmöglich zu beschreiben. Inwieweit dies gelungen ist, konnte nicht abschliessend geklärt werden, da in der Gegenüberstellung der Resultate von automatisierter Videoanalyse und manueller Konfliktanalyse erhebliche Abweichungen festzustellen waren. Die Gründe für diese Abweichungen liegen neben methodischen Differenzen der beiden Methoden auch darin, dass auch die manuelle Konfliktanalyse Schwächen aufweist. Die Validierung der Resultate der automatisierten Sicherheitsanalyse anhand der Ergebnisse der manuellen Konfliktanalyse hat sich vor diesem Hintergrund als wenig geeignet herausgestellt.

Auch anhand des tatsächlichen Unfallgeschehens ist eine Validierung der Resultate der automatisierten Videoanalyse kaum möglich. Dies liegt primär an der, statistisch betrachtet, geringen Anzahl an Unfällen. Zumindest konnten in der Detailbetrachtung Auffälligkeiten hinsichtlich Unfalltypen auch im Ergebnis der Konflikttypen-Auswertung nachgewiesen werden.

Zusammenfassend sind folgende wesentliche Erkenntnisse festzuhalten:

- Mit den zur Verfügung stehenden technischen Möglichkeiten können Videodaten in der benötigten Qualität und über längere Zeiträume erhoben werden. Stromversorgung und Datenspeicherkapazitäten können im temporären Einsatz weiterhin limitierende Faktoren sein, die aber dank stetiger Weiterentwicklungen in der Erhebungstechnik immer besser in den Griff zu bekommen sind.
- Die erhobenen Videorohdaten können die Qualität der Resultate der automatisierten Videoanalyse stark beeinflussen. Die Wahl des Erhebungsstandortes sowie die Aufnahmeperspektive sind deshalb von grosser Bedeutung.
- Äussere Rahmenbedingungen wie Wetterbedingungen oder Lichtverhältnisse wirken sich weniger als erwartet auf die Qualität der Resultate der automatisierten Videoanalyse aus, solange allfällige Einflüsse nicht auch schon mit freiem Auge als erhebliche Einschränkungen wahrgenommen werden können (z.B. keine ausreichende Beleuchtung während der Nacht).
- Die Messbarkeit der Sicherheitsindikatoren wird durch die gewählten Anwendungen limitiert. Insbesondere der Indikator TTC bedingt eine hohe Genauigkeit der

extrahierten Trajektorien bzw. der Umlegung in ein Koordinatensystem. Je ungünstiger die Aufnahmeperspektive der erhobenen Videorohdaten desto grösser ist die potenzielle Ungenauigkeit der extrahierten Trajektorien.

- Fehldetektionen und Ungenauigkeiten (insbesondere bedingt durch die Aufnahmeperspektive), die im Resultat der automatisierten Analysen enthalten sind, können durch gezielte Nachbearbeitung zum Teil herausgefiltert werden. Eine kritische Prüfung und Nachbearbeitung der Resultate sind deshalb essenziell.
- Der einfacher messbare Indikator PET als konfliktunabhängige Grösse hat den Nachteil, dass dieser allein nur bedingt geeignet erscheint, das Sicherheitsniveau zu beschreiben. Die Berücksichtigung weiterer Kriterien einer PET-Begegnung wie beispielsweise die Geschwindigkeit der Beteiligten Verkehrsteilnehmenden sowie die Beteiligten selbst (unter Einbezug der Reihenfolge, in der sie in einer PET-Begegnung auftreten), ist hilfreich, das Risiko der ermittelten Begegnungen besser zu beschreiben.
- Die anhand der relevanten PET-Konflikttypen und ihrer Parameter definierten Kenngrössen «Ratio kB/üB» und «Risikoindex» können mögliche Ansätze für eine Sicherheitsbeurteilung sein, die es weiterzuentwickeln gibt.
- Die Beurteilung bzw. Validierung der Resultate der automatisierten Sicherheitsanalyse stellt eine grosse Herausforderung dar. Weder die manuelle Konfliktanalyse noch die Analyse des Unfallgeschehens sind für die Validierung ausreichend geeignet. Zumindest können gewisse Übereinstimmungen von Ausprägungen hinsichtlich Unfalltypen und Konflikttypen nachgewiesen werden.

5.5 Empfehlungen hinsichtlich Anwendbarkeit

Die Empfehlungen für die Anwendung der getesteten alternativen Methode werden nachfolgend anhand eines typischen Anwendungsbeispiels (Use Case) beschrieben. Zunächst wird noch ein kurzer Überblick über mögliche Anwendungsfälle gegeben, für welche die Methode grundsätzlich gut geeignet sein kann. Die Überlegungen knüpfen dabei bewusst an die bestehenden Infrastruktursicherheitsinstrumente (ISSI) [11] der Verkehrssicherheitsarbeit in der Schweiz an. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass sich die Anwendbarkeit der im Rahmen dieses Forschungsprojektes getesteten Methode auf Knoten, Einmündungen und Querungsstellen beschränkt.

- <u>Überprüfung eines besonderen Neubauprojektes</u>
  Mit der Anwendung von Sicherheitsinstrumenten wie dem Road Safety Audit (RSA) [7] wird grundsätzlich ein hoher Sicherheitsstandard bei Realisierung von neuen Infrastrukturanalagen sichergestellt. Dennoch ist eine zeitnahe Überprüfung von Neubauprojekten an sich sinnvoll und vielfach auch von vornherein vorgesehen. Dies insbesondere, wenn die realisierte Anlage Besonderheiten aufweist (z.B. Normabweichungen, spezielle/innovative Lösungen der Verkehrsführung/Signaletik) oder umfangreiche Veränderungen vorgenommen wurden (z.B. Verkehrsregime, Vortrittsregelungen, etc.). Bei neuen Anlagen ist eine herkömmliche Unfallanalyse erst nach mehreren Betriebsjahren zweckmässig. Kurzfristig stellt die alternative Methode eine Möglichkeit dar, allfällige Sicherheitsdefizite frühzeitig erkennen und beheben zu können, noch bevor Unfälle geschehen. Sie ist überdies besonders geeignet, um allfällige Entwicklungen über eine gewisse Zeitdauer abbilden zu können (z.B. Überprüfung unmittelbar nach Inbetriebnahme und nach einer gewissen Eingewöhnungszeit).

- Analyse einer Verkehrsanalage (im Rahmen einer Road Safety Inspektion)
  In der Road Safety Inspektion (RSI) [8] stützt sich die Beurteilung im Themenbereich «Verkehrsablauf» heute insbesondere auf Messungen der Verkehrsmengen und Geschwindigkeiten sowie allenfalls kurzeitigen qualitativen Beobachtungen. Die alternative Methode ermöglicht eine umfassende Analyse des Verkehrsgeschehens, die neben konkreten Hinweisen auf sicherheitsrelevante Auffälligkeiten im Verkehrsablauf auch die Verkehrsmengen und, zumindest punktuell, Geschwindigkeiten liefert. Die Sicherheitsanalyse nach Konflikttypen und Beteiligten kann wichtige Hinweise hinsichtlich des Unfallrisikos bestimmter Verkehrsteilnehmendengruppen bringen.
- Analyse eines Unfallschwerpunkts (im Rahmen eines Black Spot Managements)
  Spezifische Verkehrsbeobachtungen eines Unfallschwerpunkts im Rahmen des Unfallschwerpunkt- bzw. Black Spot Managements (BSM) [9] umfassen heute meist kurzzeitige Beobachtungen der Verkehrsabläufe im Sinne einer qualitativen Einschätzung der Situation. Mit dem Einsatz der alternativen Methode kann die Beurteilung der Situation um wertvolle quantitative Elemente ergänzt werden und zudem die qualitative Analyse unterstützen. Insbesondere die Sicherheitsanalyse nach Konflikttypen kann wichtige Erkenntnisse hinsichtlich spezifischer Unfallrisiken bringen. Dies insbesondere dann, wenn aus der Unfallanalyse keine klaren Rückschlüsse auf Defizite abgeleitet werden können.
- Analyse einer Unfallstelle (im Rahmen eines Einzelunfall-Managements)
  Bei der Analyse einer Unfallstelle kann die alternative Methode beispielsweise zur Überprüfung Anwendung finden, ob ein konkreter Unfall in Zusammenhang mit einem allfälligen Sicherheitsdefizit im Verkehrsablauf steht. Konkret könnte mit der Methode z.B. festgestellt werden, dass der mit dem Unfalltyp des Einzelereignisses korrespondierende Konflikttyp der alternativen Methode Auffälligkeiten hinsichtlich der Sicherheitsbeurteilung aufweist. Im Rahmen eines Einzelunfallmanagements kann die Erarbeitung oder Aktualisierung eines anderen Instruments wie RSI oder BSM ausgelöst werden, in welchem die alternative Methode wie oben beschrieben eingesetzt werden kann.
- Wirkungsanalyse im Sinne eines Vorher-Nachher-Vergleichs
  Der Einsatz der alternativen Methode empfiehlt sich besonders für die Wirkungsüberprüfung von realisierten Massnahmen. Idealerweise wird bereits der Vorher-Zustand entsprechend analysiert, sodass ein Vorher-Nachher-Vergleich möglich ist. Statistische Kenngrössen, die auf Basis der Resultate der automatisierten Sicherheitsanalyse ermittelt werden können, eignen sich besonders gut für einen solchen Vergleich. Ein Anwendungsbeispiel kann die Wirkungskontrolle im Rahmen einer Road Safety Inspektion oder des Black Spot Managements sein.

Im exemplarisch beschriebene Use Case wird folgende Ausgangssituation angenommen:

Gemäss Hinweisen soll es an einem Knoten (ohne LSA) regelmässig zu Situationen in Zusammenhang mit einbiegenden Fahrzeugen kommen, die als «gefährlich» wahrgenommenen werden. Die Unfallstatistik weist diesbezüglich keine Auffälligkeiten auf. Der Strasseneigentümer veranlasst daraufhin, die Situation über die Analyse der Verkehrsabläufe untersuchen zu lassen, um damit Hinweise auf allenfalls bestehende Sicherheitsdefizite zu erhalten.

Für die Entscheidung, ob und in welchem Umfang die alternative Methode am Untersuchungsort anwendbar ist, sind zunächst eine Prüfung der örtlichen Situation und der Rahmenbedingungen nötig. Dabei sind folgende Themen relevant:

- **Anlagedimensionen**
  Bei grösseren Anlagen, die nicht optimal mit einem Aufnahmegerät erfasst werden können, kann es notwendig werden, den konkret zu untersuchenden Bereich beispielsweise auf einen bestimmten Knotenast zu begrenzen oder die Erhebung mit zwei oder mehr Aufnahmegeräten aus unterschiedlichen Perspektiven durchzuführen. Hierbei gilt es in erster Linie abzuwägen, wie umfassend die Analyse sein soll/muss und welche Kosten, dafür eingesetzt werden können.
- **Ausstattung (insbesondere Beleuchtung)**

Ist die Anlage während der Nacht gut und durchgehend beleuchtet, ist eine reguläres bildbasiertes Erhebungsverfahren im Normalfall ausreichend. Ansonsten kann der Einsatz einer Wärmebildkamera Abhilfe schaffen, oder die Auswertung wird auf bestimmte Zeiträume begrenzt.

- **mögliche Erhebungsstandorte** (Befestigungsmöglichkeiten für Aufnahmegeräte im Strassenraum, wie Kandelaber oder Signalpfosten bzw. alternativ auf angrenzenden Liegenschaften/Gebäuden)
  In seltenen Fällen steht ein Erhebungsstandort aus erhöhter Position (z.B. Dachterrasse eines angrenzenden Gebäudes) zur Verfügung, der es ermöglicht, grössere Bereiche einer Anlage abdecken zu können und bei welchem die Nachteile einer Aufnahme aus der Schrägperspektive (insbesondere Messungenauigkeiten) weniger ins Gewicht fallen. Andererseits kann bei Erhebungen von einem solchen Standort aus, die Qualität der Erfassung des Fuss- und Veloverkehrs beeinträchtigt sein.
- **Sichteinschränkungen** (Elemente der Verkehrsinfrastruktur, Bepflanzung)
  In Zusammenhang mit der Frage nach möglichen Erhebungsstandorten sollten auch allfällige Sichteinschränkungen geprüft werden, da diese die Qualität der Videorohdaten respektive der späteren Auswerteresultate erheblich beeinflussen können.
- **Verkehrszusammensetzung**
  Die Verkehrszusammensetzung kann die Eignung der Methode erheblich einschränken. Hohe Schwerverkehrsanteile sowie Linienfahrzeuge des öffentlichen Verkehrs können (insbesondere bei Aufnahmen aus der Schrägperspektive von einem Standort im Strassenraum) zu vermehrten Ungenauigkeiten und Fehldetektionen führen und dadurch das Resultat der Sicherheitsanalyse verfälschen. Ungünstig können ausserdem sehr hohe Fussverkehrsströme sein.

Eignet sich die Methode am Untersuchungsort, ist im nächsten Schritt die Erhebung zu definieren und durchzuführen. Dafür könne folgende Empfehlungen gegeben werden:

- **Beizug des Anbieters der automatisierten Videoanalyse**
  Es ist sehr ratsam, den Anbieter bei der Definition der Erhebung beizuziehen. Dies ist insbesondere nützlich, um dank hilfreicher Tipps und Empfehlungen für die Durchführung der Erhebung, bestmögliche Videorohdaten aufzuzeichnen, was wiederum die Kalibrierung erleichtert und zu einer hohen Qualität der Ergebnisse beiträgt.
- **Auswahl Erhebungsstandort**
  Der Erhebungsstandort sowie die Perspektive ist im Hinblick auf die zu untersuchenden Bereiche bzw. Fragestellung so zu wählen, dass sich die relevanten Stellen möglichst in der Bildmitte befinden. Insbesondere bei Installation im Strassenraum und entsprechender Aufnahme aus einer Schrägperspektive sind allenfalls von vornherein Bereiche zu definieren, die nicht oder nur bedingt in der späteren Auswertung berücksichtigt werden. Allenfalls ist der Einsatz zusätzlicher Aufnahmegeräte sinnvoll.
- **Erhebungsequipment**
  Das Erhebungsequipment besteht bei temporären Installationen typischerweise aus einer Kamera mit entsprechender Befestigungslösung (allenfalls Teleskopmast), Datenträger zu Speicherung der Videodaten und einer Stromversorgungslösung (z.B. leistungsstarke Batterie). Grundsätzlich eignet sich jede handelsübliche Kamera. Seitens Anbieter von automatisierten Sicherheitsanalysen werden Mindestanforderung bezüglich Auflösung, Bitrate und Bildrate formuliert. Bei der Auswahl der Kamera für temporären Einsatz mit Akkubetrieb ist der Energiebedarf des Gerätes ein wichtiges Entscheidungskriterium.

- **Installation**
  Bei der Installation ist darauf zu achten, dass die Kamera stabil montiert wird und sich während der Erhebung nicht bewegt. Die Aufnahmeeinstellungen hinsichtlich Auflösung, Bitrate und Bildrate sollten sehr bewusst gewählt werden. Es empfiehlt sich, die vom Anbieter der automatisierten Analyse beschriebenen Mindestanforderungen zu erfüllen. Grundsätzlich wirkt sich eine darüber hinaus gehende höhere Aufnahmequalität zwar positiv auf die Qualität der Auswertung aus. Anderseits wird dadurch mehr Speicherkapazität benötigt. Zudem können sich Herausforderungen hinsichtlich Datenschutzes stellen, wenn beispielsweise Gesichter von Personen oder Fahrzeugkennzeichen im Videobild erkennbar sind.
- **Aufnahmedauer**
  Die Erhebungsdauer sollte in der Regel mindestens drei Tage, idealerweise sieben Tage (eine gesamte Woche) betragen, wobei die Entscheidung über die Erhebungsdauer auch unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens zu treffen ist. Grundsätzlich gilt: je geringer das Verkehrsaufkommen, desto länger ist die Erhebungsdauer anzusetzen. Bei Situationen mit sehr geringem Aufkommen kann eine Dauer von mehreren Wochen angezeigt sein.
- **Datenschutz**
  Die Aufnahmeperspektive und -qualität sollten möglichst so gewählt werden, dass keine personenbezogenen Daten (Gesichter von Personen, Fahrzeugkennzeichen) im Videobild erkennbar sind. Allenfalls müssen bestimmte Bildbereiche mit einem Anonymisierungsfilter belegt werden. Dieses Feature ist in der Bedienungssoftware zahlreicher Kamerasysteme bereits integriert.
- **Begleiterhebungen**
  Um die Resultate der automatisierten Videoanalyse überprüfen und plausibilisieren zu können, sind Begleiterhebungen sinnvoll. Als besonders zweckmässig gelten kurzzeitige Drohnenaufnahmen, die nachträglich mit geeigneter Software automatisiert ausgewertet werden. Im Hinblick auf die Sicherheitsbeurteilung wichtig ist dabei insbesondere die Prüfung der Geschwindigkeitsmesswerte.

Sind die Videodaten erhoben, kann die automatisierte Auswertung erfolgen. Sollen nur bestimmte, im Vorfeld definierte Bereich/Themen analysiert werden, so kann eine entsprechend eingeschränkte Auswertung bestellt werden. Im Wesentlichen müssen in diesem Schritt lediglich die Videorohdaten zur Auswertung übergeben werden. Dies erfolgt über die Online-Plattform des Anbieters via Daten-Upload. Auf dieser Plattform werden schliesslich auch die Ergebnisse zur Verfügung gestellt.

Sämtliche Resultate können auf der Plattform eingesehen und anhand von Auswertegrafiken und statistischen Kenngrössen interpretiert werden. Es empfiehlt sich aber auch, eine eingehende Prüfung der Resultate vorzunehmen sowie anhand der exportierbaren Datentabellen, die Ergebnisse einer Nachbearbeitung zu unterziehen und eigene Auswertungen durchzuführen. Hierfür können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- **Datenprüfung**
  Wenn nicht bereits im Vorfeld eine auf bestimmte Bereiche/Themen beschränkte Auswertung bestellt wurde, ist es besonders ratsam, die einzelnen generierten «Szenarien» (Konflikttypen) dahingehend zu prüfen, ob diese überhaupt relevant sind. So können beispielsweise systematische «FALSCH-Positiv-Szenarien» oder Konflikttypen, die nicht weiter betrachtet werden sollen, identifiziert werden.
- **Nachbearbeitung**
  Für die Nachbearbeitung müssen die Daten zu den detektierten sicherheitsrelevanten Ereignissen exportiert werden. In dieser Datentabelle sind sämtliche ausgewerteten PET- und TTC-Begegnungen mit den erfassten Parametern enthalten. Über Filterung und Aggregation können selektive Auswertung vorgenommen werden, beispielsweise, um eigene Konflikttypen zu generieren oder Detailauswertung zu bestimmten Verkehrsteilnehmendengruppen durchzuführen. Die Auseinandersetzung mit den Daten hilft ausserdem, das Verständnis für die Möglichkeiten und Limitationen zu entwickeln bzw. zu schärfen.
- **Berechnung eigener Sicherheitskenngrössen**

Auf Basis der zur Verfügung stehenden ausgewerteten Parameter der detektierten Begegnungen lassen sich eigene Sicherheitskenngrössen berechnen. Die in Kapitel 4.2 dieses Berichts beschriebenen Kenngrössen sind ein erster Ansatz, der aber noch weiterzuentwickeln ist.

- **Beurteilung**
  Hinsichtlich Beurteilung der Verkehrssicherheit auf Basis der Resultate der automatisierten Sicherheitsanalyse ist grosse Sorgfalt geboten. Von der Nutzung ungeprüfter Sicherheitskenngrössen ist abzuraten. Bei der Verwendung eigener Kenngrössen, ist deren Eignung vorgängig zu prüfen. Jedenfalls müssen Schwächen und Grenzen solcher Kenngrössen bekannt sein und diese sind bei der Beurteilung entsprechend zu berücksichtigen. Darüber hinaus empfiehlt es sich, die automatisiert ausgewerteten Begegnungssituationen zumindest stichprobenhaft einer qualitativen Analyse zu unterziehen und deren Ergebnisse in die Beurteilung einfliessen zu lassen. Für den Fall, dass die Anwendung von Sicherheitskenngrössen grosse Unsicherheiten hervorruft, kann die automatisierte Auswertung auch lediglich als Vorselektionsmethode für Begegnungssituationen herangezogen werden. Die extrahierten Begegnungen können dann anschliessend einer systematischen qualitativen Analyse unterzogen werden, um auf diesem Weg zu einer Sicherheitsbeurteilung zu gelangen.

5.6 Weiterentwicklung der getesteten Methode

Wie die gegenständliche Forschung gezeigt hat, konnte mit der getesteten Methode im gewählten Versuchsaufbau nicht die Qualität der automatisierten Auswertungen erreicht werden, die nötig wäre, um valide Messergebnisse zu erhalten. Die erzielten Resultate sind eher als annäherungsweise Bestimmungen zu bezeichnen, als dass von Messungen gesprochen werden kann. Vor diesem Hintergrund besteht die Notwendigkeit zur Weiterentwicklung im Bereich der automatisierten Videoanalyse in Richtung der Ermöglichung und Sicherstellung präziserer Messbarkeit. Die erforderlichen Verbesserungen betreffen insbesondere folgende Themen:

- Objekterkennung und Trajektorienbestimmung (insbesondere von Zufussgehenden, Velofahrenden sowie grösseren Objekten wie Lastwagen und Bussen)
- Bestimmung der Grösse, Position und Ausrichtung der erfassten Objekte im Raum
- Georeferenzierung und Kalibrierung (Messbarkeit von Distanz bzw. Geschwindigkeit)

In Bezug auf die praktische Anwendbarkeit durch Fachpersonen, sind insbesondere folgende Weiterentwicklungen im Bereich der Softwareanwendungen zur Analyse der automatisierten Auswertungen wünschenswert:

- Möglichkeiten zur räumlichen Eingrenzung von Analysen
- Erweitere Auswahlmöglichkeiten zur Anwendung verfügbarer Sicherheitsindikatoren
- Einstellungsmöglichkeit der Parameter zur Definition von sicherheitsrelevanten Ereignissen bzw. Begegnungssituationen

Die (teil-)automatisierten Videoanalytik unterliegt einer grossen Entwicklungsdynamik. Laufend werden neue bzw. weiterentwickelte Anwendungen vorgestellt, die als Lösungen zur Messbarkeit von Verkehrssicherheit beschrieben werden. Einerseits ist damit verbunden eine entsprechende Qualitätsverbesserung der erzielbaren Resultate und Weiterentwicklung der Methoden zu erwarten. Andererseits können dadurch aber auch neue Schwierigkeiten entstehen, wenn beispielsweise komplexere Algorithmen zur Anwendung kommen, welche ein noch höheres Genauigkeitsmass erfordern. Dies wiederum könnte dazu führen, dass die Methode nur unter bestimmten Voraussetzungen einsetzbar sein könnte, was ihre praktischen Anwendungsmöglichkeiten limitieren würde.

5.7 Forschungsbedarf

Bezogen auf die in diesem Projekt getestete Methode ist abzuleiten, dass weiterer Forschungsbedarf vor allem hinsichtlich der angewendeten Sicherheitsindikatoren bzw. den darauf aufbauend ermittelbaren Sicherheitskenngrössen besteht. Aufgrund der im gewählten Versuchsaufbau festgestellten Ungenauigkeiten muss die Messbarkeit der erforderlichen Paramater unter Berücksichtigung angestrebter Messzeiträume weiter untersucht werden. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach neuen Erhebungstechniken, die beispielweise Aufnahmen aus einer geeigneten Perspektive auch über einen längeren Zeitraum möglich machen. Diesbezügliche Entwicklungen gibt es konkret im Bereich der drohnenbasierten Erhebung von Videodaten (z.B. Verlängerung der Aufnahemdauer durch den Einsatz einer sogenannten «tethered» Drohne, die über ein Kabel mit Strom versorgt wird). Darüber hinaus gilt es, geeignete Sicherheitskenngrössen, die anhand messbarer Sicherheitsindikatoren und weiterer relevanter Messgrössen gebildet werden können, zu definieren und zu validieren. Im Hinblick auf eine absolute Sicherheitsbeurteilung wird es zudem notwendig sein, der Frage nach sinnvoll anwendbaren Grenzwerten nachzugehen.

In Zusammenhang mit alternativen Methoden zur Messung von Verkehrssicherheit allgemein ist davon auszugehen, dass mit weiter fortschreitender Digitalisierung und «Big Data» vermehrt Daten angeboten werden, von denen behauptet werden wird, dass sie eine Beurteilungsmöglichkeit der örtlichen Verkehrssicherheit ermöglichen würden. Insbesondere die Entwicklungen zum «automatisierten Fahren», wo das Thema Sicherheit eine zentrale Position einnimmt, sind diesbezüglich zu nennen. Bei der Thematik der Nutzung solcher Daten stellen sich neben Fragen zur Datenverfügbarkeit und Transparenz bzw. Nachvollziehbarkeit der Verfahren auch Forschungsfragen betreffend die Validität der Daten sowie hinsichtlich der Definition von Kriterien, deren Gewichtung und schliesslich der Sicherheitsbeurteilung. Aufgrund der Komplexität solcher Aufgaben, noch dazu, wenn Daten aus unterschiedlichen Quellen bezogen werden müssen und kaum überprüfbar sind, scheinen grosse Zweifel hinsichtlich der Umsetzbarkeit und Anwendbarkeit solcher Methoden angebracht.

Anhänge

I Materialien Begleituntersuchungen 189
I.1 Manuelle Konfliktanalyse 189
I.2 Begleitbefragungen 191

I Materialien Begleituntersuchungen

I.1 Manuelle Konfliktanalyse

Factor A: Time to collision

- **Long [Class 1] (*TTC* > 2 s)**: The vehicle or the pedestrian has to decelerate, however the time to collision is such that the braking is steady and there is no change of course of either road user. This case also applies to occasions when either road user has to accelerate.
- **Moderate [Class 2] (0.5 < *TTC* ≤ 2 s)**: The time to collision is greatly reduced, such that the road user has to brake hard and may also need to change his/her course after braking to avoid a collision.
- **Short [Class 3] (*TTC* ≤ 0.5 s)**: The road user has to both brake hard and at the same time significantly change his/her course in order to avoid a collision.

Factor B: Severity of evasive action

- **Light [Class 1]**: Light, controlled deceleration or acceleration (less than 2 m/s^2) for vehicles. For pedestrians this corresponds to a change up/down by one level on the severity hierarchy.
- **Medium [Class 2]**: Moderate, but controlled deceleration or acceleration (2 – 3.45 m/s^2) for vehicles. For pedestrians this corresponds to a change up/down by two levels on the severity hierarchy
- **Heavy [Class 3]**: Sharp, less controlled deceleration or acceleration (3.45 – 8.5 m/s^2) for vehicles. For pedestrians this corresponds to a change up/down by three levels on the severity hierarchy. This is likely to be combined with a change of course, which occurs after the deceleration or acceleration.
- **Emergency [Class 4]**: Sudden, uncontrolled deceleration or acceleration (> 5.5 m/s^2) for vehicles. For pedestrians this corresponds to a change up/down by four levels on the severity hierarchy. This is likely combined with a fairly instant change of course.

Pedestrian severity hierarchy:
'stop' (0 m/s) – *'walk'* (1 – 2.5 m/s) – *'jog'* (2.5 – 4 m/s) – *'run'* (4 – 5.5 m/s) – *'sprint'* (> 5.5 m/s)

Factor C: Complexity of evasive action

- **Simple [Class 1]**: The road user either decelerates/accelerates in order to avoid a collision (change in speed without change in course), or distinctively changes course (>45°) in order to avoid a collision (change in course without change in speed).
- **Complex [Class 3]**: The road user takes an action involving a distinct (>45°) change of course and decelerates or accelerates in order to avoid a collision (combined change of course and speed)

Factor D: Distance to collision

In accordance with the original PVCA and CAPS definition, distance to collision describes the distance of the approaching road users to the projected collision point at the time of initialisation of the evasive action. The distance is defined in relation to the vehicle length, as its criticality is dependent on it. As such, a definition of vehicle length is added. Hence:

- **Far [Class 1]**: Greater than two vehicle lengths between the conflicting road users, when they begin to take action to avoid the collision. For formal pedestrian crossings this should be taken as greater than one vehicle length.
- **Medium [Class 2]**: Between one and two vehicle lengths between the conflicting road users, when they begin to take action to avoid the collision. For formal pedestrian crossings this should be taken as between 0.5 and 1 vehicle length.
- **Short [Class 3]**: Less than one vehicle length between the conflicting road users, when they begin to take action to avoid the collision. For formal pedestrian crossings this should be taken as less than 0.5 vehicle length.

Vehicle length values:
Heavy vehicles (*trucks*): *8 m – 4-wheelers* (*cars, vans*): *5 m – 2-wheelers* (*cycles, motorcycles*): *2 m*

***Abb. 1** Schema zur Konfliktbeurteilung (Kaparias et al., 2013)*

Factor	Grade 1 conflict – slight												
A	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3
B	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2
C	1	3	1	3	1	3	1	3	1	1	3	1	3
D	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1

Factor	Grade 2 conflict – serious																		
A	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
B	1	1	2	2	3	3	1	1	2	2	3	3	1	1	1	1	2	3	3
C	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	1	3
D	3	3	2	2	1	1	3	2	2	2	1	1	2	2	3	3	2	1	1

Factor	Grade 3 conflict – serious																		
A	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
B	2	2	3	3	1	2	2	3	3	3	3	2	2	2	3	3	4	4	4	4
C	1	3	1	3	3	1	3	1	3	1	3	3	1	3	1	3	1	3	1	3
D	3	3	2	2	3	3	3	2	2	3	3	2	3	3	2	2	1	1	2	2

Factor	Grade 4 conflict – serious					
A	2	2	3	3	3	3
B	4	4	3	3	4	4
C	1	3	1	3	1	3
D	3	3	3	3	3	3

Abb. 2 *Konfliktgrade (Kaparias et al., 2013)*

I.2 Begleitbefragungen

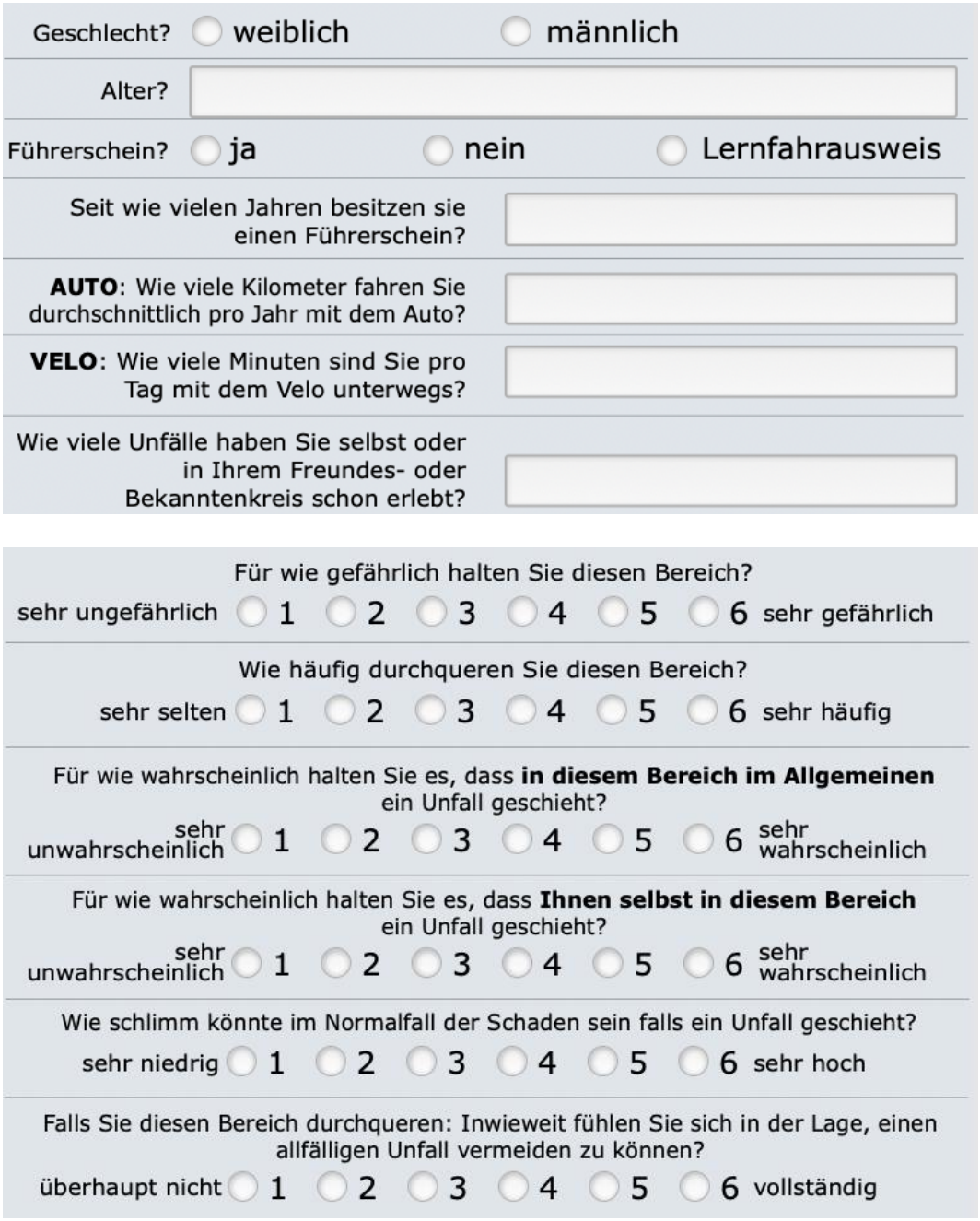


Abb. 3 *Fragebogen der Begleitbefragungen*

Glossar

Begriff	Bedeutung
Blickverhaltensanalyse (Eye Tracking)	Eine systematische Untersuchung dazu, wo und zu welchem Zeitpunkt ein Fahrer oder eine Fahrerin genau hinblickt
BSM	Black Spot Management
Erhebungsdaten	Daten, die mittels geeigneter Erhebungsmethoden aufgezeichnet werden können
Erhebungsmethode	Methode zur Messung von Erhebungsdaten
Gap Acceptance	Zeitliche Lücken, die für das Ein- bzw. Abbiegen oder Queren von nicht vortrittsberechtigten Verkehrsteilnehmenden genutzt werden
Georeferenzierung	Übertragung der internen Koordinaten einer Bild- oder Videodatei in ein geografisches Koordinatensystem
Gütekriterien	Kriterien, welche die Messung bzw. den Datenumfang und die Datenqualität beeinflussen
Infrastrukturtyp	Unterschiedliche Knotenformen, Querungsstellen des Fussverkehrs, spezifische Velolösungen
ISSI	Infrastruktur-Sicherheitsinstrumente
Korrekturhandlung	beispielsweise Brems- oder Ausweichmanöver, um einer Kollision zu verhindern
LSA	Lichtsignalanlage
Objektklassifizierung	(automatisierte) Zuordnung eines Objektes einer bestimmten Klasse (z.B. Fahrzeugtyp)
Open source	Software, deren Codes öffentlich sind und von Dritten eingesehen, abgeändert und genutzt werden können
PET	Post Encroachment Time = Zeitunterschied zwischen zwei Verkehrsteilnehmenden bezogen auf einen gemeinsamen räumlichen Bereich, den beide nacheinander aus unterschiedlichen Richtungen befahren (unabhängig einer potenziellen Kollision).
RSA	Road-Safety-Audit
RSI	Road-Safety-Inspection
Sicherheitsindikator	Grösse, die für die Beurteilung des Sicherheitsniveaus herangezogen werden.
Sicherheitskenngrösse	Grösse, anhand derer das Sicherheitsniveau beurteilt werden kann.
SN	Schweizer Norm (SN)
SVI	Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten
Temporegime	Signalisierte zulässige Höchstgeschwindigkeit
TTA	Time To Accident = Zeit bis zu einer potenziellen Kollision zweier Verkehrsteilnehmer, die zum Zeitpunkt des Beginns einer Korrekturhandlung (z.B. Bremsen) noch verbleibt
TTC	Time To Collision = Zeit bis zu einer potenziellen Kollision zweier Verkehrsteilnehmer, unabhängig vom Zeitpunkt einer allfälligen Korrekturhandlung (kontinuierliche Messung)
Trajektorien	Bewegungspfade, die Objekten zurücklegen
Trajektorienextraktion	Erfassen und Speichern der Bewegungspfade von Objekten, die sich in einer Videosequenz bewegen
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Literaturverzeichnis

Bundesgesetze

[1] Schweizerische Eidgenossenschaft (1958), „**Strassenverkehrsgesetz vom 19. Dezember 1958 (SVG)**“, *SR 741.01*, www.admin.ch.

Verordnungen

[2] Schweizerische Eidgenossenschaft (2007), „**Nationalstrassenverordnung (NSV) vom 7. November 2007**“, *SR 725.111*, www.admin.ch.

[3] Schweizerische Eidgenossenschaft (1962), « **Verkehrsregelverordnung vom 13. November 1962 (VRV)** », *SR 741.11*, www.admin.ch.

[4] Schweizerische Eidgenossenschaft (1979), „**Signalisationsverordnung vom 5. September 1979 (SSV)**“, *SR 741.21*, www.admin.ch.

Bundesbeschlüsse

[5] Schweizerische Eidgenossenschaft (1960), „**Bundesbeschluss vom 21. Juni 1960 über das Nationalstrassennetz**“, *SR 741.113.11*, www.admin.ch.

Normen

[6] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019), „**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Unfallraten und Unfallkostensätze**“, *VSS-41824*. 2019-03, Zürich

[7] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2017), „**Strassenverkehrs-sicherheit - Audit**“, *SN-641722*. 2017-06, Zürich

[8] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), „**Strassenverkehrs-sicherheit; Inspektion**“, *SN-641723*. 2016-03, Zürich

[9] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2015), „**Strassenverkehrs-sicherheit - Unfallschwerpunkt-Management**“, *SN-641724*. 2015-06, Zürich

[10] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2015), „**Strassenverkehrs-sicherheit - Einzelunfallstellen-Management**“, *SN-641726*. 2015-12, Zürich

Vollzugshilfe des ASTRA

[11] Bundesamt für Strassen ASTRA (2013), „**ISSI – Infrastruktur-Sicherheitsinstrumente**“, *Vollzugshilfe*

Dokumentation

[12] Amstad, C., Diener, S., Hackenfort, M., & Tsimitselis, L. (2015). Einfluss von Routine auf das Blickverhalten im Strassenverkehr. Strassenverkehr / Circulation Routière, 3, 14-19.

[13] Archer, j. (2005). Indicators for traffic safety assessment and prediction and their application in micro-simulation modelling: A study of urban and suburban intersections. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm

[14] Ghielmetti, M, Steiner, R., Leitner, J., Hackenfort, M., Diener, S. & Hartmut, T. (2017). Flächiges Queren in Ortszentren – langfristige Wirkung und Zweckmässigkeit (SVI 1604). Bern: Bundesamt für Strassen.

[15] Hackenfort, M. (2008). Entwicklung und Evaluation eines zielgruppenspezifischen Präventionsprogramms zur Verringerung von Wegeunfällen. Dissertation, Universität Duisburg-Essen.

[16] Hackenfort, M. (2012). Jenseits des Vorsatzes: Eine Untersuchung zu kognitiven Ursachen von regelwidrigem Verhalten im Radverkehr. In: Christian Schwarzenegger; Rolf Nägeli (Hg.). Fünftes Zürcher Präventionsforum. Raser, Risikofahrer und andere Verkehrsteilnehmer (171-238). Zürich: Schulthess.

[17] Hackenfort, M. (2013). Untersuchung der Wirkungen eines Unfallpräventionsprogramms mit konfrontativen Stilmitteln. Z. f. Verkehrssicherheit, 59(3). 155-160.

[18] Hydén, C. (1987). The development of a method for traffic safety evaluation: The Swedish Traffic Conflicts Technique (Bulletin 70). Lund: Lund Institute of Technology, Department of Traffic Planning and Engineering.

[19] InDeV (2018). In-Depth understanding of accident causation for Vulnerable road users. Final Report.

[20] Polders, E., & Brijs, T. (2018). How to analyse accident causation? A handbook with focus on vulnerable road users (Deliverable 6.3). Horizon 2020 EC Project, InDeV. Hasselt, Belgium: Hasselt University.

[21] InDeV (2016). In-Depth understanding of accident causation for Vulnerable road users. Review of current study methods for VRU safety. Appendix 6 – Scoping review: surrogate measures of safety in site-based road traffic observations.

[22] Ismail, K., Sayed, T., & Saunier, N. (2010) Automated analysis of pedestrian-vehicle con-flicts : a context for before-and-after studies. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, 2198(1), 52-64.

[23] Ismail, K., Sayed, T. & Saunier, N. & Lim, C. (2009). Automated analysis of pedestrian-vehicle conflicts using video data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2140(1), 44-54.

[24] Johnsson C., Laureshyn A. & De Ceunynck T. (2018) In search of surrogate safety indicators for vulnerable road users: a review of surrogate safety indicators, Transport Reviews, 38:6, 765-785

[25] Kaparias, I., Bell, M.G.H., Greensted, J., Cheng, S., Miri, A., Taylor, C. & Mount, B. (2010). Development and implementation of a vehicle-pedestrian conflict analysis method: Adaptation of a vehicle-vehicle technique. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2198, 75-82.

[26] Kaparias, I., Bell, M. G. H., Dong, W., Sastrawinata, A., Singh, A., Wang, X., & Mount, B. (2013). Analysis of Pedestrian–Vehicle Traffic Conflicts in Street Designs with Elements of Shared Space. Transportation Research Record, 2393(1), 21-30.

[27] Klebelsberg, D. (1982). Verkehrspsychologie. Berlin: Springer

[28] Laureshyn, A., Svensson, Å., & Hydén, C. (2010). Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation. Accident Analysis and Prevention, 42, 1637-1646.

[29] Laureshyn, A. (2010). Application of automated video analysis to road user behaviour (Doctoral dissertation, Lund University). Retrieved from http://portal.research.lu.se/portal/files/5337337/ 1522970.pdf

[30] Laureshyn, A., Várhelyi, A. (2018). The Swedish Traffic Conflict Technique. Observer's manual v. 1.0 (04/2018)

[31] Saunier, N., Sayed, T. & Ismail, K. (2010). Large-Scale Automated Analysis of Vehicle Interactions and Collisions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2147(1), 42-50.

[32] Scholl, L., Elagaty, M., Ledezma-Navaroro, B., Zamora, E. & Miranda-Moreno, L. (2019). A Surrogate Video-Based Safety Methodology for Diagnosis and Evaluation of Low-Cost Pedestrian-Safety Countermeasures: The Case of Cochabamba, Bolivia

[33] Slovic, P., Fischhoff, B. & Lichtenstein, S. (1982). Facts versus fears: Understanding perceived risk. In D. Kahneman, P. Slovic, & A. Tversky (Hrsg.), Judgment Under Uncertainty: Heuristics and biases (S. 463-489). Cambridge: Cambridge University Press.

[34] St-Aubin, P., Saunier, N. & Miranda-Moreno, L. (2015). Large-scale automated pro-active road safety analysis using video data. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, 58(Part B), 363-379.

[35] Tarko, A. (2020). Measuring Road Safety Using Surrogate Events. Cambridge/USA: Elsevier

[36] Zheng, L., Ismail, K. & Meng, X. (2014). Traffic conflict techniques for road safety analysis: open questions and some insights. Canadian Journal of Civil Engineering, 41(7), 633-641.

Projektabschluss

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 31.01.2023

Grunddaten

Projekt-Nr.:	SVI 2018/02
Projekttitel:	Alternative Methoden zur Messung lokaler Verkehrssicherheit
Enddatum:	30.06.2023

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Sicherheitsindikatoren: Als besonders vielversprechende alternative Sicherheitsindikatoren konnten insbesondere jene Indikatoren identifiziert werden, die ähnliche Eigenschaften wie tatsächliche Unfälle aufweisen und auf standardisierten Kriterien bzw. Messungen in Raum und Zeit beruhen. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Messverfahren wurden schliesslich die Indikatoren «Time To Collision» (TTC) sowie «Post Encroachment Time» (PET) als besonders geeignet eingeschätzt.
Methoden: Im Hinblick auf die gewünschten Anforderungen und Erwartungen an die alternative Methode, hat sich der videobasierte Ansatz als zweckmässigster Methodenansatz herauskristallisiert. Der Ansatz hat neben seinen günstigen Eigenschaften auch den Vorzug, dass bereits automatisierte Analyseverfahren zur Verfügung stehen, welche Messungen der geeigneten Sicherheitsindikatoren beinhalten.
Erkenntnisse Feldversuche: Videodaten konnten an sich in der benötigten Qualität und über längere Zeiträume erhoben werden, wobei die Wahl des Erhebungsstandortes sowie die Aufnahmeperspektive für die nachgelagerten Analysen von grosser Bedeutung sind. Äussere Rahmenbedingungen wie Wetterbedingungen oder Lichtverhältnisse wirken sich weniger als erwartet auf die Qualität der Resultate der automatisierten Videoanalyse aus. Die Messbarkeit der Sicherheitsindikatoren wird aber durch die eingesetzten Anwendungen limitiert. Insbesondere der Indikator TTC bedingt eine hohe Genauigkeit der extrahierten Trajektorien bzw. deren Umlegung in ein Koordinatensystem, die nicht wie gewünscht erreicht werden konnte. Fehldetektionen und Ungenauigkeiten, die im Resultat der automatisierten Analysen enthalten sind, erfordern eine kritische Prüfung und Nachbearbeitung der Resultate. Der Indikator PET hat wiederum den Nachteil, dass der Indikatorwert alleine nur bedingt geeignet erscheint, das Sicherheitsniveau zu beschreiben. Die Berücksichtigung weiterer Kriterien wie beispielsweise die Geschwindigkeit der Beteiligten Verkehrsteilnehmenden ist hilfreich, das Risiko der ermittelten Begegnungen besser zu beschreiben. Die Beurteilung bzw. Validierung der Resultate der automatisierten Sicherheitsanalyse stellt eine grosse Herausforderung dar. Es hat sich herausgestellt, dass weder die manuelle Konfliktanalyse noch die Analyse des Unfallgeschehens für die Validierung ausreichend geeignet sind.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die gesetzten Ziele konnten weitgehend erreicht werden. Eine alternative Methode mit integrierter Messung geeigneter Sicherheitsindikatoren anhand von Videoaufnahmen konnte definiert und im Rahmen von Feldversuchen an unterschiedlichen Infrastrukturanlagen getestet werden. Die mittels Anwendung kommerzieller Software durch teilautomatisierte Auswertung gewonnenen Resultate wurden objektiv geprüft, einer Nachbearbeitung unterzogen und - wo dies möglich war - den Resultaten der Begleituntersuchungen (manuelle Konfliktanalyse) sowie der Unfallanalyse gegenübergestellt. Das methodische Vorgehen ist ebenso dokumentiert wie die Möglichkeiten und Limitationen der alternativen Methode sowie die sich aus den Erkenntnissen der Feldversuche ableitbaren Empfehlungen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit. Eine konkretere Einordnung der ermittelten Sicherheitskennwerte im Hinblick auf eine Definition von Richtwerten zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus von Infrastrukturanlagen war auf Basis der erzielten Ergebnisse allerdings nicht möglich.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die in den Feldversuchen getestete alternative Methode konnte im gewählten Versuchsaufbau nicht die erhoffte Qualität der automatisierten Auswertungen erreichen, die nötig wäre, um valide Messergebnisse der definierten Sicherheitsindikatoren und weiterer wesentlicher Parameter zur gesamthaften Beurteilung der Verkehrssicherheit einer Infrastrukturanlage zu erhalten. Auch die Nutzbarkeit der ermittelten Sicherheitskenngrössen ist vor diesem Hintergrund fraglich. Die getestete Methode liefert aber erste Anhaltspunkte für Auffälligkeiten in den Verkehrsabläufen, die mittels qualitativer Analysen überprüft werden müssen.
Für die Empfehlungen hinsichtlich der Anwendbarkeit der Methode ergeben sich aus den Erkenntnissen der durchgeführten Methodentestung, dass der Ansatz unter bestimmten Voraussetzungen geeignet sein kann, die analytische Verkehrssicherheitsarbeit zu unterstützen. Gleichzeitig besteht aber auch die Notwendigkeit von Weiterentwicklungen auf dem Sektor der automatisierten Auswertetechnologie, um die Qualität der erzielbaren Ergebnisse zu steigern.

Publikationen:

Steiner, Rolf / Leitner, Jakob / Hackenfort, Markus / Doerfel, Marion / Lüthi, Beat (2023): Alternative Methoden zur Messung lokaler Verkehrssicherheit. Forschungsarbeit 2018/002 auf Antrag der Schweizerischen Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI).

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Steiner Vorname: Rolf

Amt, Firma, Institut: verkehrsteiner AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die BK beurteilt das Forschungsprojekt, den Schlussbericht sowie die darin enthaltenen Schlussfolgerungen positiv und genehmigt den Schlussbericht SVI 2018/002 Alternative Methoden zur Messung der lokalen Verkehrssicherheit. Die BK bestätigt, dass die Forschungsstelle die definierten Forschungsziele sowie die Anforderungen an die Forschungsarbeiten umgesetzt und erfüllt hat. Die Sitzungen der BK wurden effizient und zielorientiert durchgeführt und die Inputs der BK wurden in die Forschungsarbeiten aufgenommen und soweit möglich berücksichtigt. Aufgrund der ausserordentlichen Lage (Pandemie) und der damit verbundenen Verzögerungen wurden die wesentlichen Änderungen in der BK besprochen und auch dem ASTRA kommuniziert. Dies betraf insbesondere die Reduktion der Anzahl geplanter Feldversuche. Auf den begründeten Antrag der BK zur Erhöhung des Forschungskredits ist das ASTRA nicht eingegangen. Auf die Einordnung der ermittelten Sicherheitskennwerte im Hinblick auf die Definition von Richtwerten zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus von Infrastrukturanlagen konnte so nicht eingegangen werden.

Umsetzung:

Im Hinblick auf die gewünschten Anforderungen und Erwartungen an die alternative Methode, hat sich der videobasierte Ansatz als zweckmässigster Methodenansatz herauskristallisiert. Der Ansatz hat neben seinen günstigen Eigenschaften auch den Vorzug, dass bereits automatisierte Analyseverfahren zur Verfügung stehen, welche Messungen der geeigneten Sicherheitsindikatoren beinhalten. Die Forschungsarbeit zeigt zum jetzigen Zeitpunkt die Grenzen und Möglichkeiten einer alternativen Methode zur Messung der lokalen Verkehrssicherheit auf. Insbesondere krankt die Anwendbarkeit der Methode an noch fehlender Qualität bzw. technischen Limitierungen zur Trajektorienbestimmung aus dem Videomaterial und an einem Set valider Sicherheitsindikatoren. Es wurde jedoch auch auf die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der automatisierten Auswertetechnik und deren Qualität zur Unterstützung einer analytischen Verkehrssicherheitsarbeit hingewiesen.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Verkehrssicherheitsforschung kann keinen eigenen Beitrag an bessere Technologien und Auswertungstools von Trajektorien aus Videobildmaterial leisten. Eine hohe Qualität dieser Grundlagendaten ist jedoch zwingend für die breite Anwendung der untersuchten Methoden. Weiterer Forschungsbedarf besteht jedoch hinsichtlich der verwendeten Sicherheitsindikatoren bzw. der daraus ableitbaren Sicherheitskenngrössen. Darüber hinaus sind geeignete Sicherheitskenngrössen zu definieren und zu validieren, die aus messbaren Sicherheitskenngrössen und weiteren relevanten Messgrössen gebildet werden können. Im Hinblick auf eine absolute Sicherheitsbewertung ist auch die Frage nach sinnvoll anwendbaren Grenzwerten zu untersuchen. Auch die derzeit verfügbaren Produkte zur automatisierten analytischen Auswertung müssen weiterentwickelt werden, um einer nachvollziehbaren Sicherheitsbewertung gerecht zu werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Aus der Forschung ergeben sich keine Einflüsse auf das Normenwerk.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Skeledzic Vorname: Stevan

Amt, Firma, Institut: Kanton Zürich, Baudirektion, Tiefbauamt, Fachstelle Verkehrssicherheit

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Skeledzic Stevan UINPTE
2023.01.31 14:30:46 +01'00'