



---

## Wo entsteht der Nutzen der Erreichbarkeit?

Bence Tasnády

**Masterarbeit**  
**Studiengang Bauingenieurwissenschaften**

**Juni 2009**

**IVT** *Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme*  
*Institute for Transport Planning and Systems*

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

## Dank

Für die Unterstützung während der Durchführung meiner Masterarbeit möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken:

- Professor Kay W. Axhausen (IVT, ETH Zürich) für die fachliche Begleitung dieser Masterarbeit und für die – im buchstäblichen Sinne – fast immer offene Türe bei Fragen und Problemen,
- Christof Zöllig (IVT, ETH Zürich) für die engagierte Begleitung der Arbeit und insbesondere für die zahlreichen Diskussionen im Pausenraum, die mir halfen, diese Arbeit in einem grösseren Zusammenhang zu erkennen und so manch neue Gedanken und Ideen anregen,
- Dominik Tasnády, meinem Bruder, der mir bei vielen mathematischen Problemen und Fragestellungen geduldig geholfen und am Schluss den ganzen Bericht kritisch durchgelesen hat.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehen .....	2
2	Theorie .....	3
2.1	Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) .....	3
2.2	Vier-Stufen-Modell .....	8
2.3	Entscheidungstheorie .....	9
2.4	Messen von Massnahmenutzen .....	19
3	Modell .....	23
3.1	Netz .....	24
3.2	Population .....	27
3.3	Nutzenfunktionen .....	28
4	Implementierung .....	33
4.1	Erstellung der Eingabedaten (Ausgangszustand) .....	33
4.2	Modellaufbau .....	35
4.3	Simulationsablauf .....	37
4.4	Konfiguration .....	40
5	Parametrisierung .....	42
5.1	Netz und Population .....	43
5.2	Verbindungswahl .....	48
5.3	Wohnortwahl .....	49
5.4	Zeitwahl .....	50
5.5	Gewichtung .....	51
5.6	Überprüfung der Elastizitäten .....	53
5.7	Ergebnis .....	55

6	Simulation .....	56
6.1	Referenzfall .....	56
6.2	Entscheidungsmechanismen .....	58
6.3	Szenarien .....	63
6.4	Stabilität .....	78
7	Diskussion.....	81
7.1	Probleme bei der Datenanalyse.....	81
7.2	Einfluss des Einkommens .....	84
7.3	Einfluss des Entscheidungskriteriums.....	89
7.4	Einfluss der Freiheitsgrade .....	90
7.5	Vergleich Nutzenberechnung KNA und Logsum.....	94
7.6	Schlussfolgerungen.....	102
8	Ausblick.....	106
9	Literatur.....	107
10	Glossar.....	110
	Anhänge.....	A-1
	A1 Kosten-Nutzen-Analysen (PSL und MAX) .....	A-1
	A2 Streckenauslastungen.....	A-7

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Parameter der BPR-Funktion .....	26
Tabelle 2	Programmkonfiguration .....	41
Tabelle 3	Strecken im Netz .....	45
Tabelle 4	Einkommensklassen .....	48
Tabelle 5	Parameter für Standortwahl .....	52
Tabelle 6	Elastizitäten .....	54
Tabelle 7	Ergebnis der Parametrisierung.....	55
Tabelle 8	Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Referenzfall).....	57
Tabelle 9	Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (z-a-r) .....	60
Tabelle 10	Logsum und Nutzensumme .....	61
Tabelle 11	Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Massnahmenpaket A) ....	65
Tabelle 12	Veränderung der OD-Matrix (Massnahmenpaket A).....	66
Tabelle 13	Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (A MNL) .....	68
Tabelle 14	Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Massnahmenpaket B) ....	70
Tabelle 15	Veränderung der OD-Matrix (Massnahmenpaket B).....	70
Tabelle 16	Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (B MNL) .....	73
Tabelle 17	Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Massnahmenpaket C) ....	75
Tabelle 18	Veränderung der OD-Matrix (Massnahmenpaket C).....	75
Tabelle 19	Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (C MNL) .....	78
Tabelle 20	Simulationsdauern.....	79
Tabelle 21	Variationskoeffizienten der Nutzensumme und des Logsums (MNL) .....	80
Tabelle 22	Einfluss des Einkommens auf die Wohnortwahl .....	86

Tabelle 23 Mittelwert und Standardabweichung des Einkommens in den Wohnorten nach Massnahmenpaketen (MNL) .....	87
Tabelle 24 Nutzenanteile nach Einkommensklassen (Massnahmenpaket A) .....	88
Tabelle 25 Reihenfolge der Szenarien .....	92
Tabelle 26 Fehler in der Nutzenberechnung .....	93
Tabelle 27 Übersicht der Monetarisierungen (ohne ext. Kosten) .....	96
Tabelle 28 Logsum–KNA-Verhältnis .....	97
Tabelle 29 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (A PSL) .....	A-1
Tabelle 30 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (A MAX) .....	A-2
Tabelle 31 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (B PSL) .....	A-3
Tabelle 32 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (B MAX) .....	A-4
Tabelle 33 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (C PSL) .....	A-5
Tabelle 34 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (C MAX) .....	A-6

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Path Size Logit Model .....	15
Abbildung 2 Konsumentenrente .....	20
Abbildung 3 Mietpreis als Funktion der Auslastung .....	29
Abbildung 4 Grober Programmablauf .....	37
Abbildung 5 Schematisches Netz .....	43
Abbildung 6 Geglättete Verteilung der Äquivalenzeinkommen 2004 .....	46
Abbildung 7 Netzbeispiel zum Abwandern auf schlechtere Alternativen .....	62
Abbildung 8 Schematisches Netz (Massnahmenpaket A) .....	64

Abbildung 9	Schematisches Netz (Massnahmenpaket B) .....	69
Abbildung 10	Schematisches Netz (Massnahmenpaket C) .....	74
Abbildung 11	Fehler infolge Diskretisierung.....	82
Abbildung 12	Nutzenzusammensetzung für die Zielwahl .....	84
Abbildung 13	Streckenauslastungen Referenzfall (z-a-r).....	A-7
Abbildung 14	Streckenauslastungen Massnahmenpaket A (r) .....	A-10
Abbildung 15	Streckenauslastungen Massnahmenpaket A (a-r).....	A-14
Abbildung 16	Streckenauslastungen Massnahmenpaket A (z-a-r).....	A-18
Abbildung 17	Streckenauslastungen Massnahmenpaket B (r) .....	A-22
Abbildung 18	Streckenauslastungen Massnahmenpaket B (a-r).....	A-26
Abbildung 19	Streckenauslastungen Massnahmenpaket B (z-a-r).....	A-30
Abbildung 20	Streckenauslastungen Massnahmenpaket C (r).....	A-34
Abbildung 21	Streckenauslastungen Massnahmenpaket C (a-r).....	A-38
Abbildung 22	Streckenauslastungen Massnahmenpaket C (z-a-r).....	A-42



## Wo entsteht der Nutzen der Erreichbarkeit?

Bence Tasnády  
Ormisstrasse 123  
8706 Meilen  
btasnady@ethz.ch

Juni 2009

### Kurzfassung

Es hat sich gezeigt, dass die Erfassung der verkehrlichen Nutzen eines Verkehrssystems durch die Routenwahl alleine zu kurz greift, deswegen müsste ein Verkehrsmodell auch die Flächen-nutzung sowie die Wahl der Abfahrtszeit beinhalten.

In dieser Arbeit wird ein dynamisches Verkehrsmodell (agenten-basierte Mikrosimulation) programmiert, das die drei Freiheitsgrade Verbindung, Zeit und Ziel illustrieren kann. Anschliessend wird das Modell mit Hilfe der Schweizer Elastizitäten parametrisiert. Mit der Simulation von verschiedenen Szenarien bei verschiedenen Freiheitsgradkonfigurationen wird eruiert, wie gross der Fehler bei der Nutzenbewertung gemäss KNA ist, wenn im Verkehrsmodell bestimmte Wahldimensionen nicht berücksichtigt werden. Die Auswertung ergibt, dass die Nutzen dabei beträchtlich unterschätzt werden können, die Reihenfolge der Szenarien jedoch gleich bleibt.

Der Logsum als Bewertungsmass von Nutzenveränderungen wird der KNA-Methode gegenübergestellt und als konsistenteres und einfacher zu berechnendes Mass befunden.

### Schlagworte

Verkehrsmodellierung; Entscheidungsmodelle; Kosten-Nutzen-Analyse; Logsum; Routenwahl; Zeitwahl; Zielwahl, Nutzenbestimmung

### Zitierungsvorschlag

Tasnády, Bence (2009) Wo entsteht der Nutzen der Erreichbarkeit?, *Masterarbeit*, IVT ETH Zürich, Zürich





# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Verkehrsinfrastrukturprojekte werden meistens von der öffentlichen Hand finanziert und stehen somit unter einem Rechtfertigungsdruck gegenüber der Öffentlichkeit, auch in Hinblick auf Nachhaltigkeit oder induzierten Verkehr<sup>1</sup>. Es gilt dabei, möglichst viele Personen mit den neuen Bauwerken zu begünstigen, während die Kosten so niedrig wie möglich gehalten werden sollen. Es ist ein stetes Abwägen von Kosten und Nutzen. Um die Auswirkungen einer Infrastrukturmassnahme beurteilen zu können, wurde die Methode der Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) geschaffen, die in der Schweizer Norm SN 641 820 beschrieben ist und die in der Praxis das gängigste Beurteilungsmass darstellt. Sie soll es ermöglichen, bei mehreren möglichen Projekten, dasjenige herauszukristallisieren, welches das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist und somit gebaut werden soll. Dabei basiert die KNA auf der Annahme, dass sämtliche Auswirkungen einer Massnahme in monetären Grössen ausgedrückt werden können. Ein wesentlicher Anteil an den Gesamtnutzen gemäss der KNA wird seit jeher bei den Zeitersparnissen (*travel time savings*) vermutet. Mackie, Jara-Díaz et al. (2001) z.B. haben sich mit der Problematik der Bewertung von eingesparter Zeit beschäftigt und aufgezeigt, inwiefern sich gesparte Zeit überhaupt monetarisieren lässt. Dabei spielt es nicht nur eine Rolle, dass mit kürzeren Arbeitswegen mehr Zeit zur Wertschöpfung am Arbeitsplatz bleibt, sondern mit verkürzten Reisezeiten sind auch Geldersparnisse bei den Benzinkosten verbunden. Metz (2008) hält aber fest, dass das Zeitbudget einer Person in den letzten Jahrzehnten konstant bei etwa einer Stunde pro Tag geblieben ist und fragt sich, wo diese Zeitersparnisse, durch Infrastrukturmassnahmen geschaffen, geblieben sind. Dies lässt vermuten, dass der Nutzen nicht primär in der Zeiteinsparung, sondern in der zusätzlichen Erreichbarkeit liegt: mit neuen schnelleren Strassen sind weitere Ortschaften in gleicher Zeit erreichbar, womit die Auswahl an möglichen Wohn- und Arbeitsorten steigt. Weiter nimmt auch die Konkurrenz zwischen Supermärkten zu, da die Kunden auch weitere besuchen, wenn diese günstigere Angebote haben. Diese Überlegungen legen nahe, dass die Erfassung der verkehrlichen Nutzen eines Verkehrssystems durch die Routenwahl alleine zu kurz greift. Neben der Wahl der Route<sup>2</sup> sind auch die Wahl des Wohnorts oder die Wahl der Abfahrtszeit massgebende Kompo-

---

<sup>1</sup> Verkehr, der durch Kapazitätserhöhung eines Systems entsteht

<sup>2</sup> Die Routenwahl beinhaltet gleichzeitig auch die Verkehrsmittelwahl und wird daher in dieser Arbeit im Folgenden als Verbindungswahl bezeichnet.

nenen, die den Nutzen eines Verkehrssystems beeinflussen, die jedoch bei der gewöhnlichen KNA nicht berücksichtigt werden. Doch müssen auch diese Faktoren in eine ganzheitliche Beurteilung einfließen, um untersuchen zu können, wo der Nutzen der Erreichbarkeit entsteht, auf welche Weise die Nutzen aus der Reisezeitverkürzung (schnellere Verbindungen) in andere Nutzen umgewandelt werden, wie zum Beispiel in bessere Abfahrtszeiten, in besseren Abgleich zwischen räumlicher Nachfrage und dem Angebot oder in höhere Bodenwerte.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehen

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein dynamisches Verkehrsmodell entwickelt werden, das ein abstraktes Beispiel berechnen kann. Es soll dabei einfach genug gehalten werden, doch gerade komplex genug sein, um folgende Freiheitsgrade zu ermöglichen:

- Wahl der Verbindung (Route und Verkehrsmittel)
- Wahl der Abfahrtszeit
- Wahl des Wohnortes

Das Verkehrsmodell wird mit der Programmiersprache *Python* implementiert. Das Modell wird auf die bekannten Schweizer Elastizitäten geeicht, sodass das Verhalten der Agenten im Modell demjenigen der Schweizer Bevölkerung entspricht. Die Modellschätzung wird dabei nicht selbst vorgenommen, sondern es werden Parameter aus der Literatur verwendet. Es werden verschiedene Massnahmen an einem zu definierenden Netz vorgenommen und ausgewertet. Dabei werden verschiedene Entscheidungsmechanismen miteinander verglichen und die Stabilität des gefundenen Gleichgewichts untersucht. Die Massnahmennutzen werden einerseits mit einer KNA, andererseits mit dem Logsum beurteilt und diese beiden Beurteilungskriterien miteinander verglichen. Dabei werden die Einflüsse der Freiheitsgrade beobachtet.

Mit Hilfe des erstellten Verkehrsmodells sollen insbesondere die folgenden Fragestellungen beantwortet werden können:

- Entsteht der Nutzen der Erreichbarkeit tatsächlich vor allem bei den Reisezeitverkürzungen? Wie gross ist der Fehler, der gemacht wird, wenn bei der KNA nur die Routenwahl berücksichtigt wird, ohne Zeit- und Ziel ebenfalls mit einfließen zu lassen?
- Was wären die Vorteile eines anderen Beurteilungsmasses wie z.B. des Logsums gegenüber der KNA? Wo liegen die Nachteile?
- Wie gross ist der Einfluss des Entscheidungsmodells auf die Bewertung einer Massnahme?

## 2 Theorie

### 2.1 Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)

Die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) ist eine Methode, die es erlaubt, die Nutzen eines Verkehrsinfrastrukturprojekts seinen Kosten gegenüberzustellen. Dabei wird von einem Mengengerüst ausgegangen, das beschreibt, wie sich der Verkehr auf das zu untersuchende Netz verteilt. Beim Vorhandensein von mehreren Varianten kann auf diese Weise das beste Projekt ausgewählt werden. Die Norm SN 641 820 (2006) regelt, wie die Kosten und Nutzen einer Infrastrukturmassnahme im Strassenverkehr zu bestimmen und beurteilen sind. Es wird immer ein Referenzfall mit einem Projektfall verglichen. Absolute Nutzen eines Projektes können nicht gemessen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die KNA sehr vereinfacht. Sie soll an dieser Stelle nicht in ihrer allgemeinen Form vorgestellt werden (dazu sei auf die entsprechende Norm verwiesen), sondern in ihrer vereinfachten Form, wie sie in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde. Das Vorgehen wird in den nächsten Kapiteln erläutert.

#### ***Projektdefinition***

In der Projektdefinition wird bestimmt, was zu bewerten ist. Es werden das Projekt und die Varianten bestimmt. Hierbei handelt es sich um die im folgenden "Massnahmenpaket" oder "Szenarien" genannten Veränderungen am ursprünglichen Netz (Grundfall oder Referenzfall). Die räumliche Abgrenzung ist durch die Wahl des Netzes bereits gegeben, auf eine zeitliche Abgrenzung wird wegen der abstrakten Natur des Beispiels verzichtet, ebenso auf die Rahmenbedingungen, die zukünftige Entwicklungen der Bevölkerung, Treibstoffpreise, etc. berücksichtigen würde.

#### ***Berücksichtigte Indikatoren***

Im Indikatorensystem sind alle monetarisierbaren Effekte zu berücksichtigen. Unter Kosten versteht man den Ressourcenverbrauch des Betreibers (wobei unter Umständen auch Gewinne entstehen können, die als negative Kosten in die Analyse einfließen), unter Nutzen die Ressourcengewinne der Benutzer und der Allgemeinheit (wobei auch hier negative Nutzen möglich sind). Für die KNA in dieser Arbeit werden lediglich folgende Indikatoren berücksichtigt:

- Betriebskosten der Fahrzeuge (aus dem Verkehrsmodell: Distanzen und Anzahl Fahrten je Relation)
- Reisezeitveränderungen (aus dem Verkehrsmodell: Reisezeit und Anzahl Personenfahrten je Relation)
- Nettonutzen des Mehrverkehrs (aus dem Verkehrsmodell: Distanzen und Anzahl Fahrzeugfahrten sowie Reisezeit und Anzahl Personenfahrten je Relation)
- Einnahmen aus Treibstoffsteuern und Maut im Mehrverkehr (aus dem Verkehrsmodell: Distanzen und Anzahl Fahrzeugfahrten je Relation)
- Veränderung der öV-Einnahmen (aus dem Verkehrsmodell: Anzahl öV-Benützer)
- Unfälle (aus dem Verkehrsmodell: Veränderung der Fahrzeugkilometer im ganzen Netz pro Autobahn und Hauptstrasse)
- Luftverschmutzung (aus dem Verkehrsmodell: Veränderung der Fahrzeugkilometer im ganzen Netz)
- Klima (aus dem Verkehrsmodell: Veränderung der Fahrzeugkilometer im ganzen Netz)

Auf die Eruiierung der Baukosten wird verzichtet, da es sich um ein abstraktes Beispiel handelt. Auf eine Teilbilanzierung (z.B. für die Frage, in welchem Teil des Untersuchungsgebietes welche Kosten und Nutzen entstehen) wird ebenfalls verzichtet.

### ***Erfassung der Auswirkungen (Mengengerüst)***

Für die Erfassung der Auswirkungen werden die Daten aus den Simulationen verwendet. Dazu sollen gemäss SN 641 820 (2006) zwei Arten von Verkehr unterschieden werden:

- Stammverkehr: Ist derjenige Verkehr, der vom Projekt nicht verändert wird, d.h. die Verkehrsmenge, die sowohl mit als auch ohne Projekt von i nach j fährt.
- Mehrverkehr: Ist der durch das Projekt ausgelöste Mehrverkehr, der zurückzuführen ist auf ein Umsteigen von anderen Verkehrsträgern oder auf eine veränderte Zielwahl. Neuverkehr wird in diesem Modell nicht modelliert<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> In der Realität wäre durch die Erreichbarkeitserhöhung Neuverkehr zu erwarten, was als induzierter Verkehr bezeichnet wird. In Weis und Axhausen (2009) wurden Nachfrageelastizitäten für Neuverkehr infolge Erreichbarkeitsverbesserung bestimmt. Da der Binnenverkehr in diesem Modell von der KNA nicht erfasst wird, kann der Verkehr, der sich durch Infrastrukturmassnahmen auf externe Beziehungen verlagert, ebenfalls als induzierter Verkehr betrachtet werden.

Da im Modell jeweils mehrere Verbindungen von  $i$  nach  $j$  gewählt werden, werden die Reisezeiten und -distanzen gemittelt. Auf eine Einteilung in Fahrzeugkategorien, wie in der Norm verlangt, wird verzichtet, da davon ausgegangen wird, dass alle Agenten in die gleiche Kategorie gehören.

Die Indikatoren werden wie folgt bestimmt:

- Die Veränderung der Betriebskosten im Stammverkehr errechnet sich aus der Veränderung der Fahrzeugkilometer ( $\Delta Fzkm$ ) multipliziert mit den Kosten pro Fahrzeugkilometer. Es wird hierbei nur der IV betrachtet.

$$\Delta Fzkm = \sum_n \sum_i \sum_j F_{i,j,n} \Delta d_{i,j}$$

mit  $F_{i,j,n} = \min(F_{i,j,n}^0, F_{i,j,n}^P)$

$F_{i,j,n}^0, F_{i,j,n}^P =$  Anzahl Fahrten auf der Relation von  $i$  nach  $j$ <sup>4</sup>

$\Delta d_{i,j} =$  Veränderung der Distanz

- Die Reisezeitgewinne (RG) des Stammverkehrs (Verkehr, der vom Projekt nicht verändert wird) werden wie folgt berechnet (IV und öV):

$$RG = \sum_n \sum_i \sum_j F_{i,j,n} \Delta t_{i,j,n}$$

mit  $F_{i,j,n} = \min(F_{i,j,n}^0, F_{i,j,n}^P)$

$F_{i,j,n}^0, F_{i,j,n}^P =$  Anzahl Fahrten auf der Relation von  $i$  nach  $j$

$\Delta t_{i,j,n} =$  Reisezeitveränderung im Vergleich zum Referenzfall

auf der Relation von  $i$  nach  $j$

- Der Nettonutzen des Mehrverkehrs (NNM) berechnet sich wie folgt (die Deltas bezeichnen jeweils die Differenz zwischen Projektvariante und Referenzfall):

$$NNM = 0.5 \cdot \sum_n \sum_i \sum_j |\Delta F_{i,j,n}| \Delta BK_{i,j,n} + 0.5 \cdot \sum_n \sum_i \sum_j |\Delta F_{i,j,n}| \Delta ZK_{i,j,n}$$

mit  $|\Delta F_{i,j,n}| =$  Abs. Differenz der Anzahl Fahrten auf der Relation von  $i$  nach  $j$

$\Delta BK_{i,j,n} =$  Veränderung der Betriebskosten des Fahrzeugs (nur IV)

$\Delta ZK_{i,j,n} =$  Veränderung der Reisezeit (IV und öV)

- Die zusätzlichen Einnahmen (ZE) aus Treibstoffsteuern und Maut im Mehrverkehr berechnen sich wie folgt (nur IV):

$$ZE = \sum_n TSM_n \sum_i \sum_j \Delta F_{i,j,n} d_{i,j}^P$$

mit  $TSM_n =$  Einnahmen aus Treibstoffsteuern und Maut pro Kilometer

---

<sup>4</sup> Der Index  $0$  steht für den Referenzfall, der Index  $P$  für den Projektfall.

$\Delta F_{i,j,n}$  = Zunahme der Anzahl Fahrten von i nach j

$d_{i,j}^P$  = Distanz (in km) in der Projektvariante von i nach j

- **Unfälle**  
Mittels Kennwerten aus SN 641 824 (2009) und der Differenz der Fahrzeugkilometer werden die zusätzlichen Nutzen berechnet. Für den Streckentyp "Autobahn" und "Hauptstrasse" werden unterschiedliche Kennwerte verwendet.
- **Luftverschmutzung**  
Die Norm SN 641 828 (2009) verlangt eine Differenzierung zwischen bebautem und unbebautem Gebiet für die Luftverschmutzung. Da in diesem abstrakten Beispiel diese Daten nicht zur Verfügung stehen wird der Einfachheit halber davon ausgegangen, dass die Veränderung der Fahrzeugkilometer je zur Hälfte in unbebautem und zur Hälfte in bebautem Gebiet stattfindet. Diese Veränderungen der Fahrzeugkilometer werden mit Emissionsfaktoren multipliziert. Die Emissionsfaktoren sind für PM<sub>10</sub> 0.05 g/Fzkm, für NO<sub>x</sub> 0.32 g/Fzkm und für Zink 0.0014 g/Fzkm.
- **Klima**  
Analog zum Vorgehen bei der Luftverschmutzung wird die Veränderung der Fahrzeugkilometer mit Emissionsfaktoren multipliziert. Auf eine Unterteilung in unbebautes und bebautes Gebiet kann verständlicherweise verzichtet werden. Der Emissionsfaktor für die CO<sub>2</sub>-Äquivalente ist 209.1 g/Fzkm.

### **Bewertung der Auswirkungen (Wertgerüst)**

Aus dem zuvor bestimmten Mengengerüst wird nun das Wertgerüst berechnet, also die Mengen monetarisiert.

- Die Reisezeitveränderungen werden für alle Agenten mit dem gleichen Zeitkostenansatz bewertet. Er beträgt für den Pendlerverkehr nach SN 641 822 (2007) im Schnitt 17.63 CHF/h. Da er für den öV (17.58 CHF/h) und IV (17.68 CHF/h) praktisch identisch ist, wird mit dem Mittelwert der beiden gerechnet.
- Als Betriebskosten der Fahrzeuge gelten die variablen Kosten (fahrleistungsabhängige Abschreibung, Reifen, Öl, Wartung, Reparaturen und Treibstoffkosten, ohne Treibstoffsteuern) und werden gemäss SN 641 827 (2008) berechnet. Der Ansatz beträgt 0.1317 CHF/km. Zu diesen Grundkosten werden die Kosten aus zusätzlichem Benzinverbrauch addiert. Der Einfachheit halber wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge im Netz einen Benzinmotor haben. Es wird der Mittelwert von Benzinverbrauch in g pro km auf Autobahnen und übrigen Strassen gewählt: 54.075 g/km. Mit der Dichte von Benzin (742 g/l) wird der Benzinverbrauch in Liter/km berechnet. Dieser wird für den Mehrverkehr mit dem Benzinpreis von 1.55 CHF/Liter multipliziert und ergibt 0.113 CHF/km. Für den Stammverkehr wird der Benzinver-

brauch in Liter/km mit 0.6819 CHF/Liter multipliziert statt mit 1.55 CHF/Liter und ergibt 0.050 CHF/km.

- Die Einnahmen aus Treibstoffsteuern und Maut pro Fahrzeugkilometer müssen nur für den Mehrverkehr bestimmt werden und betragen 0.063 CHF/km. Berechnet wird dieser Wert, indem der Benzinverbrauch in Liter/km mit den Benzinsteuern von 0.8681 CHF/Liter multipliziert wird.
- Die Differenz der öV-Benutzer wird mit dem im Modell verwendeten öV-Fahrpreis multipliziert.
- Die Unfallkostenraten betragen gemäss SN 641 824 (2009) auf der Autobahn 0.0589 CHF/Fzkm und auf der Hauptstrasse 0.4235 CHF/km.
- Für die Luftverschmutzung werden einerseits lokale Schäden von regionalen Schäden unterschieden, die lokalen Schäden werden weiter in bebautes und unbebautes Gebiet unterteilt. Die Kostensätze pro Tonne Schadstoff sind gemäss SN 641 828 (2009) für PM<sub>10</sub> bei den Gesundheitskosten in bebautem Gebiet 0.345 CHF/g, in unbebautem Gebiet 0.046 CHF/g und für regionale Schäden 0.26 CHF/g. Bei den Gebäudeschädenkosten für PM<sub>10</sub> sind die Ansätze für bebautes Gebiet 0.084 CHF/g, für unbebautes Gebiet 0.011 CHF/g und für regionale Schäden 0.021 CHF/g. Die Kostensätze für NO<sub>x</sub> betragen 0.0031 CHF/g und für Zink 0.919 CHF/g.
- Der Kostensatz für die CO<sub>2</sub>-Emission ist 0.00004 CHF/g.

### **Berechnung der Wirtschaftlichkeit**

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur die Reihenfolge der verschiedenen Massnahmen aufgrund der Nutzen gebildet. Auf eine abschliessende Wirtschaftlichkeitsprüfung wird wegen der theoretischen Natur des Beispiels verzichtet.

Das Wertgerüst der KNA (siehe z.B. Tabelle 13) ist wie folgt zu lesen: alle Werte sind jeweils Veränderungen zum Referenzfall. Dabei bedeuten positive Zahlen einen Nutzengewinn und negative Zahlen eine Nutzenverschlechterung gegenüber dem Referenzfall. Die bestimmten externen Kosten wurden mit einem negativen Vorzeichen versehen und sind jetzt vielmehr als externe Nutzen zu verstehen. Eine positive Zahl unter der Sparte *Unfälle* z.B. bedeutet einen erhöhten Nutzen dank weniger Unfälle.

## 2.2 Vier-Stufen-Modell

Um eine soeben erläuterte KNA durchführen zu können, muss ein Mengengerüst vorhanden sein, das die Verkehrsflüsse zwischen den Quellen und Senken beschreibt. Es gibt verschiedene Ansätze, ein Mengengerüst zu bestimmen. In der klassischen Verkehrsplanung werden Verkehrsflüsse nach dem Vier-Stufen-Modell bestimmt, das folgende vier Schritte umfasst:

- Erzeugung (*Trip generation*)  
Es wird mittels Kennzahlen bestimmt, wie viel Verkehr eine bestimmte Ortschaft erzeugt und wie viel sie anzieht. Das Ergebnis dieses Schrittes sind die Randsummen der OD-Matrix (Quell-Ziel-Matrix, engl. *origin-destination*)
- Verteilung (*Trip distribution*)  
Es wird in diesem Schritt mit Hilfe verschiedener Verfahren (z.B. Gravitationsmodell) die OD-Matrix berechnet. Dabei können die zuvor bestimmten Randsummen sowohl als harte, als auch als weiche Randbedingung angesehen werden.
- Aufteilung (*Modal Split*)  
In diesem Schritt wird bestimmt, wie sich die Verkehrsströme in der OD-Matrix auf die verschiedenen Verkehrsträger aufteilen.
- Umlegung (*Network assignment*)  
In diesem letzten Schritt wird der in den ersten drei Schritten bestimmte Verkehr auf das konkrete Verkehrsnetz aufgeteilt. In diesem Schritt wird ein Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage gesucht.

Dabei werden die vier Schritte sequentiell durchgeführt. Dieses Vorgehen bildet die Realität jedoch nur ungenügend ab, denn in Wirklichkeit wird die Wahl des Verkehrsmittels (*modal split*) nicht unabhängig von der Routenwahl (*network assignment*) getroffen. So kann für die eine Route der öffentliche Verkehr als attraktiver erscheinen, während für eine andere Route das eigene Fahrzeug das bevorzugte Fortbewegungsmittel darstellt. Deshalb muss zwischen den einzelnen Schritten rückgekoppelt werden, um dieses Phänomen zu berücksichtigen. Das führt zu sehr aufwendigen Verfahren, die in der Praxis selten angewandt werden (Vrtic (2003)).

Neben dem klassischen Vier-Stufen-Modell gibt es auch die Möglichkeit, das Mengengerüst basierend auf der Entscheidungstheorie mit Hilfe von Mikrosimulationen zu bestimmen. Für diese Arbeit wurde dieser Ansatz verfolgt und eine agenten-basierte Mikrosimulation (oder auch Multi-Agenten-Simulation) in der Programmiersprache *Python* programmiert. In einer Mikrosimulation werden im Gegensatz zur Makrosimulation auf detaillierter Ebene einzelne

Bestandteile des Systems modelliert. Aktive Komponenten des Systems werden dabei als Agenten bezeichnet, die eigene Ziele verfolgen und deren Verhalten einzeln modelliert werden kann.

Dabei wird bei der Simulation nicht nach dem Vier-Stufen-Modell vorgegangen, sondern einzelne Schritte werden in der Modellierung einer Entscheidung simultan statt sequentiell zusammengefasst. Da es sich in dem vorliegenden Beispiel ein fiktives Beispiel handelt, existieren dafür auch keine Kennzahlen für Verkehrserzeugung und -anziehung. Die Verkehrserzeugung wird daher nicht modelliert und der Anfangszustand des Systems wird vorgegeben. Die OD-Matrizen (vom Wohnort zum Arbeitsort und wieder zurück) werden zu Beginn festgesetzt und auf alle Knoten aufgeteilt. Da die Kanten im modellierten Netz verkehrsmittelgebunden sind (d.h. mit der Wahl der Kante wird zugleich das Verkehrsmittel gewählt), findet die Aufteilung und Umlegung in einem Schritt statt. Auf die Modellierung des Systems wird in Kapitel 3 näher eingegangen.

## 2.3 Entscheidungstheorie

Die Entscheidungs- und die Nutzentheorie beschäftigen sich mit der Modellierung des menschlichen Verhaltens. Die mathematischen Herleitungen in diesem Kapitel beruhen im Wesentlichen auf Ben-Akiva und Lerman (1985) und Ben-Akiva und Bierlaire (2003).

Simulationen dienen dem Zweck, die Realität so einfach wie möglich – und doch so genau wie erforderlich – abzubilden, um bestimmte Fragestellungen beantworten zu können. Sie sollen insbesondere zukünftige Entwicklungen möglichst genau voraussagen können. Damit werden verkehrliche Auswirkungen von Infrastrukturprojekten abschätzbar und deren wirtschaftliche Nutzen prognostizierbar. Dabei muss, um dieses Ziel zu erreichen, das menschliche Handeln und Verhalten mathematisch beschrieben werden können. Im Zusammenhang mit dieser Arbeit ist das menschliche Handeln in Bezug auf das Verkehrsverhalten zu untersuchen.

Modellierungen gehen immer von Annahmen aus. Die wichtigste Annahme bei der Modellierung menschlichen Verhaltens ist das Konzept des *homo oeconomicus*. Der *homo oeconomicus* ist ein Wirtschaftsmensch, "der mit gegebenen Mitteln den grösstmöglichen Erfolg zu erzielen oder einen vorgegebenen Erfolg mit möglichst geringen Mitteln zu erwirtschaften" sucht, wie er in Bathelt und Glückler (2002) definiert wird. Er zeichnet sich aus durch Rationalität, vollständige Information über die Entscheidungsmöglichkeiten sowie deren Konsequenzen und er maximiert dabei seinen eigenen Nutzen. Vor allem der Aspekt der vollständigen Information wird dem Konzept des *homo oeconomicus* als Kritikpunkt vorgeworfen.

Auch fehlt dem homo oeconomicus in vielen Modellen die Weitsicht, die evtl. kurzfristige Verluste erlauben würde, um langfristig Gewinne zu erzielen.

Um den homo oeconomicus in einer Modellwelt agieren und entscheiden zu lassen, muss er wissen, was seine Präferenzen sind und wie er diese umsetzen soll. Dabei lässt sich der Entscheidungsprozess vereinfachend in folgende vier Teilschritte unterteilen:

- Definition des Entscheidungsproblems
- Generierung der Alternativen
- Auswertung der Alternativen
- Wahl

Entscheidungsmodelle (*choice model*) beschreiben solche Entscheidungsprozesse mathematisch. Es wird dabei unterschieden, ob es sich um diskrete oder kontinuierliche Entscheidungen handelt. An dieser Stelle soll nur auf erstere Kategorie eingegangen werden. Von diskreten Entscheidungsmodellen (*discrete choice model*) spricht man, wenn folgende drei Bedingungen an den Alternativensatz (*choice set*) erfüllt sind:

- Der Alternativensatz muss vollständig sein, das heisst, er muss alle möglichen Alternativen beinhalten. Das führt dazu, dass auf jeden Fall eine Alternative aus dem Satz gewählt wird.
- Die Alternativen im Satz müssen sich gegenseitig ausschliessen, das heisst, die Wahl einer Alternative schliesst die Wahl anderer Alternativen vollständig aus. Das führt dazu, dass nur eine Alternative aus dem Satz gewählt wird.
- Der Alternativensatz muss eine begrenzte und abzählbare Anzahl an Alternativen beinhalten.

In einem Entscheidungsprozess sind folgende Komponenten zu berücksichtigen:

- Agent (*decision maker*): die Attribute des Agenten  $n$  werden zu einem Attributvektor  $s_n$  zusammengefasst. Mögliche Attribute sind z.B. sein Einkommen.
- Alternativen: aus einem Satz  $C$ , bestehend aus allen existierenden Alternativen (*universal set*), bilden diejenigen, die dem zu wählenden Agenten  $n$  zur Verfügung stehen den Alternativensatz  $C_n$  (*choice set*), mathematisch gesprochen  $C_n \subseteq C$ .
- Alternativattribute: die Attribute der Alternative  $j$  für den Agenten  $n$  werden im Vektor  $z_{nj}$  zusammengefasst.
- Entscheidungsregel (*decision rule*): sie bestimmt letztendlich, welche Alternative aus dem Alternativensatz  $C_n$  ausgewählt wird. Dazu werden im Folgenden verschiedene Modelle vorgestellt.

Ziel der diskreten Entscheidungsmodelle ist es, die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, mit der der Agent  $n$  die Alternative  $j$  aus dem Alternativensatz  $C_n$  auswählt:

$$P(j|C_n) = P[U_{nj} \geq U_{nk}, \forall k \in C_n, j \neq k]$$

### 2.3.1 Nutzentheorie

Um die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative berechnen zu können, muss deren Nutzen  $U_{nj}$  quantifiziert werden. Mit diesem Problem beschäftigt sich die Nutzentheorie.

Der Nutzen von Alternativen wird durch eine so genannte Nutzenfunktion mathematisch beschrieben. Beim *random utility approach* besteht die Nutzenfunktion dabei aus einer messbaren Komponente  $V_{nj}$  sowie einer Zufallskomponente  $\varepsilon_{nj}$  (ohne Zufallsterm spricht man von *constant utility approach*). Diese Zufallskomponente beinhaltet Einflüsse, die nicht gemessen werden können und berücksichtigt auch, dass die Agenten nicht über alle nötigen Informationen verfügen, um die Entscheidung zu treffen, die den Maximalnutzen bringt.

Die weiter oben beschriebenen Attributvektoren  $s_n$  und  $z_{nj}$  werden mit einer Funktion  $h$  zu einem gemeinsamen Attributvektor  $x_{nj}$  der Entscheidungssituation zusammengefasst:

$$x_{nj} = h(z_{nj}, s_n)$$

Es wird meistens angenommen, dass die Attribute  $x_{nj}$  linear mit einem Parameter-Vektor  $\beta$  mit der Nutzenfunktion verbunden sind (*linear-in-parameters*):

$$V_{nj} = \beta \cdot x_{nj} = \beta_1 \cdot x_{nj1} + \dots + \beta_H \cdot x_{njH}$$

Es ist dabei zu beachten, dass die Linearität in den Parametern  $\beta$  nicht gleichbedeutend mit der Linearität in den Attributen  $s_n$  und  $z_{nj}$  ist. Die Funktion  $h$  kann auch nichtlinear sein. Es wird ferner davon ausgegangen, dass die Parameter für die ganze Population  $N$  gleich sind.

Der oben beschriebene deterministische Teil und der Zufallsterm ergeben zusammen die Nutzenfunktion  $U_{nj}$ :

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj}$$

Auf die konkrete Formulierung der Nutzenfunktionen im vorliegenden Modell wird in Kapitel 3.3 eingegangen.

### 2.3.2 Entscheidungsmodelle

Entscheidungsmodelle stellen die Entscheidungsregel (letzter Schritt im Entscheidungsprozess) dar, sie bestimmen also, wie in Entscheidungssituationen entschieden wird. Es soll an dieser Stelle nicht auf alle in der Literatur vorkommenden Modelle vertieft eingegangen werden, sondern nur auf diejenige, die in dieser Arbeit verwendet werden.

#### **Maximaler Nutzen**

Der einfachste aller Ansätze ist derjenige, dass die Agenten die Alternative mit dem maximalen Nutzen wählen. Es gilt dabei für den Nutzen  $U_{nj}$  der gewählten Alternative  $j$

$$U_{nj} > U_{nk}, \quad \forall k \neq j, \quad k \in C_n$$

Wird dabei angenommen, dass die Nutzenfunktion vollständig bekannt ist, kann auf einen Störterm in Form eines Zufallsterms verzichtet werden. Auf diese Weise wird bei gleichen Randbedingungen immer gleich gewählt (*constant utility approach*). In der Realität aber wird die Nutzenfunktion immer mit Unsicherheiten behaftet sein. Daher wird immer ein Zufallsterm  $\varepsilon_{nj}$  zum deterministischen Teil der Nutzenfunktion addiert (*random utility approach*). In diesem Fall wählen die Agenten nicht immer die gleiche Alternative, da der Störterm die Maxima variiert.

Neben dem deterministischen Ansatz, die Alternative mit dem maximalen Nutzen zu wählen, gibt es stochastische Ansätze (*probabilistic choice theory*), die das menschliche Verhalten realistischer nachbilden sollen, indem Inkonsistenzen des Verhaltens (keine vollständige Information, variierende persönliche Präferenzen, Tageslaune, etc.) berücksichtigt werden.

#### **Multinomial Logit Model**

Das am häufigsten verwendete Entscheidungsmodell ist das Multinomial Logit Model (MNL) und geht davon aus, dass die Zufallsterme (bzw. Störterme) der Nutzenfunktion unabhängig voneinander und identisch (*independent and identically distributed*, kurz IID) gumbelverteilt sind. Diese Annahme der Gumbelverteilung ist zentral, da sie die Form der Auswahlwahrscheinlichkeit bestimmt, die im Folgenden hergeleitet wird.

Die Gumbelverteilung (mit Parametern  $\eta$ ,  $\mu$ ) besitzt unter anderem folgende Eigenschaften nach Maier und Weiss (1990):

- (1) Die Verteilungsfunktion ist  $F(\varepsilon) = e^{-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)}}$
- (2) Die Dichtefunktion ist  $f(\varepsilon) = \mu e^{-\mu(\varepsilon-\eta)} e^{-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)}}$

- (3) wenn  $\varepsilon$  gumbelverteilt ist mit Parametern  $(\eta, \mu)$  und  $V$  und  $\alpha > 0$  skalare Konstanten sind, dann ist  $\alpha\varepsilon + V$  gumbelverteilt mit Parametern  $(\alpha\eta+V, \mu/\alpha)$ .
- (4) wenn  $(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_J)$   $K$  unabhängig gumbelverteilte Zufallsvariablen sind mit Parametern  $(\eta_1, \mu_1), \dots, (\eta_K, \mu_K)$ , dann ist  $\max(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_K)$  gumbelverteilt mit Parametern  $\left(\frac{1}{\mu} \ln \sum_{k=1}^K e^{\mu\eta_k}, \mu\right)$ .
- (5) wenn  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  unabhängig gumbelverteilt sind mit Parametern  $(\eta_1, \mu_1)$  und  $(\eta_2, \mu_2)$ , dann ist  $\varepsilon^* = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$  logistisch verteilt mit folgender Verteilungsfunktion:

$$F(\varepsilon^*) = \frac{1}{1 + e^{\mu(\eta_1 - \eta_2 - \varepsilon^*)}}$$

In der folgenden Herleitung für die Auswahlwahrscheinlichkeit der Alternative  $j$  im Multinomial Logit Model wird für alle Störterme  $\eta = 0$  gesetzt. Wenn die Alternativen so geordnet werden, dass  $j = 1$ , dann gilt:

$$P_n(1) = P\left[V_{n1} + \varepsilon_{n1} \geq \max_{k=2 \dots K_n} (V_{nk} + \varepsilon_{nk})\right]$$

Es wird definiert

$$U_n^* = \max_{k=2 \dots K_n} (V_{nk} + \varepsilon_{nk}) \text{ mit den Parametern } \left(\frac{1}{\mu} \ln \sum_{j=2}^J e^{\mu V_{nj}}, \mu\right) \text{ (Eigenschaften 3 und 4)}$$

und kann umgeschrieben werden zu

$$U_n^* = V_n^* + \varepsilon_n^*$$

wobei

$$V_n^* = \frac{1}{\mu} \ln \sum_{k=2}^K e^{\mu V_{nk}} \text{ und } \varepsilon_n^*$$

gumbelverteilt sind mit den Parametern  $(0, \mu)$ .

Die ursprüngliche Formulierung wird somit zu

$$P_n(1) = P(V_{n1} + \varepsilon_{n1} \geq V_n^* + \varepsilon_n^*) = P((V_n^* + \varepsilon_n^*) - (V_{n1} + \varepsilon_{n1}) \leq 0)$$

und mit der Eigenschaft (5) zu

$$P_n(1) = \frac{1}{1 + e^{\mu(V_n^* - V_{n1})}} = \frac{e^{\mu V_{n1}}}{e^{\mu V_{n1}} + e^{\mu V_n^*}} = \frac{e^{\mu V_{n1}}}{e^{\mu V_{n1}} + e^{\sum_{k=2}^{K_n} \mu V_{nk}}} = \frac{e^{\mu V_{n1}}}{\sum_{k=1}^{K_n} e^{\mu V_{nk}}}$$

Somit beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass die Person n aus dem Alternativensatz  $C_n$  die Alternative j auswählt:

$$P(j|C_n) = \frac{e^{\mu V_{nj}}}{\sum_k e^{\mu V_{nk}}}$$

Dabei ist zu beachten, dass die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative nur von deren Nutzendifferenz zu anderen Alternativen abhängig ist (binärer Fall):

$$P(A|\{A,B\}) = \frac{e^{V_A}}{e^{V_A} + e^{V_B}} = \frac{1}{1 + e^{V_B - V_A}}$$

Dass dies zu verfälschten Ergebnissen führen kann, zeigt folgendes Beispiel: Alternative A weist eine Reisedauer von 5 Minuten auf, während Alternative B 10 Minuten dauert. Es ist eine viel höhere Wahrscheinlichkeit für Alternative A zu erwarten, da die Reisezeit nur die Hälfte der Alternative B beträgt. Werden die Reisedauern auf 100 und 105 Minuten erhöht, bleiben die Auswahlwahrscheinlichkeiten gleich, auch wenn nun etwa je 50% zu erwarten wäre, da dieser Unterschied von 5 Minuten relativ gesehen irrelevant scheint.

Ferner ist das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten zweier beliebiger Alternativen unabhängig vom Alternativensatz:

$$\frac{P(j|C_{n_1})}{P(k|C_{n_1})} = \frac{P(j|C_{n_2})}{P(k|C_{n_2})}$$

Oben stehende Aussage ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten zweier beliebiger Alternativen unabhängig von den Nutzen der anderen Alternativen und somit konstant ist:

$$\frac{P(j|C_n)}{P(k|C_n)} = \text{const. (in } n)$$

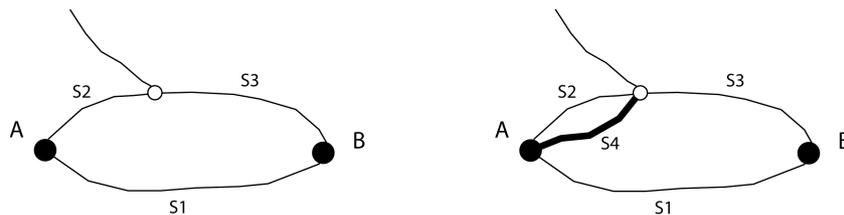
Die hier beschriebene Eigenschaft wird als Unabhängigkeit irrelevanter Alternativen (*independence of irrelevant alternatives*, kurz IIA) bezeichnet. Grund hierfür ist, dass die Zufallsterme unabhängig voneinander verteilt sind und somit keine Korrelationen zwischen Alternativen berücksichtigt werden können.

### Path Size Logit Model

Wie oben eingeführt, bedeutet die Unabhängigkeit irrelevanter Alternativen (IIA), dass das Verhältnis zweier Auswahlwahrscheinlichkeiten unabhängig vom Vorhandensein bzw. den Attributen von anderen Alternativen ist. Dass dies jedoch zu sehr verzerrten Entscheidungswahrscheinlichkeiten und schliesslich zu einer falschen Modellierung der Realität führt, soll folgendes Beispiel zeigen:

Es soll die Situation vor und nach dem Bau einer neuen Strasse miteinander verglichen werden. Vor dem Bau (siehe Abbildung 1, links) existieren zwei Verbindungen von A nach B: S1 (Alternative 1) und S2-S3 (Alternative 2). Unter Annahme von gleichen Nutzen der beiden Verbindungen liefert das Mal-Modell folgende Auswahlwahrscheinlichkeiten für die beiden Alternativen:  $P(1 | C_n) = 0.5$  und  $P(2 | C_n) = 0.5$ .

Abbildung 1 Path Size Logit Model



Nun wird neben S3 eine neue Strasse gebaut: S4 (dick eingezeichnet in Abbildung 1, rechts). Zu den bisherigen Alternativen 1 und 2 ist eine neue hinzugekommen: S4-S3 (Alternative 3). Das MNL-Modell liefert für die drei Alternativen nun folgende Wahrscheinlichkeiten (wiederum unter der Annahme von gleichen Nutzen für alle drei Varianten):  $P(1 | C_n) = 0.33$ ,  $P(2 | C_n) = 0.33$  und  $P(3 | C_n) = 0.33$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass die Verbindung S1 gewählt wird, hat sich gegenüber der Situation vor dem Bau der Strasse stark verringert. Dass diese starke Verringerung nicht unbedingt gerechtfertigt ist, wird ersichtlich, wenn man die Längen der Strecken S2 und S4 gegen Null tendieren lässt. Auf diese Weise ähneln sich Alternativen 2 und 3 immer mehr (bis sie im Grenzfall sogar identisch werden), doch die Wahrscheinlichkeiten für die Wahl einer Alternative ändern sich dadurch nicht. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass die Überlappung der Verbindungen zu berücksichtigen ist.

In der Literatur gibt es viele Ansätze, die die Ähnlichkeit von Alternativen modellieren, die im Folgenden nach Vrtic (2003) in ein paar Sätzen vorgestellt werden sollen, ohne auf mathematische Hintergründe einzugehen:

- *Nested Logit Model*  
Beim Nested Logit Model werden Gruppen gebildet, die aus ähnlichen Alternativen bestehen. Besteht zum Beispiel neben einer Strasse eine Bahnlinie, auf der zwei S-Bahnlinien verkehren, so sind sich die beiden S-Bahn-Linien sehr ähnlich, während die Wahl der Strasse eine komplett andere Alternative darstellt. In diesem Fall bildet die Strasse die eine Gruppe und die beiden S-Bahn-Linien zusammen die andere Gruppe. Während solche modalen Ähnlichkeiten einfach modellieren lassen, gestaltet sich die Modellierung der Routenwahl beim Nested Logit Model schwieriger.
- *Cross Nested Logit Model*  
Das Cross Nested Logit Model ist eine Erweiterung des einfachen Nested Logit Models und erlaubt, dass eine Alternative gleichzeitig zu mehreren Gruppen (Nestern) gehört.
- *C-Logit Model*  
Das C-Logit Model erweitert das Multinomial Logit Model um einen sogenannten Gemeinsamkeitsfaktor, der ein Mass dafür ist, wie sehr sich eine Route zwischen Quelle und Ziel anderen Routen zwischen Quelle und Ziel ähnelt.
- *Path Size Logit Model*  
Das Path Size Logit Model verwendet wie das C-Logit Model einen Faktor, der die Ähnlichkeit von verschiedenen Routen bewerten soll.

Für diese Arbeit wird der relativ einfache Ansatz des Path Size Logit Models verwendet. Dieser Ansatz berücksichtigt lediglich die Ähnlichkeit von Wegen, unabhängig vom verwendeten Verkehrsmittel und ist folglich eine starke Vereinfachung, die jedoch gerade wegen der Einfachheit in der Anwendung gerechtfertigt ist. Auf die Problematik der Ähnlichkeit in Bezug auf die Abfahrtszeitwahl wird in Kapitel 7.1.2 eingegangen.

Das Path Size Logit Model berücksichtigt die Tatsache von sich überlappenden Verbindungen, indem die Verbindungen mit dem sogenannten Path Size Faktor  $PS_n$  korrigiert werden. In Ramming (2002) wird das PS-Logit Modell wie folgt vorgeschlagen:

Die Wahrscheinlichkeit für die Wahl einer Alternative berechnet sich

$$P(j|C_n) = \frac{e^{\mu(V_{nj} + \ln PS_n)}}{\sum_j e^{\mu(V_{nj} + \ln PS_n)}}$$

mit

$$PS_{in} = \sum_{a \in \Gamma_i} \left( \frac{l_a}{L_i} \right) \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \delta_{aj}}$$

mit  $L_i$  = Länge der Verbindung  $i$

$l_a$  = Länge der Kante  $a$

$\Gamma_i$  = alle Kanten der Verbindung  $i$

$\delta_{aj} = 1$  wenn  $a \in i$ , sonst 0

Für den PS-Faktor sind verschiedene Formeln vorgeschlagen worden, es wird hier die am einfachsten zu berechnende gewählt. Je unabhängiger eine Verbindung von anderen ist, desto grösser wird sein  $PS_{in}$ . Im Grenzfall beträgt er 1. Und umgekehrt wird der  $PS_{in}$  einer Verbindung desto kleiner, je mehr die Verbindung mit anderen zusammenfällt. Da der natürliche Logarithmus von Zahlen kleiner als 1 negativ wird, bedeutet dies, dass ein kleines  $PS_{in}$  den Zähler im Term der Auswahlwahrscheinlichkeit reduziert und somit auch die Wahrscheinlichkeit verringert, dass die betreffende Alternative ausgewählt wird.

### 2.3.3 Parameterschätzung

Die noch unbekannt Parameter  $\beta$  der Nutzenfunktionen (siehe Kapitel 2.3.1) müssen geschätzt werden. Sie werden dabei so gewählt, dass die im Modell berechneten Auswahlwahrscheinlichkeiten den in der Realität (Stichprobe) festgestellten entsprechen. Ein geeignetes Verfahren ist die Methode der Maximum-Likelihood-Schätzung. Ziel dieser Schätzmethode ist es, den Vektor  $\beta$  mit den gesuchten Parametern zu bestimmen und zwar auf die Weise, dass mit den geschätzten Parametern die beobachtete Ausprägung der Stichprobe am wahrscheinlichsten ist (daher der Name des Schätzers).

Es wird von der Ausprägung der Stichprobe ("Realität") ausgegangen und daraus soll eine theoretische Dichtefunktion  $f_X(x; \theta)$  der Zufallsvariable  $X$  mit zu schätzenden Verteilungsparametern  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_k)^T$  bestimmt werden. Die Ausprägung der Stichprobe wird mit dem Vektor  $z = (z_1, \dots, z_N)^T$  dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit (Likelihood)  $L(\theta|z)$ , dass diese Ausprägung zustande kommt, ist nach Faber (2007)

$$L(\theta|z) = \prod_{i=1}^N f_X(z_i|\theta)$$

und wird als Likelihood-Funktion definiert. Diese Likelihood-Funktion soll maximiert werden. Um die numerische Stabilität zu erhöhen wird die Log-Likelihood-Funktion  $\ell(\theta|z)$  maximiert:

$$\max \ell(\theta|z) = \max \sum_{i=1}^N \ln(f_x(z_i|\theta))$$

Es soll nun die Anwendung dieser Methode auf das MNL-Modell betrachtet werden. Die Ausführungen sind Ben-Akiva und Lerman (1985) entnommen.

Die Ausprägung (welche Person wählt welche Alternative) der Stichprobe wird durch den Vektor  $y_n$  beschrieben, wobei gilt:

$$y_{nj} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } n \text{ Alternative } j \text{ wählt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Likelihood-Funktion für ein allgemeines MNL-Modell ist

$$L = \prod_{n=1}^N \prod_{j \in C_n} P_n(j|C_n)^{y_{nj}}$$

wobei für Nutzenfunktionen, die linear mit dem Parametervektor  $\beta$  verbunden sind, gilt:

$$P_n(j|C_n) = \frac{e^{\beta x_{nj}}}{\sum_{k \in C_n} e^{\beta x_{nk}}}$$

Die Log-Likelihood-Funktion ist dann

$$\ell = \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C_n} y_{nj} \left( \beta x_{nj} - \ln \sum_{k \in C_n} e^{\beta x_{nk}} \right)$$

Oben stehende Funktion soll maximiert werden. Dafür werden deren ersten Ableitungen nach  $\hat{\beta}_m$  (Einträge des Vektors  $\beta$ ) gleich 0 gesetzt:

$$\frac{\partial \ell}{\partial \hat{\beta}_m} = \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C_n} y_{nj} \left( x_{njm} - \frac{\sum_{k \in C_n} e^{\beta x_{nk}} x_{nkm}}{\sum_{k \in C_n} e^{\beta x_{nk}}} \right) = 0, \quad \text{für } m = 1, \dots, M$$

Oben stehende Gleichung kann umgeformt werden zu

$$\sum_{n=1}^N y_{nj} = \sum_{n=1}^N P_n(j|C_n)$$

woraus ersichtlich ist, dass die Summe der Auswahlwahrscheinlichkeiten über die gesamte Population gleich der Anzahl Personen in der Population ist, die die Alternative  $j$  wählen.

Die Parametrisierung des Modells erfolgt in Kapitel 5.

## 2.4 Messen von Massnahmenutzen

Abschliessend zum Theorieteil soll in diesem Kapitel darauf eingegangen werden, wie der Nutzen einer Massnahme gemessen werden kann. Ganz zu Beginn des Kapitels wurde die KNA vorgestellt, die heute gängigste Methode, um den Nutzen einer Massnahme zu messen. Sie ist dabei unabhängig davon, wie das Mengengerüst zustande kommt, anwendbar. Das Ergebnis einer KNA sind die Kostenveränderungen einerseits und die monetarisierten Nutzenveränderungen gegenüber einem Referenzfall andererseits. Mit dem Kosten-Nutzen-Verhältnis kann die Wirtschaftlichkeit eines Projekts mit einer einzigen Zahl ausgedrückt werden.

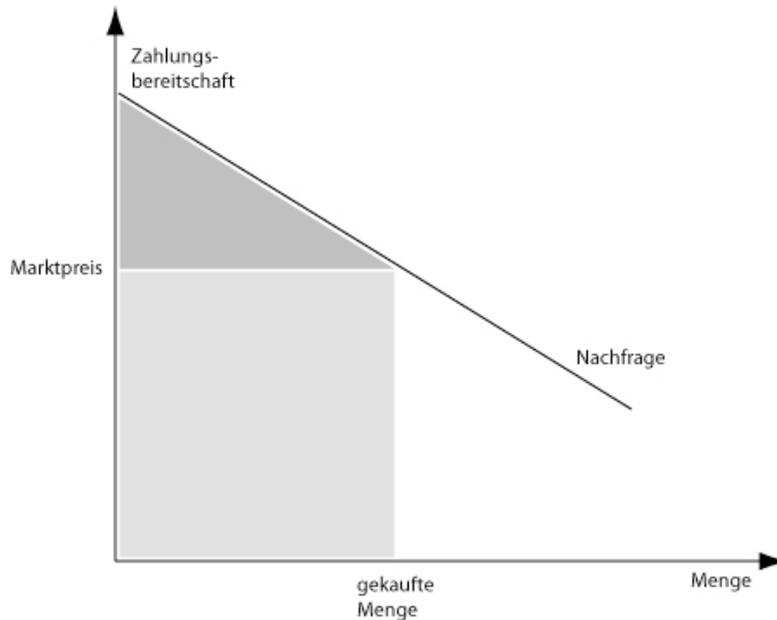
Basierend auf der vorgestellten Nutzen- und Entscheidungstheorie sollen noch zwei weitere Werkzeuge vorgestellt werden, anhand derer die Nutzenveränderungen einer Massnahme quantifiziert werden können.

### 2.4.1 Logsum-Term

In de Jong, Pieters et al. (2005) wird der Logsum-Term als Mass für die (aggregierte) Konsumentenrente hergeleitet. Im Folgenden sollen die wesentlichen Punkte der Publikation zusammengefasst werden.

Als Konsumentenrente (*consumer surplus*, kurz CS) wird die Differenz zwischen dem Preis, den der Konsument zu zahlen bereit ist (*willingness-to-pay*) und dem Marktpreis, den der Konsument tatsächlich bezahlt, bezeichnet (dunkelgrau schraffiert in Abbildung 2). Sie ist also ein Mass für den monetären Nutzen eines Gutes (oder einer Alternative). Sie ist einerseits abhängig vom Konsumenten selbst (wie viel ist ihm das Gut wert) und andererseits vom Markt (wie teuer ist das Gut). Dabei sind die beiden Komponenten natürlich nicht unabhängig voneinander. Der Markt reagiert auf das Konsumentenverhalten und umgekehrt.

Abbildung 2 Konsumentenrente



Nach de Jong, Pieters et al. (2005)

Die Konsumentenrente eines Agenten ist

$$CS_n = \left( \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \max(U_{nj} \forall j)$$

mit  $U_{nd} = V_{nj} + \epsilon_{nj}$  (Nutzen der Alternative j für Person n)

$$\alpha_n = \frac{dU_{nj}}{dY_n} \text{ (Grenznutzen des Einkommens)}$$

$Y_n$  = Einkommen der Person n

Unter der Annahme, dass die  $\epsilon_{nj}$  unabhängig und identisch gumbelverteilt sind und  $\alpha_n$  konstant ist, berechnet sich der Erwartungswert der Konsumentenrente einer Person n mit Hilfe der Eigenschaften (3) und (4) der Gumbelverteilung aus Kapitel 2.3.2 zu:

$$E(CS_n) = \left( \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \ln \left( \sum_j e^{V_{nj}} \right) + C$$

mit  $C$  = unbekannte Konstante

Abgesehen von der Multiplikation mit  $1/\alpha_n$  und der Konstante C ist der Erwartungswert der Konsumentenrente der Logarithmus des Divisors der Auswahlwahrscheinlichkeit im Multinomial Logit Modell

$$P(i|C_n) = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_j e^{V_{jn}}}$$

und wird als Logsum-Term bezeichnet.

Der Erwartungswert der Konsumentenrente einer gesamten Population (N Personen) lässt sich folglich als Summe der Erwartungswerte der einzelnen Personen n berechnen:

$$E(CS_{Population}) = \sum_{n=1}^N E(CS_n)$$

Da es bei der Beurteilung von Massnahmenutzen jedoch immer um Vergleiche zwischen verschiedenen Massnahmen (oder mit dem ursprünglichen Zustand) geht, interessiert vor allem die Differenz der Konsumentenrente vor (Superskript 0) und nach (Superskript 1) einer Massnahme:

$$\Delta E(CS_n) = \left(\frac{1}{\alpha_n}\right) \cdot \left[ \ln\left(\sum_{j=1}^{J^1} e^{V_{nj}^1}\right) - \ln\left(\sum_{j=1}^{J^0} e^{V_{nj}^0}\right) \right]$$

und

$$\Delta E(CS_{Population}) = \sum_{n=1}^N \Delta E(CS_n)$$

Die verschiedenen Massnahmen können aufgrund des  $\Delta E$  in eine Reihenfolge gebracht werden, die es erlaubt, die Massnahme zu identifizieren, die den Wohlstand der Population am ehesten verbessert.

In de Jong, Pieters et al. (2005) werden verschiedene Methoden vorgeschlagen, die es erlauben, den Logsum zu monetarisieren. Die Methode der durchschnittlichen Kosten (auf Seite 58 in der genannten Publikation) lautet für eine lineare Kostenfunktion:

$$\Delta \text{Logsum in CHF} = \frac{\Delta \text{Logsum}}{\alpha_c}$$

wobei  $\alpha_c$  der Parameter für die Kosten ist. Wie in Kapitel 5.7 gezeigt wird, existieren zwei verschiedene Parameter für die Kosten. Es kann hierbei für  $\alpha_c$  der Mittelwert gewählt werden.

Die so bestimmte Differenz des monetarisierten Logsums ist – genau wie auch die Nutzendifferenz gemäss der KNA – ein Nutzenwert in CHF, der die Veränderung der Nutzen eines Projektsfalls gegenüber dem Referenzfall misst. Auf die Unterschiede dieser beiden Methoden wird in Kapitel 7.5 eingegangen.

### 2.4.2 Nutzensumme

Eine andere sehr einfache Möglichkeit, den Nutzen einer Massnahme zu messen, ist, die von den Agenten erzielten Nutzen über die gesamte Agentenpopulation  $N$  aufzusummieren:

$$\text{Nutzensumme}_{\text{Population}} = \sum_{n=1}^N U_n$$

Dieser Wert sagt jedoch nur etwas darüber aus, wie sich die Population als Reaktion auf eine Massnahme konkret verhält und welchen Nutzen sie daraus zieht.

Es ist zu beachten, dass beim stochastischen Ansatz gemäss dem Multinomial Logit Model die Werte der Zufallsterme nicht bekannt sind. Diese fliessen in die Auswahlwahrscheinlichkeiten ein. Daher kann nicht über die ganzen Nutzenfunktionen aufsummiert werden, sondern nur über die deterministischen Anteile  $V$ :

$$\text{Nutzensumme}_{\text{Population}} = \sum_{n=1}^N V_n$$

### 3 Modell

Um die eingangs vorgestellten Fragestellungen bearbeiten zu können, muss ein einfaches Netz modelliert werden, das erlaubt, Verkehrsströme zu simulieren. Dabei bildet das hier vorgestellte Modell nur sehr stark vereinfacht die Realität ab. Es werden nur gezielt ausgewählte Einflüsse modelliert. Diese einfache Modellierung erlaubt einerseits die Fragestellungen innerhalb einer Masterarbeit zu bearbeiten, andererseits haben einfache Modelle den Vorteil, dass Ursachen und Wirkungen sich einfacher zuordnen lassen, während bei komplizierten und umfangreichen Modellen die Schwierigkeit besteht, festzustellen, worauf ein bestimmtes beobachtetes Phänomen zurückzuführen ist.

Für die Agenten der Population wird der Weg zur Arbeit sowie der Rückweg nach Hause modelliert. Die Bewohner (oder Agenten) treffen dabei (je nach Anzahl freigegebener Freiheitsgrade) maximal fünf Entscheidungen: Sie können ihren Wohnort wählen, sie können die Abfahrtszeit und die Verbindung am Morgen bestimmen, sie können die Dauer der Mittagspause den eigenen Wünschen anpassen und schliesslich am Abend eine Verbindung nach Hause wählen. Dabei bildet eine Entscheidungskombination eine Alternative im Alternativensatz, aus dem die Agenten eine auswählen müssen. Die Entscheidungen in den Entscheidungsdimensionen werden zeitgleich getroffen.

Die fünf Entscheidungen sind allerdings zu nur drei Freiheitsgraden zusammengefasst: Ort, Zeit und Verbindung, die je nach Bedarf festgehalten werden können. Das Festhalten von Freiheitsgraden schränkt den Alternativensatz der Agenten ein. Es sind verschiedene Kombinationen von Freiheitsgraden möglich, wobei jedoch nicht alle sinnvoll sind. Werden alle drei Freiheitsgrade festgehalten, werden die Agenten ihre Ausgangskonfiguration wählen, da die Randbedingungen nur diese eine Alternative im Alternativensatz belassen. Im Rahmen dieser Arbeit werden jeweils drei Freiheitsgradkombinationen untersucht, die wie folgt abgekürzt werden:

- Nur Verbindung frei wählbar (Abkürzung r)
- Verbindung und Abfahrtszeit frei wählbar (Abkürzung a-r)
- Verbindung, Abfahrtszeit und Ziel frei wählbar (Abkürzung z-a-r)

## 3.1 Netz

### 3.1.1 Knoten

Die Knoten im Netz werden in zwei Kategorien eingeteilt:

- Bewohnbare Knoten
- Nicht bewohnbare Knoten

Die bewohnbaren Knoten können Wohnorte und Arbeitsorte sein, während nicht bewohnbare Knoten lediglich der Erstellung der Netzgeometrie dienen und nicht bewohnt werden können.

Die Knoten verfügen über folgende Parameter:

- *Knoten-ID* (string<sup>5</sup>)
- *Bewohnbarkeit* (int, 1 = bewohnbar, 0 = nicht bewohnbar)
- *Kapazität* (int)  
Die Kapazität ist ein Mass für das Wohnungsangebot im betreffenden Knoten. Der Mietpreis steigt mit zunehmender Auslastung (als Funktion von Angebot und Nachfrage) exponentiell an (siehe hierzu die Nutzenfunktion der Wohnortwahl im Kapitel 3.3.1). Die Kapazität ist unabhängig vom Arbeitsplatz, d.h. es zählen hierbei nur die Anzahl Agenten, die in einem Knoten wohnen.
- *Bodenpreis* (int)  
Der Bodenpreis ist ein Mass für die Mietzinse und wird in CHF angegeben. Der hier angegebene Bodenpreis ist lediglich eine untere Grenze, da der Preis mit zunehmender Auslastung des Wohnorts ansteigt (Wohnungsmangel). Es wird davon ausgegangen, dass alle Wohnungen bzw. Häuser in einer Ortschaft gleich teuer sind.
- *Attraktivität* (int)  
Die Attraktivität ist eine Konstante, die alle Einflüsse beinhalten soll, die eine Ortschaft zum Wohnen attraktiv macht: z.B. das Vorhandensein von Naherholungsgebieten, gute Einkaufsmöglichkeiten, Seesicht, und vieles mehr. Auch die Attraktivität ist – wie der Bodenpreis – innerhalb einer Ortschaft konstant.

### 3.1.2 Kanten

Die Knoten werden durch Kanten (oder auch Strecken genannt) verbunden. Die Kanten werden durch folgende Parameter charakterisiert:

---

<sup>5</sup> *string*, *int* und *float* bezeichnen im Folgenden die Datentypen bei der Programmierung

- *Strecken-ID* (int)
- *Anfangspunkt* (string) und *Endpunkt* (string)  
Die Angabe des Anfangs- und Endpunktes macht deutlich, dass die Kanten gerichtet sind, d.h. sie sind nur in die angegebene Richtung (vom Anfangspunkt in Richtung Endpunkt) befahrbar. Für die Gegenrichtung muss eine eigene Kante modelliert werden. Als Anfangs- und Endpunkt müssen definierte Knoten angegeben werden. Es können dies sowohl bewohnbare als auch nicht bewohnbare Knoten sein.
- *Streckenlänge* in km (ist)
- *Streckentyp* (string): Hauptstrasse, Autobahn, Eisenbahn, Arbeitsweg  
Der Streckentyp ist massgebend für die Netzgenerierung, da die Strecken an das Verkehrsmittel gekoppelt sind: Autobahnen und Hauptstrassen sind sogenannte "Autostrecken", die Eisenbahn eine "Eisenbahnstrecke" und interne Wege (innerhalb eines Knotens) werden als "Arbeitsweg" bezeichnet. Das Verkehrsmittel kann für eine Route nur einmal gewechselt werden und zwar in folgender Art: Für die Fahrt vom Wohnort weg kann sowohl die Eisenbahn als auch eine Autostrecke gewählt werden. Wird die Eisenbahn gewählt, ist danach ein Umsteigen auf eine Autostrecke nicht möglich. Wird eine Autostrecke gewählt, ist ein einmaliges Umsteigen auf die Eisenbahn möglich. Allerdings muss dann auf dem Rückweg vom Arbeitsplatz das Auto an dem Knoten, an dem auf die Eisenbahn gewechselt wurde, wieder abgeholt werden. Die Verkehrsmittelwahl schränkt damit den Alternativensatz ein.
- *Kapazität* (int)  
Die Kapazität wird in Anzahl Agenten (eigentlich Fahrzeuge, doch da von einem PW-Besetzungsgrad = 1 ausgegangen wird, gilt Agent = Fahrzeug) angegeben. Auch bei den Strecken ist die Kapazitätsgrenze nicht hart modelliert, d.h. es ist möglich, die Strecken über die Kapazitätsgrenze hinaus zu belasten, allerdings verlängern sich dadurch die Reisezeiten exponentiell (siehe hierzu die Nutzenfunktion der Verbindungswahl in Kapitel 3.3.3).
- *Fahrzeit Nullbelastung* in min (int)  
Die Fahrzeit Nullbelastung gibt die Fahrzeit auf der leeren (unbelasteten) Strecke an. Sie ist ein Mass für die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf der Strecke.
- *alpha* (float) und *beta* (float)  
alpha und beta sind Parameter, die für die BPR-Funktion zur Reisezeitberechnung benutzt werden. Aus der BPR-Funktion (siehe Kapitel 3.3.3) ist ersichtlich, dass alpha ein Mass dafür ist, wie stark die Reisezeit mit zunehmender Belastung vor der Kapazitätsgrenze zunimmt, beta hingegen ist ein Mass dafür, wie stark die Reisezeit nach dem Erreichen der Kapazitätsgrenze mit zunehmender Belastung zunimmt. Unten stehende Tabelle 1 zeigt die verwendeten Parameter, die Vrtic, Schüssler et al. (2007) entnommen sind.

- *inter* (int)  
Der Parameter *inter* sollte auf 1 gesetzt werden für interne Strecken, also z.B. Strecken von A nach A. Für alle übrigen Strecken muss dieser Wert auf 0 gesetzt werden. Der Typ von internen Strecken wird mit "Arbeitsweg" bezeichnet.
- *maut* (int)  
Der Parameter *maut* gibt an, welche Mautgebühren auf der betreffenden Strecke gelten. Es muss zwingend ein Mautregime angegeben werden. Für unbemautete Strecken muss ein Mautregime mit einer Mautgebühr von 0 CHF definiert werden.

Tabelle 1 Parameter der BPR-Funktion

Streckentyp	alpha	beta
Autobahn	0.6	4.0
Autostrasse	0.8	3.6
Hauptstrasse ausserorts	1.2	3.4
Verbindungsstrasse ausserorts	1.2	3.0
Sammel- und Erschliessungsstrasse ausserorts	1.1	2.6
Hauptstrasse innerorts	1.2	2.4

Quelle: Vrtic, Schüssler et al. (2007)

### 3.1.3 Maut

Strecken können mit Mauten versehen werden. Diese werden durch folgende Parameter charakterisiert:

- *Maut-ID* (int)  
Die Maut-ID wird bei den Strecken angegeben, um einer Strecke das Mautregime zuzuordnen. Eine Strecke wird genau einem Mautregime zugeordnet.
- *Preis* (float)  
Der Preis wird in CHF angegeben. Er wird pro Mautregime nur einmal entrichtet (unabhängig von der Länge der bemauteten Strecke), allerdings sowohl am Morgen als auch am Abend.

- *Zeiten* (string)  
Die Zeiten geben an, zu welcher Zeit, die Maut gilt. Sie müssen in folgender Form angegeben werden: "42/43/44" Die Zahlen entsprechen den Zeitintervallen, die be-mautet sind<sup>6</sup>.

## 3.2 Population

Das Netz aus Knoten und Kanten wird von den Agenten bevölkert. Die Agenten in der Population weisen folgende Attribute auf:

- *Agent-ID* (int)
- *Wohnort* (string) und *Arbeitsort* (string)  
Als Wohn- und Arbeitsort müssen definierte Knoten angegeben werden. Es dürfen nur bewohnbare Knoten angegeben werden. Der Arbeitsplatz kann während der Simulation nicht geändert werden. Der Wohnort wird je nach Konfiguration der Simulation (Freiheitsgrade) variiert.
- *Bevorzugte Ankunftszeit am Morgen* (int) und *am Abend* (int)  
Die bevorzugte Ankunftszeit am Morgen und am Abend wird als über die gesamte Population normalverteilt angenommen mit einem Mittelwert um 8:00 Uhr am Morgen und 18:00 Uhr am Abend und einer Standardabweichung von 1 (entspricht 30 Minuten). Wichtig ist zu beachten, dass für die Simulation eine eigene Zeitrechnung verwendet wird.
- *Abfahrtszeit am Morgen* (int)  
Für die Abfahrtszeit am Morgen wird für alle Agenten als Initialisierungswert angenommen, dass sie eine Stunde vor der gewünschten Ankunftszeit abfahren (unabhängig von Wohn- und Arbeitsort).
- *Mittagspausendauer* (int)  
Für die Mittagspause wird als Initialisierungswert angenommen, dass alle Agenten eine Stunde Mittagspause machen.
- *Verbindung am Morgen* (string) und *am Abend* (string)  
Die benutzten (bzw. gewählten) Verbindungen sind abhängig von Wohn- und Arbeitsort und werden bei der Generierung der Agentenpopulation mit Hilfe eines Python-Programms (siehe Kapitel 4.1) bestimmt. Sie müssen im File ein *int*<sup>7</sup> sein.

---

<sup>6</sup> Der Tag beginnt um Mitternacht zur Zeit 0 und endet um zehn Minuten vor Mitternacht zum Zeitpunkt 143. Ein Zeitintervall beträgt 10 Minuten und wird als eine Zeiteinheit aufgefasst.

<sup>7</sup> Jede Verbindung im Netz ist mit einer eindeutigen ID versehen, die hier als *int* eingetragen werden muss.

- *Einkommen* (int)  
Das Einkommen ist ein Mass für das Monatseinkommen und wird in CHF angegeben. Es wird über die gesamte Population als log-normalverteilt angenommen.
- *Autoverfügbarkeit* (int)  
Die Autoverfügbarkeit gibt an, ob der betreffende Agent über ein eigenes Fahrzeug verfügt (1) oder nicht (0). Das Vorhandensein eines eigenen Fahrzeugs ist allerdings im Modell mit keinen Fixkosten verbunden, nur deren Verwendung (pro km).

### 3.3 Nutzenfunktionen

Die Agenten treffen während ihres Arbeitstages mehrere Entscheidungen. Um für diese Entscheidungen eine Grundlage zu schaffen, müssen Nutzenfunktionen definiert werden. Dabei wird jeder Entscheidungsdimension eine Nutzenfunktion zugewiesen.

Im Folgenden werden die messbaren deterministischen Komponenten  $V_{in}$  der im Modell verwendeten Nutzenfunktion  $U_{in}$  vorgestellt.

#### 3.3.1 Wohnort

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Nutzen, den eine Wohnortwahl bringt, sich lediglich aus folgenden zwei Komponenten zusammensetzt:

- *Bodenpreis*  
Der Nutzen aus dem Bodenpreis ist einerseits abhängig vom eigenen Einkommen und andererseits von der Auslastung des Wohnorts. Mit steigender Auslastung steigen die Bodenpreise. Dabei bleiben die Preise bis zu einer Auslastung von 50% mehr oder weniger konstant, während sie ab einer Auslastung von 60% sehr steil ansteigen. Maximal werden die Preise verdoppelt, ab einer Auslastung von 140%-150%. Da die Preise ins Verhältnis zum eigenen Einkommen gesetzt werden, nimmt der Nutzen aus der Wohnortwahl mit abnehmendem Einkommen ebenfalls ab. Die Nutzenfunktion sieht dabei wie folgt aus (siehe auch Abbildung 3):

$$V_{\text{Bodenpreis}} = \beta_{\text{Bodenpreis}} \cdot \frac{P_k}{Y_n} \cdot \left( 2 - e^{-\left(\frac{Q_k}{K_k}\right)^{\theta}} \right)$$

mit  $P_k$  = Bodenpreis des leeren Wohnorts  $k$

$Y_n$  = Einkommen der Person  $n$

$Q_k$  = Belastung des Wohnorts  $k$

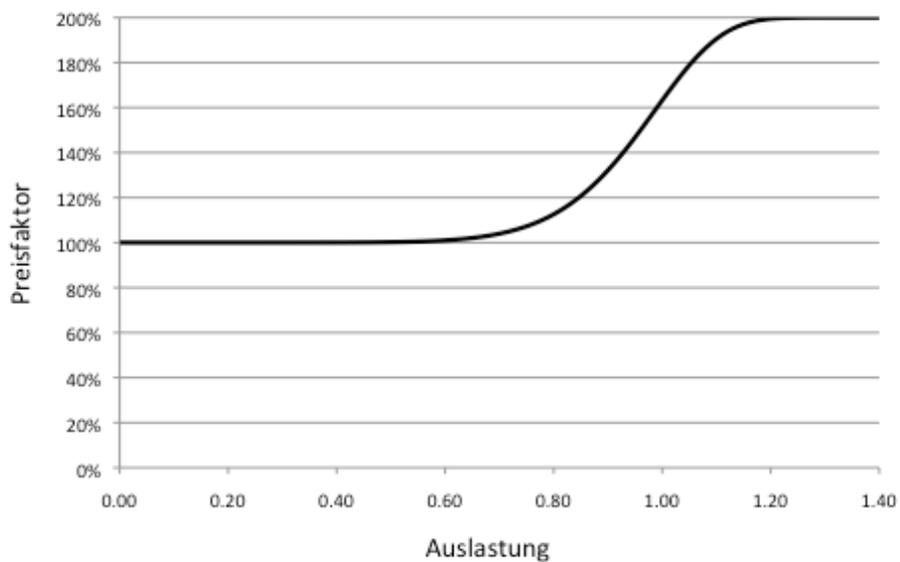
$K_k$  = Kapazität des Wohnorts  $k$

- **Attraktivität**

Die Attraktivität beinhaltet alle Faktoren, die einen Wohnort attraktiv machen. Sie wird mit einer Konstante abgebildet. Für den attraktivsten Ort des Netzes ist die Nutzenfunktion 0, für alle anderen wird ein negativer Nutzen angerechnet. Die Nutzenfunktion sieht wie folgt aus:

$$V_{Attraktivität} = \beta_{Attraktivität} \cdot (\alpha_{Attraktivität} - \alpha_{Attraktivität,max})$$

Abbildung 3 Mietpreis als Funktion der Auslastung



Die Nutzenfunktion für die Wohnortwahl ergibt sich aus der Summe der beiden Teilfunktionen:

$$V_{Wohnort} = \beta_{const.} + V_{Bodenpreis} + V_{Attraktivität}$$

### 3.3.2 Abfahrtszeit am Morgen

Die Nutzenfunktion der Zeitwahl besteht aus zwei Komponenten:

- SDE (*schedule delay early*) berücksichtigt das verfrühte Ankommen und bestraft dieses proportional zur verfrühten Zeit mit dem Faktor  $\beta$ .

- *SDL (schedule delay late)* berücksichtigt das verspätete Ankommen und bestraft dieses proportional zur verspäteten Zeit mit dem Faktor  $\gamma$ .

Die Nutzenfunktion für die Abfahrtszeit am Morgen sieht nach Ortúzar und Willumsen (2001) wie folgt aus:

$$V_{\text{Abfahrtszeit}} = -\beta \cdot SDE(\tau) - \gamma \cdot SDL(\tau)$$

$$\text{mit } SDE = \max(\text{PAT}^8 - \tau, 0)$$

$$SDL = \max(\tau - \text{PAT}, 0)$$

$$\tau = \text{Abfahrtszeit}_{\text{Morgen}} + \text{Reisezeit}_{\text{Morgen}}$$

### 3.3.3 Verbindung

Der Nutzen einer gewählten Verbindung (am Morgen und am Abend identisch) ist im Modell abhängig von der Reisezeit, den Reisekosten und der Verkehrsmittelwahl. Dazu werden folgende Komponenten verwendet:

- Reisezeit ( $\beta_{\text{Fahrzeit,Auto}}$ ,  $\beta_{\text{Fahrzeit,öV}}$ ,  $\beta_{\text{Reisezeit,Arbeitsweg}}$ )
- Reisekosten ( $\beta_{\text{Reisekosten,Auto}}$  für Benzin und Maut,  $\beta_{\text{Reisekosten,öV}}$  für öV-Ticket)
- Zugangszeit zum öV ( $\beta_{\text{Zugangszeit,öV}}$ )
- Taktdichte öV ( $\beta_{\text{Intervall,öV}}$ )
- Autoverfügbarkeit ( $\beta_{\text{Verfügbarkeit,Auto}}$ )
- Grundpräferenz ( $\beta_{\text{Konstante,Auto}}$ ,  $\beta_{\text{Konstante,Arbeitsweg}}$ )

Das Verkehrsmittel wird mit der Route gleichzeitig gewählt, was vom klassischen Vier-Stufen-Ansatz abweicht. Bei der Wahl der Verbindung müssen verkehrsmittelwahltechnische Randbedingungen eingehalten werden (siehe Kapitel 3.1.2).

Die Reisezeitverlängerung eines Streckenelements durch gesteigerte Nachfrage auf der betreffenden Strecke wird durch Widerstandsfunktionen (*capacity restraint functions*) abgebildet. Für die Implementierung wird die weit verbreitete BPR-Funktion des amerikanischen Bureau of Public Roads verwendet, nach Treiber (2007):

---

<sup>8</sup> PAT = preferred arrival time

$$T_a = T_{a0} \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{Q_a}{K_a} \right)^\beta \right]$$

mit  $T_a$  = Reisezeit auf der Strecke a

$T_{a0}$  = Fahrzeit Nullbelastung auf der Strecke a

$Q_a$  = Belastung auf der Strecke a

$K_a$  = Kapazität auf der Strecke a

$\alpha, \beta$  = Parameter (siehe Tabelle 1 im Kapitel 3.1.2)

Die Nutzenfunktion für die Reisezeit ergibt sich zu:

$$V_{\text{Reisezeit}} = \beta_{\text{Fahrzeit,Auto}} \cdot \sum_{a \in i} T_{a,\text{Auto}} + \beta_{\text{Fahrzeit,öV}} \cdot \sum_{a \in i} T_{a,\text{öV}} + \beta_{\text{Reisezeit,Arbeitsweg}} \cdot \sum_{a \in i} T_{a,\text{Arbeitsweg}}$$

Die monetären Kosten werden mit  $P_i$  berücksichtigt:

$$P_i = L_{i,\text{Autostrecke}} \cdot P_{\text{Benzin}} + P_{\text{Maut}} + P_{\text{öV}}$$

mit  $L_{i,\text{Autostrecke}}$  = Länge der Autostrecke

$P_{\text{Benzin}}$  = Preis für Benzin pro km

$P_{\text{Maut}}$  = Mautgebühren

$P_{\text{öV}}$  = Pauschalpreis für Benützung öV (= 0 bei Nichtbenützung des öV)

Und fließen wie folgt in die Nutzenfunktion der Reisekosten ein:

$$V_{\text{Kosten}} = \beta_{\text{Kosten,Auto}} \cdot (P_{\text{Benzin}} + P_{\text{Maut}}) + \beta_{\text{Kosten,öV}} \cdot P_{\text{öV}}$$

Mit dem Bezahlen des öV-Preises kann auf dem ganzen Netz der öV benutzt werden. Der Preis ist folglich pauschal und nicht kilometerabhängig. Der im Modell angegebene Preis wird sowohl am Morgen als auch am Abend bezahlt.

Die Nutzenfunktion für die gesamte Verbindung sieht wie folgt aus:

$$V_{\text{Verbindung}} = (\beta_{\text{Konst.,Auto}} + \beta_{\text{Verfügbarkeit,Auto}}) + (\beta_{\text{Zugangszeit,öV}} + \beta_{\text{Intervall,öV}}) + (\beta_{\text{Konst.,Arbeitsweg}}) + V_{\text{Reisezeit}} + V_{\text{Reisekosten}}$$

Je nach verwendeten Verkehrsmitteln entfallen in obiger Gleichung bestimmte Terme. Die gesamte Nutzenfunktion wird noch um einen konstanten Wert auf der Skala verschoben, dass

keine positiven Nutzen entstehen, was den Vergleich verschiedener Nutzenkomponenten untereinander vereinfacht.

### 3.3.4 Dauer der Mittagspause

Die Dauer der Mittagspause und die Reisezeit am Morgen bestimmen den Abfahrtszeitpunkt am Abend (alle Agenten arbeiten acht Stunden pro Tag). Die Mittagspause selbst bringt den Agenten zwar keinen Nutzen, doch die Dauer der Pause legt direkt den Abfahrtszeitpunkt am Abend fest, der schliesslich indirekt mit einem Nutzen verbunden ist (Ankunftszeit zu Hause). Während die Wahl am Morgen auf 10 Minuten genau getroffen werden kann (Auflösung des Modells), kann die Mittagspause nur halbstundengenau gewählt werden. Mit dieser Einschränkung soll der Alternativensatz in seiner Grösse eingeschränkt werden, um die Rechenzeit einer Simulation beträchtlich zu verringern. Die Nutzenfunktion ist identisch mit derjenigen am Morgen, nur dass sich das  $\tau$  anders berechnet und andere Parameter ( $\beta$  und  $\gamma$ ) verwendet werden (siehe hierzu Kapitel 5.4).

$$\tau = \text{Abfahrtszeit}_{\text{Morgen}} + \text{Reisezeit}_{\text{Morgen}} + \text{Arbeitszeit} \\ + \text{Mittagspause} + \text{Reisezeit}_{\text{Abend}}$$

### 3.3.5 Gesamtnutzen

Die fünf Entscheidungsdimensionen (Wohnort, Abfahrtszeit am Morgen, Verbindungswahl am Morgen, Dauer der Mittagspause und Verbindungswahl am Abend) liefern je einen Nutzenwert, so dass sich ein deterministischer Gesamtnutzen errechnen lässt:

$$V_{\text{Total}} = V_{\text{Wohnort}} + V_{\text{Abfahrtszeit, Morgen}} + V_{\text{Verbindung, Morgen}} + V_{\text{Mittagspause}} + V_{\text{Verbindung, Abend}}$$

Gemäss Kapitel 2.3.1 wird der stochastische Gesamtnutzen wie folgt berechnet:

$$U_{\text{Total}} = V_{\text{Total}} + \varepsilon$$

## 4 Implementierung

Im folgenden Kapitel wird die Implementierung des im vorangehenden Kapitel vorgestellten Modells dokumentiert. Der Programmcode ist auf der beigelegten CD zu finden. Hier wird nicht jedes Detail des Codes kommentiert. Vielmehr wird auf den groben Ablauf des Programms, auf die wichtigsten Datenstrukturen, sowie auf Schwierigkeiten und Grenzen der Simulation eingegangen.

Die Implementierung wurde mit *Eclipse (integrated developer environment)* in der objektorientierten Programmiersprache *Python* realisiert.

### 4.1 Erstellung der Eingabedaten (Ausgangszustand)

#### 4.1.1 Erzeugung der Agentenpopulation

Bevor das endgültige Agentendatenfile erstellt werden kann, muss ein provisorisches Agentenfile vorbereitet werden, das im Modellaufbau eingelesen und anschliessend ergänzt wird. Die Vorbereitung des Files geschieht mit Hilfe der Excel-Datei *Konfiguration\_Agenten.xls*. Die Werte bei *AgentID*, *Wohnort*, *Arbeitsort*, *bevorzugte Ankunftszeit am Morgen* und *am Abend*, *Abfahrtszeit am Morgen*, *Mittagspause* und *Einkommen* müssen so eingetragen werden, wie sie am Schluss sein sollen. Bei *Verbindung am Morgen* und *am Abend* soll 0 eingetragen werden, bei der *Autoverfügbarkeit* ebenfalls. Diese Daten werden vom Python-Programm *build\_population()* geändert. Es ist darauf zu achten, dass alle Anführungszeichen im File in der Form " " und nicht ' ' sind.

Im Python-Programm muss beim "Parameter für Populationsgenerierung" ein Motorisierungsgrad gewählt werden. Anschliessend müssen die Funktionen *m = Modell()*, *m.build\_modell(dateipfadA, dateipfadK, dateipfadS, dateipfadM)* und *m.build\_population()* aufgerufen werden.

Für die Populationserzeugung wird zuerst der im Kapitel 4.2 beschriebene Modellaufbau durchgeführt. Die Funktion *build\_population()* ruft für jeden Agenten die Funktion *berechne\_initialwerte()* auf. Die Funktion teilt jedem Agenten zufällig einen Wohn- und Arbeitsort zu, sodass am Schluss die Knoten die gewünschte Auslastung bezüglich Wohnen und Arbeiten aufweisen. Die entsprechenden Werte werden im Dictionary *initialbelastungen* wie folgt angegeben:

```
{<KnotenID>: [<Anzahl Wohnen>, <Anzahl Arbeiten>]}
```

Danach werden für den Agenten alle Alternativen mit seinem Wohn- und Arbeitsort in eine Liste geschrieben, aus der anschliessend mittels Zufallszahl eine ausgewählt wird. Die Verbindungen am Morgen und am Abend werden dem Agenten zugewiesen. Handelt es sich dabei um Verbindungen mit Autostrecken, wird die Autoverfügbarkeit des Agenten auf 1 gesetzt. Andernfalls wird die Autoverfügbarkeit auf 0 gesetzt und der Agent in eine `kein_autoliste` aufgenommen.

Die am Schluss aufgerufene Funktion `auto_zuweisen()` überprüft, wie viele Agenten bereits motorisiert sind. Ist der Motorisierungsgrad kleiner als der gewünschte (Variable `motorisierungsgrad`), werden die restlichen Autos zufällig auf die Agenten in der `kein_autoliste` verteilt. Im Falle einer zu hohen Motorisierung wird eine Fehlermeldung ausgegeben und der tatsächliche Motorisierungsgrad angegeben. In diesem Fall muss bei Bedarf die Populationserzeugung manuell wiederholt werden. Das neue Agentenfile wird ausgegeben.

Die ausgegebene Datei `Agentendaten_initial.txt` muss ins Agentendatenfile kopiert werden. Die Konfiguration der Agenten ist hiermit beendet.

#### 4.1.2 Streckendaten

Das Streckendatenfile wird mit Hilfe der Excel-Datei `Konfiguration_Strecken.xls` erstellt. Es müssen *Anfangspunkt*, *Endpunkt*, *Länge*, *Typ* (aus der Auswahlliste), *Kapazität*, *inter* sowie das Mautregime angegeben werden. Es ist darauf zu achten, dass *alpha* und *beta* floats sind. *Inter* wird bei internen Strecken (also von A nach A, etc.) auf 1 gesetzt, sonst auf 0. Die Konfiguration der Streckendaten ist somit beendet. Es ist darauf zu achten, dass alle Anführungszeichen im File in der Form `" "` und nicht `' '` sind.

#### 4.1.3 Mautdaten

Das Mautdatenfile muss manuell erstellt werden. Die Eingaben sind in der Form:

```
1,15.0,"39/40/41/42/43/44/45/46/47/48/99/100/101/102/103"
```

Wobei die erste Zahl die Maut-ID darstellt, die zweite Zahl (float) der Preis ist und die Zahlen in den Anführungsstrichen und durch `/` getrennt sind die Zeiten, zu denen Maut verlangt wird. Da wahrscheinlich nicht alle Strecken bemautet sind, muss ein Gratis-Regime existieren:

```
0,0.0,"0"
```

Die Konfiguration des Mautdatenfiles ist somit beendet. Auch hier ist darauf zu achten, dass alle Anführungszeichen im File in der Form " " und nicht ' ' sind.

#### 4.1.4 Knotendaten

Das Knotendatenfile wird ebenfalls manuell erstellt. Die Eingaben sind in der Form:

```
"A",1,500,1500,1
```

Wobei der Buchstabe die Knoten-ID ist, die erste Zahl die Bewohnbarkeit angibt (1 = bewohnbar, 0 = nicht bewohnbar), die dritte Zahl die Kapazität, die vierte Zahl den Bodenpreis und die letzte Zahl die Attraktivität. Alle Zahlen müssen im int-Format sein, die Knoten-ID zwischen Anführungszeichen der Form " ".

## 4.2 Modellaufbau

In einem ersten Schritt werden die Agentendaten, die Knotendaten, die Streckendaten sowie die Mautdaten eingelesen und abgespeichert. Die Agenten werden in die `agentenliste` eingelesen. Die Knoten werden differenziert nach Bewohnbarkeit abgespeichert: Die `knotenliste` enthält alle Knoten, während die `wohnotliste` nur die Wohnorte und Arbeitsorte enthält. Die Streckendaten werden ebenfalls differenziert abgespeichert: die internen Strecken (von A nach A, B nach B, etc.) in die `interliste`, alle anderen in die `streckenliste`. Zusätzlich werden alle Strecken in ein `streckenset` abgespeichert, wo die Strecken-ID den Schlüssel und das zugehörige Strecken-Objekt den Eintrag bildet. Die Mautdaten werden in das `mautset` eingelesen, das folgende Form aufweist:

```
{<mautregimeID>: {'Preis': (float), 'Zeit': (list)}}
```

Für alle Strecken wird der Belastungsvektor erzeugt. Es handelt sich dabei um eine Liste mit 144 Einträgen, wovon jeder Eintrag der Uhrzeit seines Index entspricht. Eine Belastung z.B. zur Uhrzeit 50 führt zu einer Erhöhung des Belastungswertes in der Liste beim 50. Element. Der Belastungszeitpunkt der Strecken wird bei der Reisezeitberechnung mittels BPR-Funktion berücksichtigt. Die Einträge der Belastung werden nicht bei allen Strecken der Verbindung zum Zeitpunkt des Reisebeginns gemacht, sondern zum Zeitpunkt des Befahrens der jeweiligen Strecke. Es wird hierbei jeweils immer auf 10 Minuten gerundet (Auflösung der Zeit). Problematisch ist es, wenn die Strecken überlastet sind. Es kann dabei vorkommen, dass sich die Reisezeit derart verlängert, dass die Agenten nicht mehr am selben Tag nach Hause kommen. Programmtechnisch heisst das, dass die nachfolgenden Strecken zu einem Zeitpunkt belastet werden sollen, der nicht mehr modelliert wird. In diesem Fall wird keine

Belastung eingetragen und eine Reisezeit von 999'999'999 Minuten zurückgegeben. Um solche ungültigen Alternativen herauszufiltern, werden Alternativen mit einem sehr grossen negativen Nutzen nicht in den Alternativensatz des Agenten übernommen. Ist bei der Wahl der Alternative das Set leer (alle Alternativen sind überlastet), wird die Simulation abgebrochen und eine Fehlermeldung ausgegeben.

Als nächstes wird das `verbindungsset` und gleichzeitig das `verbindungsregister` berechnet. Das `verbindungsregister` ist ein Dictionary, in dem die Verbindungen als Liste mit einem Schlüssel versehen werden. So ist jede Verbindung eindeutig mittels ID identifizierbar:

```
{<verbindungsID>: <verbindung>}
```

mit `verbindung` der Form `[strecke,strecke,...]`

Das `verbindungsset` ist ebenfalls ein Dictionary, das folgende Form hat:

```
{'<verbindung von-nach>': [<verbindung>,<verbindung>,...]}
```

Das `verbindungsset` enthält alle Verbindungen, auch diejenigen, die verkehrsmittelwahl-technisch nicht möglich sind (z.B. zuerst eine Eisenbahnstrecke und danach eine Autostrecke). Diese werden beim nächsten Schritt gelöscht, beim Erstellen des sogenannten `reisenset`. Eine Reise im `reisenset` besteht aus einem Hinweg am Morgen und einem Rückweg am Abend. Die unmöglichen Verbindungen werden nicht abgespeichert. Das `reisenset` hat die Form:

```
{'<verbindung von-nach>': [[<verbindung_Hin>,<verbindung_Rück>],  
[<verbindung_Hin,<verbindung_Rück>],...]}
```

In einem nächsten Schritt wird das `alternativenset` berechnet. Es enthält alle möglichen Alternativen, also eine Kombination von allen möglichen Abfahrtszeiten am Morgen, allen möglichen Reisen (Hin- und Rückweg), allen möglichen Mittagspausendauern und allen möglichen Wohnorten. Jede Alternative erhält eine Nummer, mit der sie eindeutig identifizierbar ist. Für das `alternativenset` werden ausserdem die Path-Size-Faktoren (bei entsprechender Konfiguration) und die Fahrpreise für die Verbindungen berechnet, sowie bestimmt, ob die Alternative eine Autostrecke beinhaltet. Das `alternativenset` hat als Wert ein Dictionary und hat folgende Form:

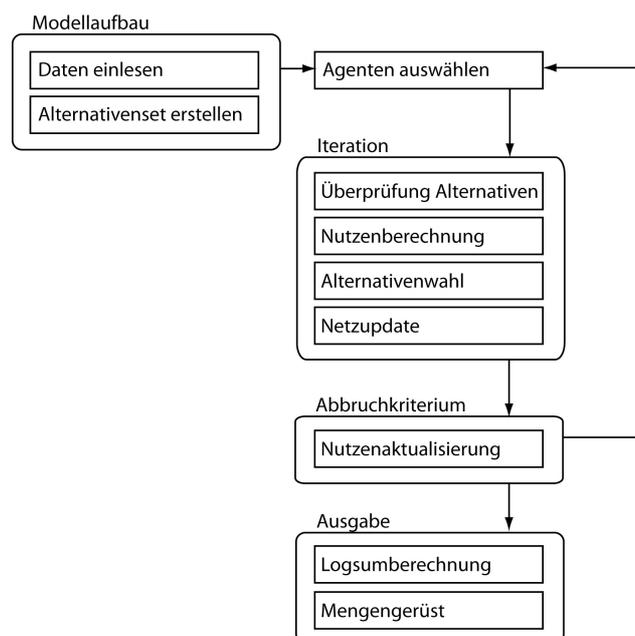
```
{<alternativennummer>:{'Wohnort':knoten,'Arbeitsort':knoten,  
'Abfahrtszeit_Morgen':(int),'Verbindung_Morgen':verbindung,  
'Mittagspause':(int),'Verbindung_Abend':verbindung,  
'PS_Morgen':(float),'PS_Abend':(float),'Fahrpreis':(float),  
'Auto':(int)}}
```

Damit ist der Modellaufbau abgeschlossen und die Simulation beginnt.

### 4.3 Simulationsablauf

In der Simulation wählen die Agenten so lange eine Alternative, bis sich die Nutzensumme<sup>9</sup> über die gesamte Population um weniger als 5% verändert. Damit die Iteration auch wirklich konvergiert, wählen in jedem Iterationsschritt jeweils nur 90% der Agenten des vorherigen Iterationsschrittes eine neue Alternative. Abbildung 4 zeigt den groben Programmablauf (inkl. Modellaufbau) schematisch.

Abbildung 4 Grober Programmablauf



#### 4.3.1 Überprüfung aller Alternativen

In einem ersten Schritt wird für den aktuellen Agenten die Funktion ueberpruefe\_alle\_alternativen() aufgerufen. In der Funktion werden alle Alternativen des alter-

<sup>9</sup> Summe der deterministischen Nutzen der gewählten Alternativen

nativensets durchgegangen. Es müssen dabei zwei Kriterien erfüllt sein, damit die jeweilige Alternative für den Agenten überhaupt in Frage kommt: Der Arbeitsort in der Alternative muss mit demjenigen des Agenten übereinstimmen und der Agent muss über ein eigenes Fahrzeug verfügen, wenn es sich um eine Alternative mit Autostrecke handelt. Ferner müssen in diesem Schritt die Freiheitsgrade überprüft werden. Sind gewisse Freiheitsgrade festgehalten, ist eine Alternative nur gültig, wenn der festgehaltene Wert dem Initialwert des Agenten entspricht. Nach erfolgreicher Überprüfung einer Alternative wird die Funktion `berechne_nutzen_alternative()` aufgerufen.

### 4.3.2 Nutzenberechnungen

Die Nutzen für die Wahl des Wohnorts, der Abfahrtszeit am Morgen, der Verbindung am Morgen, der Dauer der Mittagspause und der Verbindung am Abend werden einzeln berechnet und anschliessend zu einem Gesamtnutzen zusammengezählt und ins nutzenset des Agenten abgespeichert. Jeder Agent verfügt über ein nutzenset in Form eines Dictionarys, das als Schlüssel die Alternativennummer und als Eintrag den deterministischen Gesamtnutzen der jeweiligen Alternative in der jeweiligen Iteration enthält:

```
{<alternativennummer>: <gesamtnutzen>}
```

Auf die Berechnung der Nutzen soll hier nicht eingegangen werden, sie leitet sich direkt aus den vorgestellten Nutzenfunktionen in Kapitel 3.3 ab. Die Berechnung der Reisezeit erfolgt getrennt nach Verkehrsmittel, um bei der Nutzenfunktion die entsprechenden betas verwenden zu können. Bei der Berechnung der Reisezeit werden die Mautgebühren erhoben: Jede Strecke ist einem Mautregime zugeordnet. Bei der Berechnung der Reisezeit wird überprüft, ob der Zeitpunkt des Befahrens der Strecke bemaute ist. Ist dies der Fall, wird in das maut-Dictionary des jeweiligen Agenten ein Eintrag gemacht: als Schlüssel die Mautregime-ID, als Eintrag der entrichtete Preis. Bei der Nutzenberechnung wird über die Einträge des maut-Dictionarys aufsummiert. Da die Maut sowohl am Morgen als auch am Abend separat zu entrichten ist, wird zu Beginn der Berechnung das maut-Dictionary gelöscht.

Nach der Berechnung aller Nutzen für alle Alternativen wird die Funktion `wahle_alternative()` aufgerufen.

### 4.3.3 Wahl der Alternative

Je nach Entscheidungsmechanismus (Maximaler Nutzen, Multinomial Logit Model, Path Size Logit Model) wird eine Alternative gewählt und die Nummer der gewählten Alternative der Funktion `wahle_alternative()` zurückgegeben.

### **Maximaler Nutzen**

Aus dem nutzenset des Agenten wird die Alternative mit dem grössten deterministischen Nutzen bestimmt.

### **Multinomial Logit Model**

Der Parameter *lambda\_ps* muss 0 gesetzt sein (gemäss Tabelle 2), damit die Path Size Faktoren unberücksichtigt bleiben. Es wird gemäss dem MNL-Modell die Auswahlwahrscheinlichkeit für jede Alternative berechnet und in das `wahlset()` geschrieben, das folgende Form hat:

```
{<alternativennummer>: [<untere_grenze>,<obere_grenze>]}
```

mit `<untere_grenze> = <obere_grenze>` vorangehende Alternative

`<obere_grenze> = <untere_grenze> + Auswahlwahrscheinlichkeit`

Danach wird eine Zufallszahl von 0 bis 1 (gleichförmige Verteilungsfunktion) gewählt. Es wird diejenige Alternative gewählt, deren obere und untere Grenze die Zufallszahl einschliesst.

### **Path Size Logit Model**

Es wird die gleiche Funktion wie beim MNL-Modell aufgerufen, doch der Path Size Faktor wird diesmal berücksichtigt (das *lambda\_ps* muss gleich 1 gesetzt werden).

#### **4.3.4 Aktualisierung der Netzdaten und Nutzen**

Nach der Wahl der Alternative werden die Knoten- und Streckenbelastungen aktualisiert. Zuerst werden die Belastungen der letzten Iteration entfernt, anschliessend die Belastungen der aktuellen Iteration aufgebracht. Für die Entfernung der alten Knotenbelastung wird nur die Variable `wahl` des Agenten benutzt, in die jeweils die Nummer der gewählten Alternative abgespeichert wird. Für die Entfernung der alten Streckenbelastungen reicht die Alternativennummer nicht, da diese die Dynamik der Strecken nicht beinhaltet (zu welcher Tageszeit sind die betroffenen Strecken belastet). Dazu wird das OZB-Dictionary (Ort-Zeit-Belastung) des Agenten benutzt. Es hat als Schlüssel die Strecken-ID und als Eintrag die Uhrzeit der Belastung:

```
{<streckenID>: <uhrzeit>}
```

Es existiert für den Morgen und den Abend ein separates OZB-Dictionary, da sonst eine Strecke täglich nur einmal belastet werden könnte wegen der Eindeutigkeit von Schlüsseln in Dictionarys. Nach der Entfernung der alten Knoten- und Streckenbelastungen werden die OZB-Dictionarys gelöscht und die aktuell gewählte Alternativennummer in die Wahl-Variable abgespeichert.

In einem nächsten Schritt werden die OZB-Dictionarys für die aktuelle Iteration berechnet und danach die Knoten- und Streckenbelastungen vorgenommen.

Nach Abschluss einer Iteration müssen die Nutzen der Agenten neu berechnet werden, da sich diese seit der Wahl geändert haben: hatte der erste zu wählende Agent in der ersten Iteration noch leere Strassen und Knoten zur Auswahl (und als Grundlage der Nutzenberechnung) haben sich diese nachher gefüllt, was den eigenen Nutzen schmälert.

#### 4.3.5 Bewertung

Am Ende jedes Iterationsschrittes wird die Nutzensumme berechnet und ausgegeben. Ist die Veränderung der Nutzensumme gegenüber der vorhergehenden Iteration kleiner als 5% wird die Iteration abgebrochen, der Logsum berechnet und die Ergebnisse (Wahl der Agenten, Knoten- und Streckenbelastungen sowie Daten für die KNA) werden in ein File abgespeichert.

### 4.4 Konfiguration

Im Programm müssen vor dem Start der Simulation die Einstellungen gemäss Tabelle 2 vorgenommen werden.

Der Parameter *dcm* wählt den Entscheidungsmechanismus MNL/PSL oder MAX. Die Unterscheidung zwischen normalem Multinomial Logit Modell und dem Path Size Logit Modell wird mit dem Parameter *lamda\_ps* vorgenommen. Der Parameter *lamdba\_mnl* multipliziert den Exponenten in der Formel der Auswahlwahrscheinlichkeit.

Mit *fg\_ort*, *fg\_zeit* und *fg\_verbindung* werden die Freiheitsgrade bestimmt. Ein Freiheitsgrad wird mit 0 freigegeben und mit 1 festgehalten.

Tabelle 2 Programmkonfiguration

Entscheidungskriterium	dcm	lamdba _psl	lambda _mnl	fg_ort	fg_zeit	fg_verbindung
Multinomial Logit Model (r)	mnl	0.0	1.0	1	1	0
Multinomial Logit Model (a-r)	mnl	0.0	1.0	1	0	0
Multinomial Logit Model (z-a-r)	mnl	0.0	1.0	0	0	0
Path Size Logit Model (r)	mnl	1.0	1.0	1	1	0
Path Size Logit Model (a-r)	mnl	1.0	1.0	1	0	0
Path Size Logit Model (z-a-r)	mnl	1.0	1.0	0	0	0
Maximaler Nutzen (r)	max	0.0	1.0	1	1	0
Maximaler Nutzen (a-r)	max	0.0	1.0	1	0	0
Maximaler Nutzen (z-a-r)	maxi	0.0	1.0	0	0	0

## 5 Parametrisierung

Im Rahmen dieser Masterarbeit kann die im Kapitel 2.3.3 kurz vorgestellte Parameterschätzung aus Zeitgründen nicht selbst vorgenommen werden. Es werden Parameter verwendet, die in der Literatur vorkommen.

Einerseits müssen die Nutzenfunktionen selbst parametrisiert, d.h. die Parameter  $\beta$  bestimmt werden, andererseits aber müssen auch die einzelnen Nutzenfunktionen untereinander so gewichtet werden, dass plausible Ergebnisse entstehen. Es ist dabei auf das richtige Verhältnis zwischen den verschiedenen Parametern zu achten.

In der Literatur sind viele durchgeführte Parameterschätzungen zu finden, doch es stellen sich gewisse Schwierigkeiten bei deren Anwendung auf das vorliegende Modell. In den verschiedenen Studien wurden unterschiedliche Modelle auf unterschiedliche Weise geschätzt: reine Routenwahl, reine Verkehrsmittelwahl oder gemischte Modelle aus SP-Daten<sup>10</sup> oder RP-Daten<sup>11</sup>. Die geschätzten Parameter  $\beta$  aus diesen verschiedenen Studien können nicht miteinander verglichen werden, nur deren Verhältnisse untereinander.

Die Werte aus der Literatur wurden als Ausgangsgrößen für das vorliegende Modell gewählt. Das Ziel der Parametrisierung war, die im Modell berechneten Elastizitäten für die Verkehrsmittelwahl mit denjenigen aus Vrtic, Axhausen et al. (2003) und Vrtic, Meyer-Rühle et al. (2000) in Einklang zu bringen.

Bevor mit der Parametrisierung des Modells begonnen werden kann, muss ein Netz und eine Population definiert werden. Im folgenden Kapitel wird das in dieser Arbeit verwendete Netz und die Population vorgestellt, in den anschließenden Kapiteln wird die Parametrisierung vorgenommen.

---

<sup>10</sup> SP = stated preference, Befragungen zu hypothetischen Situationen

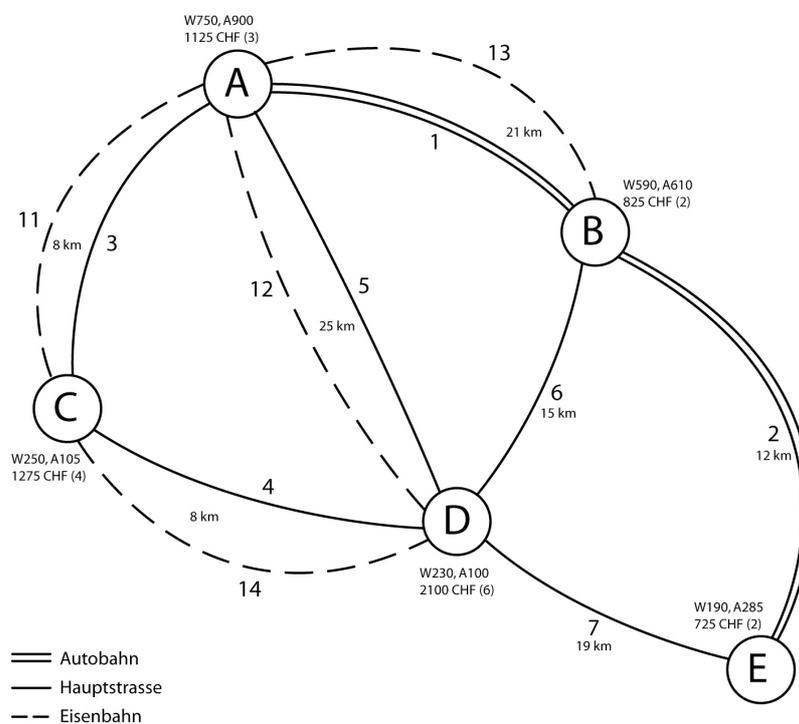
<sup>11</sup> RP = revealed preference, tatsächliches Verkehrsverhalten

## 5.1 Netz und Population

### 5.1.1 Netz

Das gewählte Netz ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Tabelle 3 gibt Auskunft über die Streckencharakteristiken. Um die Übersicht zu wahren, sind die Gegenrichtungen (Suffix "9") der Strecken sowohl im Netzschema als auch in den Tabellen weggelassen. In der Grafik ist bei den Wohnorten jeweils nach einem "W" die Kapazität als Wohnort, nach einem "A" die Anzahl Arbeitsplätze und der Bodenpreis<sup>12</sup> angegeben. Es ist zu beachten, dass die Angabe der Arbeitsplätze fest ist, das heisst, es arbeiten genau so viele Agenten im betreffenden Knoten, während die Wohnortkapazität lediglich ein Mass für das Wohnungsangebot darstellt und weich modelliert wird. In Klammern ist jeweils die Anzahl Attraktivitätspunkte für den Wohnort angegeben.

Abbildung 5 Schematisches Netz



<sup>12</sup> Die im Modell verwendeten Bodenpreise basieren auf Statistisches Amt (2009).

Das Netz lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Die Ortschaft A ist die grösste, fast die Hälfte aller Arbeitsplätze und etwa ein Drittel der Wohnortkapazität sind dort zu finden. A ist mit allen direkt anschliessenden Ortschaften durch eine Eisenbahnlinie verbunden, nach B führt sogar eine Autobahn und ist somit äusserst gut erschlossen. Mit einem Bodenpreis von 1'125 CHF und 3 Attraktivitätspunkten ist die Ortschaft gemessen an der Attraktivität eher teuer (375 CHF/Punkt), sonst jedoch gerade im Mittelfeld.
- Die Ortschaft B ist die zweitgrösste mit 610 Arbeitsplätzen und einer Wohnortkapazität von 590. Gemessen an den 2 Attraktivitätspunkten ist die Ortschaft mit einem Bodenpreis von 825 CHF relativ gesehen am teuersten: 412.5 CHF/Punkt, allerdings absolut gesehen eher billig.
- Die Ortschaft C ist wie Ortschaft D sehr klein, doch wesentlich günstiger als Ortschaft D. Relativ gesehen ist C am günstigsten (318.75 CHF/Punkt), da der Bodenpreis mit 1'275 CHF nicht viel über demjenigen der Ortschaft A liegt, aber die Ortschaft C attraktiver ist (4 Attraktivitätspunkte). C ist relativ gut erschlossen und profitiert von der Nähe zum grossen Arbeitgeber bzw. Arbeitnehmer A. Sowohl in C als auch in D hat es mehr Wohnorte als Arbeitsplätze.
- Die Ortschaft D ist sehr teuer (2'100 CHF), gemessen an seiner Attraktivität (6 Punkte) allerdings nicht so sehr. Die Ortschaft D ist bedeutend weiter entfernt von A als C von A entfernt ist, doch dank hervorragender Eisenbahnverbindung sind die Reisezeiten mit der Eisenbahn von D nach A etwa so lange wie von C nach A.
- Die Ortschaft E ist mit einem Bodenpreis von 725 CHF am günstigsten, allerdings auch nicht besonders attraktiv. E bietet mehr Arbeitsplätze (285) als Wohnorte (190) an.

Tabelle 3 Strecken im Netz

Strecken-ID	von–nach	Länge [km]	Typ	Kapazität [F]	Fahrzeit Nullbelastung [Min]	$\alpha$	$\beta$
1	A–B	21	Autobahn	20	14	0.6	3.0
2	B–E	12	Autobahn	20	9	0.8	3.6
3	A–C	8	Hauptstrasse	20	11	1.2	3.0
4	C–D	8	Hauptstrasse	20	11	1.2	3.0
5	A–D	25	Hauptstrasse	20	34	1.2	3.0
6	B–D	15	Hauptstrasse	20	20	1.2	3.0
7	D–E	19	Hauptstrasse	20	25	1.2	3.0
11	A–C	8	Eisenbahn	30	13	0.5	1.5
12	A–D	25	Eisenbahn	30	14	0.5	1.5
13	A–B	21	Eisenbahn	30	14	0.5	1.5
14	C–D	8	Eisenbahn	30	10	0.5	1.5
991	A–A	2	Arbeitsweg	90	16	0.5	1.5
992	B–B	2	Arbeitsweg	61	14	0.5	1.5
993	C–C	2	Arbeitsweg	11	11	0.5	1.5
994	D–D	2	Arbeitsweg	10	11	0.5	1.5
995	E–E	2	Arbeitsweg	29	12	0.5	1.5

### 5.1.2 Population

Für die vorliegende Arbeit wurde eine Population bestehend aus 2000 Agenten erzeugt. Für deren Generierung wurde einerseits das Statistik-Programm R verwendet, andererseits wurde selbst ein Python-Programm programmiert, das einzelne Aufgaben übernimmt. Die durchgeführten Schritte sollen hier kurz erläutert werden.

#### **Einkommen**

Für die Verteilungsfunktion der Einkommen der Population wurde die Lognormalverteilung gewählt, das heisst die Logarithmen der Einkommen sind normalverteilt.

Die Dichtefunktion der Lognormalverteilung für  $x > 0$  ist

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Das Maximum der Dichtefunktion besitzt den Funktionswert

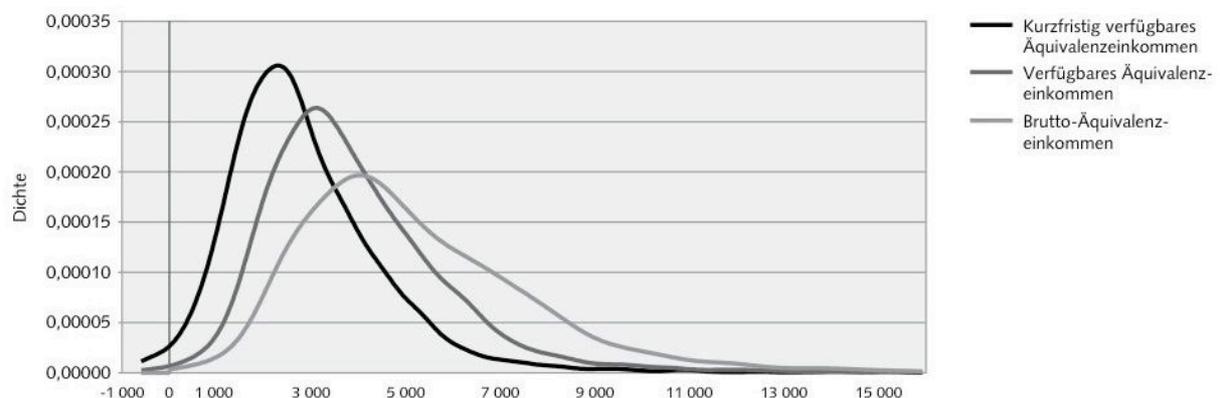
$$f_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{\frac{\sigma^2}{2} - \mu}$$

und erreicht diesen beim Wert  $x$  von

$$x_{\max} = e^{\mu - \sigma^2}$$

Abbildung 6 zeigt eine geglättete Verteilung (Dichtefunktion) der Brutto-Äquivalenzeinkommen<sup>13</sup> im Jahr 2004 und nennt als Mittelwert 5335 CHF.

Abbildung 6 Geglättete Verteilung der Äquivalenzeinkommen 2004



Quelle: Einkommens- und Verbrauchserhebung (EVE), Bis

Mit den oben genannten Formeln wurde die Dichtefunktion für das Brutto-Äquivalenzeinkommen nachgebildet ( $\mu = 8.5$  und  $\sigma = 0.45$ ). Mit Hilfe des Statistik-Programms R wurden 2000 Zufallszahlen unter Annahme einer Lognormalverteilung generiert und als Ein-

<sup>13</sup> Äquivalenzeinkommen: Verfügbares Haushaltseinkommen wird auf einen Einpersonenhaushalt umgerechnet.

kommen der Population verwendet. Die synthetische Population besitzt eine lognormalverteilte Einkommensstruktur.

### **Bevorzugte Ankunftszeit**

Für die bevorzugte Ankunftszeit am Morgen und am Abend wurde eine Normalverteilung angenommen mit Mittelwert am Morgen von 48 (entspricht 8:00 Uhr) und am Abend von 108 (entspricht 18:00 Uhr). Für die Standardabweichung wurde für beide Fälle 1 angenommen. Mit Hilfe des Statistik-Programms R wurden mit Verwendung dieser Werte 2000 bevorzugte Ankunftszeiten für den Morgen und den Abend generiert. Die beiden Werte sind unabhängig voneinander. Dies führt dazu, dass die verschiedenen Agenten unterschiedliche präferierte Arbeitstageslängen haben, alle jedoch genau 8 Stunden arbeiten. Da das zu frühe Ankommen am Abend nicht bestraft wird, ist die Unabhängigkeit der beiden Werte unproblematisch.

### **Wohn- und Arbeitsorte**

Den Agenten wurden mittels Zufallsgenerator ein Arbeitsort und ein initialer Wohnort zugeteilt, sodass die jeweiligen Arbeitsorte wie im Netzschema angegeben ausgelastet sind. In einem weiteren Schritt wird in einer ersten Referenz-Simulation ein Gleichgewichtszustand bei allen freigegebenen Freiheitsgraden gesucht. Dieses Gleichgewicht ist der Referenzzustand für alle weiteren Simulationen (siehe Kapitel 6.1).

### **Verbindung und Autoverfügbarkeit**

Für die Bestimmung der initial gewählten Verbindung und der Autoverfügbarkeit der Agenten wurde ein Python-Programm erstellt, da diese Eigenschaften vom Wohn- und Arbeitsort abhängig sind. Es gibt Quell-Ziel-Beziehungen, die ohne Auto nicht überwindbar sind, also muss in diesem Fall der betreffende Agent zwingend über ein eigenes Fahrzeug verfügen. Genaueres zum Ablauf des Programms siehe im Kapitel 4.1.

### **Einkommensklassen**

Um die Einflüsse des Einkommens untersuchen zu können, wurden vier Einkommensklassen gebildet, die je 500 Agenten beinhalten und Einkommensspannweiten gemäss Tabelle 4 aufweisen:

Tabelle 4 Einkommensklassen

Klasse	Niedrigstes Einkommen	Höchstes Einkommen
1. Klasse	6'621 CHF	26'759 CHF
2. Klasse	4'868 CHF	6'619 CHF
3. Klasse	3'609 CHF	4'867 CHF
4. Klasse	1'229 CHF	3'609 CHF

## 5.2 Verbindungswahl

Es wurde für die Parametrisierung zunächst die Nutzenfunktion der Verbindung parametrisiert und davon ausgehend die anderen Funktionen ins richtige Verhältnis dazu gesetzt. In Vrtic, Lohse et al. (2005) und Vrtic, Axhausen et al. (2003) sind für die  $\beta$ -Werte der Nutzenfunktionen SP-Schätzungen durchgeführt worden. Neben diesen Angaben stehen z.B. auch die Werte aus Hess, Erath et al. (2008) zur Verfügung.

Als Ausgangspunkt wurden die Werte für den IV aus Vrtic, Axhausen et al. (2003) übernommen, namentlich die Parameter "Konstante Auto", "Autoverfügbarkeit", "Reisezeit IV" sowie "Reisekosten IV". Da mit den Parametern für den öV (namentlich "Reisezeit öV", "Reisekosten öV", "Zugangszeit" und "Intervall") aus ebendieser Quelle die Elastizitäten zum Teil sehr stark von den gewünschten abwichen, wurden die Parameter "Reisezeit" und "Reisekosten" für den öV mit Hilfe der Parameterverhältnisse in Hess, Erath et al. (2008) angepasst. Jene Verhältnisse weichen zum Teil stark von denjenigen in Vrtic, Axhausen et al. (2003) ab. Die so erhaltenen Parameter führen zu etwas besseren Elastizitäten (siehe Tabelle 6). Die Parameter für den LV wurden Vrtic, Lohse et al. (2005) entnommen, jedoch verändert, um im vorliegenden Modell einen Anteil an externem Verkehr von ca. 50% zu erhalten. Die restlichen 50% sind Binnenverkehr und werden in diesem Modell nicht weiter untersucht.

Es ist wichtig zu beachten, dass bei der Implementierung dem öV kein Fahrplan zugewiesen wurde. Die Eisenbahn ist daher genau gleich flexibel bezüglich der Abfahrtszeit wie das eigene Fahrzeug. Da dies in der Wirklichkeit nicht zutrifft, muss die Benützung des öV mit einem Intervalls-Parameter bestraft werden, der berücksichtigt, dass die Agenten nicht zur gewünschten Zeit fahren können, sondern sich einem bestimmten Takt anpassen müssen. Es wird hierbei von einem Takt von 30 Minuten für alle Eisenbahnverbindungen ausgegangen.

Ferner muss auch berücksichtigt werden, dass im Gegensatz zum Auto die Benützung des öV mit Zugangszeiten verbunden ist. Es wird hier von einer Zugangszeit für alle öV-Angebote von 15 Minuten ausgegangen. Diese beiden Werte können nur für das gesamte Modell verändert werden, nicht jedoch für einzelne Verbindungen. Für die Autobenützer wird davon ausgegangen, dass jeder Agent über ein eigenes Fahrzeug verfügt, das mit niemandem geteilt wird (Autoverfügbarkeit = 1).

Für gemischte Strecken (öV und IV benutzt) werden die Konstanten für das Auto weggelassen, da ein grosser Vorteil des Autos (Bequemlichkeit) dann grösstenteils wegfällt.

Gemäss BFS (2007) beträgt der Anteil des öV an den Tagesdistanzen ungefähr 20%. Für dieses Modell wurde wegen fehlenden öV-Verbindungen auf wichtigen Strecken ein geringerer Modal Split von ca. 16% akzeptiert. Dazu musste zuerst ein kilometerabhängiger Preis für den IV und ein Preis für den öV festgelegt werden.

Für den Kilometerpreis des IV wurden 0.245 CHF gewählt. Dieser Preis ist zwar höher als die Grundkosten für den Betrieb in der Norm SN 641 827 (2008) angegeben sind, doch sind so auch implizit fixe Kosten berücksichtigt, die zwar eigentlich nicht kilometerabhängig sind, aber dennoch anfallen (wie Parkplatzgebühren, Versicherung, Reparaturen, etc.).

Für den öV-Preis wurde von einem durchschnittlichen Monatsabopreis von 140 CHF ausgegangen, was mit den Preisen auf dem Zürcher S-Bahnnetz mit den im Modell vorherrschenden Distanzen durchaus vergleichbar ist, siehe SBB (2009). Der Monatsabopreis wird auf 20 Arbeitstage aufgeteilt und anschliessend durch zwei (Verbindung am Morgen und am Abend) dividiert. Das ergibt einen öV-Preis von 3.50 CHF pro Fahrt, also einen Tagespreis von 7.00 CHF. Dieser Preis ist damit eher zu hoch angesetzt, da stillschweigend davon ausgegangen wird, dass der öV (und somit das Monatsabo) nur für den Arbeitsweg genutzt wird, was diesen teuer macht.

Die Konstanten im Modell werden so angepasst, dass keine positiven Nutzen entstehen können. Dafür wird von der Nutzenfunktion für die Verbindung der konstante Wert von 0.51 (Konstante Arbeitsweg) subtrahiert. Dieser Wert wird mit "Konstante Modell" bezeichnet. Er wurde bei der Beschreibung der Nutzenfunktionen der Einfachheit halber weggelassen.

### 5.3 Wohnortwahl

Bei der Wohnortwahl gilt es, die Anteile der Konstante, der Miete und der Attraktivität des Wohnorts ins richtige Verhältnis zu setzen. Auf Grund fehlender Literatur zu diesem Thema

müssen hier Annahmen getroffen werden. Es ist sicherlich zu beachten, dass die Mietpreise selbst bereits eine Funktion der Attraktivität eines Wohnortes sind. So berücksichtigt das hedonische Mietpreismodell in Löchl, Bürgle et al. (2007) die Distanz zum nächsten grossen See als ein Parameter des Mietpreises. Die Attraktivität soll aber im vorliegenden Modell nicht bloss preisbestimmend sein, sondern einen positiven Nutzen bringen und gegebenenfalls einen etwas zu hohen Mietpreis ausgleichen. Die Konstante soll die Einflüsse wie Bundessteuereinnahmen pro Kopf in der Gemeinde, Mietleerstand in der Gemeinde und Wohnfläche pro Wurzel der Anzahl Haushaltsmitglieder in sich vereinen, die für alle Wohnorte im Modell als gleich angenommen werden. Bei Verwendung der Parameter in Tabelle 5 zeigt sich, dass der Anteil des Mietpreisverhältnisses am Wohnort-Nutzen lediglich 1.5% beträgt. Für das Modell dieser Masterarbeit wird dieser Prozentanteil auf 10% erhöht. Für das Verhältnis von Mietpreisverhältnis:Attraktivität wird 5:1 gewählt. Das gewichtete Mittel der Attraktivität im vorliegenden Netz, wobei das Gewicht die Wohnortkapazität darstellt, beträgt etwa 3.1 Punkte. Unter Berücksichtigung der Nutzenfunktion in Kapitel 3.3.1, des gewichteten Mittelwerts der Attraktivität (3.1 Punkte), des gewichteten Mittelwerts der Bodenpreise (1'135 CHF), des mittleren Einkommens (5'335 CHF) und des gewählten Parameterverhältnisses für Mietpreisverhältnis und Attraktivität (5:1) ergibt sich folgendes Verhältnis (ohne Beachtung der Vorzeichen) für die Parameter:

$$\beta_{\text{const.}} : \beta_{\text{Bodenpreis}} : \beta_{\text{Attraktivität}} = 1 : 0.4 : 0.08$$

## 5.4 Zeitwahl

Bei der Zeitwahl sollen die Parameter für das verfrühte und das verspätete Ankommen gefunden werden, wobei vorerst lediglich das Verhältnis der beiden Parameter interessiert.

In Small (1982) wird die Wichtigkeit der Berücksichtigung von Zeitfragen (auch in Hinblick auf Kosten-Nutzen-Analysen) diskutiert. Dabei wird eine Nutzenfunktion vorgeschlagen wie sie in Kapitel 3.3.2 gezeigt wird. Small hat neben der Bestrafung für zu frühes und zu spätes Ankommen proportional zur Zeit auch noch eine Pauschalbestrafung für das zu späte Ankommen vorgeschlagen. Auf diesen Pauschalzuschlag wurde jedoch im Modell für diese Arbeit verzichtet, wie auch in Chaumet, Axhausen et al. (2007) die Nutzenfunktion für die Modellschätzung in dieser vereinfachten Form zur Anwendung kam. Small hat festgestellt, dass die Nutzer bereit sind, ihre Tagespläne um 1 bis 2 Minuten nach vorne zu verschieben (zu früh) bzw. 1/3 bis 1 Minute nach hinten zu verschieben (zu spät), um eine Minute Reisezeit zu gewinnen. Es ist hierbei zu beachten, dass dies Mittelwerte sind und die tatsächlichen Werte stark von der jeweiligen Person und deren Arbeitsbedingungen abhängig sein können.

Wird der Parameter der Reisezeit mit  $\alpha$  bezeichnet und die Parameter für zu frühes und zu spätes Ankommen mit  $\beta$  und  $\gamma$ , dann gilt nach obigen Aussagen:

$$\alpha : \beta : \gamma = 1 : 1-0.5 : 1-3$$

In Chaumet, Axhausen et al. (2007) wurden vergleichbare Werte bestimmt:

$$\alpha : \beta : \gamma = 2 : 1 : 3$$

Der Parametrisierung dieser Arbeit werden letztere Verhältnisse zu Grunde gelegt. Wird für  $\alpha$  der Mittelwert der  $\beta$  für die Reisezeit mit IV und öV gewählt ( $\alpha = \beta_{\text{Mittel}} = -2.69$  gemäss Tabelle 7), so werden die Parameter zu

$$\beta = -1.35$$

$$\gamma = -4.04$$

bestimmt. Oben genannte Parameter gelten für den Weg zur Arbeit. Für den Heimweg am Abend wird das  $\beta$  gleich 0 gesetzt und  $\gamma$  gleich wie am Morgen gewählt.

## 5.5 Gewichtung

Im Folgenden geht es darum, die drei Nutzenfunktionen Wohnortwahl, Zeitwahl und Verbindungswahl untereinander zu gewichten.

Da die Parameter für die Zeitwahl direkt aus den Parametern für die Verbindungswahl abgeleitet wurden, stimmt die Gewichtung dieser beiden Nutzenfunktionen bereits. Es muss nun noch die Wohnortwahl mit der Verbindungswahl in das richtige Verhältnis gebracht werden.

In Löchl, Bürgle et al. (2007) wurde ein Standortwahlmodell vorgestellt, das modelliert, wie im Grossraum Zürich Wohnstandorte gewählt werden. In der dort definierten Nutzenfunktion für einen Wohnort sind neben anderen folgende Faktoren vertreten: Bundessteuereinnahmen pro Kopf in der Gemeinde, Mietleerstand in der Gemeinde, Verhältnis von Miete zu Haushaltseinkommen (Mietpreisverhältnis), Wohnfläche pro Wurzel der Haushaltsmitglieder und die Entfernung zum Arbeitsplatz. Alle genannten Parameter ausser der Distanz zum Arbeitsort beziehen sich dabei direkt auf die Wohnung bzw. auf die Gemeinde der Wohnung. All diese Einflüsse sind im Modell dieser Masterarbeit in der Nutzenfunktion der Wohnortwahl vertreten. Der Einfluss der Nähe zum Arbeitsort wird in der Verbindungswahlfunktion berücksichtigt. Wird nun im Standortwahlmodell des Grossraums Zürich untersucht, in welchem Verhältnis die erstgenannten Parameter zum Parameter der Entfernung zum Arbeitsort steht,

kann abgeschätzt werden, in welchem Verhältnis die Nutzenfunktionen für Wohnortwahl und Verbindungswahl im vorliegenden Modell sein müssen.

In Tabelle 5 sind die geschätzten Parameter für das Modell gemäss Löchl, Bürgle et al. (2007) zu finden. Ebenso sind die Werte angegeben, die in die Nutzenfunktion eingesetzt werden.

Tabelle 5 Parameter für Standortwahl

Konstante	$\beta$	Werte
Entfernung zum Arbeitsort (km)	-5.459	5 – 35
Exponent der Entfernung zum Arbeitsort	0.167	–
Bundessteuereinnahmen/Kopf in der Gemeinde	-0.026	5.123
Mietleerstand in der Gemeinde	-0.224	0.03
Verhältnis Miete zu Haushalteinkommen	-0.546	0.33
Wohnfläche/Wurzel der Haushaltsmitglieder	-0.289	44.0

Quelle: Löchl, Bürgle et al. (2007)

Der Nutzen für die Wohnortwahl bei Verwendung der in obiger Tabelle genannten Werte ergibt im Standortwahlmodell einen Nutzen von  $-13.04$ . Bei der Annahme von Distanzen zur Arbeit von 5 bis 35 km (wie sie im verwendeten Modell vorkommen) schwankt der Nutzen für die Arbeitsortsdistanz im Standortwahlmodell zwischen ungefähr  $-7.14$  und  $-9.88$ , womit der prozentuale Anteil des Wohnorteinflusses zwischen 57% und 65% liegt. Für das in dieser Arbeit verwendete Modell werden die Parameter so bestimmt, dass der Nutzen des Wohnstandorts in diesen Bereich zu liegen kommt.

Dieser Anteil wird mit folgenden Parametern erreicht:

$$\beta_{\text{const.}} = -3.50$$

$$\beta_{\text{Bodenpreis}} = -1.4$$

$$\beta_{\text{Attraktivität}} = 0.28$$

## 5.6 Überprüfung der Elastizitäten

Im Folgenden werden die Elastizitäten des Modells bestimmt. Blum, Karmann et al. (2003) definieren die Eigen- und Kreuzelastizität wie folgt:

$$\text{Eigenelastizität} = \frac{\Delta x_i}{\Delta p_i} \cdot \frac{p_i}{x_i}$$

$$\text{Kreuzelastizität} = \frac{\Delta x_i}{\Delta p_j} \cdot \frac{p_j}{x_i}$$

mit  $x$  = Nachfrage

$p$  = Ausprägung einer unabhängigen Variable, z.B. Preis

Diese sehr allgemeine Definition soll etwas an das vorliegende Problem angepasst werden. Nach Louviere, Hensher et al. (2000) misst die Eigenelastizität (oder auch direkte Elastizität) die relative Veränderung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative in Funktion der relativen Änderung eines Attributs derselben Alternative. Die Kreuzelastizität misst die relative Veränderung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative in Funktion der relativen Änderung eines Attributs einer konkurrierenden Alternative. Die Elastizitäten berechnen sich:

$$\text{Eigenelastizität} = \beta_{ik} X_{ikn} (1 - P_{in})$$

$$\text{Kreuzelastizität} = -\beta_{jk} X_{jkn} P_{jn}$$

mit  $P_j$  = Auswahlwahrscheinlichkeit der Alternative  $j$  (siehe Kapitel 2.3.2)

$X_k$  = Einflussgrößen

Es ist zu beachten, dass die Kreuzelastizität für die Variante  $i$  unabhängig von den Attributen von  $i$  ist und nur von denjenigen von  $j$  abhängt. Die Kreuzelastizität verbunden mit der Variante  $j$  ist bei einem Multinomial Logit Model für alle Varianten  $i \neq j$  gleich. Dies ist eine Folge der unabhängig und gleichförmig verteilten Zufallsterme (IID).

Für dieses Modell wurden die Elastizitäten nicht anhand der oben gezeigten Formeln berechnet, sondern direkt aus den Simulationen mit der Formel nach Blum, Karmann et al. (2003) bestimmt. Dazu wurden am Referenzfall für nur Verbindungswahl ( $r$ ) Änderungen des Angebots in beide Richtungen (Preiserhöhung und Preisvergünstigung, Reisedauererhöhung und -verringerung) vorgenommen. Zur Ermittlung der Elastizitäten sind fünf Simulationen durchgeführt und gemittelt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zu finden. Ebenso in der Tabelle angegeben sind die Werte, wie sie in Vrtic, Axhausen et al. (2003) und Vrtic, Meyer-Rühle et al. (2000) bestimmt wurden. Für letztere sind Spannbreiten angegeben. Es ist zu be-

achten, dass für die simulierten Elastizitäten die Nachfrage des IV in zurückgelegten Fahrzeugkilometern gemessen wurde, die Nachfrage des öV hingegen in Anzahl gelösten Billetten. Ein Vergleich der im Modell bestimmten Werte mit den Werten aus der Literatur zeigen, dass manche Werte gut übereinstimmen, während andere stark abweichen.

Tabelle 6 Elastizitäten

Variablen- veränderung	Nachfrage	Elastizität Modell	Elastizität Vrtic et al. (2003)	Elastizität Vrtic et al. (2000)	Differenz zu Vrtic et al. (2003)
Reisezeit IV	IV	-0.49	-0.67	-0.30 / -0.50 <sup>14</sup>	0.18
	öV	0.94	0.78		0.16
Preis IV	IV	-0.31	-0.31	-0.01 / -0.03 <sup>15</sup>	0.00
	öV	0.68	0.37		0.31
Reisezeit öV	IV	0.11	0.48		-0.37
	öV	-0.61	-0.56	-0.60 / -1.00	-0.05
Preis öV	IV	0.11	0.44		-0.33
	öV	-0.54	-0.51	-0.25 / -0.40	-0.03

Relativ gute Übereinstimmung mit Vrtic, Axhausen et al. (2003) sind bei den Eigenelastizitäten vom IV-Preis, von der öV-Reisezeit und vom öV-Preis und bei den Kreuzelastizitäten von der IV-Reisezeit festzustellen. Ebenfalls verhältnismässig gut sind die Eigenelastizität von der IV-Reisezeit und die Kreuzelastizität vom IV-Preis. Grosse Unterschiede sind bei den Kreuzelastizitäten von der öV-Reisezeit und dem öV-Preis festzustellen. Das heisst, dass die IV-Nachfrage sehr träge auf Veränderungen im öV-Angebot reagiert. Dass nicht für alle (wichtigen) Verbindungen im Netz öV-Alternativen zum IV existieren, ist sicherlich ein Grund für diese grosse Abweichung.

<sup>14</sup> Eigentlich "Geschwindigkeit MIV" mit positivem Vorzeichen

<sup>15</sup> Eigentlich "PW-Kosten"

Trotz der genannten Abweichungen können die bestimmten Elastizitäten als plausibel und mit den Schweizer Verhältnissen als vergleichbar befunden werden. Da auch die anderen Randbedingungen wie Modal Split oder prozentualer Anteil des Wohnnutzens eingehalten sind, wird diese Parametrisierung akzeptiert.

## 5.7 Ergebnis

Unten stehende Tabelle 7 zeigt zusammenfassend das Ergebnis der Parametrisierung. Es werden im Folgenden die Fragestellungen dieser Masterarbeit mit diesen Parametern beantwortet.

Tabelle 7 Ergebnis der Parametrisierung

Variable	$\beta$	Variable	$\beta$
Bodenpreis	-1.4	Attraktivität	0.28
Konstante	-3.50		
Verfrühung Morgen	-1.35	Verspätung Morgen	-4.04
Verfrühung Abend	0.0	Verspätung Abend	-4.04
Konstante Auto	-0.839	Fahrzeit öV	-2.471
Fahrzeit Auto	-2.916	Zugangszeit öV	-3.354
Verfügbarkeit Auto	1.118	Durchschn. Zugzeit	0.25 h
Reisekosten Auto	-0.191	Intervall öV	-0.868
Benzinpreis	0.245 CHF/km	Durchschn. Intervall	0.5 h
Konstante Arbeitsweg	0.510	Reisekosten öV	-0.217
Reisezeit Arbeitsweg	-5.000	Konstante Modell	-0.510

## 6 Simulation

Im folgenden Kapitel soll die Implementierung des Modells (wie sie in Kapitel 4 vorgestellt wurde) angewandt werden um die eingangs gestellten Fragen zu beantworten. Dazu werden am bestehenden Netz (siehe Kapitel 5.1.1) verschiedene Änderungen vorgenommen und deren Auswirkungen beurteilt.

### 6.1 Referenzfall

Zuerst wird ein sogenannter Referenzfall für alle drei Entscheidungsmechanismen berechnet. Dazu wird eine Simulation mit den in Kapitel 5 bestimmten Parametern durchgeführt, wobei alle Freiheitsgrade offen sind, d.h. die Agenten können unter sämtlichen Alternativen auswählen. Das gefundene Gleichgewicht ist der Referenzzustand und wird in das Agentenfile abgespeichert, das den nachfolgenden Simulationen als Ausgangslage dient. Bei festgehaltenem Wohnort und festgehaltener Abfahrtszeit gelten für die Agenten die im Referenzzustand festgehaltenen Entscheidungen. Es ist wichtig zu beachten, dass für jedes Entscheidungskriterium ein eigenes Agentenfile existieren muss, da jedes Entscheidungsmodell zu einem anderen Gleichgewichtszustand führt (siehe Kapitel 6.2).

In diesem Kapitel soll der bestimmte Referenzzustand für MNL kurz vorgestellt und insbesondere die Einhaltung der während der Parametrisierung aufgestellten Randbedingungen überprüft werden.

Für die Auswertung (auch in den nachfolgenden Kapiteln) wurden die Datenbanksoftware *FileMaker Pro* und die Statistiksoftware *SPSS Statistics 17.0* verwendet.

### 6.1.1 Verteilung auf Wohn- und Arbeitsorte

Die Agenten verteilen sich im Referenzzustand gemäss Tabelle 8 auf die verschiedenen Wohn- und Arbeitsorte.

Tabelle 8 Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Referenzfall)

Arbeiten Wohnen	A	B	C	D	E	Total	Auslastung
A	509	69	20	15	8	621	83%
B	80	302	6	8	80	476	81%
C	195	34	52	29	6	316	126%
D	106	85	27	46	19	283	123%
E	10	120	0	2	172	304	160%
Total	900	610	105	100	285	2000	

Von den 2000 Agenten benutzen 46% externe Verbindungen, wovon 16% mit dem öffentlichen Verkehr zurückgelegt werden. Der geforderte Modal Split von 20% ist mit einer Abweichung von -20% annähernd erreicht und die Bedingung kann als erfüllt betrachtet werden.

Der durchschnittliche Nutzen der Verbindungen ist  $-3.27$  und des Wohnorts  $-4.85$ , somit beträgt der Anteil des Wohnortes im Schnitt ca. 60%, was der geforderten Bedingung entspricht<sup>16</sup>. Die Nutzensumme<sup>17</sup> des Referenzfalls beträgt  $-17'749$ .

### 6.1.2 Streckenbelastungen

Im Anhang A 2 sind die Streckenauslastungen für den Referenzfall sowie für die drei Szenarien zu finden. Im Referenzfall sind die Strecken teilweise überlastet. Die Auslastung der Strecke S6 ist maximal 90%, während die Strecken S2 und S3 zeitweise sogar eine Belastung

<sup>16</sup> Für die Bestimmung des Wohnortnutzenanteils wurde der Zeitnutzen weggelassen, da im Standortwahlmodell kein Zeitnutzen vorhanden ist und nur das Verhältnis von Wohnort zur Nähe zum Arbeitsplatz betrachtet wurde.

<sup>17</sup> Summe der deterministischen Nutzen der gewählten Alternativen aller Agenten

von über 100% haben. Die Zeiten der Belastung streuen sehr stark, was auf unterschiedliche Präferenzen der Ankunftszeit im Büro zurückzuführen ist. Im Gleichgewichtszustand ist es allen Agenten möglich, ohne Verspätung zum Arbeitsort zu gelangen. Bei der Simulation der Massnahmenpakete haben die Zeitnutzen auch jeweils nur einen geringen Anteil. Dies ist einerseits die Folge der Parametrisierung, andererseits liegt es auch daran, dass die bevorzugten Ankunftszeiten womöglich zu stark streuen, sodass ein gutes Ausweichen möglich ist und dass die Strassen zu gering ausgelastet sind.

### 6.1.3 Ist-Zustand

Da der gefundene Referenzzustand mit vielen Unsicherheiten behaftet (wie es das Multinomial Logit Model modelliert) und somit in seiner konkreten Ausprägung bis zu einem gewissen Grad wegen des Zufallsterms zufällig ist, soll das bestehende Netz mehrmals berechnet werden, um einen gemittelten Gleichgewichtszustand zu finden. Dazu werden für das bestehende Netz für alle drei Freiheitsgradkonfigurationen (r, a-r und z-a-r) für alle drei Entscheidungsmechanismen (MAX, PSL, MNL) je fünf Simulationen durchgeführt. Für die Bewertung der Nutzenveränderungen gemäss KNA und Logsum wird das Mittel über die jeweils fünf Simulationen verwendet. Der vorhin vorgestellte Referenzzustand ist also lediglich die Grundlage des Agentenfiles.

## 6.2 Entscheidungsmechanismen

Anhand der fünf Simulationen des ursprünglichen Netzes soll nun der Einfluss des gewählten Entscheidungsmechanismus auf das Gleichgewicht untersucht werden. In Kapitel 2.3.2 wurden die drei Entscheidungsmechanismen Multinomial Logit Model (MNL), Path Size Logit (PSL) und maximaler Nutzen (MAX) eingeführt. In Tabelle 9 ist die Verteilung der Agenten auf die Wohn- und Arbeitsorte für die drei verschiedenen Entscheidungsmechanismen und für den Referenzzustand (REF) bei voller Wahlfreiheit (z-a-r) dargestellt.

Es wäre zu erwarten, dass MNL und REF die gleiche Verteilung ergeben, da die selben Konfigurationen verwendet wurden. Der einzige Unterschied dabei ist, dass REF eine einzelne Simulation ist, während MNL das Mittel über fünf Simulationen. Bis auf die Beziehung A–A und C–A ist diese Forderung ziemlich gut erfüllt.

Es zeigt sich sehr deutlich, dass bei MAX die internen Beziehungen sehr stark zunehmen, wobei hier die Ortschaft C eine Ausnahme bildet. Der Anteil an externen Beziehungen beträgt nur noch ca. 25%, wobei der öffentliche Verkehr gar nicht benutzt wird. Ebenfalls zeichnet sich ab, dass bei PSL die internen Beziehungen (ca. 56%) häufiger sind als bei MNL (ca.

52%). Die öV-Benutzung ist bei PSL mit ca. 15% der externen Beziehungen gegenüber MNL mit ca. 18% ebenfalls geringer.

Dass die internen Beziehungen bei MAX sehr stark zunehmen ist einleuchtend, da dabei die Wegkosten grösstenteils entfallen und somit der Nutzen grösser wird. Externe Wege werden interessant, wenn der betreffende Agent in einem sehr teuren Ort arbeitet und es sich lohnt, Wegkosten auf sich zu nehmen, um günstiger wohnen zu können. Für 25% der Population ist dies der Fall. Es fällt auch auf, dass für externe Beziehungen praktisch nur angrenzende Ortschaften gewählt werden, die Verbindungen zu weiter entfernten Orte bleiben vollständig unbenutzt. Da das Autofahren mit einer "Konstante Auto" belohnt wird (Freude am Autofahren) und die Wege zu kurz sind, um von den geringeren Zeitkosten des öffentlichen Verkehrs zu profitieren, wird der öV bei MAX nicht benutzt.

Die Zahl der externen Beziehungen ist bei PSL geringfügig kleiner als bei MNL. Das liegt daran, dass PSL die Ähnlichkeit von Alternativen berücksichtigt. Dabei erhöht sich die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative, wenn die darin benutzten Wege in wenig anderen Alternativen vorkommen. Die internen Wege werden nur dann benutzt, wenn der Agent im Arbeitsort wohnt. Das heisst, alle externen Beziehungen sind sich so gesehen etwas ähnlicher und damit ist die Auswahlwahrscheinlichkeit einer internen Beziehung höher und somit auch deren Zahl. Umgekehrt sind die externen Beziehungen bei MNL zahlreicher als bei PSL.

Tabelle 9 Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (z-a-r)

Arbeiten		A	B	C	D	E
Wohnen						
A	MNL	471	70	27	11	7
	PSL	507	62	28	9	2
	MAX	658	0	1	0	0
	REF	509	69	20	15	8
B	MNL	79	307	4	10	82
	PSL	73	338	1	9	87
	MAX	0	479	0	0	59
	REF	80	302	6	8	80
C	MNL	223	30	48	29	6
	PSL	227	5	47	24	1
	MAX	242	0	24	0	0
	REF	195	34	52	29	6
D	MNL	118	78	25	48	23
	PSL	89	70	30	54	20
	MAX	0	13	80	100	0
	REF	106	85	27	46	19
E	MNL	10	125	2	2	167
	PSL	4	135	0	3	175
	MAX	0	118	0	0	226
	REF	10	120	0	2	172

Tabelle 10 zeigt die Nutzensumme und den Logsum für die drei Entscheidungsmechanismen bei den drei Freiheitsgradkonfigurationen. Zuerst fällt auf, dass die Werte für das Entscheidungskriterium MAX sowohl bei der Nutzensumme als auch beim Logsum höher sind als bei den Kriterien MNL und PSL. Diese Tatsache ist einleuchtend, da bei MAX die Agenten aufgrund des fehlenden Zufallsterms stets die objektiv beste Alternative wählen. Während der Logsum für die Freiheitsgradkonfiguration z-a-r für MNL und PSL etwa gleich gross ist, unterscheiden sich die Logsums dieser beiden Entscheidungskriterien bei den anderen beiden Freiheitsgradkonfigurationen (r und a-r) stärker. Grund hierfür ist, dass bei den ersten beiden Konfigurationen für die beiden Entscheidungskriterien unterschiedliche Referenzfälle bestehend, die wegen des Zufallsterms nicht optimal und unterschiedlich sind. Wegen festgehaltener Freiheitsgrade können diese Werte nicht grenzenlos verbessert werden und unterscheiden sich dadurch voneinander stärker als bei voller Wahlfreiheit (z-a-r), bei der nicht optimale Wohnorte gewechselt werden können. Der Logsum kann aufgrund unterschiedlicher Anzahl

von berücksichtigten Alternativen nicht über die verschiedenen Freiheitsgradkonfigurationen verglichen werden.

Im Gegensatz zum Logsum können die Nutzensummen ohne Einschränkung miteinander verglichen werden, da es sich hierbei nur um die deterministischen Nutzenanteile der tatsächlich gewählten Alternativen handelt. Die Nutzensumme bei PSL ist um ca. 3% höher als bei MNL. Der Grund für das bessere Abschneiden von PSL ist in der Anzahl der externen Beziehungen zu finden: sie ist beim PSL kleiner. Wie bereits erwähnt, sind mit externen Beziehungen grössere Kosten verbunden (daher die kleine Anzahl derer bei MAX) und somit verringert sich der Nutzen. Bei MAX und MNL nimmt die Nutzensumme von r nach a-r zu, bei PSL bleibt sie ungefähr gleich. Bei der Freigabe aller Freiheitsgrade aber geschieht etwas Seltsames: Bei MAX und MNL nimmt die Nutzensumme wieder ab, nur bei PSL nimmt sie zu, wie man es eigentlich erwarten würde.

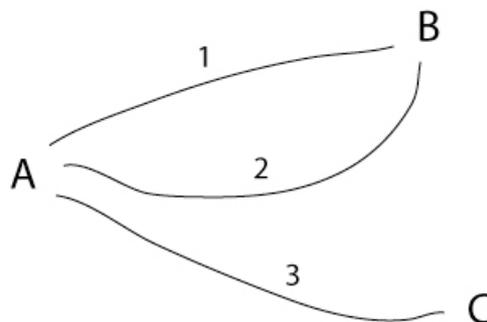
Tabelle 10 Logsum und Nutzensumme

	r	a-r	z-a-r
MAX			
Logsum	-15'921	-9'087	-7'477
Nutzensumme	-16'015	-15'658	-15'995
PSL			
Logsum	-16'492	-9'206	-7'233
Nutzensumme	-17'360	-17'365	-17'310
MNL			
Logsum	-16'604	-9'334	-7'215
Nutzensumme	-17'788	-17'758	-17'837

Dass beim Entscheidungskriterium MNL bei grösster Wahlfreiheit die Agenten ihre Situation nicht unbedingt verbessern, sondern verschlechtern lässt sich anhand des folgenden Beispiels erklären: Man stelle sich ein Mininetz wie in Abbildung 7 vor. Alle Agenten arbeiten in A und können in B oder C wohnen. Nur die Verbindungen sind mit Nutzen (bzw. Kosten) verbunden, die Wohnorte nicht. Die ausgewerteten Nutzenfunktionen seien für die Strecke S1 -4.0, für die Strecke S2 -5.0 und für S3 -8.0. Da die Strecke S3 dermassen unattraktiv ist, las-

sen sich 99 der 100 Bewohner des Systems in der Ortschaft B nieder und nur eine Person wohnt in C. Die Bewohner verteilen sich dabei wie folgt auf die Strecken: 72 Agenten auf der S1, 27 Agenten auf der S2 und 1 Agent auf der S3. Die Nutzensumme beträgt hierbei -432. Eine Infrastrukturmassnahme verbessert das Netz so, dass die ausgewertete Nutzenfunktion auf der Strecke S2 neu -4.5 und auf der S3 -5.5 ergibt. Wird zunächst nur die Verbindungswahl freigegeben, so bleibt ein Agent auf der S3, wegen der Verbesserung der S2 fahren nun mehr dort (37 Agenten) und weniger auf der S1 (62 Agenten). Die Nutzensumme hat sich verbessert: -425. Bei voller Wahlfreiheit geschieht nun etwas anderes: es verlagern sich mehr Agenten auf den Wohnort C, gemäss dem stochastischen Ansatz: 12 Agenten wohnen neu in C und die Nutzensumme beträgt -435. Wegen der vermehrten Benützung der relativ schlechten Verbindung S3 hat sich die Nutzensumme gesamthaft verschlechtert, obwohl sie sich bei nur Verbindungswahl verbessert hat.

Abbildung 7 Netzbeispiel zum Abwandern auf schlechtere Alternativen



Dieses kleine Beispiel zeigt sehr deutlich, was auch im grösseren geschehen kann: Mit der Eröffnung neuer Alternativen, die schlechter als die bestehenden sind, findet ein Abwandern von der besseren auf die schlechtere statt.

Im weiteren Verlauf der Analyse werden zwar alle drei Entscheidungskriterien berücksichtigt, doch das Gewicht wird auf das Multinomial Logit Model gelegt. Grund hierfür ist, dass wie bereits bei der Einführung der verschiedenen Entscheidungsmechanismen erwähnt wurde, die Annahme, dass die Agenten immer die beste Alternative ohne Zufallsterm wählen (MAX) nicht realistisch ist. Die Schwierigkeit des Path Size Logit Models ist die Vernachlässigung des Verkehrsmittels. Der Path Size Faktor berücksichtigt nur, ob eine Verbindung in einer Re-

lation vorkommt oder nicht, beachtet aber nicht, ob es sich dabei um Individualverkehr oder öffentlichen Verkehr handelt. Stellt man sich zwischen zwei Knoten vier Verbindungen vor, wovon je zwei Autostrecken und je zwei Eisenbahnstrecken sind, so stellt sich die Frage für den Entscheider in erster Linie, ob er mit dem Individualverkehr oder mit dem öffentlichen Verkehr reisen möchte und erst in einem zweiten Schritt wäre dann die Frage zu klären, welche der beiden Verbindungen mit dem gewünschten Verkehrsmittel gewählt wird. Da diese wichtige Tatsache nicht modelliert wurde<sup>18</sup>, wird das Gewicht auf das klassische Multinomial Logit Model gelegt.

### 6.3 Szenarien

Das bestehende Netz soll mit der Einführung von verschiedenen Massnahmen verbessert werden. Dabei wurden drei verschiedene Massnahmenpakete (Szenarien) erarbeitet und einzeln ausgewertet. Jedes Massnahmenpaket wurde jeweils zehnmal mit dem MNL und je fünfmal mit MAX und PSL in jeder der drei Freiheitsgradkonfigurationen (z-a-r, a-r und r) simuliert und anschliessend der Mittelwert der Ergebnisse weiterverwendet.

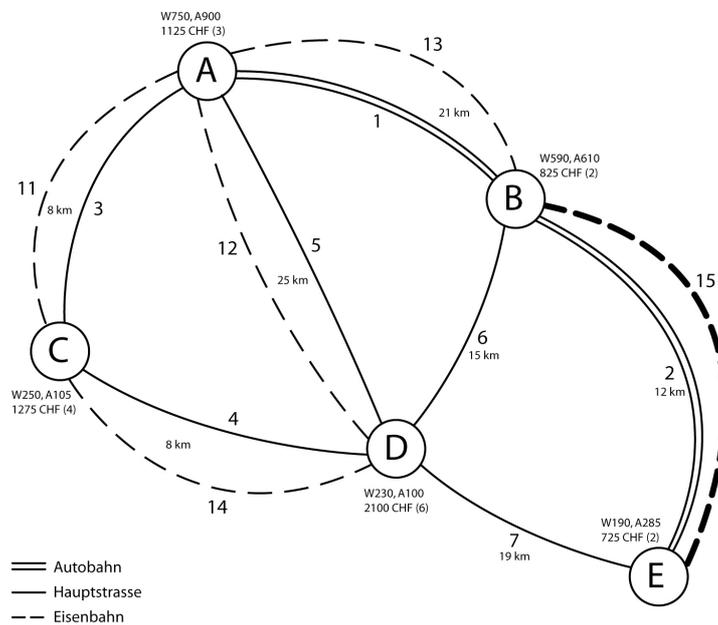
#### 6.3.1 Massnahmenpaket A – Verbesserung des öffentlichen Verkehrs

Mit diesem Paket soll die Benützung des öffentlichen Verkehrs gefördert werden. Dazu wird eine neue Eisenbahnstrecke von B nach E erstellt mit einer Reisezeit von 11 Minuten. Ausserdem werden die Reisezeiten auf allen bisherigen Eisenbahnstrecken um 15% reduziert und alle Taktintervalle auf 15 Minuten verkürzt.

---

<sup>18</sup> Um den Effekt der Verkehrsmittelwahl zu berücksichtigen würde sich z.B. das Nested Logit Modell eignen. Siehe hierzu auch Vrtic (2003).

Abbildung 8 Schematisches Netz (Massnahmenpaket A)



**OD-Matrix**

Tabelle 11 zeigt die OD-Matrix für das Massnahmenpaket A bei voller Wahlfreiheit (z-a-r). Sie verändert sich im Vergleich zum Referenzfall (Tabelle 8) wie folgt:

- in A arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in den Ortschaften C oder D
- in B arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in den Ortschaften A, C oder E
- in C arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in der Ortschaft A
- in E arbeitende Agenten wohnen neu etwas vermehrt in den Ortschaften B und D

Es ist allgemein eine Tendenz festzustellen, dass die Agenten von A nach C oder D ziehen. Die Ortschaft A ist Hauptarbeitgeber im Netz und bei höheren Transportkosten sind die Agenten eher gezwungen, ihren Wohnsitz in der Nähe, also ebenfalls in A, zu suchen. Mit der Einführung des Viertelstundentaktes und der Reduktion der Reisezeiten auf dem öV-Netz sinken die generalisierten Kosten für den Transport. Daher findet allgemein ein Abwandern aus der Ortschaft A statt. Dennoch gibt es auch Zuwanderer, z.B. aus der teureren Ortschaft C. Dies wiederum ist die Folge davon, dass ärmere Agenten nun in billigere Ortschaften ziehen können. Es wäre also insgesamt eine Tendenz zu erwarten, dass sich in den billigeren Ortschaften eher ärmere und in den teureren Ortschaften eher reichere Agenten ansammeln. Ein Blick auf

Tabelle 22 jedoch kann diese Annahme nicht vollständig bestätigen. Problematisch ist hierbei vermutlich die Einkommensklassenbildung: alle vier Klassen beinhalten zwar gleich viele Agenten, haben jedoch sehr unterschiedliche Spannweiten der Einkommen. So ist in der 1. Klasse die Differenz zwischen dem reichsten und ärmsten Agenten etwa 20'000 CHF, in der 3. Klasse hingegen bloss etwa 1'200 CHF, was starke Auswirkungen auf die Bewertung der Wohnnutzen hat. Auch wenn der Mittelwert der Einkommen pro Wohnort betrachtet wird, wird obige These nur teilweise bestätigt: in den Ortschaften A, B und C nimmt der Mittelwert des Einkommens ab, in den Ortschaften D und E nimmt er zu, d.h. die Bevölkerung ist in diesen Ortschaften nach der Massnahme reicher als vorher. Ansatzweise geschieht eine Umlagerung in den Einkommensklassen, jedoch nicht sehr eindeutig. Da die Arbeitsplätze der Agenten ihre Arbeitsplätze unabhängig von ihrem Einkommen zugeteilt erhalten haben, kann es dazu kommen, dass dennoch reichere Agenten in der billigen Ortschaft E wohnen. Für eine weitere Diskussion zum Einfluss des Einkommens sei auf Kapitel 7.2 verwiesen.

Es ist festzustellen, dass die Zahl der externen Beziehungen zunimmt (von 46% auf 53%). Das liegt daran, dass die Wegkosten dank besserer öV-Verbindungen abgenommen haben, sodass die Zielwahl besser den eigenen Bedürfnissen angepasst werden kann und externe Verbindungen schlicht billiger und damit attraktiver werden.

Tabelle 11 Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Massnahmenpaket A)

Arbeiten Wohnen	A	B	C	D	E	Total	Auslastung
A	418	75	29	12	11	545	73%
B	82	284	3	9	89	467	79%
C	232	41	43	27	8	351	140%
D	149	84	28	49	23	332	145%
E	20	126	2	3	154	304	160%
Total	900	610	105	100	285	2000	

Tabelle 12 Veränderung der OD-Matrix (Massnahmenpaket A)

Arbeiten Wohnen	A	B	C	D	E	Total	Auslastung <sup>19</sup>
A	-91	+6	+9	-3	+3	-76	-10%
B	+2	-18	-3	+1	+9	-9	-2%
C	+37	+7	-9	-2	+2	+35	+14%
D	+43	-1	+1	+3	+4	+49	+22%
E	+10	+6	+2	+1	-18	±0	±0%

Der Modal Split für den öffentlichen Verkehr beträgt bei der Konfiguration r 21.9%, bei der Konfiguration a-r 21.7% und bei der Konfiguration z-a-r 29.7%. Es ist einleuchtend, dass der Modal Split für r und a-r etwa gleich, jedoch höher als im Referenzzustand (ca. 16%) ist. Somit ist das politische Ziel dieses Massnahmenpakets erreicht, die öV-Benutzung ist angestiegen. Doch wirklich zum Tragen kommt der Effekt erst bei freier Wohnortwahl: die Agenten können so umziehen, dass sie besser von den öV-Verbindungen profitieren, wenn sie z.B. bis anhin an einem Ort wohnten, der nicht mit dem öV erschlossen ist oder ungünstige Verbindungen anbietet.

### **Streckenbelastungen**

Im Anhang A 2 sind die Streckenbelastungen für den Referenzfall sowie die drei Szenarien zu finden. Mit der neuen Situation verändern sich natürlich auch diese Streckenbelastungen<sup>20</sup>. Es soll hier nur auf einige interessante Aspekte hingewiesen werden. Wird davon ausgegangen, dass vorerst nur die Verbindung gewählt werden kann, so nehmen die Belastungen und Spitzen auf den Strecken S1, S2, S4 und S5 ab. Dies ist sehr gut nachvollziehbar, da für alle diese Autostrecken alternative Eisenbahnverbindungen existieren, das heisst, es findet hier ein Wechsel des Verkehrsmittels statt. Auch bei der Betrachtung von anderen Streckenbelastungen ist eine Verlagerung von der Strasse auf die Schiene festzustellen, sowie, dass die Spitzen grösstenteils abnehmen.

<sup>19</sup> Veränderung in Prozentpunkten

<sup>20</sup> Unter der Belastung wird die Auslastung (Anzahl der Fahrzeuge dividiert durch die Kapazität) pro Zeiteinheit (10 Minuten) verstanden. Wird von "grösserer Belastung über den Tag" gesprochen, ist das Integral der Ganglinie gemeint.

Wird nun neben der Verbindungswahl auch die Zeitwahl freigegeben, so glättet sich die Ganglinie der Belastung. Das liegt daran, dass der Referenzfall eine einzelne Auswertung ist, während die Szenarien über zehn Simulationen gemittelt sind. Zudem ist festzustellen, dass die Belastungsspitzen fast überall abnehmen, was auch zu erwarten wäre, da die Agenten ihre Abfahrtszeit wählen und so Staubildung eher vermeiden können. Die qualitative Beurteilung der Veränderung der Streckenbelastungen gegenüber dem Referenzfall ist schwierig, da aufgrund der fehlenden Glättung der Ganglinien die Charakteristiken der beiden sich stark voneinander unterscheiden.

Wird nun auch die Zielwahl freigegeben, so nehmen die Belastungen auf folgenden Strecken weiter zu: S2, S7, S11, S12, S13, S14 und S15. Es fällt natürlich auf, dass bis auf S2 und S7 (ohne Eisenbahnalternative) die zusätzlich belasteten Strecken Eisenbahnverbindungen sind. Es wäre auch nicht anders zu erwarten, da die Agenten ihren Wohnort zum Teil so neu wählen, dass sie vermehrt vom besseren öV-Angebot profitieren können. Bemerkenswert ist der Anstieg der Belastung der Verbindung S15, die ja neu im Netz ist und erst richtig zur Geltung kommt, wenn die Agenten volle Wahlfreiheit haben und ihren Wohnort der neuen Situation anpassen können.

### **KNA und Logsum**

Im Folgenden sollen die Nutzen aus der KNA und der Logsum für alle drei Freiheitsgradkonfigurationen untersucht werden. Die entsprechenden Werte sind der Tabelle 13 zu entnehmen.

Die Nutzenwerte der drei Freiheitsgradkonfigurationen gemäss KNA sind so, wie es zu erwarten wäre: mit zunehmender Wahlfreiheit nimmt der Nutzen zu. Es fällt auf, dass der Unterschied zwischen nur Verbindungswahl (r) und Verbindungswahl mit Zeitwahl (a-r) kleiner ist, als der nachfolgende Sprung auf die volle Wahlfreiheit (z-a-r). Es zeigt sich auch, dass ein wesentlicher Teil des Nutzens aus den öV-Einnahmen kommt (vor allem bei z-a-r). Wegen eines Wechsels des Verkehrsträgers in Richtung öffentlicher Verkehr entstehen beim Mehrverkehr negative Nutzen für die Treibstoffsteuern (da weniger Kilometer mit dem Auto zurückgelegt werden). Es erstaunt jedoch auf den ersten Blick, dass bei voller Wahlfreiheit<sup>21</sup> die Unfallkosten wieder etwas zunehmen, was darauf zurückzuführen ist, dass vermehrt längere Strecken gefahren werden. Dies hängt damit zusammen, dass mit freier Wohnortwahl die Arbeitswege unter Umständen länger werden. Gerade die externen Kosten, die in der KNA einen grossen Teil der Gesamtnutzen ausmachen, können in einem gewissen Gegensatz zur Wahl-

---

<sup>21</sup> Es muss beachtet werden, dass die mit dem Wechsel des Wohnorts verbundenen Umzugskosten nicht berücksichtigt und damit die Kosten unterschätzt werden.

dimension stehen, da sie nicht Teil des Entscheidungsmodells sind und somit nicht berücksichtigt werden bei der Entscheidungsfindung, die zum Mengengerüst führt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei allen Freiheitsgraden mit dem Massnahmenpaket die bestehende Situation verbessert werden kann und die Massnahme somit prinzipiell zu empfehlen wäre. Im Vergleich zur Berücksichtigung der vollen Wahlfreiheit sind die Fehler ziemlich gross, die gemacht werden, wenn gewisse Freiheitsgrade eingeschränkt sind: bei nur Verbindungswahl wird der Nutzen bis zu 64% zu niedrig eingeschätzt.

Auch bei der Bewertung des Massnahmenpakets mittels Logsums ist bei allen Freiheitsgraden eine Verbesserung der bestehenden Situation festzustellen. Allerdings ist die Verbesserung bei Verbindungswahl mit Zeitwahl (a-r) minimal geringer als bei nur Verbindungswahl (r), was nicht zu erwarten wäre. Die Fehler, die beim Logsum gemacht werden sind mit im Schnitt 32% geringer als bei den Nutzen gemäss KNA.

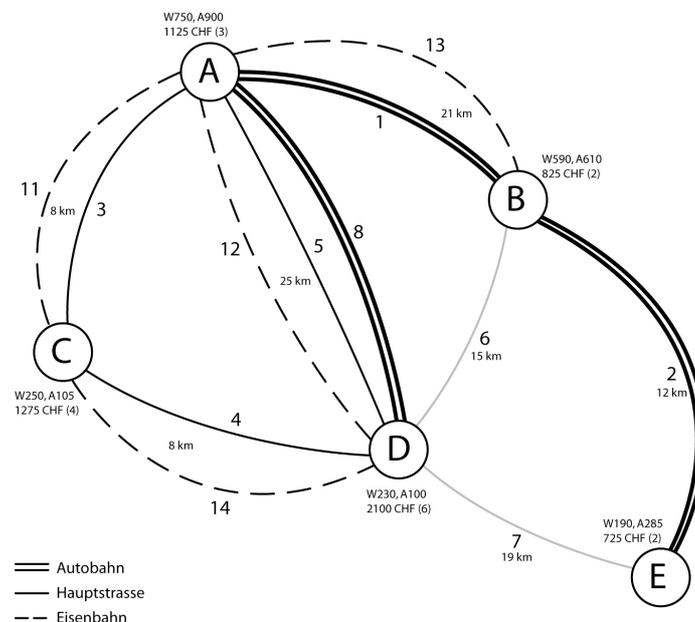
Tabelle 13 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (A MNL)

	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	137.05	322.67	502.18
Betriebskosten der Fahrzeuge	-62.16	-0.95	-12.06
Reisezeitveränderungen	199.21	323.62	514.24
Mehrverkehr	-73.37	-68.94	1.10
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	-119.48	-118.83	-67.13
Nettonutzen	46.11	49.89	68.23
Einnahmen im öV	178.50	163.80	958.30
– Externe Kosten	381.53	534.70	260.70
Unfälle	368.90	534.50	258.25
Luftverschmutzung	9.76	0.15	1.89
Klima	2.87	0.04	0.56
Total	623.72	952.23	1'722.28
Fehler bezüglich z-a-r (KNA)	-64%	-45%	0%
Logsum	145.35	140.81	210.99
Fehler bezüglich z-a-r (Logsum)	-31%	-33%	0%

### 6.3.2 Massnahmenpaket B – Autobahn Nord-Süd

Bei diesem Massnahmenpaket B sollen die kleinen Nebenstrassen entlastet und der Verkehr auf Autobahnen und Autostrassen gebündelt werden. Dazu wird die Kapazität der beiden bestehenden Autobahnen massiv erhöht (verdoppelt). Zusätzlich wird neben der Hauptstrasse von D nach A eine Autostrasse gebaut. Als flankierende Massnahme werden die Strassen zwischen D und B sowie zwischen D und E beruhigt und die Geschwindigkeit reduziert (Verlängerung der Reisezeit um 40%).

Abbildung 9 Schematisches Netz (Massnahmenpaket B)



#### OD-Matrix

Tabelle 14 zeigt die OD-Matrix für das Massnahmenpaket B bei voller Wahlfreiheit, die sich wie folgt im Vergleich zum Referenzfall (Tabelle 8) verändert:

- in A arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in den Ortschaften C oder D
- in B arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in den Ortschaften B oder E
- in C arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in der Ortschaft A
- in D arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in den Ortschaften A oder D

- in E arbeitende Agenten wohnen neu etwas vermehrt in den Ortschaften B oder E

Die Verlagerungen in den Verkehrsströmen sind zum grössten Teil entlang neu gebauter oder ausgebauter Strecken, was durchaus plausibel ist. Allgemein ist eine Tendenz festzustellen, dass die Agenten von A nach D oder E ziehen. Zudem nimmt die Zahl der externen Beziehungen minimal zu (von 46% auf 48%), da die Wegkosten dank besserer Autobahnverbindungen abgenommen haben. Es ist auch zu sehen, dass die Beziehungen D–B und D–E bedingt durch die erhöhten Reisezeiten weniger stark genutzt werden.

Tabelle 14 Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Massnahmenpaket B)

Arbeiten Wohnen	A	B	C	D	E	Total	Auslastung
A	446	73	32	21	6	577	77%
B	64	318	3	5	87	476	81%
C	214	29	42	23	3	311	124%
D	168	60	28	51	9	316	137%
E	8	131	0	1	179	320	168%
Total	900	610	105	100	285	2000	

Tabelle 15 Veränderung der OD-Matrix (Massnahmenpaket B)

Arbeiten Wohnen	A	B	C	D	E	Total	Auslastung
A	-63	+4	+12	-6	+2	-44	-6%
B	-16	+16	-3	-3	+7	±0	±0%
C	+19	-5	-10	-6	-3	-5	-2%
D	+62	-25	+1	-5	-10	+33	+14%
E	-2	+11	±0	-1	+7	+16	+8%

Der Modal Split für den öffentlichen Verkehr beträgt bei der Konfiguration r und bei der Konfiguration a-r 14.4%, bei der Konfiguration z-a-r 14.8%. Die öV-Benutzung hat gegen-

über dem Referenzfall minimal abgenommen, was darauf zurückzuführen ist, dass das IV-Angebot ausgebaut und somit attraktiver geworden ist. Es wäre andererseits zwar auch anzunehmen, dass der öffentliche Verkehr wegen der Beruhigungsmassnahmen auf der Querachse zunimmt, doch existiert z.B. für die Verbindung D–B keine entsprechende öV-Verbindung, auf die der Verkehr ausweichen könnte.

### **Streckenbelastungen**

Es soll nun untersucht werden, wie sich die Streckenbelastungen gegenüber dem Referenzfall verändern. Wird zuerst nur der Freiheitsgrad der Verbindungswahl freigegeben, so fällt auf, dass auf den meisten Strecken die Belastung abnimmt. Das heisst jedoch nicht zwingend, dass weniger externe Beziehungen gefahren werden, da mit abnehmender Reisezeit bei gleich bleibender Fahrzeuganzahl die totale Belastung der Strecke dennoch abnimmt, da die einzelnen Fahrzeuge weniger lang auf der Strecke fahren. Vielmehr ist es sogar ein Ziel dieser Massnahme, die Situation zu verbessern, also die Auslastung der Strecken zu verringern. Diese Betrachtungen können in einem gewissen Gegensatz zur später aufgeführten KNA mit den Reisezeiten stehen. Grund hierfür ist, dass die Reisezeiten zur Berechnung der Streckenbelastungen auf zehn Minuten gerundet sind, die Reisezeiten im Mengengerüst der KNA hingegen genau sind (siehe Kapitel 7.1.2).

Wird neben der Verbindungswahl auch die Zeitwahl freigegeben, so glättet sich die Ganglinie der Belastung wie auch schon beim Massnahmenpaket A. Ebenfalls festzustellen ist, dass die Belastungsspitzen fast überall abnehmen.

Wird auch die Zielwahl freigegeben, so nehmen die Belastungen auf folgenden Strecken weiter zu: S2, S4, S5, S8, S11 und S12 und auf den folgenden ab: S1 (am Morgen), S6, S7 und S13. Es fällt auf, dass auf den Strecken S1 und S2 (beide in der Kapazität erhöht) einmal die Belastung zunimmt und einmal abnimmt. Dies lässt sich damit erklären, dass zwei sich kompensierende Effekte auftreten: einerseits reduziert sich die Reisezeit wegen Kapazitätserhöhung, andererseits zieht dies vermehrt Autos an, die die Reisezeiten wiederum verlängern, da dadurch die Auslastung zunimmt. Je nachdem, welcher Effekt überwiegt, kann die Veränderung der Belastung in die eine oder andere Richtung gehen. An diesem Beispiel ist jedoch deutlich zu erkennen, was auch oft in der Realität festzustellen ist: der Kapazitätsausbau einer Strecke vermag das Problem nicht zu lösen, da zusätzliche Kapazität durch Neuverkehr aufgefressen wird. Wegen der Herabsetzung der Geschwindigkeit auf den Strecken S6 und S7 nimmt dort die Belastung ab. Doch auch hier sind die soeben genannten Effekte möglich. Da die Verbindung S1 attraktiver ist, nimmt die Auslastung auf der dazu parallelen Eisenbahnalternative S13 ab. Es ist verständlich, dass mit freier Zielwahl die neue Strecke S8 besser ge-

nutzt wird, wie dies auch schon bei der neuen Strecke S15 im Massnahmenpaket A zu beobachten war.

### **KNA und Logsum**

Im Folgenden sollen die Nutzen gemäss KNA und der Logsum für alle drei Freiheitsgradkonfigurationen untersucht werden. Die entsprechenden Werte sind der Tabelle 16 zu entnehmen.

Zunächst einmal fällt auf, dass das Massnahmenpaket B bei allen Freiheitsgradkonfigurationen einen negativen Nutzen aufweist, also eine Verschlechterung der bestehenden Situation bedeutet. Für die ersten beiden Konfigurationen (r und a-r) sind die Nutzen deutlich schlechter als für die volle Wahlfreiheit (z-a-r). Diese Tatsache überrascht nicht, denn neben dem Bau von Autobahnen wurden die Querverbindungen massiv verschlechtert (sehr viel längere Reisezeiten). In diesem Fall heisst dies, dass die Nutzen der neuen Autobahnen die Verschlechterung der Querverbindung nicht aufwiegen. Aber auf jeden Fall werden die externen Kosten verringert. Allgemein fällt auf, dass bei allen Freiheitsgradkonfigurationen der Stammverkehr zu leiden hat. Dies liegt daran, dass die Agenten bedingt durch die Verkehrsberuhigung entweder längere Reisezeiten wegen langsamerer Geschwindigkeiten auf den betreffenden Strecken auf sich nehmen, oder aber grössere Umwege fahren. Dies schlägt sich in den erhöhten Betriebskosten und ebenfalls in erhöhten Reisezeiten nieder. Es zeigt sich bei diesem Massnahmenpaket sehr deutlich, welch grosser Fehler gemacht werden kann, wenn gewisse Freiheitsgrade unterschlagen werden: ohne Zielwahl (r und a-r) sind die Nutzen um ein Vielfaches (bis zu über 250%) schlechter als bei voller Wahlfreiheit (z-a-r).

Es fällt ausserdem auf, dass die Konfiguration mit Zeitwahl und Verbindungswahl schlechter abschneidet als die Konfiguration nur mit Verbindungswahl. Dies ist auf den ersten Blick verwirrend, würde man doch annehmen, dass die Agenten bei mehr Wahlfreiheit ihren Nutzen besser optimieren. Es muss jedoch beachtet werden, dass bei der Konfiguration r sich der ganze Optimierungsprozess auf die Verbindungen konzentriert, da nur durch die Veränderung der benutzten Verbindung bessere Nutzenwerte erreicht werden können. Bei der Konfiguration a-r vergrössert sich der Entscheidungsraum, Optimierung findet nicht nur bei der Verbindungswahl, sondern auch bei der Zeitwahl statt. So kann eine Verschiebung in Richtung Zeitoptimierung stattfinden, was konkret bedeutet, dass die Agenten weniger zu spät kommen, jedoch dafür etwas länger reisen, so aber insgesamt dennoch einen höheren Nutzen erzielen als wenn sie nur kurze Reisezeiten anstrebten. Da die KNA jedoch das zu-spät-Ankommen, also

die Pünktlichkeit<sup>22</sup>, nicht bewertet, scheint diese Konfiguration gemäss KNA schlechter als diejenige mit weniger Wahlfreiheit.

Der Logsum im Gegensatz zur KNA bewertet sämtliche Nutzenkomponenten, die entscheidungsrelevant sind, und kann somit auch die Pünktlichkeit bewerten. Dabei ist auch die Rangfolge der Nutzendifferenzen gegenüber dem Referenzfall so, wie man sie erwarten würde: mit zunehmender Wahlfreiheit nimmt das Optimierungspotential zu. Die Fehler bei Vernachlässigung gewisser Freiheitsgrade ist in etwa gleicher Grössenordnung wie beim Massnahmenpaket A.

Tabelle 16 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (B MNL)

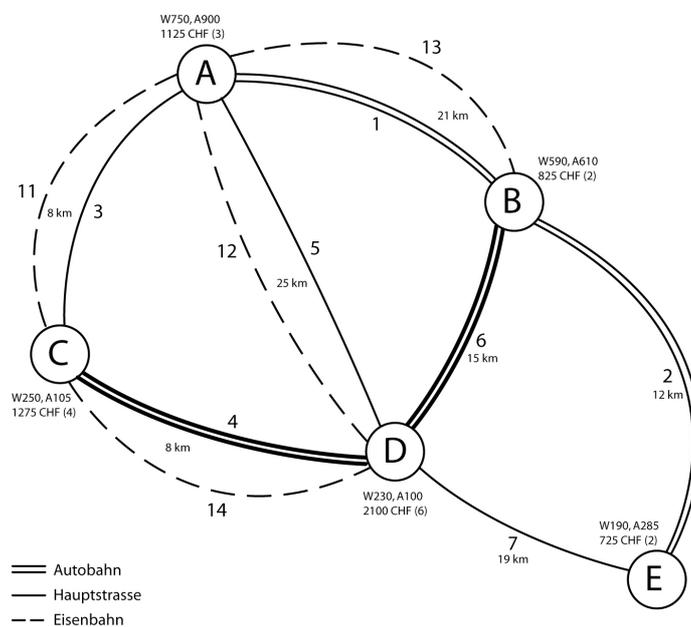
	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	-837.07	-858.22	-603.17
Betriebskosten der Fahrzeuge	-340.63	-366.69	-301.98
Reisezeitveränderungen	-496.44	-491.53	-301.19
Mehrverkehr	21.94	16.10	-46.97
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	37.18	35.55	62.20
Nettonutzen	-15.24	-19.45	-109.17
Einnahmen im öV	-305.90	-306.60	-234.50
– Externe Kosten	672.31	668.14	701.49
Unfälle	603.12	593.66	640.16
Luftverschmutzung	53.48	57.57	47.41
Klima	15.71	16.91	13.92
Total	-448.73	-480.58	-183.15
Fehler bezüglich z-a-r (KNA)	-245%	-262%	0%
Logsum	60.53	77.69	111.71
Fehler bezüglich z-a-r (Logsum)	-46%	-30%	0%

<sup>22</sup> Die Norm SN 641 825 (Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr – Bewertung und Abschätzung der Zuverlässigkeit) bewertet und schätzt die Zuverlässigkeit zwar ab, wurde jedoch für die KNA in dieser Arbeit weggelassen. Ferner sei beachtet, dass die Zuverlässigkeit nicht mit der Pünktlichkeit zu verwechseln ist.

### 6.3.3 Massnahmenpaket C – Querverbindung

Die schnellen Verbindungen laufen alle über die Ortschaft A. Neu soll eine Querachse geschaffen werden. Dazu wird die Verbindung zwischen D und B zu einer Autobahn und die Verbindung zwischen C und D zu einer Autostrasse umgebaut. Allerdings sind bei dieser Variante im Gegensatz zum Massnahmenpaket B keine flankierenden Massnahmen vorgesehen, d.h. die Nord-Süd-Achse wird nicht geschwächt.

Abbildung 10 Schematisches Netz (Massnahmenpaket C)



### OD-Matrix

Tabelle 17 zeigt die OD-Matrix für das Massnahmenpaket C bei voller Wahlfreiheit. Sie verändert sich im Vergleich zum Referenzfall (Tabelle 8) wie folgt:

- in A arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in den Ortschaften B oder D
- in B arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in den Ortschaften C oder D
- in C arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in der Ortschaft A oder D
- in D arbeitende Agenten wohnen neu vermehrt in der Ortschaft B

- in E arbeitende Agenten wohnen neu etwas vermehrt in der Ortschaft D

Es ist allgemein eine Tendenz festzustellen, dass die Agenten von A und E nach D ziehen. Der Zusammenhang zwischen der Verlagerung der Verkehrsströme und dem Ausbau der Infrastruktur ist bei diesem Szenario nicht so ausgeprägt wie bei dem Massnahmenpaket B. Auch bei dieser Massnahme nimmt die Zahl der externen Beziehungen zu (von 46% auf 50%), da die Wegkosten abgenommen haben.

Tabelle 17 Wohn- und Arbeitsorte der Agenten (OD-Matrix Massnahmenpaket C)

Arbeiten Wohnen	A	B	C	D	E	Total	Auslastung
A	468	71	26	13	7	584	78%
B	90	280	7	13	81	471	80%
C	198	40	40	26	8	312	125%
D	131	115	31	44	28	348	151%
E	14	104	2	4	161	284	150%
Total	900	610	105	100	285	2000	

Tabelle 18 Veränderung der OD-Matrix (Massnahmenpaket C)

Arbeiten Wohnen	A	B	C	D	E	Total	Auslastung
A	-41	+2	+6	-2	-1	-37	-5%
B	+10	-22	+1	+5	+1	-5	-1%
C	+3	+6	-12	-3	+2	-4	-1%
D	+25	+30	+4	-2	+9	+65	+28%
E	+4	-16	+2	+2	+11	-20	-10%

Der Modal Split für den öffentlichen Verkehr beträgt bei der Konfiguration r 14.5%, bei der Konfiguration a-r 14.2% und bei der Konfiguration z-a-r 15.4%. Wie auch beim Massnah-

menpaket B hat die öV-Benutzung etwas abgenommen, wiederum bedingt durch die bessere IV-Infrastruktur.

### **Streckenbelastungen**

Es wird nun analysiert, inwiefern sich die Streckenbelastungen gegenüber dem Referenzfall ändern. Wiederum wird zunächst nur die Verbindungswahl freigegeben. Die Belastungen und Belastungsspitzen nehmen auf den Strecken S2, S11 und S12 ab, während auf den Strecken S13 und S14 die Spitzen zwar abnehmen, die Belastungen aber ungefähr gleich bleiben. Die Belastungen nehmen hier ab, da dies Verbindungen in Nord-Süd-Richtung sind, dieses Szenario aber die Ost-West-Verbindung stärkt, dort also erhöhte Nachfrage zu erwarten ist und sich der Verkehr daher umlagert. Auf den Strecken S4 und S7 nehmen die Belastungsspitzen ab, obwohl die Belastung über den Tag gesehen zunimmt. Die S4 ist dabei Teil der ausgebauten Strecke.

Wird nun auch die Zeitwahl freigegeben, glättet sich die Ganglinie der Belastung wie auch schon bei den beiden vorangegangenen Massnahmenpaketen. Ebenfalls festzustellen ist, dass die Belastungsspitzen abnehmen.

Wird zuletzt auch die Zielwahl freigegeben, so nehmen die Belastungen im Wesentlichen auf folgenden Strecken weiter zu: S1, S5, S6, S7 und S12 und auf der Strecke S2 ab. Es fällt auf, dass die Strecke S4 nicht stärker belastet ist, obwohl sie Teil der Infrastrukturmassnahme ist.

### **KNA und Logsum**

In Tabelle 19 ist das Ergebnis der KNA und der Logsum des Massnahmenpakets zu sehen.

Im Gegensatz zum Massnahmenpaket B, das bei allen Freiheitsgradkonfigurationen einen negativen Nutzen brachte, sind hier alle monetären Nutzen positiv, selbst wenn nur die Verbindungswahl (r) berücksichtigt wird. Vor allem die externen Kosten tragen zu der positiven Beurteilung dieses Szenarios bei. Das verwundert nicht, wurden doch zwei Hauptstrassen durch Autobahnen ersetzt, die die Unfallkosten massgebend senken. Im Gegensatz zum Massnahmenpaket B bringt diese Massnahme auch dem Stammverkehr einen positiven Nutzen. Die Reisezeiten verkürzen sich, doch werden mehr Kilometer gefahren, was zu negativen Nutzen aus Betriebskosten führt.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Freiheitsgrade fällt auf, dass die Wahl der Abfahrtszeit inkl. der Verbindung (a-r) zu einer positiveren Bewertung des Massnahmenpakets führt als nur die Verbindungswahl (r). Allerdings nimmt der Nutzen der Massnahme mit zunehmender

Wahlfreiheit (z-a-r) nicht weiter zu, sondern wieder ab, jedoch nicht ganz auf den Betrag der Konfiguration nur mit Verbindungswahl. Diese Abnahme ist unter anderem auf eine weniger positive Bewertung der Unfallkosten zurückzuführen, da andere und längere Verbindungen gewählt wurden. Diese Beobachtung deckt sich mit der Annahme, dass bei voller Wahlfreiheit längere Wege in Kauf genommen werden, um den Wohnnutzen zu verbessern. Mit freier Zielwahl wächst der Nutzen im Mehrverkehr. Eine Veränderung im Mehrverkehr ist entweder auf einen Wechsel des Verkehrsträgers oder auf eine veränderte Zielwahl zurückzuführen. Die erhöhten Nutzen im Mehrverkehr entstehen zu einem grossen Teil aus zusätzlichen Einnahmen aus Treibstoffsteuern. Auch dieser Effekt ist auf zusätzlich zurückgelegte Kilometer zurückzuführen. Wie schon beim Massnahmenpaket B darauf hingedeutet wurde, dass die KNA nur Reisezeiten berücksichtigt, so soll auch hier angemerkt werden, dass mit einem Wohnortwechsel nicht nur die Reisezeiten verändert werden, sondern die Pünktlichkeit und auch der Nutzen aus dem Wohnen selbst. Die beiden letztgenannten Nutzenanteile werden in der KNA nicht erfasst. So kann es dazu kommen, dass gemäss KNA eine Massnahme bei grösserer Wahlfreiheit zu scheinbar geringerem Nutzen führt. Bei diesem Massnahmenpaket sind die Fehler bei unterschlagenen Freiheitsgraden eher gering, bei allen drei Konfigurationen sind die Nutzenwerte gemäss KNA ähnlich.

Aus der Bewertung des Massnahmenpakets mittels Logsum folgt ebenfalls der Schluss, dass das Massnahmenpaket C die bestehende Situation verbessert. Bei allen drei Freiheitsgradkonfigurationen ist eine deutliche Verbesserung des Logsums gegenüber dem Referenzfall festzustellen. Die Fehler bezüglich voller Wahlfreiheit sind mit maximal 16% eher gering.

Tabelle 19 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (C MNL)

	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	253.36	428.34	466.48
Betriebskosten der Fahrzeuge	-223.49	-185.88	-191.12
Reisezeitveränderungen	476.85	614.22	657.60
Mehrverkehr	101.21	120.30	361.18
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	40.00	46.65	242.77
Nettonutzen	61.21	73.65	118.41
Einnahmen im öV	-302.40	-318.50	-142.10
– Externe Kosten	2'090.67	2'165.22	1'674.84
Unfälle	2'045.28	2'127.47	1'636.02
Luftverschmutzung	35.09	29.18	30.01
Klima	10.31	8.57	8.81
Total	2'142.85	2'395.36	2'360.40
Fehler bezüglich z-a-r (KNA)	-9%	1%	0%
Logsum	202.61	234.58	241.40
Fehler bezüglich z-a-r (Logsum)	-16%	-3%	0%

## 6.4 Stabilität

In Verkehrsfragen zielt man oft darauf ab, das sogenannte Wardrop'sche Gleichgewicht zu finden. Es besagt gemäss Vrtic (2003), dass alle genutzten Routen dieselbe oder geringere Kosten aufweisen als die ungenutzten. Da im vorliegenden Modell Routen nie alleine betrachtet werden, sondern immer in Alternativen eingebettet sind, die auch die Nutzen von Ziel und Zeit (auch bei festgehaltenem Freiheitsgrad) beinhalten, müsste die Gleichgewichtsformulierung wie folgt lauten: alle gewählten Alternativen sind mit einem höheren oder gleich grossen Nutzen verbunden als die nicht gewählten Alternativen. Dieses Wardrop'sche Gleichgewicht wäre ein mögliches Abbruchkriterium. Es bedingt jedoch, dass die Agenten ausnahmslos die besten Alternativen wählen ohne Zufallsterm. Da jedoch mit jeder Wahl eines Agenten nicht nur der eigene Nutzen bestimmt wird, sondern dies auch Auswirkungen hat auf die Nutzen aller anderen Agenten (höhere Auslastung eines Wohnortes führt zu höheren Preisen, höhere Streckenbelastungen führen zu längeren Reisezeiten), lässt sich so nur schwer – wenn über-

haupt möglich – ein Gleichgewicht finden, denn die Agenten beginnen über die Iterationen zwischen den Alternativen hin- und herzuwechseln. Daher wurde für das vorliegende Modell ein anderes Abbruchkriterium gewählt und insbesondere eingeführt, dass nur 90% der Agenten der vorangehenden Iteration eine neue Wahl treffen können. Als Abbruchkriterium wurde die Veränderung der Nutzensumme über die gesamte Population gewählt. Sobald diese eine geringere Veränderung als 5% gegenüber der vorangehenden Iteration erfährt, wird die Simulation abgebrochen. Das Abbruchkriterium ist also ein globales, es wird ein Systemgleichgewicht angestrebt. Das heisst aber, dass selbst bei konstantem Systemnutzen Umlagerungen der Nutzen zwischen den einzelnen Agenten möglich sind. Wenn z.B. ein Agent seinen Nutzen auf Kosten eines anderen verbessert, ist zwar noch kein Gleichgewicht auf Agentenebene gefunden, auf Systemebene hingegen schon, denn die Nutzensumme ist konstant.

Die Simulationsdauern in diesem Modell sind unterschiedlich lange, je nach Anzahl Freiheitsgrade und Massnahmenpaket. Mit zunehmenden Wahlmöglichkeiten wird der Alternativensatz grösser, damit steigt die Zahl der zu berechnenden Alternativen und somit auch die Simulationsdauer. Tabelle 20 zeigt eine Übersicht der Simulationsdauern.

Tabelle 20 Simulationsdauern

	Alternativen total	Dauer r [min]	Dauer a-r [min]	Dauer z-a-r [min]
Massnahmenpaket A	42'536	4	10	66
Massnahmenpaket B	64'532	5	15	96
Massnahmenpaket C	38'584	3	10	58

Die Simulationsdauern sind abhängig von der Konvergenz. Die Konvergenz in diesem Modell ist sehr gut, in den meisten Fällen reichten zwei Iterationen, bereits bei der zweiten lag die Veränderung der Nutzensumme gegenüber der ersten Iteration im Bereich von 0% bis 2%. Grund für diese gute Konvergenz ist sicherlich, dass die Netzinformationen nach jeder Wahl eines Agenten aktualisiert werden, so dass der letzte wählende Agent die aktuelle Situation kennt und so insgesamt weniger unvernünftige Entscheidungen getroffen werden. Das System konvergiert bei höheren Auslastungen der Strecken viel weniger gut, da dann die Strassen an die Leistungsgrenzen stossen und somit bereits kleine Veränderungen in der Belastung zu grossen Veränderungen in der Reisezeit und somit bei den Reisekosten führen. Die berechne-

ten Nutzen sind dann viel sensibler und abhängiger von der aktuellen Ausprägung des Systems.

Es soll nun analysiert werden, ob die gefundenen Gleichgewichte stabil sind. Dazu wurden die Variationskoeffizienten<sup>23</sup> der jeweils zehn Simulationen für die drei Freiheitsgradkonfigurationen bestimmt. Tabelle 21 zeigt das Ergebnis der Berechnungen.

Tabelle 21 Variationskoeffizienten der Nutzensumme und des Logsums (MNL)

	r	a-r	z-a-r
Massnahmenpaket A			
Variationskoeffizient der Nutzensumme	0.00261	0.00306	0.00527
Variationskoeffizient des Logsums	0.00147	0.00148	0.00372
Massnahmenpaket B			
Variationskoeffizient der Nutzensumme	0.00268	0.00174	0.00492
Variationskoeffizient des Logsums	0.00083	0.00187	0.00407
Massnahmenpaket C			
Variationskoeffizient der Nutzensumme	0.00256	0.00371	0.00370
Variationskoeffizient des Logsums	0.00110	0.00280	0.00397

Da die Variationskoeffizienten alle sehr klein sind, kann davon ausgegangen werden, dass die gefundenen Gleichgewichte sehr geringen Streuungen unterworfen sind und daher als stabil betrachtet werden können.

<sup>23</sup> Den Variationskoeffizienten erhält man, in dem die Standardabweichung durch den Mittelwert dividiert wird:

$$VarK(X) = \frac{\sqrt{Var(X)}}{E(X)}$$

## 7 Diskussion

In Kapitel 6.3 wurden die einzelnen Szenarien diskutiert, unter anderem auch der Einfluss der Freiheitsgrade, bzw. der Fehler bei fehlender Berücksichtigung derer. In diesem Kapitel soll ein Vergleich der Szenarien unter verschiedenen Gesichtspunkten gemacht, die Feststellungen aus den Simulationen und weitere Aspekte der Arbeit diskutiert werden.

### 7.1 Probleme bei der Datenanalyse

Es ist äusserst schwierig, nachvollziehen zu können, welcher Effekt im System worauf zurückzuführen ist. Diese Tatsache motiviert die Simulationen, denn die Ergebnisse lassen sich nicht ohne Weiteres mit gesundem Menschenverstand herleiten. Die Schwierigkeit aber dabei ist, die Richtigkeit des Modells zu überprüfen. Vor allem die dynamische Streckenbelastung des Systems macht die Situation beinahe undurchschaubar. In einer Testphase aber konnte anhand von Mautgebühren unter anderem überprüft werden, ob die Abfahrtszeiten darauf reagieren. Es war bei den Streckenbelastungen ein deutlicher Effekt der Maut sichtbar.

#### 7.1.1 Modellgrösse

Die kleine Grösse des Modells führt manchmal zu Problemen: Während bei grösseren Systemen gewisse Effekte vernachlässigbar sind und somit in der Gesamtanalyse verschwinden, können bei einem so kleinen Netz solche Effekte das Gesamtergebnis beeinträchtigen und die Interpretation erschweren. Ebenfalls ein Problem der kleinen Grösse ist, dass bereits einzelne Agenten auf Strecken prozentual einen grossen Anteil ausmachen. So kann durch die Umlageung z.B. nur zweier Agenten die BPR-Funktion der Strecke sehr viel längere oder kürzere Reisezeiten bestimmen. Dieses Problem entsteht vor allem bei der Anwendung der diskreten, agenten-basierten Modellierung auf kleine Modelle.

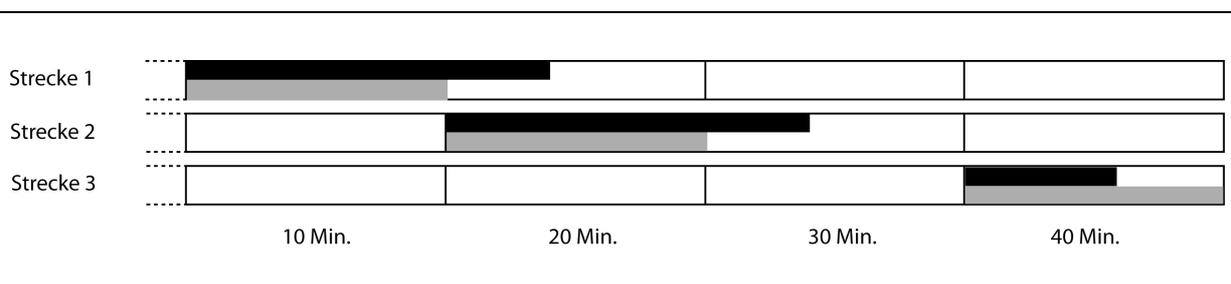
#### 7.1.2 Zeit

Ein weiteres Problem ist die Wahl der zeitlichen Auflösung. Für das vorliegende Modell wurde eine Auflösung von 10 Minuten gewählt. Die Reisezeiten auf den Strecken liegen in der Grössenordnung von 10 bis 20 Minuten, die nicht wesentlich grösser ist als die zeitliche Auflösung selbst. Da die Reisezeiten aber für die Streckenbelastung auf Auflösungsgrösse gerundet werden, können hier zum Teil beträchtliche Verfälschungen des Ergebnisses auftreten. Um diesem Effekt entgegenzuwirken wurde die aktuelle genaue Reisedauer für die KNA je-

weils zwischengespeichert. Doch bei der Berechnung der Reisezeit auf einem diskretisierten Streckenabschnitt in Abhängigkeit von deren Belastung kann dies auf diese Weise nicht umgangen werden.

Folgende Abbildung 11 illustriert den Fehler beispielhaft, der durch die Diskretisierung der Zeit entsteht. Es soll angenommen werden, dass eine Verbindung über drei Strecken führt. Alle Strecken seien vorerst unbelastet und die Reisezeiten für die ersten beiden Strecken betragen je 14 Minuten (schwarze Balken in der Abbildung), für die dritte Strecke 6 Minuten (schwarzer Balken in der Abbildung). Auf Grund der Rundung auf 10 Minuten werden die ersten beiden Strecken jeweils nur während 10 Minuten (graue Balken in der Abbildung) belastet. Da für die Anfangsbelastung jeweils die genaue Reisezeit verwendet wird, wird die dritte Strecke 30 Minuten ( $2 \cdot 14 \text{ Minuten} = 28 \text{ Minuten}$  wird auf 30 Minuten aufgerundet) nach Reisebeginn belastet. Obwohl die Fahrt auf der dritten Strecke nur 6 Minuten dauert, wird sie während 10 Minuten belastet. Die effektive Reisezeit beträgt  $14 + 14 + 6 = 34 \text{ Minuten}$ , die Belastung auf den Strecken dauert nur 30 Minuten. Der Fehler in diesem Beispiel ist also etwa 12%. Würde die Reise auf der dritten Strecke ebenfalls 14 Minuten dauern, wäre die Belastung im Modell ebenfalls 30 Minuten, während die tatsächliche Reise  $3 \cdot 14 = 42 \text{ Minuten}$  dauern würde. In diesem Fall wäre der Fehler etwa 29%. Zu beachten ist, dass für einen nachfolgenden Agenten bei der Reisezeitberechnung mit der BPR-Funktion der dritte Streckenabschnitt als unbelastet gilt, obwohl er es in Realität wäre. Somit ist die nachfolgend berechnete Reisezeit zu kurz.

Abbildung 11 Fehler infolge Diskretisierung



Das allgemeine Problem hierbei ist, dass die Zeitwahl keine diskrete Wahl ist, die diskreten Entscheidungsmodelle (wie auch in dieser Arbeit verwendet) aber davon ausgehen, dass der Alternativensatz aus diskreten Alternativen besteht. In diesem Zusammenhang sei auch noch das Problem der zeitlichen Ähnlichkeit von Alternativen kurz diskutiert. In Kapitel 2.3.2 wur-

de das Path Size Logit Model vorgestellt, dass die Ähnlichkeit von Alternativen in Bezug auf die Verbindungswahl berücksichtigen soll. Jedoch immer ausser Acht gelassen wurde die Ähnlichkeit der Zeitwahl. In Ben-Akiva und Bierlaire (2003) wird auf die Schwierigkeit hingewiesen, dass die kontinuierliche Zeit diskretisiert werden muss. Ausserdem wird gesagt, dass die Korrelation zwischen Zeitalternativen nicht ignoriert werden darf, denn die Verschiebung der Abfahrtszeit z.B. um 10 oder 20 Minuten unterscheidet sich von der gewohnten Abfahrtszeit viel weniger als die Verschiebung des Abfahrtszeitpunktes um eine ganze Stunde. Zudem ist auch nicht irrelevant, in welchem Verhältnis die Verschiebung der Zeit zur Reisezeit selbst steht. Eine Möglichkeit wäre es, die Verschiebung der Abfahrtszeit von der gewohnten in Prozent zu messen und so verschiedene "Verschiebeblöcke" zu modellieren. Im Modell dieser Arbeit wurde dies vernachlässigt und die Auswahlwahrscheinlichkeit ist für beide genannte Alternativen gleich gross. Für eine Abhandlung der Problematik von diskreten Entscheidungsmodellen für geordnete Alternativen sei auf Small (1987) verwiesen.

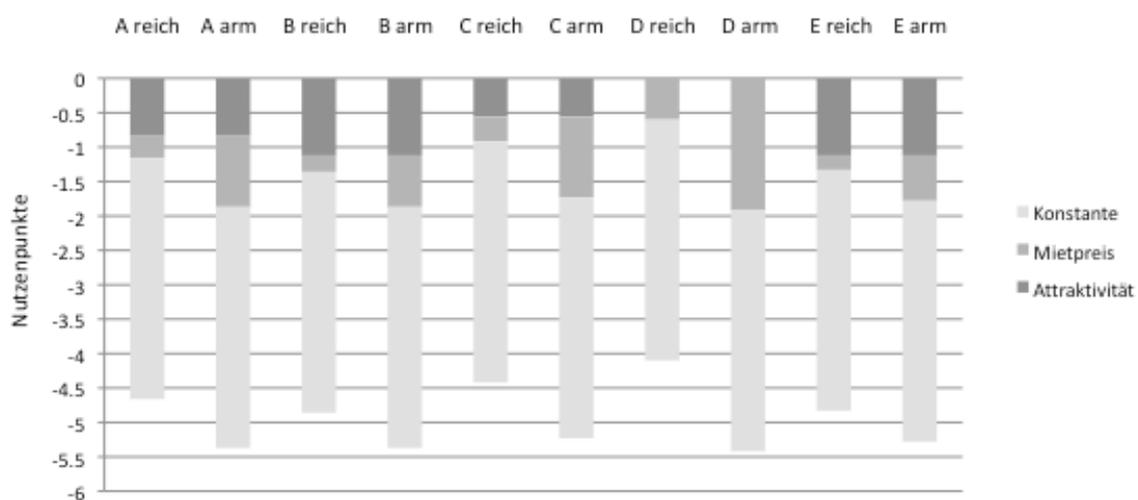
### 7.1.3 Abbruchkriterium

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Agenten bei voller Wahlfreiheit (z-a-r) eine geringere Nutzensumme erreichen als bei der Konfiguration a-r. Obwohl dies im ersten Moment nicht nachvollziehbar erscheint, wurde anhand eines Beispiels gezeigt, dass dies durchaus plausibel sein kann (siehe Kapitel 6.2). Ein weiteres Problem in Bezug auf das Gleichgewicht könnte in der Wahl des Abbruchkriteriums der Simulation liegen. Die Simulation bricht ab, sobald sich die Nutzensumme um weniger als 5% ändert. Das Kriterium beachtet damit den absoluten Wert der Nutzensumme nicht und bricht die Iteration unter Umständen bei Werten ab, die sich zwar relativ nicht mehr gross verändern, aber dennoch unter der maximalen berechneten Nutzensumme der Simulation liegen. Im Zusammenhang mit der Nutzensumme soll auch die Problematik der fehlenden Kenntnis des Zufallsterms erwähnt werden. Da dieser implizit in der Entscheidungsregel (Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeit) steckt, ist er über die verschiedenen Iterationen nicht konstant. Dies kann eine gewisse Verfälschung darstellen, da dieser Zufallsterm alle mathematisch nicht abbildbaren Einflüsse beschreiben sollte, also auch gewisse nicht bekannte Präferenzen für eine Strecke. Diese Präferenzen sollten jedoch konstant bleiben, da sie als eine Eigenschaft des Agenten angesehen werden können. Dieses Problem könnte umgangen werden, indem statt des stochastischen Ansatzes folgendes Vorgehen angewandt würde: den gumbelverteilten Zufallsterm effektiv berechnen, anschliessend zum deterministischen Nutzenteil addieren und dann die Alternative mit dem grössten Nutzen wählen.

## 7.2 Einfluss des Einkommens

Aus der Nutzenfunktion für die Wohnortwahl (siehe Kapitel 3.3.1) ist zu erkennen, dass das Einkommen einen Einfluss auf den Nutzen eines Wohnortes hat. Prinzipiell wären alle Agenten bestrebt, in einer Ortschaft mit hoher Attraktivität zu wohnen. Da jedoch in der Nutzenfunktion auch das Verhältnis von Einkommen zu Mietpreis vorkommt, frisst bei ärmeren Agenten der hohe Preis den Nutzen aus der Attraktivität auf, so dass es für diese besser ist, an einem günstigen und weniger attraktiven Ort zu leben. Für die reicheren Agenten ist es einerseits natürlich auch attraktiver, an einem günstigen Ort zu leben, doch bringt die Attraktivität eines Ortes auch einen Nutzen, so dass es für reichere von höherem Nutzen ist, an teureren, doch attraktiveren Orten zu leben. Abbildung 12 zeigt dies beispielhaft sehr deutlich, wobei bei der Darstellung für "reich" von einem Einkommen von 8000 CHF und für "arm" von einem Einkommen von 2500 CHF ausgegangen wurde, die Auslastung der jeweiligen Orte wurde zu 100% gewählt.

Abbildung 12 Nutzenszusammensetzung für die Zielwahl



Wie bereits in Kapitel 6.3.1 angedeutet, wäre bei günstigeren generalisierten Transportkosten eine bessere Anpassung der Wohnsituation an das eigene Einkommen zu erwarten. Dabei müssten sich die reicheren Agenten vermehrt in den teuren und attraktiven Ortschaften ansammeln, während sich die ärmeren vermehrt in den weniger attraktiven doch billigen Wohn-

orten niederliessen. Der Einfluss des Einkommens auf die Wohnortwahl für die drei verschiedenen Massnahmenpakete ist in Tabelle 22 zu sehen. Ebenfalls angegeben sind für jeden Wohnort die Anzahl der Attraktivitätspunkte und der Bodenpreis. Die Einkommensklassen sind in Tabelle 4 definiert. Wie bereits erwähnt ist der Einfluss weniger ausgeprägt als angenommen. Es ist jedoch festzustellen, dass in der Ortschaft D (höchster Bodenpreis) im Referenzfall der Anteil der reichsten deutlich am grössten ist (mit 36% der 1. Klasse und 27% der 2. Klasse) im Vergleich zu den anderen Ortschaften. Bei den anderen Ortschaften ist ein Einfluss des Einkommens nicht mehr festzustellen, der Anteil der 1. und 2. Klasse zusammen schwankt zwischen 46% und 49%. Ausser bei der Ortschaft D ist mit den Massnahmenpaketen auch keine wesentliche Veränderung gegenüber dem Referenzfall festzustellen. Bei D ist jedoch eine Verlagerung in Richtung der ärmeren Bevölkerung zu beobachten: Nach der Durchführung der Massnahmenpakete ist der Anteil der Reichen (1. und 2. Klasse) beim Massnahmenpaket C z.B. um 5%-Punkte kleiner. Ein Grund für den fehlenden Einfluss des Einkommens könnten die sehr unterschiedlichen Spannweiten der Einkommen in den verschiedenen Klassen sein.

Um das Problem der Einkommensklassenbildung zu umgehen, kann neben dem Median oder dem Mittelwert der Einkommen in einer Ortschaft auch überprüft werden, wie stark die Einkommen vor und nach einer Massnahme in einer Ortschaft streuen. Es wäre zu erwarten, dass durch die Sortierung der Einkommen (wegen günstigeren Transportkosten) die Streuung allgemein etwas abnimmt (Segregation). Tabelle 23 zeigt die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen für den Referenzfall sowie für die drei Szenarien bei z-a-r für jeden Wohnort (ebenfalls angegeben sind die Attraktivitätspunkte und der Bodenpreis). Es zeigt sich, dass auch diese Annahme nicht bestätigt werden kann.

Tabelle 22 Einfluss des Einkommens auf die Wohnortwahl

	1. Klasse	2. Klasse	3. Klasse	4. Klasse
Ortschaft A (3) 1125 CHF				
Referenzfall	22%	24%	26%	28%
Massnahmenpaket A	22%	23%	25%	30%
Massnahmenpaket B	23%	23%	25%	30%
Massnahmenpaket C	23%	22%	25%	30%
Ortschaft B (2) 825 CHF				
Referenzfall	24%	25%	25%	25%
Massnahmenpaket A	24%	24%	26%	26%
Massnahmenpaket B	24%	26%	25%	24%
Massnahmenpaket C	23%	25%	25%	26%
Ortschaft C (4) 1275 CHF				
Referenzfall	23%	24%	27%	26%
Massnahmenpaket A	26%	23%	25%	26%
Massnahmenpaket B	25%	23%	27%	25%
Massnahmenpaket C	28%	24%	26%	22%
Ortschaft D (6) 2100 CHF				
Referenzfall	36%	27%	22%	14%
Massnahmenpaket A	32%	28%	24%	15%
Massnahmenpaket B	31%	27%	25%	18%
Massnahmenpaket C	30%	28%	24%	18%
Ortschaft E (2) 725 CHF				
Referenzfall	23%	26%	24%	27%
Massnahmenpaket A	23%	28%	24%	24%
Massnahmenpaket B	25%	27%	24%	25%
Massnahmenpaket C	23%	28%	24%	25%

Tabelle 23 Mittelwert und Standardabweichung des Einkommens in den Wohnorten nach Massnahmenpaketen (MNL)

	Referenz		Szenario A		Szenario B		Szenario C	
	MW	Std.abw.	MW	Std.abw.	MW	Std.abw.	MW	Std.abw.
A (3) 1125 CHF	5'211	2'664	5'154	2'677	5'235	2'598	5'205	2'601
B (2) 825 CHF	5'301	2'438	5'262	2'455	5'276	2'446	5'263	2'440
C (4) 1275 CHF	5'530	2'769	5'494	2'730	5'412	2'868	5'510	2'888
D (6) 2100 CHF	6'058	2'826	6'105	2'850	6'332	2'877	6'225	2'868
E (2) 725 CHF	5'374	2'529	5'393	2'419	5'278	2'418	5'346	2'430

Abschliessend soll der Einfluss des Einkommens auf die Nutzensumme untersucht werden. Tabelle 24 zeigt die einzelnen Nutzenkomponenten aufgeschlüsselt in die 4 Einkommensklassen exemplarisch für das Massnahmenpaket A.

Markante Unterschiede zwischen den verschiedenen Einkommensklassen sind nur bei der Wohnortwahl und bei der Verbindungswahl zu finden, die Zeitnutzen zeigen keinen grossen Zusammenhang mit der Einkommensklasse. Es fällt auf, dass die Wohnnutzen bei den höheren Einkommensklassen höher ausfallen. Dies war auch zu erwarten, da die Nutzenfunktion das Verhältnis von Mietpreis zu Einkommen beinhaltet. Ebenfalls fällt auf, dass die Tendenz bei den Verbindungen gerade umgekehrt ist: die reicheren Einkommensklassen haben kleinere Verbindungsnutzen. Das bedeutet, dass sie entweder längere Distanzen wählen oder teurere. Sie können es sich leisten, in einen weiter entfernten Wohnort zu ziehen, um zusätzlichen Wohnnutzen zu generieren. Oder anders ausgedrückt: sie tauschen den Verbindungsnutzen (kurze Reisezeit) gegen einen Wohnnutzen (hoher Wohnkomfort). Es ist wichtig zu beachten, dass die Nutzenfunktionen für die Verbindung in diesem Modell unabhängig von der Einkommensklasse sind, d.h. lange Reisezeiten werden von den reichen wie von den armen gleich bewertet.

Tabelle 24 Nutzenanteile nach Einkommensklassen (Massnahmenpaket A)

	Total	Wohnen	Abfahrtszeit	Verbindung Morgen	Mittags- pause	Verbindung Abend
1. Klasse						
z-a-r	-8.86	-4.55	-0.68	-1.80	-0.06	-1.78
a-r	-8.87	-4.54	-0.67	-1.81	-0.06	-1.79
r	-8.61	-4.56	-0.59	-1.67	-0.05	-1.63
2. Klasse						
z-a-r	-8.98	-4.73	-0.69	-1.77	-0.05	-1.73
a-r	-8.98	-4.73	-0.69	-1.77	-0.06	-1.73
r	-8.89	-4.75	-0.69	-1.71	-0.05	-1.69
3. Klasse						
z-a-r	-9.09	-4.89	-0.71	-1.73	-0.06	-1.70
a-r	-9.11	-4.89	-0.72	-1.75	-0.05	-1.70
r	-8.89	-4.90	-0.68	-1.65	-0.06	-1.59
4. Klasse						
z-a-r	-9.33	-5.19	-0.70	-1.70	-0.06	-1.67
a-r	-9.33	-5.19	-0.72	-1.69	-0.06	-1.66
r	-9.09	-5.19	-0.72	-1.56	-0.06	-1.56

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Einflüsse des Einkommens gering bis gar nicht vorhanden sind. Einerseits ist das vermutlich auf das gewählte Netz zurückzuführen (siehe hierzu Kapitel 7.1.1) und andererseits auf die fehlende Modellierung der unterschiedlichen Zeitkosten im Entscheidungsmodell, denn für alle Agenten, unabhängig davon wie hoch ihr Einkommen ist, ist das Reisen gleich teuer.

In diesem Zusammenhang sei ein Aufsatz erwähnt, in dem die Frage aufgeworfen wird, inwiefern es angebracht ist, für verschiedene Einkommensklassen verschiedene Zahlungsbereitschaften für die Zeiteinsparung (*travel time savings*) anzusetzen. In Gálvez und Jara-Díaz (1998) werden zwei politische Sichtweisen der (sozialen) Bewertung eines Projekts diskutiert: erstens, dass alle Einkommensklassen gleich stark gewichtet werden (neutraler Ansatz) mit einem identischen Kostensatz für alle Einkommensgruppen, und zweitens, dass das soziale Gewicht umgekehrt proportional zum Grenznutzen des Einkommens steht (regressiver An-

satz), was bedeutet, dass höhere Einkommensklassen stärker gewichtet werden. Dabei werden für die verschiedenen Einkommensgruppen verschiedene Zeitkostensätze verwendet. Am Schluss gelangen die Autoren zur Einsicht, dass die Nutzen eines Projekts unterschätzt werden, wenn die Einkommensklassen unterschiedlich gewichtet und mit verschiedenen Zeitkostensätzen versehen werden. Es ist jedoch zu bemerken, dass es hier um die Bewertung im Sinne einer KNA geht und nicht um das Entscheidungsmodell selbst. Für das Entscheidungsmodell und die Bestimmung des Mengengerüsts stehen bei der besagten Abhandlung für die verschiedenen Einkommensklassen verschiedene Kostenparameter zur Verfügung.

### 7.3 Einfluss des Entscheidungskriteriums

In Kapitel 6.2 wurde bereits der Einfluss des Entscheidungskriteriums auf das Gleichgewicht und damit auf die OD-Matrix diskutiert. In diesem Kapitel soll untersucht werden, inwiefern sich die Wahl des Entscheidungskriteriums auf das Mengengerüst und somit auf die Bewertung der Nutzen gemäss KNA auswirkt. Dabei wird zum Teil auf den Erkenntnissen aus dem genannten Kapitel aufgebaut. Im Anhang A 1 sind für alle drei Szenarien die KNA für die Entscheidungskriterien PSL und MAX zu finden. Sie ergänzen die KNA für das Entscheidungskriterium MNL in Kapitel 6.3.

Der Quervergleich der verschiedenen Nutzen aus der KNA bei unterschiedlichen Entscheidungskriterien ist sehr heikel wenn nicht überhaupt unmöglich. Die KNA vergleicht jeweils einen Projektfall mit dem Referenzfall. Der Referenzfall ist dabei ein Gleichgewichtszustand in der bestehenden Situation. Wie bereits gezeigt wurde, ist der Gleichgewichtszustand sehr stark abhängig vom gewählten Entscheidungsmodell. Somit muss für jedes Entscheidungskriterium ein anderer Referenzfall für die KNA gewählt werden. Damit wird aber der Vergleich schwierig, weil völlig unterschiedliche Referenzfälle bestehen. So erstaunt es nicht, dass sich die Nutzenveränderungen der verschiedenen KNA erheblich voneinander unterscheiden. Es sollen an dieser Stelle dennoch ein paar bemerkenswerte Effekte diskutiert werden.

Wie bereits gezeigt wurde, wird der öffentliche Verkehr beim Entscheidungskriterium MAX überhaupt nicht benutzt, bei PSL und MNL hingegen schon. Konsistent mit dieser Feststellung sind die Reaktionen der Agenten beim Massnahmenpaket A. Diese Massnahme sieht ja nur Verbesserungen im öffentlichen Verkehr vor. Daher ist es plausibel, dass die Simulation mit Entscheidungskriterium MAX einen Zustand prognostiziert, der bezüglich dieser Infrastrukturmassnahme in diesem Punkt nicht positiv bewertet wird: es gibt keine zusätzlichen Einnahmen aus dem öffentlichen Verkehr.

Der Nutzen aus dem Mehrverkehr ist bei MNL und PSL ungefähr in der gleichen Grössenordnung. Beim Entscheidungskriterium MAX hingegen sind die Nutzen bei den ersten beiden Freiheitsgradkonfigurationen (r und a-r) jeweils fast Null und erst bei voller Wahlfreiheit (z-a-r) nehmen sie einen Wert ungleich Null an (ausser beim Massnahmenpaket A). Zur Erinnerung sei erwähnt, dass ein positiver Nutzen aus Mehrverkehr entweder mit neuen Fahrten auf einer Relation oder mit einem Wechsel von der Schiene auf die Strasse verbunden ist (da modellbedingt kein Neuverkehr innerhalb des Systems entstehen kann). Da bei festgehaltenem Wohnort (r und a-r) keine Umlagerung zwischen den Relationen entstehen kann, ist bei diesen Konfigurationen der Mehrverkehr zwingend mit zunehmender öV-Benutzung verbunden. Daher ist es auch nachvollziehbar, dass beim Massnahmenpaket A gar kein Nutzen aus Mehrverkehr entsteht, da – wie erwähnt – der öffentliche Verkehr nicht benutzt wird und bei den anderen beiden Massnahmenpaketen erst bei voller Wahlfreiheit, wenn der Wechsel des Wohnortes zulässig und somit eine Umlagerung in den Relationen möglich ist.

Es fällt auf, dass die Nutzen aus weniger Unfällen beim Entscheidungskriterium MAX gegenüber den anderen beiden Kriterien jeweils deutlich weniger stark zunehmen. Der Grund ist derjenige, dass bei MAX allgemein sehr wenig externe Beziehungen zu beobachten sind, die zu Unfällen führen. Somit ist dort das Verbesserungspotential viel geringer. Da jedoch die Unfallraten in der KNA einen sehr grossen Teil ausmachen, sind dadurch die absoluten Grössen der verschiedenen KNA sehr unterschiedlich.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Einfluss des Entscheidungskriteriums gross ist. Die Nutzenveränderungen der Massnahmenpakete sind sehr stark davon abhängig, nach welchem Kriterium die Agenten ihre Wahl treffen. Rein qualitativ (was die Reihenfolge der Massnahmenpakete betrifft) sind die Unterschiede weniger gross (siehe hierzu das folgende Kapitel).

## 7.4 Einfluss der Freiheitsgrade

Eine der Hauptfragestellungen dieser Arbeit ist die Frage nach dem Fehler, der begangen wird, wenn bei der Bestimmung des Mengengerüsts in der KNA nur die Verbindungswahl berücksichtigt wird, ohne auf die Zeit- und Zielwahl zu achten. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, werden die Ergebnisse der KNA über die Freiheitsgrade miteinander verglichen. Dazu wird in einem ersten Schritt zunächst nur eine Rangfolge gebildet und auf diese Weise festgestellt, welche Massnahmenpakete den höchsten Nutzen erreichen. Tabelle 25 zeigt die Rangfolge der drei Massnahmenpakete für die drei Entscheidungsmechanismen bei allen drei Freiheitsgradkonfigurationen. Das Ergebnis ist sehr konsistent: bei der Bewertung mit der KNA

sind die Rangfolgen für die Entscheidungskriterien MNL und PSL bei allen drei Freiheitsgradkonfigurationen gleich: das Massnahmenpaket C schneidet am besten ab, gefolgt vom Massnahmenpaket A und an letzter Stelle das Massnahmenpaket B. Das Entscheidungskriterium MAX liefert ein weniger konsistentes Bild: für die mittlere Freiheitsgradkonfiguration (a-r) ist die Reihenfolge der Massnahmenpakete identisch mit derjenigen bei den Entscheidungskriterien MNL und PSL. Bei nur Verbindungswahl (r) und voller Wahlfreiheit (z-a-r) hingegen weicht die Rangfolge ab: das Massnahmenpaket C bleibt an erster Stelle, danach folgt aber das Massnahmenpaket B und zuletzt das Massnahmenpaket A.

Aufgrund dieser Daten kann gesagt werden, dass es bei der Bewertung mittels KNA für die Rangfolge der Massnahmenpakete keine Rolle spielt, ob nur die Verbindungswahl berücksichtigt wird oder ob auch mehr Freiheitsgrade mitmodelliert werden. Es ist auch nicht von Bedeutung, welches Entscheidungsmodell den Entscheidungen zu Grunde liegt, wenn es sich um MNL oder PSL handelt. Das Entscheidungskriterium MAX weicht zwar von den anderen beiden Modellen ab, ist in praktischen Fällen jedoch nicht interessant.

Die gleiche Betrachtung für den Logsum als Bewertungsmass liefert ein ähnliches Bild. Für die Entscheidungskriterien MNL und PSL ist die Rangfolge für alle Freiheitsgradkonfigurationen gleich und auch identisch mit der Reihenfolge gemäss KNA. Für das Entscheidungskriterium MAX ergibt sich eine ganz neue Bewertung der Massnahmen: am besten schneidet die sonst eher stiefmütterlich behandelte Massnahme B ab, gefolgt von der Variante C und zuletzt schliesslich figuriert das Massnahmenpaket A. Diese neue Reihenfolge ist über alle Freiheitsgradkonfigurationen konstant und so gesehen in sich konsistent. Dass zwischen den Bewertungsmethoden KNA und Logsum nur für das Entscheidungskriterium MAX Abweichungen entstehen, lässt sich wie folgt erklären: die KNA bewertet nur die tatsächliche Ausprägung des Verkehrsverhaltens, das heisst, wenn unattraktive und unbenutzte Verbindungen verbessert werden, jedoch unbenutzt bleiben, so hat dies keinen Einfluss auf die Bewertung. Der Logsum hingegen ist eine Funktion des gesamten Alternativensatzes und vergrössert sich durch die Verbesserung von unattraktiven (und unbenutzten) Alternativen. Bei den Entscheidungsmechanismen MNL und PSL besteht aufgrund des stochastischen Ansatzes eine Abhängigkeit zwischen dem gesamten Alternativensatz und dem Mengengerüst und damit auch zwischen den Nutzen gemäss Logsum und KNA. Beim Entscheidungskriterium MAX hingegen ist die Abhängigkeit zwischen dem Mengengerüst und dem Alternativensatz geringer, da nur die Alternative mit dem grössten Nutzen gewählt wird. Somit ist auch ein geringerer Zusammenhang zwischen der Bewertung nach KNA und Logsum zu erwarten.

Tabelle 25 Reihenfolge der Szenarien

										KNA							
										r		a-r			z-a-r		
Rang	MNL	PSL	MAX	MNL	PSL	MAX	MNL	PSL	MAX								
1.	C	C	C	C	C	C	C	C	C								
2.	A	A	B	A	A	A	A	A	B								
3.	B	B	A	B	B	B	B	B	A								
										Logsum							
										r		a-r			z-a-r		
Rang	MNL	PSL	MAX	MNL	PSL	MAX	MNL	PSL	MAX								
1.	C	C	B	C	C	B	C	C	B								
2.	A	A	C	A	A	C	A	A	C								
3.	B	B	A	B	B	A	B	B	A								

In einem nächsten Schritt soll neben der Rangfolge der Alternativen genauer untersucht werden, wie gross die Abweichungen der KNA- und Logsum-Werte zum Fall der vollen Wahlfreiheit (z-a-r) sind. Tabelle 26 zeigt die Fehler in Relation zur vollen Wahlfreiheit für alle berechneten Fälle. Schon ein kurzer Blick auf die Zahlen zeigt ein sehr inhomogenes Bild, so dass keine Gesetzmässigkeit ausgemacht werden kann. Zunächst einmal soll festgehalten werden, dass die Fehler bei den Nutzen nach KNA nicht vergleichbar sind mit denjenigen nach der Logsumberechnung. Das Vorzeichen der Fehler (KNA und Logsum) für das Entscheidungskriterium MNL ist bis auf die Konfiguration a-r beim Massnahmenpaket C stets negativ. Daraus lässt sich schliessen, dass die Nutzen aus einer Infrastrukturmassnahme mit der Vernachlässigung von Freiheitsgraden unterschätzt werden. Für die Bewertung nach KNA sind beim Entscheidungskriterium PSL bei den Massnahmenpaketen A und C und bei MAX für das Massnahmenpaket A positive Fehler festzustellen, was heisst, dass mit der Vernachlässigung von Freiheitsgraden die Nutzen grösser sind.

Es kann gesamthaft festgehalten werden, dass die Fehler zum Teil beträchtliche Ausmasse annehmen können – auch wenn dadurch, wie oben gezeigt, die Rangfolge der einzelnen Sze-

narien unberührt bleibt. Die Konsequenz davon ist, dass mit der Vernachlässigung der Freiheitsgrade zwar die Kosten und Nutzen einer Alternative ziemlich falsch abgeschätzt werden können, doch die Entscheidung, welche Massnahme gebaut wird, ist davon weniger stark betroffen, da die Reihenfolge gleich bleibt. Es sind aber auch Fälle vorstellbar, bei denen durch die fehlerhafte Einschätzung der Nutzen durch Vernachlässigung von Freiheitsgraden der Entscheidung über die Realisierung des Projekts negativ beeinflusst wird.

Tabelle 26 Fehler in der Nutzenberechnung

	r	a-r	z-a-r
<b>Massnahmenpaket A</b>			
KNA (MNL)	-64%	-45%	0%
KNA (PSL)	63%	63%	0%
KNA (MAX)	67%	150%	0%
Logsum (MNL)	-31%	-33%	0%
Logsum (PSL)	-45%	-41%	0%
Logsum (MAX)	-44%	-83%	0%
<b>Massnahmenpaket B</b>			
KNA (MNL)	-245%	-262%	0%
KNA (PSL)	29%	-951%	0%
KNA (MAX)	-29%	-28%	0%
Logsum (MNL)	-46%	-30%	0%
Logsum (PSL)	-72%	-67%	0%
Logsum (MAX)	-34%	-47%	0%
<b>Massnahmenpaket C</b>			
KNA (MNL)	-9%	1%	0%
KNA (PSL)	11%	8%	0%
KNA (MAX)	-23%	3%	0%
Logsum (MNL)	-16%	-3%	0%
Logsum (PSL)	-30%	-35%	0%
Logsum (MAX)	-52%	-38%	0%

## 7.5 Vergleich Nutzenberechnung KNA und Logsum

Schliesslich soll der Vergleich zwischen der KNA und dem Logsum als Bewertungsmethode gemacht werden. Es ist also die Frage zu beantworten, inwiefern die klassische KNA durch den Logsum ersetzt werden kann und was die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden sind.

### 7.5.1 Berücksichtigung der externen Kosten

Um die Ergebnisse der beiden Bewertungsmethoden vergleichen zu können, muss darauf geachtet werden, dass auch tatsächlich die gleichen Einflüsse berücksichtigt werden. Der Logsum ist eine Funktion der gewählten Nutzenfunktion. Diese beinhaltet gemäss Kapitel 3.3.5 im vorliegenden Modell die folgenden Einflüsse:

- Verbindung (Reisekosten und -zeiten)
- Wohnort (relative Kosten und Attraktivität)
- Pünktlichkeit

Es sind dies alles entscheidungsrelevante Faktoren, eine Bewertung der externen Kosten<sup>24</sup> fehlt. Die KNA, wie sie in dieser Arbeit angewandt wird, berücksichtigt hingegen folgende Einflüsse:

- Reisedistanzen und -zeiten für Stamm- und Neuverkehr
- Einnahmen aus dem öffentlichen Verkehr
- verschiedene externe Kosten

Deckungsgleich bei beiden Bewertungsmassen sind also nur die Reisezeiten und -kosten und die öV-Einnahmen. Nur schon diese Gegenüberstellung zeigt, dass die beiden Bewertungsmasse, wie sie in dieser Arbeit zustande kommen, nicht ohne Weiteres miteinander verglichen werden können. Daher müssen für den Vergleich der Nutzen zwischen Logsum und KNA die externen Kosten in der KNA vernachlässigt werden. Doch selbst dann ist der Vergleich mit Unsicherheiten verbunden, da die KNA ja immer noch Wohnortnutzen und Pünktlichkeit nicht explizit bewertet. Andererseits aber darf nicht vergessen werden, dass diese beiden Ein-

---

<sup>24</sup> Unter externen Kosten versteht man Kosten, die nicht der Verursacher selbst, sondern andere oder die Allgemeinheit trägt. Als Beispiel sei der Strassenlärm erwähnt: Der Autofahrer, der durch eine Quartiersstrasse fährt, verursacht Lärm und schädigt dadurch die Anwohner der Strasse, die dann in gewisser Weise den Preis für den Autofahrer bezahlen.

flüsse auch das Mengengerüst beeinflussen, das wiederum Auswirkungen auf die Zahlen der KNA hat.

Tabelle 27 zeigt eine Übersicht der Bewertungen der drei Szenarien mittels KNA (ohne externe Kosten) und Logsum, sowie deren Fehler. Die Differenzen der Logsums wurden gemäss Kapitel 2.4.1 monetarisiert<sup>25</sup>.

Um die Nutzen aus der KNA mit den Nutzen gemäss Logsum vergleichen zu können, müsste man erwarten, dass das Verhältnis von monetarisiertem Logsum zur KNA über alle Szenarien etwa konstant (und idealerweise 1.0) ist. Ein Blick auf die Tabelle aber zeigt, dass dies keineswegs der Fall ist. In manchen Fällen ist der Verhältnis unter 1.0, in anderen darüber. Das heisst, es ist auch keine Tendenz in der Abweichung festzustellen.

---

<sup>25</sup> Da im Verlauf der Parametrisierung die einzelnen Nutzenkomponenten ins richtige Verhältnis zueinander gesetzt wurden, können so nicht nur die monetären Kosten wie Benzin- oder Billetpreise wieder "rückwärts" gerechnet, sondern auch die anderen Nutzenanteile monetarisiert werden. Als Kostenparameter  $\alpha_C$  wurde der Mittelwert aus dem IV- und öV-Kostenparameter gemäss Tabelle 7 gewählt und beträgt 0.204.

Tabelle 27 Übersicht der Monetarisierungen (ohne ext. Kosten)

Massnahmenpaket A	r	a-r	z-a-r
KNA (MNL)	242.19	417.53	1'461.58
$\Delta$ Logsum in CHF (MNL)	712.49	690.25	1'034.28
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MNL)	2.94	1.65	0.71
KNA (PSL)	707.75	741.52	528.55
$\Delta$ Logsum in CHF (PSL)	580.75	620.83	1'056.92
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (PSL)	0.82	0.84	2.00
KNA (MAX)	393.81	584.44	181.62
$\Delta$ Logsum in CHF (MAX)	355.59	110.40	635.72
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MAX)	0.90	0.19	3.50
Massnahmenpaket B			
KNA (MNL)	-1'121.03	-1'148.72	-884.64
$\Delta$ Logsum in CHF (MNL)	296.71	380.83	547.62
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MNL)	-0.26	-0.33	-0.62
KNA (PSL)	-449.71	-559.20	-557.43
$\Delta$ Logsum in CHF (PSL)	182.70	213.11	641.84
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (PSL)	-0.41	-0.38	-1.15
KNA (MAX)	475.05	480.07	532.65
$\Delta$ Logsum in CHF (MAX)	684.44	546.73	1'033.31
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MAX)	1.44	1.14	1.94
Massnahmenpaket C			
KNA (MNL)	52.17	230.14	685.56
$\Delta$ Logsum in CHF (MNL)	993.18	1'149.90	1'183.35
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MNL)	19.04	5.00	1.73
KNA (PSL)	499.15	428.84	681.68
$\Delta$ Logsum in CHF (PSL)	930.94	862.27	1'334.25
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (PSL)	1.87	2.01	1.96
KNA (MAX)	486.22	846.47	785.35
$\Delta$ Logsum in CHF (MAX)	357.17	460.98	745.35
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MAX)	0.73	0.54	0.95

Dass die Nutzenveränderungen gemäss KNA und der Logsum nicht verglichen werden können, liegt auch daran, dass das Weglassen der externen Kosten nicht ganz unproblematisch ist, wenn man beachtet, welcher grossen Anteil diese an den Gesamtkosten haben. Eine andere Möglichkeit wäre es, den Logsum für den Vergleich entsprechend anzupassen, eine Art Teil-Logsum zu berechnen und z.B. nur die Verbindungseinflüsse aufzusummieren. Es wurde dies für alle Massnahmenpakete mit den Freiheitsgradkonfigurationen r und a-r durchgeführt (je drei Simulationen). Tabelle 28 zeigt die Werte für die angepasste Simulation. Für den Logsum wurden nur die Nutzen aus der Verbindung aufsummiert. Für die KNA wurden nur die Nutzen aus dem Stamm- und Mehrverkehr sowie den öV-Einnahmen aufaddiert.

Tabelle 28 Logsum–KNA-Verhältnis

	r	a-r
Massnahmenpaket A		
KNA (MNL)	242.19	417.53
$\Delta$ Logsum in CHF (MNL)	152.76	56.50
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MNL)	0.63	0.14
Massnahmenpaket B		
KNA (MNL)	-1121.03	-1148.72
$\Delta$ Logsum in CHF (MNL)	152.76	-396.58
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MNL)	-0.14	0.35
Massnahmenpaket C		
KNA (MNL)	52.17	230.14
$\Delta$ Logsum in CHF (MNL)	1652.27	1678.28
$\Delta$ Logsum in CHF/KNA (MNL)	31.67	7.29

Es ist schnell ersichtlich, dass auch dieser Vergleich als gescheitert erachtet werden muss: Die Verhältnisse zwischen dem Nutzen aus KNA und dem Logsum sind über die Freiheitsgrade nicht konstant, geradezu willkürlich, was heisst, dass die beiden Werte nicht miteinander verglichen werden können. Der Grund hierfür ist, dass unterschiedliche Parameter verwendet werden (siehe Kapitel 7.5.2). Ebenfalls muss erwähnt werden, dass der Logsum im Gegensatz

zur Methode nach KNA auch den Binnenverkehr berücksichtigt, der rund die Hälfte aller Beziehungen ausmacht.

Bei den bisherigen Ansätzen, die beiden Bewertungsmasse miteinander zu vergleichen, wurden bei der KNA jeweils die externen Kosten weggelassen. Eine dringend zu beantwortende Frage jedoch ist, wie die externen Kosten beim Logsum berücksichtigt werden können, da diese von grosser Wichtigkeit sind. Soll der Logsum als Bewertungsmass herangezogen werden können, muss er unbedingt auch externe Effekte abbilden können. Es sollen hier zwei unterschiedliche Ansätze genannt werden.

Die erste Methode ist eine, die sich stark an die der KNA anlehnt. Es werden neben dem Logsum mit Hilfe des Mengengerüsts gemäss KNA die externen Kosten berechnet. Diese lassen sich einfach zum monetarisierten Logsum addieren.

Die zweite Methode sieht eine Veränderung der Nutzenfunktionen vor. Es müssten somit weitere Nutzenfunktionen definiert werden, die die externen Einflüsse wie z.B. Klima, Unfälle und Luftverschmutzung abbilden. In einem weiteren Schritt stellte sich die Frage, wie sich diese Nutzenfunktionen auf die Entscheidungssituation auswirken. Denn im Logit-Modell werden nur diejenigen Einflüsse modelliert, die auch tatsächlich die Entscheidung des Agenten beeinflussen. Vermutlich wird die schlechtere Beurteilung der Hauptstrassen gegenüber den Autobahnen in Bezug auf die Unfallraten viel weniger ein Argument für die Autobahnen sein als die höhere zulässige Geschwindigkeit. Für die Frage nach der Sicherheit der verschiedenen Modi (öV, IV, LV), darf angenommen werden, dass dies langfristige Entscheidungen sind und nicht jeden Tag vor dem Antreten des Arbeitswegs diskutiert werden. Vielmehr wird dieser Einfluss allgemeinerer Natur sein, also wird sich der Agent eher beim Kauf eines Autos die Frage stellen müssen, ob er sich den Gefahren des Autoverkehrs aussetzen will oder ob er doch lieber mit dem öffentlichen Verkehr fährt. Genauso wird das Thema Klima nicht jeden Morgen neu diskutiert, sondern eine grundlegendere Entscheidung sein, wie klimafreundlich der betreffende Agent reisen will. Hier ist eine Unterscheidung von verschiedenen Entscheidungshorizonten angebracht, wobei langfristige Entscheidungen von kurzfristigen unterschieden werden, was auch in der Parameterschätzung und allgemein in der Modellierung berücksichtigt werden könnte (siehe auch Kapitel 8). Wollte man aber auf die Einflüsse der externen Kosten bei der Berechnung des Logsums nicht verzichten, so müsste man zwar die Nutzenfunktionen auch für die externen Kosten auswerten, jedoch nicht in das Logit-Modell einfliessen lassen, sondern lediglich bei der Berechnung des Logsums berücksichtigen. Man müsste also entscheidungsrelevante Nutzen (RN) und entscheidungsirrelevante Nutzen (NRN) unterscheiden. Die Auswahlwahrscheinlichkeit berechnete sich dann nur aufgrund der entscheidungsrelevanten Nutzen wie folgt

$$P(j|C_n) = \frac{e^{V_{RN}}}{\sum_j e^{V_{RN}}}$$

der Logsum jedoch aufgrund aller definierten Nutzen

$$\ln\left(\sum_j e^{V_{RN}} + \sum_j e^{V_{NRN}}\right)$$

Gerade wegen der Trägheit des Logsums (die in Kapitel 7.5.3 diskutiert wird) ist es fraglich, ob entscheidungsirrelevante Nutzen tatsächlich modelliert werden sollen, wenn sie nachträglich nicht verändert bzw. angepasst werden können.

Mit der zweiten Methode wurde eigentlich eine Internalisierung der externen Kosten vorgenommen. Unter der Internalisierung von externen Kosten versteht man, dass der Verursacher des externen Effekts die Kosten selbst trägt. Als Beispiel seien Emissionsgebühren genannt. Die soeben getroffene Annahme, dass die externen Kosten trotz Nutzenfunktionen die Entscheidung der einzelnen Agenten nicht beeinflussen, zeigt den Fall, in dem die Agenten die Kosten dennoch nicht selber tragen müssen. Das wäre dann der Fall, wenn zwar die Kosten theoretisch den Verursachern zugewiesen, aber aus politischen Gründen nicht tatsächlich eingekassiert werden können. Sobald aber die externen Kosten selbst bezahlt werden müssen, also wirklich in das Entscheidungsmodell internalisiert werden, werden sie zu entscheidungsrelevanten Faktoren, die beim Entscheidungsmodell mitberücksichtigt werden müssen.

Zum Abschluss dieser Thematik sei aber auch noch erwähnt, dass die externen Kosten selbst dann zum Teil entscheidungsrelevant sein können, wenn keine effektiven Kosten für den Verursacher anfallen. So werden viele Autofahrer – entgegen der Theorie des homo oeconomicus – aus Rücksicht auf die Mitmenschen Quartierstrassen mit spielenden Kindern meiden und eher auf grössere Strassen ausweichen, neben den Sicherheitsaspekten auch um Lärmbelästigung zu vermeiden.

## 7.5.2 Konsistenz der Werte

Wie bereits kurz angedeutet, ist beim Vergleich der Nutzen aus KNA mit dem Logsum problematisch, dass die KNA und der Logsum unterschiedliche Parameter verwenden. Die KNA verwendet z.B. Zeitkosten-Werte aus der Norm, während das Verkehrsmodell die der Parameterschätzung zu Grunde liegenden Werte aus SP- oder RP-Daten verwendet. Natürlich sind auch die Werte in der Norm aus solchen SP- oder RP-Daten erhoben worden, doch ist die Datengrundlage in jedem Fall nicht die gleiche wie im Verkehrsmodell. Exemplarisch soll das

Verhältnis von Zeit- zu Betriebskosten betrachtet werden. Gemäss Kapitel 2.1 werden in der KNA für die Zeitkosten 17.63 CHF/h angesetzt und für die Betriebskosten im Stammverkehr 0.1817 CHF/km. Das Verhältnis dieser beiden Kosten beträgt 97. In Tabelle 7 stehen die geschätzten Werte für dieses Verkehrsmodell: Der Zeitparameter ist -2.916 und der Kostenparameter beträgt -0.191. Wird nun der Zeitparameter ins Verhältnis zum Kostenparameter gesetzt, so ergibt das einen Wert von etwa 15, was sehr stark von derjenigen in der Norm abweicht. In der KNA wird folglich die Reisezeit viel stärker gewichtet als im Logsum, der auf dem Entscheidungsmodell basiert. Die Folge dieser Inkonsistenz in den Parametern ist, dass die KNA ein Mengengerüst anders bewertet als es zustande gekommen ist. Oder anders ausgedrückt: würden sich die Agenten gemäss den KNA-Parametern entscheiden, würde ein anderes Mengengerüst resultieren.

### 7.5.3 Vor- und Nachteile der Methoden

Es sollen nun zusammenfassend die Vor- und Nachteile der Methode mit Logsum dargestellt werden.

#### **Vorteile des Logsums**

- *Der Logsum lässt sich ohne grossen zusätzlichen Mehraufwand berechnen*  
Der Logsum berechnet sich direkt aus dem gewählten Entscheidungsmodell (z.B. MNL) aus den gewählten Nutzenfunktionen. Ein Vorteil dieser Methode ist es folglich, dass mit dem Durchführen der Simulation gleichzeitig der Logsum bestimmt wird, da dieser für die Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten ohnehin berechnet werden muss und daher kein zusätzlicher Aufwand notwendig ist.
- *Der Logsum misst die Wohlstandsänderung genauer als die rule-of-half*  
In de Jong, Pieters et al. (2005) wird ausserdem folgender Vorteil der Methode gegenüber der klassischen genannt: die Veränderung des Logsums gibt gleichzeitig die Wohlstandsänderung an und zwar in einer genaueren Weise, als dies die *rule-of-half* tut, die auch in der KNA gemäss SN 641 820 (2006) bei der Berechnung der Nutzen im Mehrverkehr verwendet wird.
- *Der Logsum ist konsistenter als die Nutzenbewertung gemäss KNA*  
Ein wesentlicher Vorteil des Logsums, was auch in de Jong, Pieters et al. (2005) hervorgehoben wird, ist, dass der Logsum die Parameter des Entscheidungsmodells als Bewertungsgrundlage nimmt. Dadurch ist die Berechnung viel konsistenter als wenn zwei unterschiedliche Parameter benutzt werden, wie das bei der KNA der Fall ist: einerseits Parameter für das Mengengerüst und andererseits Parameter für die effektive Monetarisierung, insbesondere dann, wenn Entscheidungsmodelle für das Verkehrsmodell herangezogen werden. Das heisst auch, dass es für die Modellierer konsistenter

und logischer ist, mit dem Logsum zu arbeiten, es ist aber schwieriger, diese nicht so nachvollziehbare mathematische Zahl anderen, besonders der Politik, verständlich zu machen.

### **Nachteile des Logsums**

- *Der Logsum lässt sich nachträglich nicht aufschlüsseln*  
Die Berechnung des Logsums während der Simulation, die vorhin als ein Vorteil erwähnt wurde, bedeutet auch einen Nachteil: das Ergebnis ist eine Zahl, die zwar während (bzw. vor) der Simulation beliebig aufgeschlüsselt werden kann und sich so Teil-Logsums ergeben, doch wenn die Zahl einmal bestimmt ist, lässt sie sich nachträglich mathematisch nicht mehr aufschlüsseln bzw. rückwärts rechnen. Im Gegensatz dazu beruht die KNA nur auf dem Mengengerüst und kann daher einfach verändert werden, wollen z.B. die Kosten der Unfälle höher angesetzt werden. Diese Flexibilität ist natürlich auch trügerisch, denn mit der Veränderung der Kosten der einzelnen KNA-Elemente ist auch eine Veränderung des Mengengerüsts zu erwarten. Dennoch kann mittels KNA auch nachträglich entschieden werden, welche Einflüsse berücksichtigt werden und wie diese gruppiert werden sollen.
- *Der Logsum braucht ein Logit-Modell als Grundlage*  
Ebenfalls als ein Nachteil angesehen werden kann die Tatsache, dass der Logsum ein Logit-Modell als Grundlage braucht. Er lässt sich nicht direkt aus einem Mengengerüst herleiten. Prinzipiell kann die KNA auch mittels einer Verkehrszählung berechnet werden (was allerdings nicht besonders sinnvoll erscheint, da dann die Massnahme bereits realisiert worden wäre). Die KNA macht keine Vorschriften zum Verkehrsmodell und lässt damit viele Freiheiten für die Ermittlung des Mengengerüsts. Daher kann sowohl die hier verwendete Modellierung mit Hilfe von Entscheidungsmodellen als auch das klassische Vier-Stufen-Modell benutzt werden.
- *Der Logsum berücksichtigt keine externen Kosten*  
Nachteilig schliesslich am Logsum ist sicherlich die Behandlung der externen Kosten. Es wurden dafür zwei Methoden aufgezeigt. Bei der einfacheren Methode werden die externen Kosten gewöhnlich über das Mengengerüst bestimmt. Dabei vermischt man zwei verschiedene Dinge: einerseits die Berechnung mittels Logsums und andererseits die Berechnung gemäss KNA. Diese Vermischung kann als ein Nachteil dieser Methode angesehen werden. Der Vorteil aber liegt in der einfacheren Handhabung dieser Methode gegenüber der zweiten, wo die externen Kosten in die Logsum-Berechnung internalisiert werden.

## 7.6 Schlussfolgerungen

Die Frage nach dem Nutzen von Erreichbarkeitsverbesserungen ist vielschichtig und kann auch in dieser Arbeit nicht abschliessend beantwortet werden. Die Modellierung des Arbeitsweges allein, wie es in dieser Arbeit getan wurde, erlaubt nur einen kleinen Teil dieser Fragestellung zu bearbeiten. Aspekte wie der des zunehmenden Freizeitangebots durch Erreichbarkeitsverbesserung müssen ebenso ausgeklammert werden wie z.B. der zusätzliche Nutzen aus der Möglichkeit, dank neuen und besseren Routen verschiedene Aktivitäten miteinander zu verbinden und so auf dem Heimweg von der Arbeit auch gleich den Einkauf erledigen zu können.

Das für diese Arbeit erstellte Modell aber ermöglicht es dennoch zu erkennen, dass der Nutzen einer Infrastrukturmassnahme an vielen Orten neben den Reisezeitverkürzungen entstehen kann. Bei der Diskussion der Nutzenveränderungen gemäss KNA konnte festgestellt werden, dass mit zunehmender Wahldimension nicht nur vermehrt Nutzen aus den Reisezeitveränderungen entstanden sind, sondern dass zum Teil auch scheinbar schlechtere Zustände als die bestehende Situation prognostiziert wurden. Dieser scheinbare Widerspruch allerdings deutet darauf hin, dass Nutzen generiert werden, die die KNA, wie sie in dieser Arbeit angewandt wurde, nicht zu erfassen vermag: in der Pünktlichkeit und in der Verbesserung der Wohnsituation. Somit ist unumstritten klar, dass ein beträchtlicher Fehler gemacht werden kann, wenn bei der Bewertung einer Infrastrukturmassnahme das Schwergewicht nur auf die Reisezeiten gelegt wird. Es müssen jedoch bei der Beantwortung dieser Frage zwei Dinge vor Augen gehalten und unterschieden werden:

- Die Berücksichtigung von zusätzlichen Wahlfreiheiten neben der Verbindungswahl (wie z.B. Zeit- und Zielwahl) führen zu einem anderen Gleichgewicht und folglich zu einem anderen Mengengerüst als ohne Berücksichtigung dergleichen. Die monetäre Bewertung von Projekten und folglich der politische Entscheid basiert auf dem Mengengerüst und ist daher abhängig von den modellierten Entscheidungsdimensionen.
- Die Freigabe von gewissen Freiheitsgraden (wie z.B. Zeit- und Zielwahl) beeinflusst zwar das Mengengerüst und somit den Nutzen einer Infrastrukturmassnahme (siehe obiger Punkt), diese Freiheitsgrade werden aber dadurch noch nicht explizit bewertet. Auf diese Weise kann unterschlagen werden, dass ein Wohnort selbst einen Nutzen generiert, der unter Umständen längere Reisezeiten rechtfertigt. Es wäre somit angebracht, auch diese Nutzen explizit zu bewerten.

Oben genannte Punkte gelten für die Nutzenbestimmung gemäss KNA. Im Gegensatz dazu steht der Logsum, der sämtliche modellierten Freiheitsgrade berücksichtigt, da für das Ent-

scheidungsmodell Nutzenfunktionen definiert werden müssen, die zugleich auch im Logsum Niederschlag finden. Wird die Zeitwahl als eine Wahldimension modelliert, so wird diese auch explizit bewertet. Insofern kann der Logsum als Bewertungsmaß als konsistenter betrachtet werden. Es muss aber auch beachtet werden, dass die KNA in dieser Arbeit nicht alle Einflüsse bewertet, die prinzipiell möglich wären.

Selbst wenn die explizite Berücksichtigung der Zeitnutzen vernachlässigt wird, haben die Auswertungen der Simulationen gezeigt, dass ein wesentliches Verbesserungspotential in der zusätzlichen Berücksichtigung von Wahldimensionen liegt: Die Veränderung der Abfahrtszeit kann dabei einen zusätzlichen Nutzen bringen, da auf diese Weise Staubildung besser vermieden werden kann. In diesem Zusammenhang ist auch die Frage interessant, welche weiteren reichenden Konsequenzen dies hat. Stellt man sich eine Welt vor, in der alle Menschen zur gleichen Zeit zur Arbeit gehen, weil sie um Punkt 8 Uhr damit beginnen müssen, entstehen grosse wirtschaftliche Verluste, weil die Menschen überflüssige Zeit in ihrem Auto im Stau stehend verbringen oder zusätzlich Kapazitäten im öffentlichen Verkehr geschaffen werden müssen, die aber im Verlauf des Tages nicht mehr auch nur annähernd ausgenutzt werden. Im Gegensatz dazu steht eine Welt in der jeder Arbeitnehmer flexible Arbeitszeiten hat. Er kann seine Stunden so einteilen, wie er möchte. Die Konsequenz dieses Szenarios wäre, dass sich die Fahrten viel mehr über den Tag verteilen – und sich somit die Reisezeiten verkürzten. Dies zeigt sich auch beim Pendeln: am Morgen ist die Auslastung der S-Bahnen kritischer als am Abend, da sich die Personen am Abend weniger punktuell auf die S-Bahn begeben, sei es wegen Einkaufens nach der Arbeit oder aus anderen Gründen. Dazu käme die zusätzliche Nutzenkomponente, dass die Arbeitnehmer eher nach ihren persönlichen Zeitplänen arbeiten können. Damit wäre auch eine Effizienzsteigerung verbunden, denn die Arbeitenden würden während ihrer kreativen Tagesphasen arbeiten.

Bisher wurde ausführlich diskutiert, wie gross der Fehler ist, wenn gewisse Freiheitsgrade blockiert bzw. nicht beachtet werden. Doch es darf bei allen diesen Überlegungen nicht vergessen werden, dass den Betrachtungen sehr einfache Modelle zu Grunde liegen. Im vorliegenden Fall wurde der Wohnortwahl ein sehr hoher Stellenwert beigemessen: Der Nutzen des Wohnorts macht rund die Hälfte des Gesamtnutzens aus. Dabei wurde die Trägheit dieses Freiheitsgrades – oder allgemein die Trägheit gewisser Freiheitsgrade – nicht berücksichtigt. Während ein Agent ohne Weiteres zehn oder gar dreissig Minuten früher losfährt, um den Stau zu vermeiden und um so seine Pünktlichkeit zu erhöhen, wird er vielleicht schon eher zögerlich eine völlig neue Route wählen, ein anderes Verkehrsmittel wählen, geschweige denn umziehen. Nicht zuletzt auch wegen der Umzugskosten, die mit einem Wohnortwechsel verbunden sind, im Modell aber nicht berücksichtigt wurden. In diesem Modell fällen die Agenten alle Entscheidungen gleich einfach: bringt ein Wohnortwechsel einen grösseren Nut-

zen als die zeitliche Verschiebung einer Fahrt, wird gezügelt. In Realität aber sind die Gründe für die Wohnortwahl viel komplexer: das soziale Netz, die Verwurzelung, die Gewohnheit und viele andere Faktoren sprechen gegen einen Wohnortwechsel. Eine verbesserte Wohnortmodellierung könnte diese Lücke schliessen. Ein Ansatz wäre es, in einem bestehenden Netz zu simulieren, wie die optimale Wohnort-Arbeitsort-Verteilung wäre und gleichzeitig zu erheben, wie sie tatsächlich ist. Die Abweichung dieser beiden Gleichgewichte könnte Aufschluss darüber geben, wie ein berechnetes (ideales) Gleichgewicht zu korrigieren ist. Doch trotz der Trägheit des Freiheitsgrades der Zielwahl ist zu beachten, dass Infrastrukturprojekte natürlich sehr langfristig zu bewerten sind. In einem längeren Zeitraum sind auch vermehrt Umzugseffekte zu erwarten. Hierbei hat das Modell dieser Arbeit aber einen nicht zu vernachlässigenden Punkt nicht berücksichtigt: neben dem Wohnortwechsel ist auch ein Arbeitsplatzwechsel möglich.

Ein sicherlich berechtigter Einwand ist die Frage, ob der Wohlstand, bzw. der Nutzen einer Infrastrukturmassnahme anhand des Logsums richtig abgebildet wird. Wie bereits mehrmals erwähnt, ist der Logsum eine Funktion der Möglichkeiten eines Agenten, also seines Alternativensatzes. Er ist also ein Mass für das Nutzenpotential. Daher wird auch die Bezeichnung "erwarteter maximaler Nutzen" (*expected maximum utility*) in der Literatur (z.B. Ben-Akiva und Bierlaire (2003)) verwendet. Wird der Nutzenmessung der Logsum zu Grunde gelegt, so würde dies bedeuten, dass auch mit wachsender Anzahl an Möglichkeiten der Nutzen steigt. Oder mit anderen Worten: Der Nutzen der Erreichbarkeit entsteht auch in der Möglichkeit, verschiedene Routen zu wählen, mehr Ziele zu erreichen, ohne dieses Potential auch wirklich auszuschöpfen. Doch stellt sich dabei die Frage, wie viel Nutzen eine grosse Anzahl an Möglichkeiten tatsächlich bringt. Denn wenn ein Agent aus seinem Alternativensatz mit zehn verschiedenen Alternativen stets dieselbe auswählt, welchen Nutzen bringt das Vorhandensein der restlichen neun? Es ist hier die Möglichkeit, eine andere Alternative zu wählen, die positiv bewertet wird, der Optionswert sozusagen. Er ist ein Wert, der mögliche künftige Nutzen einer Alternative miteinschliesst. Doch einen effektiven Nutzen bringt sie nicht. Für viele Personen mag z.B. ein nahe gelegener Wald ein Grund für einen bestimmten Wohnort sein, denn es schafft die Möglichkeit für Erholung. Aber nicht wenige werden vermutlich nie diese Möglichkeit auch tatsächlich nutzen, wobei die Gründe hierfür verschieden sein können. Dass mehr nicht zwingend besser ist wurde z.B. in Weber (2009) gesagt: Menschen, die ihren Alternativensatz bei der Jobsuche verringern, indem sie ihrer Familie zuliebe den Umkreis der möglichen Arbeitsgeber einschränken und so vermutlich auf gewisse besonders gute Jobs verzichten, sich also mit weniger Nutzen begnügen, sind damit aber womöglich zufriedener. In diesem Fall wäre weniger mehr.

Abschliessend sollen ein paar Gedanken zum Gleichgewicht gemacht werden. Ganz zu Beginn dieser Arbeit wurde der *homo oeconomicus* eingeführt, es wird also davon ausgegangen, dass die Agenten im System ihren Nutzen maximieren. Das heisst aber auch, dass Nutzenkomponenten im Gleichgewicht stehen müssen. Fährt ein Agent länger zur Arbeit, so müssen diese durch den längeren Weg verursachten Kosten entweder durch einen sehr guten Wohnort (Preis, Attraktivität, etc.) oder durch einen sehr guten Arbeitsplatz (Arbeitsbedingungen, Lohn, etc.) oder die Freude am Fahren<sup>26</sup> kompensiert werden, denn sonst würde der Agent eine Alternative wählen, die ihm einen geringeren Nutzen bringt als eine andere. In Stutzer und Frey (2003) wurde untersucht, wie glücklich Pendler sind. Wenn nämlich die Annahme richtig ist, dass sich längere Arbeitswege kompensieren, dann dürfte keine Korrelation zwischen der Zufriedenheit (Nutzen) und der Länge des Arbeitsweges bestehen. Tatsächlich aber verhält es sich anders, denn Pendler sind laut jener Studie weniger glücklich als solche Arbeitnehmer, die kürzere Arbeitswege haben. Trotz möglicher Erklärungsversuche gelangen die Autoren schliesslich zum Schluss, dass viele Pendler nicht rational handeln. Dies soll veranschaulichen, dass die Modelle, egal wie viele Nutzenanteile mitmodelliert werden, nie in der Lage sein werden, das menschliche Verhalten genau vorauszusagen.

---

<sup>26</sup> In Mokhtarian und Salomon (2001) wird die Frage aufgeworfen, inwiefern der Verkehr tatsächlich Mittel zum Zweck ist, mit dem Ergebnis, dass es durchaus Fälle gibt, in denen die Fahrt selbst einen Nutzen bringt und nicht nur am Anfang oder Ende der Fahrt Nutzen generiert wird.

## 8 Ausblick

Mit dieser Arbeit sind die Fragen nach dem Nutzen der Erreichbarkeit bei weitem nicht erschöpft. In folgenden Arbeiten könnte mit Hilfe der Nachfrageelastizitäten für die Erreichbarkeitsverbesserungen in Weis und Axhausen (2009) der induzierte Neuverkehr berücksichtigt werden, der in diesem Modell vernachlässigt wurde. Damit wäre eine vollständigere Betrachtung der Fragestellung möglich, da infolge Erreichbarkeitsverbesserungen auch Mehrverkehr entsteht, der einen Teil des Nutzens infolge Reisezeitverkürzung wieder egalisiert.

Eine weitere interessante Fragestellung wäre, inwiefern sich die Internalisierung der externen Kosten auf die Anzahl und Art der Fahrten auswirkten und wie sich dadurch das Mengengerüst und somit die Nutzen gemäss KNA verändern würden. In diesem Zusammenhang könnte auch genauer untersucht werden, wie die externen Kosten in den Logsum integriert werden könnten und ob dies sinnvoll erscheint.

Eine Anwendung der Methoden auf reale Projekte (mit Berücksichtigung der Realisierungskosten) könnte auch die Frage beantworten, wie sich der Effekt der Vernachlässigung von Wahldimensionen auf die Bauentscheide auswirkt. In dieser Arbeit konnte zwar gezeigt werden, dass die Priorisierung der Projekte nicht so stark davon abhängig, doch auf quantitativer Ebene wäre interessant festzustellen, ob es dadurch effektiv zu fehlerhaften Bauentscheiden kommt.

Eine weitere Verbesserung des Modells wäre es, die verschiedenen Zeithorizonte zu berücksichtigen. So dass z.B. in jeder Iteration zwar alle Agenten die Abfahrtszeit und Verbindung neu wählen können, aber dass der Umzug (die Zielwahl) nur wenigen gestattet ist. Ferner müsste sicherlich auch der Arbeitsort genauer modelliert werden, der besser mit dem Einkommen abgeglichen ist und der auch gewechselt werden kann. Doch solch eine Detailtreue würde den Rahmen einer abstrakten Modellierung, wie in dieser Arbeit vorgenommen, sprengen und verlangte nach grösseren Modellen.

## 9 Literatur

- Bathelt, H. und J. Glückler (2002) *Wirtschaftsgeographie: Ökonomische Beziehungen in räumlicher Perspektive*, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Ben-Akiva, M. und M. Bierlaire (2003) Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions, *Handbook of Transportation Science*, Chapter 2, Kluwer Academic Publ.
- Ben-Akiva, M. und S.R. Lerman (1985) *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, MIT Press, Cambridge.
- Bundesamt für Statistik (2007) Finanzielle Situation der privaten Haushalte – Zusammensetzung und Verteilung der Einkommen, BfS, Neuchâtel.
- Bundesamt für Statistik (2007) Mobilität in der Schweiz – Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehrsverhalten, BfS, Neuchâtel.
- Blum, U., A. Karmann und M. Lehmann-Waffenschmidt (2003) *Grundlagen der Volkswirtschaftslehre (2. Auflage)*, Springer Verlag, Berlin.
- Chaumet, R., K.W. Axhausen, M. Bernard, F. Bruns, P. Locher, M. Lüthi und D. Imhof (2007) Verfahren zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit in Evaluationen, *Forschungsbericht SVI 2002/002*, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern.
- de Jong, G., M. Pieters, A. Daly, I. Graafland, E. Kroes und C. Koopmans (2005) Using the logsum as an evaluation measure: Literature and case study, Vortrag, ERSA, Amsterdam.
- Faber, M. H. (2007) *Statistics and Probability Theory*, Skript, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Zürich.
- Gálvez, T. und S. Jara-Díaz (1998) On the social valuation of travel time savings, *International Journal of Transport Economics*, **25** (2) 205-219.
- Hess, S., A. Erath und K.W. Axhausen (2008) Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit, *Schlussbericht SVI 2005/007*, IVT, ETH Zürich, Zürich.
- Löchl, M., M. Bürgle und K.W. Axhausen (2007) Implementierung des integrierten Flächennutzungsmodells UrbanSim für den Grossraum Zürich – ein Erfahrungsbericht, *DISP*, **168**, 13-25.
- Louviere, J. J., D.A. Hensher und J. D. Swait (2000) *Stated Choice Methods: Analyses and Application*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Mackie, P., S. Jara-Díaz und T. Fowkes (2001) The value of travel time savings in evaluation, *Transportation Research*, **37** E (1) 91-106.

- Maier, G. und P. Weiss (1990) Modelle diskreter Entscheidungen, Springer Verlag, Wien.
- Mokhtarian, P. und I. Salomon (2001) How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations, *Transportation Research A*, **35** (8) 696-719.
- Metz, D. (2008) The Economics of Travel Reconsidered, *The limits to travel: how far will you go?*, Chapter 3, Earthscan, London.
- Ortúzar, J.d.D. und L.G. Willumsen (2001) *Modelling transport (3rd edition)*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Ramming, M. S. (2002) *Network Knowledge and Route Choice*, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- SBB (2009) SBB: Ticket Shop, <http://www.sbb.ch>, 15.4.2009.
- Small, K.A. (1982) The scheduling of consumer activities: Work trips, *American Economic Review*, **72** (3) 467-479.
- Small, K.A. (1987) A discrete choice model for ordered alternatives, *Econometrica*, **55** (2) 409-424.
- SN 641 820 (2006) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Grundnorm, VSS, Zürich.
- SN 641 822 (2007) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Zeitkosten im Personenverkehr, VSS, Zürich.
- SN 641 824 (2009) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Unfallraten und Unfallkostensätze, VSS, Zürich.
- SN 641 827 (2008) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Betriebskosten im Strassenverkehr, VSS, Zürich.
- SN 641 828 (2009) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Kosten, VSS, Zürich.
- Stutzer, A. und B.S. Frey (2003) Stress that doesn't pay: The commuting paradox, *Working Paper Series*, Institute for Empirical Research in Economics, Universität Zürich, Zürich.
- Statistisches Amt (2009) Statistisches Amt des Kantons Zürich: Bodenpreise nach Gemeinden, <http://www.statistik.zh.ch/bodenpreise>, 11.4.2009.
- Treiber, M. (2007) *Grundlagen der Theoretischen Verkehrsplanung*, Skript, Lehrstuhl für Verkehrsmodellierung und -ökonomie, Technische Universität Dresden, Dresden.
- Vrtic, M. (2003) *Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell*, Dissertation, Fakultät Verkehrswissenschaften, Technische Universität Dresden, Dresden.

- Vrtic, M., K.W. Axhausen, R. Maggi und F. Rossera (2003) Verifizierung von Prognosemethoden im Personenverkehr, *SBB und Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)*, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich and USI Lugano, Zürich und Lugano.
- Vrtic, M., D. Lohse, P. Fröhlich, C. Schiller, N. Schüssler, H. Teichert und K.W. Axhausen (2005) A simultaneous two-dimensionally constraint disaggregate trip generation, distribution and mode choice model: Theory and application for the Swiss national model, *ERSA conference*, Amsterdam.
- Vrtic, M., O. Meyer-Rühle, S. Rommerskirchen, P. Cerwenka und W. Stobbe (2000) Sensitivitäten von Angebots- und Preisänderungen im Personenverkehr, *SVI Forschungsberichte*, **44/98**, Bundesamt für Strassen, Bern.
- Vrtic, M., N. Schüssler, A. Erath, K. Meister und K.W. Axhausen (2007) Tageszeitliche Fahrtenmatrizen im Personenverkehr an Werktagen im Jahr 2000, *Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bundesamt für Strassen (ASTRA) und Bundesamt für Verkehr (BAV)*, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zurich, Zürich.
- Weber, D. (2009) Die Last der grossen Auswahl, *NZZ Folio: Entscheidungen – Die Tyrranei der freien Wahl*, 47-49, NZZ, Zürich.
- Weis, C. und K.W. Axhausen (2009) Induced travel demand: Evidence from a pseudo panel data based structural equations model, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **558**, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich.

## 10 Glossar

$n$	Person
$k$	Wohnort
$a$	Kante
$i$	Verbindung
$j$	Alternative
$K$	Kapazität
$Q$	Nachfrage / Belastung
$Y$	Einkommen
$T_a$	Fahrzeit auf der Kante $a$
$T_{a0}$	Fahrzeit Nullbelastung auf der Kante $a$
$V$	deterministische Nutzenkomponente
$\varepsilon$	stochastische Nutzenkomponente
$U$	Gesamtnutzen
$C_n$	Alternativensatz des Agenten $n$
$CS$	Konsumentenrente (Consumer Surplus)

## Anhänge

### A 1 Kosten-Nutzen-Analysen (PSL und MAX)

Tabelle 29 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (A PSL)

	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	410.61	456.28	217.49
Betriebskosten der Fahrzeuge	-0.88	12.17	-8.31
Reisezeitveränderungen	411.49	444.11	225.80
Mehrverkehr	-59.87	-60.56	-9.19
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	-87.16	-84.54	-21.56
Nettonutzen	27.29	23.98	12.38
Einnahmen im öV	357.00	345.80	320.25
– Externe Kosten	302.75	269.96	90.38
Unfälle	302.57	272.43	88.70
Luftverschmutzung	0.14	-1.91	1.30
Klima	0.04	-0.56	0.38
Total	1'010.49	1'011.48	618.94
Logsum	118.47	126.65	215.61

Tabelle 30 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (A MAX)

	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	377.00	571.49	179.21
Betriebskosten der Fahrzeuge	-0.46	-0.46	-0.46
Reisezeitveränderungen	377.46	571.95	179.67
Mehrverkehr	9.81	12.95	2.42
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	9.19	10.20	1.59
Nettonutzen	0.62	2.75	0.82
Einnahmen im öV	7.00	0.00	0.00
– Externe Kosten	-24.65	-31.42	39.30
Unfälle	-24.74	-31.52	39.21
Luftverschmutzung	0.07	0.07	0.07
Klima	0.02	0.02	0.02
Total	369.16	553.01	220.92
Logsum	72.54	22.52	129.69

Tabelle 31 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (B PSL)

	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	-420.06	-498.01	-402.67
Betriebskosten der Fahrzeuge	-238.02	-212.71	-223.47
Reisezeitveränderungen	-182.05	-285.30	-179.19
Mehrverkehr	-28.24	-10.79	-58.51
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	24.41	38.12	71.43
Nettonutzen	-52.65	-48.91	-129.94
Einnahmen im öV	-1.40	-50.40	-96.25
– Externe Kosten	473.97	398.86	576.28
Unfälle	425.63	355.66	530.89
Luftverschmutzung	37.37	33.40	35.08
Klima	10.97	9.81	10.30
Total	24.27	-160.34	18.85
Logsum	37.27	43.47	130.94

Tabelle 32 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (B MAX)

	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	466.13	471.21	323.82
Betriebskosten der Fahrzeuge	-0.46	-0.46	0.00
Reisezeitveränderungen	466.60	471.68	323.82
Mehrverkehr	8.91	8.86	208.83
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	10.20	10.20	60.53
Nettonutzen	-1.28	-1.34	148.30
Einnahmen im öV	0.00	0.00	0.00
– Externe Kosten	-31.42	-31.42	93.44
Unfälle	-31.52	-31.52	93.44
Luftverschmutzung	0.07	0.07	0.00
Klima	0.02	0.02	0.00
Total	443.63	448.65	626.08
Logsum	139.63	111.53	210.80

Tabelle 33 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (C PSL)

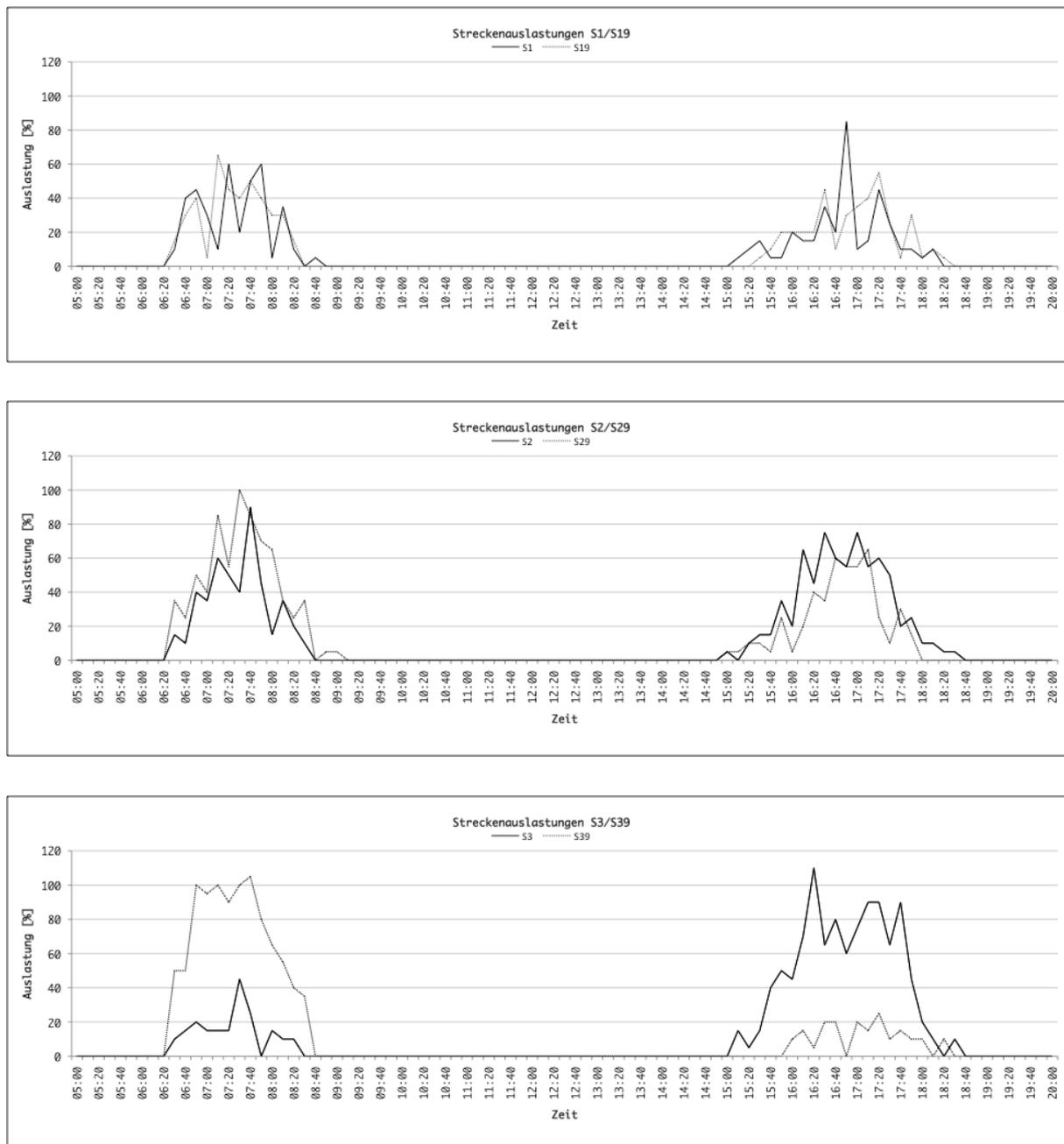
	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	419.63	382.16	355.78
Betriebskosten der Fahrzeuge	-172.96	-107.71	-157.83
Reisezeitveränderungen	592.59	489.86	513.61
Mehrverkehr	80.92	81.68	370.69
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	26.07	33.06	215.10
Nettonutzen	54.85	48.62	155.59
Einnahmen im öV	-1.40	-35.00	-44.80
– Externe Kosten	1'502.22	1'527.36	1'128.13
Unfälle	1'467.09	1'505.49	1'096.07
Luftverschmutzung	27.15	16.91	24.78
Klima	7.98	4.97	7.28
Total	2'001.37	1'956.20	1'809.80
Logsum	189.91	175.90	272.19

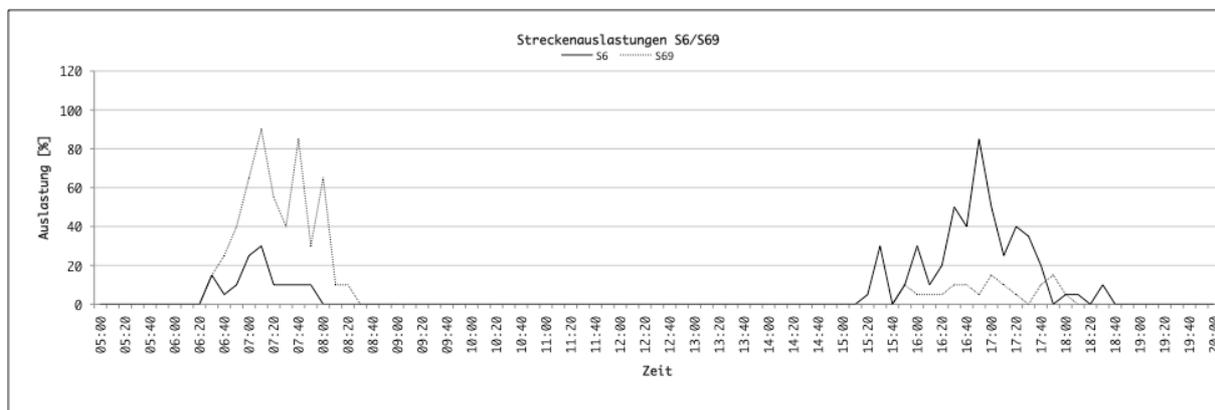
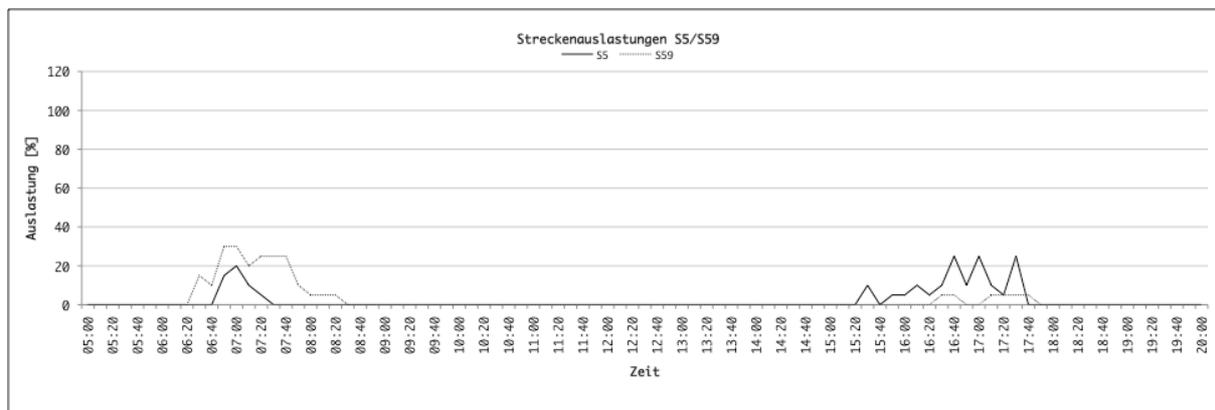
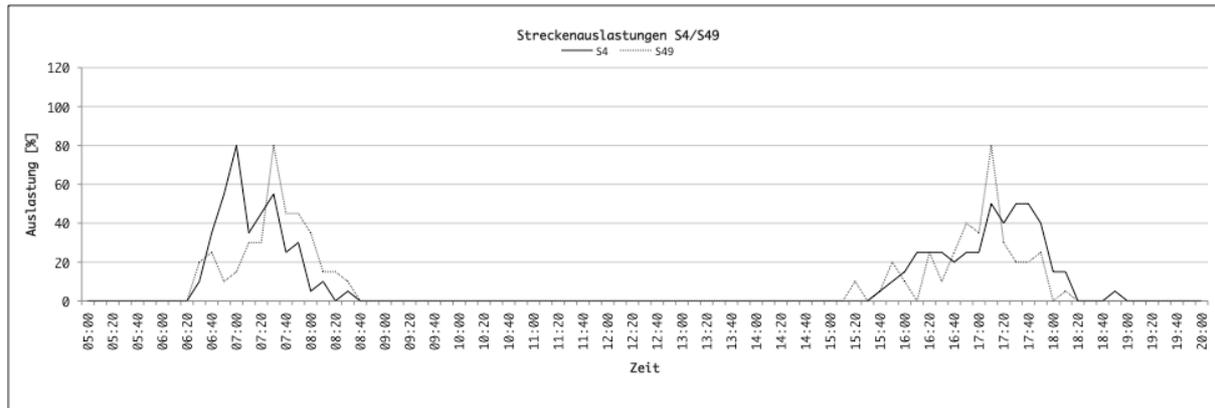
Tabelle 34 Nutzendifferenzen berechnet nach KNA bzw. Logsum (C MAX)

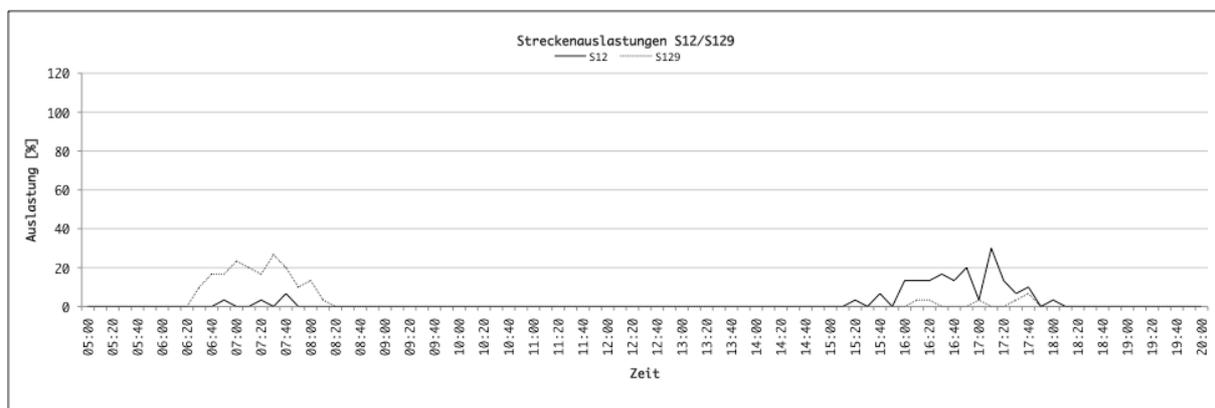
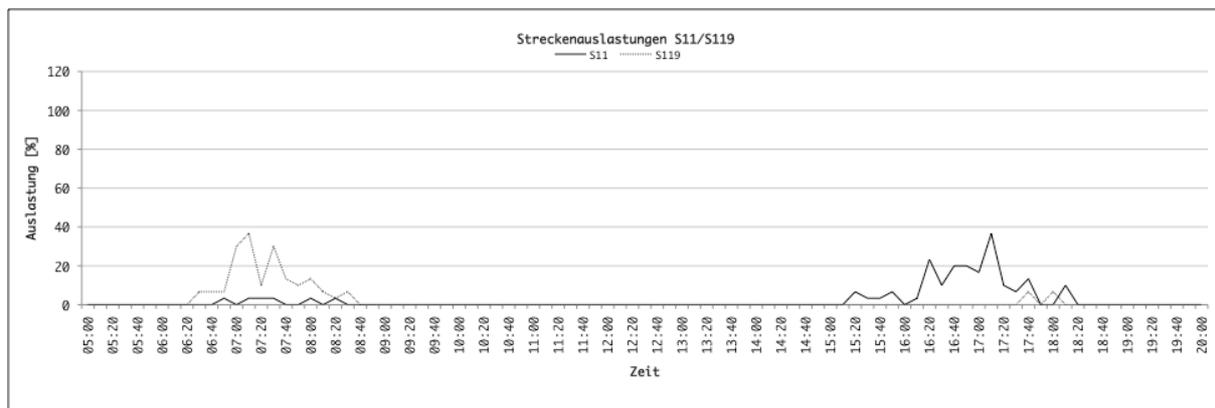
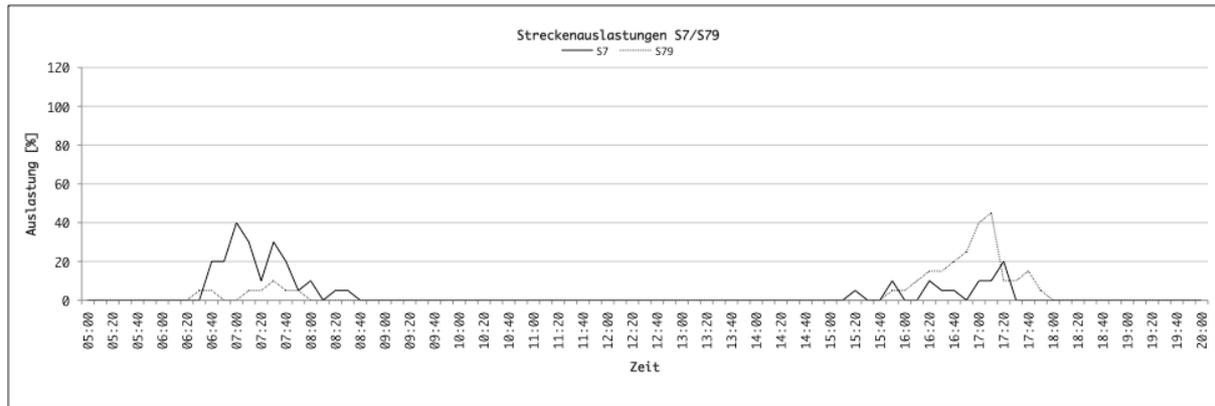
	r	a-r	z-a-r
Stammverkehr	469.70	827.32	546.04
Betriebskosten der Fahrzeuge	-0.46	-0.46	-0.46
Reisezeitveränderungen	470.16	827.79	546.51
Mehrverkehr	16.52	19.15	239.31
Einnahmen aus Treibstoffsteuern	10.20	10.20	100.59
Nettonutzen	6.32	8.95	138.72
Einnahmen im öV	0.00	0.00	0.00
– Externe Kosten	593.50	593.50	609.68
Unfälle	593.41	593.41	609.59
Luftverschmutzung	0.07	0.07	0.07
Klima	0.02	0.02	0.02
Total	1'079.72	1'439.97	1'395.03
Logsum	72.86	94.04	152.05

## A 2 Streckenauslastungen

Abbildung 13 Streckenauslastungen Referenzfall (z-a-r)







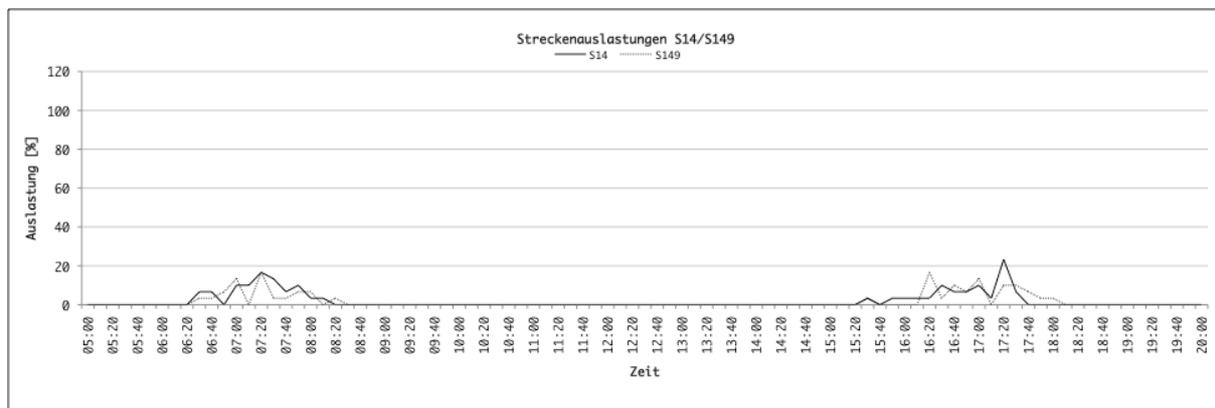
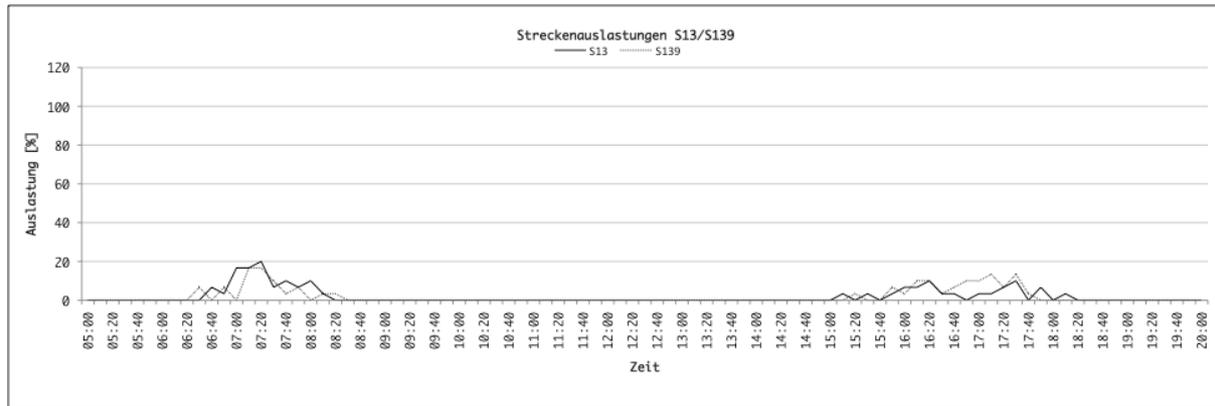
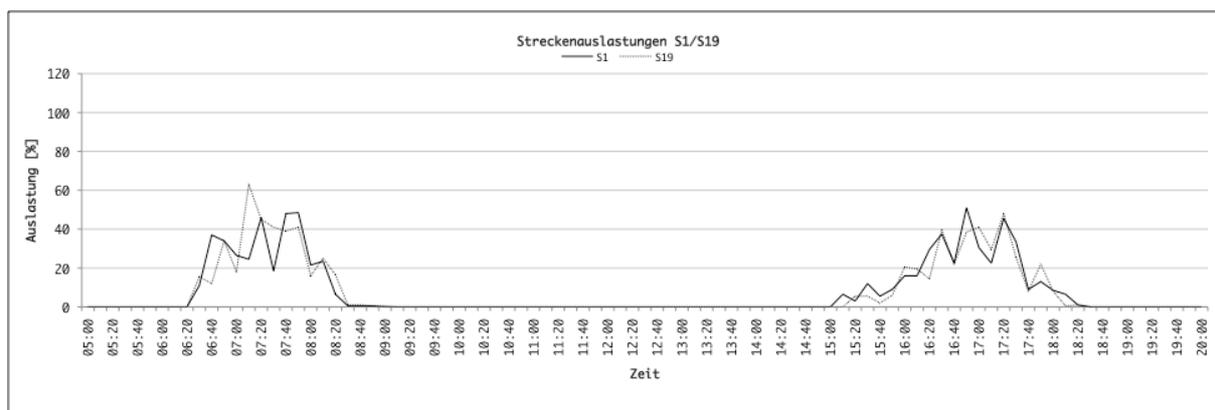
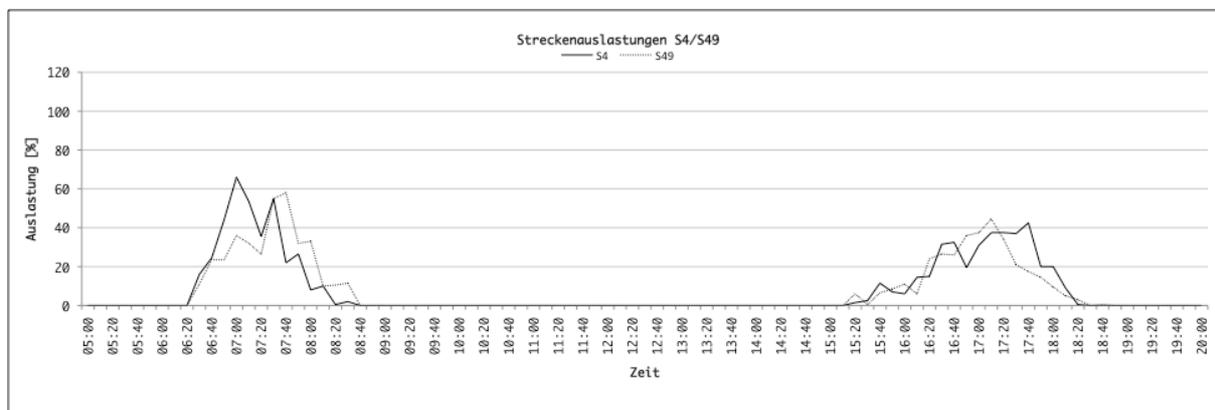
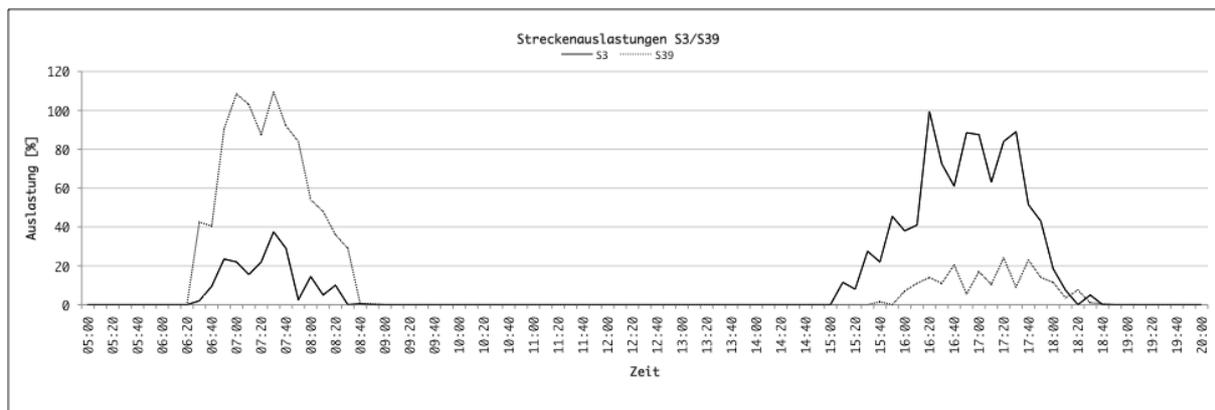
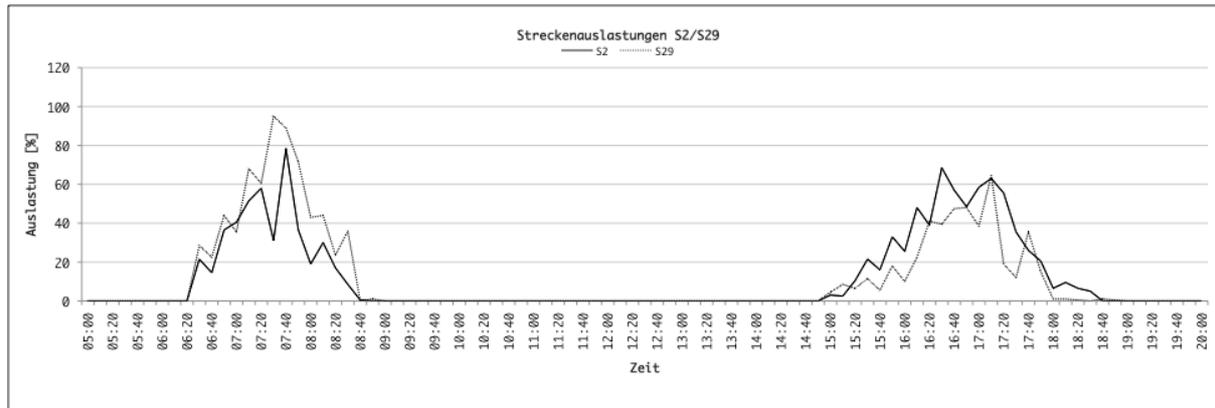
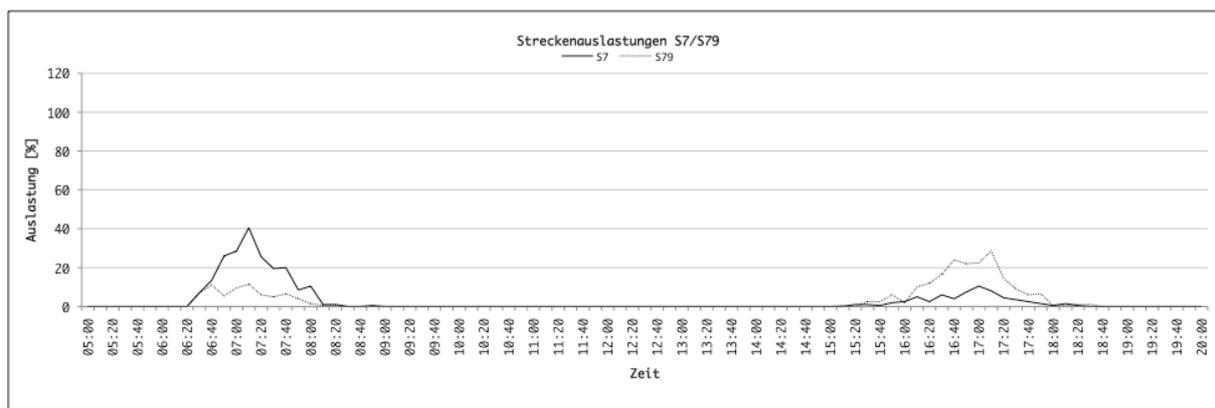
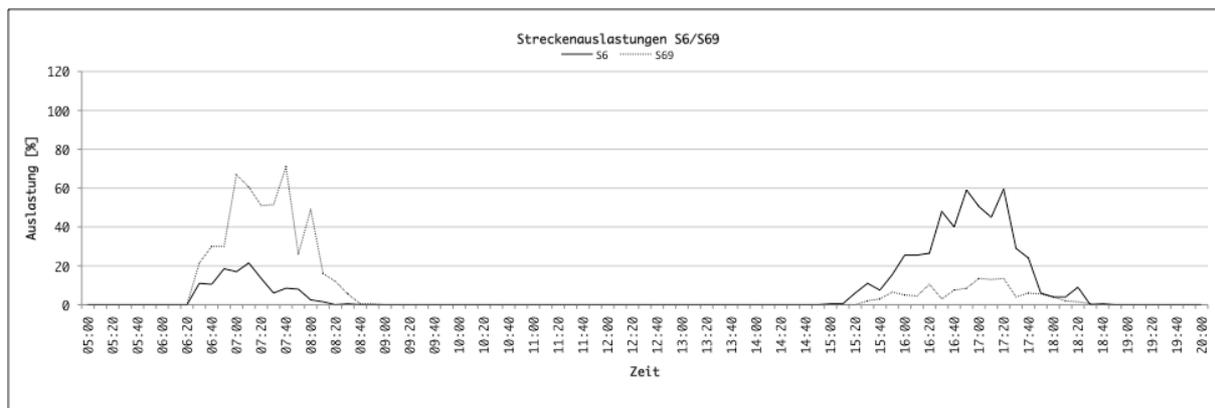
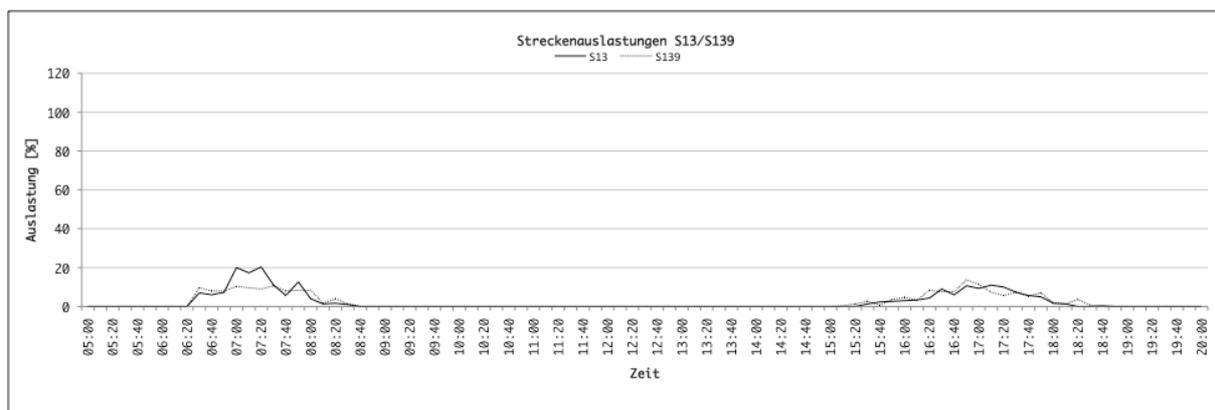
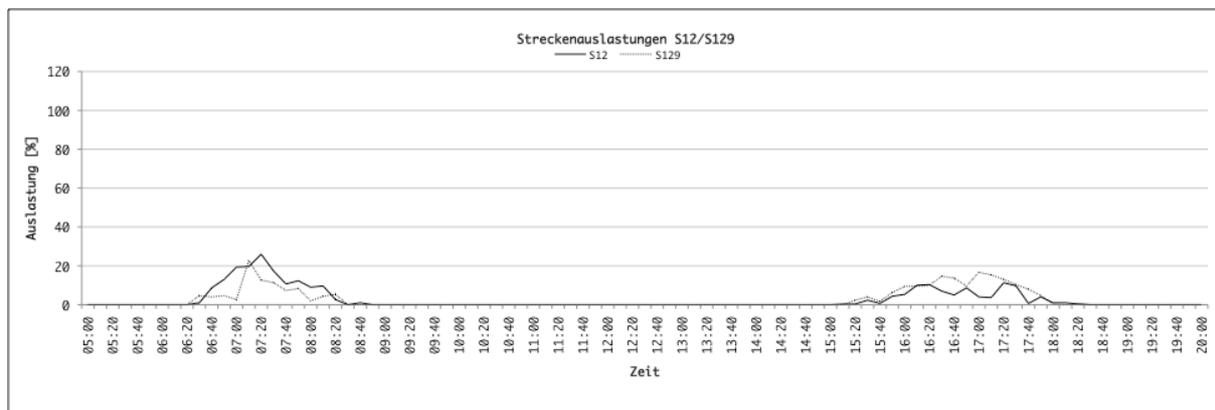
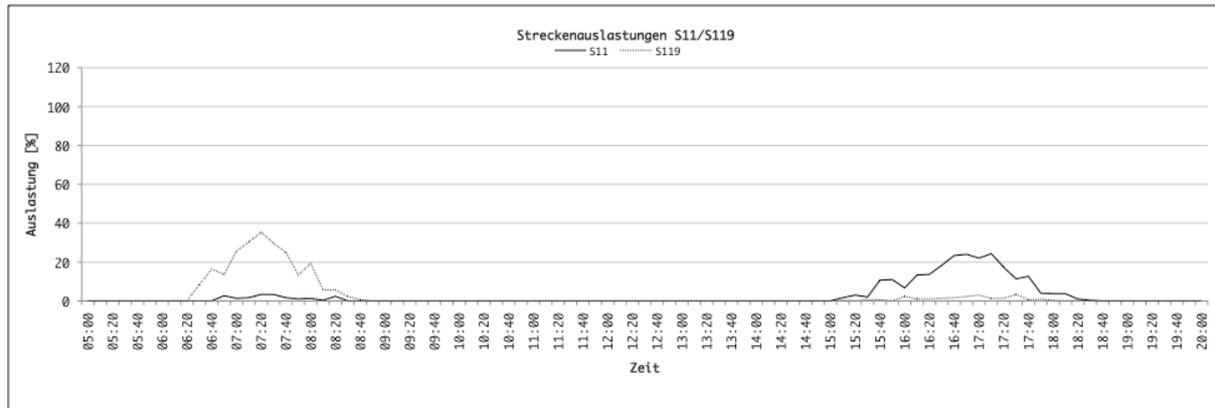


Abbildung 14 Streckenauslastungen Massnahmenpaket A (r)









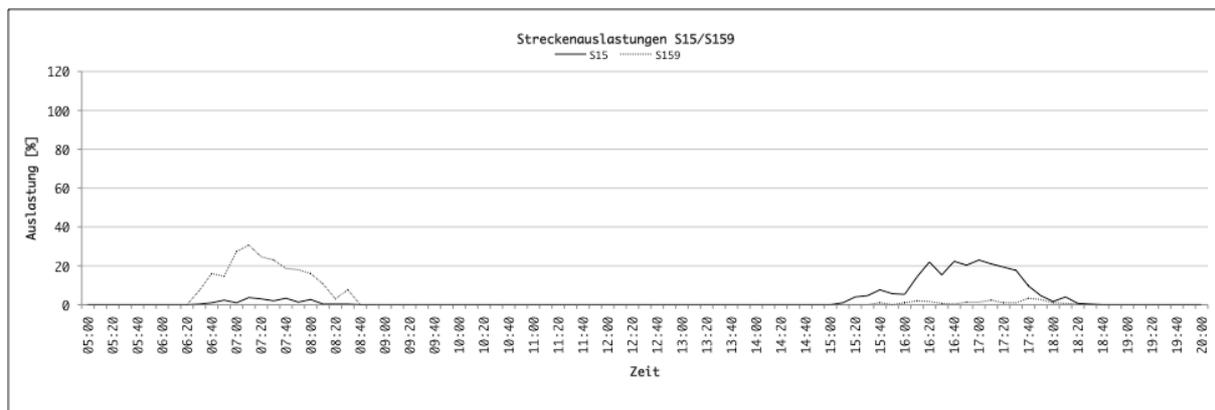
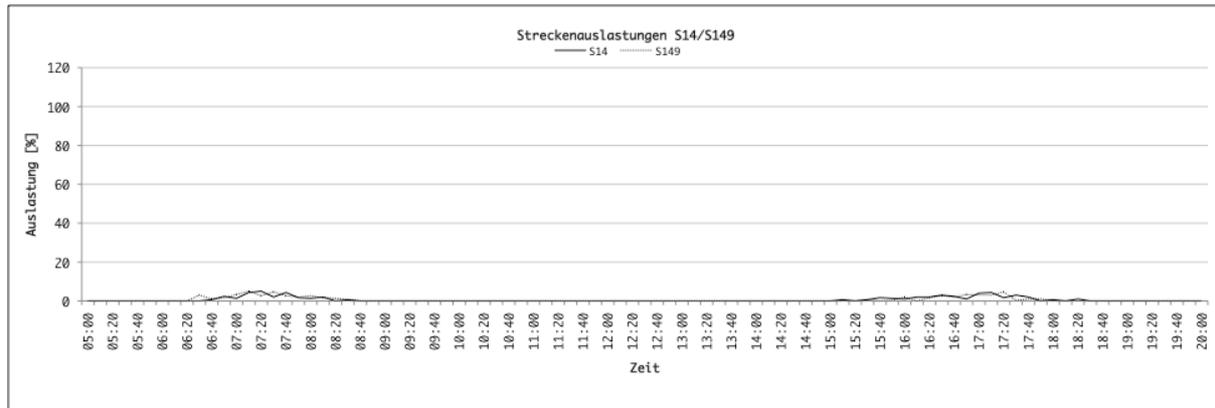
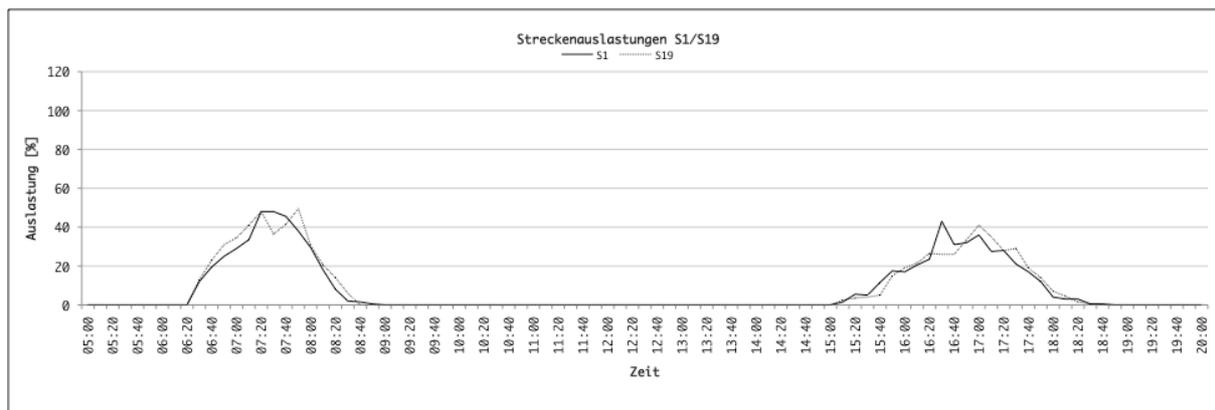
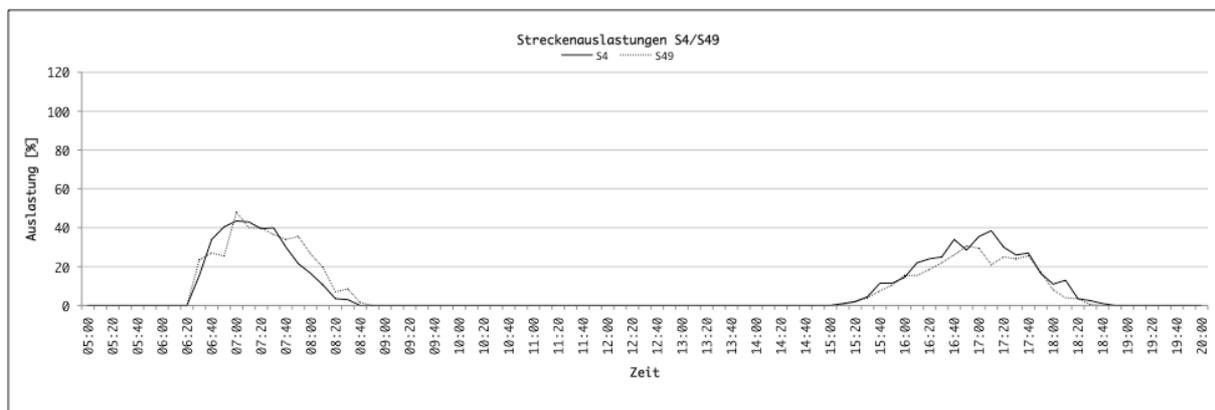
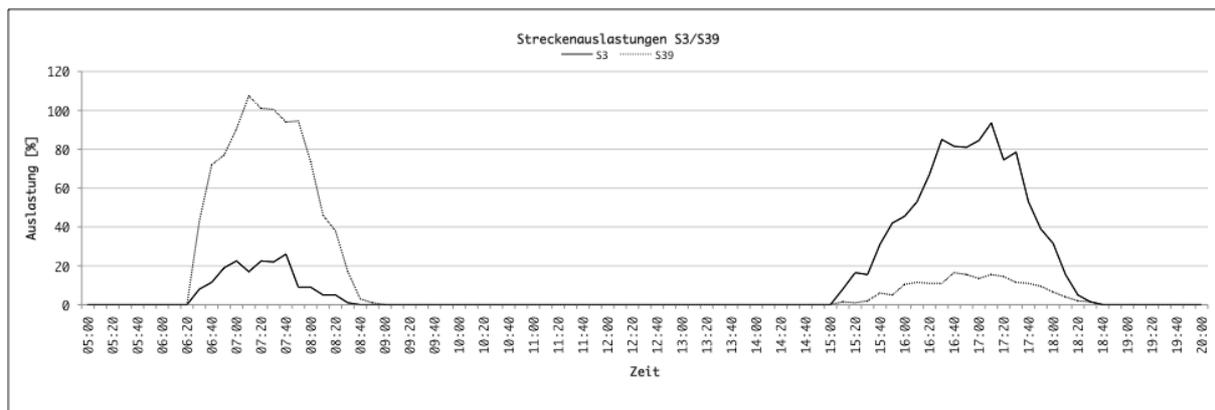
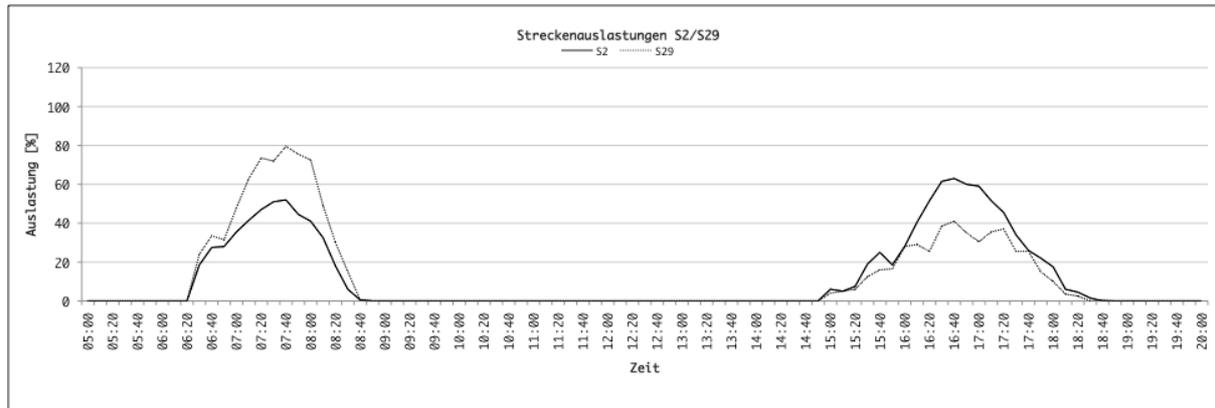
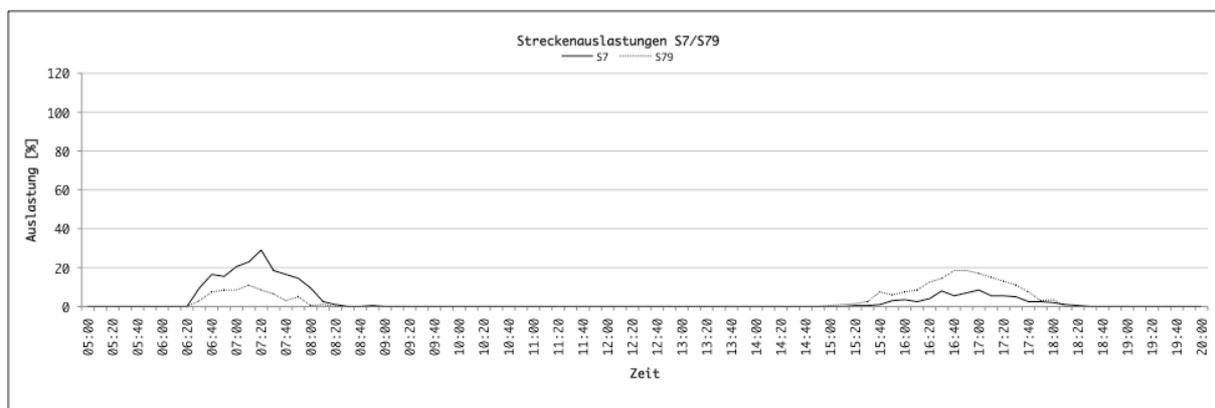
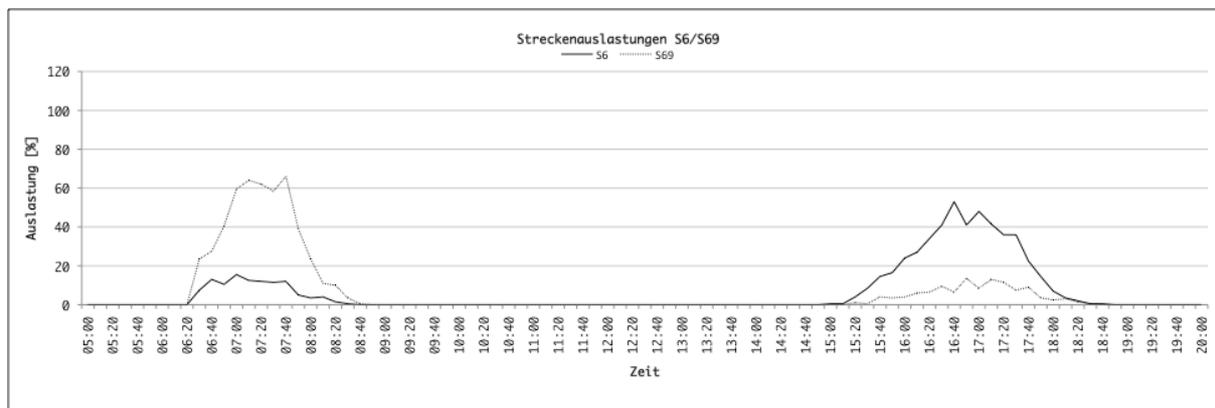
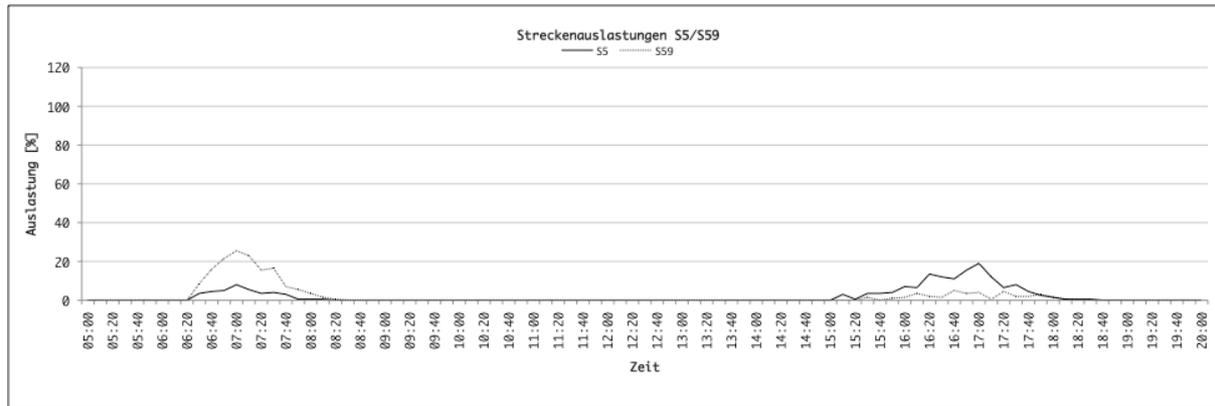
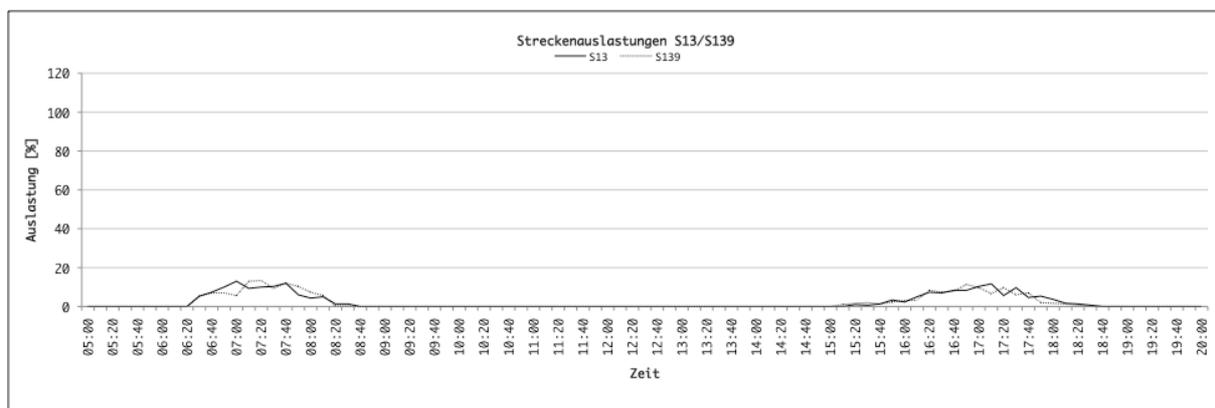
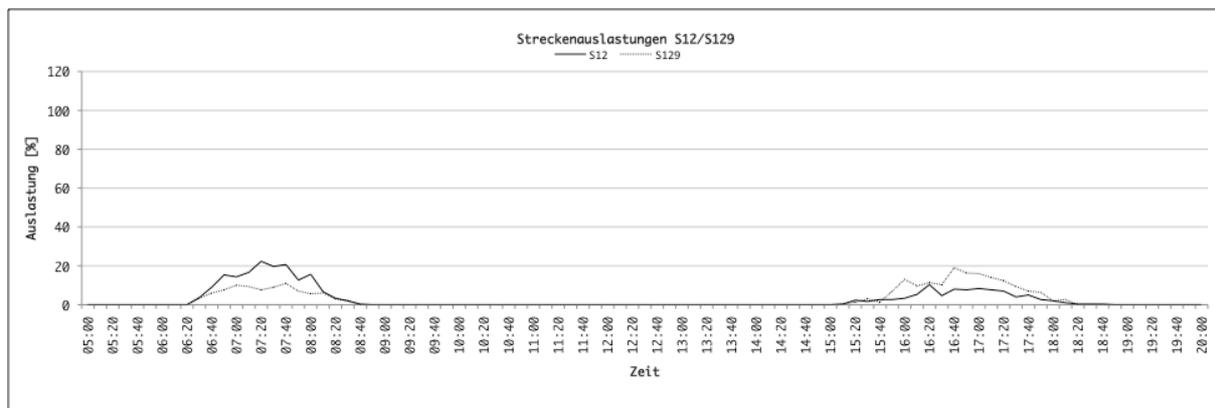
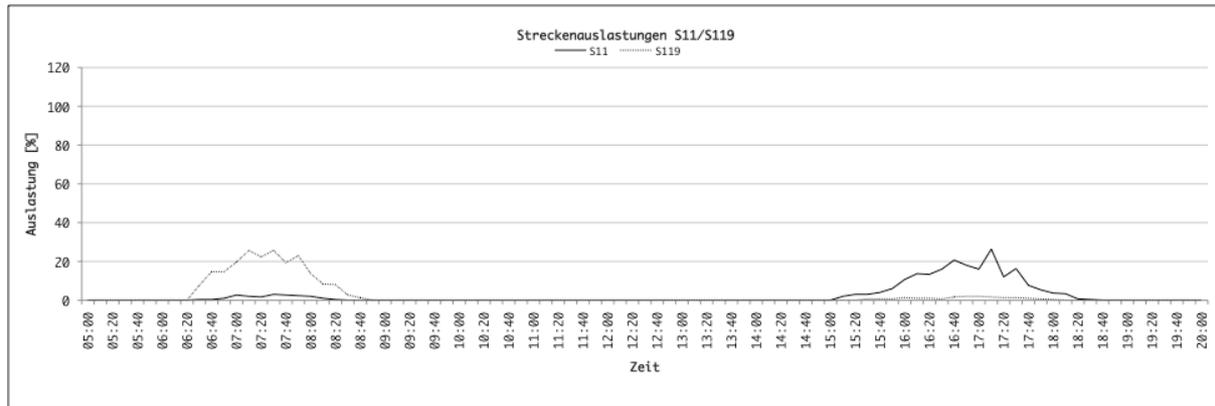


Abbildung 15 Streckenauslastungen Massnahmenpaket A (a-r)









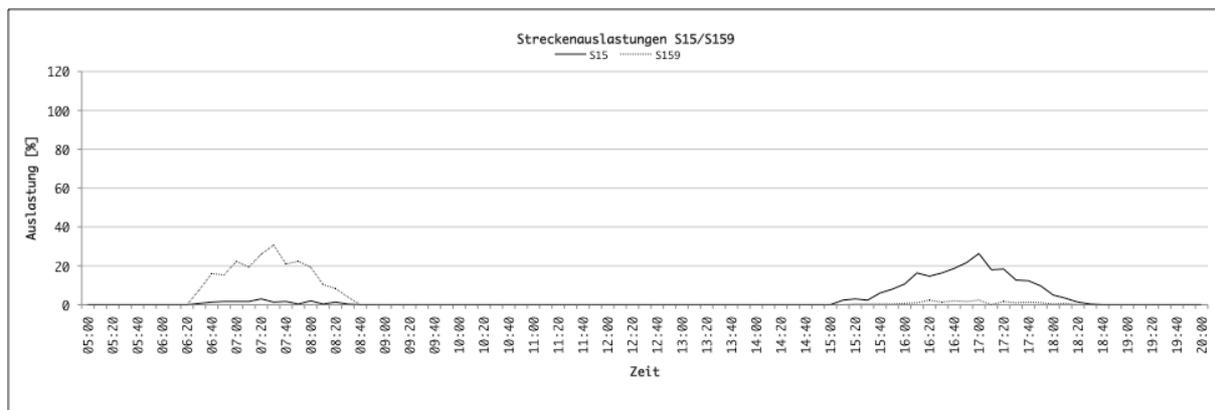
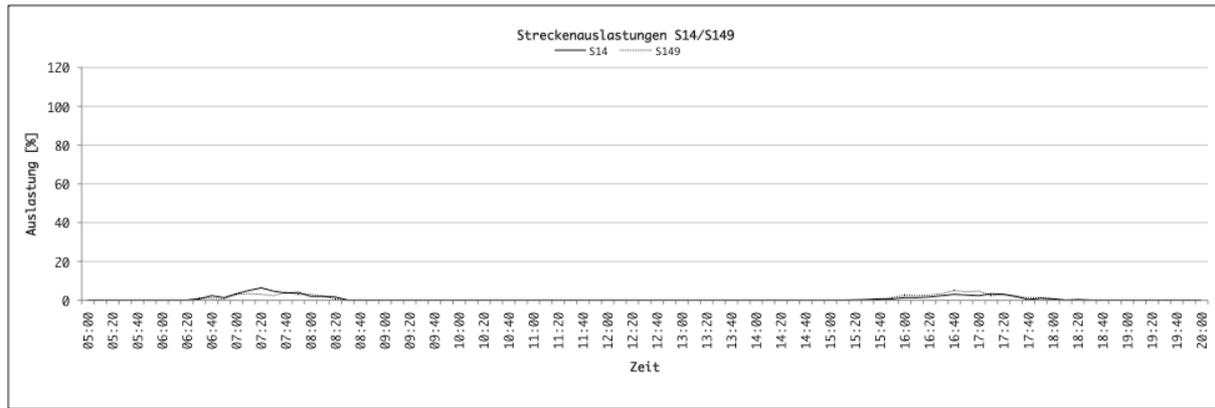
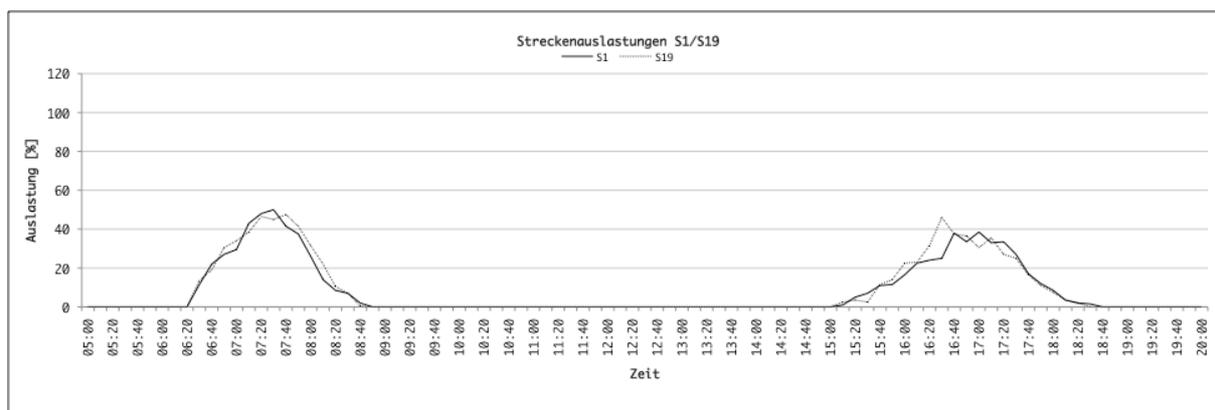
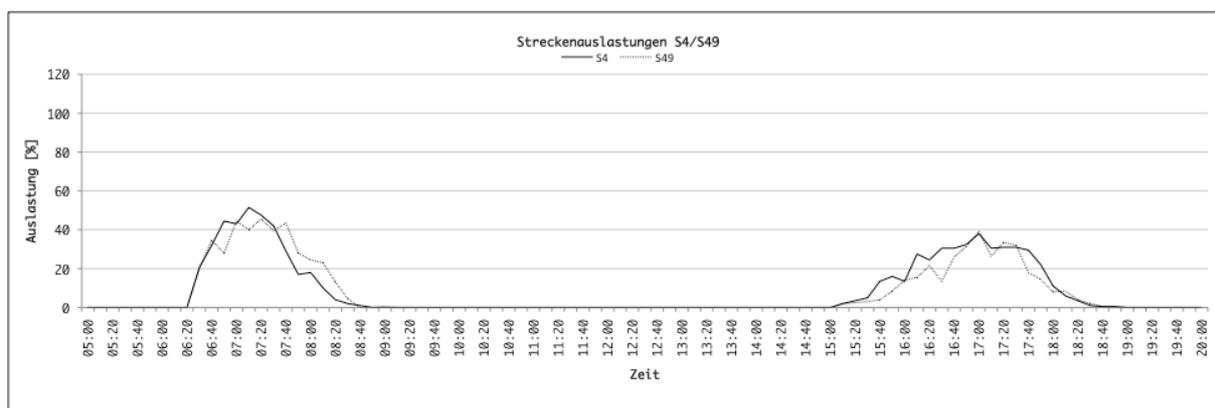
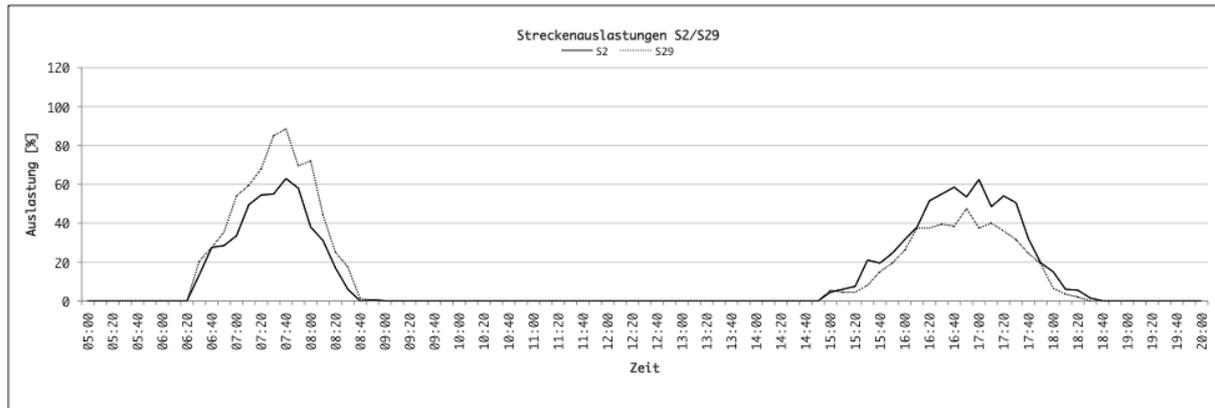
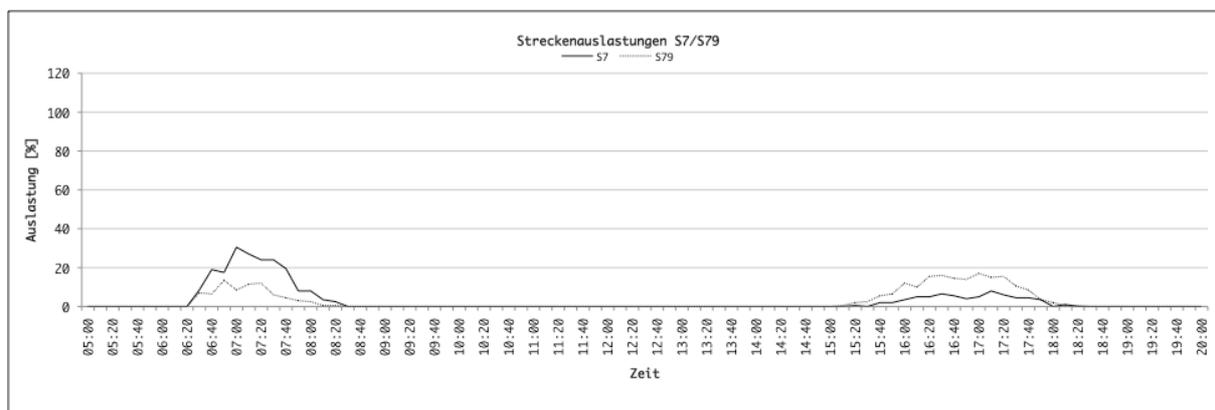
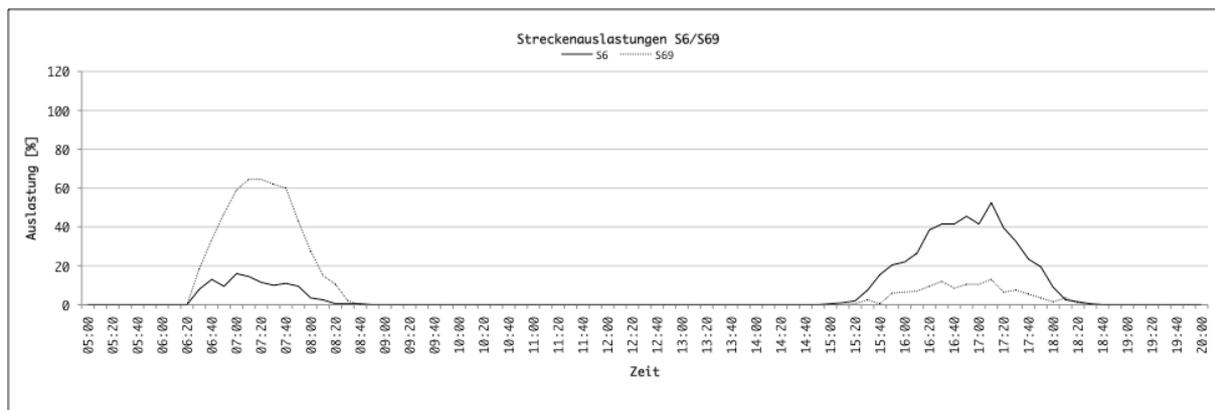
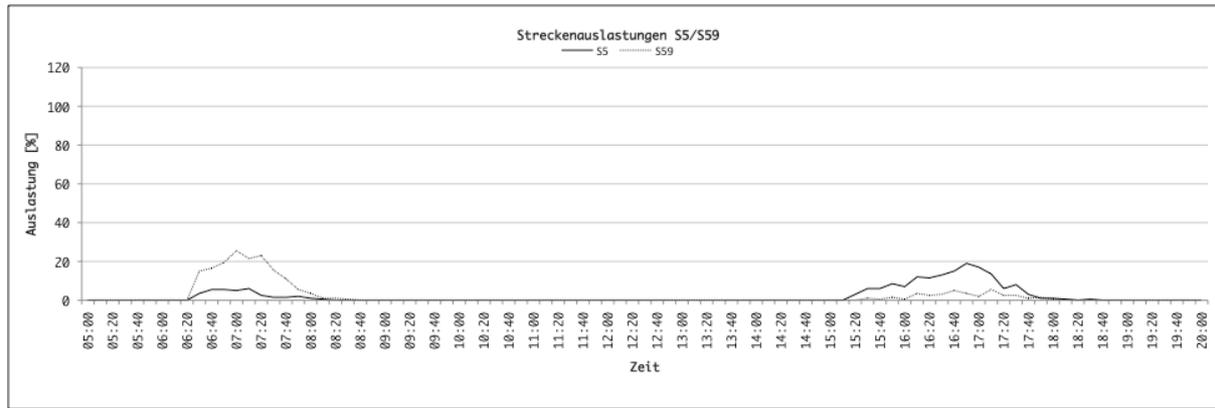
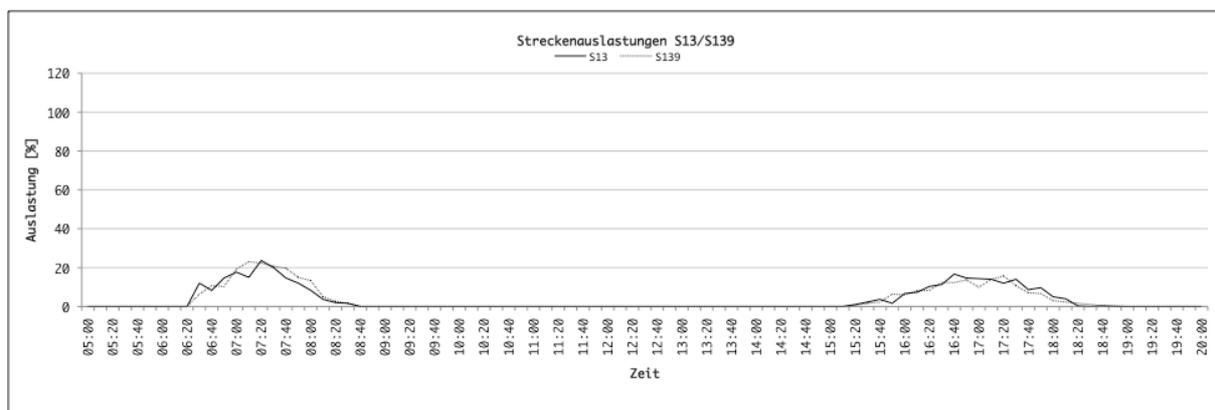
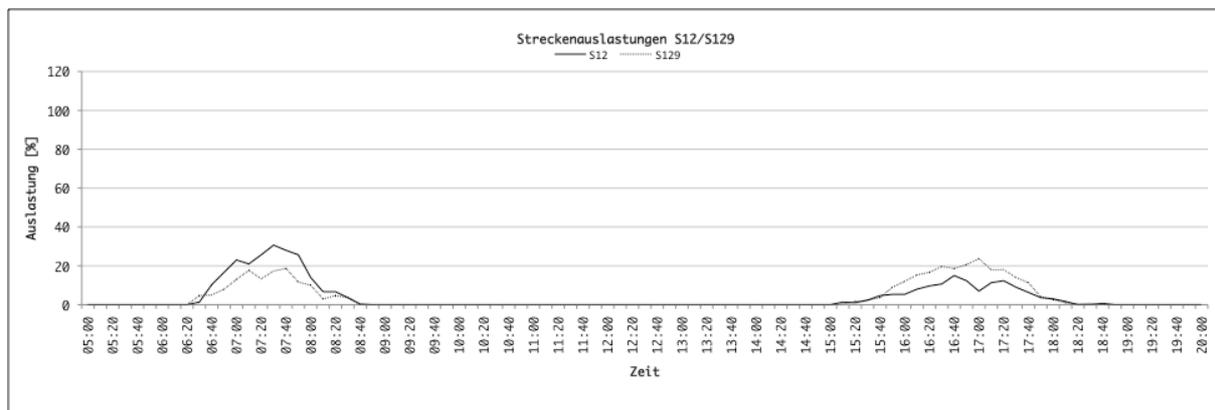
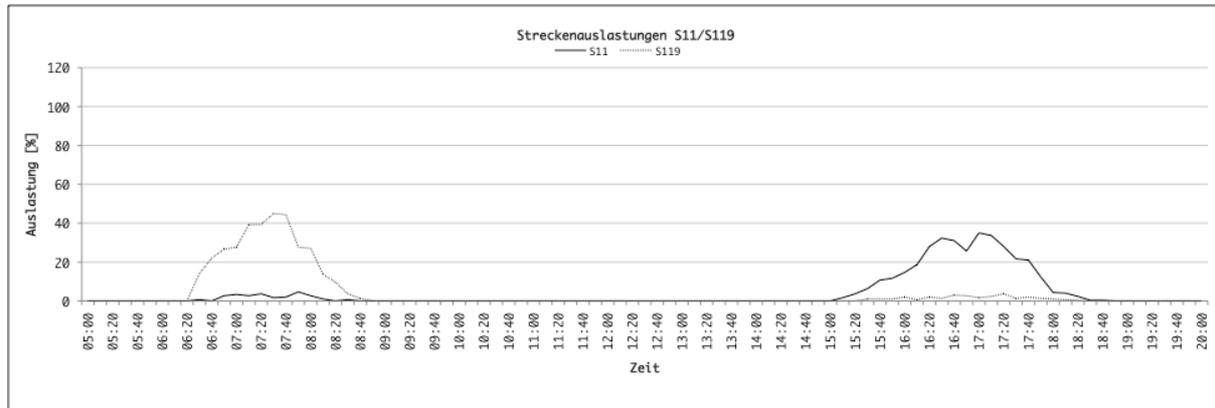


Abbildung 16 Streckenauslastungen Massnahmenpaket A (z-a-r)









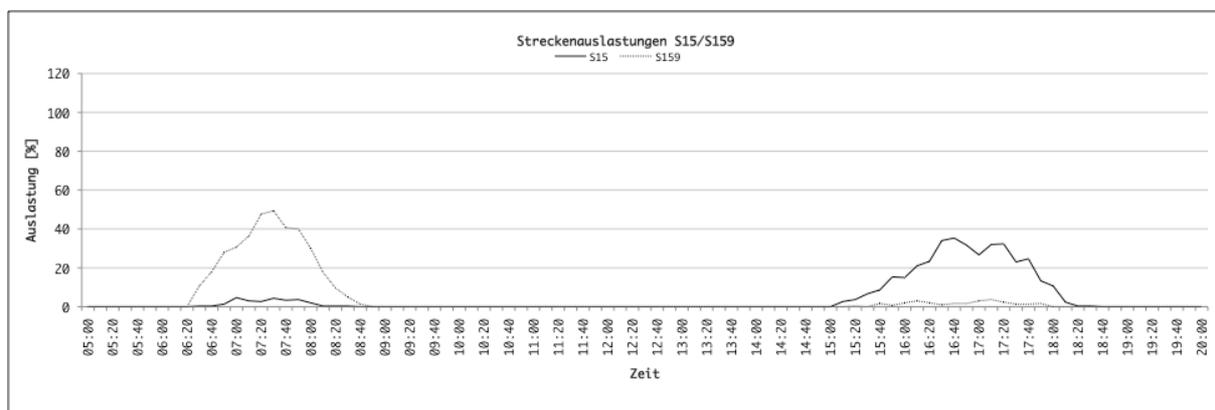
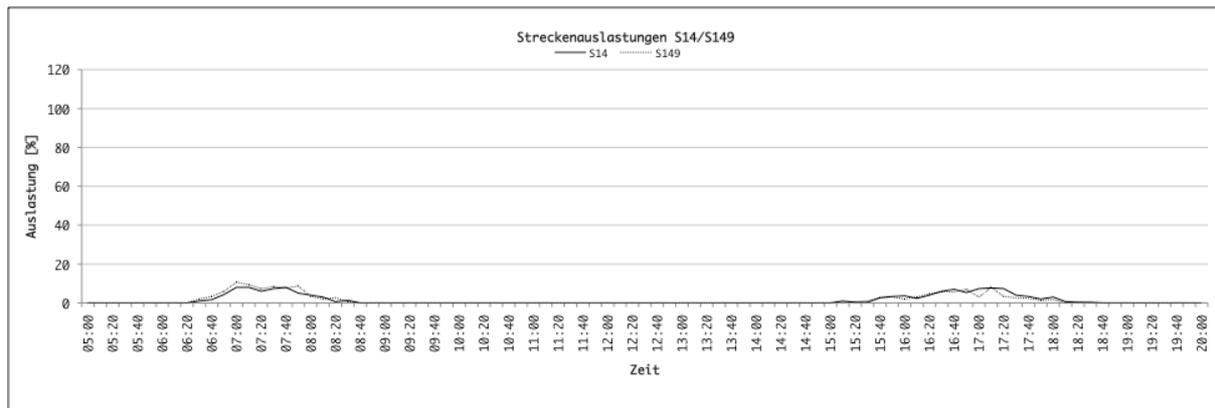
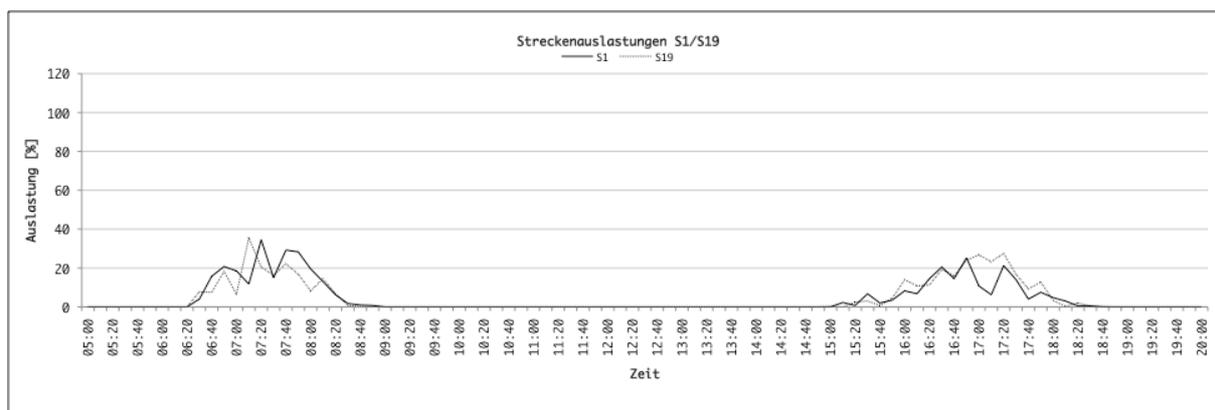
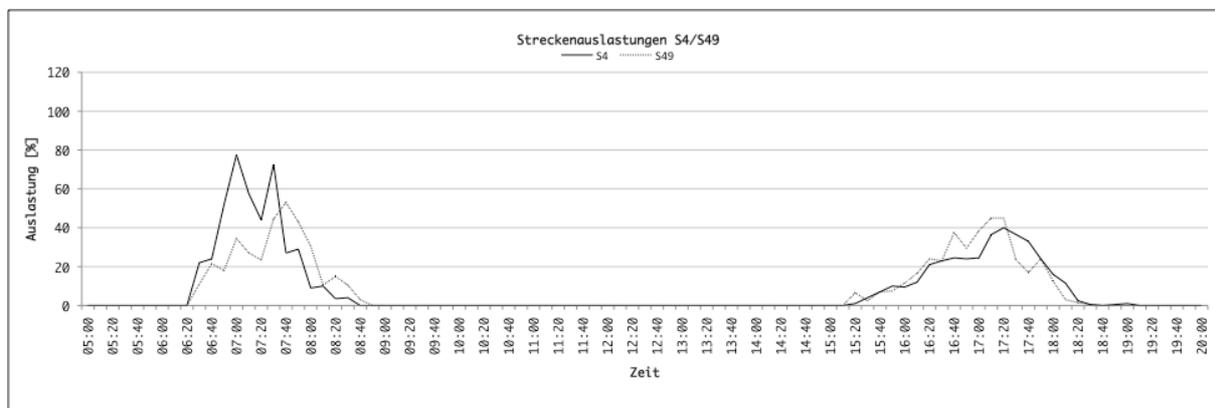
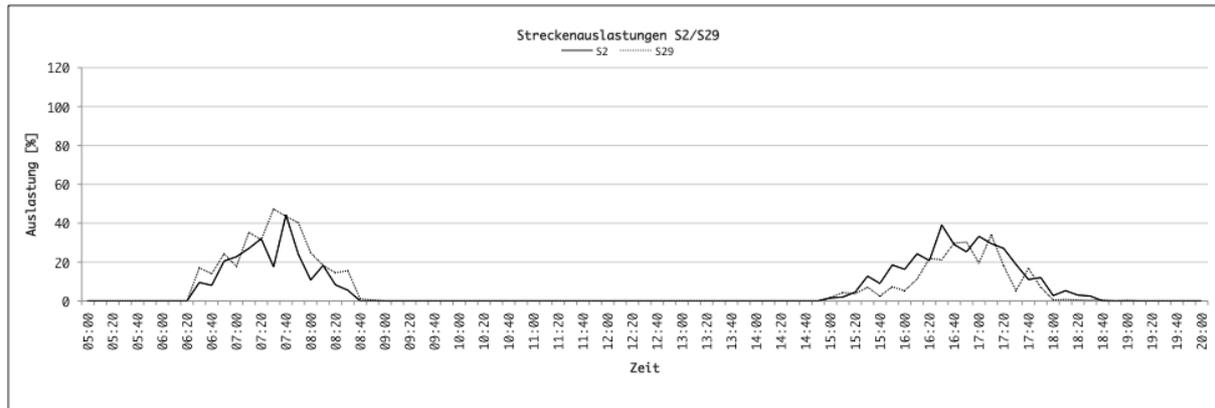
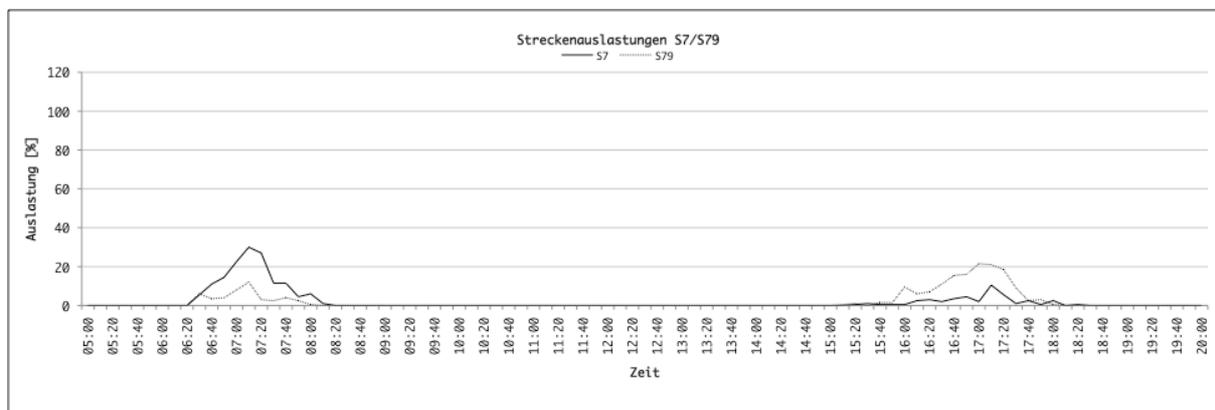
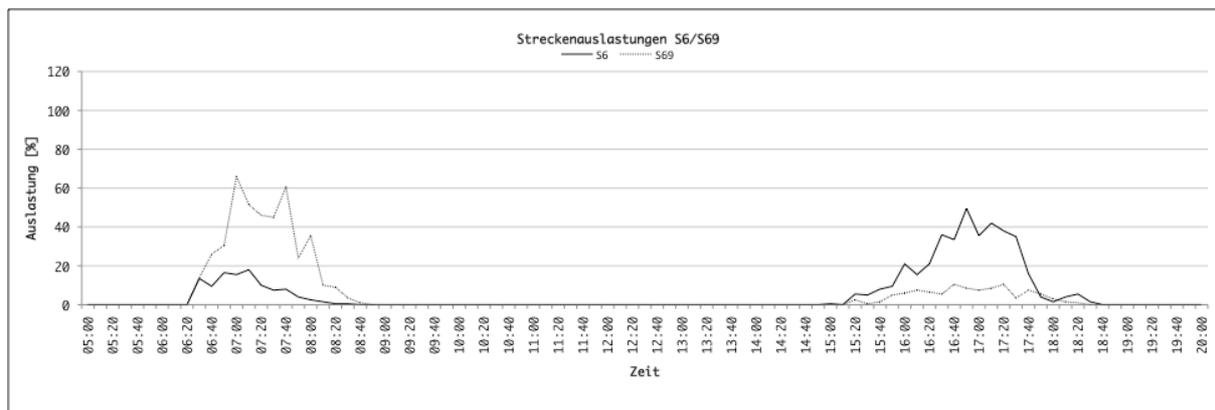
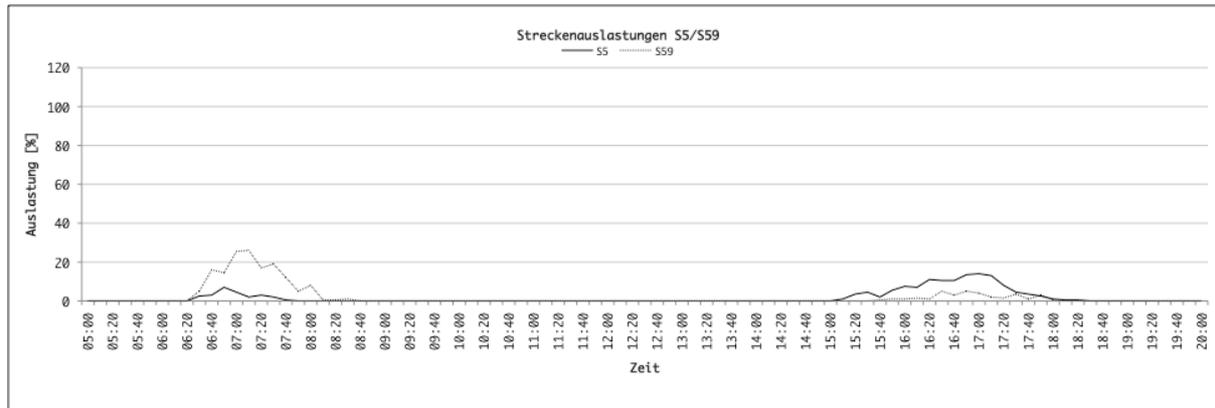
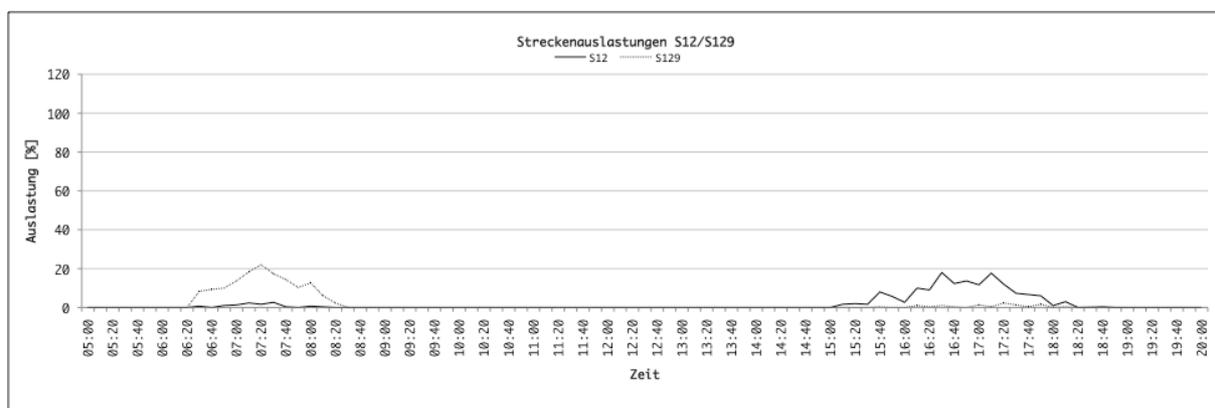
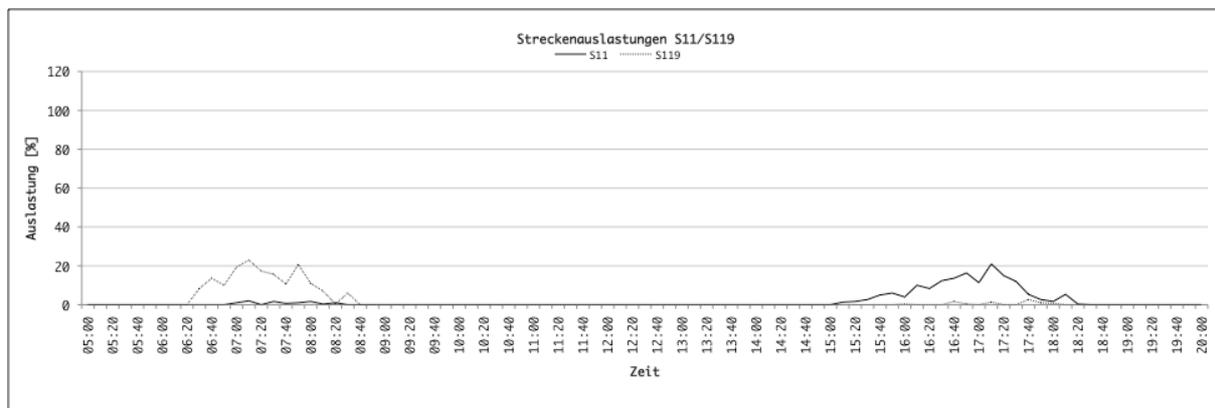
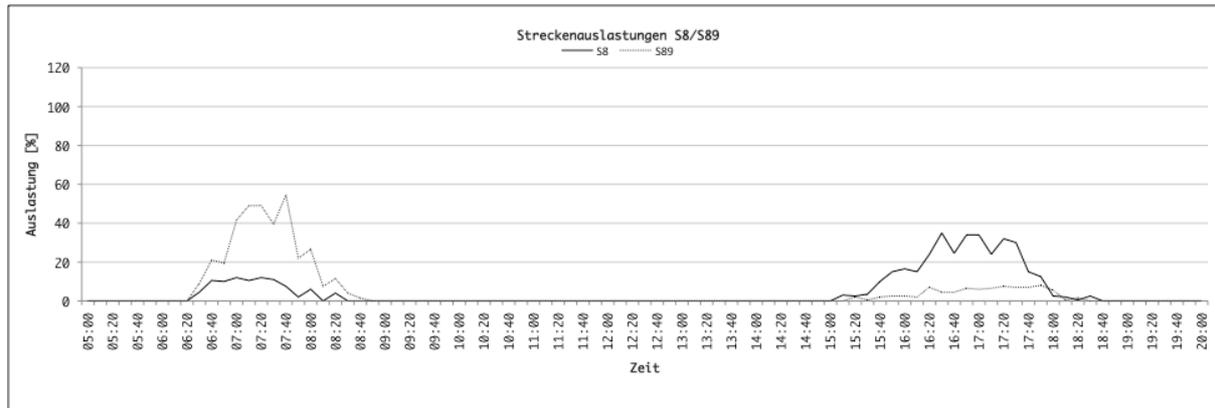


Abbildung 17 Streckenauslastungen Massnahmenpaket B (r)









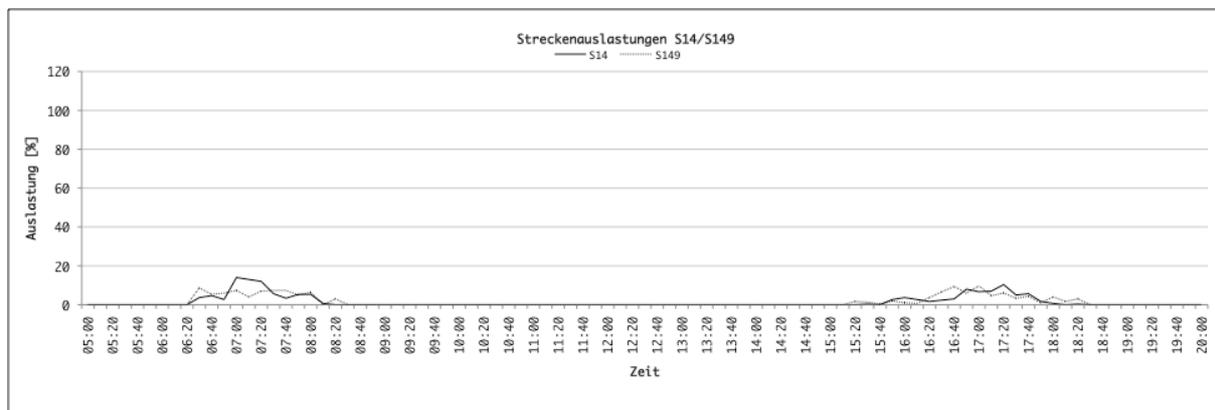
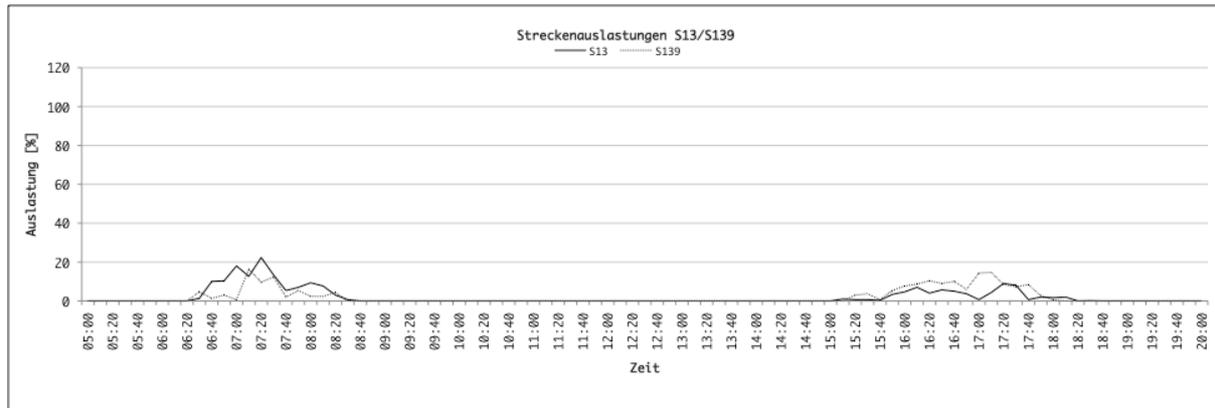
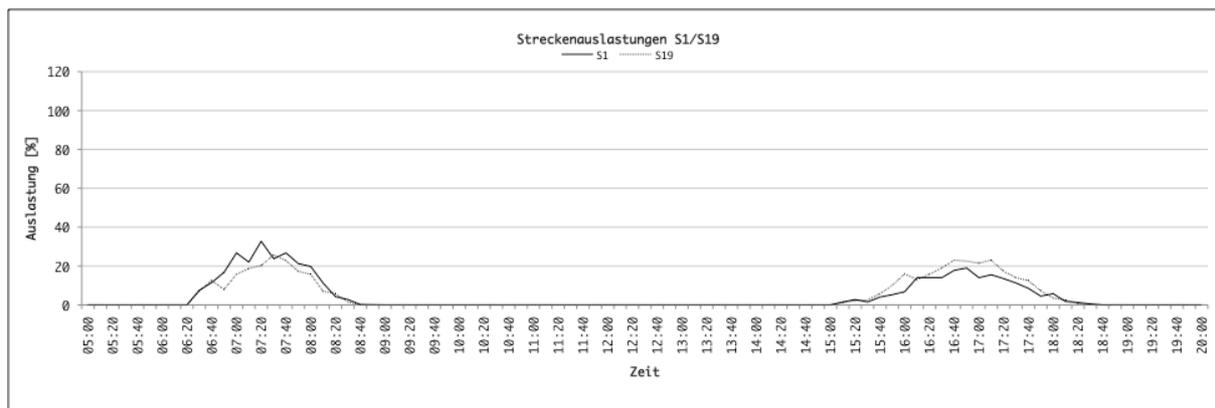
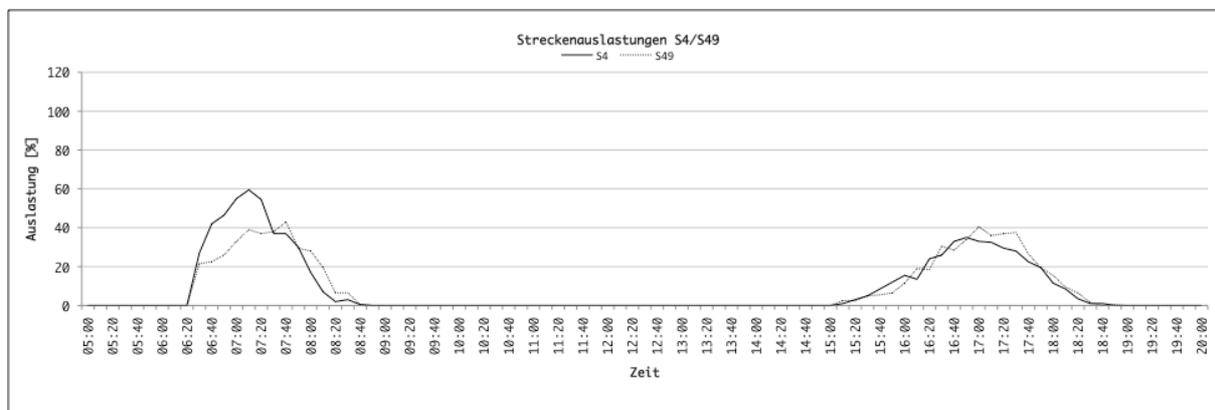
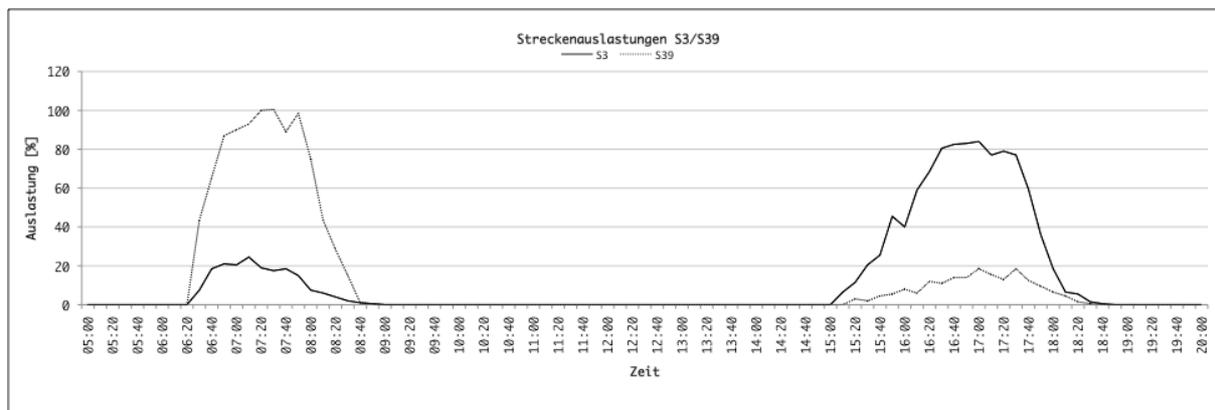
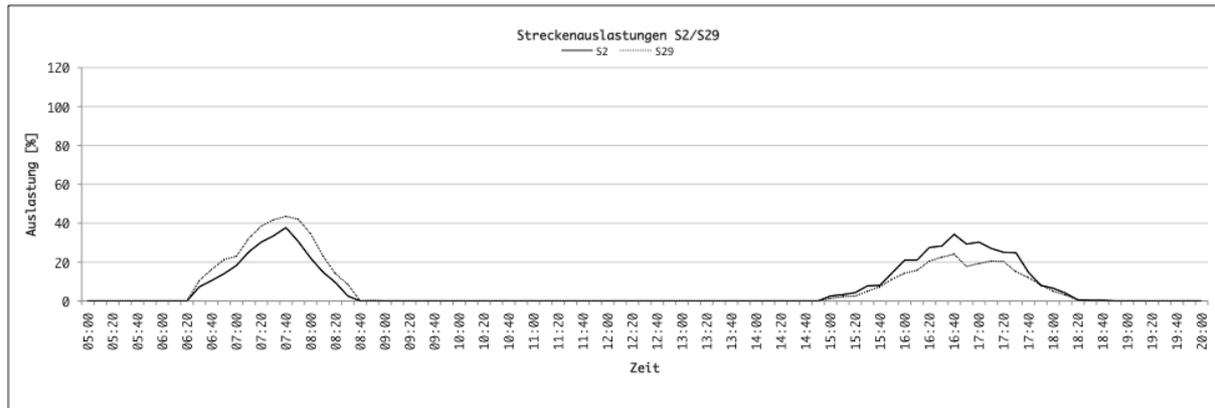
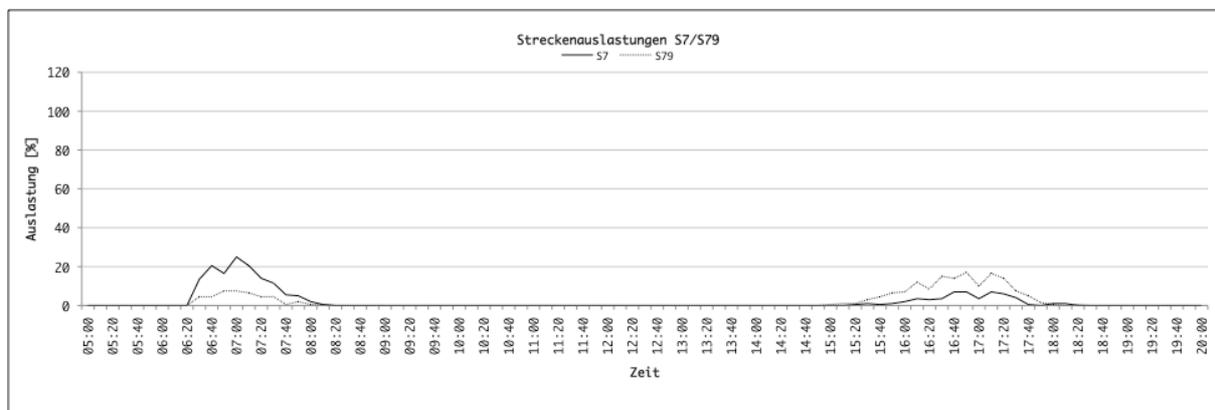
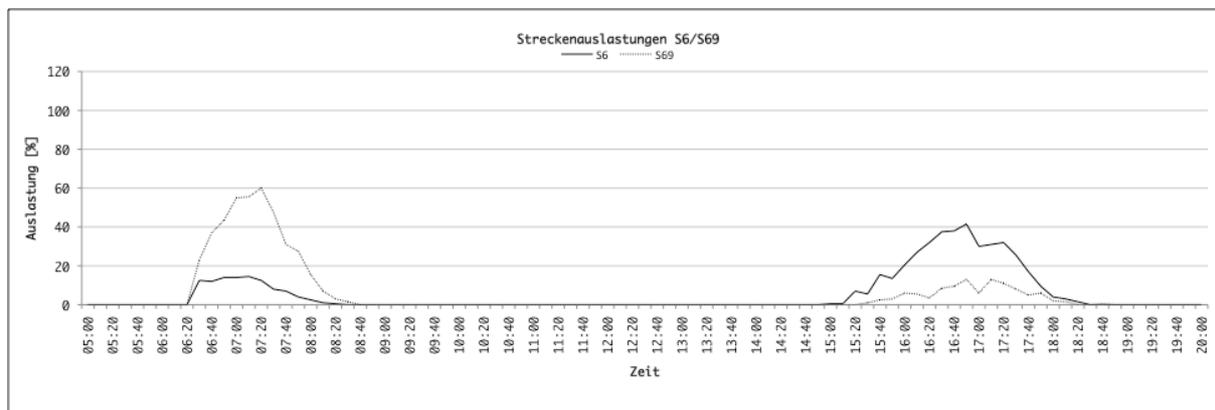
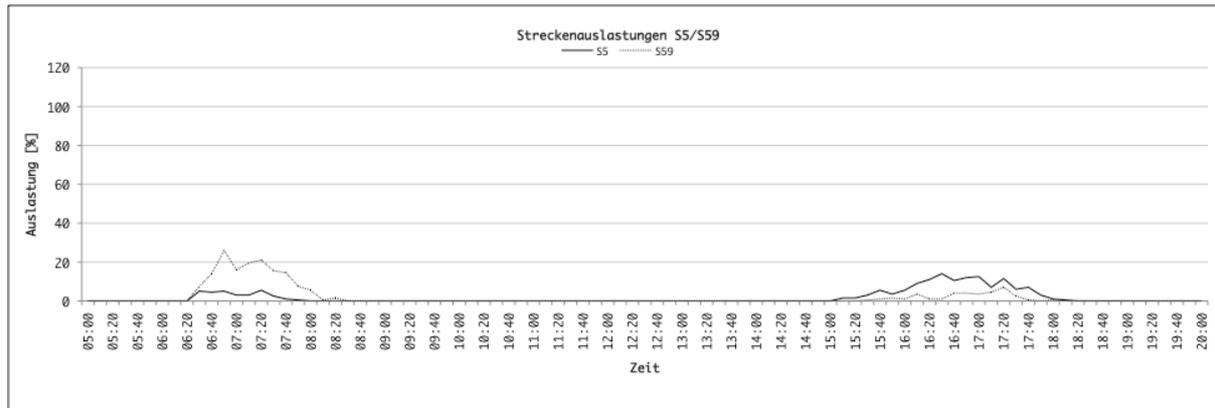
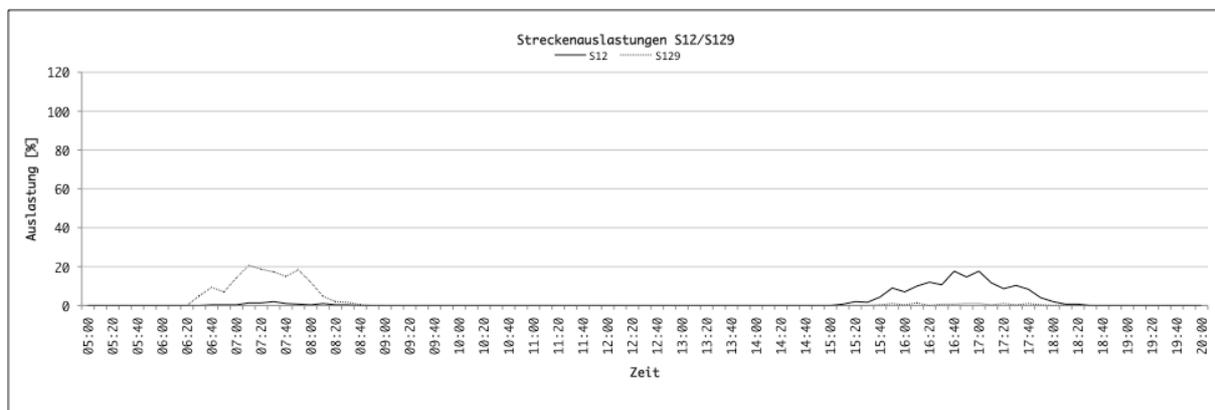
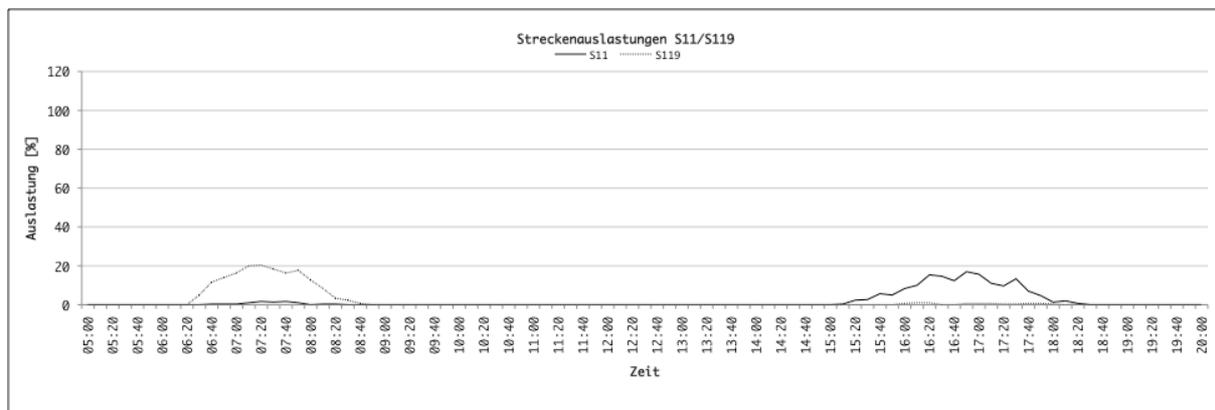
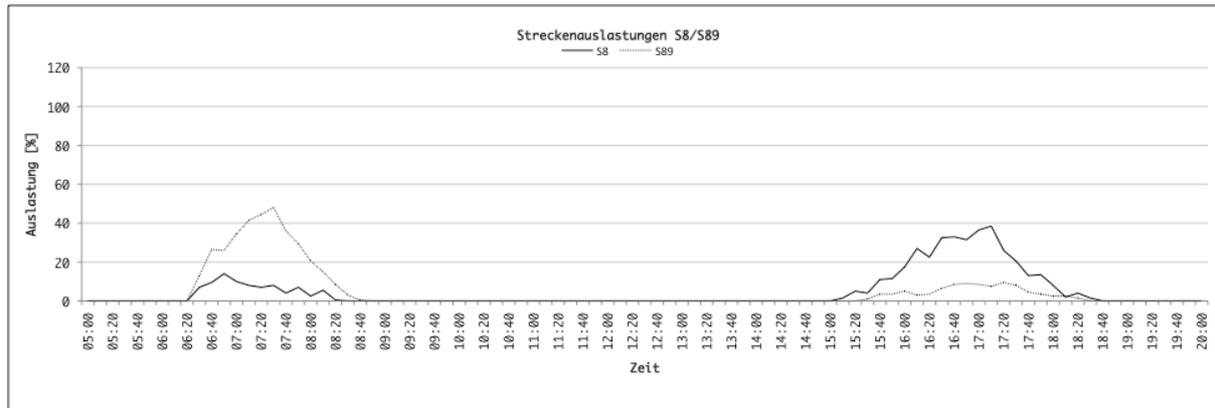


Abbildung 18 Streckenauslastungen Massnahmenpaket B (a-r)









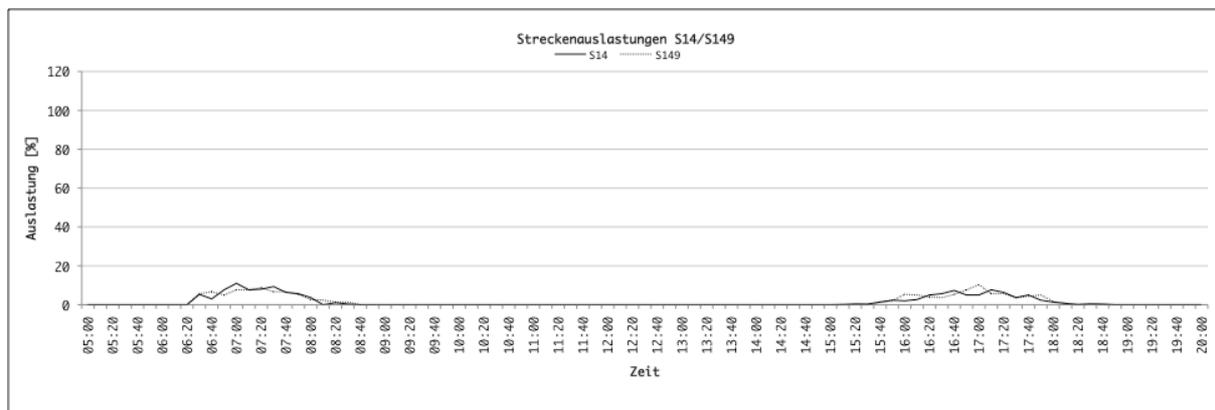
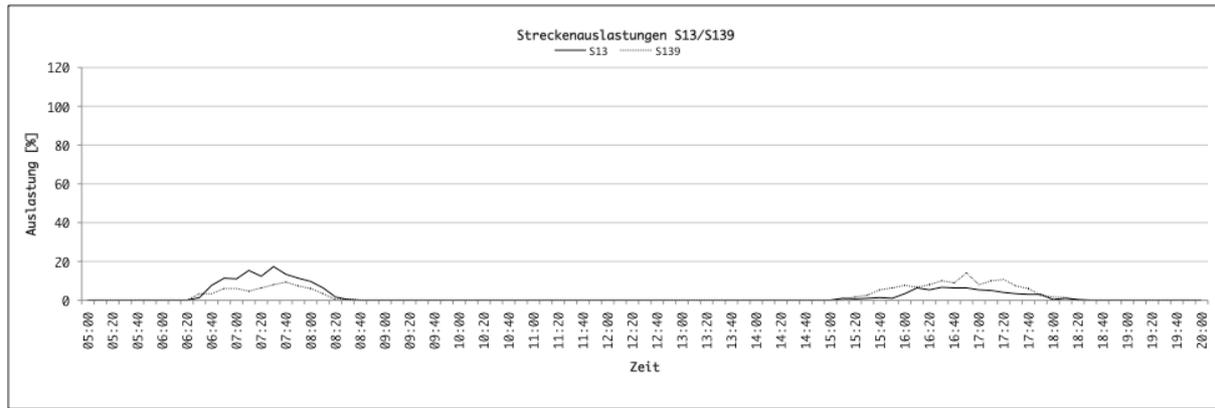
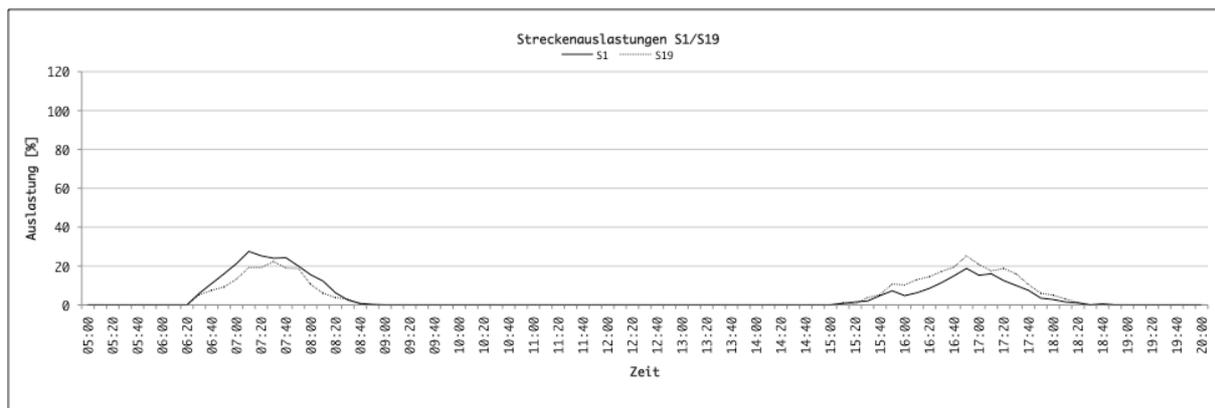
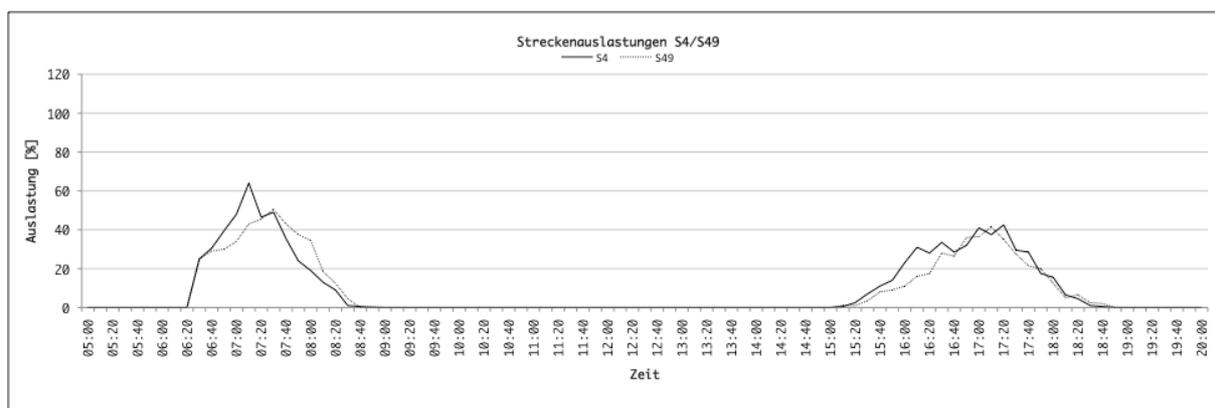
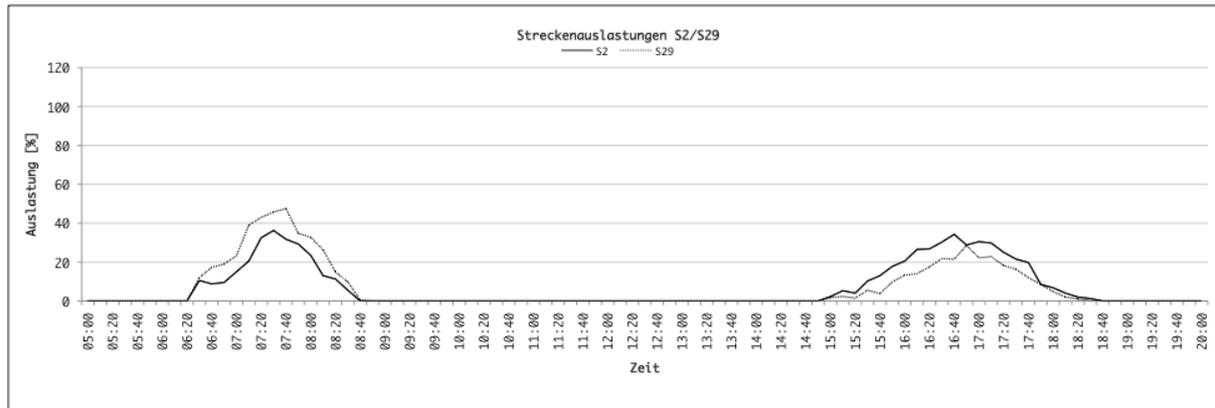
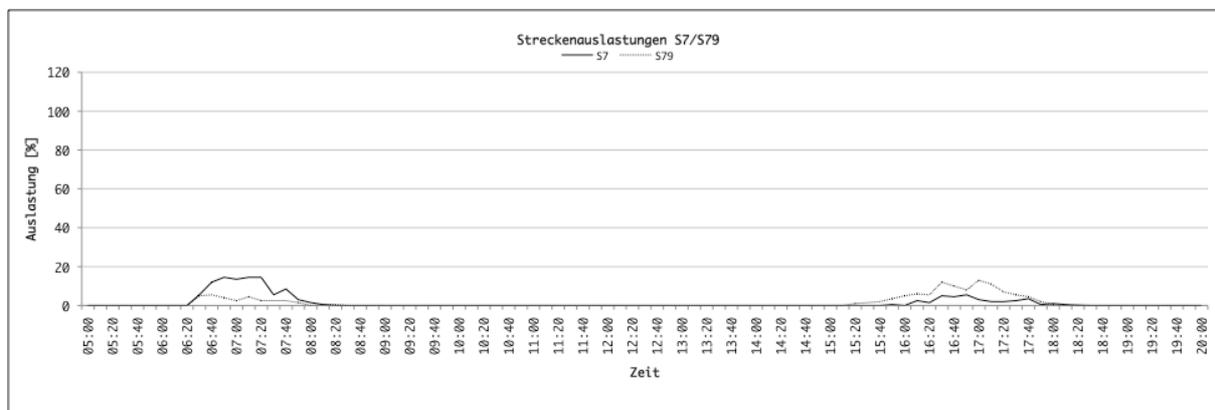
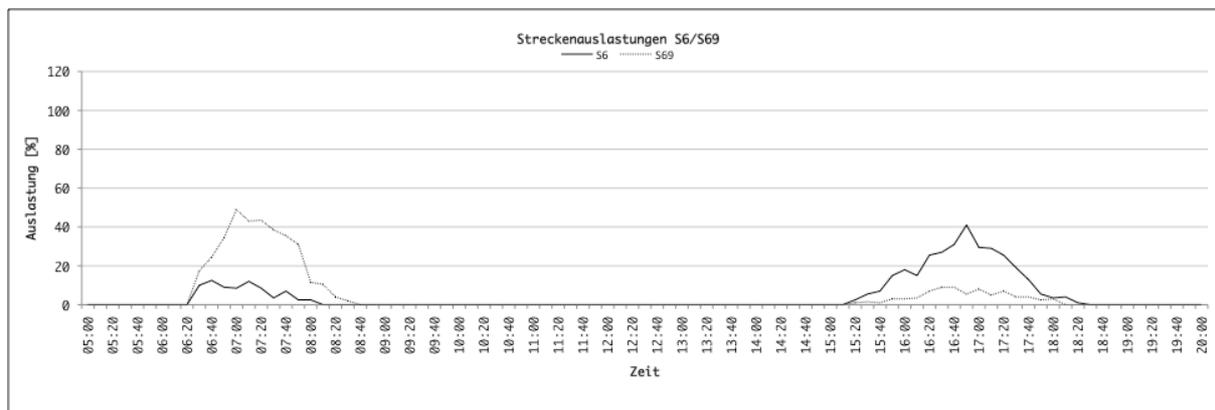
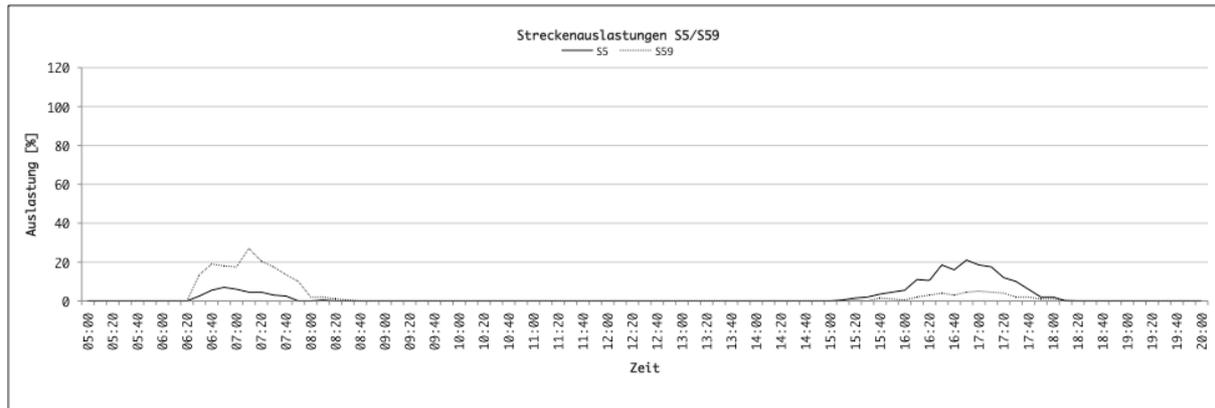
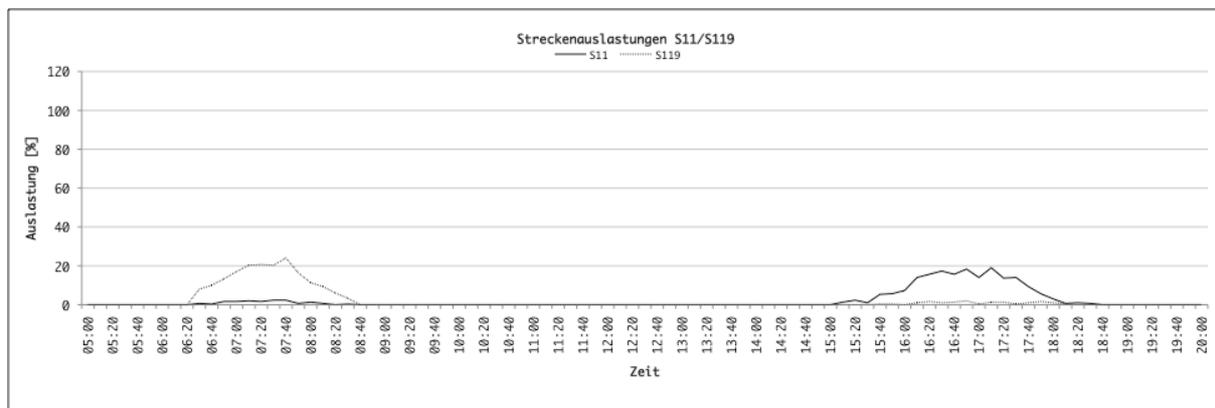
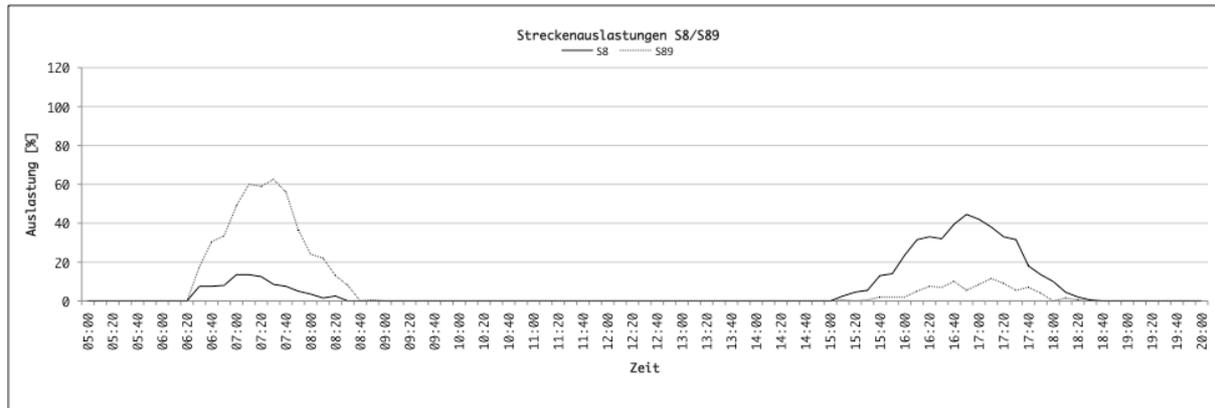


Abbildung 19 Streckenauslastungen Massnahmenpaket B (z-a-r)









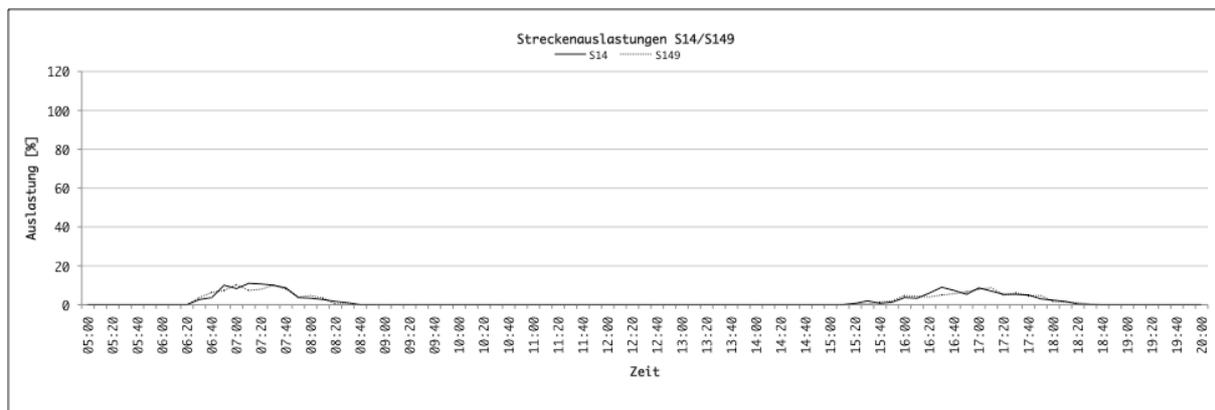
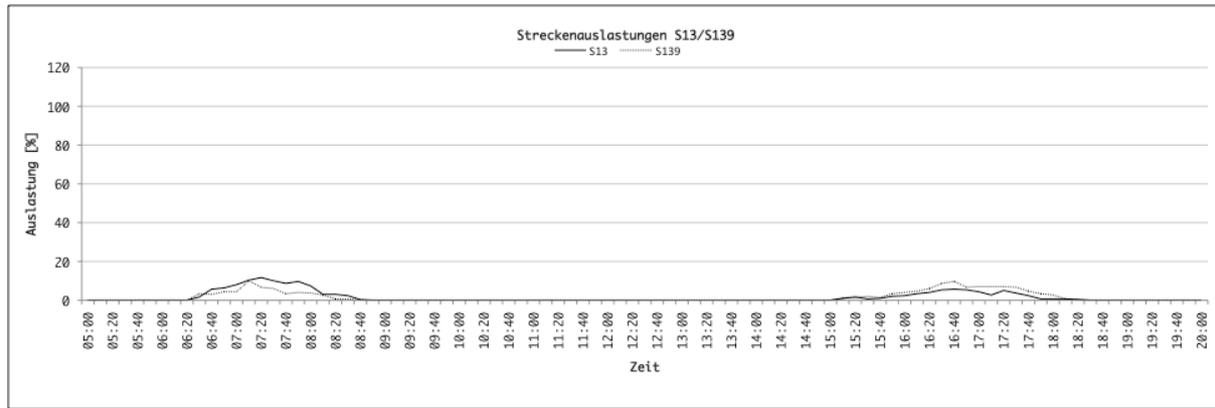
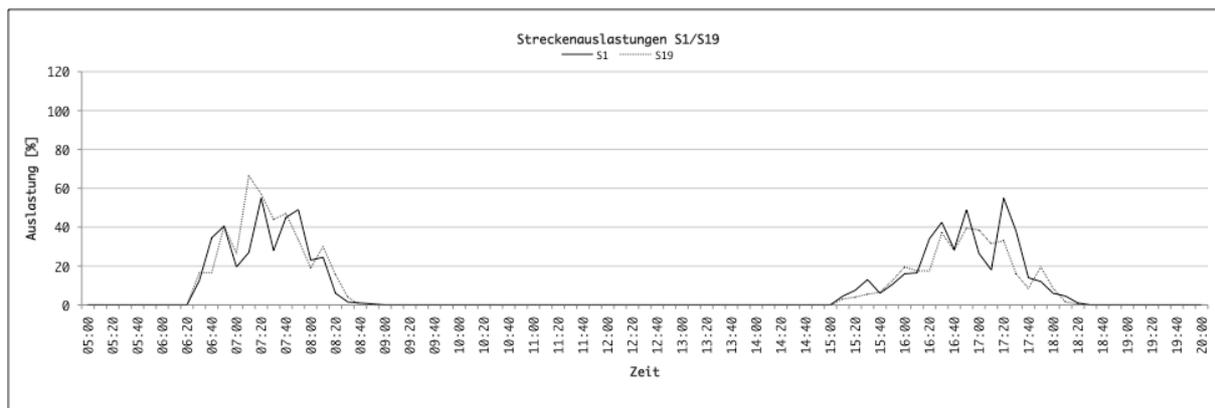
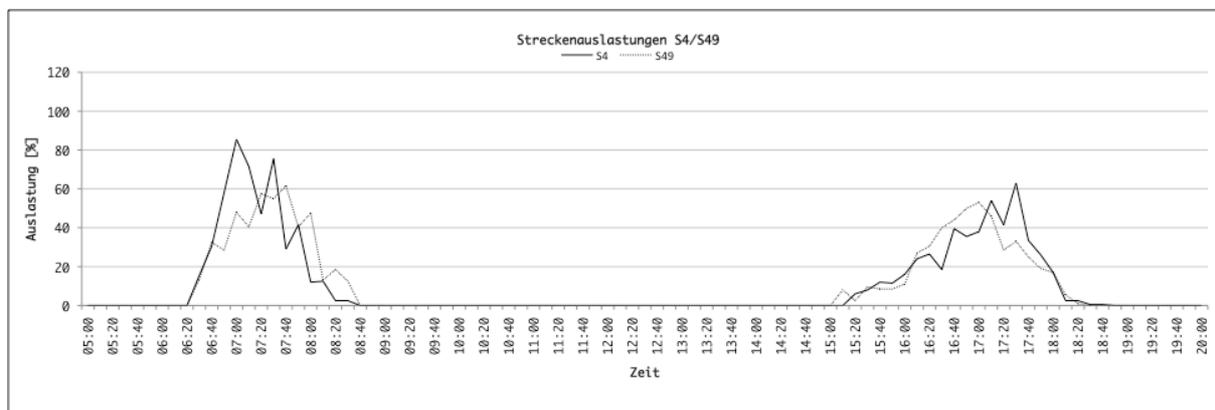
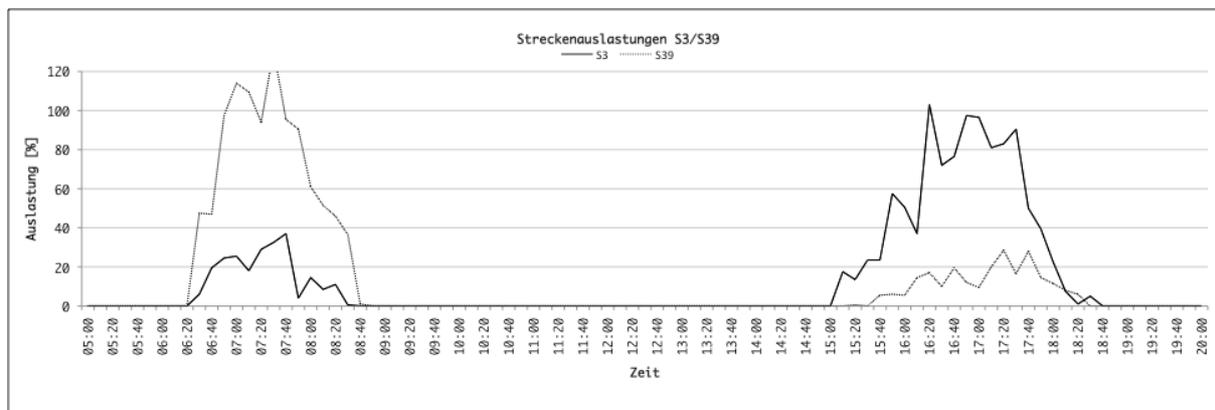
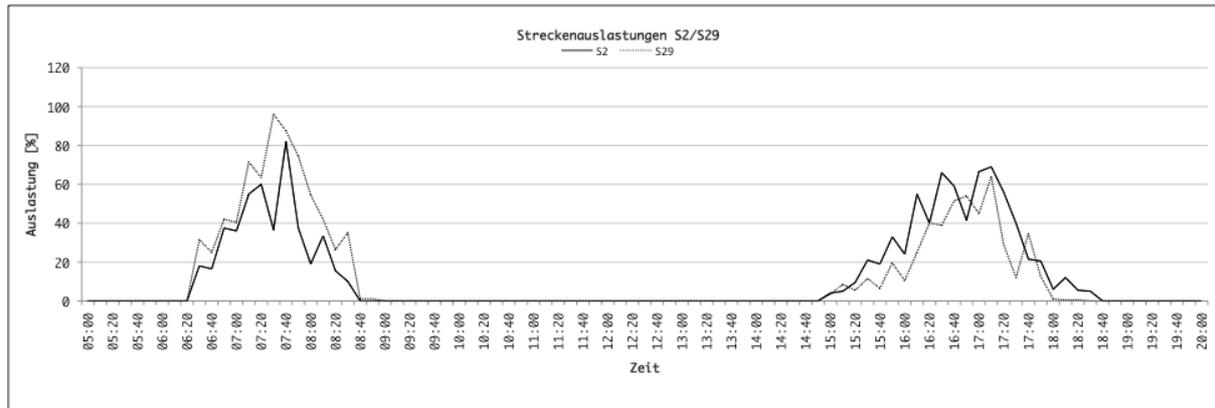
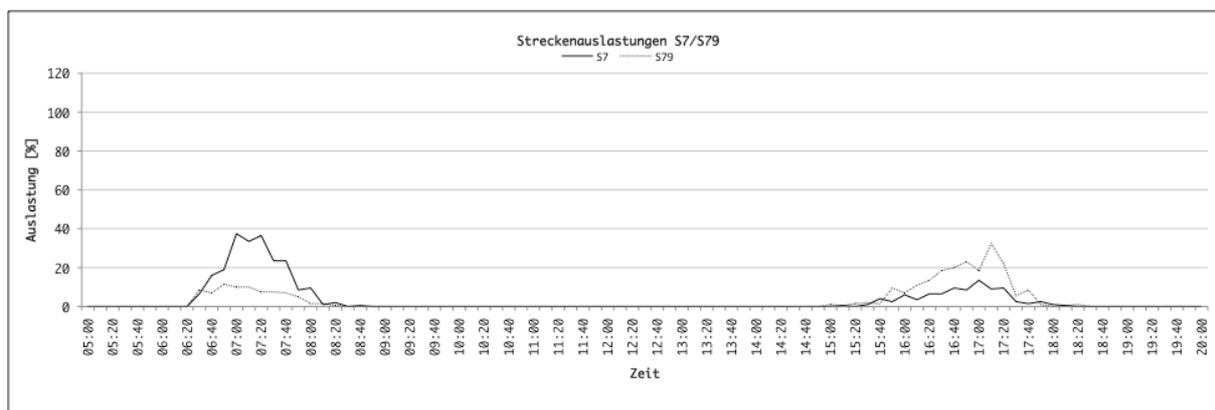
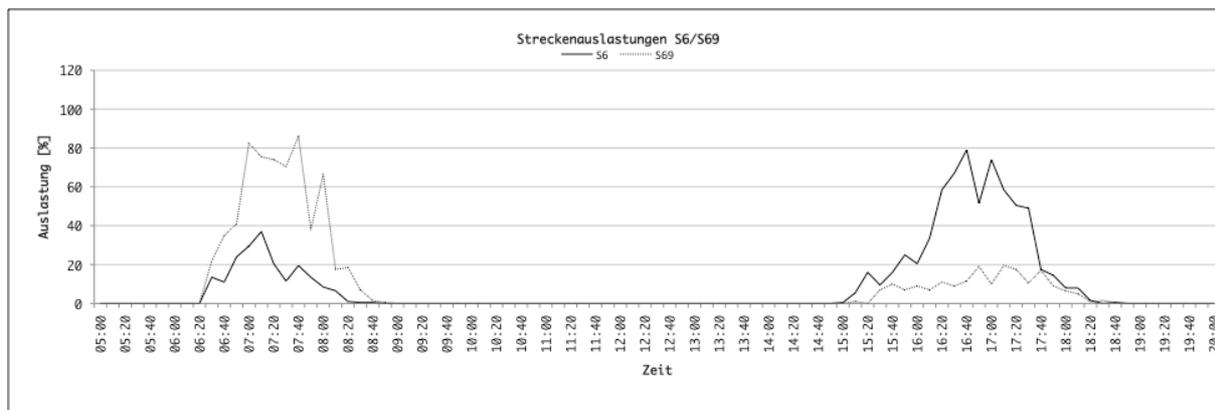
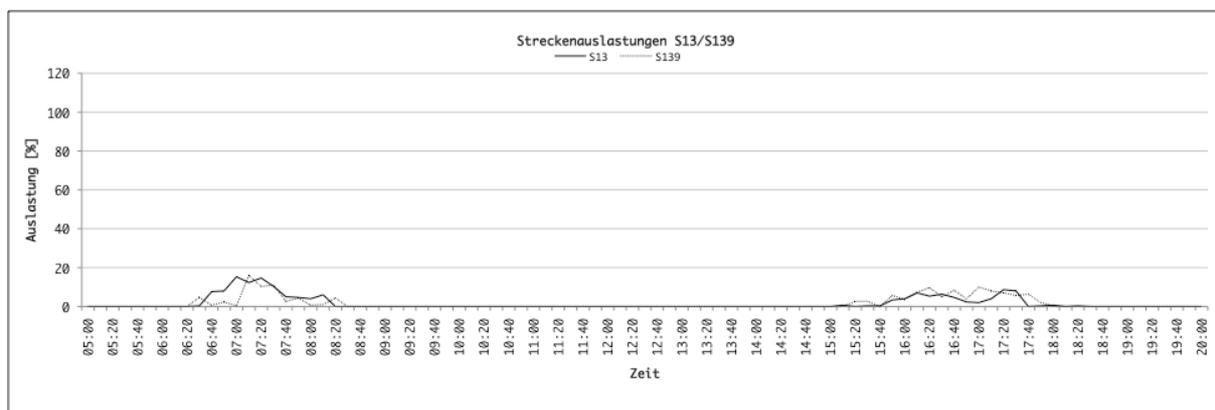
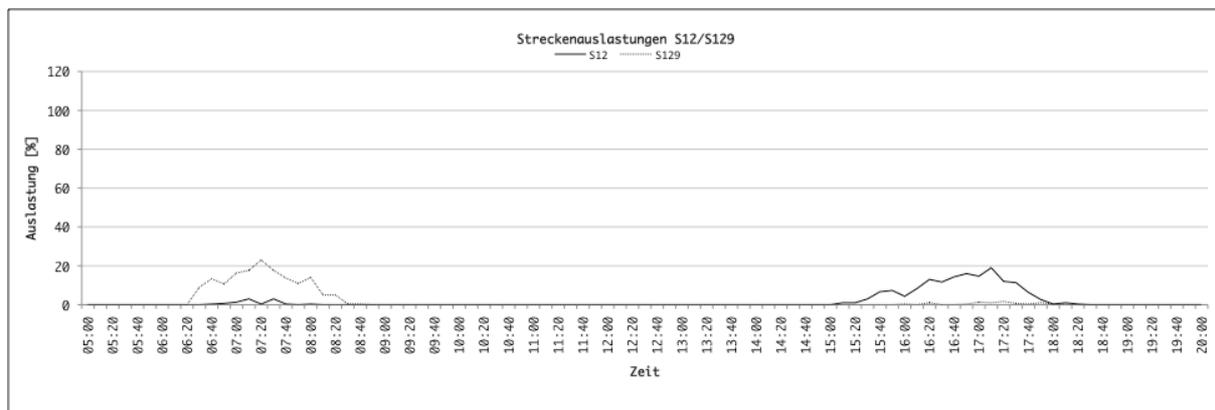
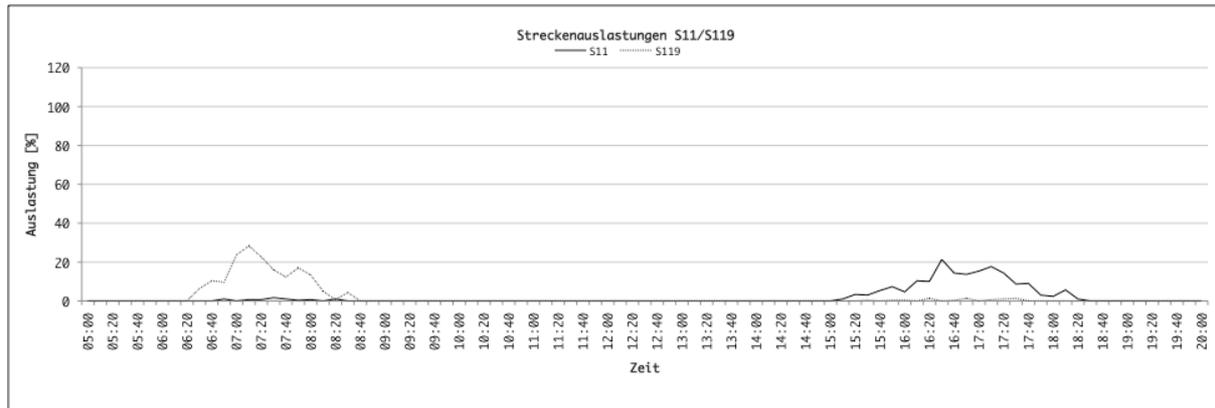


Abbildung 20 Streckenauslastungen Massnahmenpaket C (r)









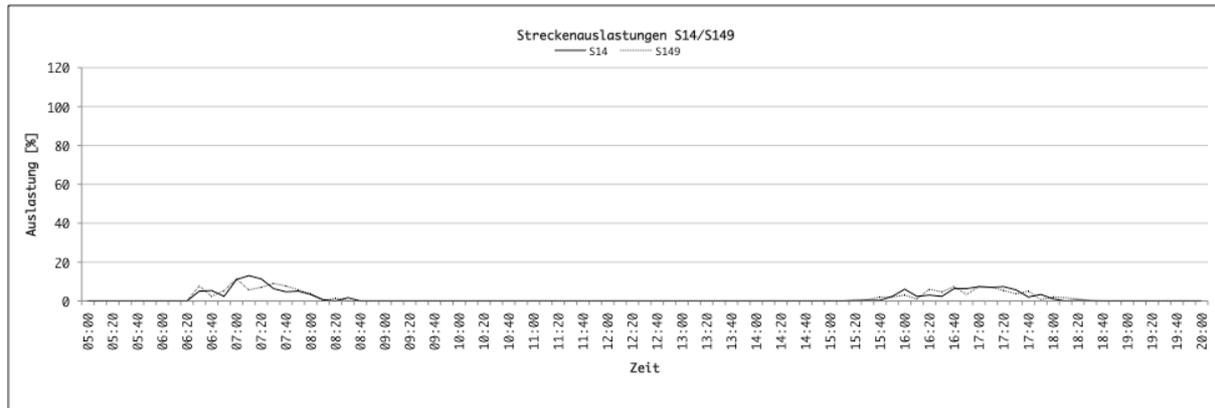
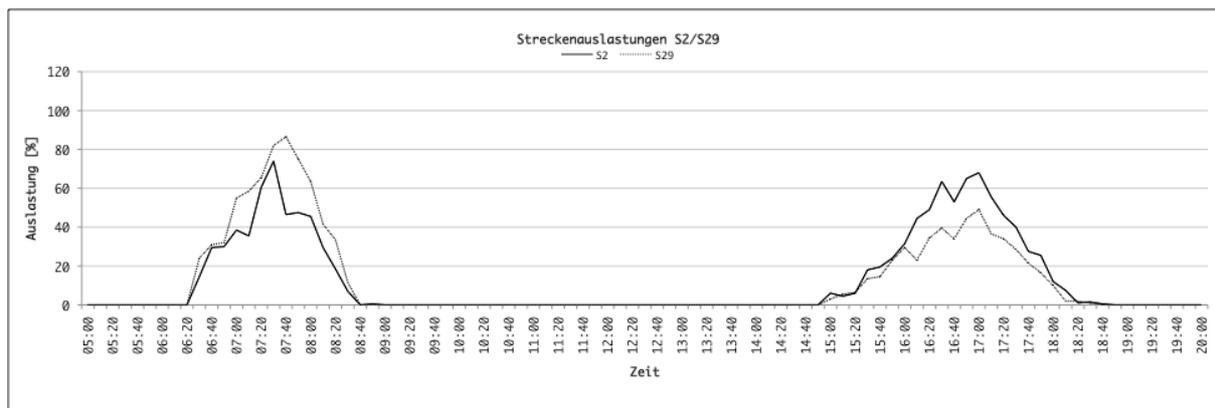
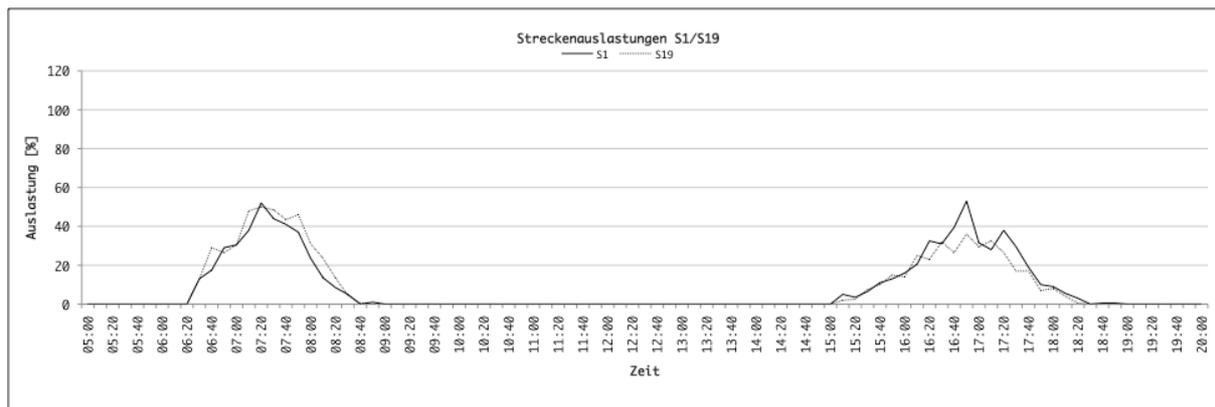
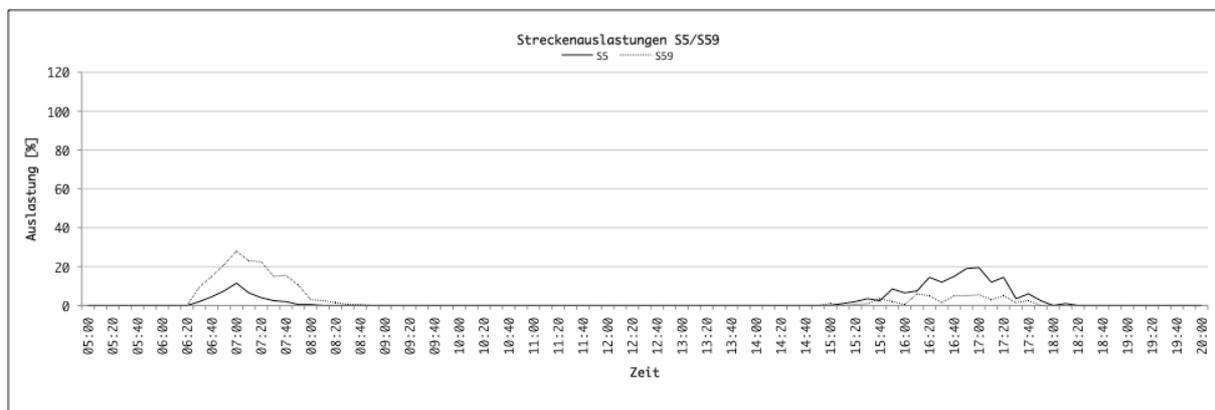
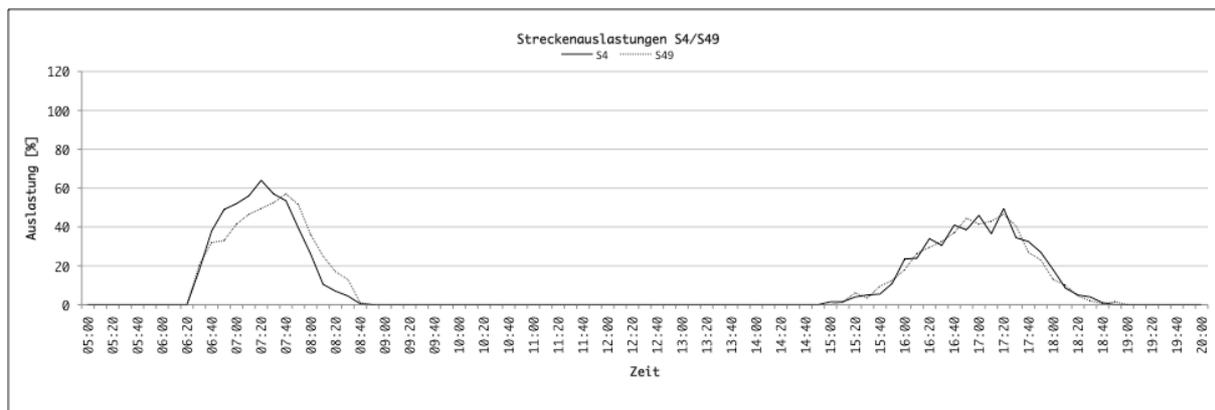
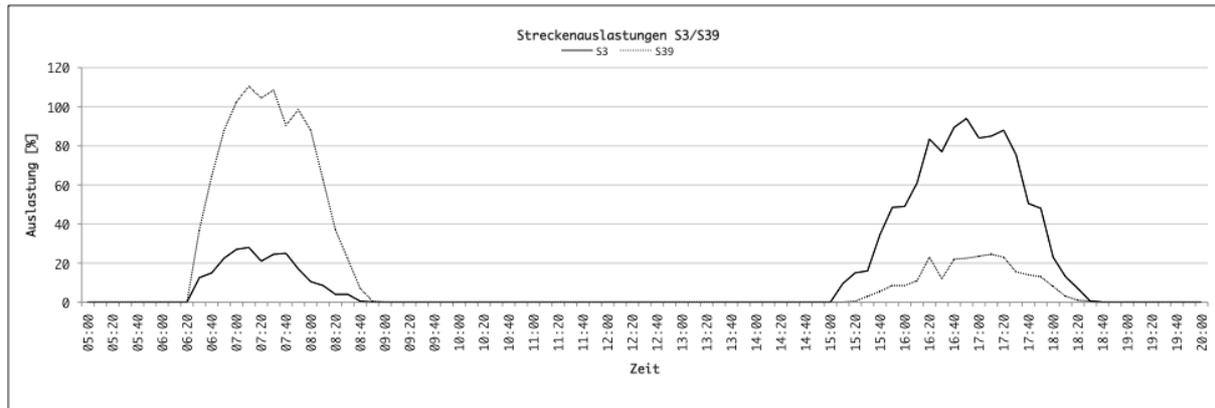
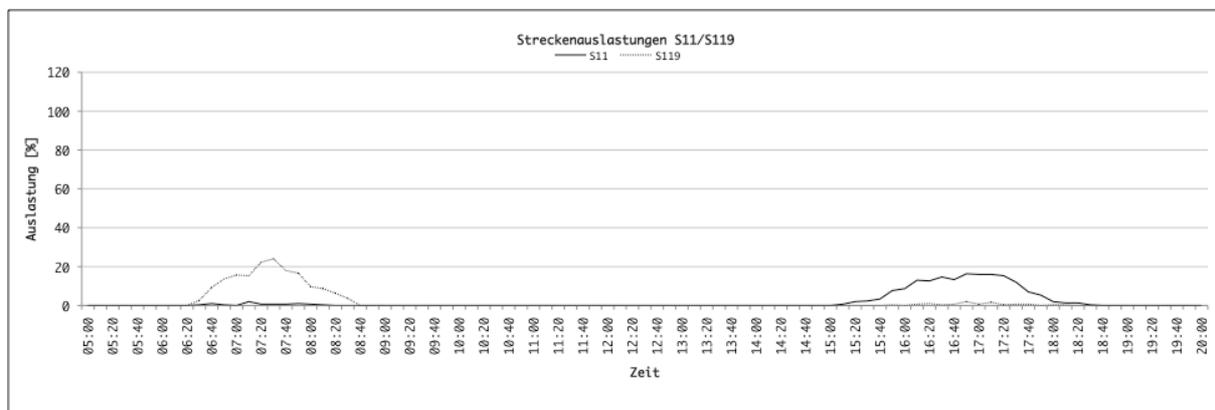
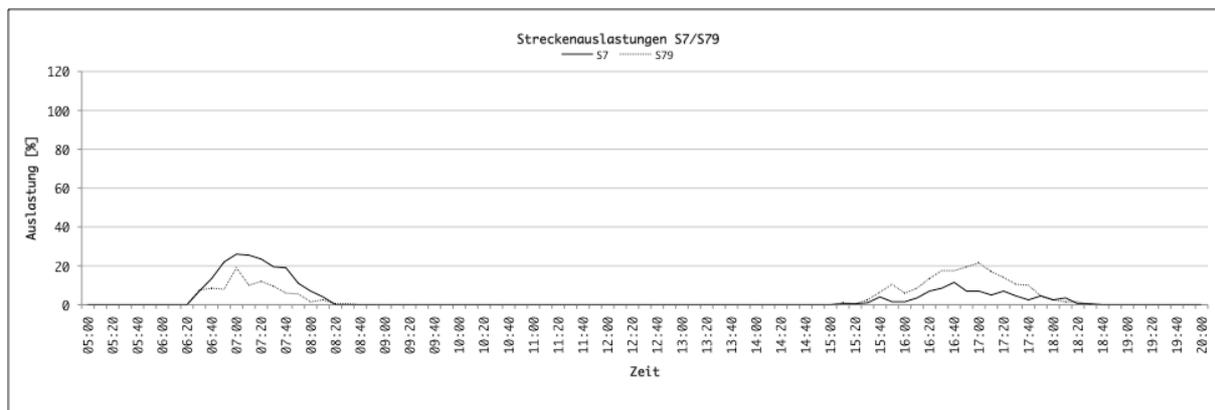
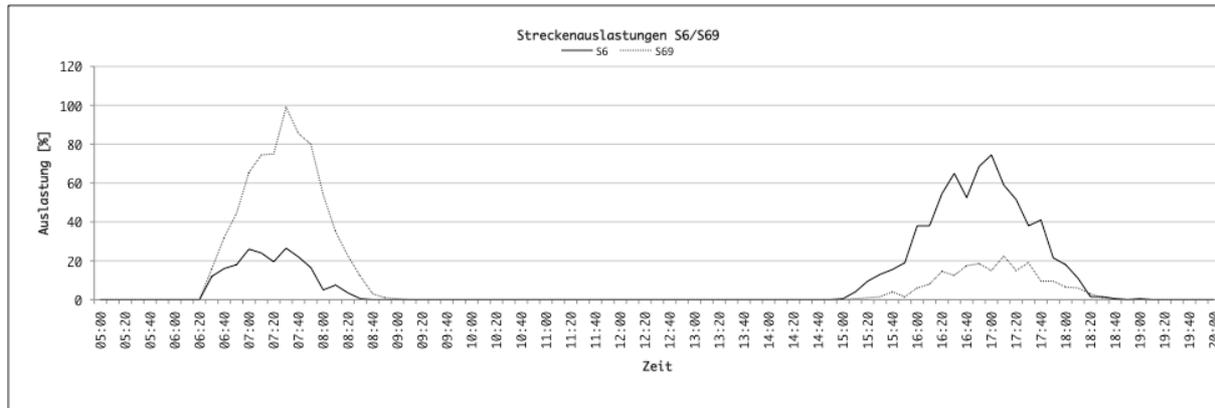


Abbildung 21 Streckenauslastungen Massnahmenpaket C (a-r)







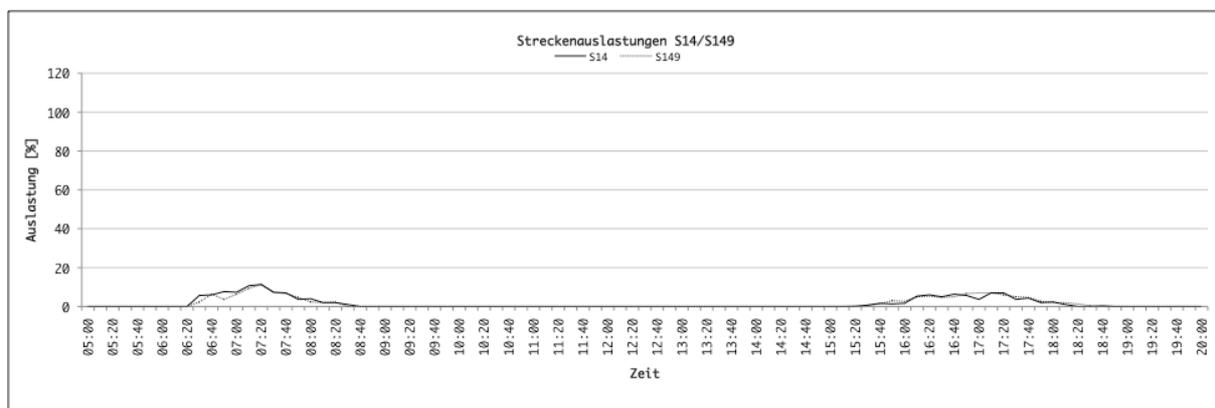
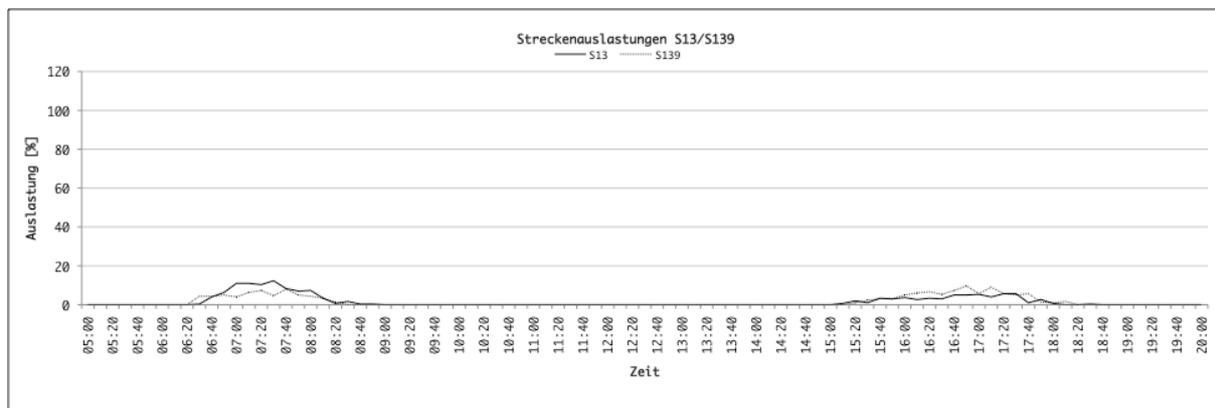
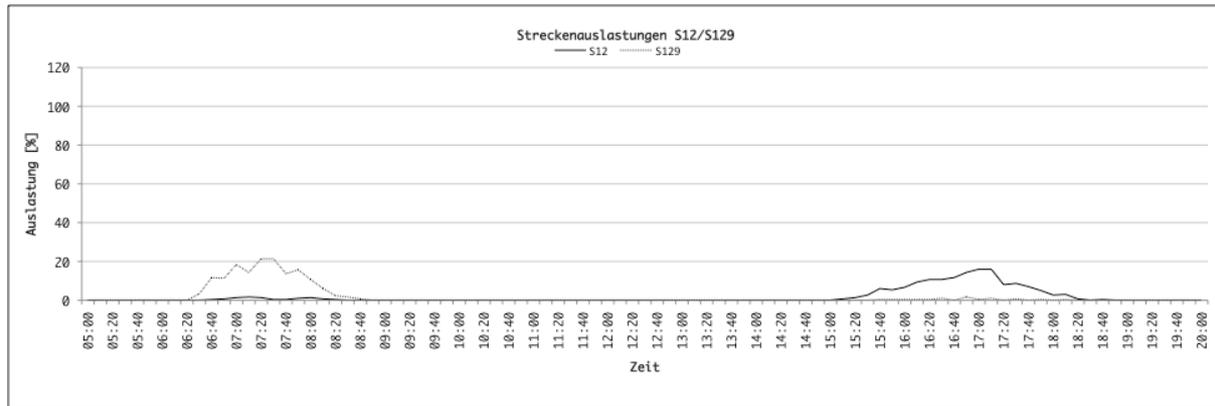


Abbildung 22 Streckenauslastungen Massnahmenpaket C (z-a-r)

