

Verkehrsregulierung an Mautstellen durch Optimierung der Spureinteilung VaMOS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2015
(VIF2015)

Oktober 2017



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

SLR Engineering GmbH
Gartengasse 19
A – 8010 Graz



Technische Universität Graz
Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV)
Rechbauerstraße 12
A – 8010 Graz



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Verkehrsregulierung an Mautstellen durch Optimierung der Spureinteilung VaMOS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2015)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Oliver SIDLA

Dipl.-Ing. Robert NEUHOLD

MSc. Filippo GAROLLA

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin FELLENDORF

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

SLR Engineering GmbH

TU Graz / Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ISV)

Liste der verwendeten Abkürzungen

BA	...	Bildanalyse
BV	...	Bildverarbeitung
CA	...	Clusteranalyse
CNN	...	Convolutional Neural Network
DL	...	Deep Learning
DTV	...	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
FZ	...	Fahrzeug
HW	...	Hardware
LOS	...	Level of Service
MS	...	Mautstelle
NN	...	Neurales Netzwerk
SW	...	Software

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
1. Einleitung	9
1.1. Problemstellung	9
1.2. Stand der Forschung	11
1.3. Projektziel	12
2. Methodik	14
2.1. Prognosemodell	15
2.1.1. Datengrundlage für die Prognose	15
2.1.2. Trend-Prognose	17
2.1.3. Langfristprognose	21
2.1.4. Kurzfristprognose	22
2.2. Verkehrsmodell	23
2.2.1. Datengrundlage für das Verkehrsmodell	23
2.2.2. Aufbau des Verkehrsmodells	24
2.2.3. Simulation als Grundlage der Optimierung	26
2.3. Die Visuelle Messung des Verkehrszustandes	28
2.4. Die Optimierung des Verkehrsflusses	33
2.5. Evaluierungsmethodik	38
3. Projektergebnisse	42
3.1. Visuelle Verkehrszustandsmessung	42
3.2. Verkehrsprognose	45
3.2.1. Ergebnisse der Trend-Prognose	45
3.2.2. Ergebnisse der Langfristprognose	47
3.2.3. Ergebnisse der Kurzfristprognose	48
3.3. Evaluierung	50
3.3.1. Wirkung anhand Basiseinstellung des Algorithmus	51
3.3.2. Wirkung durch Variation der Algorithmus Parameter	58
4. Zusammenfassung	63
Literaturverzeichnis	70
Anhang	73

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Luftbild der Mautstelle Schönberg an der Autobahn A13 (Quelle: basemap.at)	10
Abbildung 2: Methodischer Ablauf im Projekt VaMOS.....	14
Abbildung 3: Methodischer Aufbau des Verkehrsprognosemodells in VaMOS.....	15
Abbildung 4: Lage und Bezeichnung der verfügbaren Zählstellen auf der Autobahn A12 und A13 in Tirol, die rot markierten Querschnitte wurden für die Prognose verwendet.....	16
Abbildung 5: Auszug minutenfeiner Querschnittsdaten, Zählstelle MQ_A13_1_010.368.....	16
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung aller Tagesnetzganglinien in einem Cluster	18
Abbildung 7: Summe der Silhouettenbandbreite je Cluster in Abhängigkeit der Clusterzahl.	18
Abbildung 8: Mittlere Silhouettenbandbreite über alle Cluster abhängig von der Clusterzahl	19
Abbildung 9: Häufigkeit der Saisonen (links) und Tagestypen (rechts) bei Cluster 13	20
Abbildung 10: Auszug aus den Abfertigungsdaten der Mautstelle Schönberg.....	24
Abbildung 11: Verkehrsmodell für die MS Schönberg Fahrtrichtung Italien mit der Bezeichnung der einzelnen Spuren/Abfertigungsschalter	24
Abbildung 12: Verteilungsfunktion der Aufenthaltszeiten eines Fahrzeuges im Verkehrsmodell an den Automaten- und Mautnerschaltern (Spur 2-11).....	26
Abbildung 13: Montageorte der Kameras der Testinstallation an der MS Schönberg Wie in den blau hinterlegten Feldern angezeigt, werden die Fahrbahnen in der Simulation und Messung von unten nach oben durchnummeriert.	29
Abbildung 14: Die Sichtfelder der installierten Kameras 1-4, diese Daten wurden für die offline Messung aufgezeichnet und für die visuelle Analyse verwendet.....	29
Abbildung 15: Die Belegungsdetektion erfolgt durch die Klassifikation von ca. 1m langen Messfeldern entlang jeder Fahrspur in ‚belegt‘ bzw. ‚frei‘.	31
Abbildung 16: Beispiel für die Auswertung eines Bildes. Die grünen Bereiche markieren als belegt detektierte Fahrbahnabschnitte, rote Bereiche als frei detektierte Abschnitte, alle Bereiche in Blau markieren detektierte Warteschlangen.	32
Abbildung 17: Google Maps Projektion des Belegungsstatus. Die Projektion der Warteschlangen kann aus der bekannten Kamerakalibration berechnet werden.	32
Abbildung 18: Ein Testbild der Aufzeichnungen der MS St Michael. Tracking Ergebnisse (links) und Fahrzeugklassifikation (rechts).	33
Abbildung 19: Koppelung von SLR Software und Verkehrssimulationssoftware (VISSIM). ..	34
Abbildung 20: Die Struktur eines Reinforcement Learning Netzwerkes (Universität Frankfurt a. Main, Institut für Informatik). Der Agent lernt aus den Rewards von Aktionen, welche Auswirkung diese haben. Die Umgebung wird durch die Aktionen direkt beeinflusst.	35

Abbildung 21: Beispielhafte Auswertung der Abfertigungsdaten für den 19.08.2017, links die täglichen Verkehrsmengen je Fahrstreifen, rechts die Menge je Schaltertyp.....	39
Abbildung 22 Anzeigetafel an der A10 zur Verteilung des Verkehrs. Laut Erfahrungswerten der ASFINAG befolgen ca. 10-15% der Lenker diese Hinweise (Bildquelle: ASFINAG)	40
Abbildung 23: Die Messung der Staulängen aller Kameras für den 3.6.2017.	43
Abbildung 24: Die Messung der Staulängen aller Kameras für den 4.6.2017.	44
Abbildung 25: Die Messung der Staulängen aller Kameras für den 5.6.2017.	44
Abbildung 26: Repräsentative Tagesnetzganglinien als Ergebnis der Trendprognose	45
Abbildung 27: Beispiel einer Langfristprognose mit Prognose ab 6:00 Uhr (links) bzw. 14:00 Uhr (rechts) des aktuellen Tages (in diesem Fall der 11.06.2016)	47
Abbildung 28: Kurzfristprognose für die Stunde 6:00-7:00 Uhr am 17.06.2016	49
Abbildung 29: Tagesverlauf der stündlichen Verkehrsstärken für die Fahrstreifen 1 bis 5 (oben) bzw. 6 bis 9 (unten) mit und ohne Optimierung am 05.06.2017	51
Abbildung 30: Mittlere Reisezeiten zum Passieren der Mautstelle Schönberg über alle Fahrstreifen mit und ohne Optimierung für den 05.06.2017	52
Abbildung 31: Boxplot der mittleren Reisezeiten mit und ohne Optimierung über alle Fahrstreifen für den 05.06.2017	53
Abbildung 32: Rückstaulängen an der Mautstelle Schönberg mit und ohne Optimierung an den Fahrstreifen 1 bis 5 für den 05.06.2017	53
Abbildung 33: Rückstaulängen an der Mautstelle Schönberg mit und ohne Optimierung an den Fahrstreifen 6 bis 9 für den 05.06.2017	54
Abbildung 34: Häufigkeit der mittleren Staulängen an der Mautstelle Schönberg nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für den 05.06.2017	54
Abbildung 35: Tagesverlauf der Verkehrsstärken am 19.08.2017 über alle Fahrstreifen (links oben), den Fahrstreifen 1-5 (rechts oben), den Fahrstreifen 6-9 (links unten) sowie die Fächer- und Videomautspuren 10-13 (rechts unten)	55
Abbildung 36: Mittlere Reisezeiten zum Passieren der Mautstelle Schönberg mit und ohne Optimierung über alle Fahrstreifen für den 19.08.2017	56
Abbildung 37: Boxplot der mittleren Reisezeiten mit und ohne Optimierung über alle Fahrstreifen für den 19.08.2017	56
Abbildung 38: Rückstaulängen mit und ohne Optimierung an den Fahrstreifen 1 bis 5 (oben) bzw. 6 bis 9 (unten) für den 19.08.2017	57
Abbildung 39: Häufigkeit der mittleren Staulängen an der Mautstelle Schönberg nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für den 19.08.2017	58

Abbildung 40: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung für eine Befolgungsrate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 03.06.2017	59
Abbildung 41: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für eine Befolgungsrate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 03.06.2017	59
Abbildung 42: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 29.07.2017	60
Abbildung 43: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 03.06.2017.....	60
Abbildung 44: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung für eine Befolgungsrate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 29.07.2017	61
Abbildung 45: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für eine Befolgungsrate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 29.07.2017	61
Abbildung 46: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 29.07.2017	62
Abbildung 47: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 29.07.2017.....	62

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Definition der Saisonen und Tagestypen auf Basis der Clusteranalyse	20
Tabelle 2: Zuordnung der repräsentativen Ganglinien (Cluster) zu Saisonen und Tagestypen	46
Tabelle 3: Absoluter und relativer Fehler bei der Langfristprognose für den 11.06.2016	48
Tabelle 4: Absoluter und relativer Fehler bei der Kurzfristprognose 6:00-7:00 Uhr am 17.06.2016.....	49
Tabelle 5: Übersicht der betrachteten Tage in der Evaluierung	50
Tabelle 6: Übersicht der simulierten Szenarien mit Variation der Algorithmus Parameter	58

1. EINLEITUNG

Aufgrund der zentralen Lage bilden die österreichischen Autobahnen einen wichtigen Teil des transnationalen Fernstraßennetzes in Europa. An den Haupttransitrouten sind im Zulauf an Mautstellen immer wieder Stauerscheinungen, verbunden mit hohen Reisezeitverlusten, zu beobachten. Der Grund von Rückstaus liegt dabei nicht ausschließlich nur in einer überhöhten Verkehrsnachfrage, sondern **oftmalig auch in einer ineffizienten, unausgeglichene Aufteilung der ankommenden Fahrzeuge** auf die verfügbaren Abfertigungsspuren an der Mautstation. Bei manchen Mautstationen ist daher oftmalig ein Rückstau an einer Seite (z.B. rechter Fahrstreifen der Autobahn) zu beobachten, wohingegen auf der anderen ein freier Verkehrsfluss bis zu den Abfertigungsspuren der Mautstation gegeben ist. Die Ursache kann dazu einerseits an einer unpassenden Zuordnung der Zahlungsmethoden zu den ankommenden Fahrzeugen und/oder einer **fehlenden Information zur Fahrstreifenwahl** bzw. empfohlenen Zahlungsmethode an die Verkehrsteilnehmer liegen.

Diese ineffiziente Spuraufteilung kann häufig an der Mautstelle Schönberg in Tirol auf der Autobahn A13 beobachtet werden, vor allem an Tagen mit starkem Urlauberreiseverkehr (z.B. Samstag im Sommer). Aus diesem Grund wurde ein Forschungsprojekt namens **VaMOS** initiiert, dessen Ziel es ist die Spurzuteilung im Vorbereich der Mautstelle zu optimieren.

Zuerst wird in Kapitel 1.1 die Problemstellung an Ort und Stelle vorgestellt. Das Kapitel 1.2 widmet sich danach dem Stand der Forschung und präsentiert Veröffentlichungen zum Thema Modellierung und Optimierung des Verkehrsflusses an Autobahnmautstellen. Schließlich werden in Kapitel 1.3 die Forschungsfragen und Projektziele formuliert.

1.1. Problemstellung

Die Mautstelle Schönberg in Tirol befindet sich auf der Brennerautobahn A13 etwa 10km südlich von Innsbruck. Die topografischen Gegebenheiten der Mautstelle bzw. deren Umgebung sind hier nicht ideal, vor allem in Fahrtrichtung Süden (Richtung Italien) haben ortsunkundige Verkehrsteilnehmer immer wieder Orientierungsprobleme da die Mautstelle aus dieser Richtung von weitem nicht einsehbar und erkennbar ist.

Folgende ungünstige Lagefaktoren treten bei der Mautstelle Schönberg Richtung Italien auf:

- Aus der Ferne nicht oder nur schwer sichtbar
- Hohe Längsneigung von 5-6%
- Tunnel und Kurve mit engem Radius (ca. 130m) knapp vor der Mautstelle

- Anschlussstelle Schönberg direkt vor der Mautstelle
- Hoher Schwerververkehrsanteil
- Großer Anteil ortsunkundiger Verkehrsteilnehmer
- Viele Informationen (Schilder, Signale) für den Verkehrsteilnehmer (auch aufgrund der Anschlussstelle)



Abbildung 1: Luftbild der Mautstelle Schönberg an der Autobahn A13 (Quelle: basemap.at)

Aufgrund dieser ungünstigen Randbedingungen treten bei hohem Verkehrsaufkommen Probleme im Verkehrsablauf an der Mautstelle auf. Dabei kann es vorkommen, dass einzelne Spuren zu den Mautschaltern gestaut sind (z.B. im rechten Bereich), während andere Spuren nur wenig ausgelastet sind. Die Herausforderung ist es nun durch eine verbesserte Spurzuteilung zu den Mautschaltern einen verbesserten Verkehrsablauf an der Mautstelle zu erzielen.

Das vorliegende Projekt VaMOS befasst sich mit dem Thema Steuerung des Verkehrsflusses, das Thema der optimalen Beschilderung wurde in einem vorangehenden Projekt (RENNT) behandelt und ist nicht Teil von VaMOS. VaMOS baut hier jedoch auf die Erkenntnisse von RENNT auf (z.B. reduzierte, klare Beschilderung im Zulauf der Mautstelle).

1.2. Stand der Forschung

Mehrere Publikationen befassten sich mit dem Thema Modellierung und Optimierung des Verkehrsablaufs an Mautstellen. Hinsichtlich dem Betrachtungsgebiet gibt es hier keine Studie die sich explizit auf österreichische Autobahnen bezieht, die Vielzahl der Veröffentlichungen präsentiert Ergebnisse aus den Vereinigten Staaten (USA). Außerdem ist ein Vergleich zwischen unterschiedlichen Mautstellen meistens schwierig aufgrund der speziellen Gegebenheiten (Lage und Zweck im Verkehrsnetz, Fahrstreifen, Anzahl Schalter, Zahlungsmethoden etc.). Es können jedoch Erkenntnisse zu Modellierung von Mautstellen, Optimierungspotential, und gewählter Methoden für das vorliegende Projekt hilfreich sein.

Im Folgenden werden einzelne Publikation zu diesem Thema kurz vorgestellt:

Aycin [2] entwickelte eine Methode mit der die Kapazität von Mautstellen in Abhängigkeit von der Zahlungsmethode und den Fahrzeugtypen abgeschätzt werden kann. Übersteigt die Nachfrage die Kapazität, dann ermöglicht dieses Verfahren eine Berechnung der Wartezeiten und Rückstaulängen. Angewendet wurde die Methode von Aycin an der Mautstelle zur Throgs Neck Bridge über den East River in New York City. Die Berechnungen der Wartezeiten und Staulängen erbrachte hier plausible Ergebnisse die vergleichbar mit den Ergebnissen aus einer Verkehrssimulation waren.

Ein größerer Bereich um eine Mautstelle (Autobahnnetz mit Auf- und Abfahrten) wurde in der Studie von Nezamuddin und Al-Deek modelliert [18]. Dabei wurden verschiedene Regeln für die Fahrstreifenwahl in Abhängigkeit von der bevorzugten Zahlungsmethode je Fahrzeugtyp im Verkehrsmodell implementiert. Die Verkehrssimulation mit den implementierten Regeln zeigte hier einen verbesserten Verkehrsfluss ohne Staubildung im Vergleich zum Ausgangsfall, bei dem sehr viele Fahrzeuge die rechten Fahrstreifen der Mautstelle bevorzugten. Damit konnte die Kapazität der Mautstelle um etwa 500 Kfz/h erhöht werden (entspricht etwa 15%).

Radwan und Zarillo [20] analysierten die Kapazitäten und Rückstaulängen an mehreren Mautstellen in Florida (USA) anhand mikroskopischer Verkehrsflusssimulation. Dabei verwendeten sie die SHAKER Methode (beschrieben in [22]). SHAKER ist ein makroskopisches, deterministisches Modell zur Staubildung für Mautstellen und wurde am Center of Advanced Transportation Systems Simulation der University of Central Florida entwickelt. Radwan und Zarillo [20] kalibrierten das SHAKER Modell durch Verwendung von Realdaten und können damit die Kapazitäten und Rückstaulängen für verschiedene Typen von Mautstellen abschätzen.

Die Optimierung des Verkehrsablaufs war auch das Ziel der Studie von Bains et al. [4]. Dabei wurde ein mikroskopisches Verkehrsmodell für eine Mautstelle aufgebaut und mit Realdaten der Mautstelle kalibriert. Zwei verschiedene Optimierungsszenarien an der Mautstelle wurden in der Simulation angewendet: ein kamerabasiertes Kennzeichenerfassungssystem und eine spezielle Separation der Fahrzeugtypen. Daraus konnte in der Simulation für die Spitzenstunde eine Kapazitätssteigerung von 12% für das erste Szenario bzw. 15% für das zweite Szenario erzielt werden.

Es gibt noch weitere Studien die sich mit dem Thema Modellierung und Optimierung des Verkehrsflusses an Mautstellen befassen, jedoch mit unterschiedlichem Schwerpunkt zu: Fahrverhalten in Kombination mit bauliche Möglichkeiten [21], Kapazitätssteigerung [24], Verlustzeitabschätzung [19] und LOS Berechnung [12] auf Basis eines makroskopischen Modells, Entwicklung eines Wartezeitmodells [15], Fahrverhaltensmodelle [1] und deren Übertragbarkeit auf andere Mautstellen [13].

Hinsichtlich der Prognose von Verkehr werden häufig Neuronale Netzwerke (NN) verwendet. Dies passiert vor allem in der Kurzfristprognose (vgl. [11] und [26]), jedoch selten in der Optimierung von Verkehrsabläufen. Neuronale Netze in Kontext mit visueller Verkehrsmessung (z.B. LOS) werden vermehrt angewendet für die Erkennung von Objekten, da aufgrund der aktuellen Forschung hinsichtlich Deep Learning neue Möglichkeiten bestehen. Diese Typen von Netzwerken zeichnen sich durch hohe Erfassungsraten und einer geringen Anzahl falsch detektierter Objekte aus (vgl. [5] und [14]). Der Nachteil besteht hier nur darin, dass diese Netze einen sehr hohen Bedarf an Ressourcen und Systemvoraussetzungen für Computer aufweisen und somit eine Echtzeit-CPU-Implementierung nur schwer möglich bzw. sehr aufwendig ist.

1.3. Projektziel

Das Ziel von VaMOS ist die Optimierung der Abfertigung an der Mautstelle Schönberg:

Ein Prototyp für die fahstreifenfeine Verkehrszustandsanalyse und einer Durchflussoptimierung inklusive mittelfristiger Auslastungsprognose, wurde dafür entwickelt, wobei methodisch folgende Hauptkomponenten im Rahmen des Projektes umgesetzt und demonstriert wurden:

- Eine fahstreifenfeine Verkehrsmessung, inklusive Staulängen, im Sekundentakt über die gesamte Mautstation Fahrtrichtung Ost.
- Eine laufende Schätzung und Prognose des Verkehrsaufkommens anhand laufender Messdaten in Kombination mit einem aus historischen Daten trainierten Modell.

- Einer Echtzeit Berechnung und Optimierung des Verkehrsflusses und daraus erzeugter (simulierter) Hinweissignale an die Verkehrsteilnehmer.
- Ein integriertes Model für die Simulation – Optimierung – Evaluierung der Mautstation Schönberg, um Optimierungsstrategien und Parameter-Optimierungen berechnen zu können.
- Eine Echtzeit Demonstration der Verfahren anhand eines Testsystems mit 4 Kameras an der Mautstation Schönberg.

Die grundlegende Idee von VaMOS für die Optimierung der Abfertigung besteht darin, den Verkehrszustand bzw. die **Spurbelegung am gesamten Mautvorplatz mit Kameras zu vermessen**, und daraus **Leitsignale für die Verkehrsteilnehmer zu berechnen**. Die Fahrzeuglenker sollen durch die Hinweise bei Bedarf auf schwächer belastete Abfertigungsspuren gelenkt werden, um den Gesamtdurchsatz zu maximieren. Zu diesem Zweck wurden im Projekt geeignete **Methoden zur Prognose, Messung und Optimierung des Verkehrsaufkommens** entwickelt und getestet.

Als wichtigstes Projektziel wurde ein Prototyp für die fahstreifenfeine Verkehrszustandsanalyse und Optimierung der Spurzuteilung entwickelt und vor **Ort an der Mautstelle Schönberg installiert und im Frühsommer 2017 in Betrieb genommen**. Mit insgesamt vier hochauflösenden Kameras erfasste Messdatendaten wurden über einen Zeitraum von 3 Monaten aufgezeichnet, in Echtzeit ausgewertet und mit Hilfe von Simulationen und einem Optimierungsframework analysiert.

Als Ergebnis der Datenanalyse und des Testbetriebes in VaMOS kann gezeigt werden, dass die mittleren Staulängen und die daraus resultierenden Wartezeiten an Tagen mit mittlerem und hohem Verkehrsaufkommen reduziert werden können. Es ist insbesondere möglich, den Aufbau und die Stärke von Spitzenwerten zu jenen Zeiten zu reduzieren, an denen eine vollständige Sättigung der Mautstation noch nicht erreicht ist. Unter guten Randbedingungen sollte sogar fast eine Halbierung der durchschnittlichen Wartezeiten möglich sein: beispielsweise kann am 5.6.2017 die Reisezeit an der Mautstation von ca. 150 Sekunden mit der vorgeschlagenen Optimierungsmethode auf ca. 85 Sekunden verringern werden.

2. METHODIK

Die grundlegende Methodik in VaMOS gliedert sich in mehrere Bausteine und Prozesse. Eine Übersicht inklusive der verwendeten Datengrundlagen liefert Abbildung 2. Hauptbausteine sind hier die Verkehrsprognose zur Berechnung der zu erwartenden Verkehrsmengen an der Mautstelle und die Optimierung zur Verbesserung der Spurzuteilung am Vorplatz der Mautstelle. Dazwischen fungiert ein Verkehrsmodell für die Mautstelle das mit Informationen aus der Verkehrsprognose gefüttert wird sowie zur Evaluierung des entwickelten Optimierungsalgorithmus herangezogen wird. Parallel dazu wird der Verkehrszustand direkt an der Mautstelle mittelsameratechnologie erfasst. Die Kameravideos werden sowohl zum Kalibrieren des Verkehrsmodells als auch für die Verkehrszustandserkennung verwendet. Der entwickelte Optimierungsalgorithmus basiert auf der Detektion von Rückstaulängen und wurde zum Zwecke der Evaluierung auch in das Verkehrsmodell implementiert, da eine reale Anwendung des Optimierungsalgorithmus (Änderung der Beschilderung und Signalisierung) im Rahmen des Projektes aus organisatorischen Gründen nicht möglich war. Der Algorithmus ist sowohl in der Simulation als auch im Realbetrieb anwendbar und wurde im Rahmen von VaMOS anhand von Simulationen evaluiert.

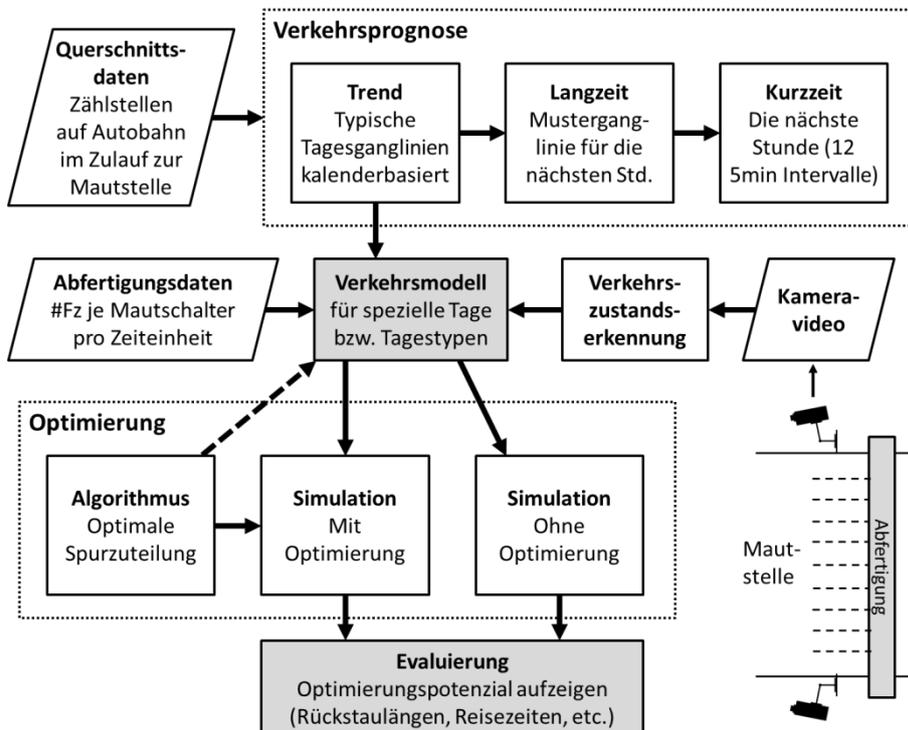


Abbildung 2: Methodischer Ablauf im Projekt VaMOS

Die Verkehrsprognose gliedert sich je nach Prognosehorizont in drei Ebenen (Trend-, Langzeit- und Kurzzeitprognose) und verwendet Querschnittsdaten von Autobahnzählstellen als Eingangsdaten. Die einzelnen Ebenen des Prognosemodells werden in Kapitel 2.1 näher vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 2.2 der Aufbau des Verkehrsmodells und die Modellierung des Fahrverhaltens an der Mautstelle inklusive der dazu notwendigen Eingangsdaten behandelt. Danach wird in Kapitel 2.3 die kamerabasierte, visuelle Erkennung des Verkehrszustandes beschrieben. Die Funktionalität des Optimierungsalgorithmus wird in Kapitel 2.4 erläutert. Abschließend wird in Kapitel 2.5 die Methodik zur Evaluierung des Optimierungsalgorithmus vorgestellt.

2.1. Prognosemodell

Das Verkehrsprognosemodell in VaMOS gliedert sich je nach prognostizierter Zeitspanne in drei Ebenen (Trend-, Langfrist- und Kurzfristprognose). Jede Ebene baut auf unterschiedliche Daten auf, jedoch ist die Prognosemethodik zwischen den einzelnen Ebenen gekoppelt. Eine Übersicht zum Ablauf der Prognose liefert Abbildung 3, die verwendete Datengrundlage sowie die einzelnen Ebenen der Verkehrsprognose werden anschließend in den folgenden Unterkapiteln näher vorgestellt.

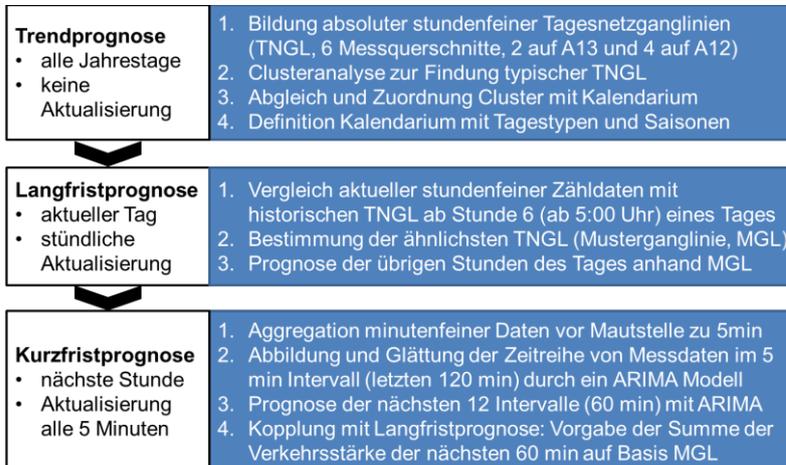


Abbildung 3: Methodischer Aufbau des Verkehrsprognosemodells in VaMOS

2.1.1. Datengrundlage für die Prognose

Für den Aufbau des Prognosemodells wurden Querschnittsdaten verwendet. Diese stammen von Dauerzählstellen auf der A12 Inntalautobahn und der A13 Brennerautobahn in Richtung Mautstelle Schönberg/Italien. Insgesamt wurden stundenfeine Verkehrsdaten von 7 Querschnitten auf der A12 und 11 Querschnitten auf der A13 für den Zeitraum Jan 2013 bis Aug 2016 zur Verfügung gestellt. Zusätzlich waren minutenfeine Verkehrsdaten von der

Zählstelle MQ_A13_1_010.368 direkt vor der Mautstelle für ein Jahr (Sep 2015 bis Aug 2016) verfügbar. Für die Verkehrsprognose wurden nicht alle Querschnitte benötigt, es wurden hier 4 von der A12 und 2 von der A13 ausgewählt (s. rot markierte Querschnitte in Abbildung 4).

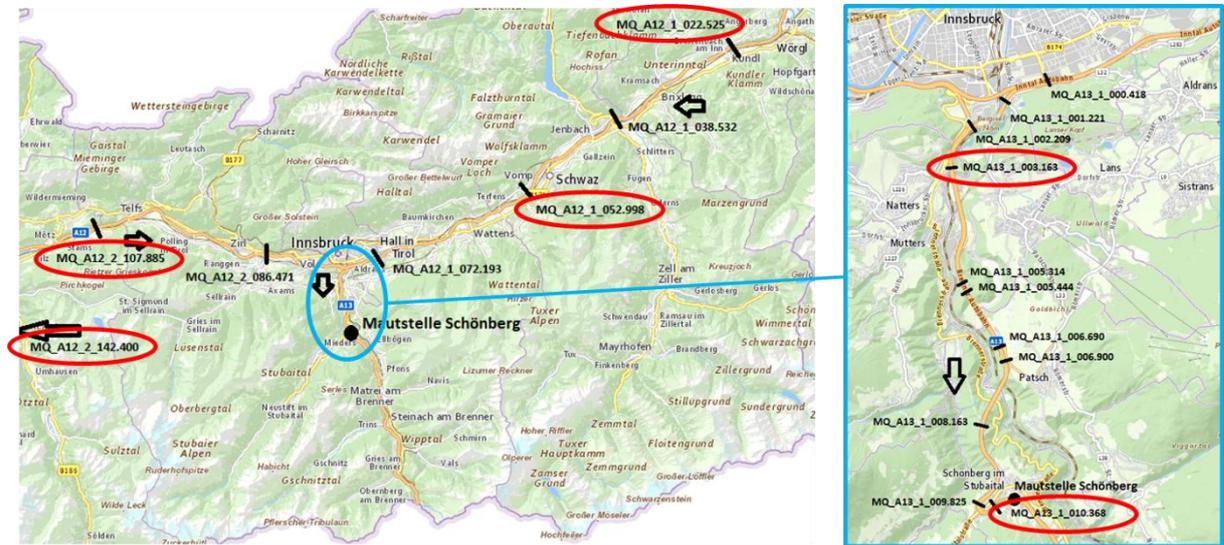


Abbildung 4: Lage und Bezeichnung der verfügbaren Zählstellen auf der Autobahn A12 und A13 in Tirol, die rot markierten Querschnitte wurden für die Prognose verwendet

Die stundenfeinen Verkehrsdaten wurden für Trendprognose (Clusteranalyse) und die Langzeitprognose, die mintunfeinen Verkehrsdaten für die Kurzzeitprognose herangezogen. Die stundenfeinen Querschnittsdaten enthalten fahrzeuggruppenfeine (PKW und LKW) Verkehrsstärken, die minutenfeinen Querschnitte zusätzlich noch weitere Projektirrelevante Kenngrößen wie Geschwindigkeit, Zeitlücke etc. (s. exemplarischer Rohdatenauszug in Abbildung 5).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	Datum	Zeit	Objekt	Objekt-Id	Route	Stationierung	caid	q-Kfz	q-Pkw	q-Lkw	v-Kfz	v-Pkw	v-Lkw	Dichte	QB	A-Lkw	t-Netto	Beleg	s
2	01.09.2015	00:00:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	120	120	0	0	56	56	2	120	0	25,4	1	7
3	01.09.2015	00:01:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	01.09.2015	00:02:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	01.09.2015	00:03:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	01.09.2015	00:04:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	01.09.2015	00:05:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	60	59	59	59	1	84	100	25,4	1	0
8	01.09.2015	00:06:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	01.09.2015	00:07:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	120	0	120	64	64	64	2	162	100	25,4	2	3
10	01.09.2015	00:08:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	01.09.2015	00:09:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	01.09.2015	00:10:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	01.09.2015	00:11:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	01.09.2015	00:12:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	0	52	52	52	1	60	0	25,4	0	0
15	01.09.2015	00:13:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	01.09.2015	00:14:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	0	64	64	64	1	60	0	25,4	0	0
17	01.09.2015	00:15:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	01.09.2015	00:16:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	60	63	63	63	1	82	100	25,4	1	0
19	01.09.2015	00:17:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	0	69	69	69	1	60	0	25,4	0	0
20	01.09.2015	00:18:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	01.09.2015	00:19:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	60	59	59	59	1	84	100	25,4	1	0
22	01.09.2015	00:20:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	60	75	75	75	1	74	100	25,4	0	0
23	01.09.2015	00:21:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	01.09.2015	00:22:00	MQ_A13_1_010.368_F1-2+0_FS1	2002232:ser	A13_1	10968	2002232	60	60	60	67	67	67	1	79	100	25,4	0	0

Abbildung 5: Auszug minutenfeiner Querschnittsdaten, Zählstelle MQ_A13_1_010.368

Die Aufbereitung der Querschnittsdaten erfolgte in mehreren Schritten. Zuerst wurden die stunden- und minutenfeinen Daten jeweils separat mit einem eigens dazu programmierten Python-Skript in eine SQL Datenbank geschrieben. Als Softwaretools wurden hier JetBrains DataGrip und JetBrains PyCharm verwendet. Anschließend erfolgte mit dem Opensource Statistikprogramm R (R-project) der Zugriff auf die Datenbank, sowie mittels entsprechender Abfragecodes die gezielte Auswahl der Daten (Vorfilterung relevanter Datenausschnitte). Damit war eine weitere Analyse mit den Daten leicht möglich, da auch sämtliche Auswertungen (Clusteranalyse, Zeitreihenanalyse, grafische Darstellungen etc.) mit R durchgeführt wurden.

2.1.2. Trend-Prognose

Die Trend-Prognose ist die erste und damit größte Ebene des Prognosemodells. Die Trend-Prognose umfasst einen Katalog aus typischen Tagesnetzganglinien kombiniert mit dem Kalendarium. Das bedeutet, dass jedem Kalendertag eine typische Tagesnetzganglinie zugeordnet werden kann.

Eine Tagesnetzganglinie setzt sich dabei aus 24 stündlichen Verkehrsstärkewerten pro Messquerschnitt zusammen. Insgesamt wurden 6 verschiedene Messquerschnitte für die Tagesnetzganglinie verwendet (s. Abbildung 4) um die Verkehrsmengen auf den zur Mautstelle zufließenden Autobahnstrecken miteinfließen zu lassen, und um damit auch unabhängig von Störungen/Datenlücken an einzelnen Messquerschnitten zu sein. Ein Querschnitt (MQ_A13_1_010.368) befindet sich dabei direkt vor der Mautstelle Schönberg (Richtung Italien). Damit ist es möglich, das zu erwartende stündliche Verkehrsaufkommen über einen Tag an der Mautstelle Schönberg lange im Voraus abzuschätzen. Dies kann auch als Grundlage zur Planung der Schalterbesetzung an der Mautstelle herangezogen werden (war nicht Gegenstand in VaMOS).

Die typischen Tagesnetzganglinien wurden durch eine statistische Clusteranalyse gewonnen. Mit der Clusteranalyse sollen möglichst ähnliche Elemente (Ganglinien) in eine Gruppe gebracht werden, während sich die Gruppen untereinander möglichst stark voneinander unterscheiden sollen (vgl. [3]). Die Datenbasis der Clusteranalyse umfasst alle Tagesnetzganglinien (zusammenhängende Tagesganglinien der 6 Querschnitte) innerhalb des Zeitraums der Querschnittsdaten (Jan 2013 bis Aug 2016). Durch Anwendung eines partitionierenden Clusteranalyseverfahrens (k-medoids, ähnlich k-means Algorithmus) mit der Statistiksoftware R wurde eine Einteilung aller Tagesnetzganglinien für verschiedene vordefinierte Anzahl an Cluster (Gruppen) durchgeführt (vgl. [17]).

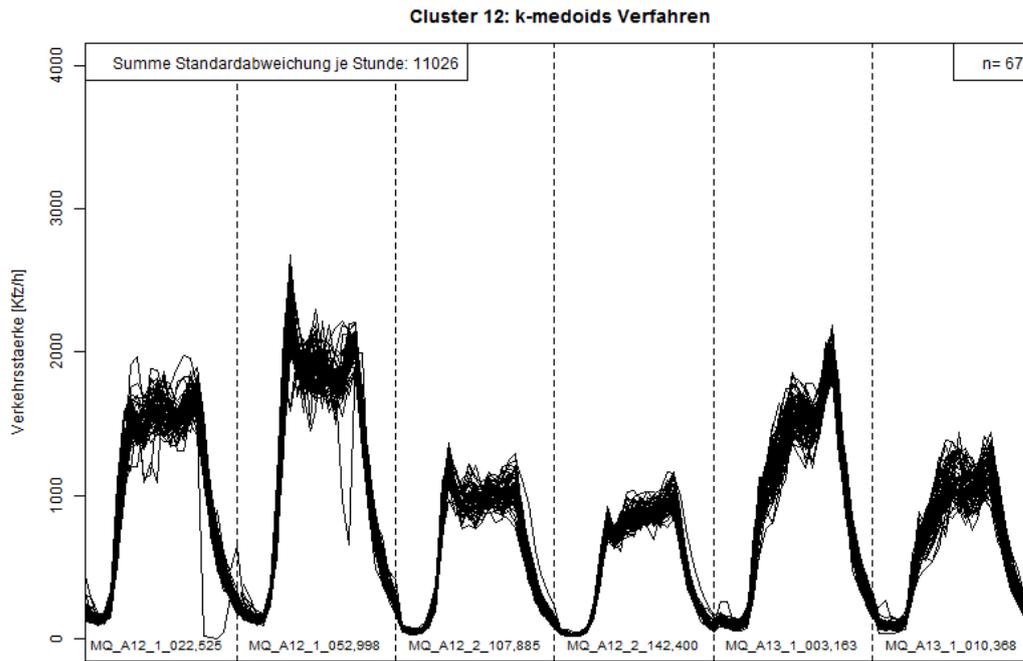


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung aller Tagesnetzganglinien in einem Cluster

Die Clusterzahl wurde dabei beginnend mit 10 schrittweise bis 50 Cluster gesteigert. Die geeignete Clusteranzahl wurde anschließend durch Analyse der Klassifizierung herausgefunden. Dazu wird die Silhouette Statistik angewendet, die beurteilt wie gut ein Datenpunkt zu einem Cluster passt. Dabei wird für jedes Element (Ganglinie) die Silhouettenbandbreite bestimmt (beschrieben in [9]). Nun werden zwei Darstellungen in Abhängigkeit der Clusterzahl angewendet, zum einen die Entwicklung der Summe der Silhouettenbandbreite je Cluster (Abbildung 7) und zum anderen die Entwicklung der mittleren Silhouettenbandbreite über alle Cluster (Abbildung 8).

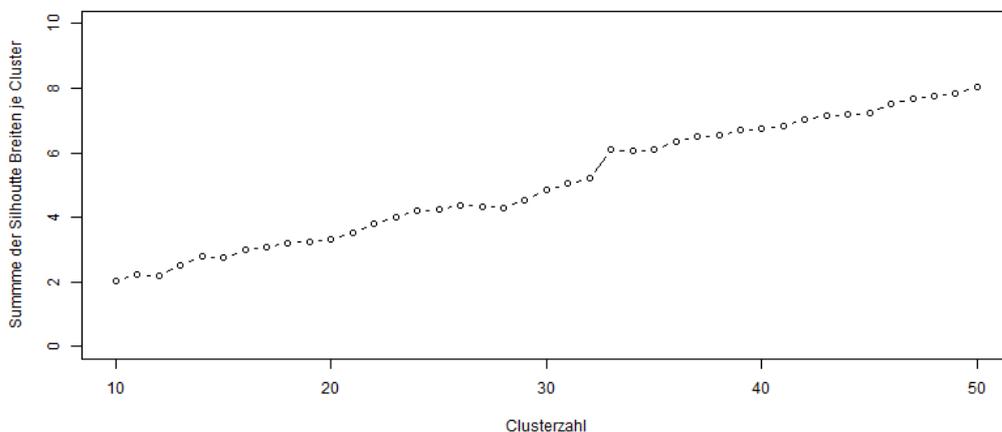


Abbildung 7: Summe der Silhouettenbandbreite je Cluster in Abhängigkeit der Clusterzahl

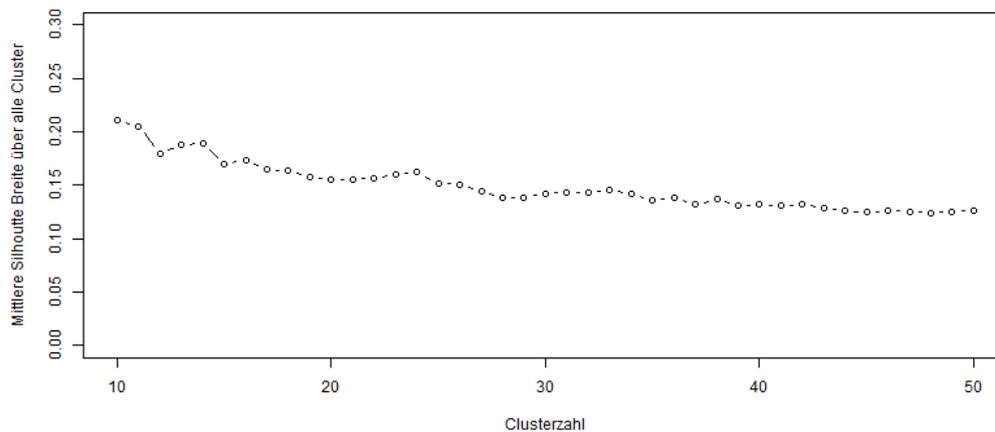


Abbildung 8: Mittlere Silhouettenbandbreite über alle Cluster abhängig von der Clusterzahl

In beiden Abbildungen ist nun ein Knick in der Entwicklung der Silhouettenbandbreite ein Indiz für eine geeignete Clusterzahl, da dies einen Qualitätssprung für das Ergebnis der Clusteranalyse signalisiert. Dabei kann in Abbildung 7 und in Abbildung 11 ein Knick in der Entwicklung der Silhouettenbandbreite bei Clusterzahl 12, 15, 20, 28 und 32 festgestellt werden. Um nun hier die „beste“ Clusterzahl aus diesen 5 Vorschlägen zu finden muss noch ein Bezug zum Kalendarium hergeleitet werden.

Dabei wird das Jahr in Saisonen und Tagestypen ausgedrückt, das heißt jeder Tag eines Jahres kann genau einem Tagestyp und genau einer Saison zugeordnet werden. Die Saisonen richten sich nach Jahreszeit und Ferienzeit. Bei den Tagestypen wird als Basis von folgender Einteilung ausgegangen:

- Werktage Montag bis Donnerstag (MoDo)
- Werktage Freitag (Fr)
- Samstag sofern kein Feiertag (Sa)
- Sonn- und Feiertage (SoF)

Danach wird die Häufigkeit der Tagestypen und Saisonen von den Elementen (Ganglinien) in einem Cluster beleuchtet. Ist ein Tagestyp und eine Saison besonders häufig in einem Cluster, dann kann dem Cluster ein bestimmter Tagestyp und eine bestimmte Saison zugeordnet werden. Tritt dies nun bei allen Clustern (für die betrachtete Clusterzahl) auf, dann stimmt die gewählte Clusterzahl auch mit dem Kalendarium überein. Beispielfhaft wird die Häufigkeit der Tagestypen und Saisonen innerhalb von Cluster 13 bei einer Clusterzahl von 20 in Abbildung

9 dargestellt. In diesem Beispiel erkennt man eindeutig eine Zuordnung zu Saison „Sommerferien“ und zu Tagestyp „Freitag“.

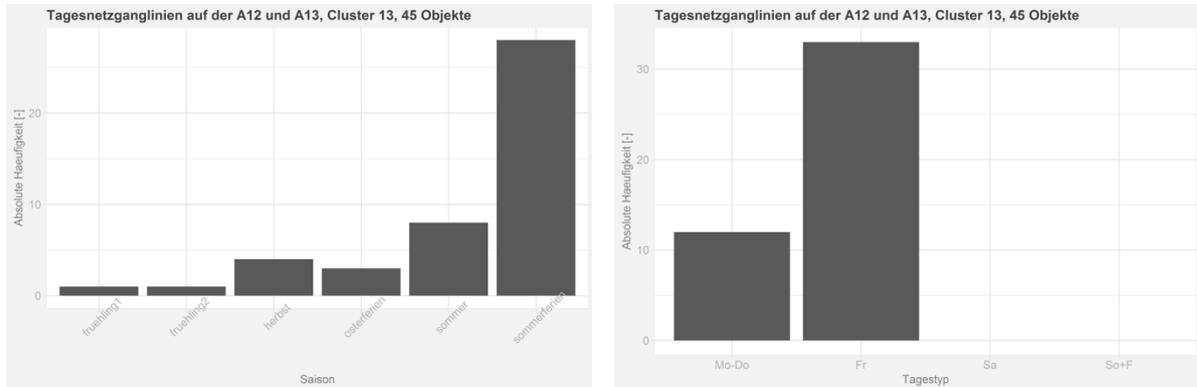


Abbildung 9: Häufigkeit der Saisonen (links) und Tagestypen (rechts) bei Cluster 13

Dieses Vorgehen hinsichtlich Abgleich Clustereinteilung mit Kalendarium wurde für die Clusterzahlen 12, 15, 20, 28 und 32 durchgeführt. Dabei wurde auch mit der Einteilung des Kalendariums (Tagestypen und Saisonen) variiert. Schließlich konnte die höchste Vereinbarkeit zwischen Clusterzahl und Kalendarium mit der Clusterzahl 20 und der in Tabelle 1 gezeigten Kalendereinteilung festgestellt werden.

Tabelle 1: Definition der Saisonen und Tagestypen auf Basis der Clusteranalyse

Saisonbezeichnung	Saisonerklärung	Tagestypen
Weihnachtsferien	It. Schulkalender Österreich	MoDo, Fr, Sa, SoF
Winter 1	ab 7. Jänner idR	MoDi, MiDo, Fr, Sa, SoF
Semesterferien	It. Schulkalender Österreich, entspricht 3 Wochen im Februar	MoDi, MiDo, Fr, Sa, SoF
Frühling 1	zw. Semester- und Osterferien	MoDi, MiDo, Fr, Sa, SoF
Osterferien	Sa vor Palmsonntag bis inkl. Di nach Ostern	MoDo, Fr, Sa, SoF
Frühling 2	Mi nach Osterferien bis inkl. Fr zu Pfingsten	MoDo, Fr, Sa, SoF
Sommer	ab Sa zu Pfingsten bis Sommerferien	MoDo, Fr, Sa, SoF
Sommerferien	It. Schulkalender Tirol	MoDo, Fr, Sa, SoF
Herbst	Ende Sommerferien bis inkl. 31.10.	MoDo, Fr, Sa, SoF
Winter 2	ab 1.11. bis Weihnachtsferien	MoDo, Fr, Sa, SoF
Sonstige Tage mit besonderer Charakteristik	Letzten drei Sa im August Christtag & Neujahr Gründonnerstag Sa Beginn Osterferien und zu Pfingsten Fr nach Fronleichnam & Christi Himmelfahrt Mariä Empfängnis	

Für jeden der 20 Cluster wird anschließend eine repräsentative Tagesnetzganglinie gebildet. Diese ergibt sich aus der Mittelung aller Tagesnetzganglinien des Clusters. Die Ergebnisse der Trend-Prognose in Form der repräsentativen Tagesnetzganglinien sowie eine genaue Zuordnung dieser zum jährlichen Kalender werden später in Kapitel 3.2.1 gezeigt.

2.1.3. Langfristprognose

Das Ziel der Langfristprognose ist es stündliche Verkehrsstärken des aktuellen Tages vorherzusagen. Die Grundidee besteht darin, dass die Form der Verkehrsstärkeganglinie des aktuellen Tages auch in gleicher bzw. ähnlicher Form in der Vergangenheit aufgetreten ist. Die gefundene ähnliche Tagesganglinie kann dann als Prognose für den aktuellen Tag herangezogen werden.

In einem ersten Schritt werden alle gemessenen stündlichen Verkehrsstärken des aktuellen Tages von den sechs betrachteten Messquerschnitten auf der A12 und A13 zu einer Teilnetzganglinie zusammengefasst und mit allen historischen Netzganglinien von Jan 2014 bis Aug 2016 verglichen (Mustervergleich). Anhand der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least-Square-Verfahren) wird anschließend mithilfe der Statistiksoftware R die „ähnlichste“ Tagesnetzganglinie aus der historischen Datenbasis identifiziert (gleiche Datenbasis wie bei der Clusteranalyse in der Trendprognose). Dabei werden die sechs Messquerschnitte der Tagesnetzganglinie unterschiedlich gewichtet:

- Gewichtungsfaktor 1,0 für die am weitesten von der Mautstelle entfernten Messquerschnitte auf der Autobahn A12 (MQ_A12_1_022.525 und MQ_A12_2_142.400)
- Gewichtungsfaktor 2,0 für die zwei näheren Messquerschnitte auf der Autobahn A12 (MQ_A12_1_052.998 und MQ_A12_2_107.885)
- Gewichtungsfaktor 3,0 beiden Messquerschnitte auf der Autobahn A13 kurz vor der Mautstelle (MQ_A13_1_003.163 und MQ_A13_1_010.368)

Anhand dieser Gewichtung werden die Verkehrsdaten von den beiden Zählstellen im Nahbereich der Mautstelle stärker im Mustervergleich berücksichtigt. Die gefundene, ähnlichste Tagesnetzganglinie liefert nun eine Verkehrsprognose für die restlichen Stunden des aktuellen Tages indem die Verkehrsstärken des Messquerschnittes MQ_A13_1_010.368 direkt vor der Mautstelle verwendet werden. Als frühester, möglicher Startzeitpunkt am aktuellen Tag wurde 4:00 Uhr gewählt da hier schon die Verkehrsstärkewerte von vier abgelaufenen Stunden vorliegen und somit ein Teil der aktuellen Netzganglinie gut nachgebildet werden kann. Eine Langfristprognose kann demnach nach jeder abgelaufenen

Stunde aufs Neue durchgeführt werden (nach jeder Stunde Mustervergleich mit Suche der ähnlichsten Tagesnetzganglinie). Ein früherer Zeitpunkt als 4:00 Uhr würde die Anzahl der Datenpunkte für den Mustervergleich zu stark vermindern, während ein zu später Zeitpunkt eine früh beginnende Morgenspitze (z.B. an stark frequentierten Tagen mit Urlaubsverkehr im Sommer) nicht mehr beinhalten würde. Exemplarische Ergebnisse der Langfristprognose werden später in Kapitel 3.2.2 gezeigt.

2.1.4. Kurzfristprognose

Die Kurzfristprognose soll auf kurzfristige Änderungen der Verkehrsbelastung an der Mautstelle reagieren können. Die entwickelte Kurzfristprognose liefert daher Verkehrsstärken im 5min Intervall für die nächste Stunde (d.h. zwölf 5min Werte). Als Datenbasis werden die Verkehrsstärken im 5min der letzten beiden Stunden des Messquerschnittes direkt vor der Mautstelle Schönberg (MQ_A13_1_010.368) herangezogen.

Die prinzipielle Idee der entwickelten Kurzfristprognose besteht darin die aktuell gemessenen Verkehrsdaten (die letzten zwei Stunden) durch ein mathematisches Zeitreihenmodell auszudrücken mit dem eine Prognose der Zeitreihe vorgenommen werden kann. Für diese Problemstellung eignen sich sogenannte ARIMA Modelle (autoregressive integrated moving-average models, vgl. [27]). Solche ARIMA Modelle sind lineare, dynamische Systeme mit denen die stochastischen Prozesse der Zeitreihe beschrieben werden können (vgl. [8]).

Mithilfe der Statistiksoftware R werden somit die gemessenen 5min feinen Verkehrsstärken der letzten beiden Stunden des aktuellen Tages mit einem ARIMA Modell in eine geglättete Zeitreihe transformiert. Mit dieser Zeitreihe kann dann einfach eine Prognose vorgenommen werden. Als Zeithorizont wurde wie zuvor erwähnt eine Stunde gewählt, das heißt es werden die nächsten zwölf Verkehrsstärken im 5min Intervall vorhergesagt und ausgegeben.

Um das Ergebnis der Kurzfristprognose zu verbessern wird die Methodik mit der Langfristprognose gekoppelt. Das bedeutet, dass das Resultat der Langfristprognose in Form von der Verkehrsstärke der nächsten Stunde mit der Summe der zwölf 5min Verkehrsstärken der Kurzfristprognose übereinstimmen muss. Damit ist gesichert, dass auch Trends in der Entwicklung der aktuellen Verkehrsstärkeganglinie (z.B. ansteigende Verkehrsspitze im Tagesverlauf) mitabgedeckt werden. Zum Vergleich werden bei der Kurzfristprognose Ergebnisse mit und ohne Kopplung mit der Langfristprognose später in Kapitel 3.2.3 gezeigt.

2.2. Verkehrsmodell

Die Mautstelle Schönberg (Fahrtrichtung Italien) wurde im Rahmen von VaMOS in einem Verkehrsmodell anhand der mikroskopischen Verkehrssimulationssoftware PTV VISSIM nachgebildet. Die dazu notwendigen Eingangsdaten, die Modellierungsschritte sowie die Methodik bei den Simulationen mit dem Verkehrsmodell werden in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

2.2.1. Datengrundlage für das Verkehrsmodell

Als Datengrundlage für die Modellierung der Nachfrage im Verkehrsmodell (zufließende Verkehrsstärke sowie Spurzuteilung) wurden detaillierte Abfertigungsdaten von der Mautstelle verwendet. Die Abfertigungsdaten liefern zeitgenau die abgewickelten Fahrzeuge pro Schalter (Fahrstreifen) an der Mautstelle Schönberg Richtung Italien. Diese Daten wurden für folgende zwei Zeitbereiche für verschiedene Zwecke von der ASFINAG zur Verfügung gestellt:

- 2 Jahre (2015-2016) für eine Langzeitanalyse der Verkehrsverteilung auf einzelne Fahrstreifen an der Mautstelle (bezogen auf die Cluster der Trendprognose) und für die Zeitlückenberechnung pro Schaltertyp (als Eingangswert in das Verkehrsmodell)
- 3 Monate (Jun bis Aug 2017) entsprechend dem Zeitraum des Realtests für die Nachbildung der tatsächlichen Verkehrssituation einzelner Tage im Verkehrsmodell (zur Evaluierung des Optimierungsalgorithmus)

Die Abfertigungsdaten beinhalten pro Fahrzeug die folgenden relevanten Informationen (s. auch Datenauszug in Abbildung 10):

- Zeitstempel beim Passieren der Mautstelle
- Gewählter Fahrstreifen (Spur)
- Schalter-Typ: Mautner-Spur (mit Bedienung), Video-Spur (Dauerkarte), GO-Spur (für Schwerverkehr), Automaten-Spur (ohne Bedienung)
- Zahlungsmethode: Bargeld, Kreditkarte, Zeitkarte, etc.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Zeitstempel	Richtung	Spur	GueltigUngueltig	Kategorie	Typ	Zahlart_kurz	Zahlart	ANZAHL
2	01.08.2017 00:00	204	3		Abfertigung	Mautner-Spur	SH	Tankkarte	1
3	01.08.2017 00:00	204	20		Abfertigung	Video-Spur	ZK	Zeitkarte	1
4	01.08.2017 00:00	204	5		Abfertigung	Automaten-Spur	VAL	Bargeld	1
5	01.08.2017 00:00	204	2		Abfertigung	Automaten-Spur	ZK	Zeitkarte	1
6	01.08.2017 00:00	204	2 U		Abfertigung	Automaten-Spur	VAL	Bargeld	1
7	01.08.2017 00:01	204	21		Abfertigung	Video-Spur	ZK	Zeitkarte	1
8	01.08.2017 00:01	204	1		Abfertigung	GO-Spur	GO	GO-Box	1
9	01.08.2017 00:01	204	2		Abfertigung	Automaten-Spur	VAL	Bargeld	1
10	01.08.2017 00:02	204	1		Abfertigung	GO-Spur	GO	GO-Box	1
11	01.08.2017 00:02	204	21		Abfertigung	Video-Spur	ZK	Zeitkarte	1
12	01.08.2017 00:02	204	11		Abfertigung	Automaten-Spur	TMA	Mastercard	1
13	01.08.2017 00:02	204	2		Abfertigung	Automaten-Spur	VAL	Bargeld	1
14	01.08.2017 00:02	204	2		Abfertigung	Automaten-Spur	ZK	Zeitkarte	1
15	01.08.2017 00:02	204	3		Abfertigung	Mautner-Spur	ZK	Zeitkarte	1
16	01.08.2017 00:03	204	20		Abfertigung	Video-Spur	TIC	Zeitkarte Einzelticket	1
17	01.08.2017 00:03	204	21		Abfertigung	Video-Spur	ZK	Zeitkarte	1
18	01.08.2017 00:04	204	3		Abfertigung	Mautner-Spur	TMA	Mastercard	1
19	01.08.2017 00:04	204	2		Abfertigung	Automaten-Spur	TIC	Zeitkarte Einzelticket	1
20	01.08.2017 00:05	204	4		Abfertigung	Mautner-Spur	VAL	Bargeld	1

Abbildung 10: Auszug aus den Abfertigungsdaten der Mautstelle Schönberg

2.2.2. Aufbau des Verkehrsmodells

Basiselemente eines Verkehrsmodells für die Verkehrsflusssimulation sind die Straßengeometrie, die Verkehrsnachfrage und das Fahrverhalten. Die Straßengeometrie im Bereich der Mautstelle Schönberg (Richtung Italien) wurde anhand des Straßenverlaufs der Autobahn A13 im Bereich der Mautstelle erstellt. Insgesamt wurde über 5km der Autobahn A13 (Richtung Italien) vor der Mautstelle modelliert um auch größere Stauerscheinungen in der Simulation abzudecken. Für die genaue Modellierung der Fahrstreifenerweiterungen vor der Mautstelle und der Abfertigungsspuren am Vorplatz der Mautstelle wurden Luftbilder herangezogen. Die separate Spur für die Videomaut und die Fächerspuren wurden realitätsgetreu nachmodelliert.

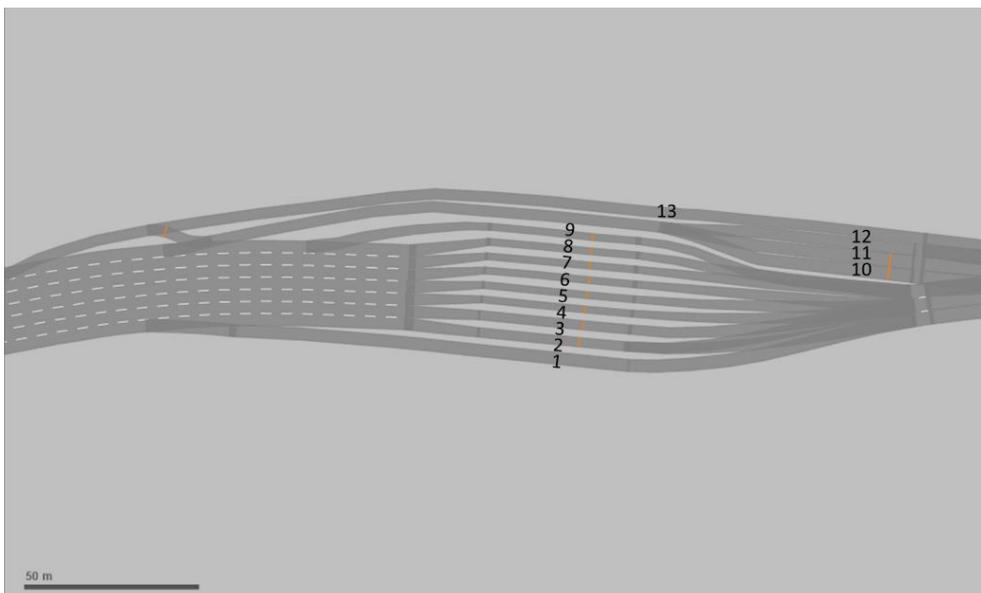


Abbildung 11: Verkehrsmodell für die MS Schönberg Fahrtrichtung Italien mit der Bezeichnung der einzelnen Spuren/Abfertigungsschalter

Die Verkehrsnachfrage in Form der zufließenden Verkehrsstärke und der Spurzuteilung an der Mautstelle wurde auf Basis der Abfertigungsdaten in das Verkehrsmodell eingebunden. Damit ist es möglich das Verkehrsgeschehen an der Mautstelle für beliebige Tage (oder Tagestypen auf Basis der Cluster der Trendprognose) realistisch nachzubilden. Die zufließende Verkehrsstärke über alle Fahrstreifen je Zeitintervall (Stunde) kann direkt durch Auswertung der Abfertigungsdaten bestimmt werden. Für die richtige Spurzuteilung im Verkehrsmodell (Routen) müssen die Abfertigungsdaten je Spur (Abfertigungsschalter) zu den Fahrzeugtypen im Verkehrsmodell zugeordnet werden.

Folgende Fahrzeugtypen sind an den jeweiligen Spuren der Mautstelle möglich:

- Spur 1: Schwerverkehr d.h. LKW und Busse
- Spur 2 & 3: Pkw sowie überbreite Fahrzeuge wie Wohnmobile und Wohnwägen (auch für Schwerverkehr geeignet)
- Spur 4-9: Pkw, zum Teil Schalter mit Automat oder Bedienung (Mautnerschalter)
- Spur 10-12: Fächerspuren für Pkw, Spur 12 nur für Pkw mit Videomaut
- Spur 13: Videomaut, separate Spur für Pkw mit Videomaut

Die richtige Modellierung des Fahrverhaltens an den einzelnen Spuren ist entscheidend, da die Verkehrsabläufe (Geschwindigkeit, Wartezeit) je nach Zahlungsmöglichkeit unterschiedlich sind. Bei den Videomautspuren ist ein Anhalten nicht notwendig, da eine gültige Zeitkarte des Fahrzeuges über sein Kennzeichen erfasst wird. Bei positiver Gültigkeit öffnet sich der Schranken früh genug, sodass die Videomautspur (Spur 12 und 13) mit einer Geschwindigkeit bis zu 40km/h befahren werden kann. Die Verteilung der Geschwindigkeit wurde aus den Abfertigungsdaten (Zeitlücken der Videomautspur) abgeleitet und in das Verkehrsmodell integriert (Geschwindigkeitsverteilung im Langsamfahrbereich).

Ähnlich ist die Situation an der Spur 1, welche für den Schwerverkehr reserviert ist. Hier ist kein Anhalten notwendig, der Verkehrsfluss wurde hier wieder anhand eines Langsamfahrbereiches mit entsprechender Geschwindigkeitsverteilung modelliert. Bei den übrigen Schaltern (Spur 2-11) ist ein Anhalten notwendig, sofern die Fahrzeuge keine Videomaut besitzen. Bezahlt wird am Automaten oder beim Mautner (sofern der Schalter mit einer Person besetzt ist). Der Verkehrsablauf wurde hier im Verkehrsmodell durch ein Stoppschild mit hinterlegter Aufenthalts-Zeitverteilung nachgebildet (s. Abbildung 12).

Dabei ist zu erkennen, dass ein Großteil der Fahrzeuge (89%) bis zu 15 Sekunden am Schalter steht und die restlichen Fahrzeuge (11%) eine Aufenthaltszeit am Schalter von bis zu 81 Sekunden aufweisen. Die Zeitverteilung wurde durch die Auswertung der Abfertigungsdaten an den entsprechenden Spuren hergeleitet.

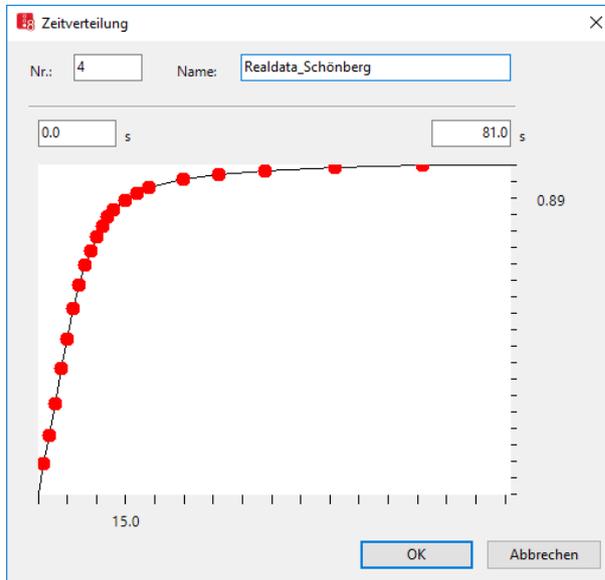


Abbildung 12: Verteilungsfunktion der Aufenthaltszeiten eines Fahrzeuges im Verkehrsmodell an den Automaten- und Mautnerschaltern (Spur 2-11)

2.2.3. Simulation als Grundlage der Optimierung

Aus logistischen und zeitlichen Gründen konnte im Rahmen des Projektes keine Hinweistafeln an der MS Schönberg installiert und getestet werden. Es musste daher neben der visuellen Messung auch auf Modellierung (= Simulation der Mautstelle) zurückgegriffen werden, um den Einfluss solcher Hinweise in die Evaluierung des Systems einfließen lassen zu können. Die Simulation konnte im gleichen Zug auch dazu verwendet werden, um verschiedene Optimierungsmethoden zu untersuchen.

In **VaMOS** wird der **Ansatz verfolgt**, dass **nicht vorhandene direkte Information** über den Verkehrszustand, bzw. dessen Veränderung durch Leitsignale, **mittels Simulation ergänzt wird**. Zukünftige Umsetzungen in Prototypen können diesen Simulationsteil jederzeit durch reale Messungen ersetzen.

Die folgenden Schnittstellen zwischen Messung, Modellierung und Optimierung wurden in VaMOS für die verschiedenen Aufgaben umgesetzt. *Durch die modulare SW Entwicklung konnten Teile der Simulation nach Aufbau der Messanlage in Schönberg durch reale Messdaten ersetzt werden.*

Simulation für die Untersuchung von Optimierungsverfahren

Mit der folgenden Methode kann unter der Voraussetzung einer realistischen Simulation jedes beliebige Optimierungsverfahren unter Laborbedingungen getestet werden:

- Vollständige Simulation MS Schönberg.
- Berechnung des Verkehrszustandes aus Simulationsdaten.
- Mathematisches Modell der Optimierung, bspw. Neuronales Netzwerk oder Heuristik.
- Virtuelle Steuerung der Verkehrsteilnehmer + Simulation ihres Verhaltens.
- Rückkopplung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer in die Simulation.

Simulation und Kopplung mit dem Testaufbau an der MS Schönberg

Im Testaufbau in Schönberg wurden, nachdem alle SW Module vorhanden waren, alle verfügbaren Messdaten in den Prozess eingekoppelt:

- Vollständige Simulation MS Schönberg auf Basis der verfügbaren ASFINAG Zählraten.
- Visuelle Messung des Verkehrszustandes mit 4 Kameras an der MS.
- Vergleich Messdaten Simulation – Finetuning der Simulation.
- Generierung von virtuellen Leitsignalen.
- Rückkopplung der Leitsignale in die Simulation – Simulation des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer.

Um den Effekt der Optimierung überprüfen zu können, wurde die Schleife mit der zusätzlichen Simulation des Lenkerverhaltens geschlossen. Dafür mussten Annahmen über die ‚Akzeptanz‘-Rate der Hinweistafeln gemacht werden, deren Einfluss auf das Gesamtergebnis wird in den folgenden Abschnitten im Detail dargestellt.

Die Videoaufzeichnung wurde verwendet, um einerseits Tests bzw. Vergleiche mit der Simulation offline zu ermöglichen, und andererseits Aufschlüsse über das generelle Verhalten der Verkehrsteilnehmer an der Mautstelle zu untersuchen. Beobachtungen über das konkrete Fahrverhalten der Lenker bei Problemen (falsche Spur, blockierte Spur, etc.) können helfen die Simulation zu verbessern und passende Orte für die Aufstellung der Hinweistafeln zu identifizieren.

Die gesamte Optimierung-Evaluierung wurde folgendermaßen implementiert:

- Vollständige Simulation MS Schönberg auf Basis der verfügbaren ASFINAG Abfertigungsdaten.
- Messung des Verkehrszustandes aus der Simulation, die möglichst exakt den ASFINAG Zähldaten angepasst ist.
- Virtuelle Generierung von Leitsignalen an die Fahrzeuglenker.
- Simulation des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer, Rückkoppelung in die Simulation.
- Eine Quantifizierung des Effekts auf die Abfertigung kann aus den Simulationsergebnissen direkt abgeleitet werden.

2.3. Die Visuelle Messung des Verkehrszustandes

Für die Vermessung des Level of Service (LOS) an der MS wurden insgesamt vier Kameras entlang der Kassenlinie montiert. Die Kameras wurden an vertikalen Trägern zwischen den Fahrspuren auf ca. 4 m Höhe montiert. Damit konnten praktisch alle relevanten Bereiche an der Mautstelle visuell abgedeckt werden. Das Satellitenbild in Abbildung 13 zeigt die Montagepunkte der Kameras im Überblick, Abbildung 14 zeigt beispielhaft Bilder jeder der Kameras 1-4. Die Kamerabilder überlappen sich, so dass in Summe eine sehr gute visuelle Abdeckung des Mautbereichs erreicht werden konnte. Die Qualität und Auflösung der Kamerabilder ist gut genug, um bis in den Zufahrtbereich zur Mautstation messen zu können.

Zusammenfassung der visuellen Datenerfassung

- Aufzeichnung 06/17 – 09/17
- Auflösung 2500x2000 Bildpunkte (angepasst für jede Kamera)
- ca. 1 Bild/Sekunde
- H264 Kodierung der Videodaten
- 3 Terrabyte an Daten wurden aufgezeichnet und verarbeitet

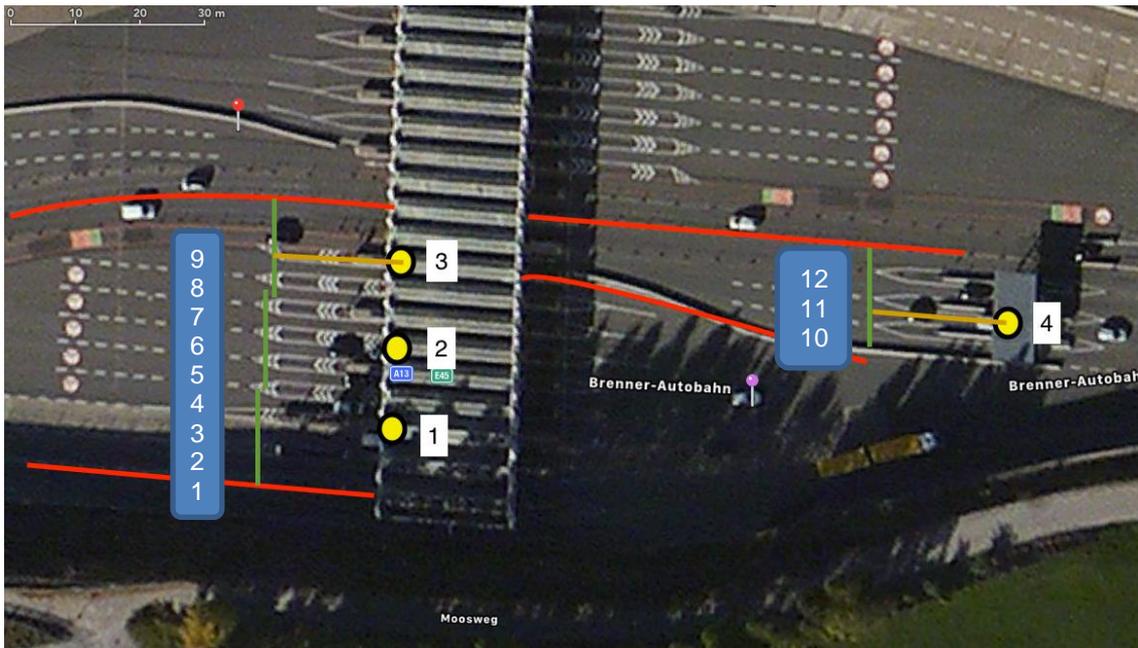


Abbildung 13: Montageorte der Kameras der Testinstallation an der MS Schönberg Wie in den blau hinterlegten Feldern angezeigt, werden die Fahrbahnen in der Simulation und Messung von unten nach oben durchnummeriert.

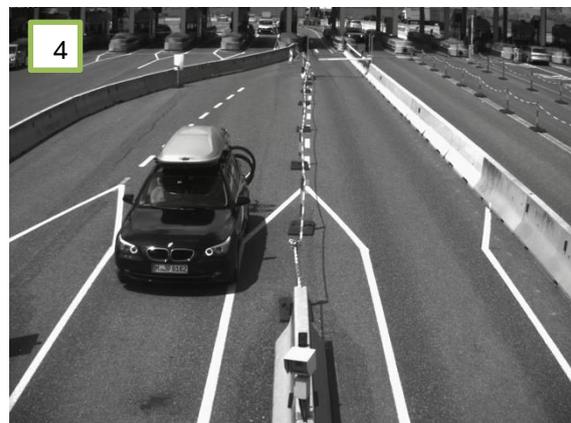


Abbildung 14: Die Sichtfelder der installierten Kameras 1-4, diese Daten wurden für die offline Messung aufgezeichnet und für die visuelle Analyse verwendet.

Die Aufgabe der Bildanalyse besteht darin, die Belegung der Fahrbahnen anhand der Kameradaten zu ermitteln und daraus den aktuellen Verkehrszustand zu berechnen. Insbesondere Staus und deren Länge pro Fahrbahn werden als Eingangswerte für die nachfolgende Optimierungsstufe benötigt und daher besonders wichtig erachtet.

Jede der Kameras ist für die Vermessung der ihr zugeordneten Fahrbahnen zuständig. Die Bilder laufen auf insgesamt zwei Industrie PCs zusammen, die für die automatische Auswertung zuständig sind. Die PCs wurden für die Testinstallation in den unterirdischen Gängen unter der MS untergebracht und mit bis zu 90 m langen Netzkabeln direkt mit den Kameras verbunden.

Die Bildanalyse wird ca. im Sekundentakt durchgeführt, die Messwerte werden anschließend über eine vorab bestimmte Kalibration transformiert, um tatsächliche Staulängen in metrischen Einheiten zu erhalten. Die Kalibration ermöglicht es zudem, die Staudaten bzw. Belegung auf ein Satellitenbild (im Projekt wurden *Google Maps* Bilder verwendet) zu projizieren und darzustellen. Dies ist in Abbildung 17 demonstriert, die genannte Methode erlaubt die Zusammenführung der Messdaten aller Kameras in ein Überblicksbild.

Die Rolle der Kamera Kalibration

Die belegten Bereiche der Fahrspuren werden mittels vorab berechneter Kamera Kalibration in Meter umgerechnet, um tatsächliche Staulängen berechnen zu können. Für die Methode der Kalibration wird mittels der Methode von Tsai [25] der geometrische Zusammenhang zwischen Bildpunkten und dem Google Maps Satelliten Bild berechnet. Die Kalibration ermöglicht die Projektion jedes Bildpunktes der Kamera auf die Google Maps Karte. Nachdem der Skalierungsfaktor der Google Karte bekannt ist, kann somit das Kamera Bild in Kartenkoordinaten in absoluten Dimensionen (m) umgerechnet werden. Die Kalibration ermöglicht es zudem, die Staudaten und die Belegung direkt im Satellitenbild zu visualisieren.

Visuelle Belegungsdetektion

Die Belegungsdetektion wird durch die Berechnung von lokalen Merkmalen und deren Klassifikation umgesetzt. Als eine sehr robuste Methode haben sich dabei *Histogram of Oriented Gradient Features* erwiesen, die vergleichsweise invariant zu Licht- und Schattenwurf, Wettereinflüssen und Fahrzeugtypen sind.



Abbildung 15: Die Belegungsdetektion erfolgt durch die Klassifikation von ca. 1m langen Messfeldern entlang jeder Fahrspur in ‚belegt‘ bzw. ‚frei‘.

Für das Training des Klassifikators wurden manuell Beispiele von belegten bzw. freien Straßenabschnitten selektiert und für den Aufbau einer *Support Vector Machine* verwendet. Der resultierende Detektor kann entlang der Fahrbahn die belegten Zonen mit einer Längsauflösung von ca. 1 m erkennen. Diese Auflösung kann hinsichtlich einer besseren Trennung parametrisiert werden, erschien aber im Rahmen der Aufgabenstellung als ausreichend.

Um einen Stau zu detektieren, müssen entlang der Fahrbahn über mehrere Sekunden Bereiche von Fahrzeugen lückenlos belegt sein, erst dann wird ein Stauzustand gemeldet. Die folgende Abbildung 16 zeigt ein Beispiel für die Arbeitsweise und Ergebnisse des Detektors. Die Projektion auf die Überblickskarte ist anschließend in Abbildung 17 dargestellt. Die Genauigkeit der Staudetektion entlang der Fahrbahn (Längenmessung) beträgt ca. 1m, aufgrund der Kameraperspektive und anderen Randbedingungen kann sie jedoch auch schlechter ausfallen:

- Verdeckungen von Fahrzeugen führen zu künstlichen Verlängerungen der gemessenen Staus nach hinten.
- Durch die flachen Winkel insbesondere in den entfernten Teilen der MS werden die Messwerte der Staulängen durch die künstlich verlängert.

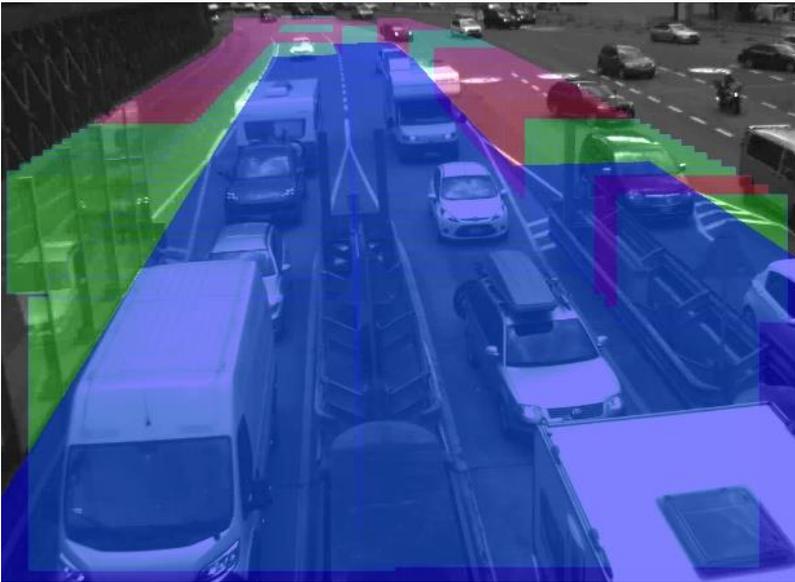


Abbildung 16: Beispiel für die Auswertung eines Bildes. Die grünen Bereiche markieren als belegt detektierte Fahrbahnabschnitte, rote Bereiche als frei detektierte Abschnitte, alle Bereiche in Blau markieren detektierte Warteschlangen.

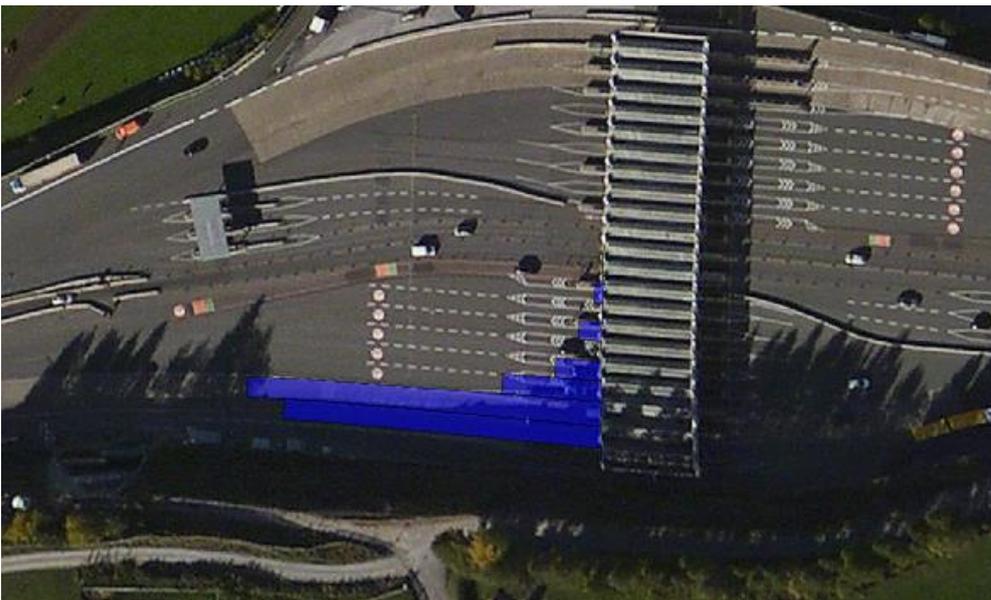


Abbildung 17: Google Maps Projektion des Belegungszustandes. Die Projektion der Warteschlangen kann aus der bekannten Kamerakalibration berechnet werden.

In der Praxis stellen die Ungenauigkeiten in der Messung der Staulängen in den rückwärtigen Bereichen der MS kein großes Problem dar, weil die Optimierung bereits bei ca. 20 m Staulänge zu greifen beginnt.

Im Verkehrsmodell kann die Staulänge direkt aus den Ausgabedateien der Simulation entnommen werden die in weiterer Folge als Eingangswert für den Optimierungsalgorithmus fungiert.

Um erste Erfahrungen mit Messungen an einer MS gewinnen zu können, wurde im Herbst 2016 ein Testaufbau an der MS A9 Pyrnautobahn/St.Michael installiert. Für die Dauer von 1 ½ Tagen wurden Aufzeichnungen mit zwei Kameras gewonnen und analysiert. Die SW von SLR Engineering konnte mit diesen Daten entwickelt bzw. vorbereitet werden. Weiters wurden wertvolle Erfahrungen zur automatischen Bildauswertung (BA) gewonnen. Die Detektionsmodule, Kalibrationsverfahren und statistischen Auswertungen wurden für diesen ersten Test bereits so programmiert, dass sie für den Testaufbau MS Schönberg eingesetzt werden konnten.

In den A9 Daten wurde neben der Staulängenberechnung auch alle Methoden zum Fahrzeugtracking und zur FZ Klassifikation getestet. Abbildung 18 unten zeigt beispielsweise das Ergebnis des FZ Tracking für 1 Stunde Aufzeichnung.



Abbildung 18: Ein Testbild der Aufzeichnungen der MS St Michael. Tracking Ergebnisse (links) und Fahrzeugklassifikation (rechts).

2.4. Die Optimierung des Verkehrsflusses

In diesem Abschnitt werden die Verfahren zur Optimierung des Verkehrsflusses erläutert. Wichtig ist dabei zu bemerken, dass die Vorversuche an der MS St Michael äußerst nützlich waren, um die Auswertesoftware zu entwickeln. Es war mit diesen Daten vor allem möglich, erste Abschätzungen des möglichen Potentials für eine Verbesserung durchzuführen, bzw. die SW Entwicklung auf Basis der Messdaten durchzuführen.

Kopplung von Simulation und Messung

Für alle Stufen der SW Entwicklung mit den Daten der MS Schönberg wurde eine Methode entwickelt, um die Algorithmen von SLR Engineering mit der Simulation der TU verknüpfen zu

können. Zu diesem Zweck wurde das Software Interface von VISSIM (Python Interface mit definiertem API) von SLR aus direkt angesteuert.

Alle fehlenden Messdaten bzw. virtuellen Steuersignale konnten über die Software-Schnittstelle direkt an die Simulation übergeben werden. Das gesamte Interface wurde seitens SLR und TU so modular aufgebaut, **dass die Simulationsergebnisse der Verkehrslage jederzeit durch Kamera-Messdaten ersetzt werden können**. Weiters könnten bei Verfügbarkeit von Signaltafeln vor Ort durch Austausch der Softwaremodule reale Steuerkommandos versendet werden.

Bemerkung: Die entwickelte Methode bzw. Schnittstelle direkt zur Simulation hat ausgezeichnet funktioniert und wird als beispielgebend für zukünftige Projekte angesehen.

Kopplung von Simulation und Optimierung

Das Ergebnis der Optimierung sind laufende Signale an die Fahrzeuglenker über Hinweistafeln. Im Rahmen von VaMOS konnten noch keine Signaltafeln eingesetzt werden. Der Effekt der Hinweistafeln musste daher simuliert werden. Dazu war es nötig die Spurwahl der laufenden Simulation mit den angenommenen Akzeptanzraten zu den Hinweistafeln zu beeinflussen.

Die oben erwähnte Software Schnittstelle wurde für diesen Zweck eingesetzt, je nach Versuchsanordnung wurde so ein parametrierbarer Anteil an Fahrzeuglenkern ‚umgeleitet‘. Falls in einem zukünftigen Pilotversuch reale Hinweistafeln eingesetzt werden sollten, kann dieser Teil der Simulation entfallen. Er wird dann implizit durch die visuelle Messung des LOS an der MS ersetzt.

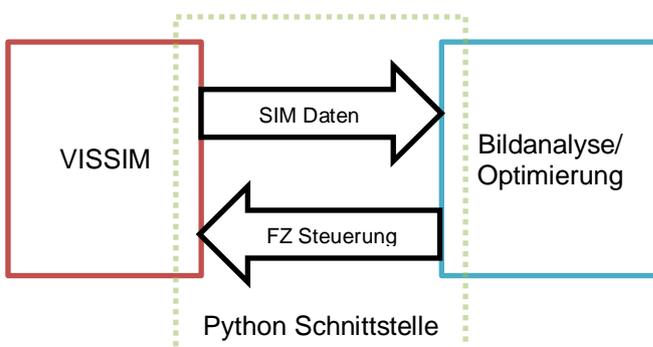


Abbildung 19: Koppelung von SLR Software und Verkehrssimulationssoftware (VISSIM).

Reinforcement Learning

Eine der Ausgangsideen für die Optimierung war die Annahme, mittels Training eines Neuronales Netzes die Optimierung anhand einer ausreichend großen Datenmenge durchführen zu können. Die Trainingsdaten können durch die Simulation, in der benötigten ausreichend großen Menge, erzeugt werden.

Zu diesem Zweck wurde ein Netzwerk nach der ‚reinforcement learning‘ Architektur in *Tensorflow* [10] entworfen und umgesetzt. Reinforcement Learning gehört zu den Klassen der unüberwachten Machine Learning Verfahren. Ein ‚Agent‘ lernt dabei selbstständig aus Erfahrungswerten gewünschte Eigenschaften, beispielsweise wie Signale zu setzen sind, um den Durchfluss an der Mautstelle zu erhöhen. Der Agent kann die nötigen Zusammenhänge aus der Beobachtung von Simulationen selbstständig lernen. Nötig ist dafür eine ausreichend große Datenmenge an Beispielen für ‚Ursache‘ und Wirkung.

Die Struktur des entworfenen Netzwerkes welches in VaMOS eingesetzt wurde hatte folgende prinzipiellen Eigenschaften:

- Das Netzwerk erzeugt mit der Simulation Verkehrssituationen, Aktionen und
- Lernt online, wie Signale (Hinweise, Geschwindigkeits-Änderungen) bzw. Aktionen den Verkehrsfluss verändern, also die Zusammenhänge zwischen Signalisierung, Verkehrsfluss und Staulänge.
- Das NN bekommt das Ziel, den Fluss zu optimieren. Damit verstärkt es mit den gelernten Zusammenhängen, wie es steuern muss, um diese Aufgabe erfüllen zu können.

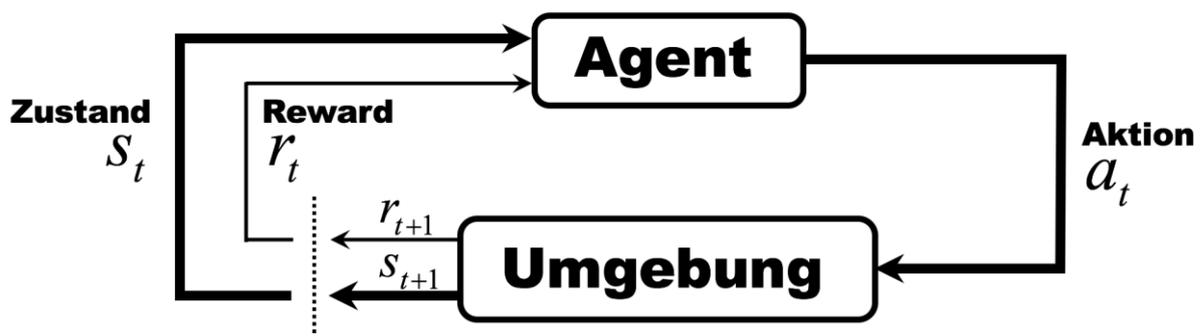


Abbildung 20: Die Struktur eines Reinforcement Learning Netzwerkes (Universität Frankfurt a. Main, Institut für Informatik). Der Agent lernt aus den Rewards von Aktionen, welche Auswirkung diese haben. Die Umgebung wird durch die Aktionen direkt beeinflusst.

Mehrere Strukturen des NN wurden entworfen und trainiert (wobei jeder Trainingsvorgang 1-2 Tage Rechenzeit benötigt), jedoch

- erwies sich die Aufgabe am Ende zu komplex, um mit vorhandener Rechenzeit zu einem Ergebnis zu kommen und
- vermutlich waren auch die Veränderungen des Verkehrsflusses in Relation zu den Signalen (Hinweistafeln) und simulierten Reaktionen der Lenker zu unkorreliert, um dem Netzwerk genügend korrekte Eingabewerte liefern zu können.

Optimierung mittels Heuristik

Nachdem die Experimente mit dem Training mittels Reinforcement Verfahren nicht aussichtsreich erschienen, wurde ein alternativer Ansatz zur Problemlösung gesucht und umgesetzt. Die Messungen an der MS St Michael aus dem Vorversuch im Oktober 2016 haben dafür die erste wertvolle Grundlage für die SW Entwicklung geliefert. Mit Daten der MS Schönberg wurden anschließend die Verfahren weiter verbessert:

Ausgangspunkt war **die Beobachtung der schnellen Sättigung einzelner Spuren bzw. nachfolgend der Mautstelle** bei hohem Verkehrsaufkommen, bei relativ geringer Beeinflussung benachbarter Spuren. Es erschien daher zweckmäßig, **bei beobachteter Staubildung die Umleitung von Verkehr auf weniger benutzte Spuren zu versuchen**, um so

1. Spuren generell besser auszulasten
2. Die Bildung lokaler Staupunkte zu vermeiden
3. Die Auslastung der verfügbaren Spuren möglichst auszubalancieren.

Die Umsetzung des Verfahrens verfolgt die Idee, evtl. auftretende Staulängen auf allen Spuren zu messen, und zu versuchen, Fahrzeuge nach einem Algorithmus auf weniger benutzte Spuren zu leiten.

Das Ergebnis der Berechnung könnte direkt in Signale für Hinweistafeln umgelegt werden. In der Umsetzung an der MS Schönberg wurden die Signale nur visualisiert bzw. gespeichert. In der Simulation wurden die Signale direkt benutzt, um das Verhalten der Fahrzeuglenker ‚virtuell‘ zu beeinflussen.

Im ersten Schritt des Verfahrens werden alle Staulängen visuell vermessen. Nach der Berechnung der Warteschlangenlängen für jede Fahrspur gilt es im nächsten Schritt zu entscheiden, ob und welches Steuersignal ausgegeben werden soll, um den Verkehrsfluss zu verbessern.

Aufgrund der Komplexität der **Mautstellenplanung** **gruppieren wir benachbarte Fahrspuren in die drei Hauptbereiche links, Mitte und rechts**. Die repräsentative Warteschlange eines jeden Bereichs ist dann die längste Warteschlange, gemessen in den Spuren des jeweiligen Bereichs:

$$Stau_a(t) = \max_{l \in LaneSplit(a)} (Stau_l(t)), \quad a \in Bereiche$$

wobei $LaneSplit(a)$ alle Spuren des Bereichs a beinhalten.

Wir definieren fünf mögliche Steuersignale (Pfeile bzw. Anzeige Elemente), die idealerweise als variable Schilder über der Fahrspur in angemessener Entfernung zum Kassenbereich angeordnet sind. **Die Signale sollten so gewählt werden, dass sie einfach darzustellen sind und die Wahrscheinlichkeit maximieren, dass der Fahrer sie wahrnimmt und befolgt**. Bei der Auswahl der Signale wurde die Erkenntnis vom ViF Projekt RENNT umgesetzt, dass Signale möglichst einfach und übersichtlich gestaltet sein müssen:

- *Signal Pfeil Mitte-Links*: Fahrer sollten Fahrspuren im mittleren linken Teil der Mautstelle bevorzugen und die rechte Seite meiden.
- *Signal-Mittelpfeil*: Fahrer sollten Fahrspuren im mittleren Teil der Mautstelle bevorzugen und beide Seiten meiden.
- *Signal Rechts-Mitte-Pfeil*: Fahrer sollten Fahrspuren im rechten Mittelteil der Mautstelle bevorzugen und links davon ausweichen.
- *Signal Links-Rechts-Pfeil*: Fahrer sollten Fahrspuren an den Seiten der Mautstelle bevorzugen und den Mittelteil meiden.
- *Aus*: kein Signal an die ankommenden Fahrer wird angezeigt.

Die Wahl des Signals, das im nächsten Zeitintervall angezeigt werden soll, erfolgt periodisch nach folgendem Algorithmus, dessen einzige Parameter der *Aktivierungsschwellwert* (AT) und der *Deaktivierungsschwellwert* (DT) sind. AT und DT stellen die entsprechenden gemessenen Staulängen in Metern dar:

PROCEDURE optimization(AT , DT):

FOR EACH timestep t :

FOR EACH $a \in Areas$:

a. $Activated_a(t) = Queue_a(t) > AT$

b. $Deactivated_a(t) = Queue_a(t) < DT$

2) IF (all $Activated(t)$ are True): $action(t) = Off$

3) ELSE IF (all $Activated(t)$ are False): $action(t) = action(t - 1)$

4) ELSE: Select the action that moves traffic away from the areas for which $Activated$ is True

5) IF (any $Deactivated(t)$ is True):

Select the action that restores traffic to the areas excluded by $action(t - 1)$

6) Apply $action(t)$

In Punkt 4) des Verfahrens oben wird die Spurwahl so getroffen, dass Fahrzeuge von Staubereichen abgeleitet werden (bspw. nur wenn $Activated_{Left}(t)$ and $Activated_{Right}(t)$ feuern, wird die mittlere Spur gewählt.).

Der Algorithmus oben wurde auf den Messrechnern in der Programmiersprache Python implementiert und mit der visuellen Messung verknüpft. Die in Echtzeit berechneten Signale wurden im GUI des Testsystems dargestellt und gespeichert.

Der Vorteil dieser Implementierung ist, dass sich das System immer dem aktuellen Verkehrszustand anpasst, weil die Messung und daraus resultierende Hinweise in Echtzeit berechnet werden.

2.5. Evaluierungsmethodik

Der letzte Schritt in der Projektmethodik ist die Evaluierung des Optimierungsalgorithmus. Damit soll das Potential der Verbesserung des Verkehrsflusses durch die Optimierung der Spureinteilung zu den Mautschaltern veranschaulicht werden. Da im Rahmen des Projektes eine reale Anwendung des Optimierungsalgorithmus nicht möglich war (durch eine entsprechende Signalisierung im Zulauf der Mautstelle), wird die Evaluierung mithilfe von Verkehrssimulationen durchgeführt. Dazu werden für bestimmte, hochfrequentierte Tage, welche aus der Clusteranalyse im Rahmen der Trendprognose identifiziert wurden, separate Verkehrsmodelle pro Tag aufbereitet. Dabei wurden Tage ausgewählt, die auch innerhalb des Zeitraums der Kameraaufzeichnung sind, um so eine Kalibrierung zwischen Real und Simulation zu ermöglichen.

Insgesamt wurden schließlich 11 verschiedene Tage im Sommer 2017 gewählt, die durch hohe Verkehrsmengen und beobachtete Problemen im Verkehrsablauf an der Mautstelle charakterisiert sind.

Für die Simulation werden die Verkehrsstärken pro Mautschalter und Zeit direkt aus den Abfertigungsdaten der Mautstelle übernommen (beispielhaft eine Auswertung der täglichen Verkehrsstärken je Fahrstreifen und der Schaltertypen in Abbildung 26). Der Verkehrsablauf an der Mautstelle in der Simulation wird mit den Videoaufzeichnungen der Kameras am jeweiligen Tag abgeglichen. Vereinzelt wurden dabei noch kleine Anpassungen im Verkehrsmodell vorgenommen (z.B. bei der Zeitlückenverteilung am Schalter).

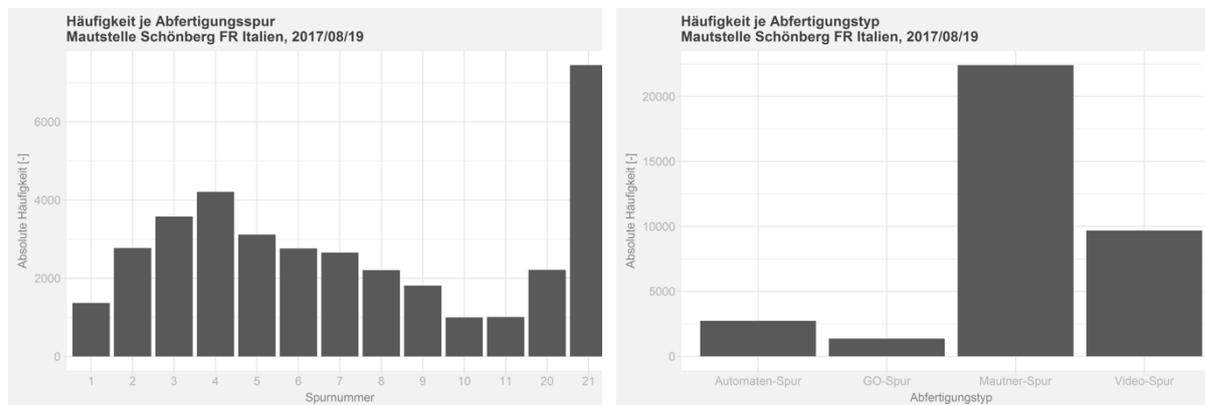


Abbildung 21: Beispielhafte Auswertung der Abfertigungsdaten für den 19.08.2017, links die täglichen Verkehrsmengen je Fahrstreifen, rechts die Menge je Schaltertyp

Für eine Evaluierung werden mehrere Simulationen des gleichen Tages mit unterschiedlicher Startzufallszahl mit aktiver als auch inaktiver Optimierung durchgeführt. Die Startzufallszahl in der Verkehrssimulation gibt an wie die Fahrzeuge in das Verkehrsnetz eingeschleust werden. Das heißt die Menge und Zusammensetzung der Fahrzeuge je Zeitintervall (1 Stunde) wird exakt anhand der empirischen Abfertigungsdaten vordefiniert, jedoch nicht der genaue Zeitpunkt und Reihenfolge der einzelnen Fahrzeuge. Dadurch unterscheiden sich die Simulationsergebnisse bei geänderter Startzufallszahl. Für einen zuverlässigen Vergleich des Verkehrsablaufs mit und ohne Optimierung werden daher mehrere Durchläufe simuliert. Schließlich wurden für jeden Evaluierungstag 5 Simulationsdurchläufe mit unterschiedlicher Startzufallszahl mit aktiver als auch inaktiver Optimierung durchgeführt.

Außerdem wird die Wirkung des Optimierungsalgorithmus auf den Verkehrsablauf bei unterschiedlichen Einstellungen getestet. Der Algorithmus bietet hier folgende Einstellungsparameter:

- **Grenzwert für die Aktivierung: Basiswert 20m** (d.h. der Algorithmus wird aktiviert sofern zumindest an einem Fahrstreifen/Schalter die mittlere Rückstaulänge pro 5min Intervall mindestens 20m beträgt).
- **Grenzwert für die Deaktivierung: Basiswert 10m** (d.h. der Algorithmus wird deaktiviert sofern am Fahrstreifen/Schalter die mittlere Rückstaulänge pro 5min Intervall maximal 10m beträgt)
- **Befolgungsrate: Basiswert 20%** (d.h. 20% der Fahrzeuge befolgen die Empfehlung des Optimierungsalgorithmus und ändern ihre Route

Die Basiswerte bei den Einstellungen ergaben sich im Falle der Grenzwerte für Aktivierung und Deaktivierung anhand der ersten Tests des Algorithmus und lieferten hier plausible Werte der Optimierung. Bezüglich der Befolgungsrate musste ein Basiswert angenommen werden da der Wert nicht empirisch ermittelbar ist und hier keine Erfahrungswerte vorliegen.

Der Algorithmus für die Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer wurde so konzipiert, dass er mit Erkenntnissen aus dem Projekt RENNT vereinbar ist – gewählt wurde eine einfache klare Signalisierung, die nicht zu unübersichtlich ist. Es werden nur drei Fahrstreifenbereiche (Links, Mitte, Rechts) an der Mautstelle Schönberg Richtung Italien in der Optimierung berechnet und bei Bedarf signalisiert.



Abbildung 22 Anzeigetafel an der A10 zur Verteilung des Verkehrs. Laut Erfahrungswerten der ASFINAG befolgen ca. 10-15% der Lenker diese Hinweise (Bildquelle: ASFINAG)

Als Indikatoren für die Bewertung des Verkehrsflusses werden hier die Reisezeit zum Passieren der Mautstelle, die Rückstaulänge pro Fahrstreifen/Schalter und die abgefertigten Verkehrsstärken pro Schalter und Zeit herangezogen. Diese verkehrlichen Kenngrößen können einfach aus den Simulationsergebnissen abgeleitet, berechnet und grafisch dargestellt werden. Dazu wurde wieder die Statistiksoftware R verwendet.

Die Kenngrößen wurden folgendermaßen anhand der Simulationsergebnisse berechnet:

- **Verkehrsstärke:** durch Anordnung von Zählstellen (Detektoren) im Verkehrsmodell kann die Anzahl der abgefertigten Fahrzeuge pro Schalter bzw. Fahrstreifen und Zeitintervall direkt aus den Simulationsergebnissen entnommen werden. Die Werte werden anschließend stundenfein pro Fahrstreifen aggregiert und über alle 5 Simulationsläufe gemittelt.
- **Reisezeit:** der Startquerschnitt der Reisezeitmessung im Verkehrsmodell befindet sich etwa 500m vor der Mautstelle und der Zielquerschnitt etwa 260m nach der Mautstelle. Daraus ergibt sich für Pkw eine durchschnittliche Reisezeit von etwa 70s bei freiem Verkehr (kein Rückstau an der Mautstelle), dies entspricht einer mittleren Geschwindigkeit von etwa 40km/h. Die Reisezeiten aller Fahrzeuge (über alle Fahrstreifen/Schalter) werden im 5min Intervall ausgegeben und anschließend im Form eines Boxplots (Verteilung aller Reisezeiten) und einer Zeitreihe (Tagesverlauf der aus den 5 Simulationsläufen gemittelten Reisezeiten) grafisch dargestellt
- **Staulänge:** zur Berechnung der Staulänge wird im Verkehrsmodell an jedem Fahrstreifen auf Höhe des Schalters (bzw. Schranken bei Videomaut) ein Stauzähler angeordnet. Die Staulängen werden im 5min Intervall schalterfein ausgegeben und über alle 5 Simulationsläufe gemittelt. Die grafische Darstellung der Staulänge erfolgt in Form einer Zeitreihe pro Fahrstreifen/Schalter über den Tag, Boxplots je Fahrstreifen (zum Vergleich mit den Schaltern untereinander) und einer Häufigkeitsverteilung (Anzahl der erfassten Staulängen je Klasse, z.B. >100m, 80-100m, 60-80m etc.)

Durch den Vergleich der Kenngrößen bei Simulation mit und ohne Optimierung kann so das Potential des Algorithmus aufgrund einer verbesserten Spurzuteilung an der Mautstelle aufgezeigt werden. Die Evaluierungsergebnisse werden später in Kapitel 3.3 für Basis- und variierte Werte der Algorithmus Parameter gezeigt.

3. PROJEKTERGEBNISSE

Die Ergebnisse im Projekt VaMOS gliedern sich in drei Bereiche. Kapitel 3.1 zeigt die Ergebnisse der visuellen Verkehrszustandsmessung an der Mautstelle Schönberg. Kapitel 3.2 stellt Ergebnisse aus der Verkehrsprognose vor. Schließlich werden in Kapitel 3.3 die Resultate der Evaluierung des Optimierungsalgorithmus präsentiert.

3.1. Visuelle Verkehrszustandsmessung

Anfang **Juni 2017 wurden die vier Kameras für den Testaufbau an der MS Schönberg installiert und in Betrieb genommen**. Das heißt der Verkehrszustand des gesamten Vorbereiches der Mautstelle (Richtung Italien) wurde im Zeitraum 1.6.2017 bis 30.09.2017 erfasst und vermessen. Die Wartung der Anlage wurde in den folgenden Wochen online durchgeführt, wobei von der ASFINAG zu diesem Zweck eine schnelle Internet Verbindung zur Verfügung gestellt wurde. Abbildung 13 aus Abschnitt 3.2 gibt einen Überblick über die Mautstation und die Installation der Kameras vor Ort.

Die Messungen wurden im Sekundenintervall auf allen Kameras durchgeführt, wobei jedoch immer mehrere Messungen (typischerweise 5 Sekunden) aggregiert wurden. Pro Kamera wurden im Mess-Zeitraum ca. 2 Terrabyte an komprimierten Daten gespeichert. Die daraus abgeleiteten Messungen der Staulängen sind, mit wenigen Lücken, für den gesamten Messzeitraum verfügbar. Die Qualität der Bilddaten erlaubte eine Messung von ca. 10 m Entfernung bis zu ca. 120 m Distanz zum Beginn der Mautstation. Jede Einzelmessung wurde protokolliert und kann bei Bedarf für weitere Auswertungen verwendet werden, beispielsweise für eine weitere Verbesserung der Simulation oder der Optimierung.

Die gemeinsame Kalibration der Kameras erlaubt die Erfassung der Messungen in ein gemeinsames Koordinaten System, so dass ein Gesamtbild der Verkehrslage aus den Einzelmessungen generierbar ist. Dies wurde ansatzweise bei der Visualisierung der Staulängen so durchgeführt.

Die Grundlage für die Optimierung stellen die in Echtzeit gemessenen Staulängen der Kameras dar. Die folgenden drei Abbildungen 23-25 zeigen mit den Kameras gemessene Staulängen für einen Tag mit sehr starkem Reiseverkehr, den 4.6.2017, den Tag davor und den darauffolgenden Tag, die beide ein deutlich geringeres Verkehrsaufkommen zeigen.

Diese drei Tage werden unter anderem beispielhaft in den Analysen in den folgenden Abschnitten verwendet. Bemerkenswert ist in den Messungen die zeitlich völlig unterschiedliche Verteilung der Verkehrsspitzen an diesen drei Tagen – die Verteilung des Verkehrs ist offensichtlich zeitlich sehr dynamisch. Dies hat zur Konsequenz, dass das **Optimierungsverfahren ebenfalls sehr dynamisch bzw. flexibel auf die Änderungen der zufließenden Verkehrsstärke reagieren muss**. Letztendlich hat sich eine Reaktionszeit von 5 Minuten auf Änderung als bester Wert herausgestellt.

Kürzere Reaktionszeiten wurden getestet, haben aber die Ergebnisse verschlechtert.

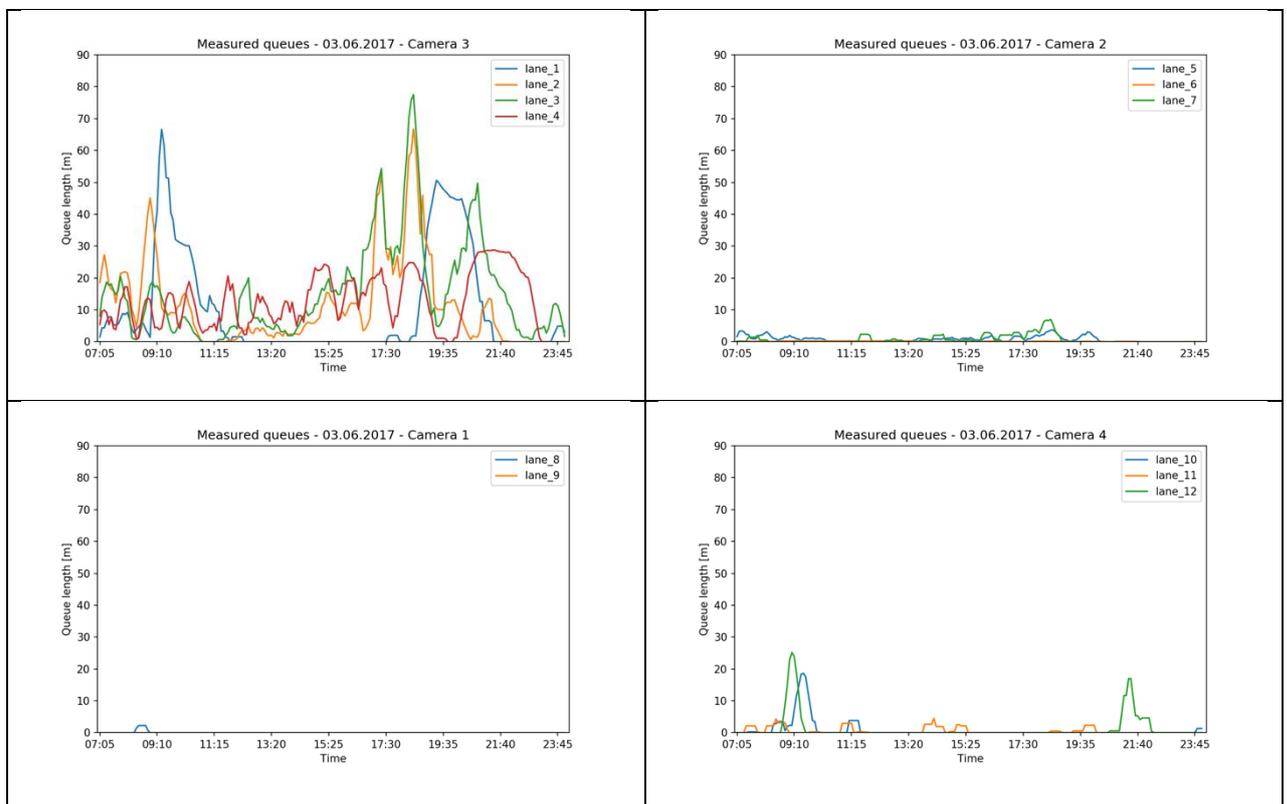


Abbildung 23: Die Messung der Staulängen aller Kameras für den 3.6.2017.

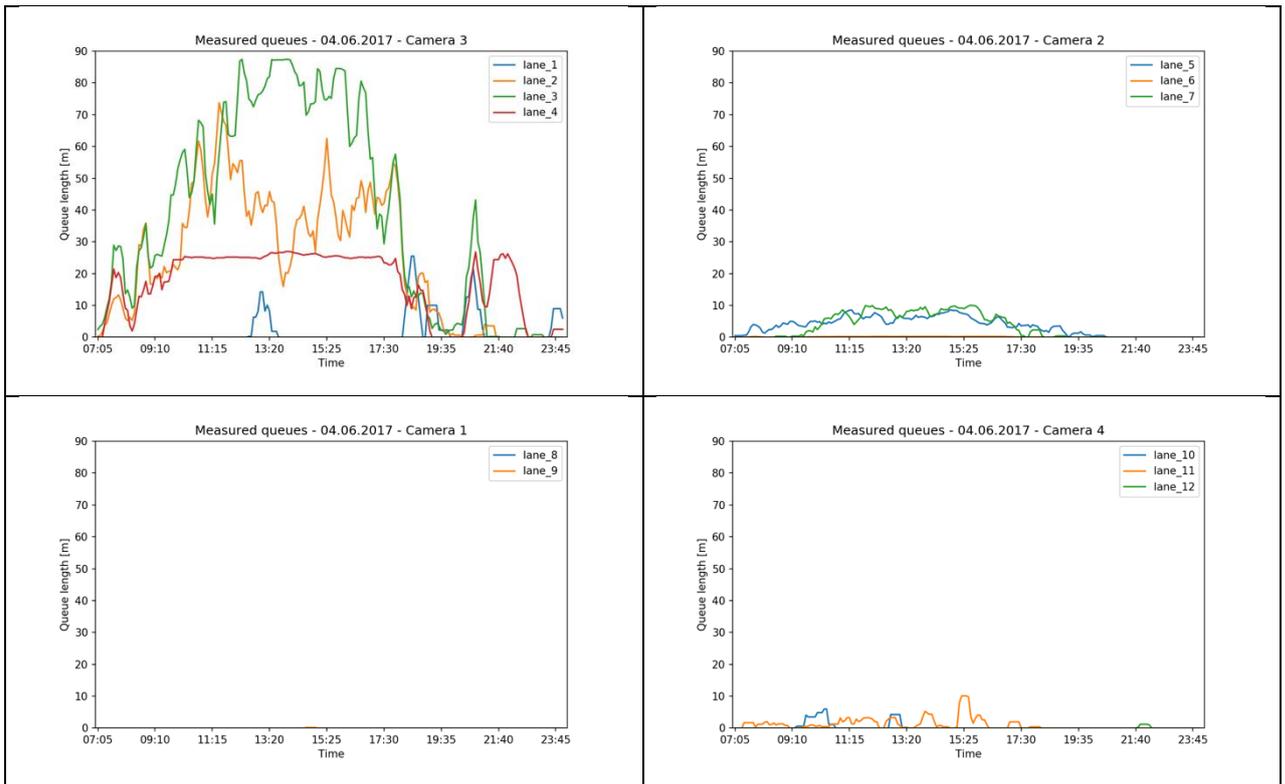


Abbildung 24: Die Messung der Staulängen aller Kameras für den 4.6.2017.

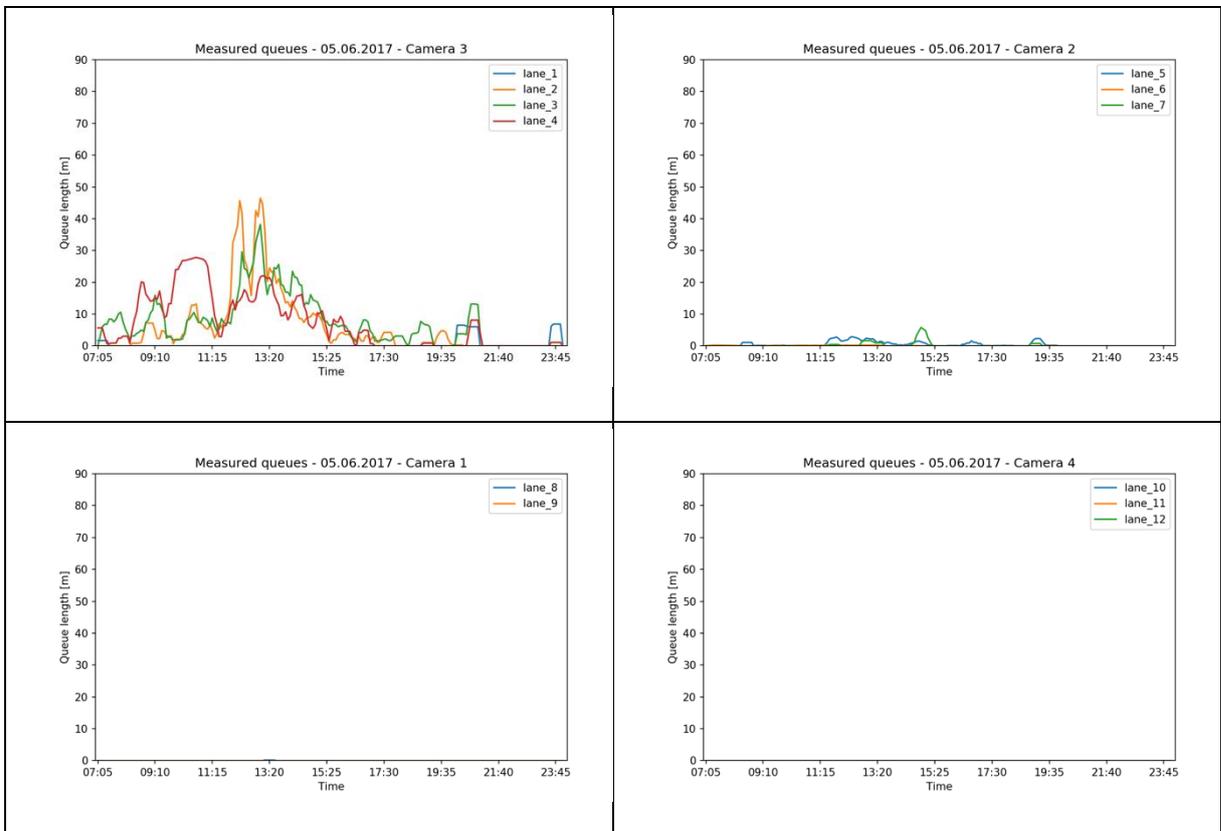


Abbildung 25: Die Messung der Staulängen aller Kameras für den 5.6.2017.

3.2. Verkehrsprognose

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse des entwickelten Prognosemodells vorgestellt. Dabei werden zuerst in Kapitel 3.2.1 die Resultate der Trendprognose und anschließend in Kapitel 3.2.2 und 3.2.3 beispielhafte Ergebnisse aus der Lang- und Kurzfristprognose gezeigt.

3.2.1. Ergebnisse der Trend-Prognose

Das Kernergebnis der Trendprognose sind 20 repräsentative Tagesnetzganglinien die aus der Clusteranalyse gewonnen wurden (s. Abbildung 26). Die Tagesnetzganglinien umfassen die stündlichen Verkehrsstärken von sechs unterschiedlichen Messquerschnitten auf der Autobahn A12 bzw. A13. Der Messquerschnitt ganz rechts (MQ_A13_1_010.368) befindet sich direkt vor der Mautstelle Schönberg (Richtung Italien). Die stündlichen Verkehrsstärken von diesem Messquerschnitt dienen demnach als Prognose für die Mautstelle. Die repräsentative Tagesnetzganglinie mit der höchsten Verkehrsspitze an der Mautstelle (ca. 2500 Kfz/h) besitzt dabei Cluster 20.

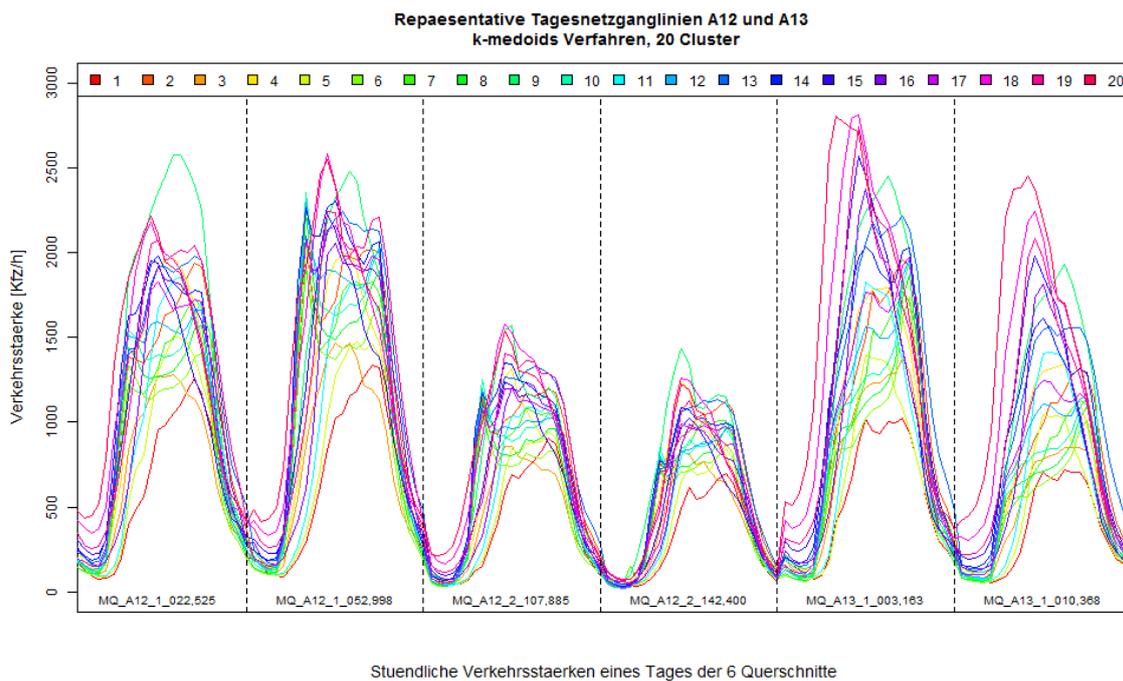


Abbildung 26: Repräsentative Tagesnetzganglinien als Ergebnis der Trendprognose

Für eine Anwendung der repräsentativen Tagesnetzganglinien als Prognosewerkzeug wurden diese mit dem Kalendarium verknüpft. Unterschieden werden hier Saisonen eines Jahres und spezielle Tagestypen (z.B. SoF, Sonn- und Feiertag). Dabei kann jedem Kalendertag (egal ob Vergangenheit oder Zukunft) genau einer Saison, einem Tagestypen und damit einem Cluster (repräsentative Tagesnetzganglinie) zugeordnet werden (siehe Tabelle 2 unten).

Neben den „typischen Tagen“ je Saison gibt es noch einzelne Tage mit besonderer Charakteristik wie beispielsweise Gründonnerstag oder Mariä Empfängnis, die direkt einem Cluster zugewiesen werden können. Durch diese Einteilung kann weit im Voraus eine Prognose der zu erwartenden Verkehrsstärken an der Mautstelle für beliebige Tage vorgenommen werden. Dies kann beispielsweise auch für die Planung der Schalterbelegung an der Mautstelle nützlich sein.

Tabelle 2: Zuordnung der repräsentativen Ganglinien (Cluster) zu Saisonen und Tagestypen

Saison- bezeichnung	Saisonerklärung	Cluster Nr. je Tagestyp					
		MoDo	MoDi	MiDo	Fr	Sa	SoF
Weihnachtsferien	lt. Schulkalender Österreich	3			3	4	5
Winter 1	ab 7. Jänner idR		6	8	7	4	5
Semesterferien	lt. Schulkalender Österreich, entspricht 3 Wochen im Februar		6	8	2	9	11
Frühling 1	zw. Semester- und Osterferien		8	10	2	9	11
Osterferien	Sa vor Palmsonntag bis inkl. Di nach Ostern	12			18	4	11
Frühling 2	Mi nach Osterferien bis inkl. Fr zu Pfingsten	10			7	4	5
Sommer	ab Sa zu Pfingsten bis Sommerferien	12			13	15	16
Sommerferien	lt. Schulkalender Tirol	14			13	18	19
Herbst	Ende Sommerferien bis inkl. 31.10.	12			2	15	16
Winter 2	ab 1.11. bis Weihnachtsferien	8			7	3	1
Sonstige Tage mit besonderer Charakteristik	Letzte drei Sa im Aug.					20	
	Christtag & Neujahr						1
	Gründonnerstag			13			
	Sa Beginn Osterferien					9	
	Sa zu Pfingsten					20	
	Fr nach Fronleichnam & Christi Himmelfahrt				17		
	Mariä Empfängnis						11

3.2.2. Ergebnisse der Langfristprognose

Das Resultat der Langfristprognose ist die Ausgabe einer stundenfeinen Musterganglinie. Diese ist die ähnlichste Tagesnetzganglinie auf Basis der gemessenen, historischen Verkehrsstärken des aktuellen Tages. Hierfür müssen die Verkehrsstärken von zumindest vier abgelaufenen Stunden der sechs Messquerschnitte der Tagesnetzganglinie vorliegen. Das heißt, eine Langfristprognose für die Mautstelle Schönberg (Richtung Italien) ist ab 4:00 Uhr des jeweiligen Tages möglich und aktualisiert sich nach Ablauf jeder weiteren Stunde bis zum Ende des Tages.

Als Beispielergebnis wird im Folgenden eine Prognose für den 11.06.2016 demonstriert. Zuerst wird die Musterganglinie nach Ablauf der 6. Stunde des Tages (6:00 Uhr) gesucht (Abbildung 27 links). Aufgrund der 6 gemessenen Verkehrsstärken an den sechs Zählstellen (schwarze Linie) wurde die Tagesnetzganglinie des 22.06.2013 (rote Linie) als die ähnlichste identifiziert und liefert somit eine Prognose für den aktuellen Tag. Später wird das gleiche Prozedere nach Ablauf der 14. Stunde absolviert. In diesem Fall wurde als Musterganglinie der 15.06.2013 identifiziert (Abbildung 27 rechts).

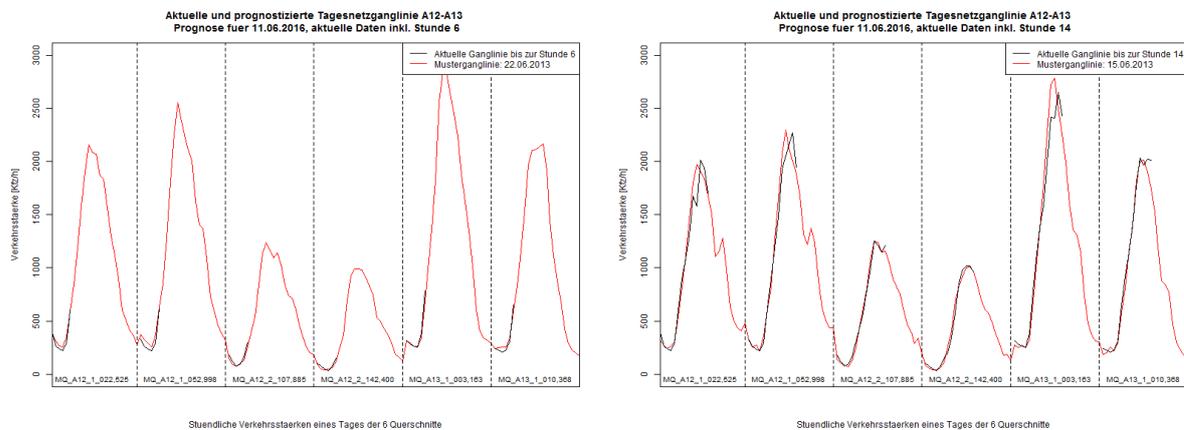


Abbildung 27: Beispiel einer Langfristprognose mit Prognose ab 6:00 Uhr (links) bzw. 14:00 Uhr (rechts) des aktuellen Tages (in diesem Fall der 11.06.2016)

Zur Beurteilung der Güte der Langfristprognose werden für den betrachteten Tag (Sa 11.06.2016) die prognostizierten mit den gemessenen Verkehrsstärken gegenübergestellt (siehe Tabelle 3). Es wird hier nach jeder Stunde (Beginn 5:00 Uhr) der mittlere Fehler absolut und relativ über alle abgelaufenen Stunden am Messquerschnitt vor der Mautstelle Schönberg (MQ_A13_1_010.368) bestimmt. Der relative Fehler beträgt maximal 10%. Dies zeigt, dass das gewählte Verfahren im Stande ist eine zuverlässige Prognose der Verkehrsstärken an der Mautstelle für die nächsten Stunden zu liefern.

Tabelle 3: Absoluter und relativer Fehler bei der Langfristprognose für den 11.06.2016

Aktuelle abgelaufene Stunde	Datum der Musterganglinie	Mittlerer Fehler absolut [Fz/h]	Mittlerer Fehler relativ [%]
5	11.08.2013	15	6,3%
6	22.06.2013	31	10,0%
7	22.06.2013	39	9,8%
8	22.06.2013	35	7,2%
9	15.06.2013	40	6,7%
10	15.06.2013	41	5,8%
11	15.06.2013	40	4,8%
12	15.06.2013	41	4,4%
13	15.06.2013	47	4,6%
14	15.06.2013	63	5,8%
15	15.06.2013	83	7,3%
16	15.06.2013	88	7,7%
17	15.06.2013	104	9,0%
18	15.06.2013	105	9,2%
19	15.06.2013	102	9,1%
20	15.06.2013	99	9,1%
21	15.06.2013	95	9,1%
22	15.06.2013	92	9,0%
23	22.06.2013	64	6,6%
24	22.06.2013	62	6,5%

3.2.3. Ergebnisse der Kurzfristprognose

Die Kurzfristprognose liefert Verkehrsmengen im 5min Intervall für die nächste Stunde (d.h. 12x 5min Werte) anhand der gemessenen Verkehrsmengen im 5min Intervall der letzten beiden Stunden am Messquerschnitt MQ_A13_1_010.368 direkt vor der Mautstelle. Als exemplarisches Beispiel wird das Ergebnis der Kurzfristprognose für den 17.06.2016 mit der Prognose der Werte zwischen 6:00 und 7:00 Uhr in Abbildung 28 gezeigt. Die graue Linie entspricht der geglätteten Zeitreihe mit dem ARIMA Modell auf Basis der gemessenen Verkehrsdaten (schwarze Linie). Mit dieser Zeitreihe wird eine Prognose für die nächste Stunde auf zwei verschiedene Arten, mit und ohne Kopplung mit der Langfristprognose, vorgenommen. Man erkennt sehr gut den positiven Effekt der Kopplung (grüne Linie), dadurch kann der Anstieg der Verkehrsmenge viel besser abgebildet werden, als ohne Nutzung der prognostizierten Verkehrsstärken aus der Langfristprognose (rote Linie).

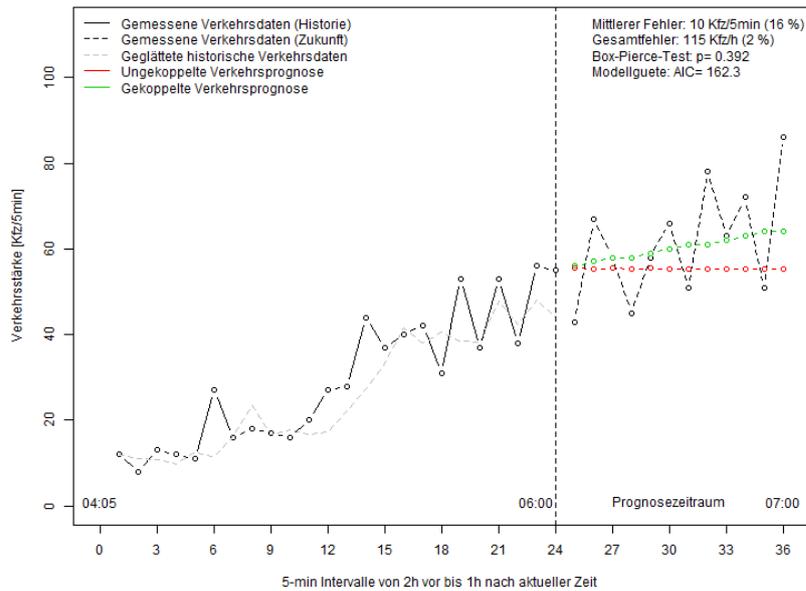


Abbildung 28: Kurzfristprognose für die Stunde 6:00-7:00 Uhr am 17.06.2016

Die Güte der Prognose wird wieder anhand des mittleren Fehlers überprüft (Tabelle 4). Aufgrund der starken Schwankung der 5min Verkehrsstärken ist hier mit Abweichungen bis zu 30% zu rechnen. Der Trend der Zeitreihe der Verkehrsmengen kann jedoch mit dem entwickelten Verfahren durch die Kopplung mit der Langfristprognose abgebildet werden.

Tabelle 4: Absoluter und relativer Fehler bei der Kurzfristprognose 6:00-7:00 Uhr am 17.06.2016

Uhrzeit	Messung [Kfz/5min]	Prognose [Kfz/5min]	Absoluter Fehler [Kfz]	Relativer Fehler [%]
06:05	43	56	-13	-30%
06:10	67	57	+10	+15%
06:15	58	58	0	0%
06:20	45	58	-13	-29%
06:25	58	59	-1	-2%
06:30	66	60	+6	+9%
06:35	51	61	-10	-20%
06:40	78	61	+17	+22%
06:45	63	62	+1	+2%
06:50	72	63	+9	+12%
06:55	51	64	-13	-25%
07:00	86	64	+22	+26%
Mittelwert	62	60	10	+16%

3.3. Evaluierung

Die **Evaluierung wird durch 5 Simulationsdurchläufe mit und ohne Optimierung an ausgewählten Tagen vorgenommen**. Mehrere Läufe pro Szenario wurden gemittelt, um die durch die Zufallsdaten entstehende Streuung der Simulationsergebnisse zu glätten.

Betrachtet werden die Kenngrößen mittlere Reisezeit (für das Passieren der Mautstelle), Verkehrsstärke (Kapazität der Mautstelle) und Rückstaulänge (pro Fahrstreifen bzw. Mautschalter), die aus der Aufbereitung der Simulationsergebnisse gewonnen werden.

Beim Entwickeln und Prüfen des Optimierungsalgorithmus wurden verschiedene Parametereinstellungen (Befolgsrate, Grenzwert für Aktivierung und Deaktivierung) getestet. Für die Befolgsrate liegen keine Erfahrungswerte vor, es wurde im Rahmen des Projektes eine **Befolgsrate von 20% als Basiseinstellung** angenommen. Bei den Grenzwerten für Aktivierung und Deaktivierung des Algorithmus in der Simulation stellte sich eine gute Funktionalität mit den Rückstaulängen 20m bzw. 10m ein. **Dadurch ergibt sich eine Basiseinstellung für die Evaluierung von 20% Befolgsrate, 20m Staulänge zur Aktivierung und 10m Staulänge zur Deaktivierung des Algorithmus.**

Insgesamt werden 11 verschiedene Tage im Sommer 2017 betrachtet an denen große Verkehrsmengen und Probleme im Verkehrsablauf an der Mautstelle beobachtet wurden. Tabelle 5 gibt einen Überblick zu den Evaluierungstagen, der zugehörigen Cluster Nummer aus der Trendprognose, welche Einstellungen hier getestet wurden und wo die Ergebnisse im vorliegenden Bericht gezeigt werden.

Tabelle 5: Übersicht der betrachteten Tage in der Evaluierung

Tag/Datum	Anmerkung	Cluster Nr.	Basis-einstellung	Parameter-variation	Evaluierungsergebnis
02.06.2017	Freitag zu Pfingsten	7	x		im Anhang
03.06.2017	Samstag zu Pfingsten	20	x	x	Kap. 3.3.2 & Anhang
04.06.2017	Pfingstsonntag	16	x		im Anhang
05.06.2017	Pfingstmontag	16	x		Kap. 3.3.1 & Anhang
28.07.2017	Freitag	13	x		im Anhang
29.07.2017	Samstag	18	x	x	Kap. 3.3.2 & Anhang
30.07.2017	Sonntag	19	x		im Anhang
05.08.2017	Samstag	18	x		im Anhang
06.08.2017	Sonntag	19	x		im Anhang
12.08.2017	Samstag	20	x		im Anhang
19.08.2017	Samstag	20	x		Kap. 3.3.1 & Anhang

Die Ergebnisse mit der Basiseinstellung werden in den folgenden Abschnitten für exemplarische Tage gezeigt. Die vollständigen Ergebnisse für alle Tage können dem Anhang entnommen werden. Die Wirkung des Algorithmus mit geänderten Parametereinstellungen werden danach in Kapitel 3.3.2 vorgestellt.

3.3.1. Wirkung anhand Basiseinstellung des Algorithmus

Die Wirkung des Optimierungsalgorithmus mit der Basiseinstellung (20% Befolgung, Staulänge von 20m für Aktivierung bzw. 10m für Deaktivierung) wird hier exemplarisch anhand von zwei Tagen im Detail dargestellt. Die vollständige Auswertung aller 11 Tage kann dem Anhang entnommen werden.

Pfingstmontag 05.06.2017

Zuerst werden die abgefertigten Verkehrsstärken pro Stunde an den einzelnen Schaltern der Mautstelle betrachtet. Abbildung 29 zeigt den Tagesverlauf der stündlichen Verkehrsmengen für die Fahrstreifen 1 bis 5 (oben) bzw. 6 bis 9 (unten) mit und ohne Optimierung. **Die Werte repräsentieren dabei den Mittelwert aus den 5 Simulationsläufen.**

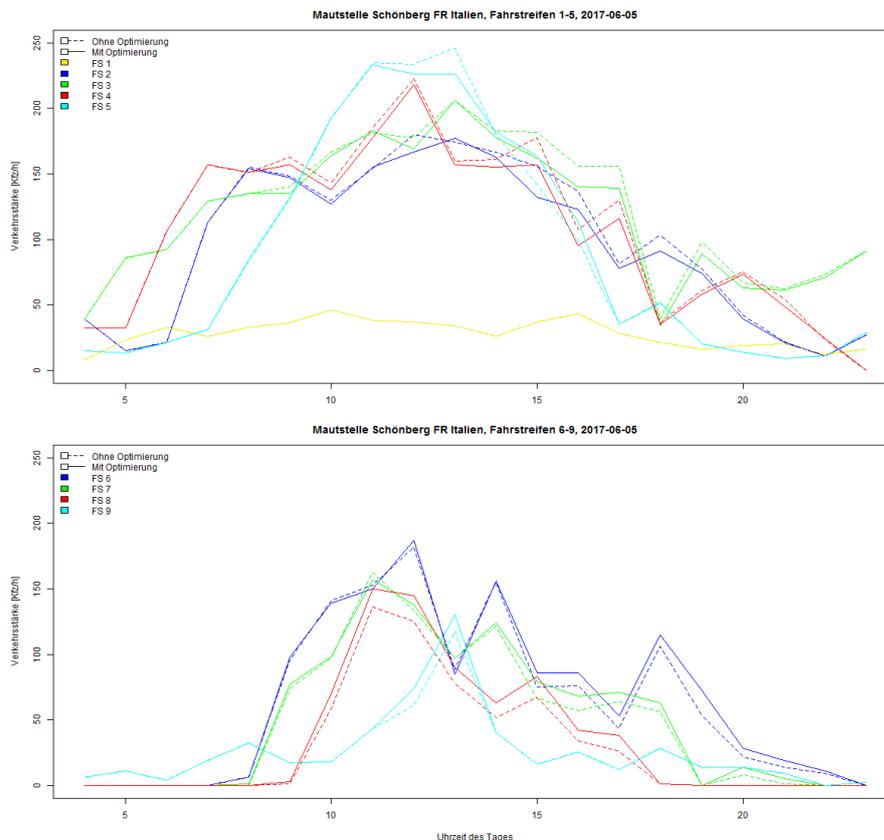


Abbildung 29: Tagesverlauf der stündlichen Verkehrsstärken für die Fahrstreifen 1 bis 5 (oben) bzw. 6 bis 9 (unten) mit und ohne Optimierung am 05.06.2017

Daraus erkennt man eine Verlagerung von den rechten Fahrstreifen (FS 2-5) zu den linken Fahrstreifen (FS 6-9) aufgrund der Optimierung. Die Summe der Verkehrsstärken über alle Fahrstreifen je Stunde bzw. Tag ist dabei nahezu identisch egal ob mit oder ohne Optimierung. **Das bedeutet, dass die Optimierung eine verbesserte Spuraufteilung, jedoch keine Kapazitätssteigerung der Mautstelle bewirkt.** Dazu müssten bei hohen Verkehrsstärken die Abfertigungszeiten direkt am Schalter reduziert werden.

Im nächsten Schritt werden die mittleren Reisezeiten im 5min Intervall zum Passieren der Mautstelle analysiert. Abbildung 30 zeigt die mittleren Reisezeiten über alle Fahrstreifen mit und ohne Optimierung. Dabei ist ein deutlicher Anstieg der Reisezeit um etwa 11 Uhr ohne Optimierung zu beobachten. Dieser Anstieg existiert bei aktiver Optimierung nicht. Bei Betrachtung der Reisezeiten als Boxplot (Abbildung 31) ist gut zu erkennen, dass der Optimierungsalgorithmus die hohen Reisezeiten (Ausreißer) abschwächen kann; der Median der Reisezeiten ist nahezu unverändert, jedoch ist der Mittelwert (71.9s vs. 74.4s) und die Standardabweichung (9.0s vs. 19.9s) bei aktiver Optimierung geringer.

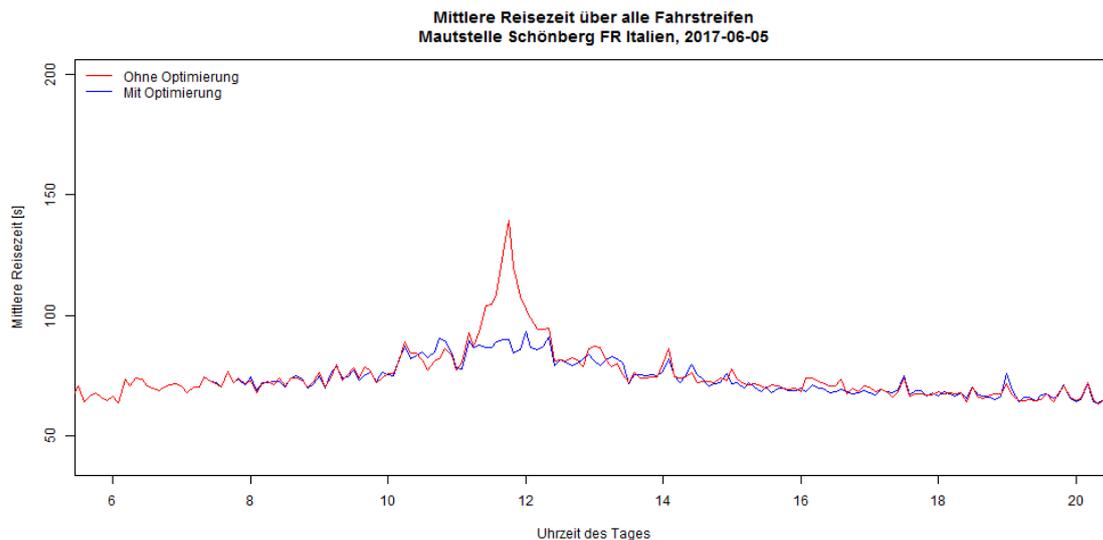


Abbildung 30: Mittlere Reisezeiten zum Passieren der Mautstelle Schönberg über alle Fahrstreifen mit und ohne Optimierung für den 05.06.2017

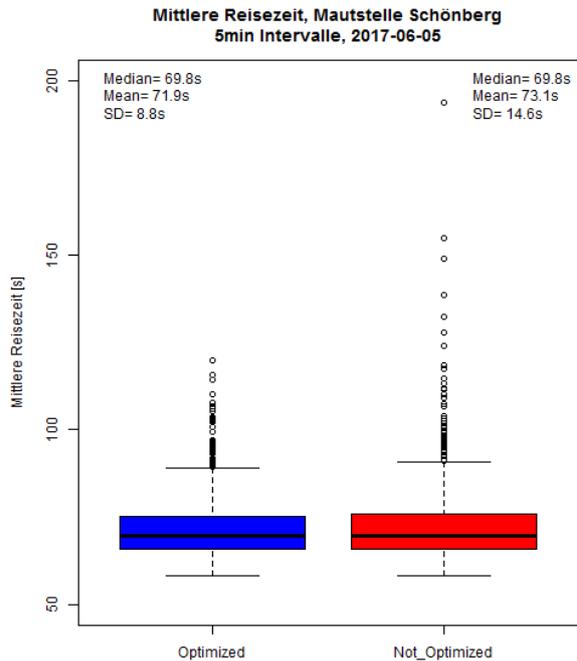


Abbildung 31: Boxplot der mittleren Reisezeiten mit und ohne Optimierung über alle Fahrstreifen für den 05.06.2017

Im Folgenden werden die Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS) am 05.06.2017 betrachtet. Es ist gut zu erkennen, dass mit Optimierung die Spitzen der Rückstaulängen am FS 4 und FS 5 zwischen 10 und 14 Uhr reduziert werden können (Abbildung 32) und sich dadurch die Staulängen am FS 6 und FS 8 geringfügig erhöhen (Abbildung 33).

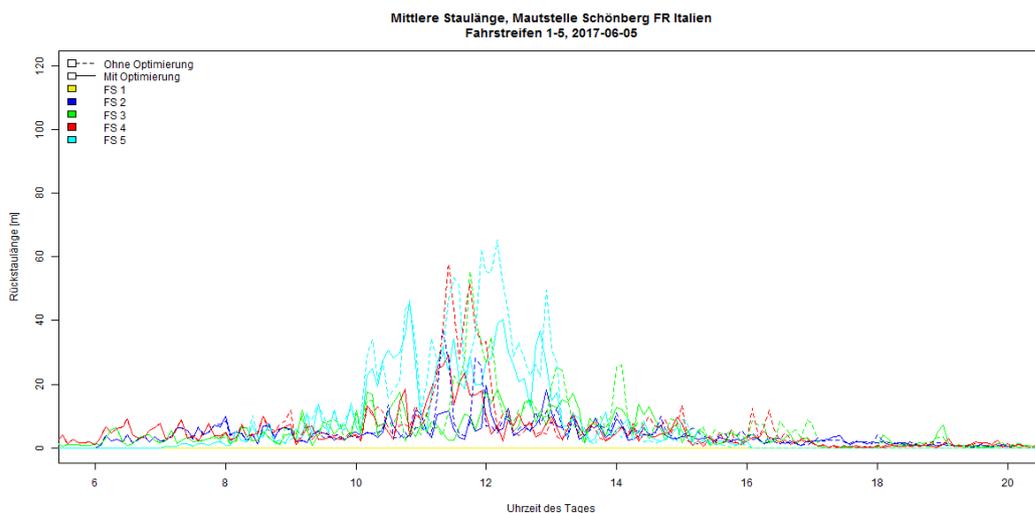


Abbildung 32: Rückstaulängen an der Mautstelle Schönberg mit und ohne Optimierung an den Fahrstreifen 1 bis 5 für den 05.06.2017

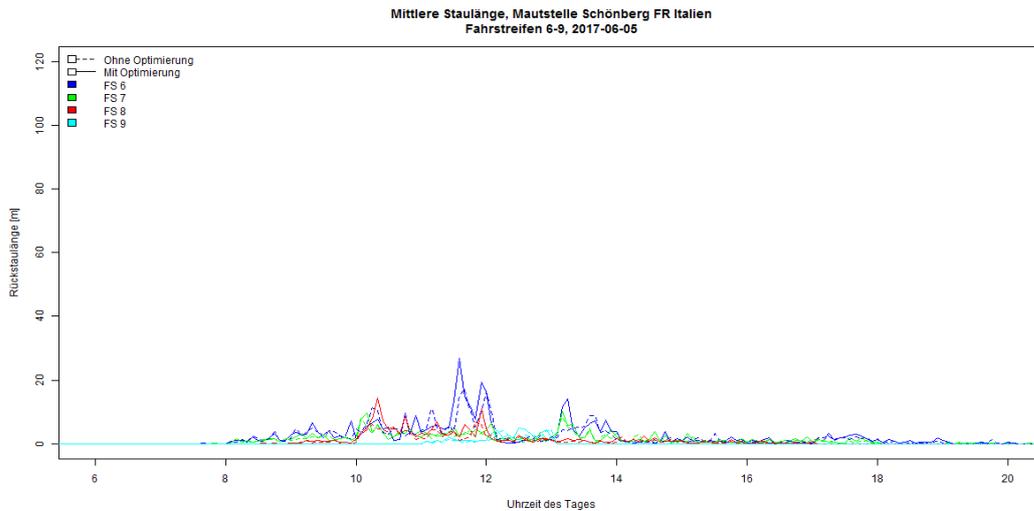


Abbildung 33: Rückstaulängen an der Mautstelle Schönberg mit und ohne Optimierung an den Fahrstreifen 6 bis 9 für den 05.06.2017

Abschließend werden alle erfassten Staulängen je Spur nach Klassen unterteilt (20-40m, 40-60m, 60-80m, 80-100m und >100m). Die Betrachtung der Häufigkeit der Klassen in Abbildung 34 zeigt, dass große Staulängen >80m durch die Optimierung deutlich seltener auftreten, die Häufigkeit bei Staulängen 20-80m bleibt dabei nahezu unverändert.

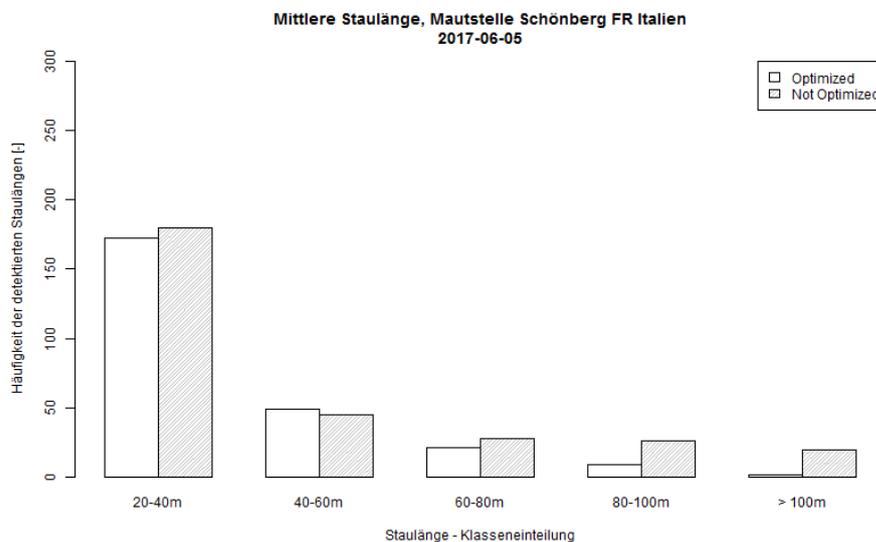


Abbildung 34: Häufigkeit der mittleren Staulängen an der Mautstelle Schönberg nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für den 05.06.2017

Samstag 19.08.2017

Als zweites Beispiel wird der 19.08.2017 herangezogen, ein Samstag im August mit starkem Urlauberverkehr. Der Vergleich der an der Mautstelle abgefertigten Verkehrsmengen mit und ohne Optimierung ist in Abbildung 37 dargestellt. Bei Betrachtung der Verkehrsmengen über alle Fahrstreifen (links oben) kann in der Spitzenstunde (9:00-11:00 Uhr) eine geringe Kapazitätssteigerung um 3-4% festgestellt werden. Dies ergibt sich vor allem aus einer Verlagerung des Verkehrs von den Fahrstreifen 2-4 (rechts oben) zu den Fahrstreifen 5 (rechts oben) bzw. 6-7 (links unten). An den übrigen Fahrstreifen 8-9 (links unten) sowie den Fächer- und Videomautspuren 10-13 (rechts unten) sind kaum Unterschiede in den Verkehrsstärken mit und ohne Optimierung wahrzunehmen.

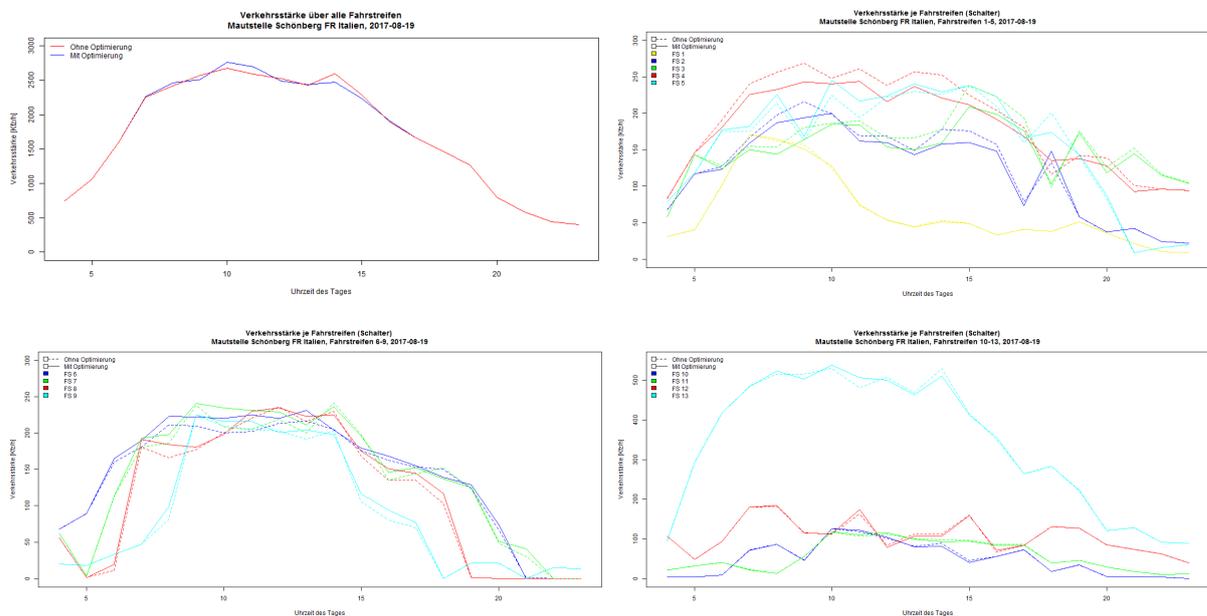


Abbildung 35: Tagesverlauf der Verkehrsstärken am 19.08.2017 über alle Fahrstreifen (links oben), den Fahrstreifen 1-5 (rechts oben), den Fahrstreifen 6-9 (links unten) sowie die Fächer- und Videomautspuren 10-13 (rechts unten)

Im nächsten Schritt werden die mittleren Reisezeiten (alle Fahrstreifen) zum Passieren der Mautstelle am 19.08.2018 analysiert (Abbildung 36). Durch die Optimierung können vor allem im Zeitbereich 7:00-12:00 Uhr deutlich geringere Reisezeiten beobachtet werden. Die Verteilung aller Reisezeiten über den ganzen Tag in Form eines Boxplots zeigt (Abbildung 37), dass Mittelwert und Standardabweichung mit Optimierung um etwa 5% geringer sind als ohne Optimierung.

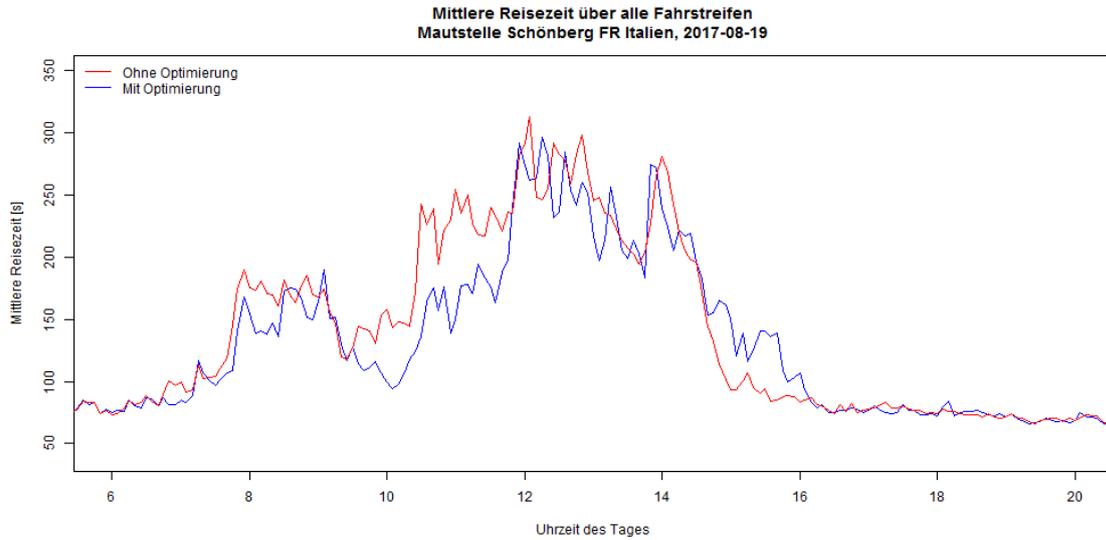


Abbildung 36: Mittlere Reisezeiten zum Passieren der Mautstelle Schönberg mit und ohne Optimierung über alle Fahrstreifen für den 19.08.2017

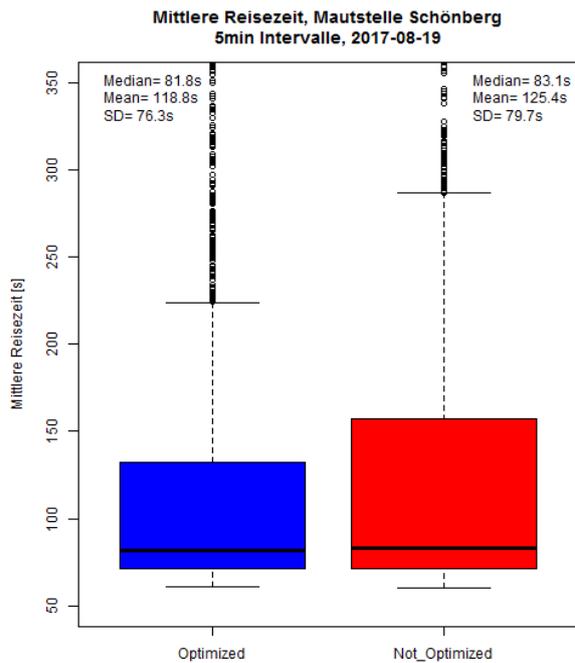


Abbildung 37: Boxplot der mittleren Reisezeiten mit und ohne Optimierung über alle Fahrstreifen für den 19.08.2017

Im Folgenden werden die Rückstaulängen je Fahrstreifen im Tagesverlauf betrachtet (Abbildung 38). Man erkennt hier vor allem an den Fahrstreifen 3 und 4 eine starke Reduktion der Rückstaulängen aufgrund der Optimierung.

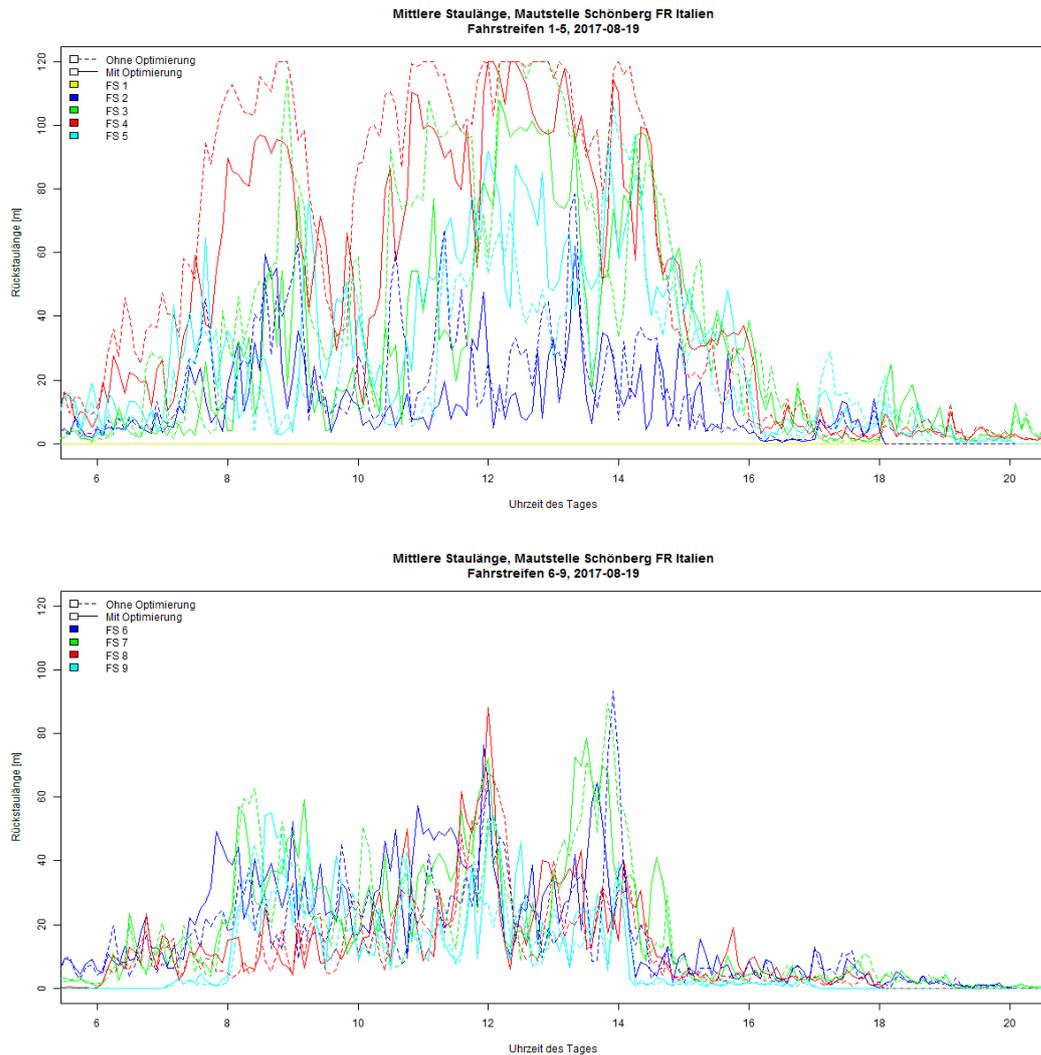


Abbildung 38: Rückstaulängen mit und ohne Optimierung an den Fahrstreifen 1 bis 5 (oben) bzw. 6 bis 9 (unten) für den 19.08.2017

Die Unterteilung der Rückstaulängen in Klassen in Abbildung 39 zeigt, dass die Häufigkeit der **Staulängen zwischen 20-80m durch die Optimierung leicht zunimmt, jedoch wird die Häufigkeit der Staulängen >100m um etwa 20% durch die Optimierung reduziert**. Das bedeutet, dass sehr hohen Staulängen >100m durch die Optimierung teilweise abgebaut werden und sich auf geringere Staulängen an anderen Fahrstreifen verteilen. Insgesamt ist durch die Optimierung eine homogenere Verteilung des starken Verkehrsaufkommens auf die einzelnen Fahrstreifen bzw. Mautschalter zu beobachten.

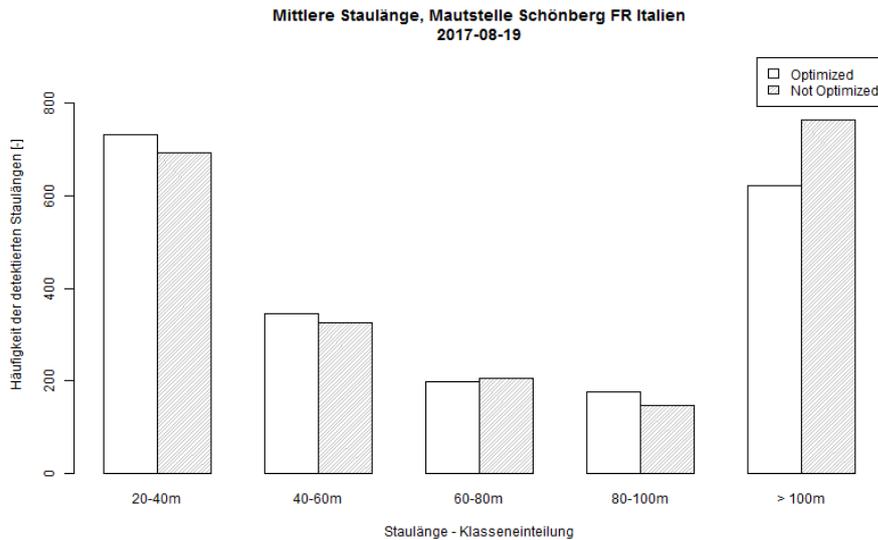


Abbildung 39: Häufigkeit der mittleren Staulängen an der Mautstelle Schönberg nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für den 19.08.2017

3.3.2. Wirkung durch Variation der Algorithmus Parameter

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung aufgrund einer geänderten Wahl der Einstellungen für den Optimierungsalgorithmus untersucht. Dabei werden für zwei Tage (Sa 03.06.2017 und Sa 29.07.2017) unterschiedliche Szenarien, Basiseinstellung plus vier mit geänderten Parametern, betrachtet (s. Tabelle 6). Beim Szenario 2a bzw. 2b wird eine geringere bzw. höhere Befolgungsrate bei gleichbleibenden Grenzwerten für Aktivierung und Deaktivierung getestet. Bei den Szenarien 3a und 3b wird die Befolgungsrate von 20% belassen und die mit den Grenzwerten für Aktivierung und Deaktivierung variiert.

Tabelle 6: Übersicht der simulierten Szenarien mit Variation der Algorithmus Parameter

Szenario	Befolgungsrate	Grenzwert für Aktivierung	Grenzwert für Deaktivierung
1 (Basisfall)	20%	20m Staulänge	10m Staulänge
2a	10%	20m Staulänge	10m Staulänge
2b	30%	20m Staulänge	10m Staulänge
3a	30%	40m Staulänge	10m Staulänge
3b	20%	40m Staulänge	20m Staulänge

Samstag zu Pfingsten, 03.06.2017

Zuerst werden die Reisezeiten der Szenarien 2a und 2b mit dem Basisfall verglichen (Abbildung 40). Dabei können kaum Unterschiede zwischen den Szenarien ausgemacht werden. Lediglich bei der höheren Befolgungsrate von 30% kann ein minimaler Anstieg von Mittelwert, Median und Standardabweichung der Reisezeit festgestellt werden.

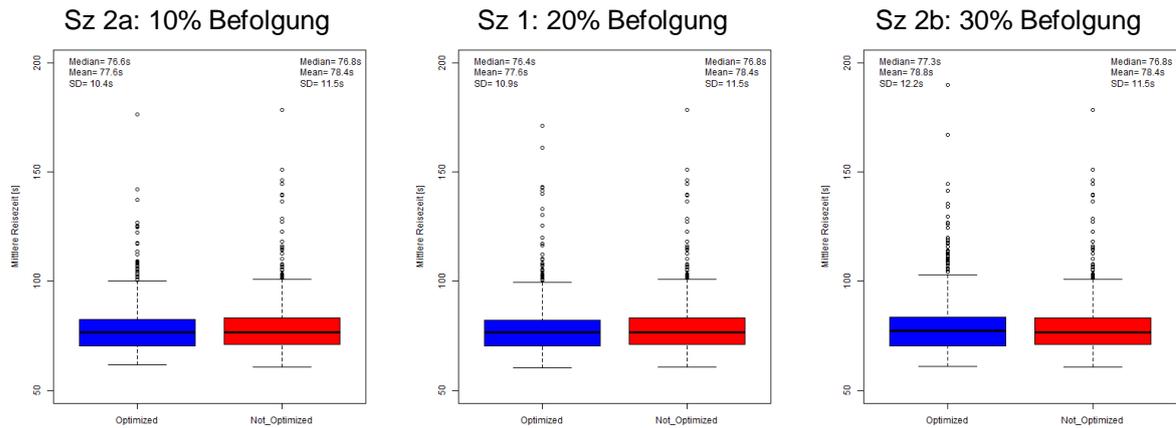


Abbildung 40: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung für eine Befolgerate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 03.06.2017

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Befolgerate auf die Rückstaulängen untersucht (Abbildung 41). Ähnlich wie zuvor bei der Reisezeit kann hier kein großer Unterschied zwischen den Szenarien festgestellt werden. Bei allen drei Szenarien wird die Häufigkeit der Staulängen >80m reduziert, tendenziell ist die Verbesserung bei der geringsten Befolgerate von 10% am größten.

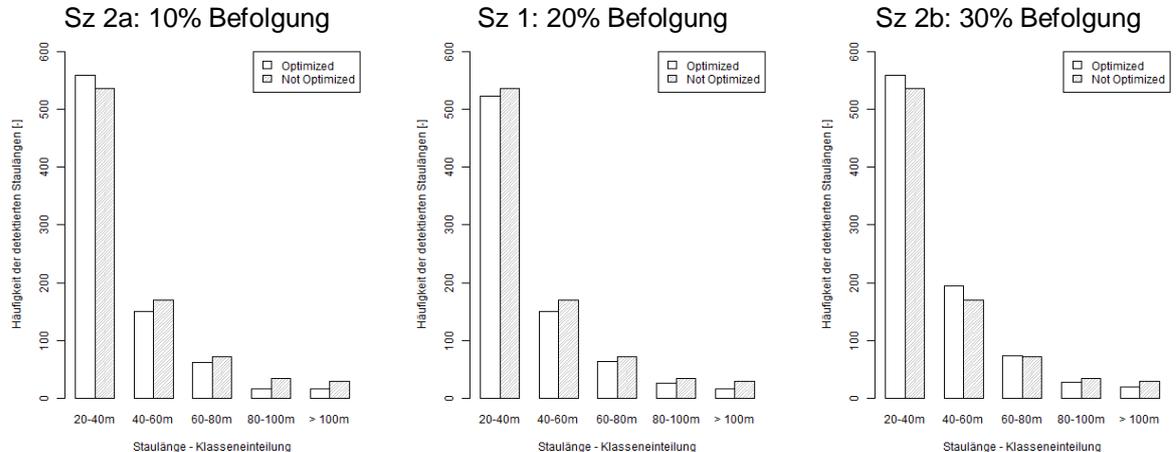
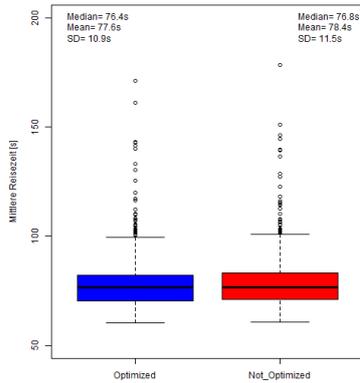


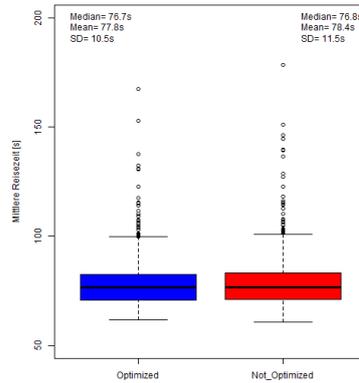
Abbildung 41: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für eine Befolgerate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 03.06.2017

Der Einfluss der Grenzwerte für Aktivierung und Deaktivierung des Optimierungsalgorithmus auf die Reisezeit wird in Abbildung 42 demonstriert. Dabei sind kaum Unterschiede zu erkennen. Bei der Einstellung 40m für Aktivierung und 20m für Deaktivierung ist lediglich eine Abnahme der Standardabweichung der Reisezeit von 11.5s auf 9.9s zu erkennen.

Sz 1: Start 20m – Stop 10m



Sz 3a: Start 40m – Stop 10m



Sz 3b: Start 40m – Stop 20m

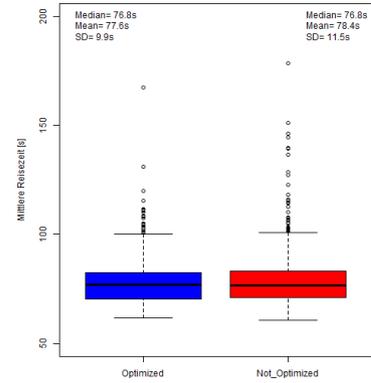


Abbildung 42: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 29.07.2017

Ähnlich wie zuvor bei der Reisezeit ist das Bild bei Betrachtung der Staulängen (Abbildung 47). Tendenziell wirkt sich ein höherer Grenzwert für die Aktivierung (hier 40 anstatt 20m) positiv auf die Häufigkeit der sehr hohen Rückstaulängen >100m aus. Diese Aussage muss anschließend noch bei Betrachtung des zweiten Beispieltages untermauert werden.

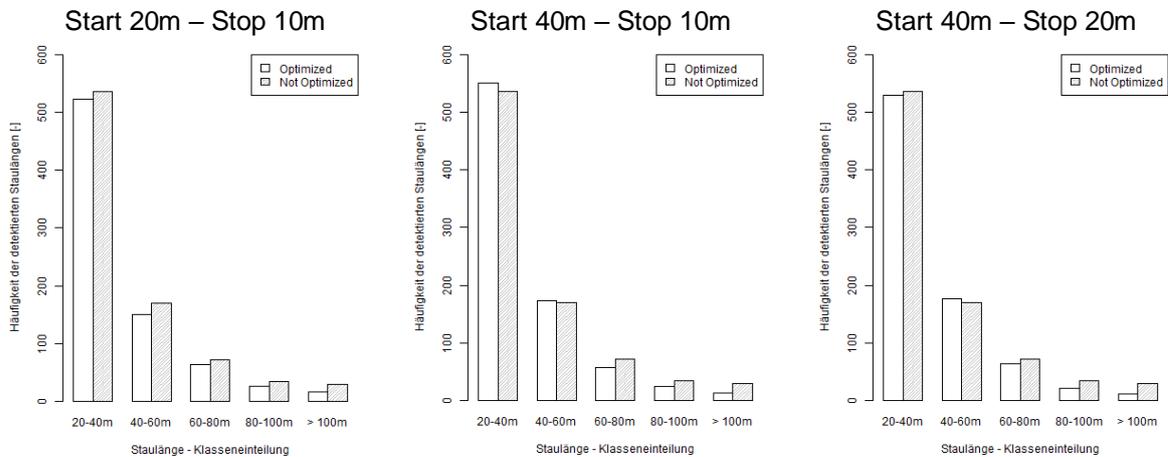


Abbildung 43: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 03.06.2017

Samstag 29.07.2017

Die gleichen Auswertungen wie zuvor für den 03.06.2017 werden nun für den 29.07.2017 (Samstag mit starkem Urlauberreiseverkehr) durchgeführt. Zuerst wird die Wirkung des Befolgungsgrades auf die Reisezeit untersucht (Abbildung 40) mit der Angabe von Median, Mittelwert (Mean) und Standardabweichung (SD) der Reisezeiten. Dabei sind positive Effekte

bei der geringeren Befolgsrate von 10% (Mean 80.7s, SD 20.5s) und negative Effekte bei der höheren Befolgsrate von 30% (Mean 87.9s, SD 42.1s) im Vergleich zum Basisfall (Mean 82.4s, SD 27.4s) zu erkennen.

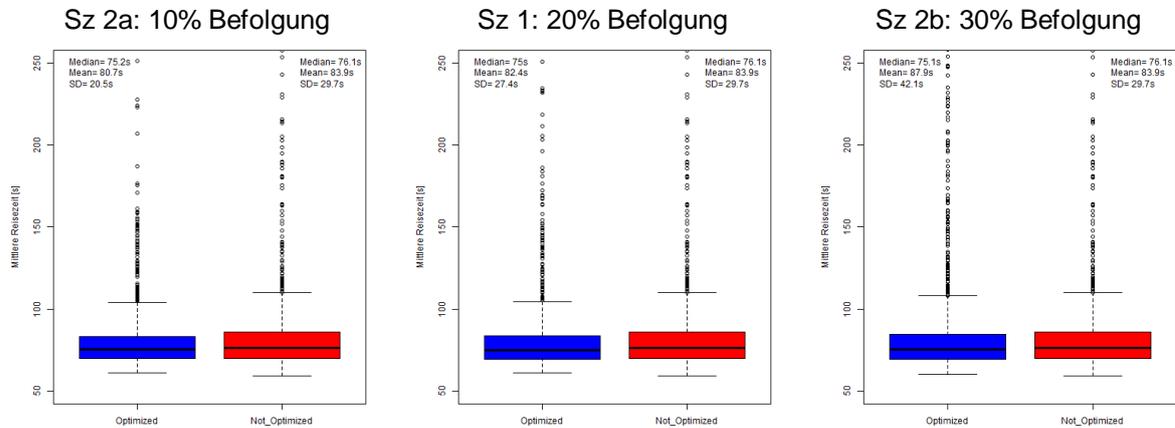


Abbildung 44: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung für eine Befolgsrate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 29.07.2017

Diese nachteilige Wirkung einer höheren Befolgsrate zeigt sich auch bei der Betrachtung der Staulängen (Abbildung 45). Bei einer Befolgsrate von 30% nimmt die Häufigkeit der Staulängen >100m bei der Optimierung deutlich zu. Das beste Ergebnis liefert auch hier die Befolgsrate von 10%, die Anzahl der detektieren Staulängen nimmt in jeder Klasse >40m ab, bei der Klasse >100m reduziert sich die Anzahl um etwa 35% durch die Optimierung.

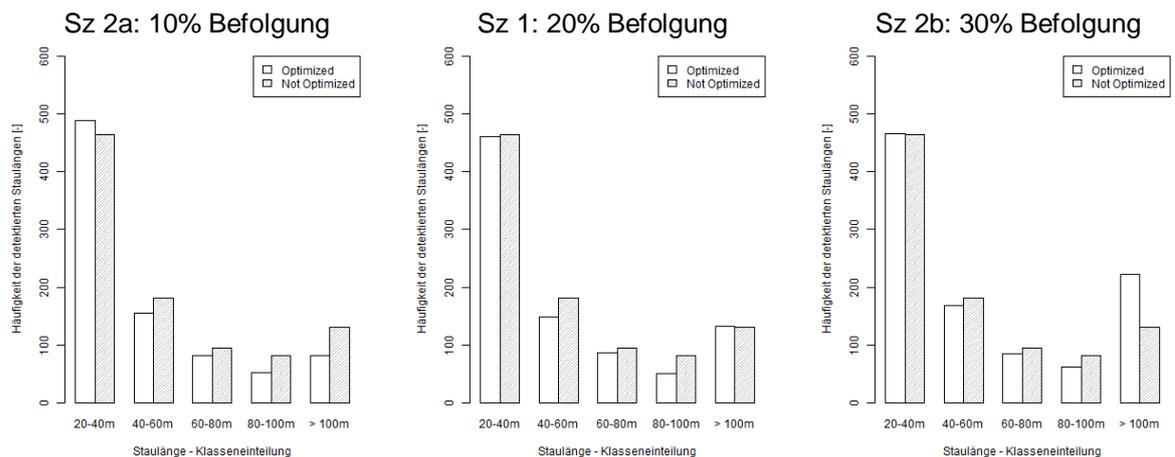


Abbildung 45: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung für eine Befolgsrate von 10% (links), 20% (Mitte, entspricht dem Basisfall) und 30% (rechts) für den 29.07.2017

Abschließend wird für den 29.07.2017 noch die Auswirkung der geänderten Grenzwerte für Aktivierung und Deaktivierung des Algorithmus betrachtet. Zunächst werden wieder die Reisezeiten analysiert (Abbildung 42). Dabei liefert die Einstellung „Start 40m – Stop 10m“ das beste Ergebnis: Im Vergleich zum Basisfall reduziert sich der Mittelwert der Reisezeiten von 82.4s auf 80.6s und die Standardabweichung von 27.4s auf 22.9s.

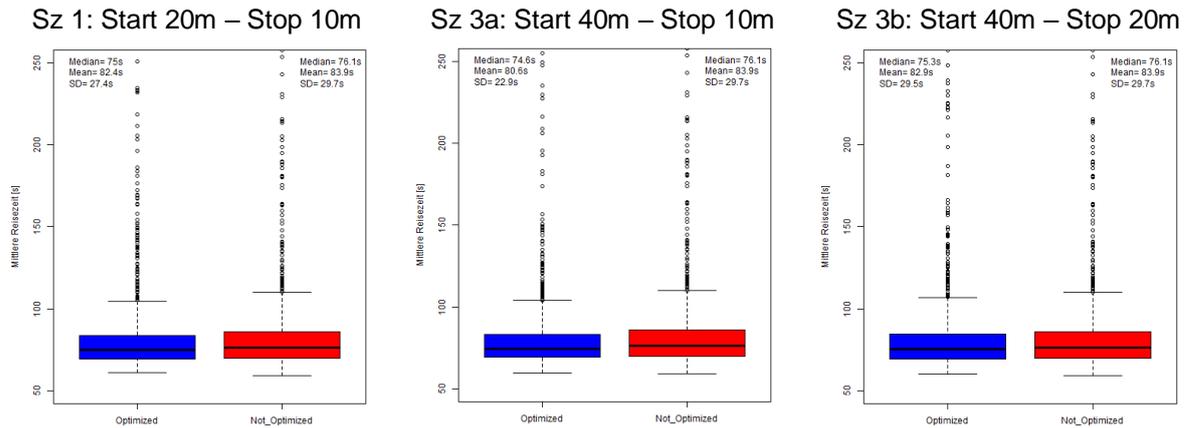


Abbildung 46: Mittlere Reisezeiten mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 29.07.2017

Passend zu den Reisezeiten präsentiert sich das Ergebnis der Staulängen. Die Einstellung 40m für Aktivierung und 10m für Deaktivierung liefert das beste Resultat. Die Häufigkeit der Staulängen >40m kann stark reduziert werden, in der Klasse >100m um etwa 35%, in der Klasse 80-100m sogar um etwa 60%.

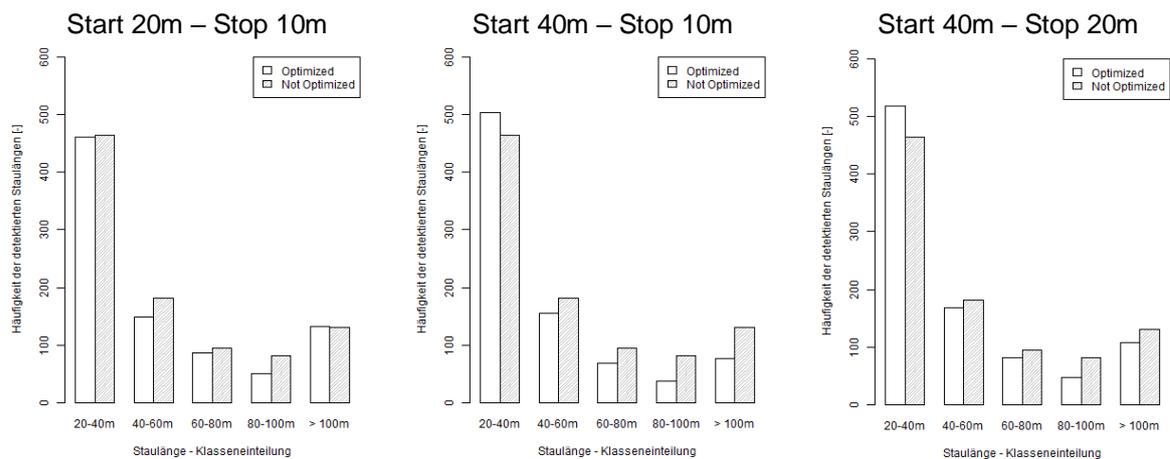


Abbildung 47: Häufigkeit der mittleren Staulängen nach Klassen unterteilt mit und ohne Optimierung mit den Grenzwerten für Aktivierung bzw. Deaktivierung von 20m bzw. 10m (links, entspricht dem Basisfall), 40m bzw. 10m (Mitte) und 40m bzw. 20m (rechts) für den 29.07.2017

4. ZUSAMMENFASSUNG

Das Projekt VaMOS befasste sich mit der Optimierung des Verkehrsablaufs an der Mautstelle Schönberg in Tirol auf der Autobahn A13 in Fahrtrichtung Italien. Die Projektidee besteht darin, die Spurteilung im Vorbereich der Mautstelle zu optimieren. Dazu wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt der aktuelle Verkehrsdaten sowie Informationen aus einem Verkehrsprognosemodell und einer visuellen Verkehrszustandserfassung direkt an der Mautstelle nutzt.

Das Prognosemodell arbeitet je nach Prognosehorizont in drei Ebenen. Die Trendprognose anhand repräsentativer Tagesganglinien gibt zeitlich weit im Voraus eine Abschätzung der stündlichen Verkehrsstärken eines beliebigen Kalendertages an. Die Langfristprognose liefert eine Musterganglinie mit stündlichen Verkehrsstärken für den aktuellen Tag. Die Kurzfristprognose ist mit der Langfristprognose gekoppelt und gibt die Verkehrsstärken im 5min Intervall für die nächste Stunde an.

Die visuelle Verkehrszustandserfassung wurde an der Mautstelle Schönberg anhand von vier installierten Kameras realisiert. Anhand Methoden zur Bildanalyse kann die Belegung eines Fahrstreifens (mit einem Fahrzeug) identifiziert und die Geschwindigkeit der Fahrzeuge gemessen werden. Dadurch kann in Echtzeit die Rückstaulänge je Fahrstreifen bestimmt und damit der Level of Service (LOS) der gesamten Mautstelle aktuell bewertet werden.

Der Algorithmus selbst wurde unter Berücksichtigung der Erkenntnisse des Vorgängerprojekts RENNT entwickelt. In RENNT wurden Hinweise für eine reduzierte, aber klare Beschilderung und Signalisierung gegeben. Diese Ideen wurden in VaMOS aufgegriffen, um eine schnelle und einfache Projektumsetzung zu gewährleisten. Der Algorithmus zur Spurteilung kann sowohl real als auch in Verkehrssimulationen implementiert und angewendet werden. Das Ergebnis des Algorithmus ist eine Empfehlung an Fahrer bestimmte Fahrstreifenbereiche an der Mautstelle zu nutzen, um eine bessere Schaltauslastung zu ermöglichen. In Abhängigkeit von der Fahrzeuganzahl, die diese Empfehlung annehmen (Befolgungsrate), ergibt sich eine homogenere Verteilung/Auslastung an den einzelnen Fahrstreifen/Mautschaltern der Mautstelle.

In VaMOS wurde der Algorithmus anhand von Verkehrssimulationen evaluiert, da ein realer Test der Optimierung aus logistischen und zeitlichen Gründen im Rahmen des Projektes nicht möglich war. Die tatsächlichen Abläufe an der Mautstelle konnten jedoch sehr gut in der Simulation rekonstruiert werden, da ideale Eingangsdaten zur Verfügung standen (detaillierte Abfertigungsdaten der Mautstelle) und der Verkehrsfluss in der Simulation mit der visuellen Verkehrszustandsmessung kalibriert werden konnte.

Was kann mit den vorgeschlagenen Methoden erreicht werden?

Die Arbeiten am Projekt VaMOS haben gezeigt, dass eine Verbesserung der Abfertigung an der Mautstation möglich ist.

Wenn auch im Sättigungszustand keine Optimierung mehr greifen kann, so kann jedoch der **Aufbau der Stausituation verzögert** und der Stau etwas **schneller abgebaut werden**. Dieser Effekt ist in den durchschnittlichen Wartezeiten spürbar und ist subjektiv für den einzelnen Fahrzeuglenker eine Verbesserung der Wartesituation.

Die Analyse der optimierten (und simulierten) Staulängen zeigt weiters, **dass gerade an Tagen mit mittlerer bis höherer Verkehrsstärke** (im Falle von Schönberg wären dies ca. 2000-2500 Kfz/h) **die Spitzen in den Staulängen geglättet** bzw. deutlich **reduziert** werden können, weil eine Umleitung auf benachbarte Spuren stattfindet, die an solchen Tagen auch effektiv ist, weil noch freie Kapazitäten bestehen. Der positive Effekt der Optimierung reduziert sich bei sehr hohen Verkehrsstärken (> 2500 Kfz/h) stark, da kaum freie Kapazitäten an den Mautschaltern anzutreffen sind.

Im Rahmen der Evaluierung konnte durch die Optimierung an einzelnen Tagen eine **Reduktion der mittleren Reisezeiten des ganzen Tages um 5% und eine Abnahme der sehr großen Staulängen je Schalter (>100m) um bis zu 20% festgestellt werden**. Dies schlägt sich wiederum in einem Vorteil für die Kunden nieder und erhöht dessen Zufriedenheit. Die Summe der Verkehrsstärken über alle Fahrstreifen je Stunde bzw. Tag ist dabei nahezu identisch egal ob mit oder ohne Optimierung. Das bedeutet, dass die Optimierung eine verbesserte Spuraufteilung jedoch keine Kapazitätssteigerung der Mautstelle bewirkt. Dazu müssten die Abfertigungszeiten am Schalter verkürzt werden.

Allgemeine Erkenntnisse

Die mehrmonatige hochauflösende Aufzeichnung der Mautstelle (MS) Schönberg beinhaltet eine umfassende Datensammlung, die im Rahmen des VaMOS Projektes sehr fokussiert auf die Problemstellung ausgewertet wurde. Die Datenaufzeichnung beinhaltet darüber hinaus noch zusätzliche Informationen, die als Datengrundlage für weitere Analysen dienen können.

Aus den Beobachtungen der aufgezeichneten Videodaten und den Messungen ist ersichtlich, dass sich Staus bei hohem Verkehrsaufkommen **relativ schnell aufbauen**, und zum Teil auch wieder auflösen können. Dies wird verursacht durch kleine Störungen im Verkehrsablauf, wie beispielsweise Fahrzeuge, die sehr spät einen oder mehrere Fahrstreifen wechseln, oder einzelne Fahrzeuge, die sehr lange Schalteraufenthaltszeiten aufweisen (>30s).

Üblicherweise **steigt die Staulänge sehr schnell an bei hohem Verkehrsaufkommen**, bzw. das System ist sehr schnell nahe an oder über der Sättigungsgrenze, wenn die zufließende Verkehrsstärke noch ansteigt. In diesem Fall kann keine Optimierung mehr greifen, weil der Durchsatz prinzipiell nicht verbessert werden kann. Der Optimierungsalgorithmus ist in der Lage, die Spurzuteilung zu den Mautschaltern zu verbessern, er führt jedoch zu keiner allgemeinen Kapazitätserhöhung der Mautstelle. Dazu müssten die Abfertigungszeiten je Fahrzeug direkt an den Mautschaltern reduziert werden (z.B. anhand neuer Bezahlsysteme); dies war jedoch nicht Gegenstand von VaMOS.

Die Beobachtungen der Zufahrten zu den Kassen zeigen, dass **außergewöhnliche Vorgänge (Reversieren, Spurwechsel direkt vor der Kassa) relativ häufig** auftreten. Diese Ereignisse blockieren zwar den Verkehr, stören aber den Verkehrsablauf nur kurzfristig für eine oder zwei Spuren. Sie haben daher wenig Einfluss auf die gesamte Abfertigungskapazität der Mautstelle.

In Teilen des Zeitbereiches der Kameramessung (Jun-Sep 2017) befand sich eine Baustelle mit Fahrstreifenreduktion von 3 auf 2 (Nähe Europabrücke) im Zulauf der Mautstelle in Fahrtrichtung Italien. Dies wirkte sich zum Teil sogar positiv auf den Verkehrsablauf der Mautstelle Schönberg aus, da die Baustelle wie ein Puffer wirkte und der Verkehr bei sehr hoher Nachfrage dosiert zur Mautstelle weitergeleitet wurde.

Parameter der Optimierung

Der Algorithmus bietet hier die drei folgenden Einstellungsparameter:

- Befolgungsrate: Anteil der Fahrzeuge die die Empfehlung des Algorithmus annehmen (z.B. nehme die Spuren im linken Bereich der Mautstelle)
- Grenzwert für die Aktivierung: Staulänge bei der der Algorithmus aktiviert wird
- Grenzwert für die Deaktivierung: Staulänge bei der der Algorithmus deaktiviert wird

Für die Befolgungsrate sind keine eindeutigen Erfahrungs- oder Erhebungswerte bekannt. Für VaMOS wurde hier eine Grundeinstellung von 20% angenommen. Bei der Variation des Parameters zeigte sich mit einer geringeren Rate von 10% sogar ein leicht verbessertes Optimierungsergebnis, während mit der höheren Befolgungsrate von 30% schlechtere Ergebnisse im Vergleich zur Grundeinstellung festgestellt wurden.

Auch die Grenzwerte für Aktivierung und Deaktivierung wurden variiert. Hier zeigte sich mit der Einstellung „40m für Aktivierung“ und „10m für Deaktivierung“, ein etwas größeres

Optimierungspotential als mit der Grundeinstellung 20m-10m; d.h., dass eine spätere Aktivierung (40m anstatt 20m Staulänge) für die Optimierung zu empfehlen ist.

Platzierung der Anzeigetafeln

Die Videoaufzeichnungen aller Kameras zeigen sehr übersichtlich das Verhalten der Fahrzeuglenker an der Mautstelle. Für Verkehrssituationen mit zunehmender Verkehrsstärke und beginnendem Staufbau sollten die Anzeigetafeln zur Beeinflussung der Fahrzeugströme möglichst im vorderen Bereich des Mautplatzes angebracht werden. Dann haben die Lenker genügend Zeit und Wegstrecke, um auf die Hinweise reagieren zu können, bevor sie in den eigentlichen Staubereich gelangen.

Ob und welcher Anteil der Fahrzeuglenker tatsächlich auf die Hinweise reagieren (können), müsste anhand eines realen Testaufbaus gemessen werden, da keine Erfahrungswerte oder Analysen zur Befolgsrate bekannt sind.

Der Follower Effekt

Die Beobachtung der Fahrzeugströme legt nahe, dass der sogenannte ‚Follower Effekt‘ nicht unberücksichtigt bleiben sollte. Fahrzeuglenker scheinen eher dem Vorderfahrzeug zu folgen, wenn dieses an der Mautstelle die Spur wechselt oder Hinweisen auf den Anzeigetafeln folgt.

Um den Nachahmeffekt zu verringern, wären bessere Hinweise zur Spurwahl bei geringer Belegung sinnvoll – diese sollten evtl. in einem realen Versuchsaufbau berücksichtigt werden. Zukünftig wäre es auch denkbar, dass die Information zur Spurempfehlung direkt ins Fahrzeug gelangt (z.B. via Radio oder on-board Monitor), oder künftig beim automatisierten Fahren das Fahrzeug direkt von der Mautstelle zur „optimalen“ Spur/Schalter geleitet wird.

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten an der MS

- Aus Sicht der Steuerung der Fahrzeugströme erscheint es sinnvoll, dass alle Spuren mit allen Systemen bezahlbar sein sollten (mit Ausnahme der Spur für Schwerverkehr und evtl. separate Videomautspuren). Damit könnten Unklarheiten bei Fahrer und unnötige Fahrstreifenwechselmanöver reduziert werden.
- Über die Trendprognose und Langfristprognose der Verkehrsnachfrage kann die Personalplanung für die Schalterbesetzung verbessert werden. Damit hätte die ASFINAG hier direkt einen innerbetrieblichen Nutzen.

Projektfazit

Das Projekt VaMOS hat aufgezeigt, welches Potential die Echtzeit Videomessung für die Bestimmung des *Level of Service* am Mautplatz haben kann. Videomessung in Kombination mit Verkehrsflusssimulation stellt ein mächtiges Werkzeug dar, um Analysen, Tests und Verbesserungen theoretisch und praktisch durchspielen zu können. Die **Videomessung der Staulängen funktioniert sehr gut** und kann als bewährtes Verfahren bezeichnet werden.

Die **Prognose des Verkehrs in mehreren zeitlichen Ebenen anhand von Zähldaten und dem Kalendarium funktioniert ebenfalls gut** und kann als robust angesehen werden. Das in VaMOS entwickelte Prognosemodell könnte auch für andere Bereiche an der Mautstelle herangezogen werden, wie beispielsweise Planung der Schalterbelegungszeiten. Außerdem wäre auch eine Anwendung der Prognosemodellmethodik auf andere Autobahnabschnitte oder -netze möglich um hier Verkehrsstärken und Ganglinien kurz- und langfristig zu prognostizieren.

Die Ergebnisse der Optimierung zeigen, dass eine Reduzierung der Staulängen und eine Verringerung der Wartezeiten mittels der Ansteuerung einfacher Hinweistafeln möglich sind. Insbesondere an Tagen mit mittleren bis hohem Verkehrsaufkommen liefert dieser Ansatz gute Ergebnisse. An Tagen mit sehr hohem Verkehrsaufkommen kann das bereits gesättigte System nicht oder kaum mehr verbessert werden, jedoch sind leichte positive Effekte durch eine Verkürzung der Überlastungsdauer erkennbar.

Mögliche weitere Anwendungsfälle

Die Methoden und Ansätze in VaMOS sind übertragbar und könnten auch auf andere Bereiche im Verkehrsmanagement und -steuerung auf dem hochrangigen Straßennetz angewendet werden. Die Ergebnisse der Arbeiten am Projekt VaMOS haben neben den eigentlichen Projektzielen Erkenntnisse, Verfahren und Softwaremodule produziert, welche in folgenden Anwendungsszenarien sinnvoll eingesetzt werden können:

- **Optimierung des Verkehrsablaufs an Baustellen** durch Messung und Verteilung des ankommenden Verkehrs auf die verfügbaren Fahrspuren und/oder bei Aufteilung der Fahrwege auf separate Fahrbahnen. Möglich ist auch eine angepasste Lenkung des Verkehrs je nach Zusammensetzung des Verkehrs (Anteile LKW/PKW, etc.)
- **Lenkung des Verkehrs an Tunneleinfahrten** (z.B. Tauern- oder Katschbergtunnel)

- **Fahrzeugtypspezifische Spurzuteilung an Autobahnknoten:** Bessere Verteilung und optimierte Lenkung des Verkehrs an Autobahnknoten durch die Kombination von Bildanalyse und traditioneller Querschnittsmessung mit statistischer Datenanalyse
- **Erweiterter Nutzen der ASFINAG Verkehrskameras:** Unter gewissen Umständen könnten Messungen (z.B. Verkehrszustand, LOS) mit den entwickelten Softwaremodulen auch auf bereits bestehenden Kameras der ASFINAG durchgeführt werden. Der Nutzwert der Software wäre hier noch größer, da auf bereits bestehende Bilddaten zurückgegriffen werden kann
- **Verkehrsprognose:** das entwickelte Prognosemodell kann leicht in andere Gebiete oder Netze, auf unterschiedlichen Autobahnstrecken eingebettet werden, da das Prognosemodell rein auf historische und aktuelle Querschnittsmessungen der ASFINAG Zählstellen basiert. Die entwickelte Trendprognose (alle Tage eines Jahres) und Langfristprognose (aktueller Tag) ist überall einsetzbar, die Kurzfristprognose (nächste Stunde) ist eher auf Strecken mit starkem Pendlerverkehr geeignet

Weiterer zukünftiger Forschungsbedarf

Aufgrund der zeitlichen und logistischen Beschränkungen konnten keine Realversuche der Optimierung mit Hinweistafeln an der Mautstelle Schönberg in Tirol durchgeführt werden. Es wäre daher von **größtem Interesse, in einem weiteren Projekt die tatsächlichen Effekte der Optimierung anhand realer Hinweistafeln an der Mautstelle** zu testen.

Zusätzlich ergaben sich aus VaMOS noch weitere offene Fragestellungen; folgende weitere Forschungsthemen wären hier interessant:

- Ein Testsystem für die **Planung der Schalterbesetzung** über die ermittelten Tagesganglinien auf Basis der Clusteranalyse. Die Personalplanung kann so verbessert werden, bzw. es treten keine Engpässe bei (prognostizierten) Verkehrsspitzen auf.
- Eine **Analyse der Befolgungsrate** als Nebenprodukt der Kameramessung bzw. Signalisierung mit Hinweistafeln würde eine wertvolle Datenbasis für zukünftige Studien bzw. Projekte liefern. Im Rahmen von VaMOS musste dieser Wert geschätzt werden, es konnten auch keine aussagekräftigen Zahlen in der Literatur als Grundlage für die Simulation gefunden werden. Die wichtige Erkenntnis hier wäre, dass **Wirkung von Beschilderung besser eingeschätzt werden kann** und damit eine Grundlage für zukünftige Simulationen und Analysen liefert.

- **Frühzeitige Information im Zulauf der Mautstelle:** Fahrzeuge könnten vorab (z.B. 1-10 km vor der Mautstelle) schon über die zu erwartende Reisezeit an der Mautstelle bzw. besser noch in Abhängigkeit des Bezahlsystems informiert werden. Dadurch hätten Fahrzeuge schon frühzeitig die Möglichkeit das Bezahlssystem zu wählen und durch die Reisezeitinformation werden schwächer ausgelastete Schalter stärker beworben (z.B. Fächerspuren oder Spuren wo nur mit Karte bezahlt werden kann). In Summe trägt dies zu einer durchschnittlichen schnelleren Abfertigung an der Mautstation bei. Die Daten zur Reisezeit Information können auch an die ASFINAG App geliefert werden.
- **Zuflussdosierung für Autobahnmautstellen:** es zeigte sich, dass eine Baustelle mit Fahrstreifenreduktion im Zulauf der Mautstelle zum Teil für einen besseren Verkehrsablauf an der Mautstelle sorgte. In diesem Zusammenhang wäre es von großem Interesse die genaue Wirkung einer Zuflussdosierung oder Pflörtneranlage an Autobahnstrecken im Zulauf einer Mautstelle (oder einer anderen Engstelle auf Autobahnen) zu erforschen.
- **Innovative Maut- oder Bezahlssysteme:** um die Kapazität der Mautstelle ohne bauliche Maßnahmen (Schaltererweiterungen) zu erhöhen, könnten neue Technologien zur Bezahlung der Maut erprobt oder eingeführt werden die zu kürzeren Abfertigungszeiten an der Mautstelle führen oder bei denen ein Anhalten des Fahrzeuges nicht mehr notwendig ist (z.B. via elektronische Maut und Kennzeichen, oder via Smartphone App, automatisches Routing etc.).
- **Konzepte für automatisiertes Fahren an Mautstellen:** in Hinblick auf das automatisierte Fahren werden Konzepte benötigt wie diese Fahrzeuge eine Mautstelle passieren. Durch die kontrollierte Umgebung beim teil- oder hochautomatisierten Fahren kann eine Steuerung und Optimierung vergleichsweise einfach durchgeführt werden. Eine Mautstation würde sich hierfür als Testumgebung für neue technische Konzepte und Ideen anbieten. Fahrzeuge würden mit der Mautstelle kommunizieren und bekommen vor der Durchfahrt einen bestimmten Fahrstreifen (Mautschalter) zugewiesen an dem die Auslastung oder Reisezeit am geringsten ist (z.B. auf Basis der Optimierung). Das Fahrzeug durchfährt autonom die Mautstelle über die vorgegebene Route. In Kombination mit innovativen Bezahlssystemen (ohne Anhalten) wäre hier eine tatsächliche Kapazitätserhöhung mit diesen Ansätzen möglich.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Al-Deek H. M., Mohamed A. A., Radwan E. A.; "A new model for the evaluation of traffic operations", Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2000.
- [2] Aycin M.; „Simple Methodology for Evaluation Toll Plaza Operations“, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board Jan 2006, Vol. 1988, pp. 92-101.
- [3] Backhaus K, Erichson B., Plinke W., Weiber R.; „Multivariate Analysemethoden“, 14. Auflage, Springer, Berlin, 2015.
- [4] Bains M. S., Arkatkar S., Anbumani K. S., Subramaniam S.; "Optimizing/Modelling toll way operation using micro simulation: case study Sanand toll plaza, Ahmedabad, Gujrat, India", Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2017.
- [5] Cireşan D. C., Meier U., Masci J., Gambardella L. M., Schmidhuber J.; "Flexible, High Performance Convolutional Neural Networks for Image Classification", in IJCAI'11 Proceedings of the Twenty-Second international joint conference on Artificial Intelligence - Volume Two, 2011, pp. 1237-1242.
- [6] Cristianini N., Shawe-Taylor J.; "An Introduction to Support Vector Machines and other kernel-based Learning methods", Cambridge University Press, 2000.
- [7] Dalal N., Triggs B.; "Histograms of Oriented Gradients for Human Detection", in Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, 2005, pp. 886-893.
- [8] Deistler M., Neusser K.; „Prognose uni- und multivariater Zeitreihen“, in Mertens P. & Rässler S.: Prognoserechnung, 7th edition, Physica-Verlag, Heidelberg, 2012, pp. 225-256.
- [9] Everitt B. S., Landau S., Leese M.; „Cluster Analysis“, Oxford University Press, New York, 2001.
- [10] Google Tensorflow, www.tensorflow.org.
- [11] Kirby H. R., Watson S. M., Dougherty M. S.; "Should we use neural networks or statistical models for short-term motorway traffic forecasting?" International Journal of Forecasting, 13(1), 1997, pp. 43-50.

- [12] Klodzinski J., Al-Deek H. M.; “Proposed Level of Service Methodology for Toll Plazas”, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2002.
- [13] Klodzinski J., Al-Deek H. M.; “Transferability of a Stochastic Toll Plaza Computer Model”, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2002.
- [14] Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E.; “Imagenet classification with deep convolutional neural networks“, in Advances in Neural Information Processing Systems 25, 2012, pp. 1106-1114.
- [15] Lin F. B.; “A delay model for planning analysis of main-line toll plazas”, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2001.
- [16] Lipetski Y., Loibner G., Ulm M., Ponweiser W., Sidla O.; „Real-time traffic jam detection and localization running on a smart camera“, SPIE Proceedings Volume 9026, Video Surveillance and Transportation Imaging Applications, 2014.
- [17] Neuhold R., Cik M., Fellendorf M.; “Typisierte Verkehrsbelastungsganglinien in der Emissionsberechnung”, in Straßenverkehrstechnik 12/2011, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2011.
- [18] Nezamuddin N., Al-Deek H.; „Developing Microscopic Toll Plaza and Toll Road Corridor Model with Paramics“, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board Dec 2008, Vol. 2047, pp. 100-110.
- [19] Ozmen-Ertekin D., Ozbay K., Mudigonda S., Cochran A. M.; „A Simple Approach to Estimating Changes in Toll Plaza Delays“, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2008.
- [20] Radwan E., Zarillo M.; „Calibration and Validation of Shaker and TNCC for Deployment on Florida’s Turnpike“, Florida Department of Transportation, Final Report, Tallahassee, 2009.
- [21] Sahin I., Akyildiz G. ; “Examination of upstream and downstream traffic features of the Bosphorus Bridge toll plaza in Istanbul”, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2005.
- [22] Schmitt D. T.; “Modeling Toll Plaza Performance – Decision Support System for Operators – SHAKER”, Thesis, University of Massachusetts Dartmouth, 2003.

- [23] Sidla O., Lipetski Y.; „Methods for vehicle detection and vehicle presence analysis for traffic applications“, SPIE Proceedings Volume 9026, Video Surveillance and Transportation Imaging Applications, 2014.
- [24] Spiliopoulou A. D., Papamichail I., Papageorgiou M.; “Real time toll plaza management for throughput maximation”, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., 2008.
- [25] Tsai R. Y.; “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision“, in Proceedings of IEEE Conference on Computer, Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, 1986.
- [26] Van Lint J. W. C., Hoogendoorn S. P., van Zuylen H. J.; "Accurate freeway travel time prediction with state-space neural networks under missing data." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 13 (5), 2005, pp. 347-369.
- [27] Von der Ruhren S.; “Kurzfristprognosen von Verkehrszuständen auf Basis von Verfahren der Mustererkennung und von dynamischen Routensuch- und Umlegungsverfahren“, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2006.

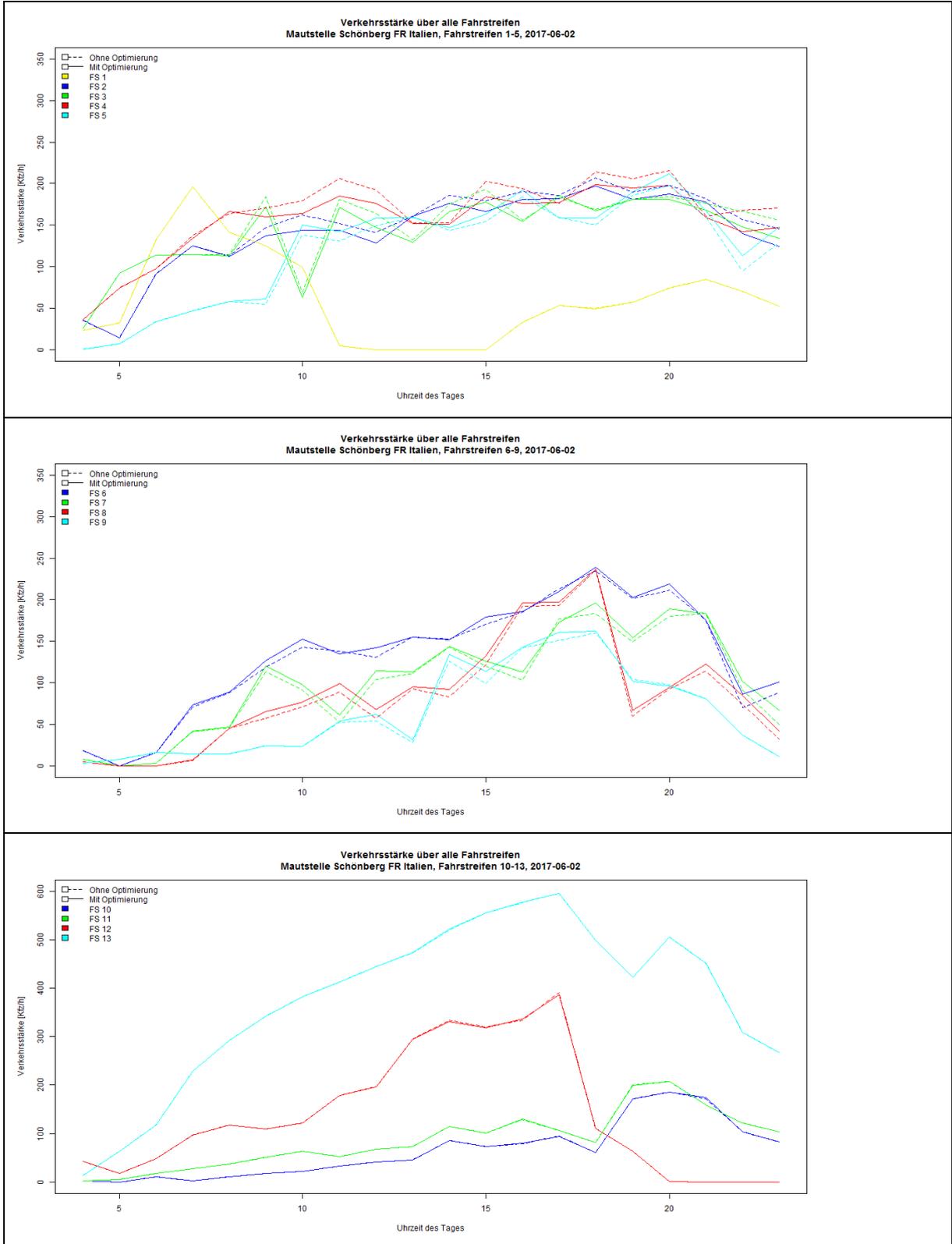
ANHANG

Vollständige Evaluierungsergebnisse

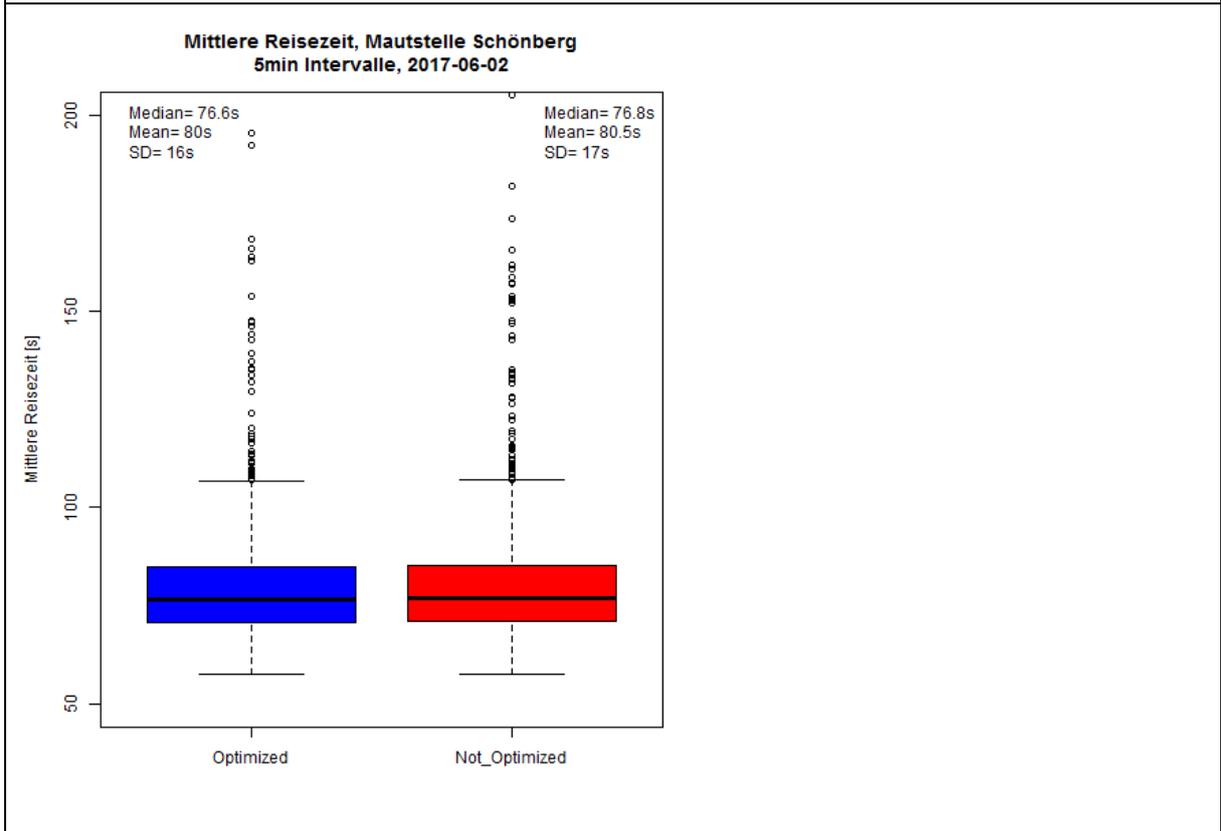
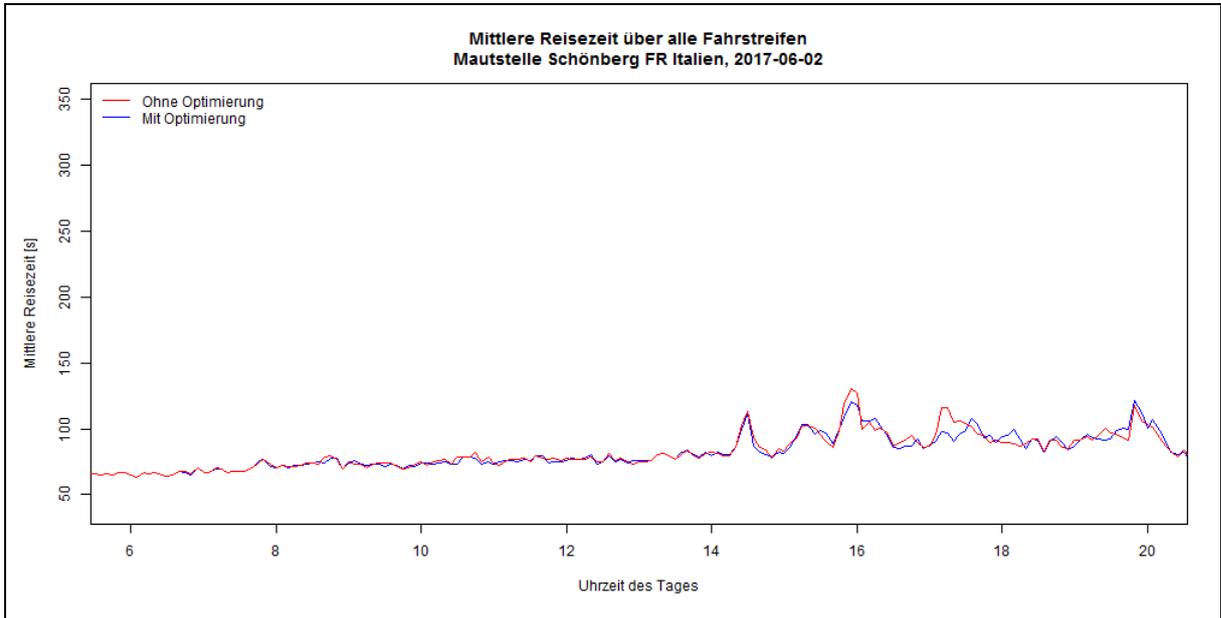
Freitag 02.06.2017.....	74
Samstag 03.06.2017.....	78
Sonntag 04.06.2017.....	82
Montag 05.06.2017.....	86
Freitag 28.07.2017.....	90
Samstag 29.07.2017.....	94
Sonntag 30.07.2017.....	98
Samstag 05.08.2017.....	102
Sonntag 06.08.2017.....	106
Samstag 12.08.2017.....	110
Samstag 19.08.2017.....	114

FREITAG 02.06.2017

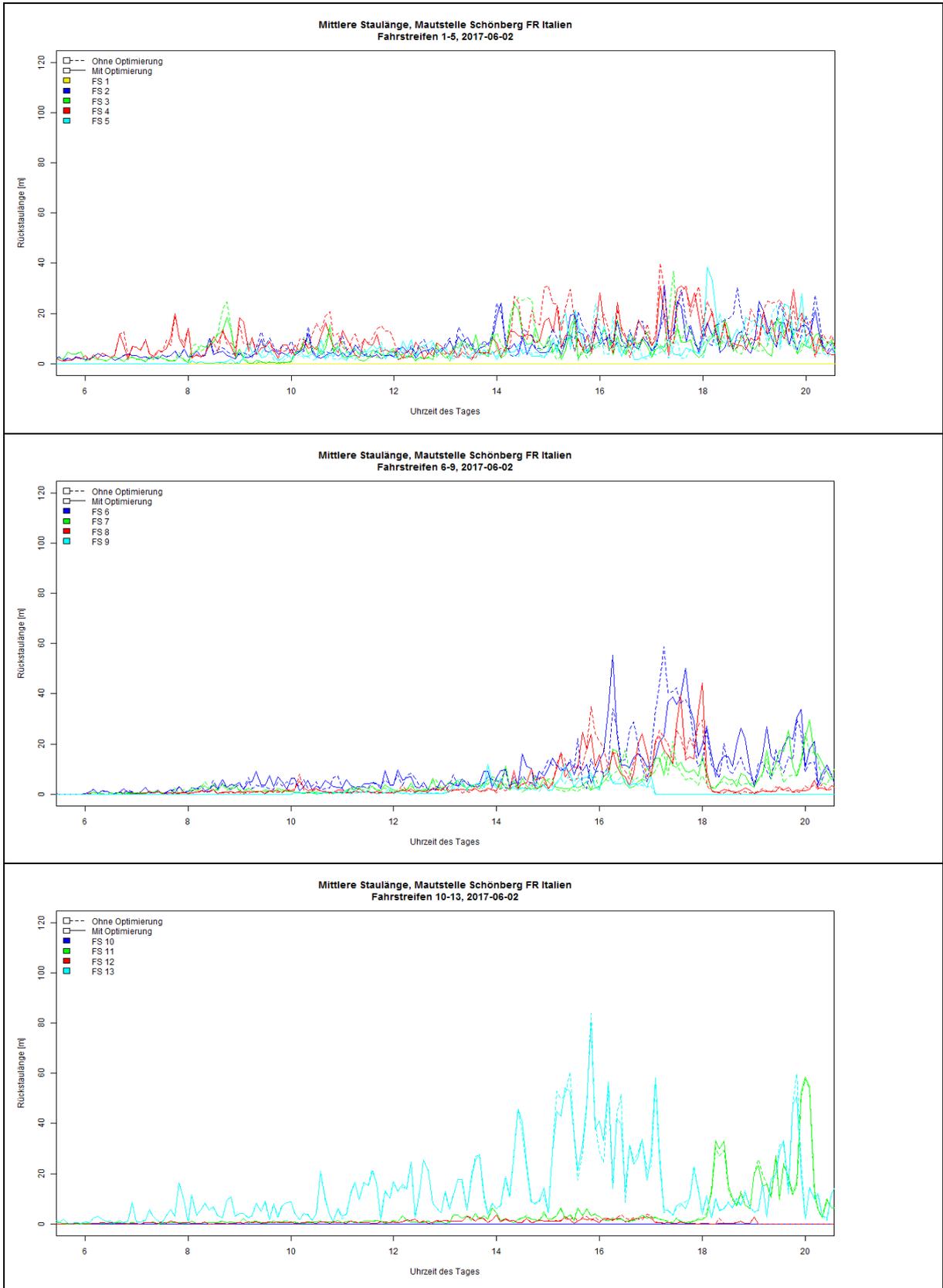
Verkehrsbelastung

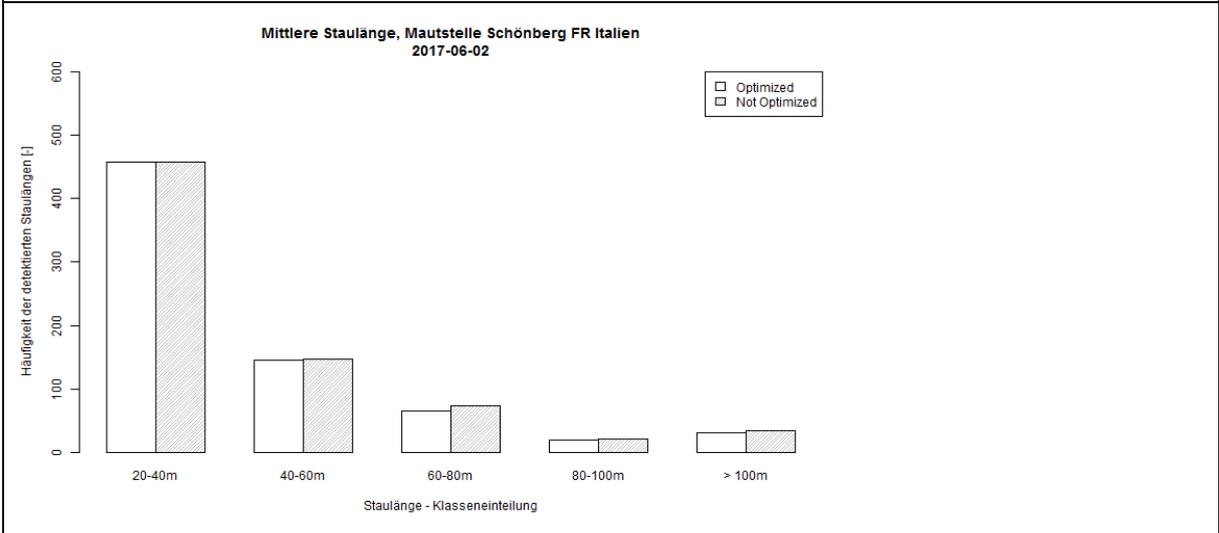
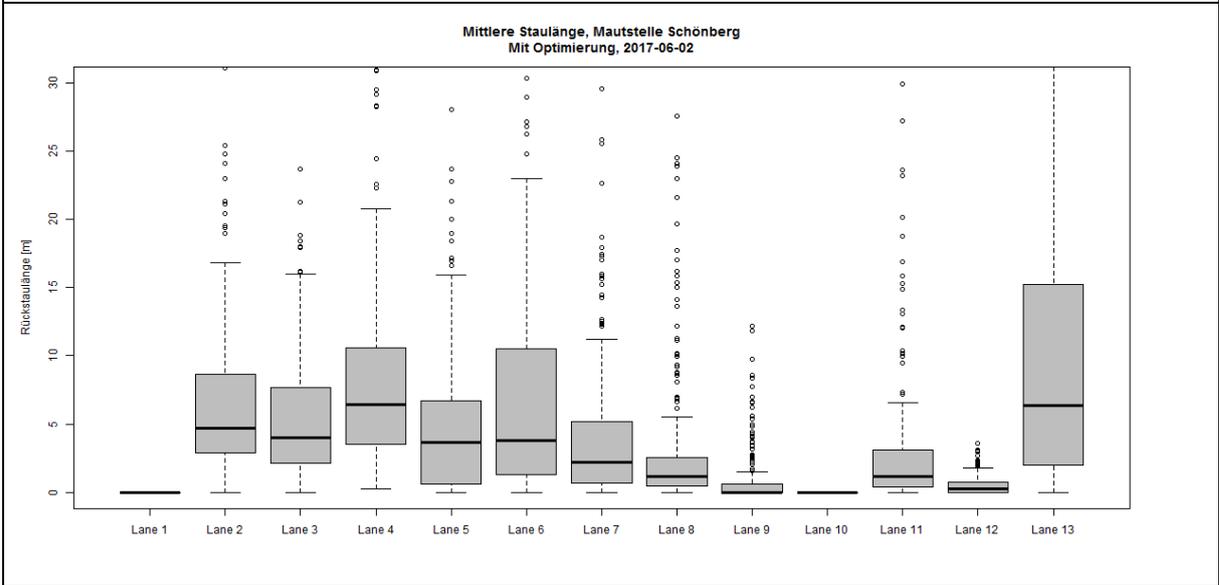
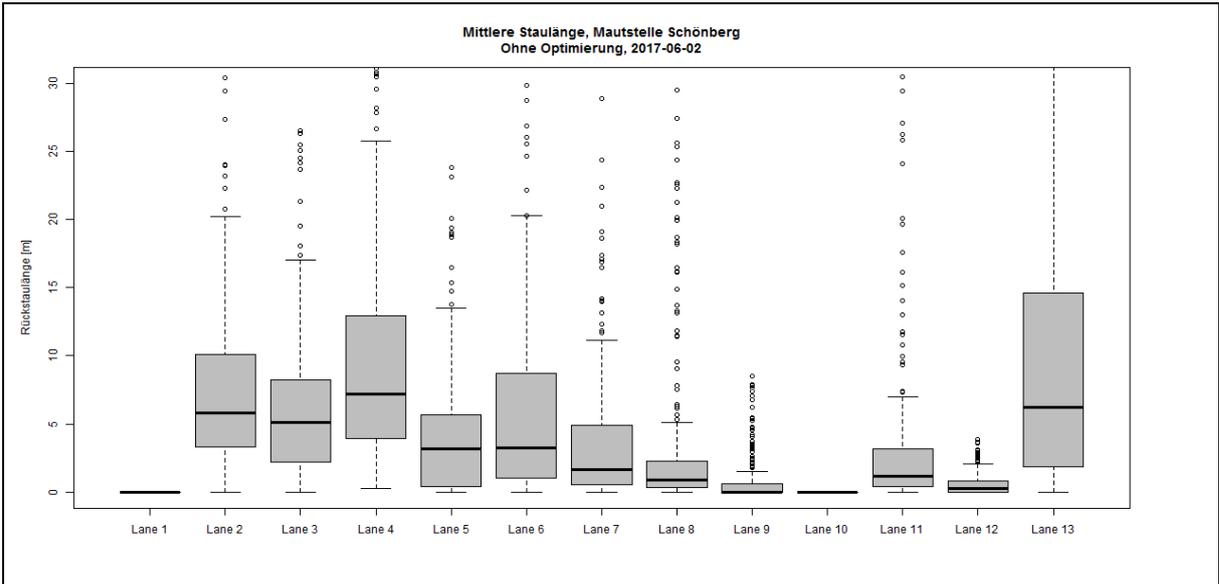


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



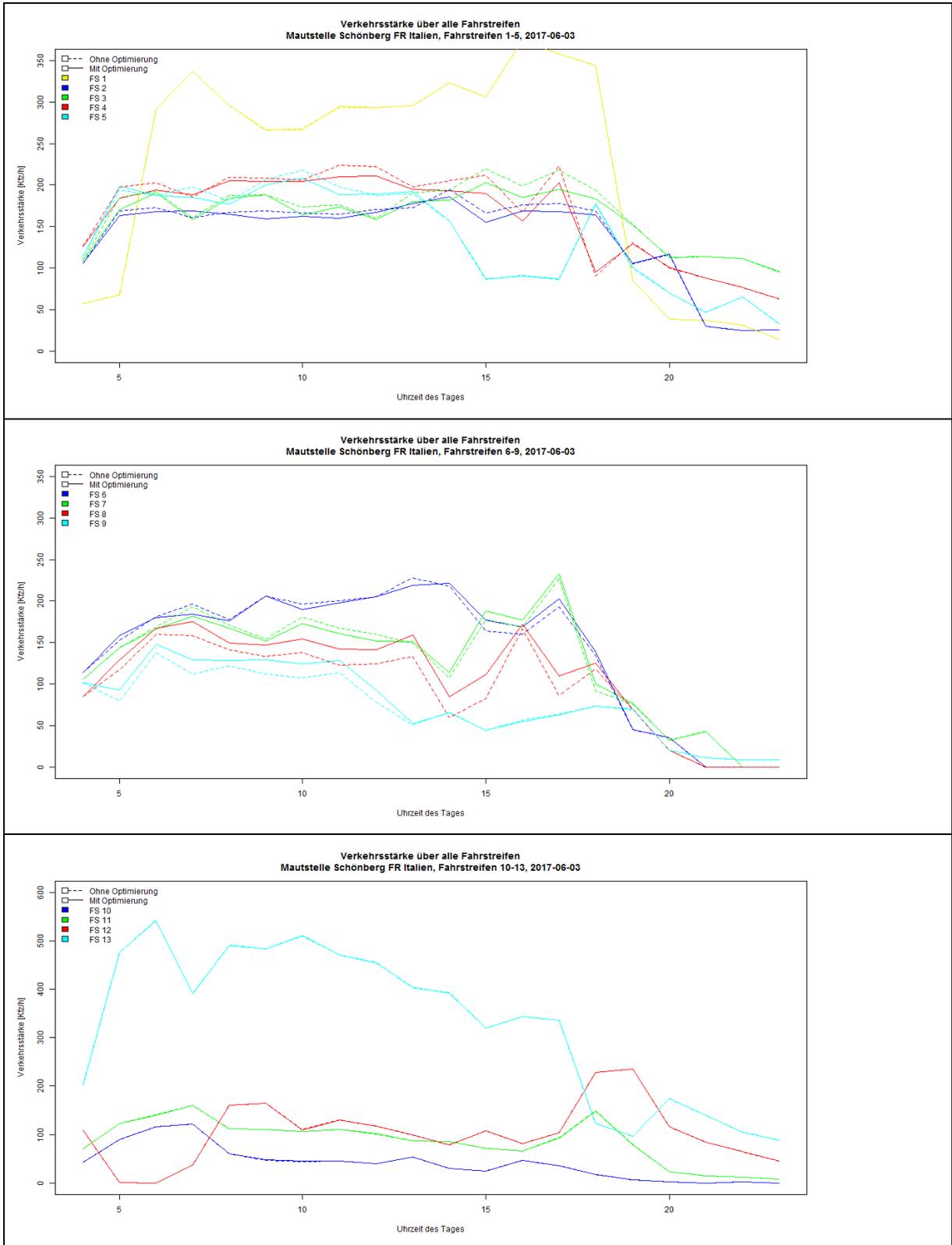
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



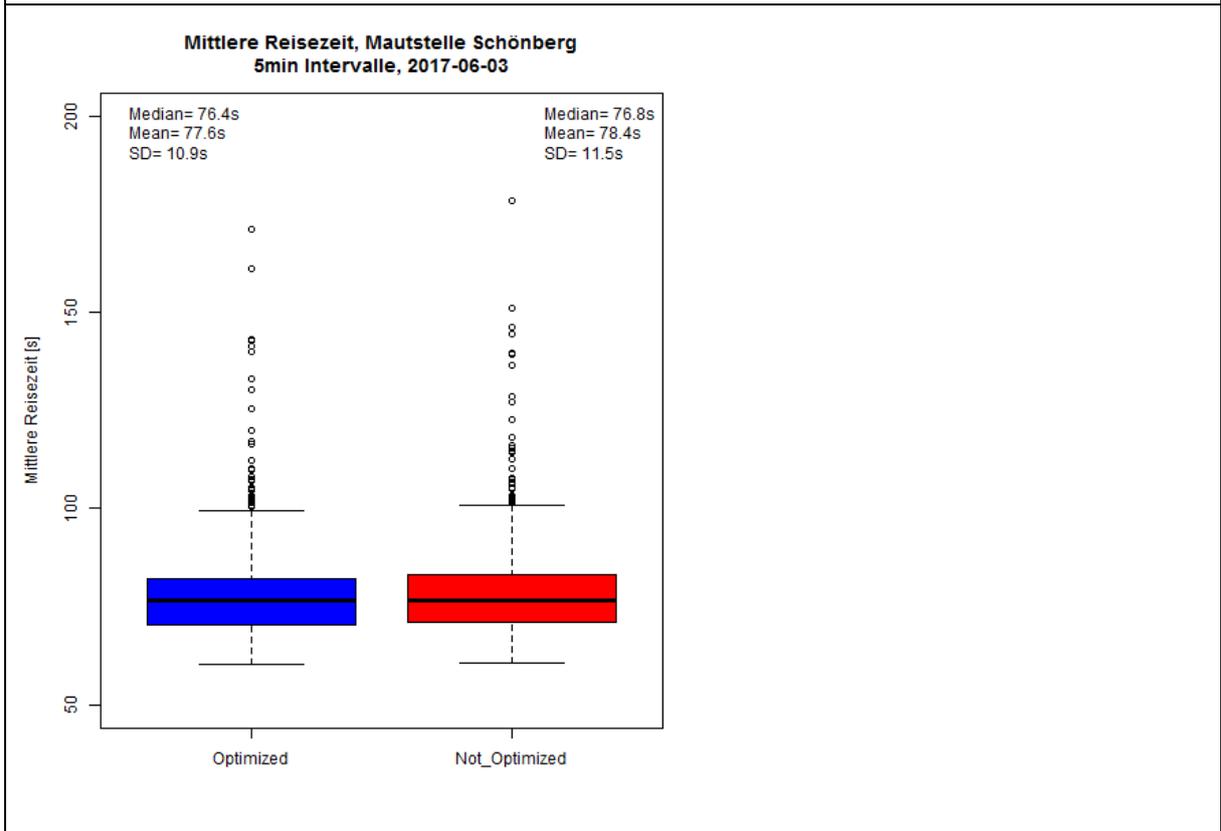
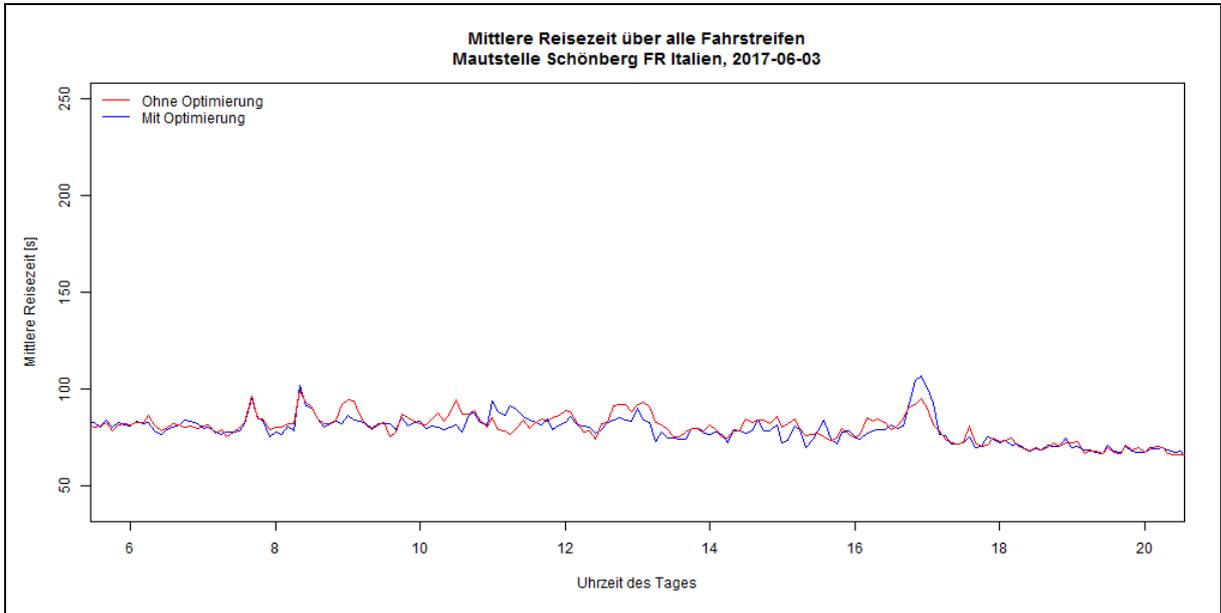


SAMSTAG 03.06.2017

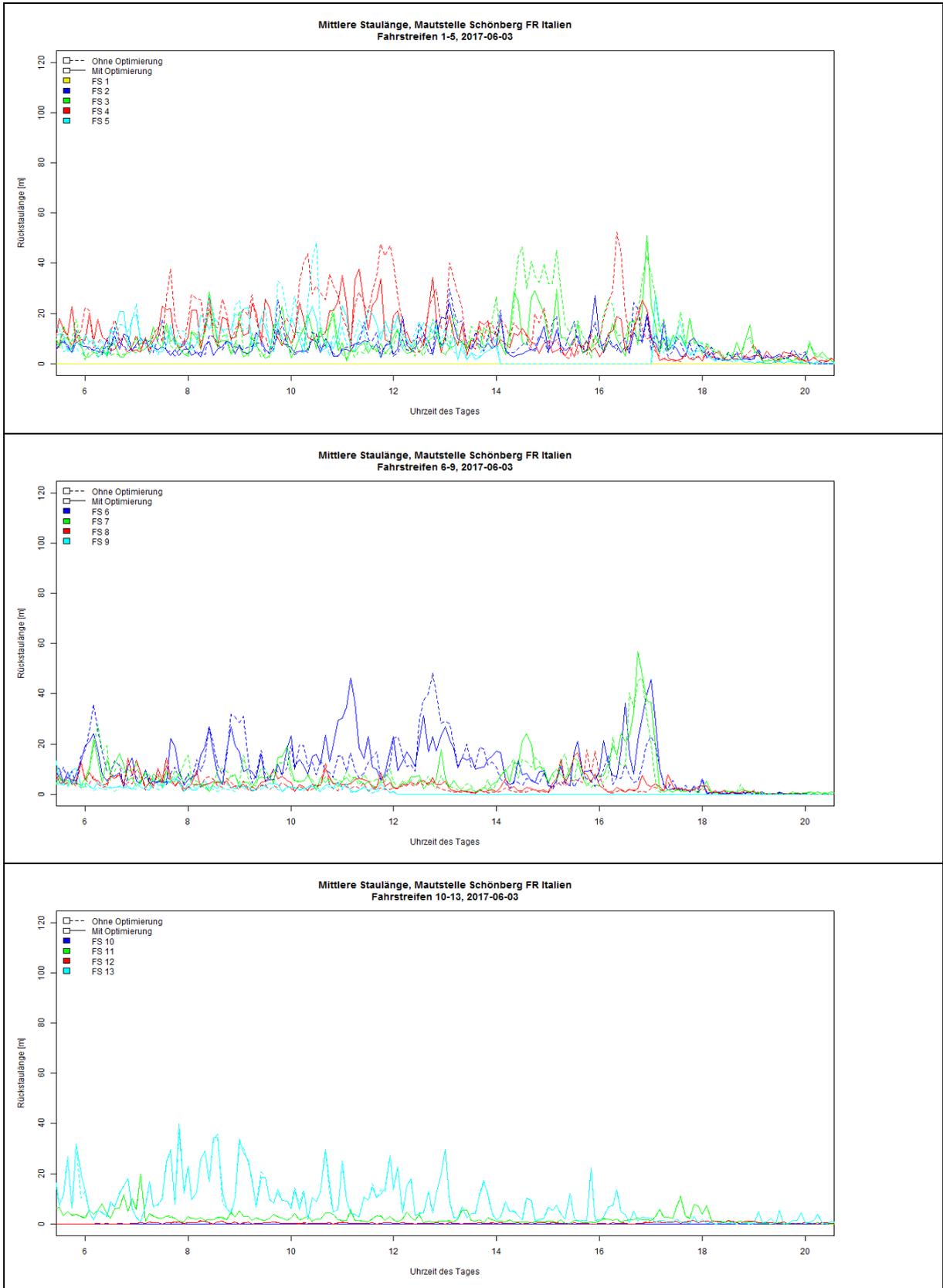
Verkehrsbelastung

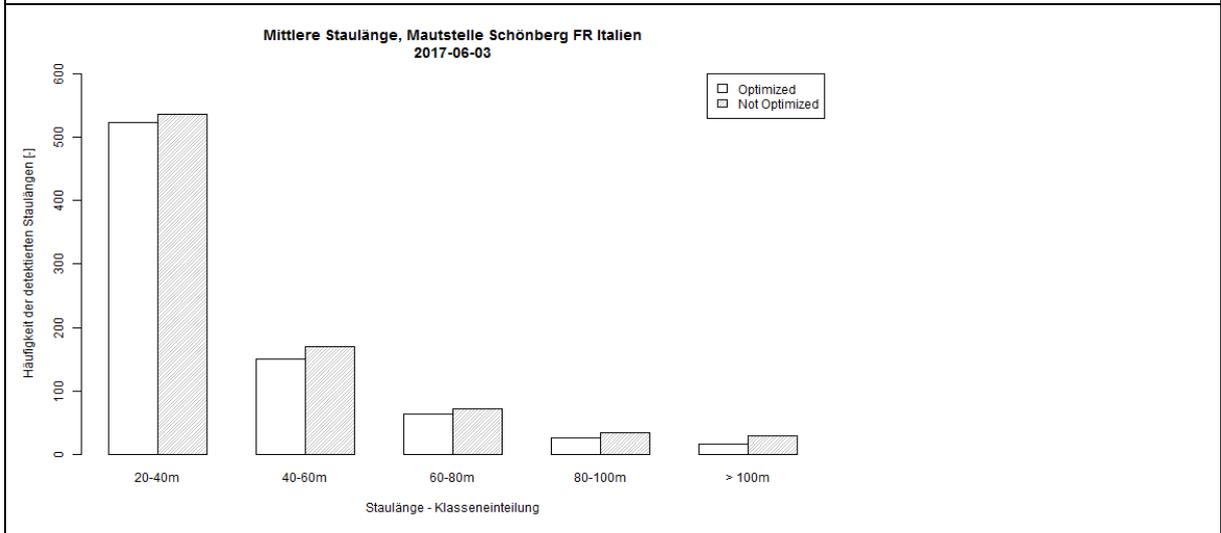
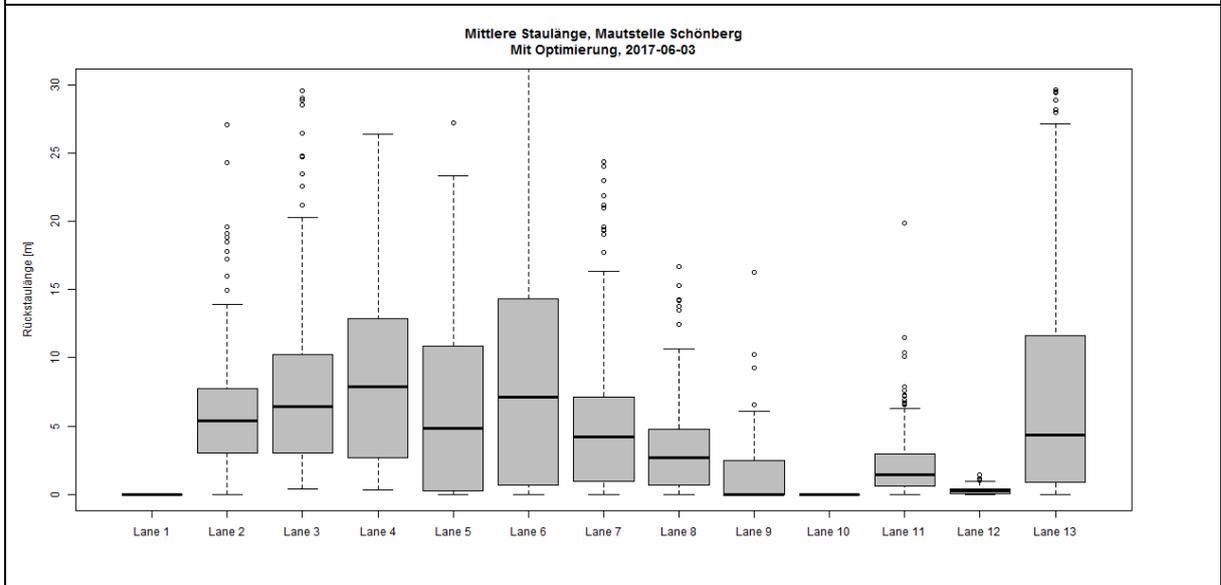
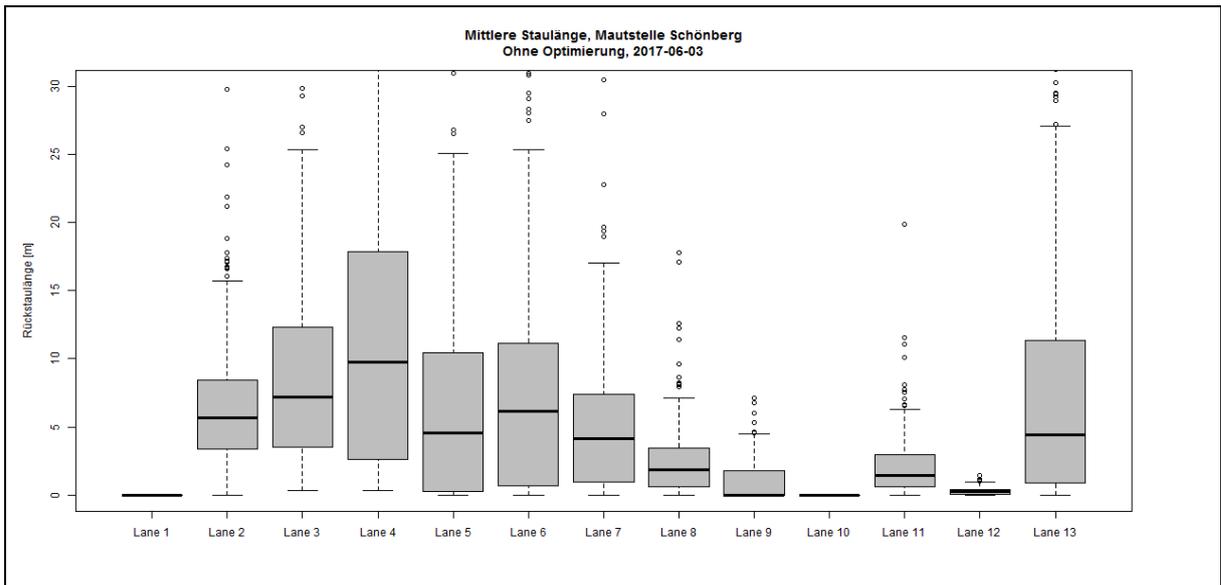


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



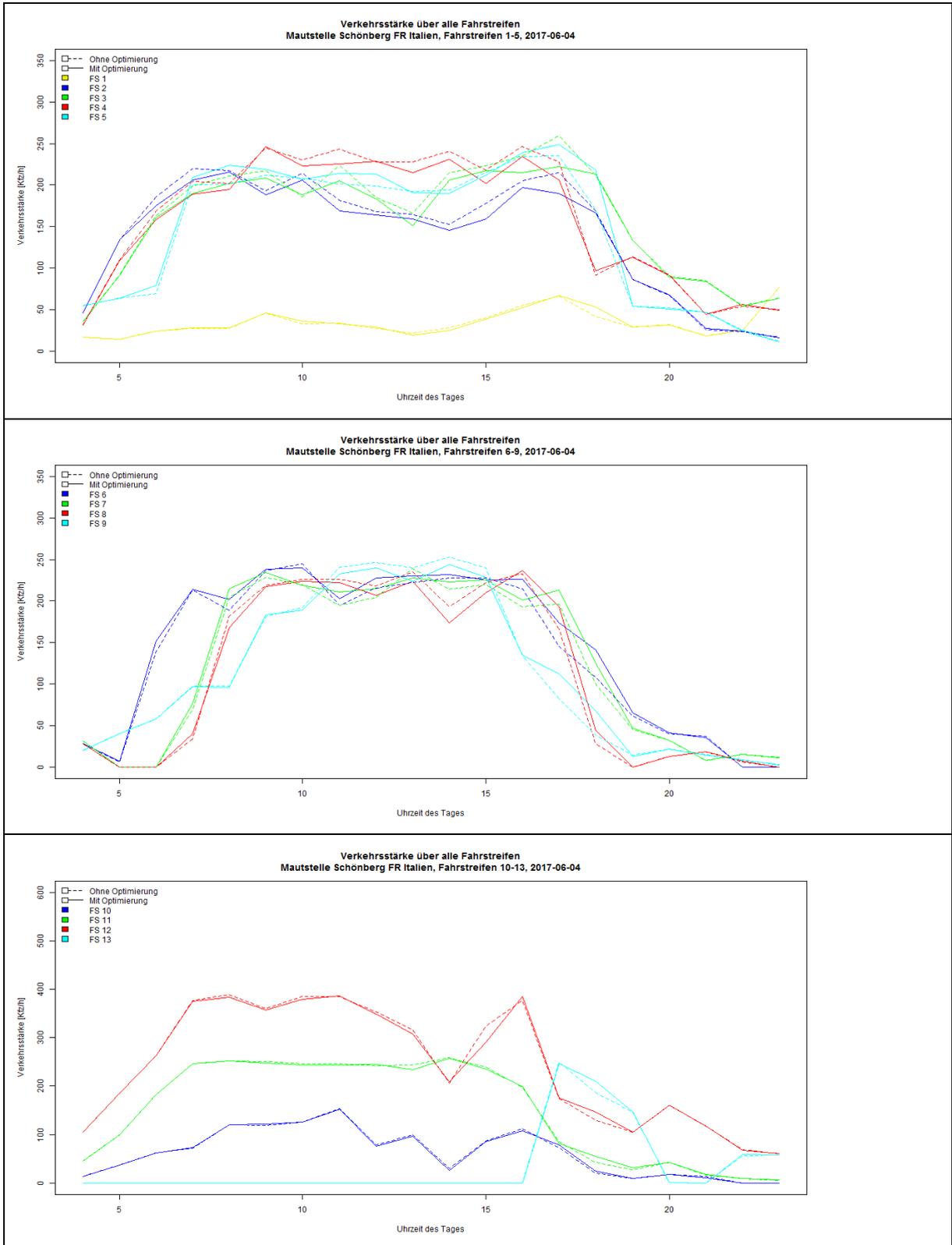
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



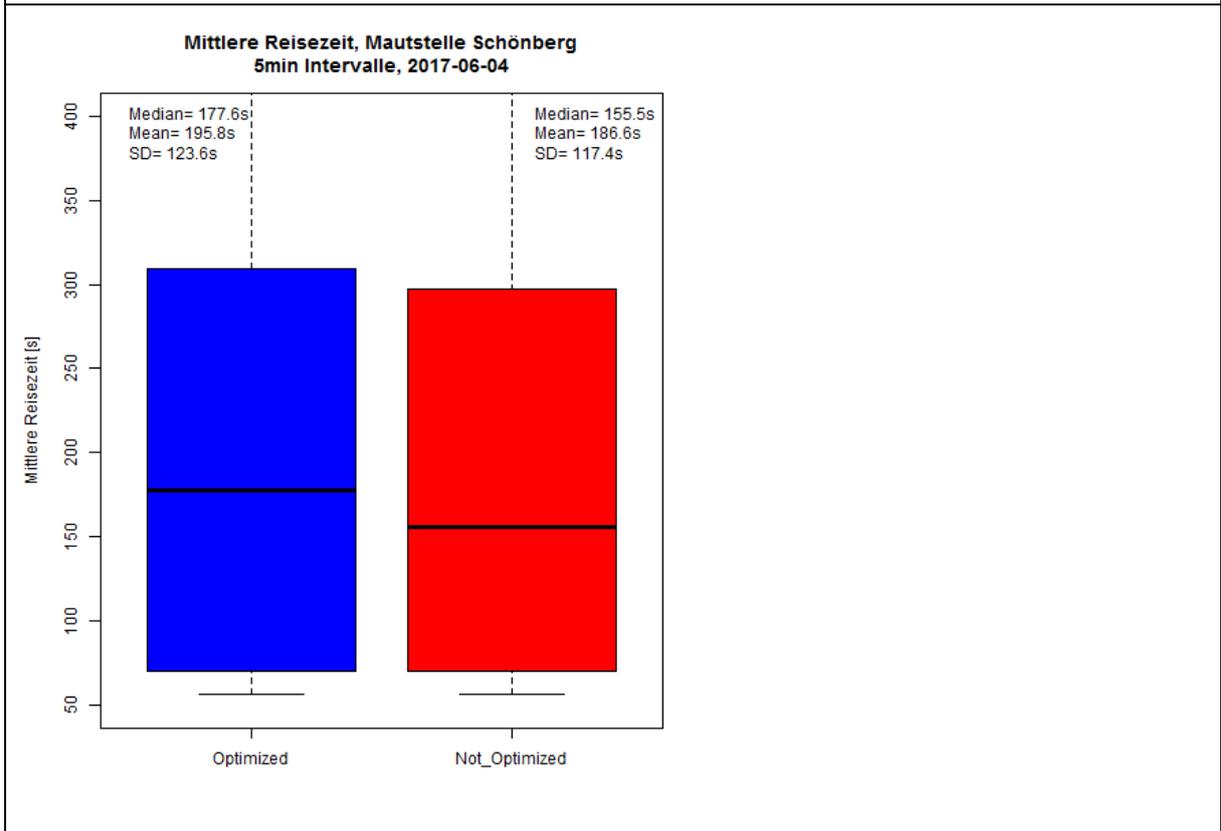
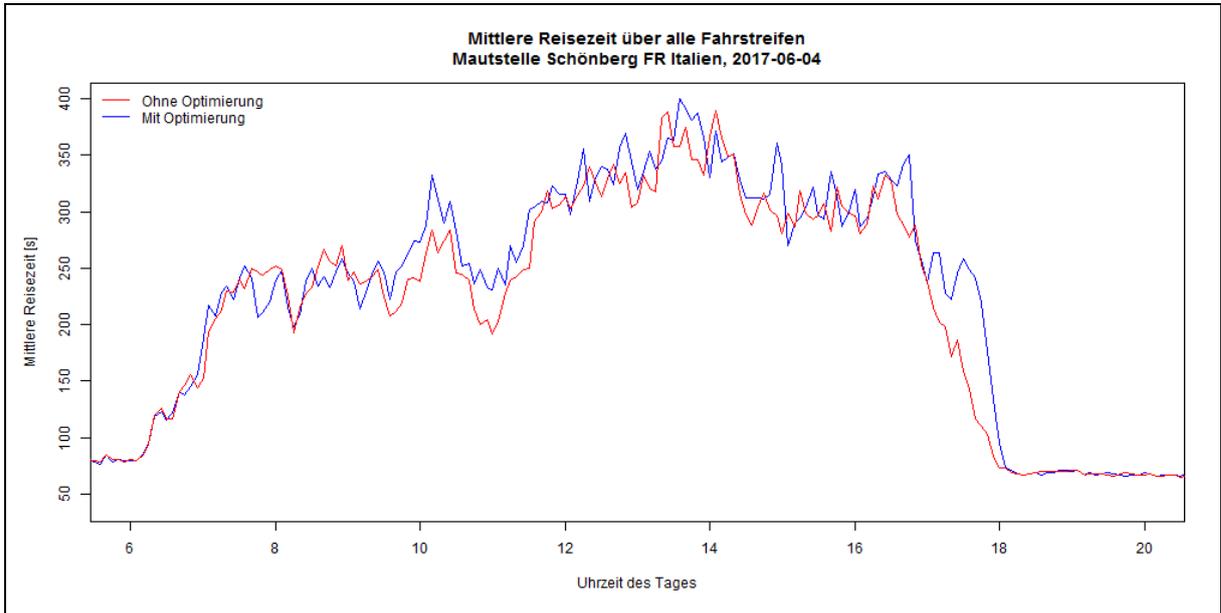


SONNTAG 04.06.2017

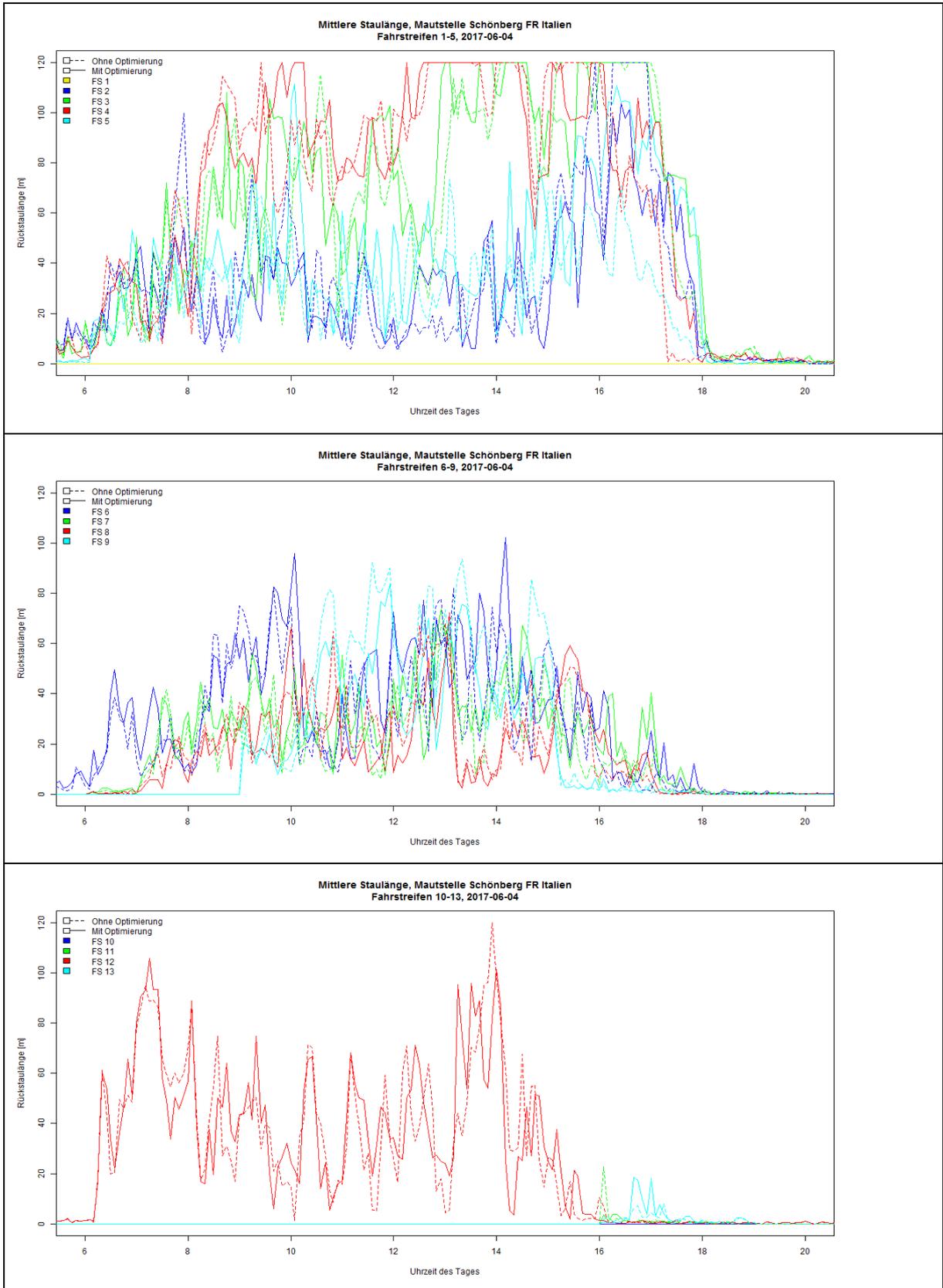
Verkehrsbelastung

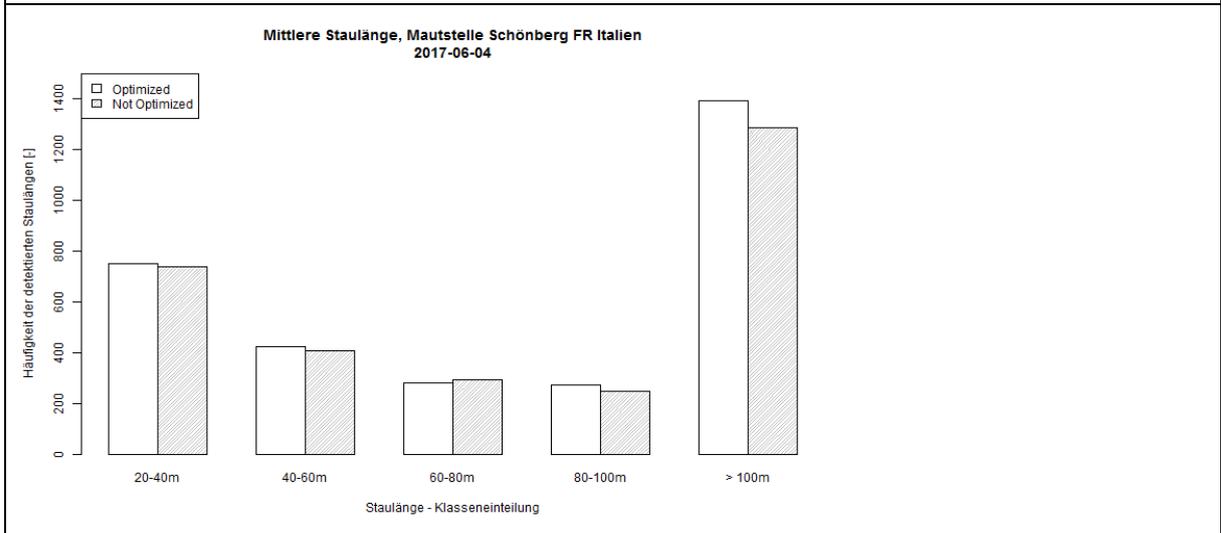
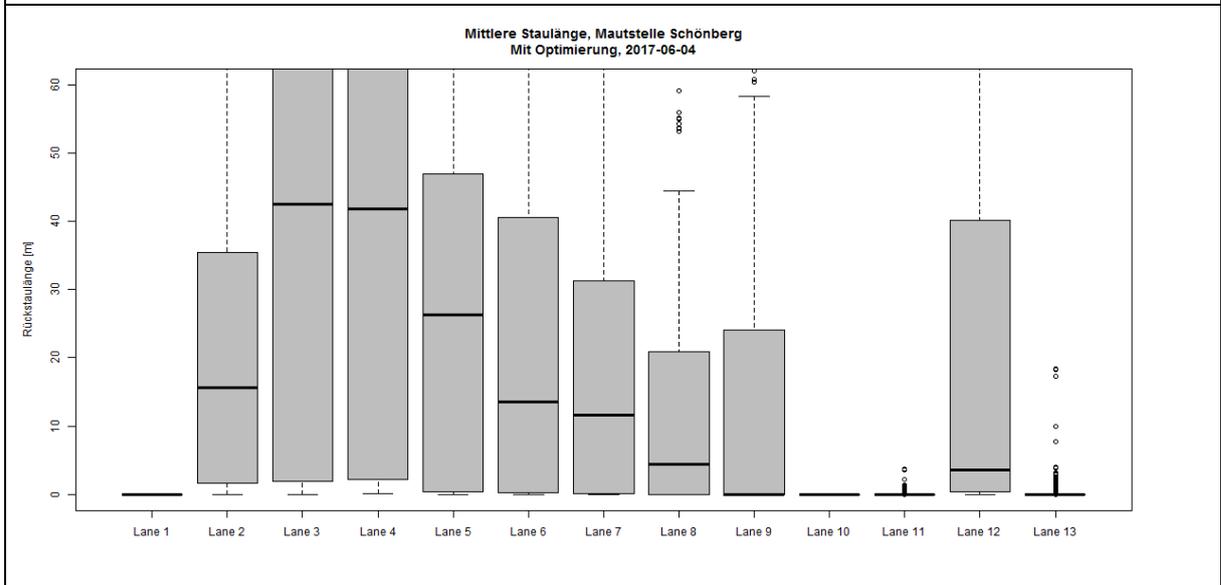
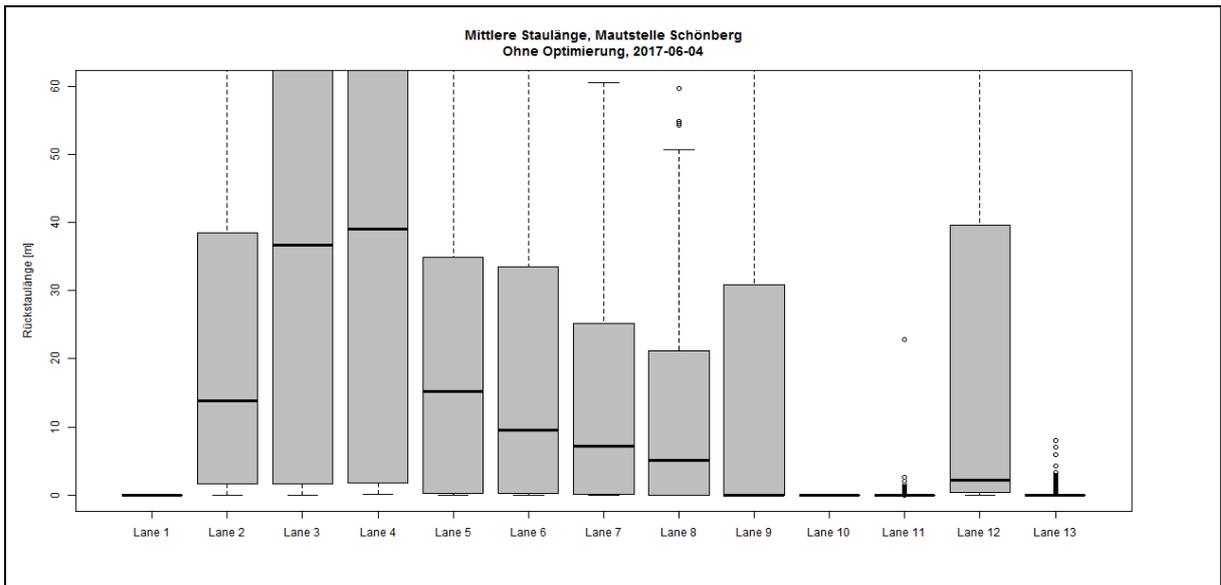


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



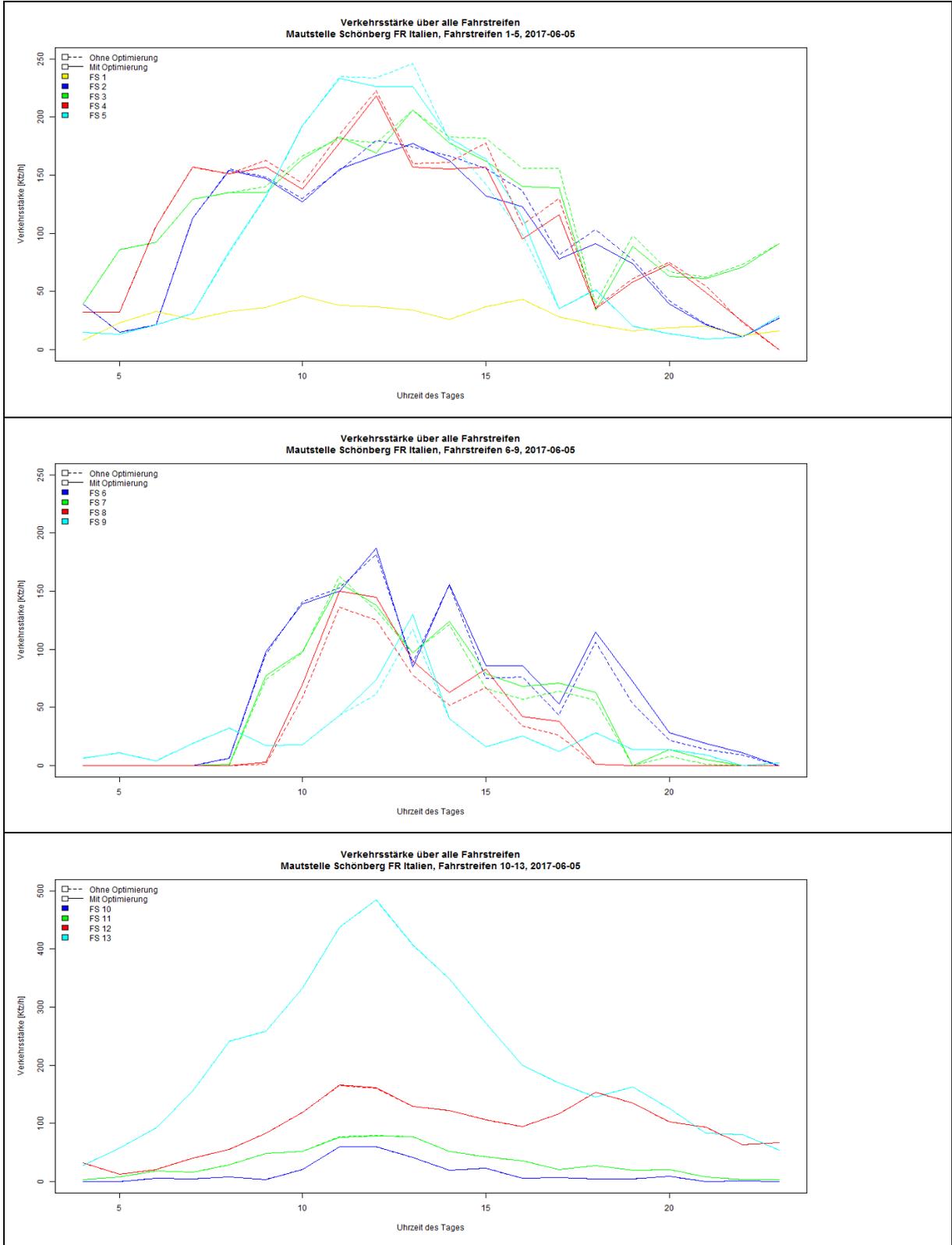
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



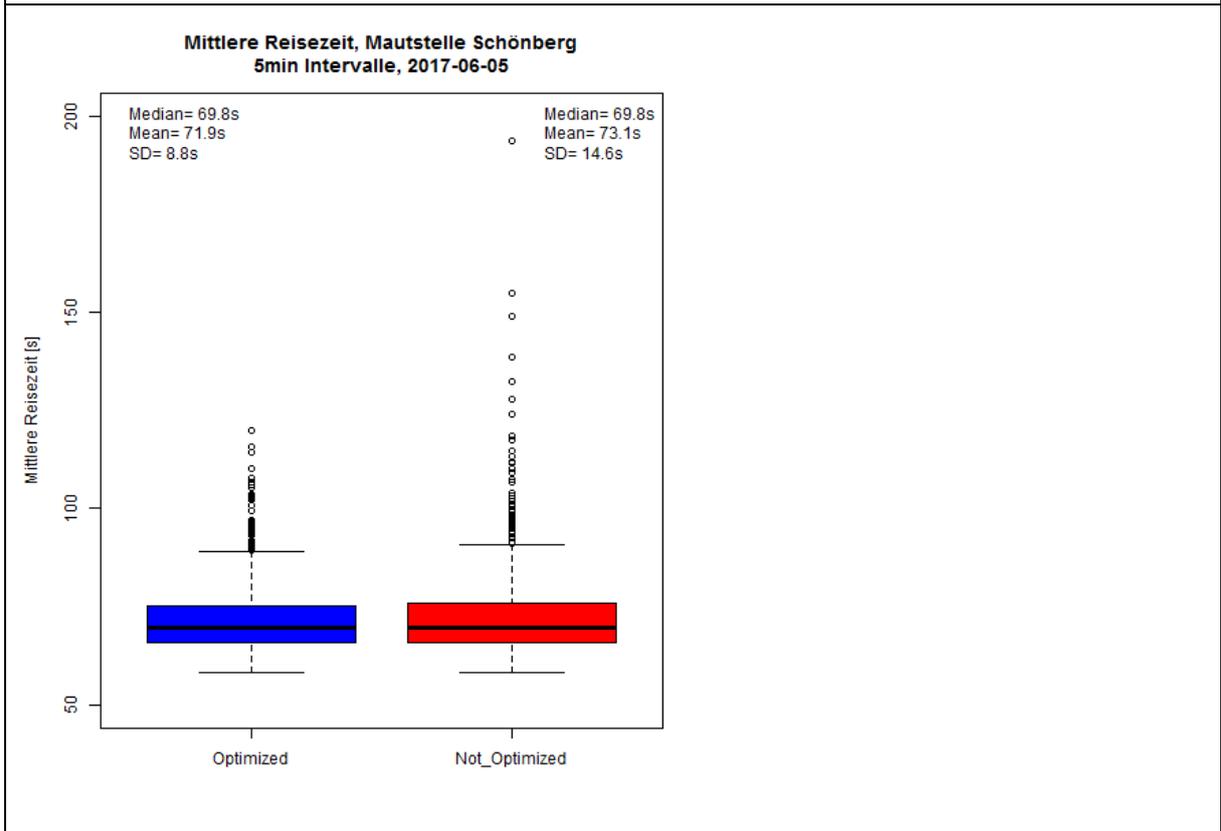
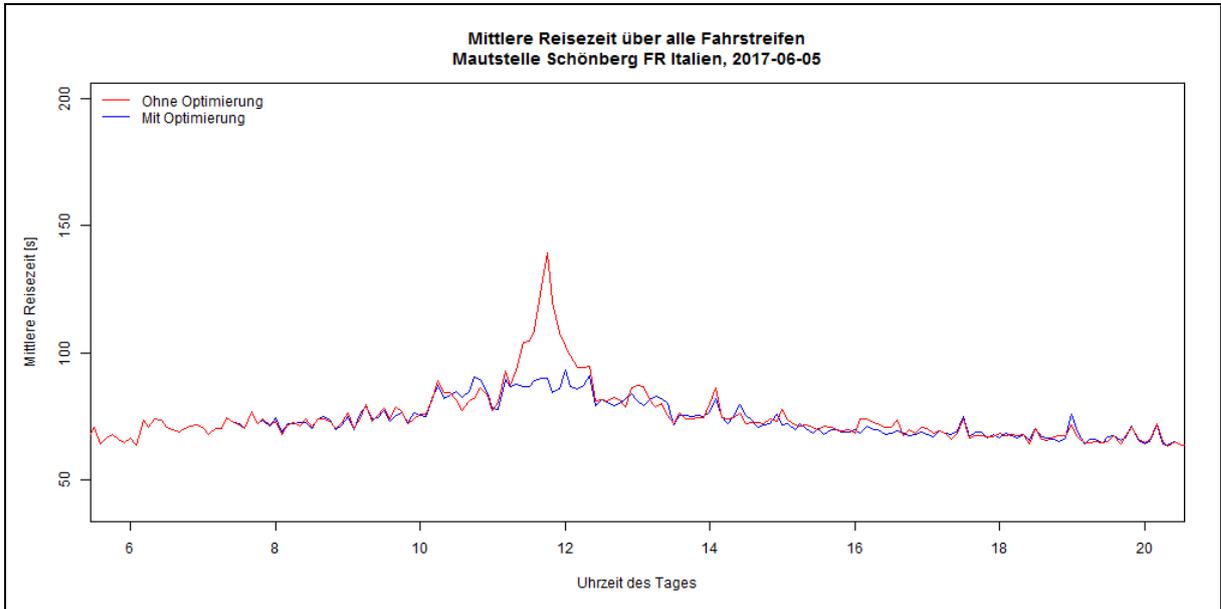


MONTAG 05.06.2017

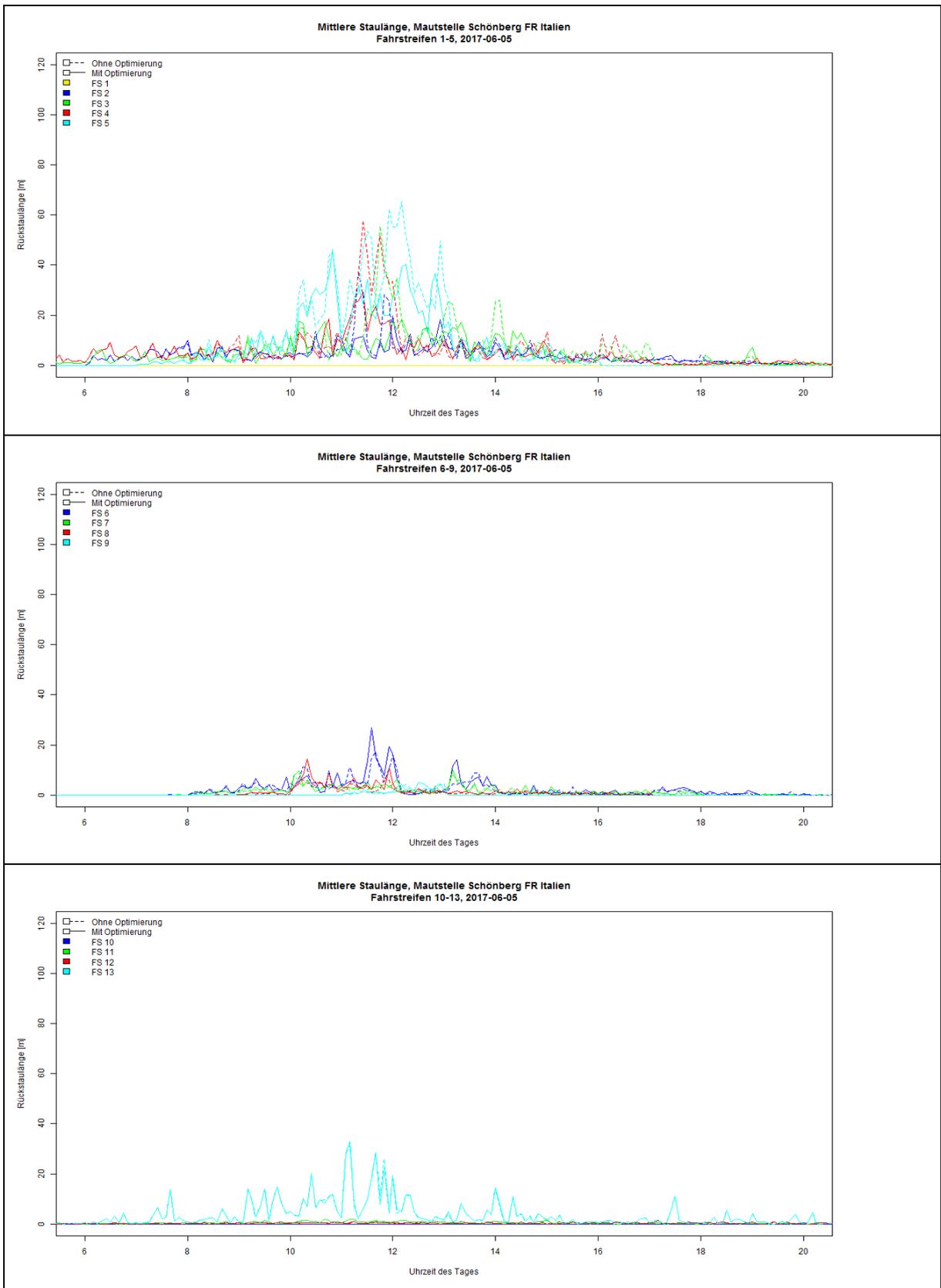
Verkehrsbelastung

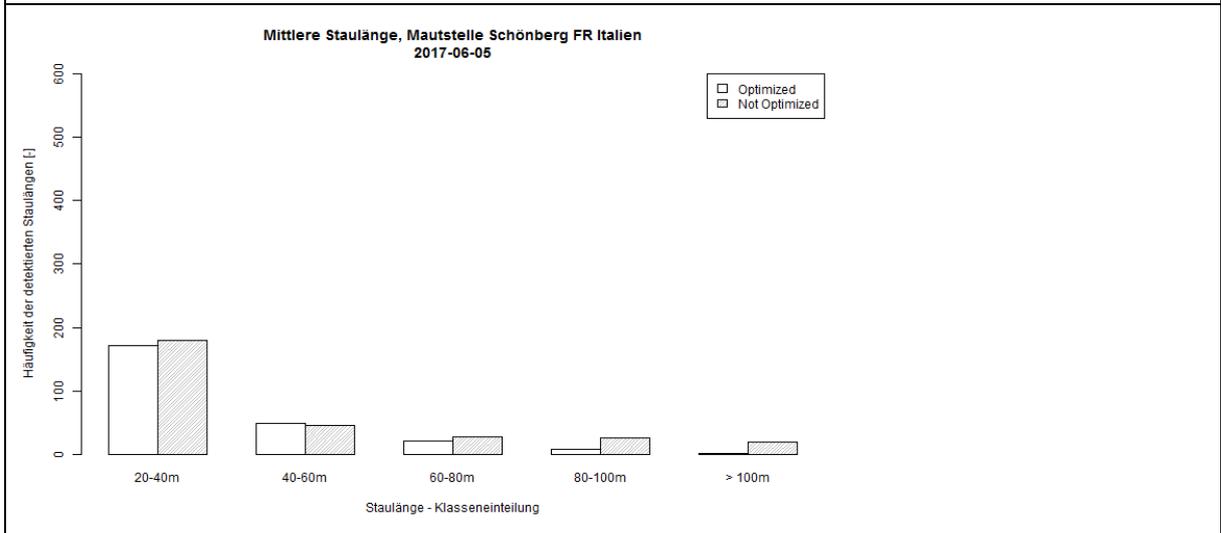
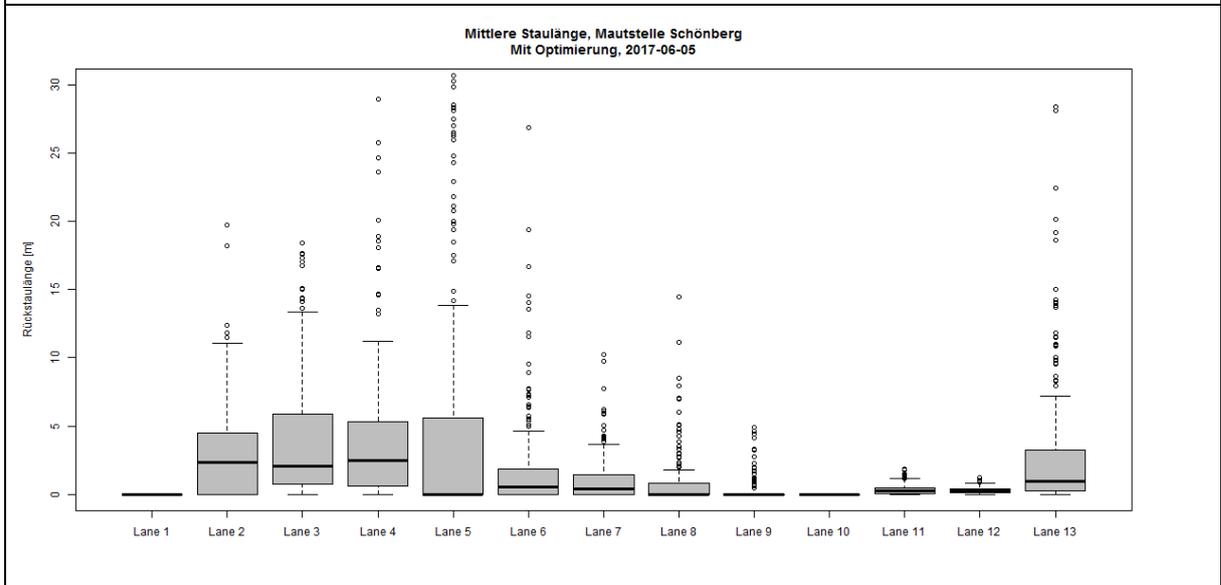
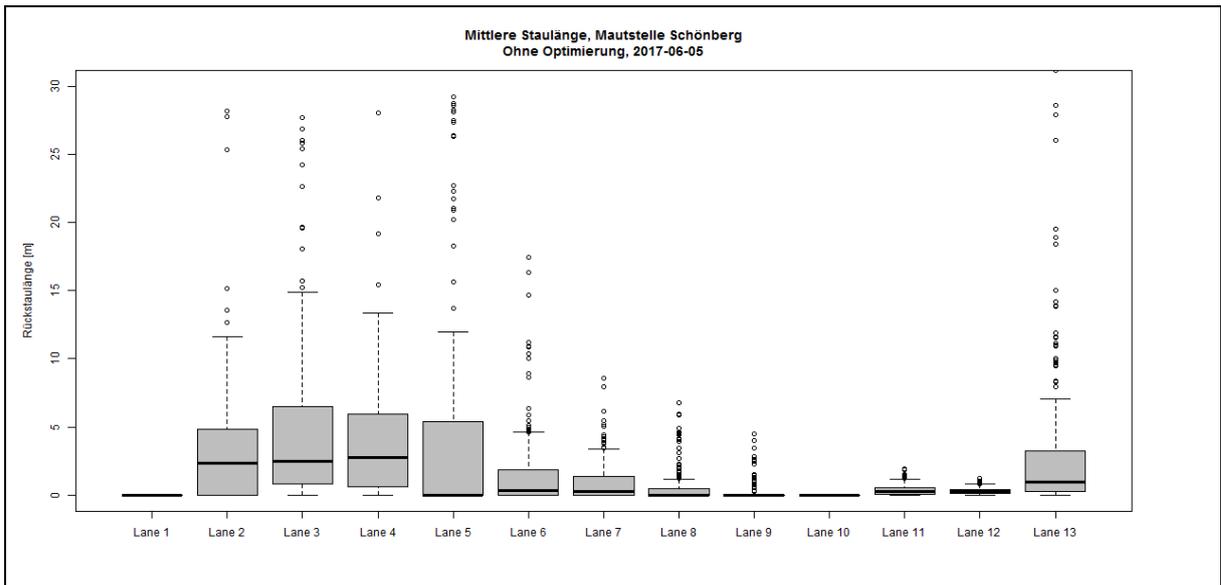


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



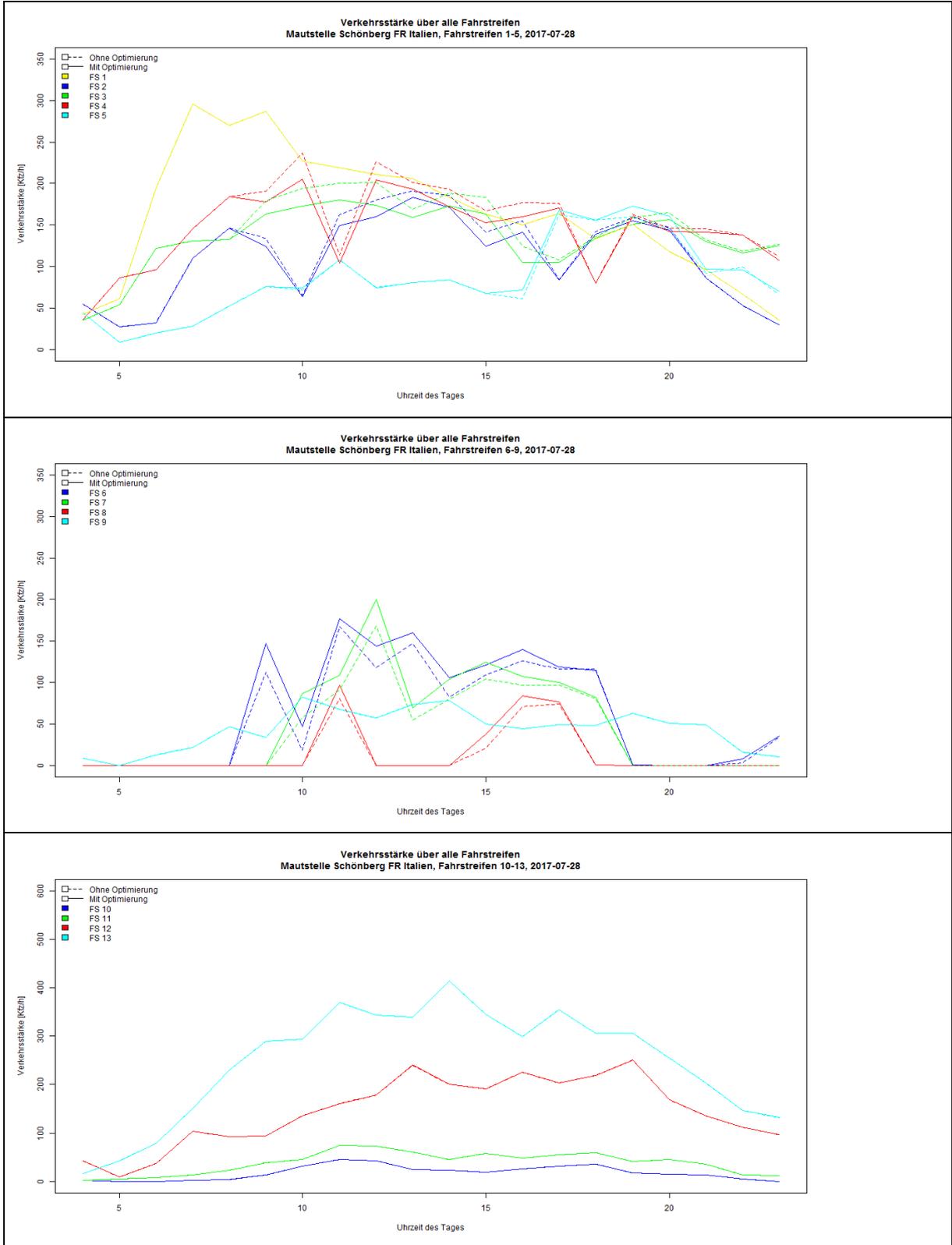
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



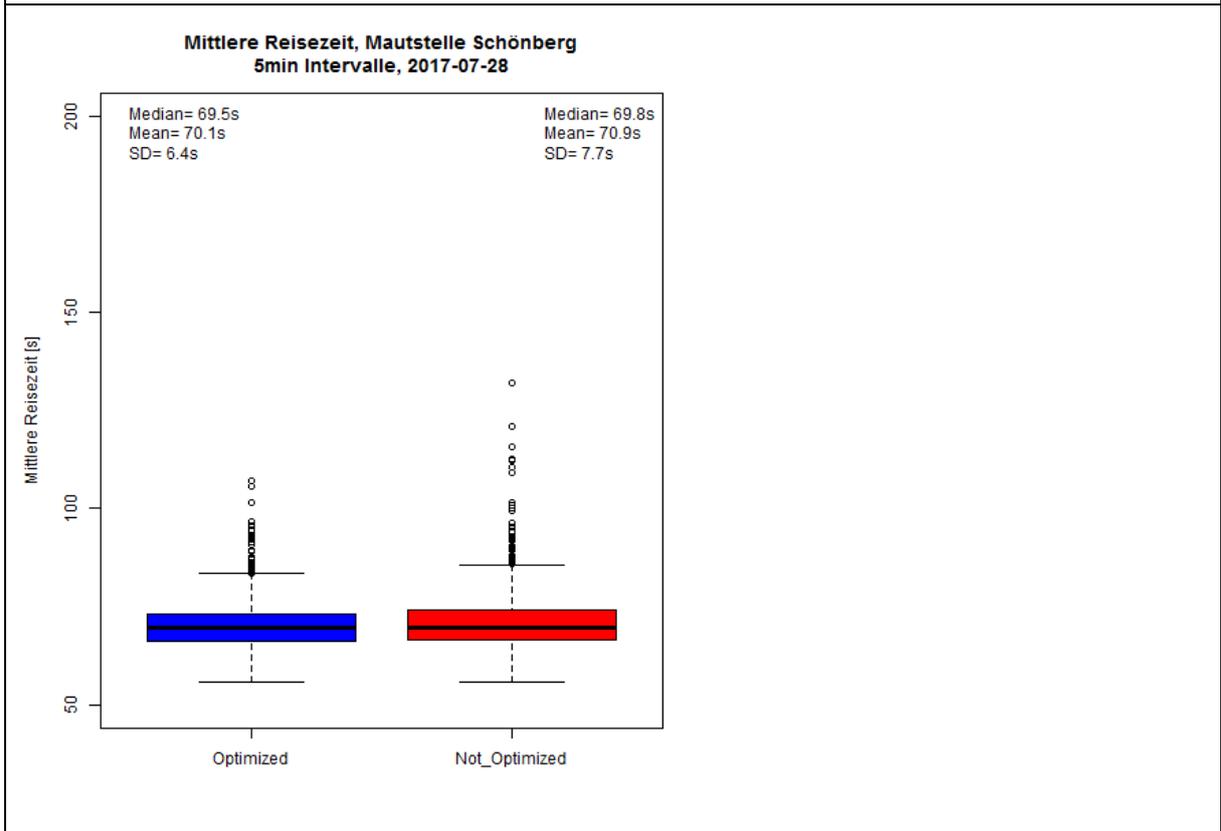
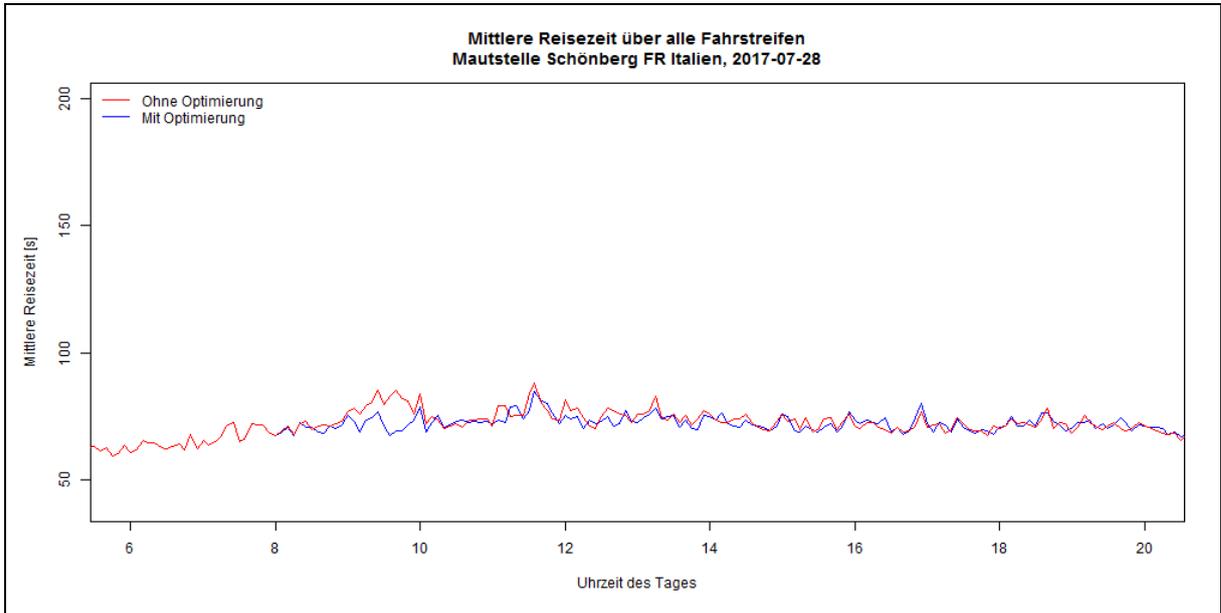


FREITAG 28.07.2017

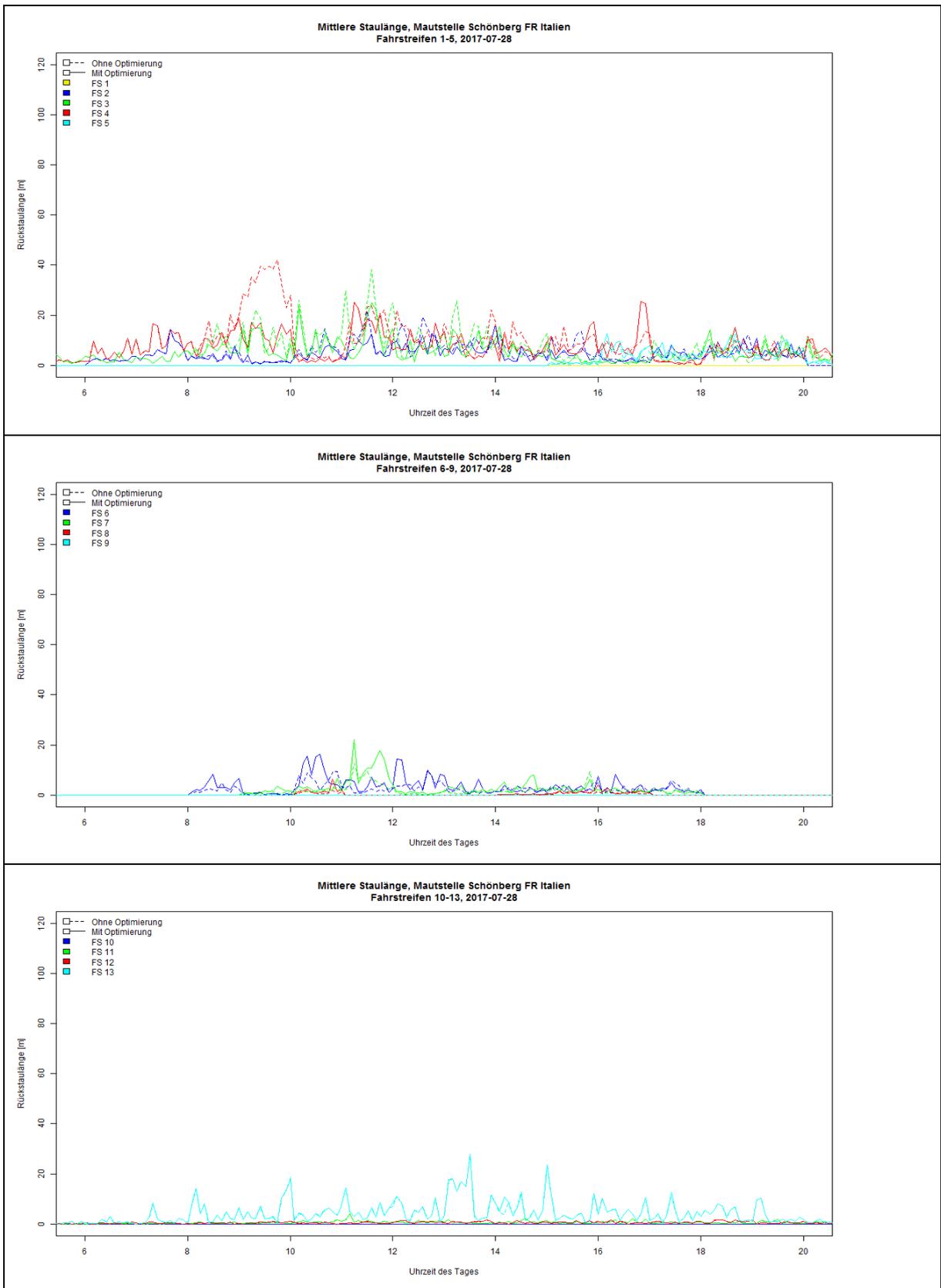
Verkehrsbelastung

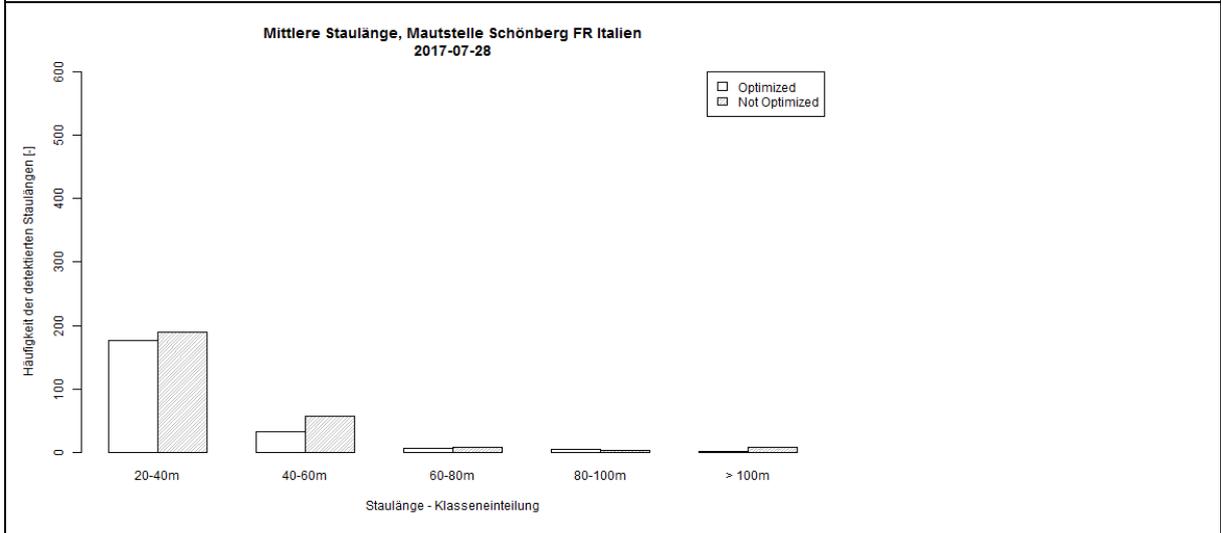
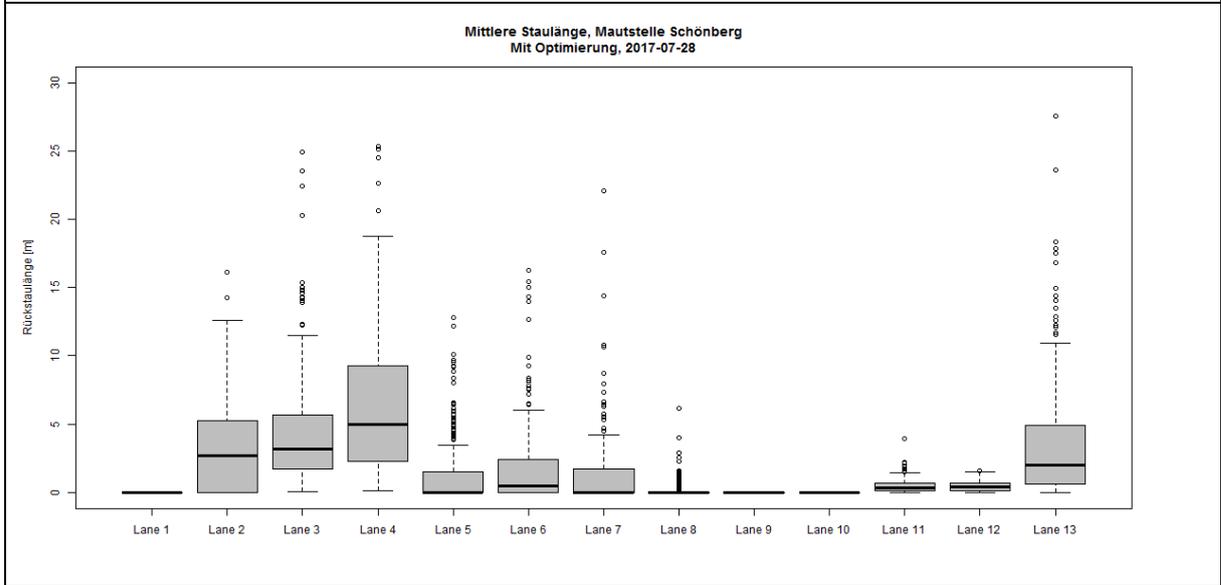
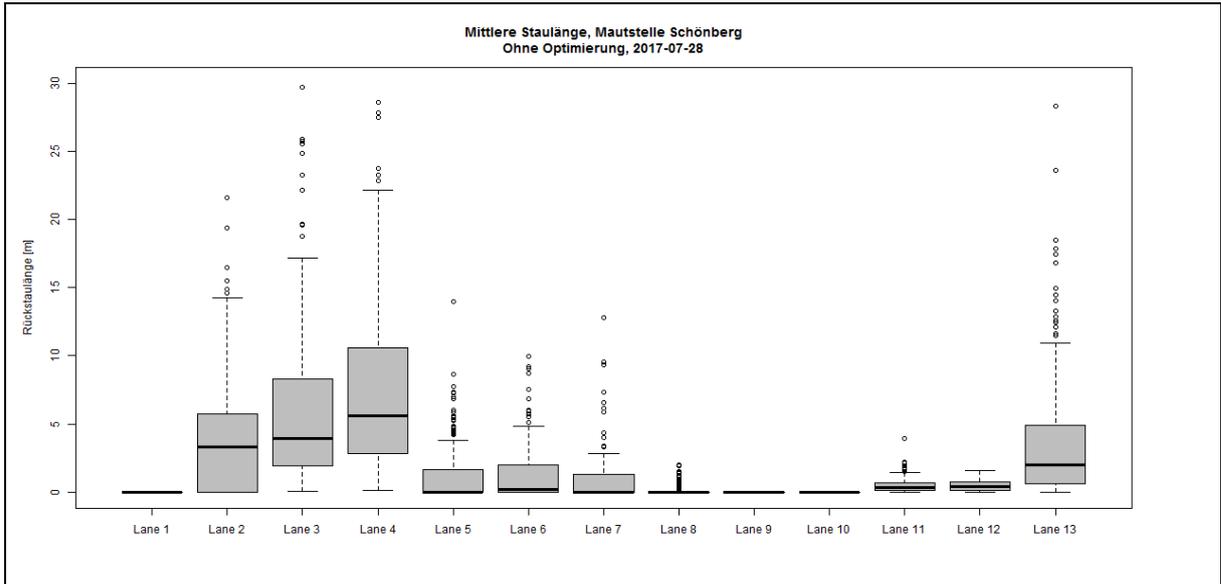


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



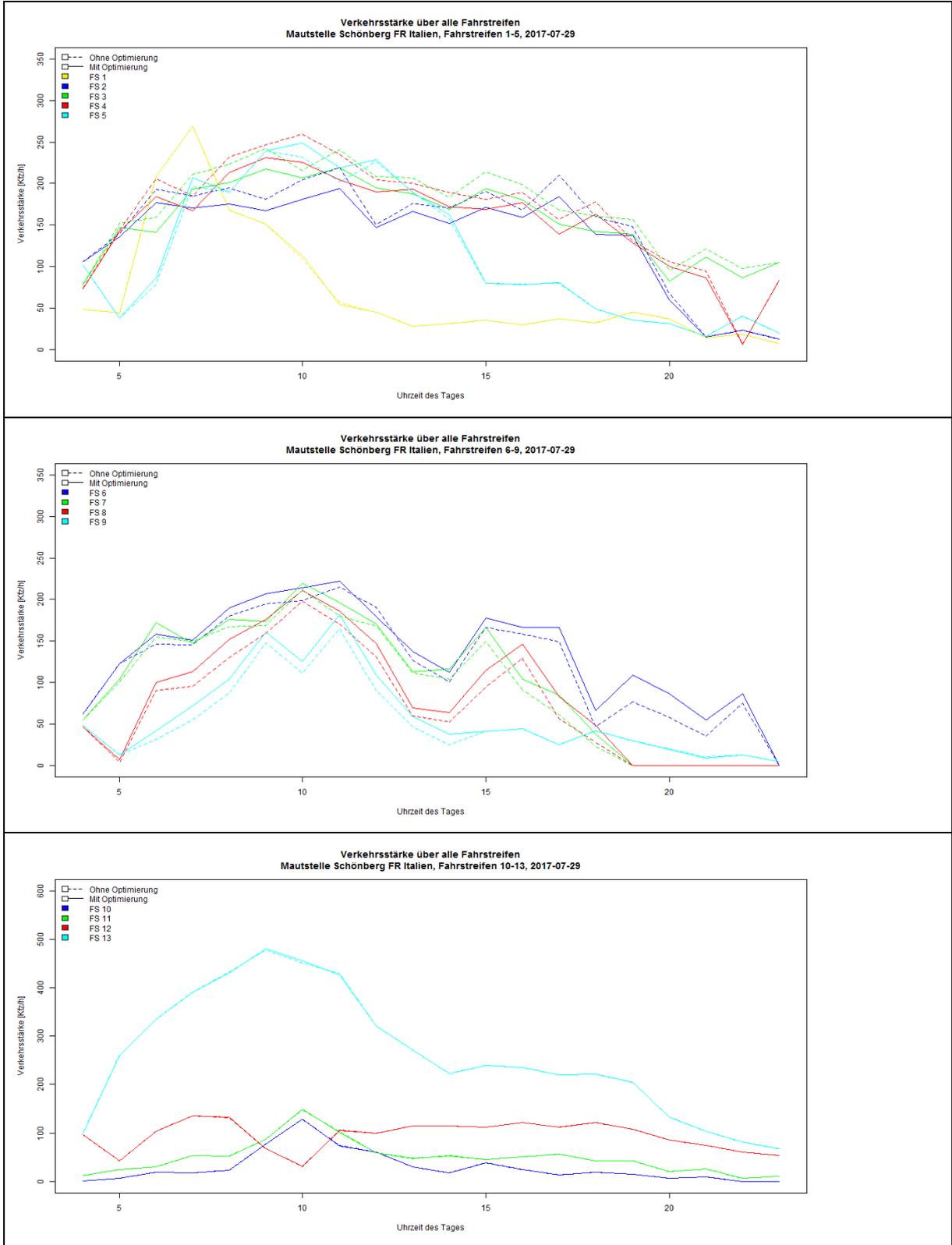
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



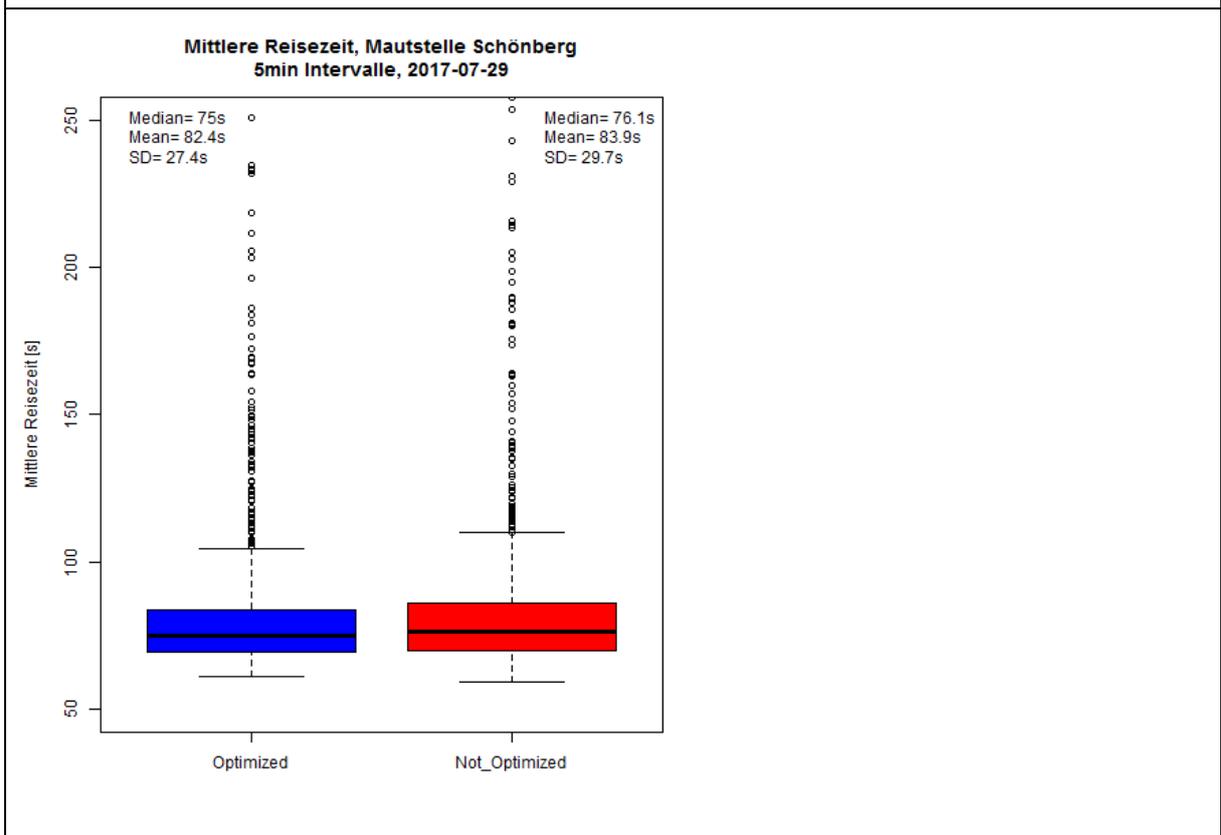
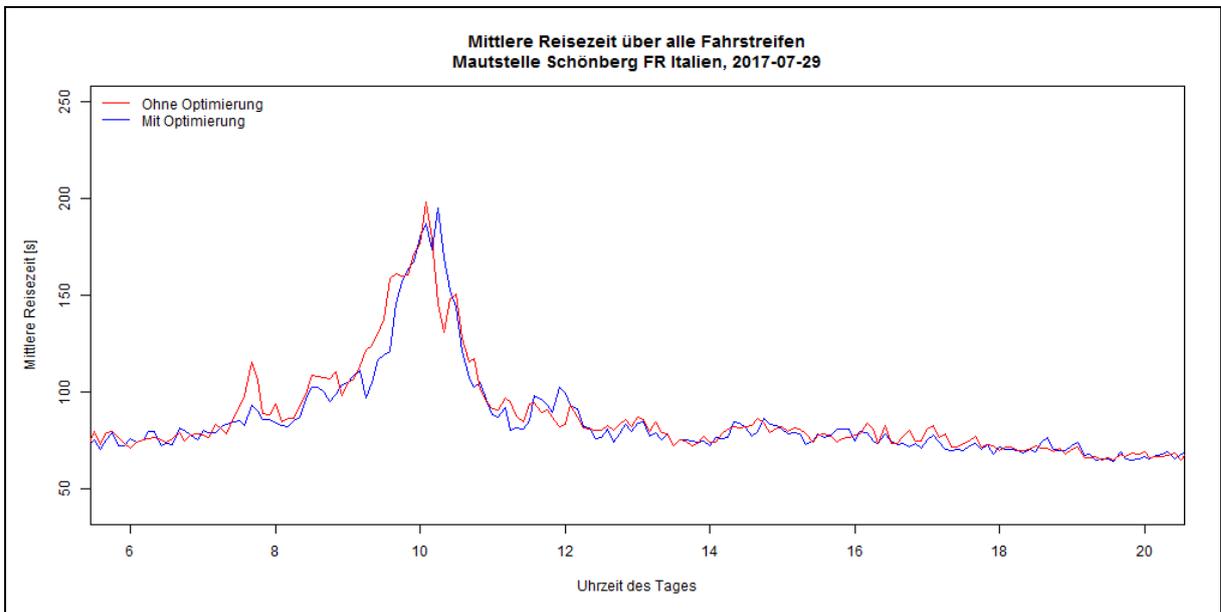


SAMSTAG 29.07.2017

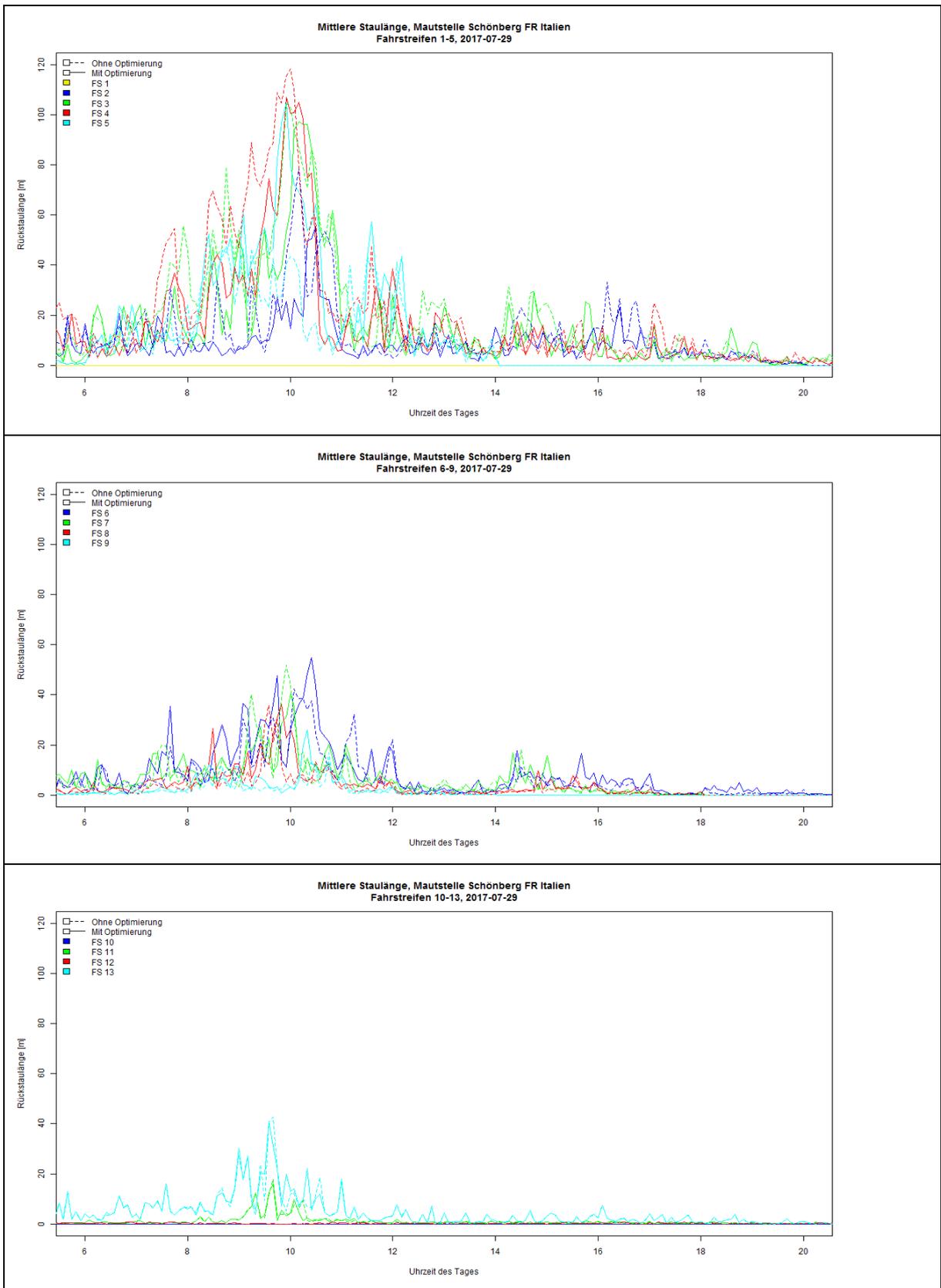
Verkehrsbelastung

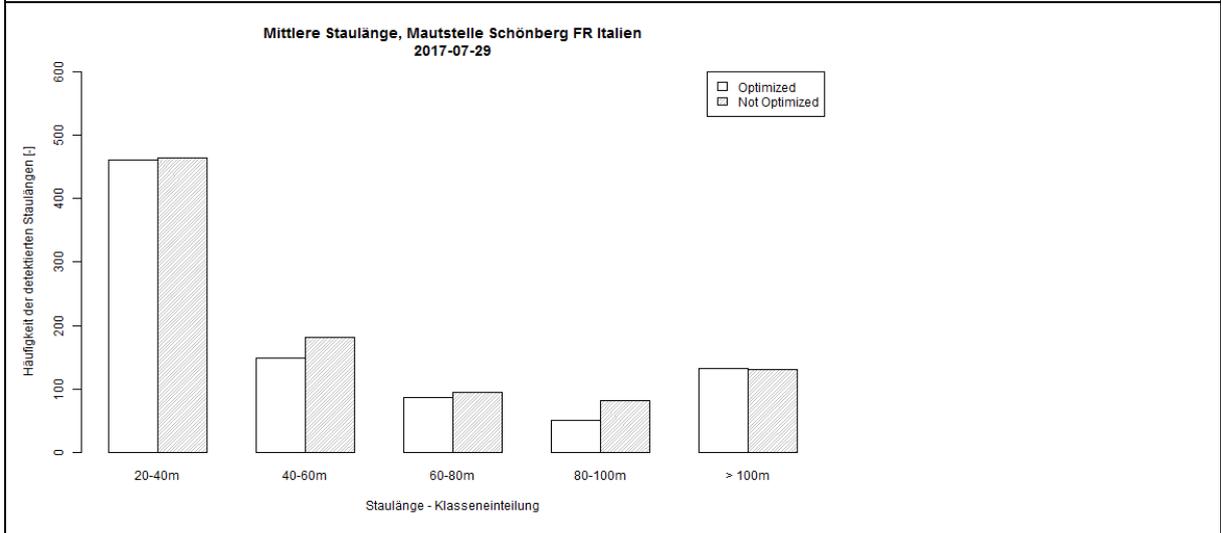
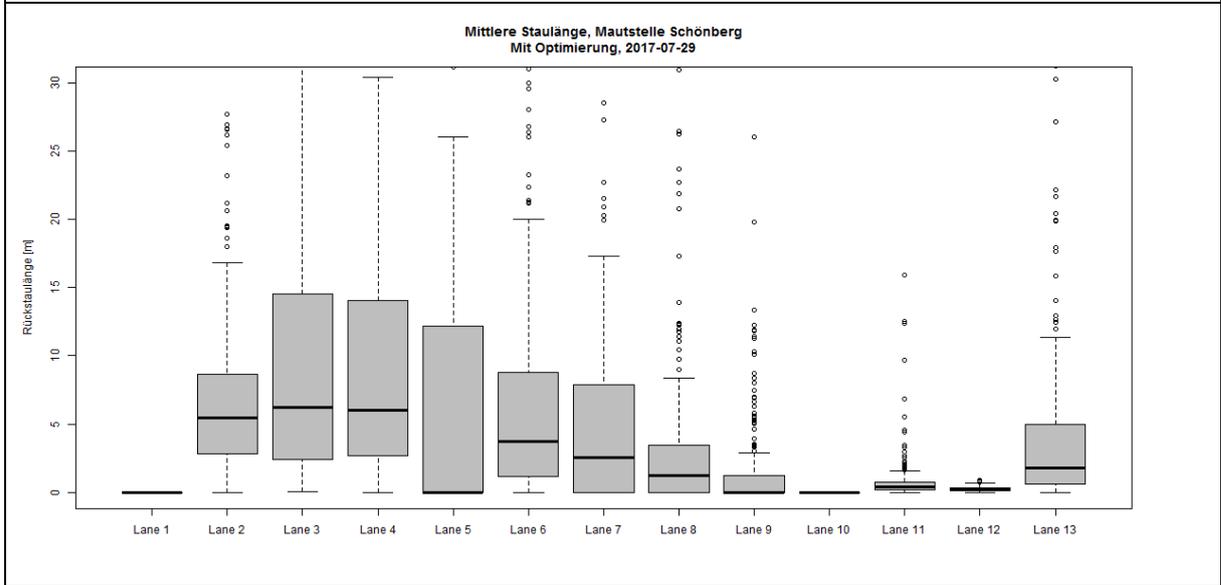
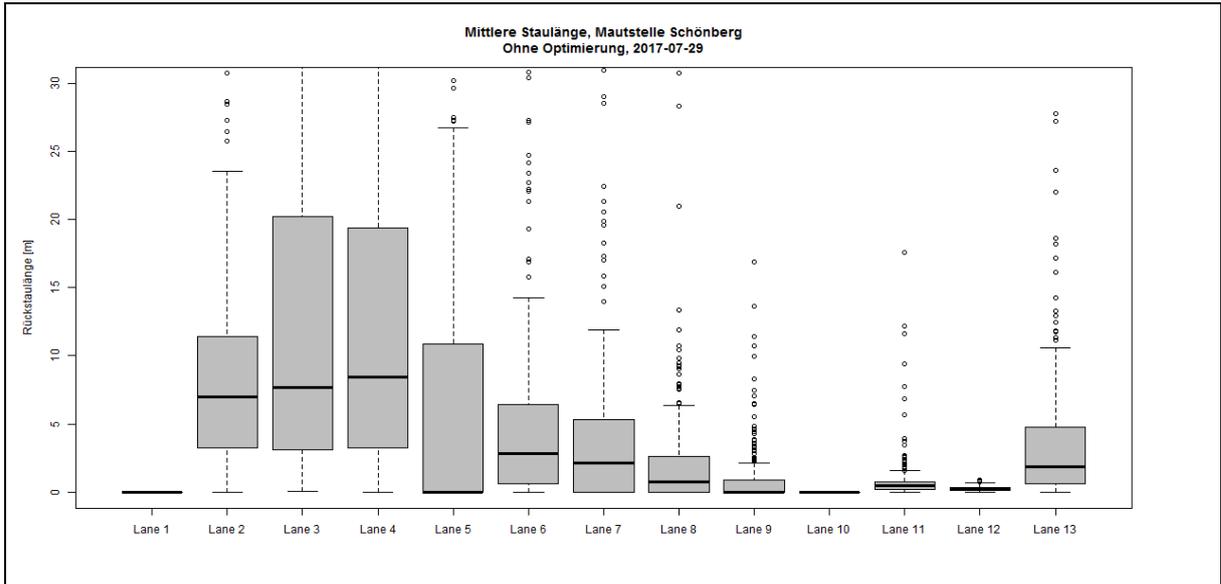


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



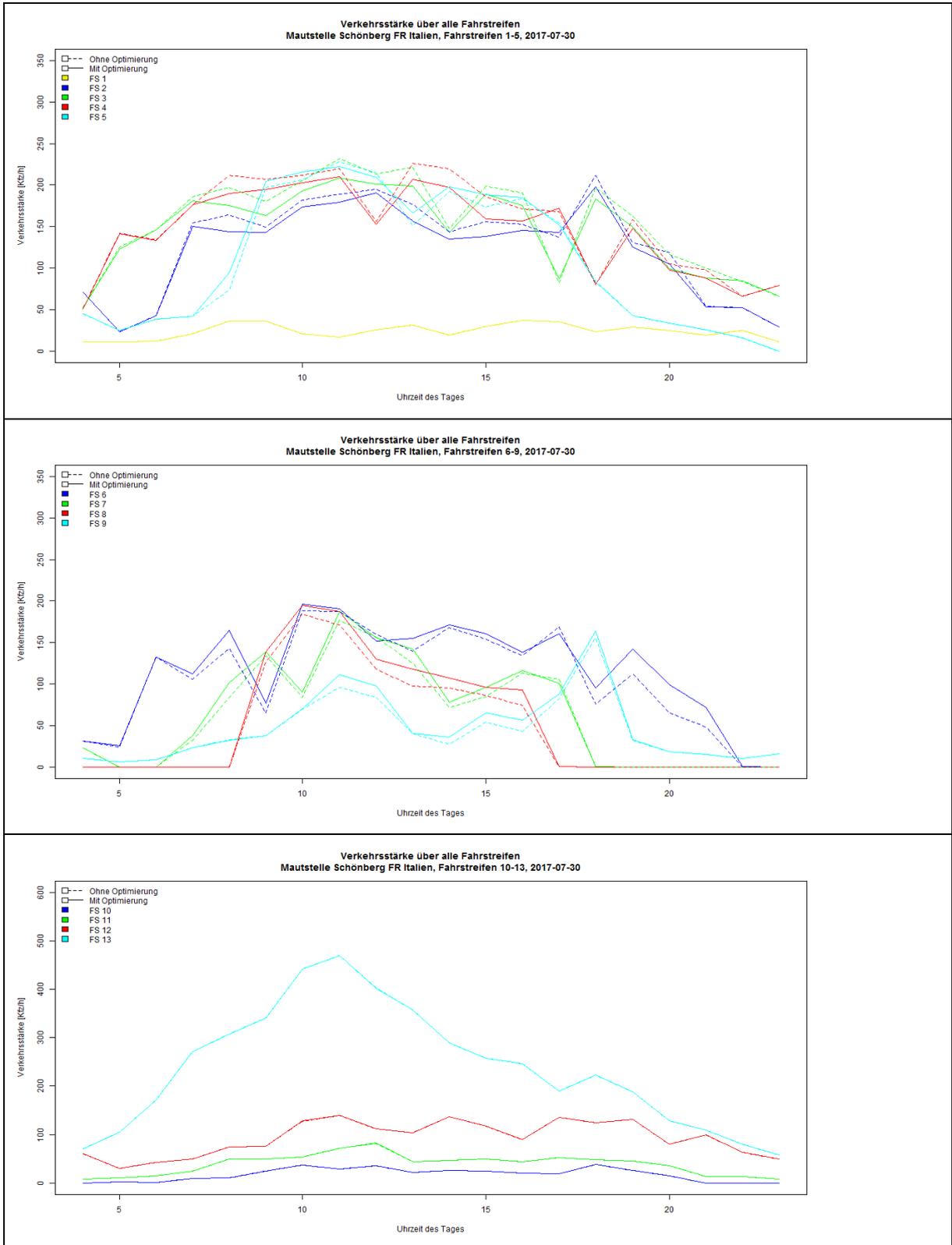
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



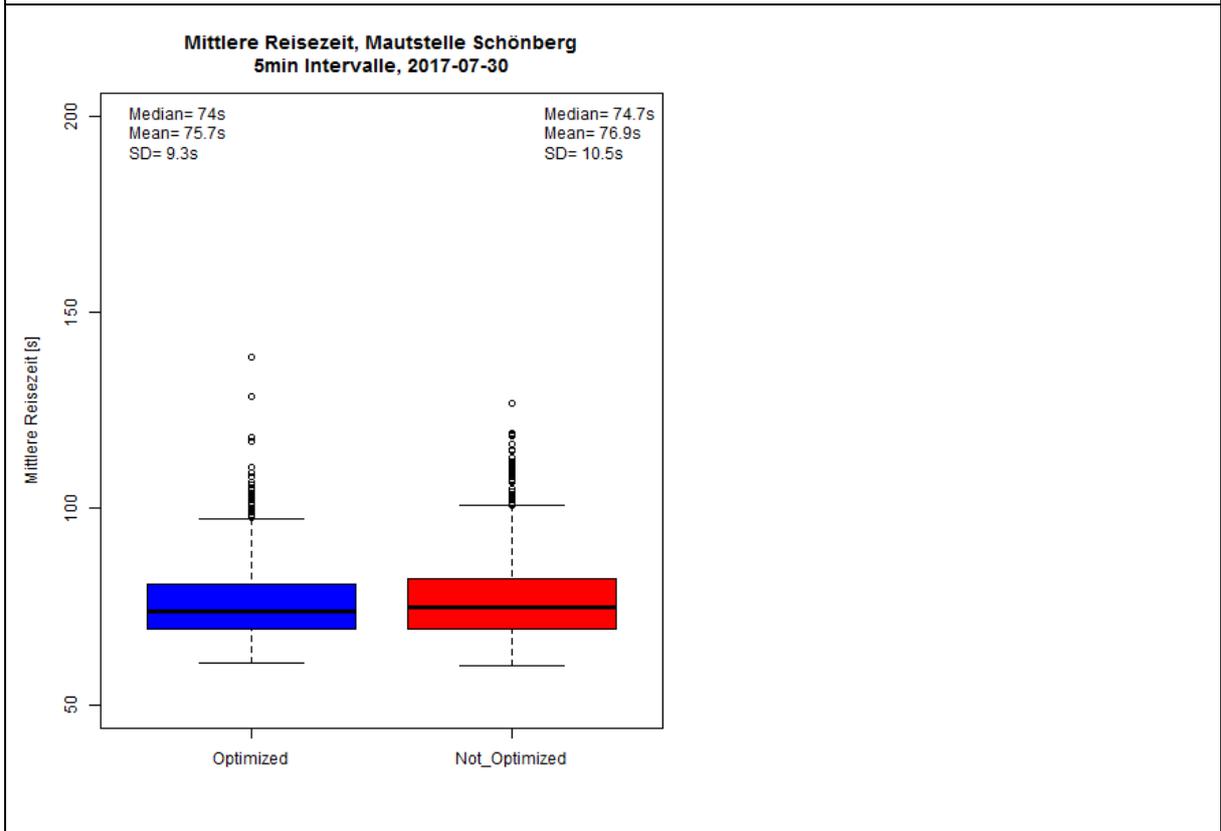
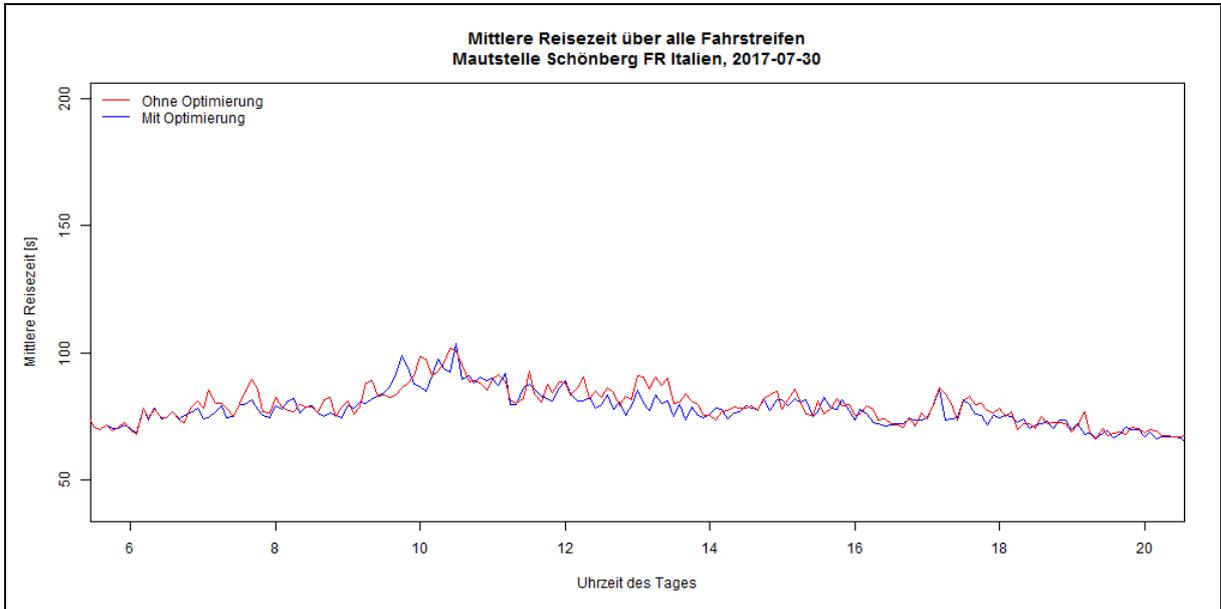


SONNTAG 30.07.2017

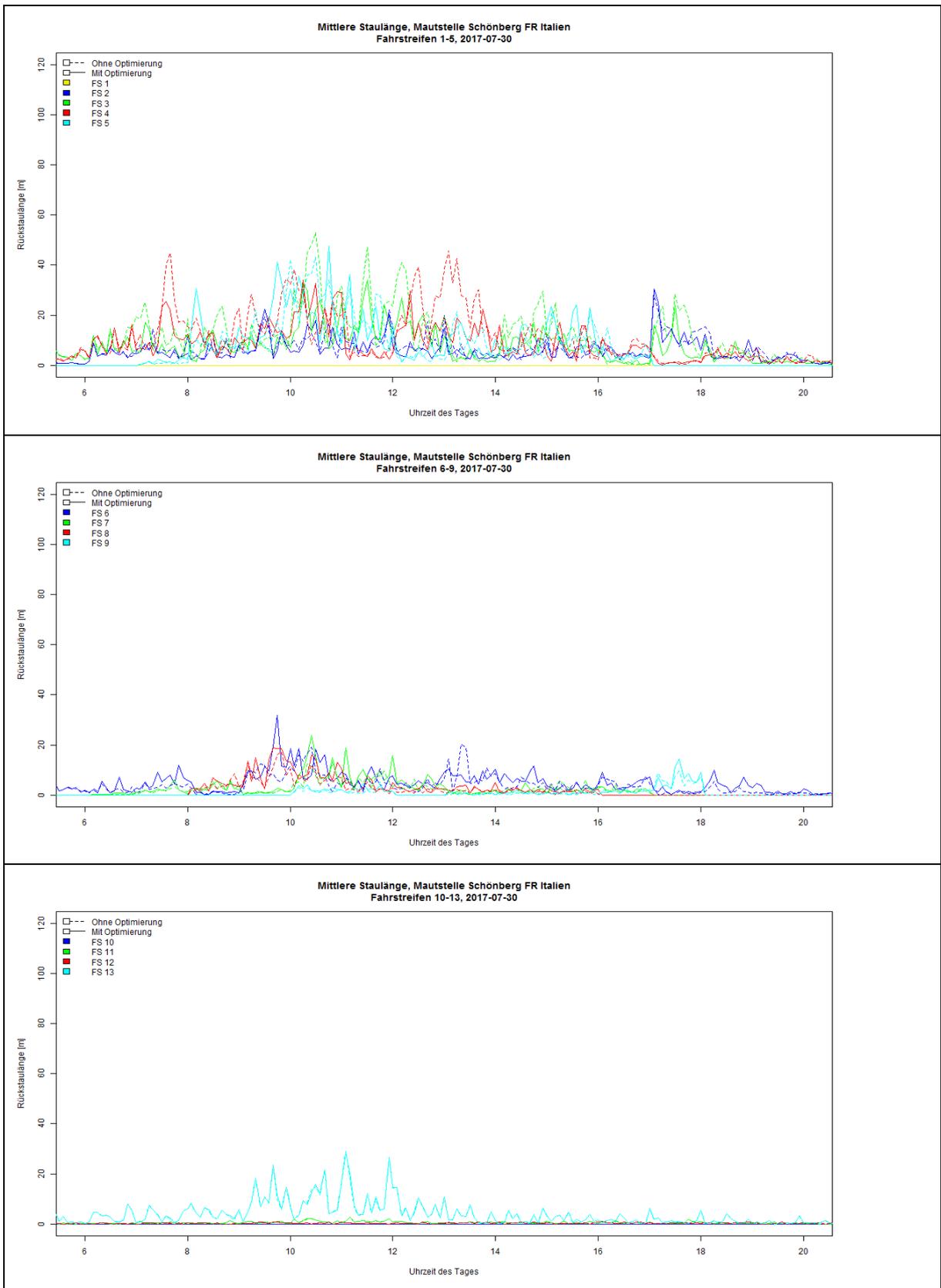
Verkehrsbelastung

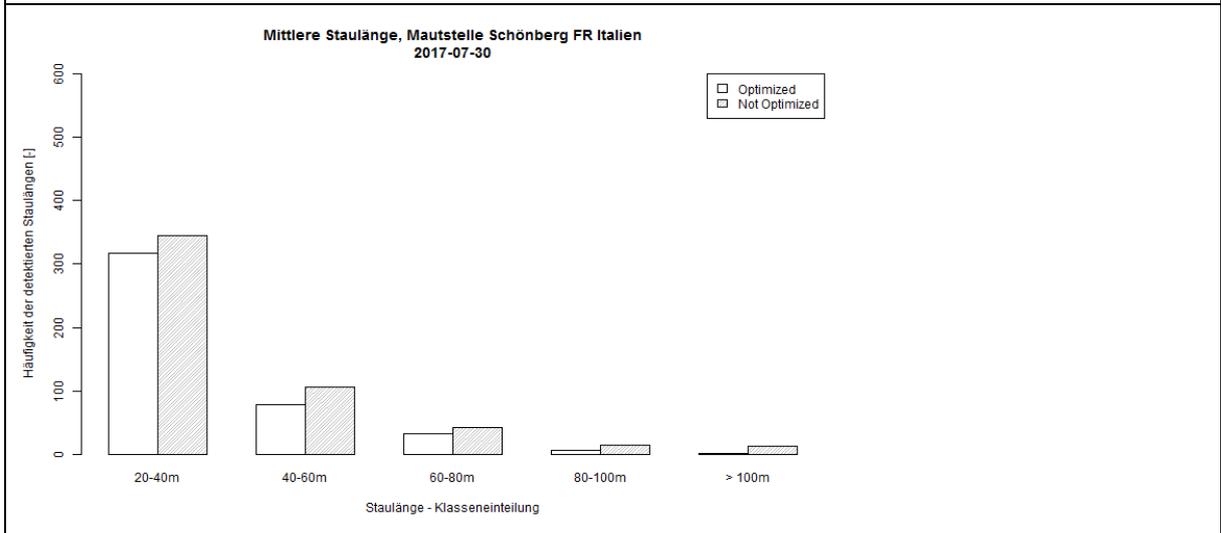
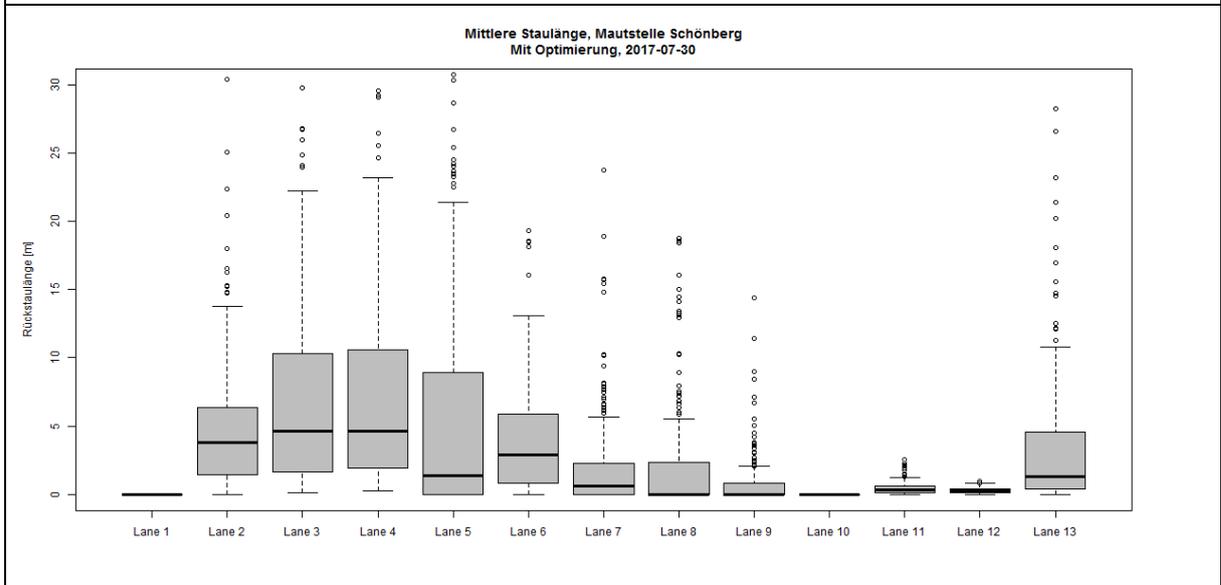
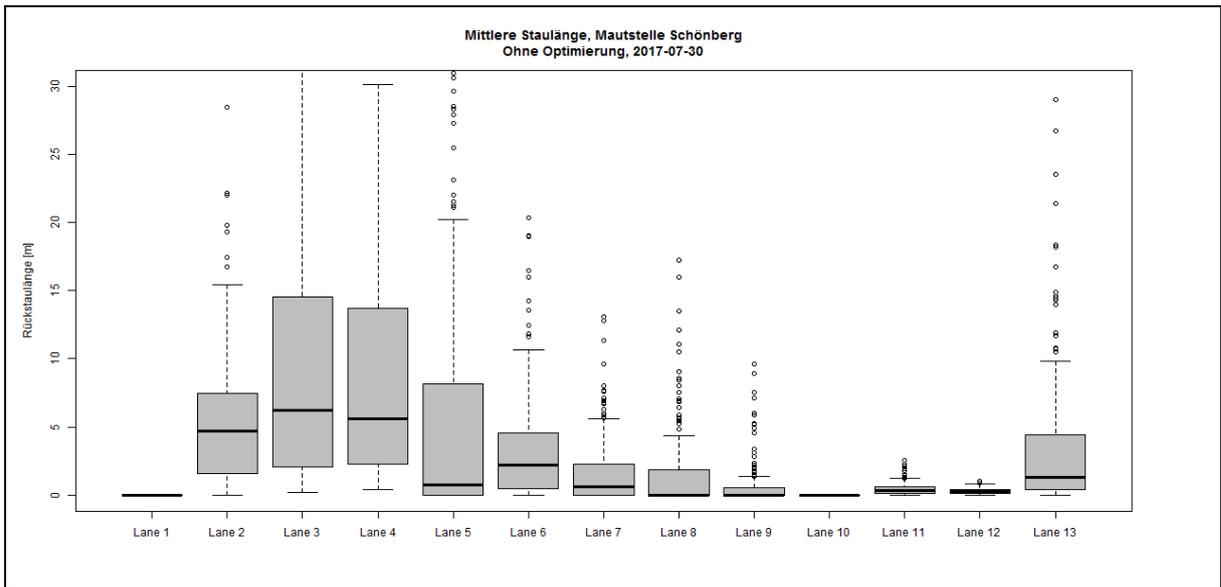


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



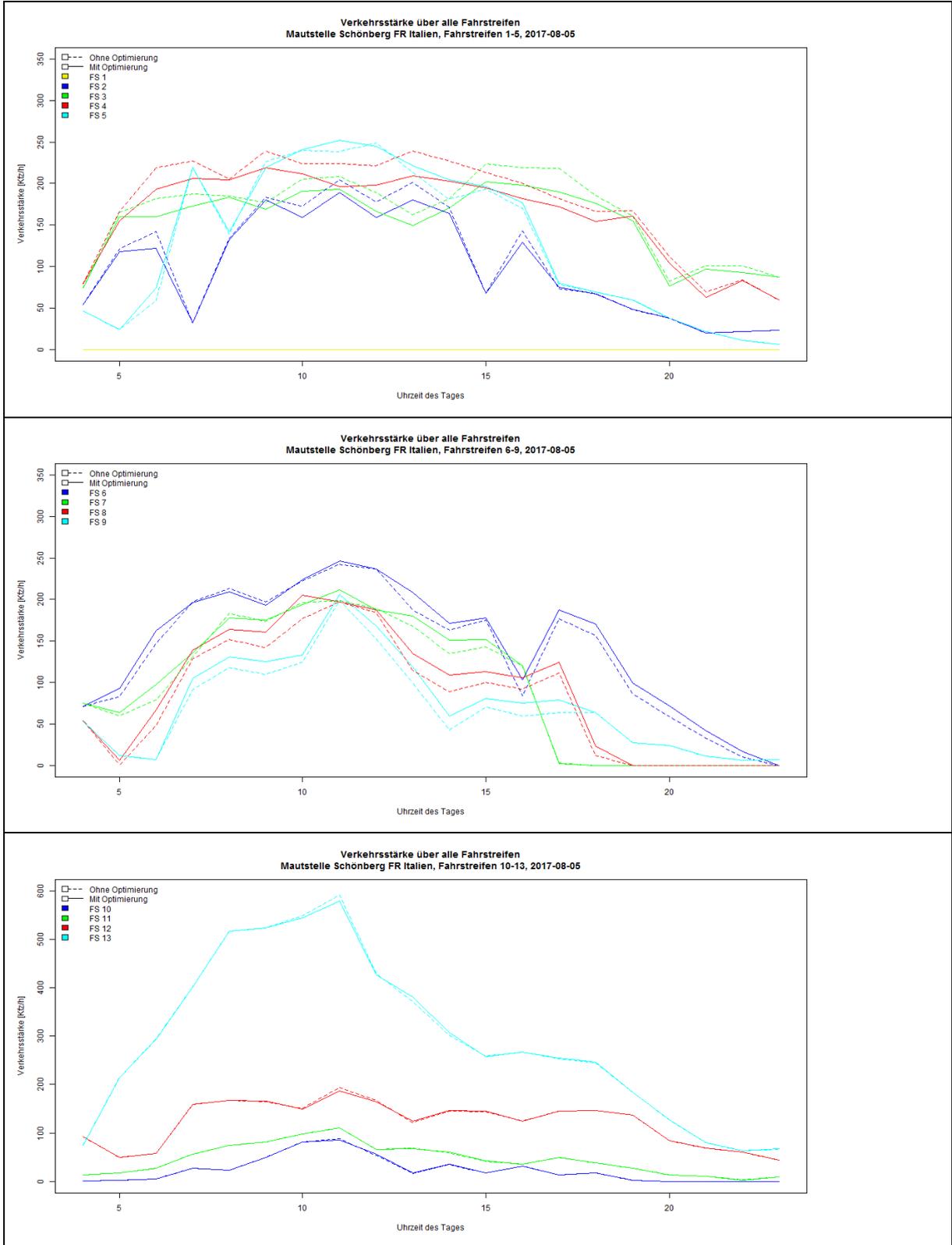
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



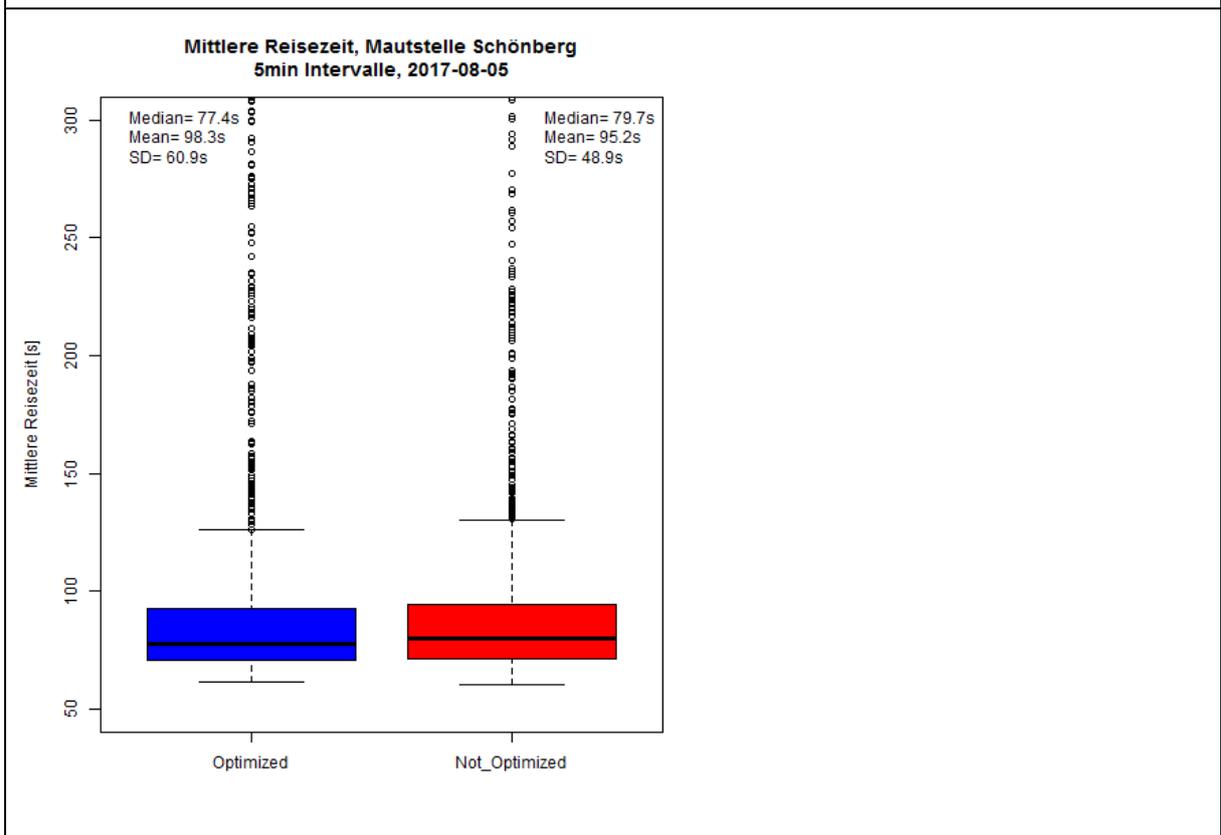
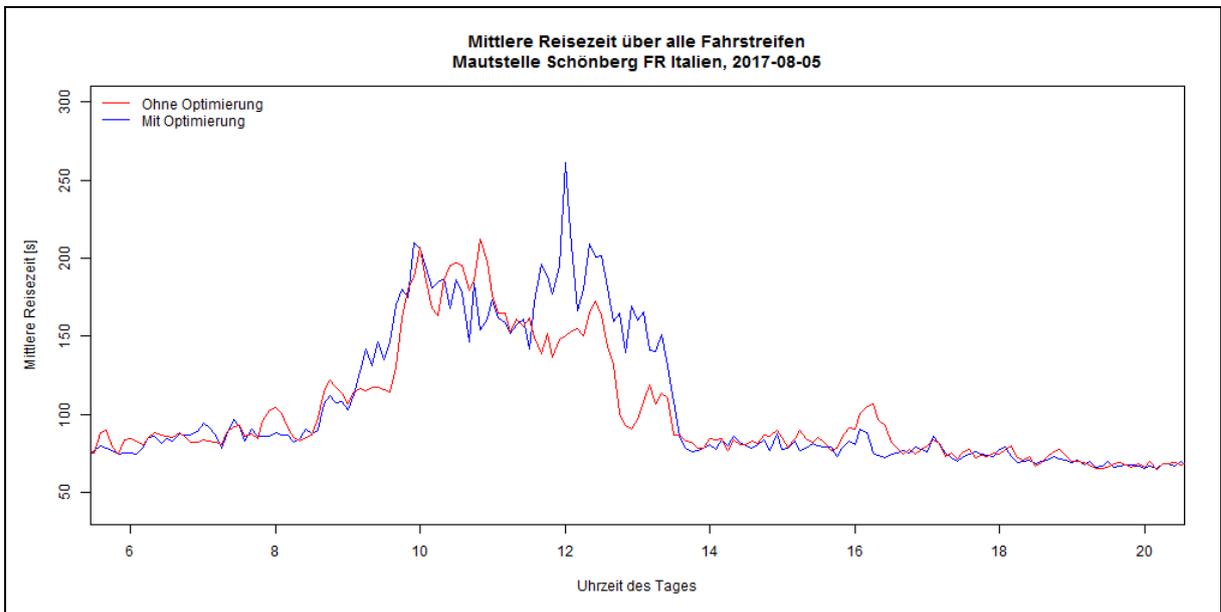


SAMSTAG 05.08.2017

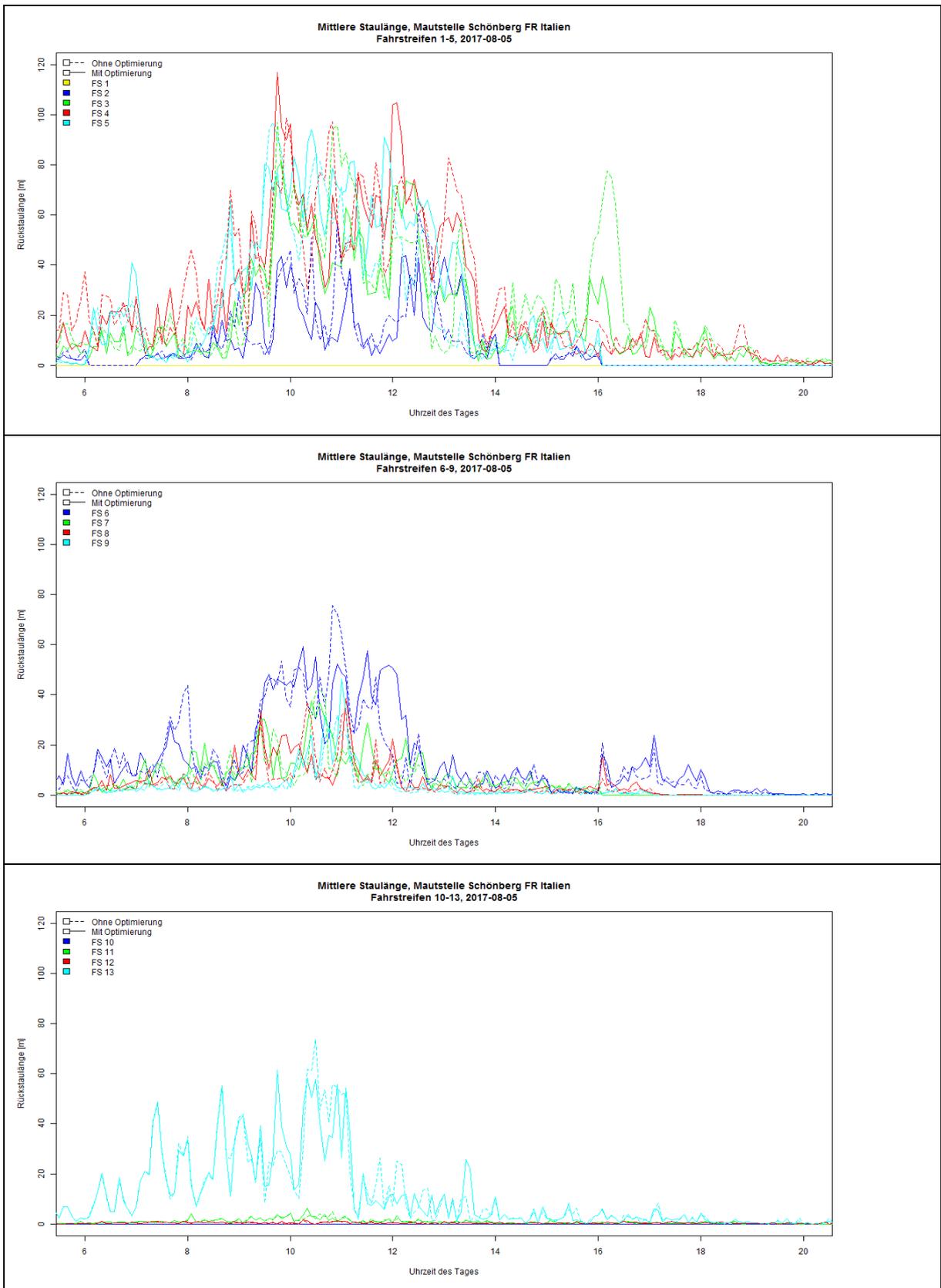
Verkehrsbelastung

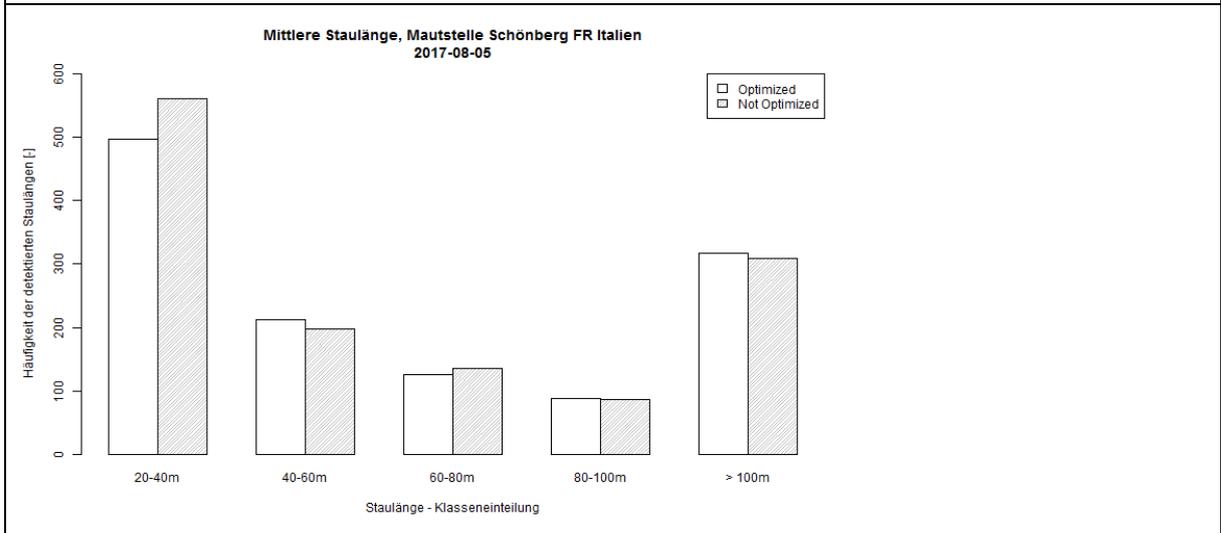
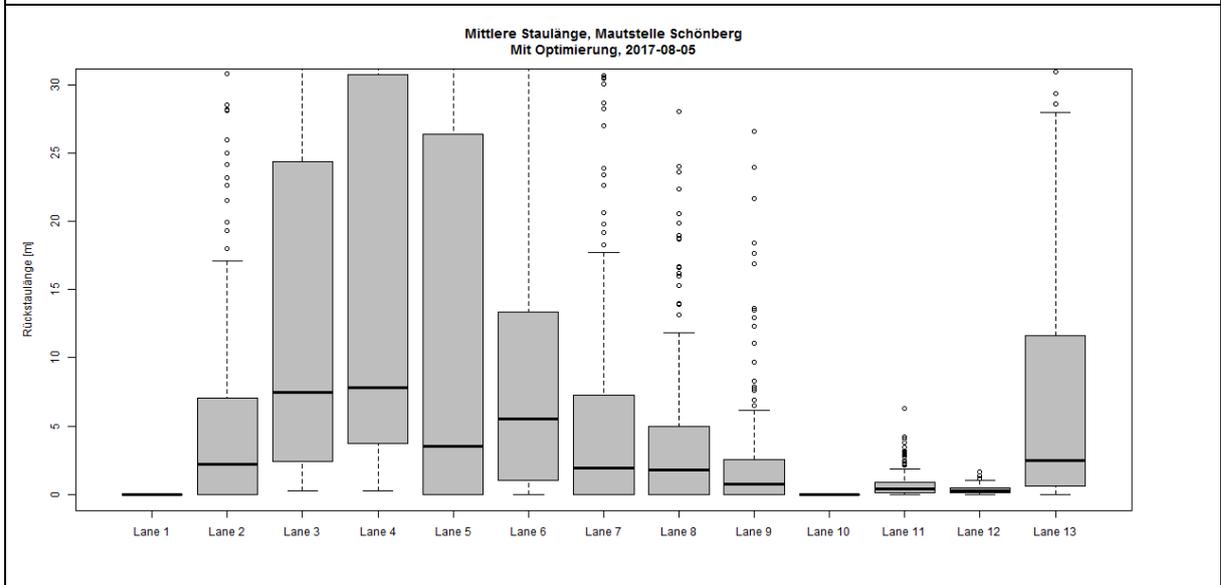
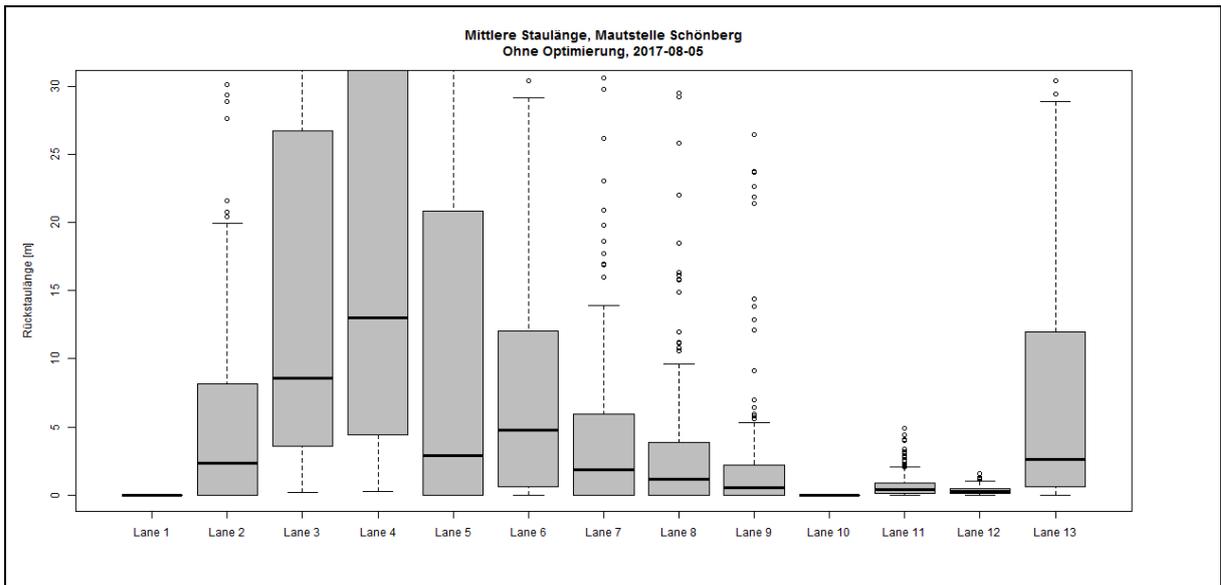


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



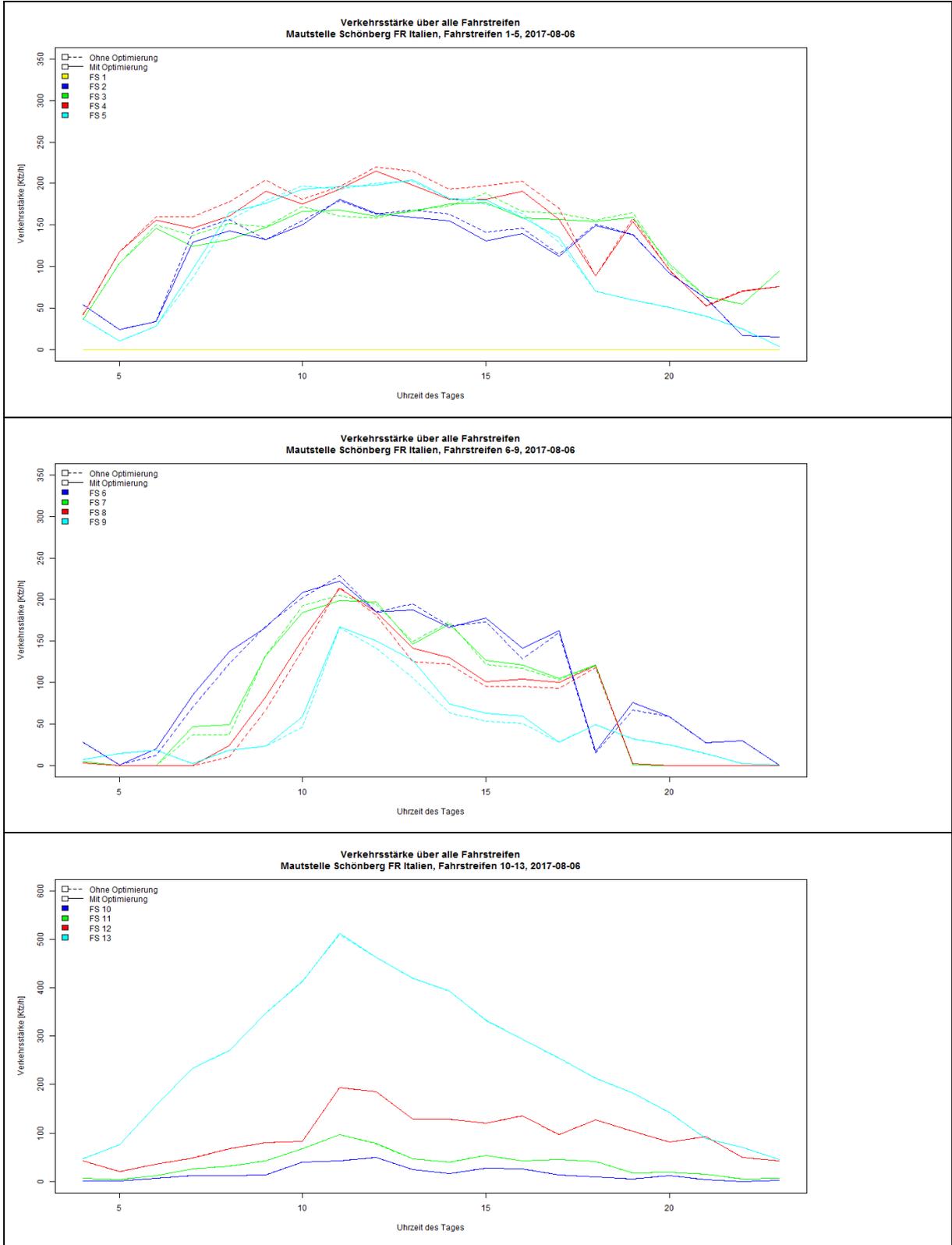
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



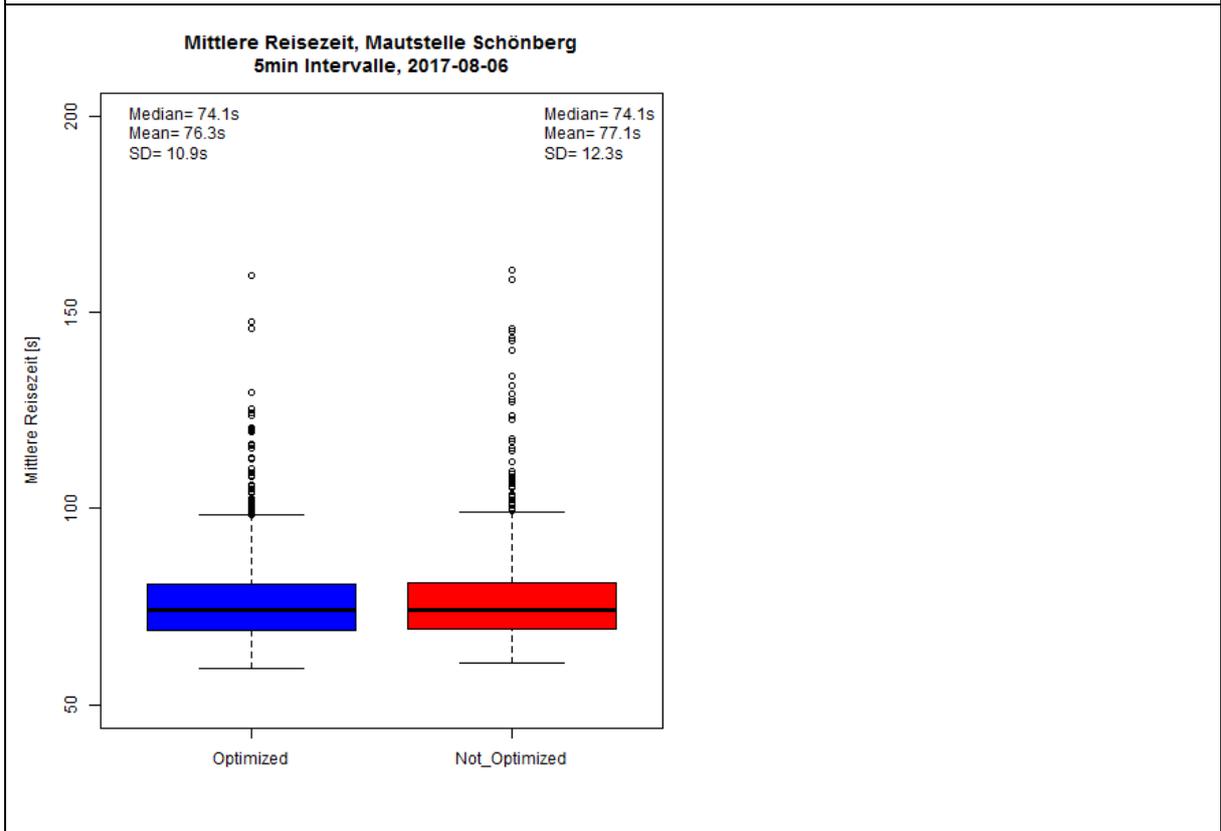
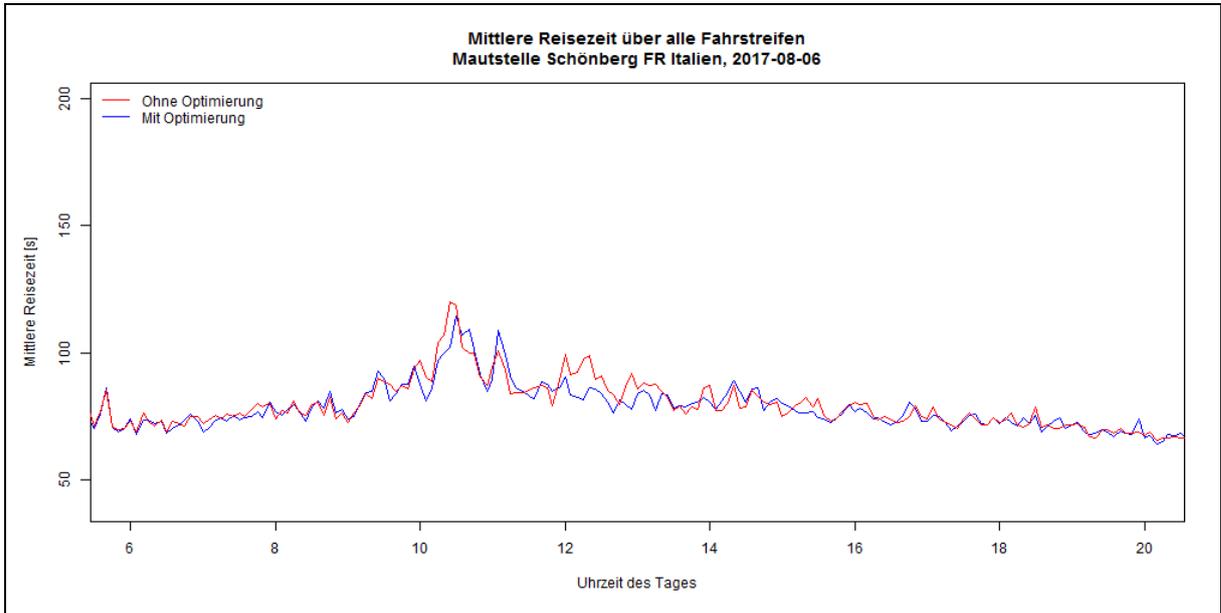


SONNTAG 06.08.2017

Verkehrsbelastung

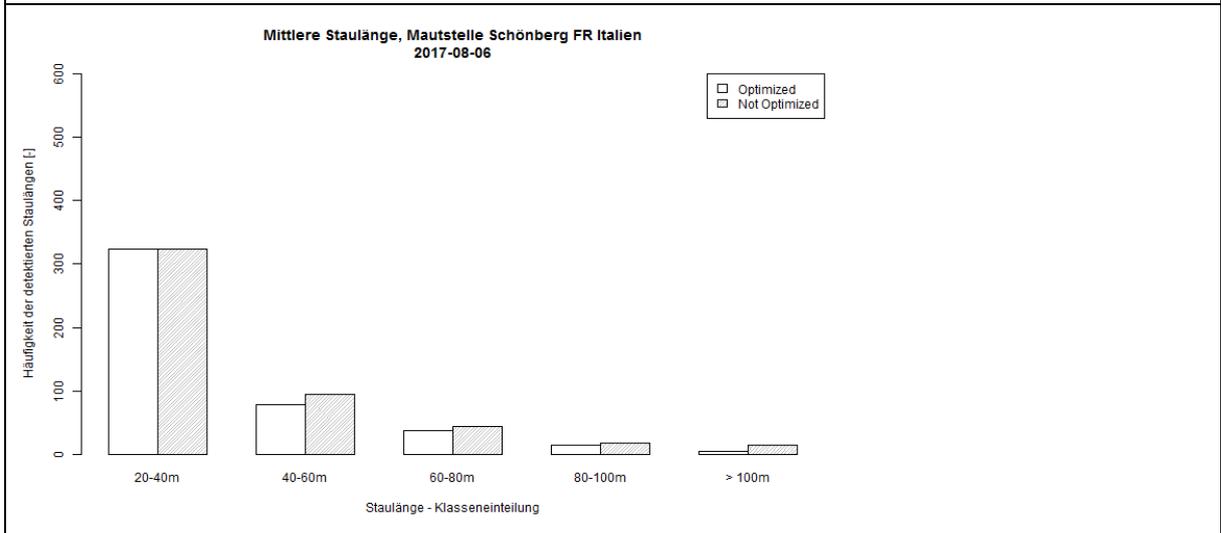
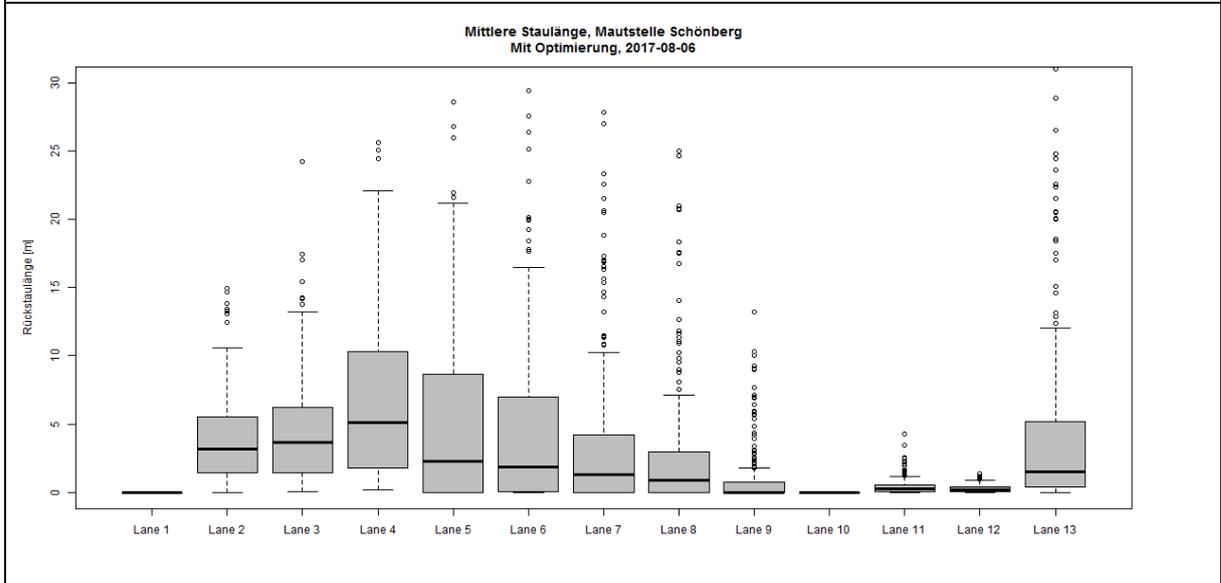
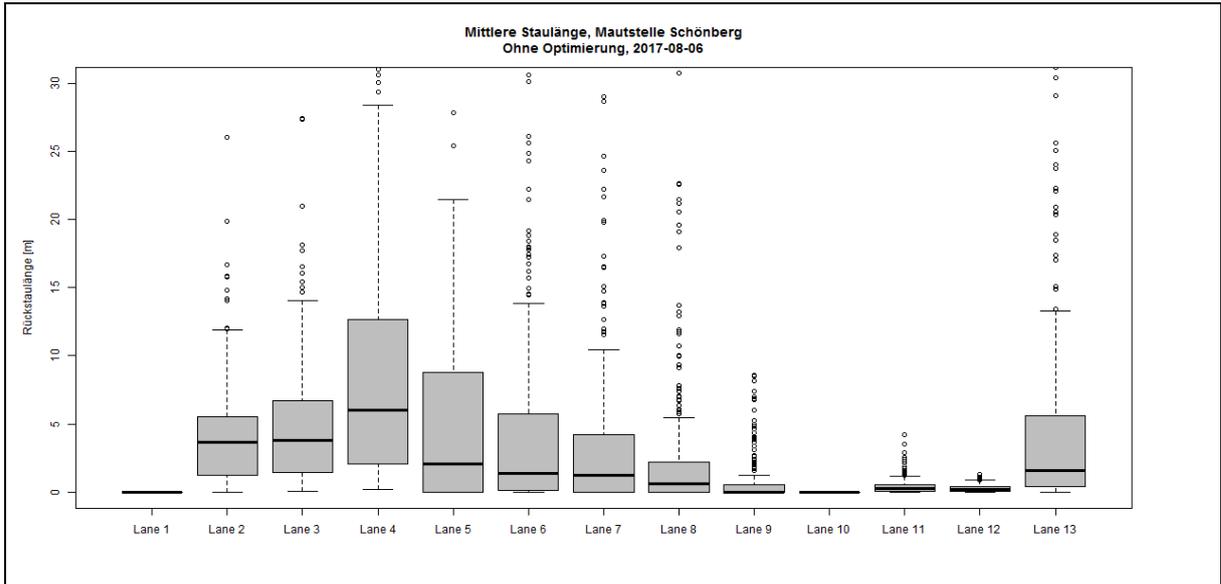


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



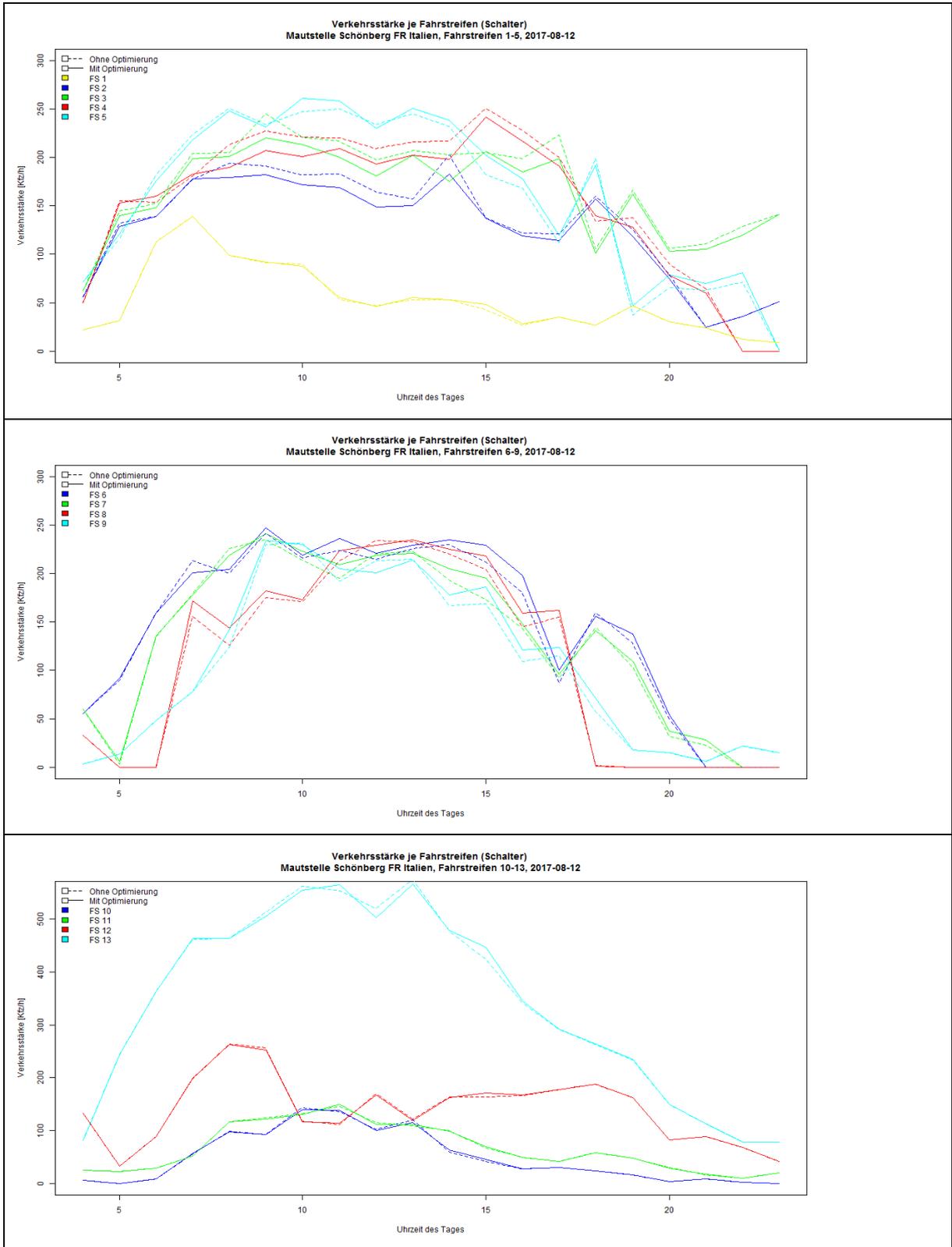
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



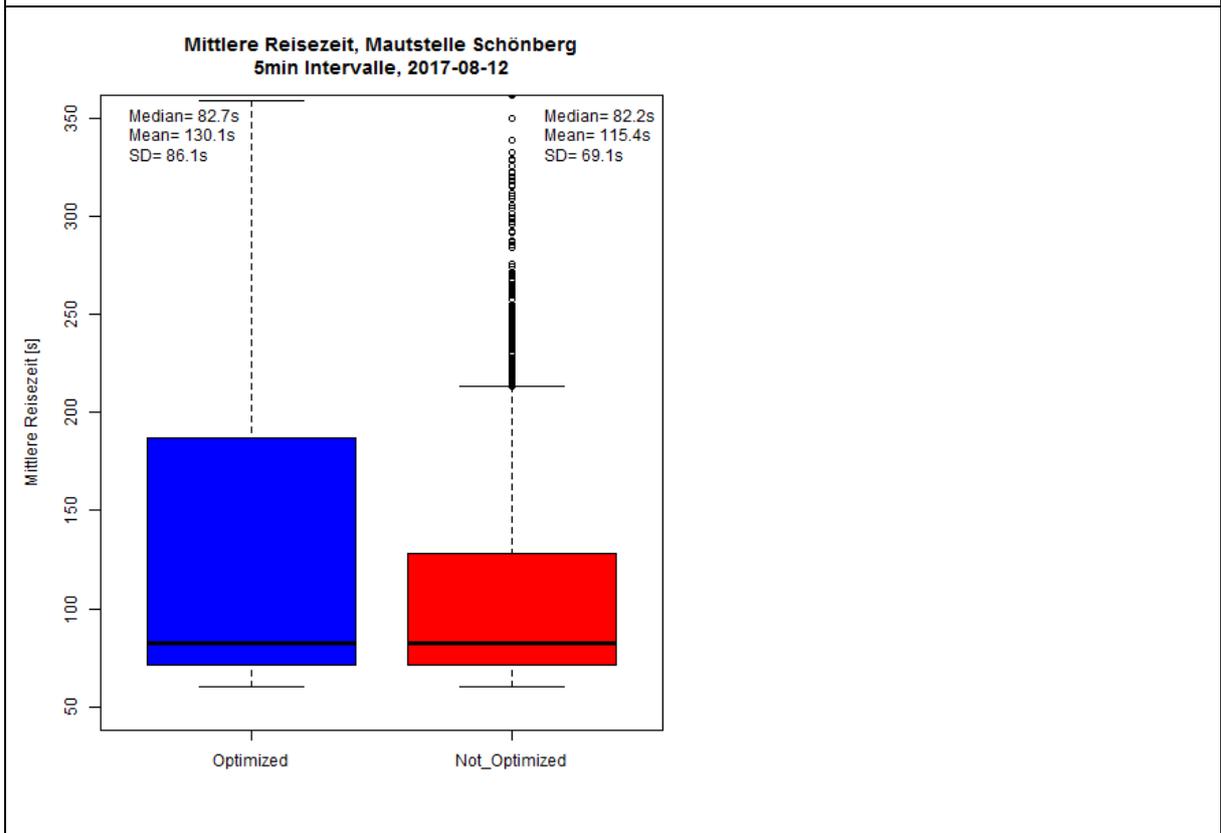
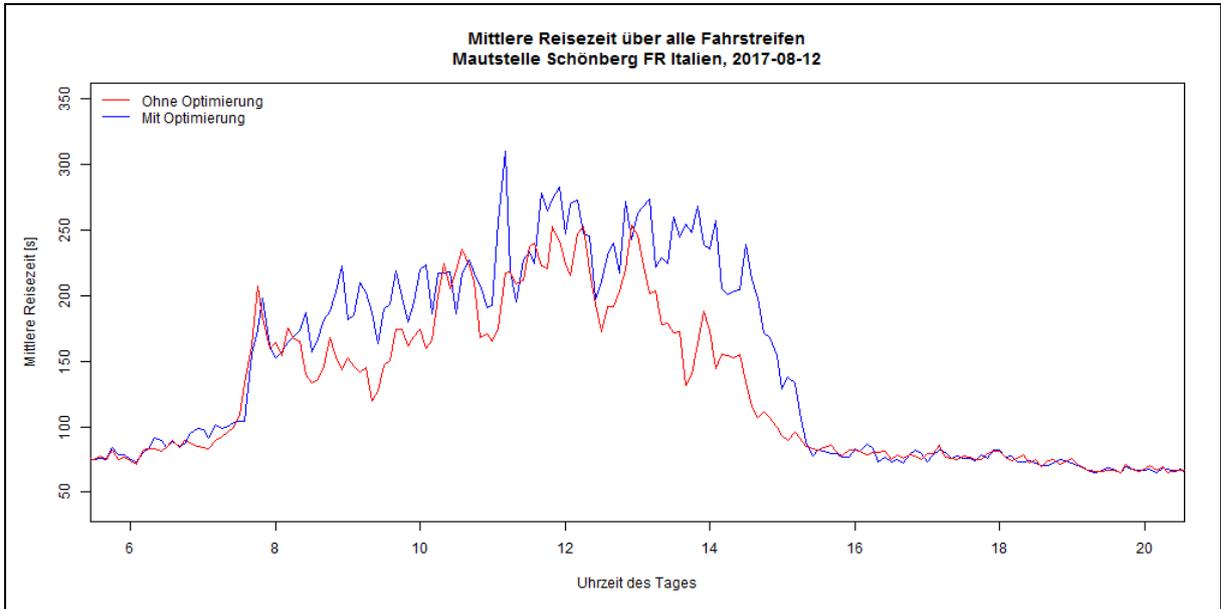


SAMSTAG 12.08.2017

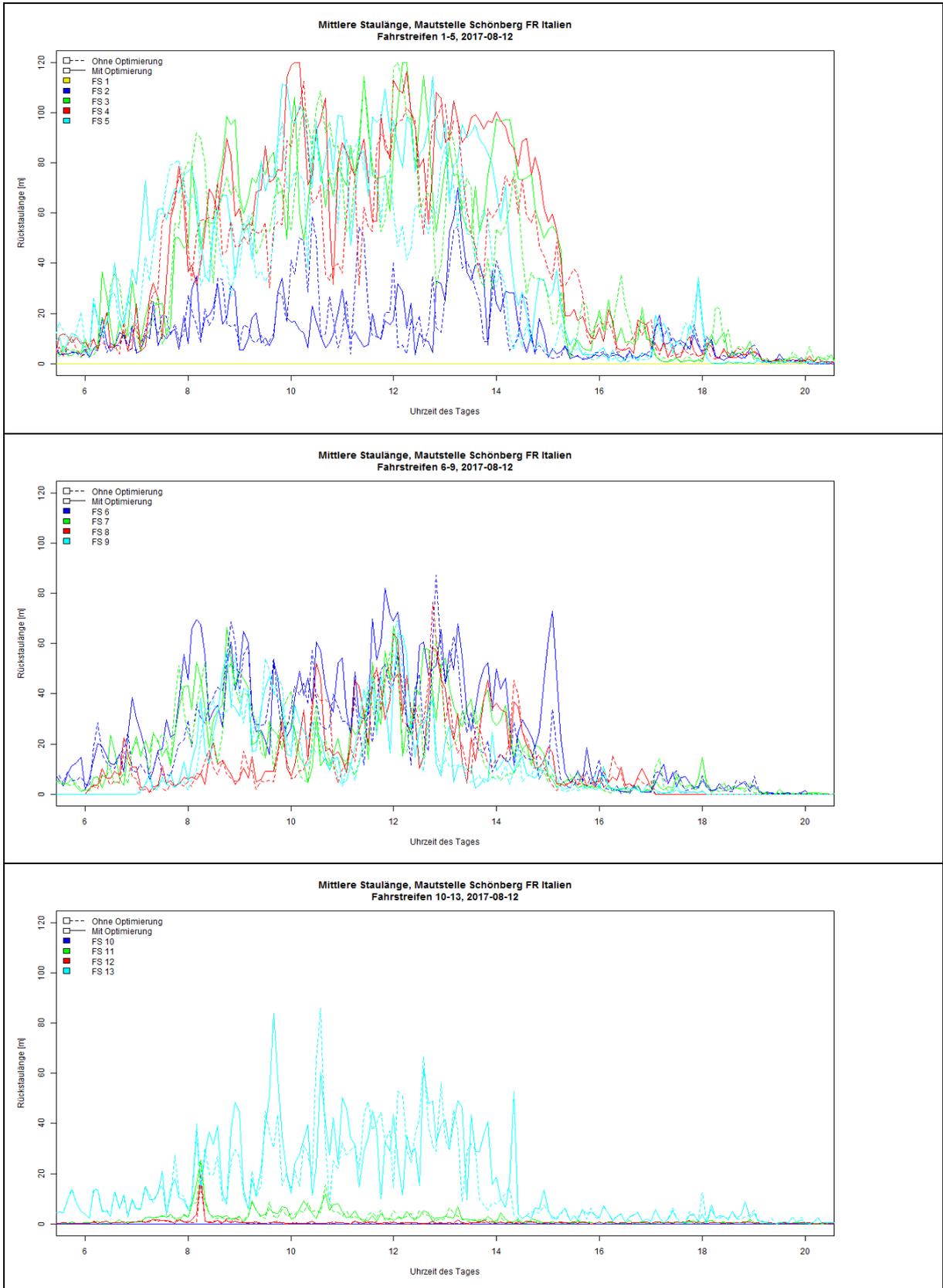
Verkehrsbelastung

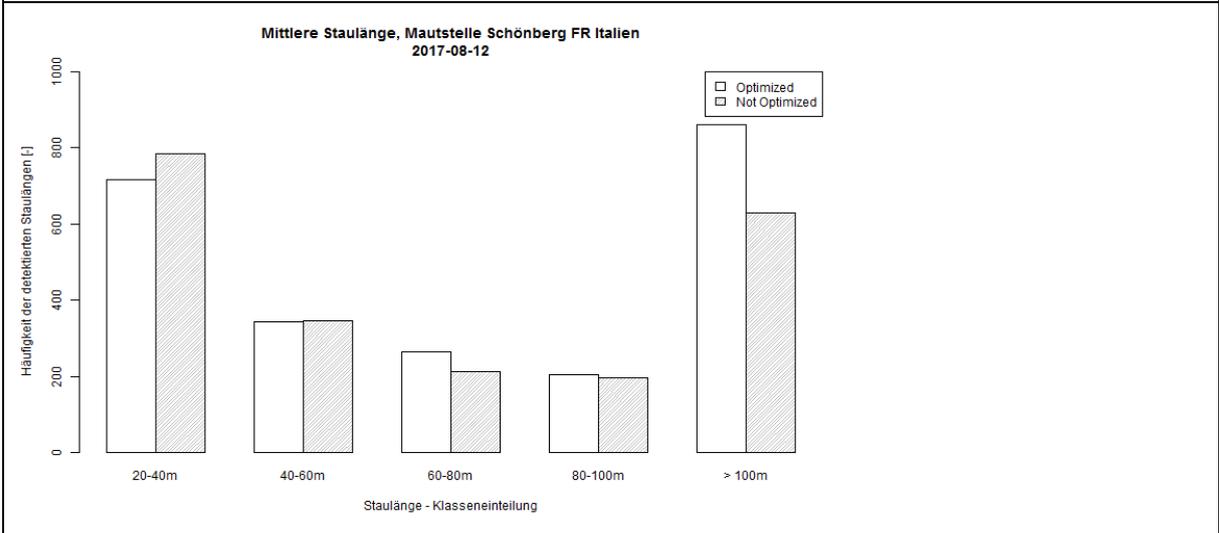
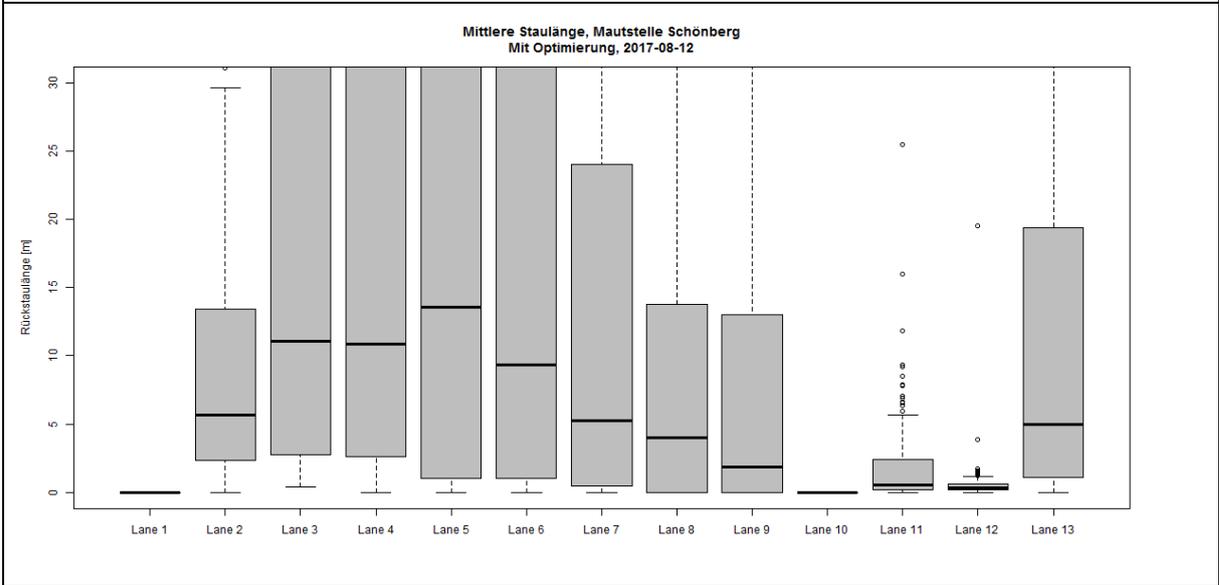
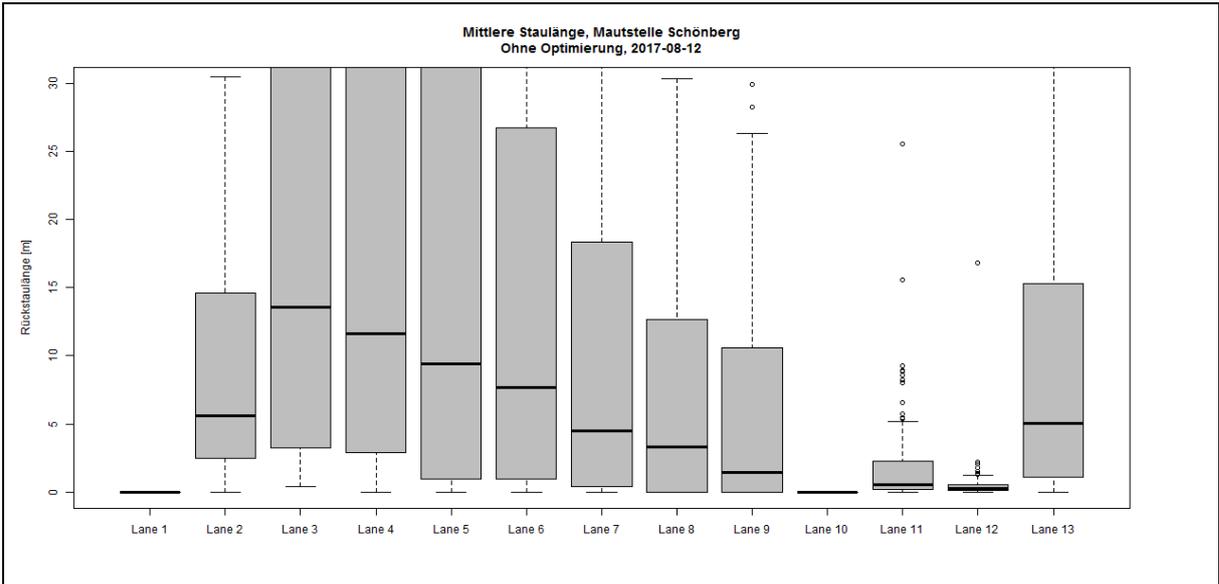


Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



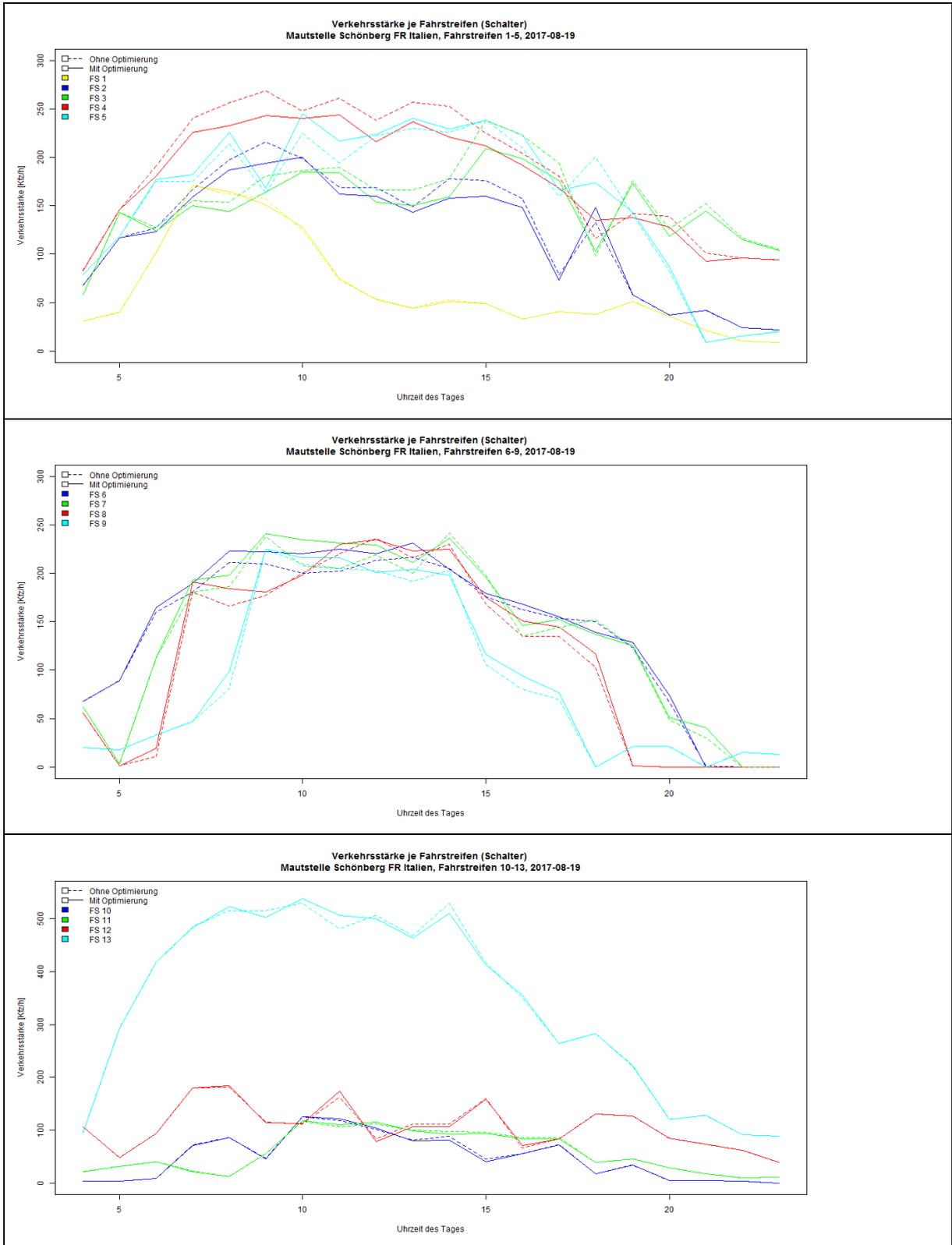
Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)



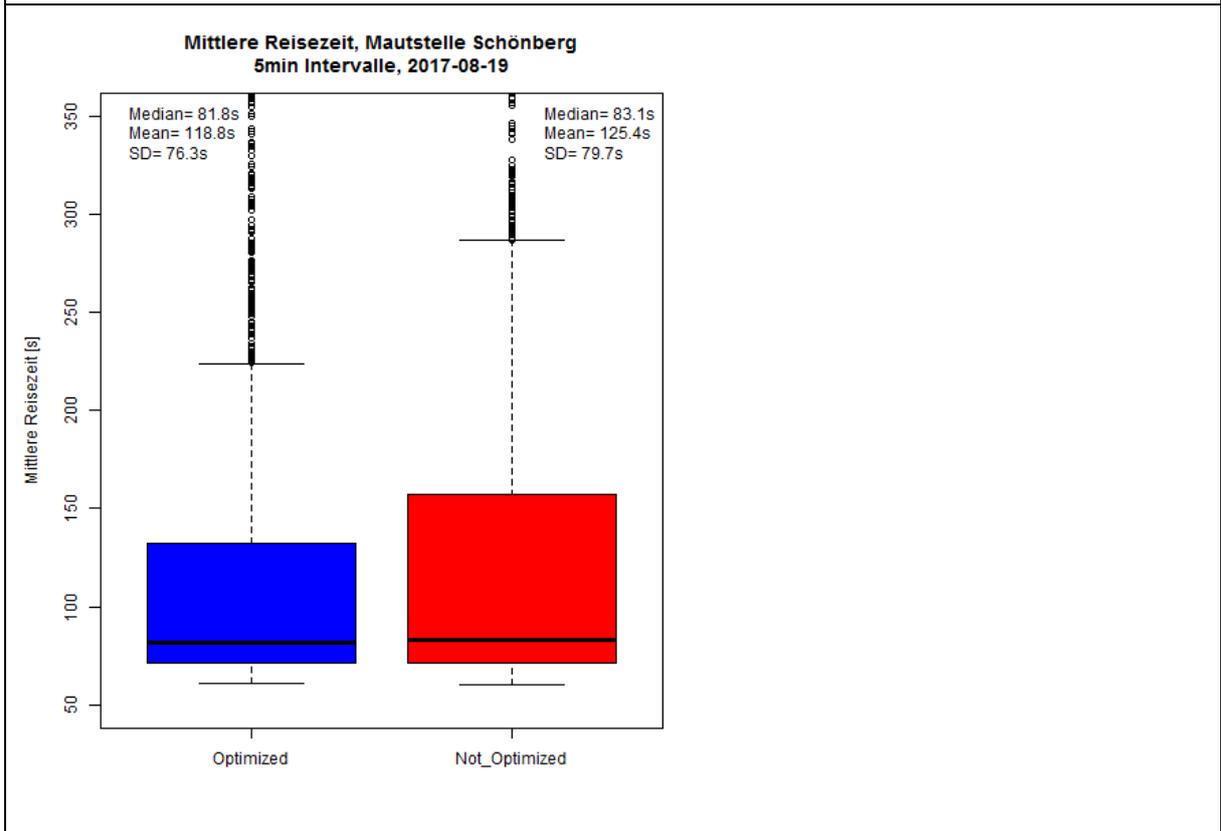
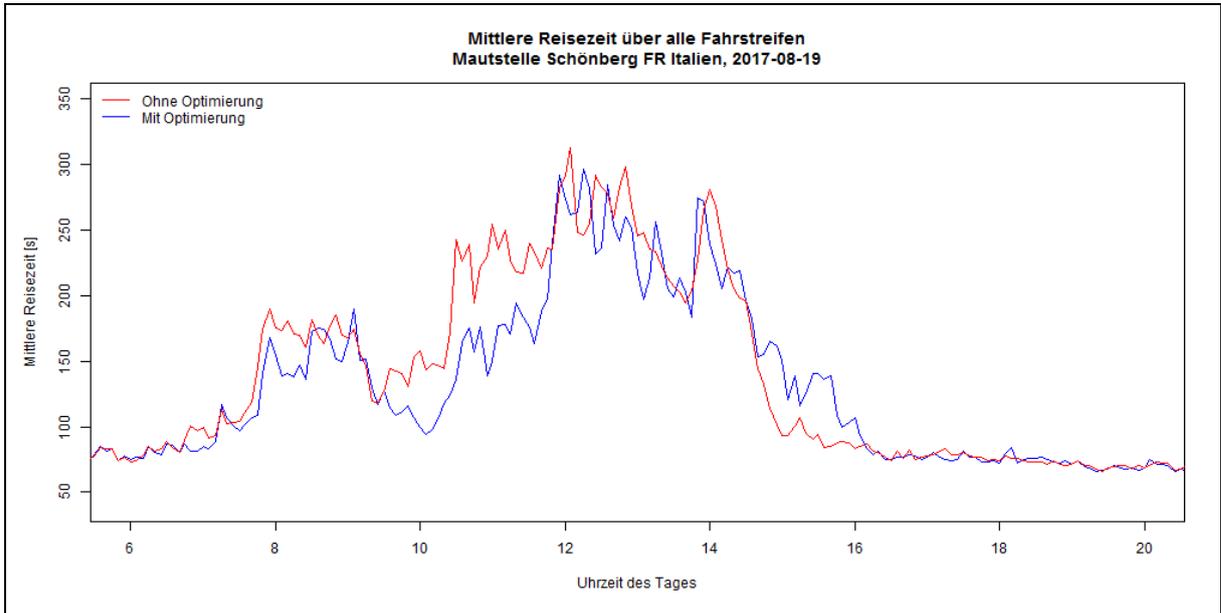


SAMSTAG 19.08.2017

Verkehrsbelastung



Mittlere Reisezeit zum Passieren der Mautstelle



Rückstaulängen je Fahrstreifen (FS)

