

Handbuch zur „Software zur Planung von städtischen Evakuierungen“

Erstellt im Projekt: „Evakuierung von Großstädten und Ballungsgebieten (Teil 2):
(Teil-)Automatisierung der Datenein- und -ausgabe“

*Prof. Dr. Alf Kimms
Lehrstuhl für Logistik und Operations Research
Mercator School of Management
Universität Duisburg–Essen
Lotharstr. 65, LB 125
47057 Duisburg
Tel.: 0203/ 379-3492
E-Mail: alf.kimms@uni-due.de*

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Technische und lizenzrechtliche Voraussetzungen	2
2.2 OpenStreetMap-Projekt	3
2.2.1 Vorstellung des OpenStreetMap-Projekts	3
2.2.2 Anforderungen an das Kartenmaterial	4
2.2.3 Import der OpenStreetMap-Datensätze	7
2.3 Cell-Transmisson-Modell	8
2.4 Aufbereitung des Kartenmaterials	11
2.5 Evakuierungsmodelle	14
2.5.1 Ursprüngliches Evakuierungsmodell	14
2.5.2 Erweiterte Evakuierungsmodelle	18
2.5.3 Resilientes Evakuierungsmodell	21
2.5.4 Eine beispielhafte Rechenstudie	21
3 Dateneingabe für ein Evakuierungsszenario	22
3.1 Programmstart	22
3.2 Auswahl des Gefahrenbereiches	23
3.2.1 Auswahloption: „Bombe“	24
3.2.2 Auswahloption: „Giftstoff“	27
3.2.3 Auswahloption: „Freie Auswahl“	31
3.2.4 Verteilung der Gefahr	31
3.3 Verteilung der Fahrzeuge	34
3.4 Anpassungen des Straßennetzwerkes	37
3.4.1 Abwahl von Ausgängen	37
3.4.2 Auswahl von unterschiedlichen Straßentypen	39
3.4.3 Löschen von einzelnen Zellen	41
3.4.4 Abwahl von Sackgassen	41
3.5 Eingabe der Periodenanzahl	42
3.6 Anpassungen an das Zellenmodell	43
3.7 Auf- und Abrunden von Zellen	43

4	Berechnung der Evakuierungsergebnisse	45
4.1	AMPL	45
4.2	Einbindung von AMPL	46
4.3	Implementierung der Optimierungssoftware	47
4.3.1	Das erweiterte Evakuierungsmodell in AMPL	47
4.3.2	Das resiliente Evakuierungsmodell in AMPL	49
4.3.3	Anpassungen in den Modellen	49
4.4	Ablauf des Optimierungsvorganges	50
5	Darstellung der Evakuierungsergebnisse	53
5.1	Konvertierung der optimalen Evakuierungsergebnisse	53
5.2	Technische Umsetzung der Evakuierungskarte	55
5.3	Darstellung der Evakuierungsergebnisse	55
5.4	Speichern der Evakuierungsergebnisse	57
6	Schlussbemerkung: Praktische Einsetzbarkeit	59
	Literaturverzeichnis	61

Abbildungsverzeichnis

1	Abbildung des Stadtteils Neudorf im OSM-Kartenformat	4
2	Grafische Darstellung der Zellenstruktur	9
3	Grafische Darstellung des Verkehrsflusses	10
4	Verdeutlichung der unterschiedlichen Zellengrößen.	19
5	Icon der Software	22
6	Darstellung des Disclaimers	23
7	Darstellung des Startbildschirms	24
8	Darstellung der Auswahloption: „Bombe“	25
9	Auswahl des Gefahrenmittelpunkts für die Auswahloption „Bombe“ . .	25
10	Definition des Gefahrenbereichs für die Auswahloption „Bombe“	26
11	Darstellung der Gefahrenstufen der Auswahloption „Bombe“	27
12	Darstellung der Auswahloption: „Giftstoff“	28
13	Festlegung der Windrichtung und -stärke	29
14	Definition des Gefahrenbereichs für die Auswahloption „Giftstoff“ . . .	30
15	Darstellung der Gefahrenstufen für die Auswahloption „Giftstoff“ . . .	30
16	Darstellung der Auswahloption: „Freie Auswahl“	32
17	Definition des Gefahrenbereichs	32
18	Eingabe der Gefahrenparameter	33
19	Darstellung der Verteilung der Gefährdung in der Auswahloption „Freie Auswahl“	33
20	Darstellung und Änderung der Gefahrenparameter	34
21	Änderung der Farben in der Gefahrenzone	35
22	Manuelle Anpassung der Gefährdung einer Straße	35
23	Gesamtanzahl der Fahrzeuge im Gefahrenbereich definieren	36
24	Anzahl der Fahrzeuge in einer Straße manuell anpassen	37
25	Ladevorgang des gewählten Kartenausschnitts von den OSM-Servern .	38
26	Hinzu- und Abwahl eines Ausgangs	38
27	Eingabefenster Parametereingabe	39
28	Straßenkarte vor dem Filtern der Bundes- und Landstraßen	40
29	Straßenkarte nach dem Filtern der Bundes- und Landstraßen	40
30	Manuelles Löschen einer Zelle	41
31	Darstellung des Optionsfensters: „Modellannahmen“	43
32	Darstellung des AMPL-Ordners	46
33	Darstellung des Optionsfensters: Optimierung - ExCTEPM	48
34	Darstellung des Optionsfensters: Optimierung - RPCTEPM	50
35	Darstellung des AMPL-Optimierungsfensters	51

36	Eingabefehler: „Inseln“	52
37	Darstellung des Optionsfensters: „Darstellung“	56
38	Beispiel zur Darstellung des identischen Evakuierungsplans mit unterschiedlicher Einstellung der Farb- bzw. Breitenparameter	57
39	Darstellung des Optionsfensters: „Evakuierungsverlauf“	58
40	Evakuierungsplan für ein Szenario in London	59
41	Evakuierungsplan für ein Szenario in Mumbai	60
42	Evakuierungsplan für ein Szenario in Tokio	60

Tabellenverzeichnis

1	Zuordnung der maximalen Geschwindigkeiten zu den jeweiligen OSM-Straßentypen.	8
2	Übersicht der Annahmen für die Ausgangsparameter des CTMs.	13
3	Übersicht der Parameter des CTMs	13
4	Übersicht der Parameter des ExCTEPMs für drei unterschiedliche Zellengrößen	20
5	Beispielhafte Rechenstudie zur Verdeutlichung des Einflusses der Fahrzeug- und Zellenanzahl auf die Rechenzeit (in Minuten)	22

1 Einleitung

Im vorliegenden Handbuch sind alle Komponenten, die zur Nutzung der „Software zur Planung von städtischen Evakuierungen“ (kurz: SPSE) relevant sind, aufgeführt. Die Software wurde im Rahmen des Projekts „Evakuierung von Großstädten und Ballungsgebieten (Teil 2): (Teil-)Automatisierung der Datenein- und -ausgabe“ entwickelt. Der Ausgangspunkt für dieses Projekt war das Vorgängerprojekt „Evakuierung von Großstädten und Ballungsgebieten“, welches ebenfalls vom Lehrstuhl für Logistik und Operations Research der Universität Duisburg-Essen durchgeführt wurde und von der Stiftung Zukunft NRW (damals noch WestLB-Stiftung Zukunft NRW) finanziert wurde. Die vorliegende Software ermöglicht die (teil-)automatische Erstellung von Evakuierungsplänen für urbane Gebiete. Diese bietet eine intuitive, grafische Oberfläche mit der alle relevanten Eingabeparameter für das gewünschte Evakuierungsszenario erfasst werden können. Danach werden diese Daten so verarbeitet, dass mittels mathematischer Modelle Evakuierungspläne berechnet werden können. Nach der Berechnung der Evakuierungsdaten werden die Ergebnisse über eine grafische Oberfläche dem Nutzer zugänglich gemacht.

Das Handbuch stellt alle Komponenten und damit verbundenen Möglichkeiten der Nutzung der Software vor. Im Handbuch sind folgende Punkte enthalten: In Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen für die Software erklärt und das Grundwissen für die Evakuierungsmodelle erläutert. In Kapitel 3 werden alle wichtigen Funktionen der Dateneingabe aufgezeigt. Kapitel 4 befasst sich mit der Optimierung der Evakuierungsergebnisse und das Kapitel 5 fasst die relevanten Aspekte der Datenausgabe zusammen. Abschließend wird in Kapitel 6 die praktische Einsetzbarkeit des Softwaretools diskutiert.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen für die „Software zur Planung von städtischen Evakuierungen“ (, welche im Folgenden mit dem Kürzel SPSE abgekürzt wird,) erläutert. In Kapitel 2.1 wird auf die technischen und lizenzrechtlichen Voraussetzungen eingegangen, die notwendig sind, um die SPSE auszuführen. Anschließend folgt in Kapitel 2.2 eine kurze Einführung in das OpenStreetMap (OSM) Projekt, dessen Kartenmaterial als Grundlage für die SPSE dient. Zusätzlich wird in diesem Kapitel ebenso auf die Datengenauigkeit von OSM eingegangen, und, begründet warum dieses Kartenmaterial gewählt wurde. Danach folgt in Kapitel 2.3 eine kurze Einführung in ein Grundlagenmodell zur Modellierung von Verkehrsflüssen, auf dem die darauf folgenden Evakuierungsmodelle basieren. Die Grundlagen dieses Modells sind wichtig, um die Zusammenhänge in Kapitel 2.4 zu verstehen. In Kapitel 2.4 wird erläutert, welche Daten aus den OSM-Datensätzen benötigt werden und wie diese in das Grundlagenmodell (siehe Kapitel 2.3) umgewandelt werden. Abschließend werden die relevanten Evakuierungsmodelle in Kapitel 2.5 erläutert.

2.1 Technische und lizenzrechtliche Voraussetzungen

- Technische Voraussetzungen:
 - Hardware: Zur Nutzung der SPSE wird ein Computer mit einem Windows Betriebssystem benötigt. Die Windowsversion sollte nicht älter als Windows 7 sein. Der Computer sollte mindestens vier GB Arbeitsspeicher und einen 3 GHz Prozessor besitzen, da innerhalb der SPSE komplexe Rechenoperationen durchgeführt werden und der Zeitaufwand der Berechnungen für realistische Netzwerke sehr groß werden kann.
 - Internet: Zum Erstellen eines Evakuierungsplanes wird eine Verbindung zum Internet benötigt, weil die Karten des ausgewählten urbanen Gebietes immer direkt aus der aktuellen Datenbank von OSM (siehe Kapitel 2.2) heruntergeladen werden. Im Falle einer Katastrophe ist es unabdingbar, dass die Karten so aktuell wie möglich sind und daher in Echtzeit von den Servern des OSM-Projektes heruntergeladen werden. Falls keine Internetverbindung vorhanden ist, können keine neue Projekte erstellt werden. Es können lediglich vorab abgespeicherte Projekte aufgerufen werden (siehe Kapitel 5.4).
- Lizenzen: In der SPSE werden unterschiedliche Programme/Lizenzen (z.B. OSM,

Visual Studio, Inkscape) verwendet, die fast ausschließlich kostenfrei im Internet zur Verfügung stehen. Es ist lediglich für den Optimierungsprozess eine Lizenz für die Modellierungssprache AMPL (siehe Kapitel 4.1) und die angebundene Solver (siehe 4.3) notwendig. Beide Komponenten müssen kostenpflichtig¹ erworben werden, damit diese (und damit die SPSE) uneingeschränkt genutzt werden kann.

2.2 OpenStreetMap-Projekt

Eine wichtige Entscheidung während des Projekts stellte die Auswahl des Kartenmaterials dar. Das Kartenmaterial, das auf dem Markt vorhanden ist, lässt sich in amtliche (z.B. die Landesvermessungsämter), kommerzielle (Navteq, Teleatlas oder Google) und freie (OpenStreetMap (OSM) oder TIGER) Kartenanbieter einteilen. Zunächst wurden die wichtigsten Anforderungen an das Kartenmaterial festgelegt, anschließend wurden die Kartenanbieter verglichen und letztendlich wurde das OSM-Kartenmaterial gewählt. Bevor nun begründet wird, warum man sich für das OSM-Kartenmaterial entschieden hat, wird zunächst das OSM-Projekt genauer vorgestellt.

2.2.1 Vorstellung des OpenStreetMap-Projekts

Das OSM-Projekt wird auch als „Wikipedia der Kartographie“² bezeichnet und verfolgt das Ziel, eine „frei-zugängliche Weltkarte“³ zu erschaffen. Das Projekt wurde 2004 gegründet und besteht derzeit aus über 2.000.000 freiwilligen Usern bzw. (so genannten) „Mappern“⁴. Die Grundidee besteht darin, eine vollständige und sehr detaillierte Weltkarte mit Hilfe der „Mapper“ zu erstellen und dadurch öffentlich und frei nutzbare Karten zur Verfügung zu stellen. Zur Dateneingabe existieren zwei unterschiedliche Vorgehensweisen:

Einerseits können die „Mapper“ mit einem GPS-fähigen Empfangsgerät (z.B. einem Smartphone) Strecken entlanglaufen oder abfahren und im Nachhinein die gesammelten Daten mit den OSM-Datensätzen synchronisieren. Zusätzlich können noch beliebig viele Informationen (z.B. Points-of-Interest, Hausnummern, Briefkästen, Bushaltestellen, Informationen zu den Bushaltestellen) hinzueditiert werden. Andererseits können die „Mapper“ neue Daten direkt, z.B. anhand von Luft-, Satellitenbildern oder anderen zur Verfügung stehenden Daten (z.B. von gespendeten Kartenmaterialien) am Computer hinzufügen. In Abbildung 1 ist der Duisburger Stadtteil Neudorf im OSM-Datenformat exemplarisch dargestellt. Wie bei Wikipedia kann jeder Benutzer neue

¹Vgl. AMPL (2015).

²Vgl. Ramm/Topf (2009), S. 4.

³Vgl. Neis et al. (2010), S.1.

⁴Vgl. OpenStreetMap (2015a).



Abbildung 1: Abbildung des Stadtteils Neudorf im OSM-Kartenformat (Quelle: OpenStreetMap (2013a)).

Informationen in die OSM-Datensätze hinzufügen oder vorhandene Datensätze bearbeiten bzw. verändern. Durch diese Tatsache wird das Projekt zum einen erst möglich, zum anderen birgt es aber die Gefahr, dass Informationen (absichtlich) nicht richtig abgespeichert sein können.

2.2.2 Anforderungen an das Kartenmaterial

Das ausschlaggebende Kriterium für die Wahl des Kartenmaterials war die Vollständigkeit der Datensätze, da unvollständiges Kartenmaterial zur Entwicklung von Evakuierungsplänen nicht herangezogen werden kann.

Neis et al.⁵ haben die Entwicklung des OSM-Straßennetzwerkes von Deutschland über die Jahre von 2007-2011 beobachtet und analysiert. Dabei wurde die Qualität der OSM-Datensätze bestimmt, indem die OSM-Datensätze mit kommerziellen Kartenmaterialien von Tele Atlas (TA) verglichen wurden. Zwei Analysen sind dabei besonders interessant: Zum einen der Vergleich der Gesamtlänge des Straßennetzwerkes und zum anderen der Vergleich der Gesamtlänge des Straßennetzwerkes, welches für die Auto-navigation verwendet wird.

Der Anteil der Gesamtlänge des Straßennetzwerkes der OSM-Datensätze im Vergleich

⁵Vgl. Neis et al. (2012).

zu den TA-Datensätzen betrug im Jahr 2007 nur knapp 20%. Es waren also nur knapp 20% der Verkehrswege, die in den TA-Datensätzen enthalten waren, auch in den OSM-Datensätzen enthalten. Das OSM-Straßennetzwerk hat sich aber bis 2011 erstaunlich entwickelt und war im Jahr 2011 circa 27% größer als das Straßennetzwerk der TA-Datensätze. Eine ähnliche Entwicklung hat auch in dem Straßennetzwerk für die Autonavigation stattgefunden. Im Jahr 2009 waren nur knapp 50% aller Verkehrswege, welche für die Autonavigation relevant sind, in den OSM-Datensätzen abgedeckt.⁶ Dieser Abstand hat sich bis zum Jahr 2011 fast aufgehoben, sodass bis dahin über 90% der Verkehrswege für die Autonavigation in den OSM-Datensätzen enthalten waren. Aufgrund dieser Entwicklung prognostizierten die Autoren, dass Mitte bzw. spätestens Ende 2012 das komplette deutsche Straßennetzwerk in den OSM-Datensätzen enthalten ist.

Besondere Schwachstellen in der Qualität der OSM-Datensätze bemängeln die Autoren Neis et al.⁷ sowie Over et al.⁸ in ländlichen Regionen. Der Grund dafür ist, dass in ländlichen Gebieten weniger Menschen leben und daher auch weniger Menschen die OSM-Karten pflegen. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass in den OSM-Datensätzen zu wenige Abbiegevorschriften hinterlegt sind. Im Jahr 2011 war die Anzahl der Vorschriften in den OSM-Datensätzen (ca. 28.000) ungefähr sechsmal geringer als in der Navigationssoftware von TomTom (ca. 174.000). Die fehlenden Abbiegevorschriften werden dadurch begründet, dass diese in den OSM-Standardkarten nicht angezeigt werden und daher von vielen „Mappern“ schlichtweg vergessen werden. Zusätzlich ist vielen Usern nicht bewusst, wie wichtig diese Vorschriften für die Navigationsanwendung sind.

Beide Kritikpunkte an den OSM-Datensätzen spielen für das aktuelle Projekt keine Rolle. Das Projekt wurde gezielt für urbane Ballungsgebiete entwickelt, in denen tendenziell viele Menschen leben und daher auch tendenziell gute OSM-Datensätze zur Verfügung stehen.⁹ Es wurde nämlich festgestellt, dass die hohe Qualität der OSM-Daten stark mit der Anzahl der Bevölkerung korreliert.¹⁰ Die fehlenden Abbiegevorschriften sind für das Projekt ebenfalls nicht relevant, da durch die neue Berechnung die Ausrichtung der Straßen neu ermittelt bzw. festgelegt wird.

Allerdings wurde erkannt, dass OSM über kein einheitliches Qualitätsmanagement verfügt und damit nicht sichergestellt ist, dass die Qualität der Daten überall identisch ist. Jedoch wurden bereits Tools zur Messung der Qualität, wie beispielsweise

⁶Vgl. Roick et al. (2011), S. 2.

⁷Vgl. Neis et al. (2012), S. 15ff.

⁸Vgl. Over et al. (2010), S. 503ff.

⁹Vgl. Neis et al. (2012), S. 17; Vgl. Over et al. (2010), S. 506.

¹⁰Vgl. Mooney et al. (2010), S. 10.

der iOSMANalyzer¹¹ entwickelt und es existiert eine spezielle Homepage¹² auf der die „Mapper“ über Unstimmigkeiten oder Fehler in den OSM-Karten diskutieren und diese im Anschluss editieren können.

Aufgrund der immer weiter wachsenden Mitgliederzahl der Community (April, 2010: ca. 240.000 registrierte Mapper¹³; August, 2015: ca. 2,0 Millionen registrierte Mapper¹⁴), dem Rückgang von „technischen Hemmnissen“ wie zum Beispiel durch Apps, wird die OSM-Kartenqualität in den nächsten Jahren weiter steigen¹⁵ und möglicherweise bald sogar den kommerziellen Kartenmaterialien überlegen sein. Erste Anhaltspunkte für diese Entwicklung sind, dass z.B. bekannte Marken wie Apple oder Four-square von dem etablierten Kartenmaterial von Google zu OSM gewechselt sind und OSM inzwischen von einer Vielzahl von Behörden genutzt wird.¹⁶

Eine zweite wichtige Anforderung an das Kartenmaterial ist das Datenformat. Die Daten sollten nach Möglichkeit in einem Geodatenformat und nicht in einem Vektor- oder Rasterdatenformat vorliegen. Der Unterschied liegt darin, dass bei einem Geodatenformat auf die Ursprungsdaten zugegriffen werden kann und diese dann frei ausgewählt bzw. gestaltet werden können. Vektor- bzw. Rasterdaten können als Bilder interpretiert werden, auf denen Markierungen (z.B. Stecknadeln) möglich sind, aber Abhängigkeiten nicht dargestellt werden können. OSM stellt im Gegensatz zu allen anderen Anbietern die vollständigen Geodaten zur freien Verfügung.¹⁷

Zusätzlich sollten die Daten digital vorliegen und erweiter- bzw. editierbar sein, um im Anschluss an die Optimierung eigene (Evakuierungs-)Karten erstellen zu können. Außerdem sollte die Möglichkeit bestehen, einzelne Kartenabschnitte zu markieren und zu exportieren. All diese Voraussetzungen werden von den OSM-Datensätzen erfüllt. Darüber hinaus besitzen die OSM-Datensätze noch weitere Vorteile:

- Die Nutzung ist frei und kostenlos. Es muss lediglich sichergestellt werden, dass neue Karten gekennzeichnet werden und ebenso zur freien Verfügung stehen.
- Für jeden Kartenabschnitt existiert ein Protokoll, welches Veränderungen in dem Kartenabschnitt speichert. So kann exakt ausgewertet werden, wann und wie häufig der Kartenabschnitt editiert wurde. Wie zuvor schon erwähnt, kann anhand der Veränderungen die Qualität des Kartenmaterials ermittelt werden.
- Das Kartenmaterial kann aufgrund der Community äußerst schnell aktualisiert

¹¹Vgl. Barron et al. (2013).

¹²Vgl. OpenStreetMap (2015b).

¹³Vgl. Zielstra/Zipf (2010), S. 1.

¹⁴Vgl. OpenStreetMap(2015a).

¹⁵Vgl. Westfälische Nachrichten(2013), S.1.

¹⁶Vgl. Soden et al. (2011), S.22.

¹⁷Vgl. Ramm/Topf (2009), S. 6.

werden. Beispielsweise wurde das Straßennetzwerk in Haiti nach dem katastrophalen Erdbeben 2011 anhand von Luftaufnahmen innerhalb weniger Stunden neu „gemappt“. Dadurch konnte den Hilfsorganisationen vor Ort sehr geholfen werden.¹⁸ Dies kann möglicherweise auch bei einer notwendigen Evakuierung hilfreich sein.

2.2.3 Import der OpenStreetMap-Datensätze

Die OSM-Datensätze enthalten sehr viele Informationen, welche für das Projekt nicht relevant sind, wie z.B. Buslinien oder Gebäude. Deshalb werden nur die folgenden Informationen aus den OSM-Karten abgespeichert:

- Der Straßentyp: Diese Information ist entscheidend, da anhand der Straßentypen die Geschwindigkeit festgelegt wird, mit welcher auf der Straße (während der Evakuierung) gefahren werden kann.
- Die Anzahl der Spuren: Anhand der Anzahl der Spuren wird die jeweilige Durchflusskapazität einer Straße bestimmt.
- Die Koordinaten einer Straße: Die Koordinaten dienen dazu das Straßennetzwerk richtig abzubilden und die Abstände zwischen den Straßenabschnitten bzw. Kreuzungen zu ermitteln.
- Die Straßennamen: Die Straßennamen sind wichtig, um bei der Darstellung der Karten die Straßennamen richtig darzustellen.

In der OSM-Datenstruktur können Straßen sehr unterschiedlich kategorisiert werden. Für das Evakuierungsprojekt sind allerdings nur die Straßen relevant, die tatsächlich mit einem Auto befahren werden können. Daher filtert das Programm automatisch bei dem Herunterladen alle Straßentypen heraus, die nicht für das Evakuierungsprojekt benötigt werden. Die folgenden „Straßen“ werden nicht betrachtet: Fußgänger-, Wander-, Fahrrad- und Reitwege sowie Treppen und geplante und derzeit im Bau befindliche Straßen. Für das Projekt relevante Straßentypen sind: Autobahnen, Autobahnzubringer, Bundes-, Land- und Hauptstraßen sowie deren Verbindungen, Kreisstraßen und verkehrsberuhigte Bereiche.

Eine wichtige Annahme für den Evakuierungsprozess ist die Geschwindigkeit, die in den jeweiligen Straßen gefahren werden kann. In den OSM-Karten sind keine Informationen zu den Geschwindigkeiten auf den unterschiedlichen Straßentypen hinterlegt, daher müssen die Geschwindigkeiten für die jeweiligen Straßen hinzugefügt werden.

¹⁸Vgl. Soden et al. (2011), S. 20.

Diese Geschwindigkeiten werden benötigt, um die Straßen später in eine interne Datenstruktur umzuwandeln. Eine mögliche Zuordnung von unterschiedlichen Straßentypen zu Geschwindigkeiten ist in Tabelle 1 dargestellt.

Straßentyp	Geschwindigkeit
Autobahnen und Schnellstraßen	130 km/h
Zubringer von Autobahnen und Schnellstraßen	60 km/h
Bundes-, Land- und Hauptstraßen	50 km/h
Verbindungen von Bundes-, Land- und innerstädtischen Vorfahrtstraßen	40 km/h
Kreisstraßen	30 km/h
Verkehrsberuhigter Bereich	10 km/h

Tabelle 1: Zuordnung der maximalen Geschwindigkeiten zu den jeweiligen OSM-Straßentypen.

2.3 Cell-Transmission-Modell

Das Cell-Transmission-Modell (CTM) wurde von Daganzo¹⁹ eingeführt und beruht auf der hydrodynamischen Verkehrsflusstheorie von Lighthill und Whitham²⁰ und Richards²¹. Es ist ein makroskopisches, zellenbasiertes Verkehrsflussmodell mit dessen Hilfe die Entstehung, Ausbreitung und Auflösung von Staus prognostiziert und simuliert werden kann. Daganzo untersuchte in seinen Ausarbeitungen unter anderem das Verhalten des Autoverkehrs auf einem amerikanischen One-Way-Highway mit nur jeweils einer Zufahrt und Abfahrt.

In Daganzos CTM wird die zu untersuchende Strecke in homogene Streckenabschnitte (= Zellen) unterteilt und von 1 bis $|I|$ durchnummeriert (siehe Abbildung 2). Wobei I die maximale Anzahl an Zellen darstellt. Das Zellennetzwerk wird dann über $|T|$ diskrete Zeitintervalle beobachtet und für jede Periode t werden die Zustände der Zellen aktualisiert. Der Verkehr kann in diesem Ausgangsmodell ausschließlich in eine Richtung fließen und das Ein- und Austreten von Fahrzeugen außerhalb der Start- und Endpunkte ist nicht möglich. Die Länge einer Zelle wird so gewählt, dass ein Auto diese Strecke ohne Stau in einer Periode durchfahren kann. Wird bspw. eine Geschwindigkeit von $50 \frac{km}{h}$ ($\approx 13,9 \frac{m}{s}$) und eine Periodenlänge von 9 Sekunden angenommen,

¹⁹Vgl. Daganzo (1994).

²⁰Vgl. Lighthill/Whitham (1955).

²¹Vgl. Richards (1956).

dann ist eine Zelle ($13,9 \frac{m}{s} * 9 s \approx$) 125 Meter lang.

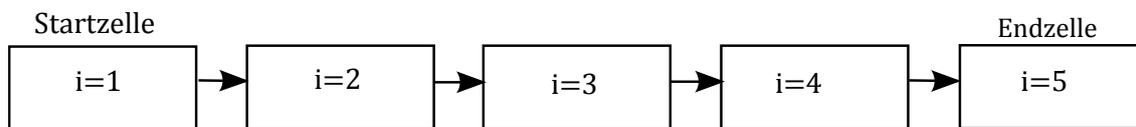


Abbildung 2: Grafische Darstellung der Zellenstruktur

Der Verkehrsfluss wird durch die folgende Formel ausgedrückt:

$$x_{i+1,t+1} = x_{it}, \quad (1)$$

wobei x_{it} der Anzahl der Autos einer Zelle i zum Zeitpunkt t entspricht. Alle Autos einer Zelle i rücken dementsprechend bei staufreiem Verkehr innerhalb einer Periode t zur nächsten Zelle $i + 1$ vor. Diese rekursive Gleichung ist erfüllt, solange der Verkehrsfluss nicht durch einen Stau gestört wird, denn die erhöhte Zellenbelegung beeinflusst die Fließgeschwindigkeit negativ.

Um Stauzustände simulieren zu können, führte Daganzo die folgenden zwei Parameter ein:

- N_i beschreibt die maximale Anzahl an Fahrzeugen, die sich in einer Zelle zu einem Zeitpunkt aufhalten können (Zellenkapazität). Diese Kennzahl berechnet sich aus der Zellenlänge und der Verkehrsdichte bei Stau.
- Q_i ist die maximale Anzahl an Fahrzeugen, die innerhalb einer Periode in die nachfolgende Zelle i hineinfließen können (Flusskapazität). Dieser Parameter berechnet sich aus der Flussgeschwindigkeit und dem jeweiligen Sicherheitsabstand.²²

Der Fluss zwischen zwei Zellen wird durch die Variable $y_{i,i+1,t}$ repräsentiert, die ausdrückt, wie viele Autos von einer Zelle i in die Nachfolgerzelle $i + 1$ in der Periode t fließen. Dieser Fluss wird formal, wie folgt, eingeschränkt:

$$y_{i,i+1,t} = \min\{x_{it}, Q_i, N_{i+1} - x_{i+1,t}\} \quad (2)$$

Inhaltlich bedeutet die Formel (2) folgendes:

1. $y_{i,i+1,t} \leq x_{it}$: Es können nicht mehr Autos in die Nachfolgerzelle $i + 1$ fließen als in der Vorgängerzelle i vorhanden sind.
2. $y_{i,i+1,t} \leq Q_i$: Die Flusskapazität darf nicht überschritten werden.

²²Die exakte Berechnung dieser Parameter wird im nachfolgenden Kapitel 2.4 beschrieben.

3. $y_{i,i+1,t} \leq N_{i+1} - x_{i+1,t}$: Die maximale Zellenkapazität der Nachfolgerzelle $i + 1$ darf (unter Berücksichtigung der aktuellen Belastung) nicht überschritten werden.

Der Fluss von einer Zelle i in die Nachfolgerzelle $i + 1$ ist durch das Minimum dieser drei Werte beschränkt.

Die Anzahl der Fahrzeuge, welche sich innerhalb eines Zeitintervalls in einer Zelle befinden, ergibt sich dann aus folgender Gleichung:

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + y_{i-1,i,t} - y_{i,i+1,t} \quad (3)$$

Somit setzt sich die Anzahl der Fahrzeuge in einer Zelle i im Zeitintervall t ($x_{i,t}$) aus den Fahrzeugen zusammen, welche in der Vorperiode in dieser Zelle waren, zuzüglich der Fahrzeuge, welche aus der Vorgängerzelle $i - 1$ in die Zelle hineinfließen, abzüglich der Fahrzeuge, welche die Zelle i in die Nachfolgerzelle $i + 1$ verlassen. Mittels

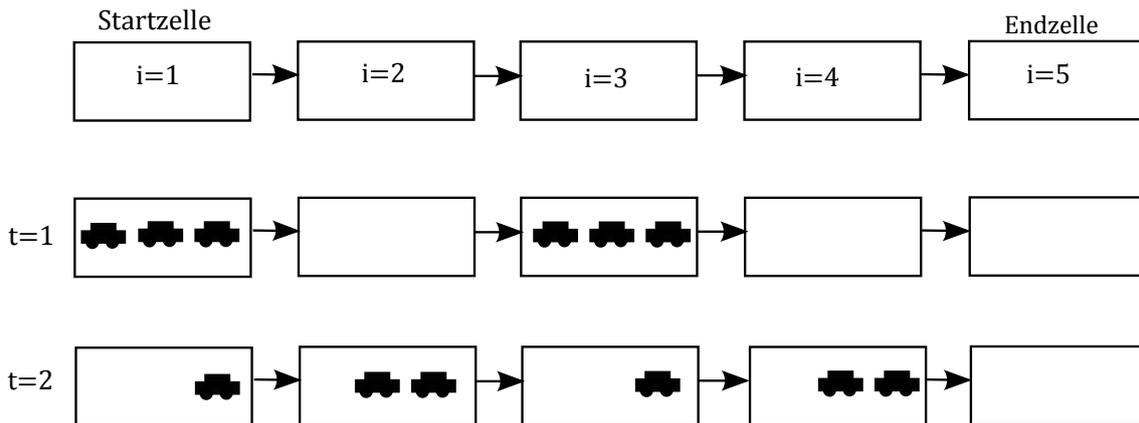


Abbildung 3: Grafische Darstellung des Verkehrsflusses

Abbildung 3 werden nachfolgend diese Zusammenhänge verdeutlicht. Es werden die folgenden Werte für die zuvor erläuterten Größen angenommen (für alle fünf Zellen): $N_i = 3, Q_i = 2$. Im Zeitintervall $t = 1$ befinden sich drei Fahrzeuge in Zelle 1 und 3. Daraus resultieren die folgenden Belegungen: $x_{11} = 3, x_{21} = 0, x_{31} = 3, x_{41} = 0, x_{51} = 0$. Unter Berücksichtigung dieser Werte ergeben sich von Zeitintervall 1 zu Zeitintervall 2 die folgenden Verkehrsflüsse (Es wird angenommen, dass in Zelle 1 keine weiteren Fahrzeuge hinein fahren):

- $y_{122} = \min\{3, 2, 3\} = 2$
- $y_{232} = \min\{0, 2, 0\} = 0$
- $y_{342} = \min\{3, 2, 3\} = 2$

- $y_{452} = \min\{0, 2, 0\} = 0$

Mit Hilfe der Formel 3 kann dann die Anzahl der Fahrzeuge für jede Zelle für die zweite Periode berechnet werden.

Wie am Beispiel gezeigt wurde, kann man mit diesem Modell nun einen Verkehrsfluss simulieren, indem in jedem Zeitintervall für jede Zelle überprüft wird, wie viele Fahrzeuge von einer vorherigen Zelle $i - 1$ in die Zelle i wechseln können. Durch diese periodische Aktualisierung der Anzahl an Fahrzeugen in einer Zelle wird ein Verkehrsfluss dargestellt. Mit der Beschränkung des Verkehrsflusses durch die zuvor vorgestellten Größen können in der Realität vorkommende Verkehrsphänomene abgebildet werden. Somit bietet diese Modellierung eine gute Basis zur Abbildung von realen Verkehrsflüssen.

2.4 Aufbereitung des Kartenmaterials

In diesem Kapitel wird erklärt, wie das vorhandene Straßennetzwerk aus den OSM-Karten in ein Zellennetzwerk umgewandelt wird.

Um einen Evakuierungsplan für ein ausgewähltes, urbanes Gebiet mit dem erwähnten Modell lösen zu können, muss das Straßennetzwerk der Stadt in ein vorgegebenes Zellenformat übertragen werden. Dafür werden die Straßenabschnitte in gleich große (sogenannte) Zellen unterteilt. Für das CTM werden die Zellengrößen so ausgewählt, dass eine Zelle bei freier Fahrt genau innerhalb einer Periode t durchfahren werden kann, um so den Verkehrsfluss abzubilden. Damit die benötigten Parameter für das CTEPM (Cell-Transmission-Based Evacuation Planning Model) berechnet werden können, müssen einige Annahmen getroffen werden, die nun im Folgenden erläutert werden. Um die Flexibilität bei der Nutzung der Software zu gewährleisten sind alle nachfolgend dargestellten Parametereingaben in der Software anpassbar (siehe Kapitel 3.6). In Tests haben sich die getroffenen Annahmen als praktikabel erwiesen und sind deshalb als Voreinstellung in der Software hinterlegt. Die Länge einer Periode ist auf neun Sekunden voreingestellt. Die Problematik bei der Auswahl dieses Parameters ist, dass ein Trade-off zwischen der Genauigkeit des Evakuierungsplanes und der Lösbarkeit existiert. Bei einer sehr geringen Periodenlänge kann der Verkehrsfluss durch das Straßennetzwerk sehr genau abgebildet werden, aber aufgrund der Vielzahl der Zellen steigt der Rechenaufwand enorm. Andererseits kann der Verkehrsfluss durch das Straßennetzwerk, bei einer größeren Periodenlänge, nicht mehr exakt (genug) abgebildet werden. Dadurch wird aber der Rechenaufwand reduziert. Es muss daher eine Entscheidung zwischen Detaillierungsgrad und Rechenaufwand getroffen werden. Die durchschnittliche Autolänge wird in der Voreinstellung auf 4,77 Meter geschätzt.²³

²³Vgl. Schuster et al. (2012), S. 8.

Der durchschnittliche Abstand zwischen zwei Autos während eines Staus wird in der Voreinstellung auf einen Meter festgelegt.

Für die durchschnittlichen Abstände zwischen zwei Autos wird der Sicherheitsabstand zwischen zwei Autos angenommen. Dieser Sicherheitsabstand berechnet sich nach der folgenden Faustformel: Innerhalb von geschlossenen Ortschaften ist die Strecke ausreichend, die in einer Sekunde bei der aktuellen Fahrgeschwindigkeit zurückgelegt wird. Außerhalb von geschlossenen Ortschaften entspricht der Sicherheitsabstand der Strecke, die in zwei Sekunden zurückgelegt wird. Um nun die durchschnittlichen Abstände berechnen zu können, ist die folgende Umformulierung notwendig:

$$1 \frac{km}{h} = \frac{1000 \frac{m}{km}}{3600 \frac{s}{h}} \times 1 \frac{km}{h} \approx 0,278 \frac{m}{s} \quad (4)$$

Die durchschnittlichen Abstände (DA) innerorts bei der Geschwindigkeit von $v = 10, 20, 30, 50$ und $60 \frac{km}{h}$ lassen sich dann mit folgender Formel berechnen:

$$DA = 1 s \times 0,278 \frac{m}{s} \times v. \quad (5)$$

Analog dazu die Berechnung des durchschnittlichen Abstandes außerorts ($v = 130 \frac{km}{h}$):

$$DA = 2 s \times 0,278 \frac{m}{s} \times v. \quad (6)$$

Zur Übersichtlichkeit sind die voreingestellten Parameter noch einmal in der Tabelle 2 dargestellt.

Anhand dieser Annahmen lassen sich nun die Parameter für das CTM ermitteln. Die Gesamtlänge einer Zelle (ZL) berechnet sich aus der Geschwindigkeit (v in $\frac{m}{s}$), die in der Zelle gefahren wird, multipliziert mit der Periodenlänge (t):

$$ZL = v \times t. \quad (7)$$

Die Anzahl an Autos (Q), die eine Zelle bei freier Fahrt durchfahren können, berechnet sich aus dem Quotienten der Gesamtlänge der Zelle (ZL) dividiert durch die Summe aus der durchschnittlichen Autolänge (A) und dem Mindestabstand der entsprechenden Geschwindigkeit (DA):

$$Q = \frac{ZL}{A + DA} \quad (8)$$

Die maximale Anzahl an Autos (N), die sich während einer Periode in einer Zelle befinden können, berechnet sich aus dem Quotienten der Zellenlänge (ZL) dividiert durch die Summe aus einer durchschnittlichen Autolänge (A) und dem Mindestabstand von

Parameter:	Bedeutung:	Annahmen:
t	Periodenlänge:	9 Sekunden
A	Durchschnittliche Autolänge:	4,77 Meter
DAS	Durchschnittlicher Abstand bei Stau:	1 Meter
DA_{10}	Durchschnittlicher Abstand bei einer Geschwindigkeit von 10 km/h:	2,78 Meter
DA_{30}	Durchschnittlicher Abstand bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h:	8,34 Meter
DA_{40}	Durchschnittlicher Abstand bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h:	11,12 Meter
DA_{50}	Durchschnittlicher Abstand bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h:	13,89 Meter
DA_{60}	Durchschnittlicher Abstand bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h:	16,67 Meter
DA_{130}	Durchschnittlicher Abstand bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h:	72,23 Meter

Tabelle 2: Übersicht der Annahmen für die Ausgangsparameter des CTMs.

zwei Autos bei Stau (DAS):

$$N = \frac{ZL}{A + DAS} \quad (9)$$

Die Werte der entsprechenden Parameter für alle Geschwindigkeiten sind in der Tabelle 3 dargestellt. Alle Kennzahlen sind in der Tabelle gerundet.

Kennzahl \ v	10 ($\frac{km}{h}$)	30 ($\frac{km}{h}$)	40 ($\frac{km}{h}$)	50 ($\frac{km}{h}$)	60 ($\frac{km}{h}$)	130 ($\frac{km}{h}$)
v in ($\frac{m}{s}$) =	2,78	8,34	13,89	11,12	16,67	36,12
ZL =	25	75	100	125	150	325
N =	5	14	18	23	27	59
Q =	3	6	6	7	7	4

Tabelle 3: Übersicht der Parameter des CTMs

Mit Hilfe dieser Kennzahlen kann nun das Straßennetzwerk aus OSM in die Zellenstruktur übertragen werden. Durch die vorgegebene Periodenlänge sind die jeweiligen Zellenlängen fest vorgegeben. Häufig wird es nicht möglich sein ein reales Straßennetzwerk exakt durch das Zellennetzwerk abzubilden, da nicht alle Straßenabschnitte

genau den vorgegebenen Zellengrößen entsprechen werden. In Kapitel 3.7 wird erklärt, wie dieser Aspekt in dem Programm berücksichtigt wurde.

Für die spätere Modellformulierung müssen die Startpunkte der Autos (sogenannte Quellen) und die Zielpunkte (sogenannte Senken) festgelegt werden. Die Identifizierung der Quellen ist unproblematisch. Jede Zelle, welche mindestens ein zu evakuierendes Auto enthält, ist eine Quelle. Die Identifizierung der Senken, also das Festlegen der Straßen, die in den sicheren Bereich führen, ist hingegen nicht ganz trivial. Die Software legt automatisch jede Straße als Senke fest, die aus dem zu evakuierenden Bereich führt. Diese automatische Vorgehensweise kann dazu führen, dass Straßen als Senken identifiziert werden, die eigentlich keine Senken sein sollen. Daher wird in Kapitel 3.4.1 erläutert, wie der Benutzer die Senken manuell bearbeiten kann.

2.5 Evakuierungsmodelle

Im folgenden Abschnitt werden mathematische Optimierungsmodelle vorgestellt, mit deren Hilfe die Fahrzeugflüsse der Evakuierungspläne ermittelt werden. Die Evakuierungspläne bauen jeweils auf dem CTM auf, welches in Kapitel 2.3 erläutert wurde. Aufbauend auf diesem Modell haben Kimms und Maassen²⁴ ein mathematisches Modell zur Optimierung des Autoverkehrs in urbanen Gebieten für ein Evakuierungsszenario entwickelt. Diese Formulierung ist die Grundlage für das Evakuierungsmodell in der SPSE und wird in Kapitel 2.5.1 vorgestellt. Darauf aufbauend haben Kimms und Maassen²⁵ eine Erweiterung des Ausgangsmodells aus Kapitel 2.5.1 vorgestellt, welches unterschiedliche Zellengrößen verwendet. Dieses erweiterte Evakuierungsmodell (ExCTEPM - Extended Cell-Transmission-Based Evacuation Planning Model) wird in diesem Projekt angewendet und wird in Kapitel 2.5.2 beschrieben. Neben diesem Evakuierungsmodell ist noch das Evakuierungsmodell von Kimms und Maiwald²⁶ in der Software hinterlegt, welches zusätzlich berücksichtigt, dass Straßenkapazitäten in dem Netzwerk ausfallen können. Dieses Modell wird in Kapitel 2.5.3 erklärt. Abschließend wird in Kapitel 2.5.4 eine kleine Rechenstudie präsentiert, um dem Leser einen Eindruck der Rechenzeiten für unterschiedliche Evakuierungsszenarien zu geben.

2.5.1 Ursprüngliches Evakuierungsmodell

Das Optimierungsmodell von Kimms und Maassen²⁷ basiert auf der Grundidee des CTMs von Daganzo. Das Straßennetzwerk wird also, wie schon beschrieben, in Zellen eingeteilt. Allerdings weicht die Formulierung teilweise von der Formulierung von

²⁴Vgl. Kimms /Massen (2011a).

²⁵Vgl. Kimms/Massen (2011b).

²⁶Vgl. Kimms/Maiwald (2015).

²⁷Vgl. Kimms/Maassen (2011a).

Daganzo ab. Kimms und Maassen treffen die Annahme, dass es mehrere Startzellen für den Verkehrsfluss geben kann. Daganzo verfolgte zusätzlich die Annahme, dass es nur eine Startzelle gibt. Außerdem ist bei der Modellformulierung von Kimms und Maassen die Richtung des Verkehrsflusses nicht vorgegeben, sodass ein Fahrzeug nicht zwangsläufig von der Zelle i in die Zelle $i + 1$ fährt. In dieser Modellformulierung kann eine Zelle auch mit mehreren Zellen verbunden sein. Daher wird ein Binärparameter β_{ij} eingeführt, welcher 1 ist, falls zwei Zellen i und j miteinander verbunden sind und ansonsten den Wert 0 hat. Selbstverständlich können Fahrzeuge von einer Zelle i nur in verbundene Zellen j wechseln. Dadurch, dass die Fahrtrichtung nicht vorgegeben ist, kann mit dem Modell auch ein sog. *Contraflow* abgebildet werden. Dies bedeutet, dass eine Straße entgegen der ursprünglichen Ausrichtung nicht mehr in zwei Fahrtrichtungen, sondern nur noch in eine Richtung befahren wird.

Zur Abbildung einer Evakuierungssituation wird das Straßennetzwerk in unterschiedliche Gefahrenzonen unterteilt. Dafür wird ein Parameter c_{it} eingeführt, der die Gefährdung für eine Zelle i für jeden Zeitpunkt t der Evakuierung darstellt. Beispielhaft wird ein Gefahrenwert (c_i) für jede Zelle i abgeschätzt und die Gefährdung für jede Periode (t) mit folgender Formel berechnet:

$$c_{it} = c_i \cdot t \qquad t \in T \qquad (10)$$

Dadurch wird sichergestellt, dass die Gefährdung im Evakuierungsverlauf zunimmt. Die Gefährdung in den Senken, also in den Straßen, die aus der gefährdeten Zone hinausführen, wird auf $c_{it} = 0$ fixiert. Zusätzlich wird eine Supersenke in das Netzwerk eingefügt, die mit allen Senken (=Ausgängen) verbunden ist. Die Gefährdung dieser Supersenke ist ebenso 0. Die Supersenke ist für die Modellierung notwendig, aber für die Abbildung der Evakuierungssituation nicht relevant. Zusätzlich wird ein Parameter E_i benötigt, der beschreibt, wie viele Autos zu Beginn der Evakuierung an einer Zelle i warten. Man kann sich für diesen Wert z.B. Fahrzeuge vorstellen, die auf Parkplätzen entlang der Straße oder in Einfahrten von Häusern stehen. Sämtliche Daten (das Straßennetzwerk, die Verteilung der Gefährdung und der Bevölkerung) kann vom Benutzer in der SPSE eingegeben werden. Außerdem werden noch die Flusskapazität (Q_i) und die Zellenkapazität (N_i) für jede Zelle i benötigt. Die Berechnung dieser Parameter ist im Kapitel 2.4 erläutert. Die Parameter werden automatisch von der Software berechnet.

Neben den genannten Parametern, welche die Rahmenbedingungen der Evakuierung darstellen, werden in der Modellformulierung die folgenden Entscheidungsvariablen verwendet. Die Variablen x_{it} (alle wartenden Fahrzeuge in einer Zelle i zum Zeitpunkt t) und y_{ijt} (alle Fahrzeuge, die von der Zelle i in die Zelle j zum Zeitpunkt t wechseln)

wurden bereits in Kapitel 2.3 eingeführt. Zusätzlich werden noch die Variable b_{it} , welche alle Fahrzeuge, die zum Zeitpunkt t in der Zelle i starten, repräsentiert und die Variable z_{it} , welche alle Fahrzeuge repräsentiert, die der Zelle i (also auch die Fahrzeuge, die noch nicht mit der Evakuierung begonnen haben) zugeordnet sind, eingeführt. Aus den ermittelten Werten der Variablen wird dann nachfolgend der Evakuierungsplan abgeleitet. Nachfolgend ist eine Übersicht von allen Parametern und Entscheidungsvariablen des CTEPMs aufgeführt:

Parameter:

$T = \{1, \dots, T \}$	Menge der Perioden
$I = \{1, \dots, I \}$	Menge der Zellen
$ I $	Supersenke
c_{it}	Gefährdung einer Zelle i in der Periode t ($c_{it} \geq 0$)
β_{ij}	$= \beta_{ji} = 1$, falls die Zellen i und j miteinander verbunden sind
N_i	Maximale Anzahl von Fahrzeugen, die sich in einer Zelle i befinden können
E_i	Anzahl der Fahrzeug, die in Zelle i starten
Q_i	Maximale Anzahl von Fahrzeugen, die aus einer Zelle heraus bzw. in eine Zelle hineinfließen können
x_{i0}	Anzahl von Fahrzeugen, die sich zu Beginn der Evakuierung auf der Straße befinden

Entscheidungsvariablen:

z_{it}	Anzahl von Fahrzeugen, die die Zelle i verlassen, in dieser Zelle warten oder noch nicht mit der Evakuierung begonnen haben zum Zeitpunkt t
x_{it}	Anzahl von Fahrzeugen, die sich zum Zeitpunkt t in der Zelle i befinden
y_{ijt}	Anzahl von Fahrzeugen, die von der Zelle i in die Zelle j zum Zeitpunkt t fahren
b_{it}	Anzahl an Fahrzeugen, die in Periode t in der Zelle i mit der Evakuierung beginnen

Ein mathematische Modell zur Optimierung der Verkehrsflüsse für eine urbanes Evakuierungsszenario kann folgendermaßen formuliert werden:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} c_{it} \cdot z_{it} \quad (11)$$

u.d.N.

$$z_{it} = x_{it} + \sum_{j \in I} y_{ijt} + (E_i - \sum_{\tau=1}^t b_{i\tau}) \quad i \in I; t \in T \quad (12)$$

$$x_{it} = b_{it} + x_{i,t-1} + \sum_{j \in I} y_{jit-1} - \sum_{j \in I} y_{ijt} \quad i \in I; t \in T \quad (13)$$

$$z_{it} \leq N_i + (E_i - \sum_{\tau=1}^t b_{i\tau}) \quad i \in I; t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{t \in T} b_{it} = E_i \quad i \in I \quad (15)$$

$$x_{|I|,|T|} = \sum_{i \in I} E_i \quad (16)$$

$$y_{ijt} \leq N_i \cdot \beta_{ij} \quad i, j \in I, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{j \in I} y_{jit} \leq N_i - x_{it} \quad i \in I; t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{j \in I} y_{jit} \leq Q_i \quad i \in I; t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{j \in I} y_{ijt} \leq Q_i \quad i \in I; t \in T \quad (20)$$

$$y_{ij0} = 0 \quad i, j \in I \quad (21)$$

$$x_{i0} = 0 \quad i \in I \quad (22)$$

$$b_{it}, x_{it}, z_{it} \geq 0 \quad i \in I; t \in T \quad (23)$$

$$y_{ijt} \geq 0 \quad i, j \in I; t \in T \quad (24)$$

Die Zielfunktion (11) minimiert die Gesamtgefährdung der Bevölkerung. Es wird das Produkt aus der Anzahl der Fahrzeuge, die einer Zelle zugeordnet sind (z_{it}) mit dem jeweiligen Gefahrenparameter (c_{it}) für alle Zellen und Perioden gebildet.

Die Restriktionen (12) - (24) beschränken den Lösungsraum des Optimierungsmodells. Die Bedingung (12) definiert die Anzahl der Autos, die in einer Periode t der Zelle i zugeordnet sind (z_{it}). Die Variable setzt sich zusammen aus der Anzahl der Autos, die in dieser Zelle i in dieser Periode t warten (x_{it}), zuzüglich der Anzahl der Autos, die in dieser Periode t die Zelle i zu einer verbundenen Zelle j verlassen ($\sum_{j \in I} y_{ijt}$) und zuzüglich der Anzahl der Fahrzeuge der Zelle i , die in der Periode t noch nicht mit der Evakuierung begonnen haben ($E_i - \sum_{\tau=1}^t b_{i\tau}$). Die Nebenbedingung (13) bestimmt die x_{it} -Variable, welche die Anzahl der Fahrzeuge ist, die in einer Zelle i in einer Periode t verbleiben. Diese Variable setzt sich zusammen aus der Anzahl der Fahrzeuge, die in dieser Periode t in der Zelle i mit der Evakuierung begonnen haben (b_{it}), zuzüglich der

Anzahl der Fahrzeuge, die in der vorherigen Periode ($t - 1$) in der Zelle waren (x_{it-1}), zuzüglich den Fahrzeugen, die in der vorherigen Periode $t - 1$, in die Zelle i gefahren sind ($\sum_{j \in I} y_{jit-1}$) und abzüglich der Fahrzeuge, die die Zelle i in dieser Periode t verlassen ($\sum_{j \in I} y_{ijt}$).

Die Nebenbedingung (14) beschränkt die Kapazität einer Zelle i . Die Anzahl der Fahrzeuge, die einer Zelle i zugeordnet sind (z_{it}) darf nicht größer sein als die Zellenkapazität (N_i) zuzüglich der Fahrzeuge, die noch nicht mit der Evakuierung begonnen haben. Fahrzeuge, die noch nicht gestartet sind, belasten die Kapazität einer Zelle nicht, sondern warten z.B. an angrenzenden Parkplätzen auf den Beginn der Evakuierung. In Nebenbedingung (15) wird sicherstellt, dass alle Fahrzeuge während des Betrachtungszeitraums mit der Evakuierung beginnen. Die Nebenbedingung (16) ergänzt die Nebenbedingung (15) und besagt, dass alle Fahrzeuge die Supersenke ($|I|$) erreichen müssen. Die Supersenke ist eine virtuelle Senke, die mit allen Senken verbunden ist. Mit dieser Bedingung wird sichergestellt, dass alle Fahrzeuge den sicheren Bereich erreichen. (17) stellt sicher, dass ein Verkehrsfluss nur zwischen benachbarten Zellen stattfinden kann. Nur falls der Binärparameter $\beta_{ij} = 1$ ist, kann die y -Variable einen positiven Wert annehmen. Nebenbedingungen (18) beschränkt den Fluss in eine Zelle i . Es können nicht mehr Fahrzeuge, als die vorhandene Restkapazität einer Zelle i , von allen verbundenen Zellen ($\sum_{j \in I} y_{jit}$) in eine Zelle i hineinfließen. Mit den Nebenbedingungen (19) und (20) wird die Anzahl der Fahrzeuge beschränkt, die in eine Zelle hinein bzw. aus einer Zelle hinaus fahren können. Diese Anzahl ist vom zuvor definierten Flussparameter Q_i abhängig. Die Nebenbedingungen (21) und (22) besagen, dass sich zu Beginn der Evakuierung keine Fahrzeuge im Netzwerk befinden. (23)-(24) geben den Definitionsbereich der Variablen an.

Das Ergebnis des CTEPM ist ein Evakuierungsplan für das ausgewählte Evakuierungsszenario. Die Ergebnisse sind die Abfahrtszeiten der Fahrzeuge, die Evakuierungsrouten durch das Netzwerk und die Zuordnung der Fahrzeuge zu diesen Routen. Die Gefährdung wird, unter den Annahmen des CTM, für die Gesamtheit minimiert.

Alle Entscheidungsvariablen werden als reellwertig definiert, sodass das Optimierungsmodell ein lineares Programm (LP) ist und daher mit bekannten, sehr effizienten Lösungsverfahren gelöst werden kann. In unseren Tests - mit nur ganzzahligen Parametern (c_i , E_i , Q_i und N_i) - waren immer alle Variablenwerte ganzzahlig.

2.5.2 Erweiterte Evakuierungsmodelle

Anfängliche Rechenstudien haben gezeigt, dass es sinnvoll ist, das ursprüngliche Optimierungsmodell (CTEPM) zu erweitern, sodass mehrere Zellengrößen betrachtet wer-

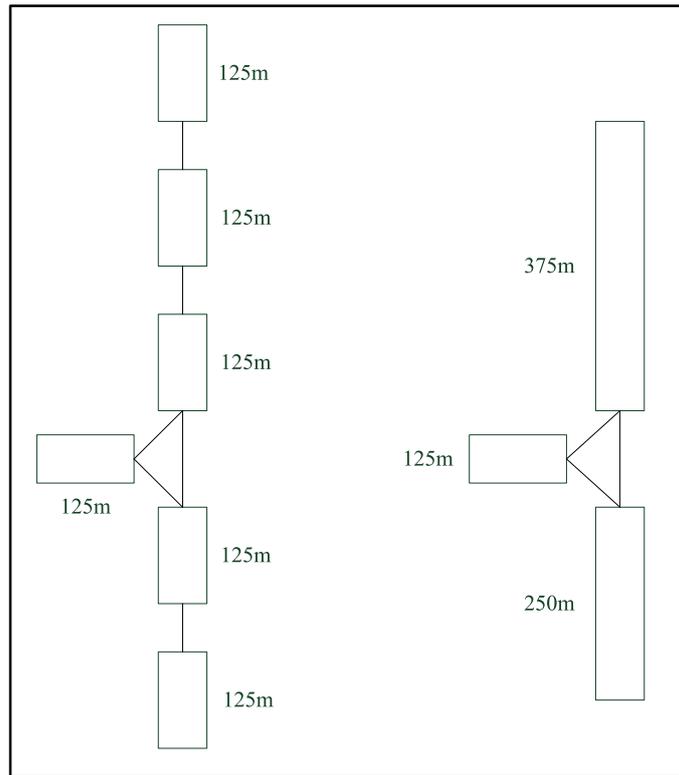


Abbildung 4: Verdeutlichung der unterschiedlichen Zellengrößen.

den können.²⁸ Die Erweiterung beinhaltet, dass, wenn mehrere Zellen mit identischer Größe aufeinander folgen, diese Zellen zu einer großen Zelle zusammengefügt werden. Eine große Zelle entspricht dann dem Vielfachen von einer normalen einzelnen Zelle. Exemplarisch ist dieser Vorgang in der Abbildung 4 dargestellt. Auf der linken Hälfte der Abbildung ist das Teilnetzwerk mit nur einer Zellgröße dargestellt. Insgesamt beinhaltet das Netzwerk somit sechs Zellen. Auf der rechten Seite ist das erweiterte Netzwerk mit drei möglichen Zellengrößen dargestellt. Das Netzwerk kann so auf insgesamt drei Zellen vereinfacht und somit um insgesamt drei Zellen reduziert werden.

Für jede Zelle i wird ein zusätzlicher Parameter n_i eingeführt, welches dem Vielfachen einer Zelle im Vergleich zu der ursprünglichen Zellgröße entspricht. Ist also z.B. der Parameter $n_i = 1$, dann wird eine Standardzelle betrachtet. Ist der Parameter $n_i = 3$, dann ist diese Zelle i dreimal so groß wie eine Standardzelle und ein Fahrzeug benötigt somit auch dreimal solange um diese Zelle zu durchfahren.

Daher muss das Modell angepasst werden, sodass die Reisezeit und die Kapazität von größeren Zellen dementsprechend länger bzw. größer ist. Dies wird sichergestellt, indem der Verkehrsfluss aus einer Zelle i heraus beschränkt wird, sodass die Mindestreisezeit von n_i eingehalten wird. Daher wird für jede Zelle i , für die $n_i \geq 2$ gilt, eine

²⁸Vgl. Kimms/Maassen (2011b).

neue Restriktion eingeführt:

$$\sum_{j \in I} \sum_{\tau=1}^t y_{ij\tau} \leq \sum_{j \in I} \sum_{\tau=1}^{\max(t-n_i, 1)} y_{ji\tau} + \sum_{\tau=1}^{\max(t-\lceil n_i/2 \rceil + 1, 1)} b_{i\tau} \quad i \in I; n_i \geq 2; t \in T \quad (25)$$

Diese Bedingung beschränkt die summierte Anzahl der Fahrzeuge, die die Zelle i zwischen der ersten Periode und der Periode t verlassen wollen, auf die Anzahl von Fahrzeugen, die in die Zelle i zwischen der ersten Periode und der Periode $t - n_i$ hineingefahren sind, zuzüglich der Anzahl der Fahrzeuge, die mit der Evakuierung zwischen der ersten Periode und der Periode $t - \lceil n_i/2 \rceil + 1$ begonnen haben.

In der Software ist der Parameter n , also die Anzahl der möglichen Zellengrößen unter den Optionen „Modellannahmen“, frei wählbar. In Tabelle 4 ist beispielhaft eine Übersicht der entsprechenden Parameter für die Zellengrößen $n_i = 1, n_i = 3$ und $n_i = 5$ dargestellt (unter der Annahme, dass die anderen Annahmen des CTMs (z.B. Auto-, Periodenlänge, Abstand bei Stau, usw.) konstant bleiben).

Durch diese Formulierung ergeben sich zwei Vorteile: Zum einen kann ein Netzwerk

Kennzahl \ v	10 ($\frac{km}{h}$)	30 ($\frac{km}{h}$)	40 ($\frac{km}{h}$)	50 ($\frac{km}{h}$)	60 ($\frac{km}{h}$)	130 ($\frac{km}{h}$)
ZL_v						
$n_i = 1$	25	75	100	125	150	325
$n_i = 3$	75	225	300	375	450	975
$n_i = 5$	125	375	500	625	750	1625
N_v						
$n_i = 1$	4	13	17	22	26	56
$n_i = 3$	13	39	52	65	78	169
$n_i = 5$	22	65	87	108	130	282
Q_v						
$n_i = 1$	3	6	6	7	7	4
$n_i = 3$	10	17	19	20	21	13
$n_i = 5$	17	29	31	33	35	21

Tabelle 4: Übersicht der Parameter des ExCTEPMs für drei unterschiedliche Zellengrößen

mit der gleichen Anzahl an Zellen besser abgebildet werden, da die Standardzellengröße kleiner gewählt werden kann. Oder das gleiche Netzwerk kann mit weniger Zellen abgebildet werden, ohne dass die Netzwerkgenauigkeit abnimmt. Zum anderen wird

der Rechenaufwand reduziert, indem das identische Netzwerk mit weniger Zellen abgebildet werden kann und so die Anzahl der Variablen reduziert wird.

Für weitere Details des mathematischen Modellierungsansatzes und der Reduzierung des Rechenaufwandes wird auf Maassen²⁹ verwiesen.

2.5.3 Resilientes Evakuierungsmodell

Neben dem erweiterten Evakuierungsmodell von Kimms/Maassen wurde zusätzlich noch ein weiteres Evakuierungsmodell in der Software implementiert, welches die Evakuierungspläne robuster gegenüber (teilweisen) Straßenausfällen (z.B. aufgrund von Unfällen, umgefallenen Bäumen usw.) des Straßennetzwerkes macht.³⁰ Die grundsätzliche Idee besteht darin die vorhandenen Straßenkapazitäten gleichmäßiger auszulasten und dadurch die Hauptevakuierungsrouten zu entlasten. Dadurch sollen die Auswirkungen von (teilweisen) Straßenausfällen reduziert werden und der Evakuierungsprozess soll, auch im Fall einer Beeinträchtigung des Straßennetzwerkes, noch reibungslos durchführbar sein. Für eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise und Modellierung wird auf den Anhang A verwiesen.

2.5.4 Eine beispielhafte Rechenstudie

In diesem Kapitel wird eine (kleine) beispielhafte Rechenstudie aufgezeigt, die dem Benutzer den Einfluss von der Fahrzeug- und Zellenanzahl auf die Rechenzeit veranschaulichen soll.

Es wird dabei immer dasselbe Ausgangsnetzwerk betrachtet und geringfügig erweitert, sodass die betrachtete Zellenanzahl ansteigt. Die Netzwerke bestehen aus jeweils ca. 300, 500, 700, 850 und 950 Zellen. Jedes Netzwerk wird für vier unterschiedliche Fahrzeuganzahlen gelöst (200, 500, 1000 und 2000). Die Fahrzeuge werden zufällig auf das Netzwerk verteilt. Die Rechenzeiten (in Minuten), die notwendig waren, um das jeweilige Szenario zu lösen, sind in Tabelle 5 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bevölkerungsanzahl einen geringen und die Zellenanzahl einen größer Einfluss auf die Rechenzeit des Modells haben. Dieses Ergebnis ist nicht überrascht, da durch den Anstieg der Zellenanzahl das Modell größer wird (u.a. Anstieg der Variablenanzahl) und dadurch aufwendiger wird zu lösen. Durch den Anstieg der Bevölkerungsanzahl wird lediglich ein Parameter erhöht. Dies führt (möglicherweise) zu einer längeren Evakuierungsdauer, aber der Einfluss auf die Rechenzeit ist nicht signifikant.

²⁹Vgl. Maassen (2011), S. 41ff.

³⁰Vgl. Kimms/Maiwald (2015).

FZ ³¹ \ ZA ³²	300	500	700	850	950
200	< 1	1,5	21,48	27,55	>60
500	< 1	1,5	22,31	29,18	>60
1000	< 1	1,5	22,53	32,43	>60
2000	<1	1,5	23,15	33,27	>60

Tabelle 5: Beispielhafte Rechenstudie zur Verdeutlichung des Einflusses der Fahrzeug- und Zellenanzahl auf die Rechenzeit (in Minuten)

3 Dateneingabe für ein Evakuierungsszenario

In diesem Kapitel wird gezeigt wie die Daten, welche zur Berechnung der Verkehrsflüsse notwendig sind, in SPSE eingegeben werden. Zunächst werden in Kapitel 3.1 der Programmstart und die Oberfläche der Software erklärt. Dann wird in Kapitel 3.2 gezeigt wie ein Gefahrenbereich in der Software ausgewählt werden kann. In Kapitel 3.3 wird beschrieben wie der Benutzer die Bevölkerung auf das Netzwerk verteilen kann und in Kapitel 3.4 wird die Option der manuellen Anpassung des Straßennetzwerks vorgestellt. Kapitel 3.5 erläutert die Eingabe der Periodenanzahl, Kapitel 3.6 die Anpassungen an das Zellenmodell und Kapitel 3.7 stellt dar wie das Problem des Auf- bzw. Abrundens von Zellen innerhalb der Software gelöst wurde, wenn eine Straße nicht exakt mit der vorgegebenen Zellengröße übereinstimmt.

3.1 Programmstart

Die SPSE wird durch einen Doppelklick auf die Exe-Datei gestartet. Für das Icon-Symbol wurde das Logo der Universität Duisburg-Essen ausgewählt, welches in der Abbildung 5 beispielhaft dargestellt ist. Nach dem Start der SPSE öffnet sich der Disclai-



Abbildung 5: Icon der Software

mer der Software, welcher in Abbildung 6 abgebildet ist. Durch diesen Disclaimer werden jegliche Haftungsansprüche gegenüber dem Lehrstuhl ausgeschlossen und es

³²= Fahrzeuganzahl

³²= Zellenanzahl

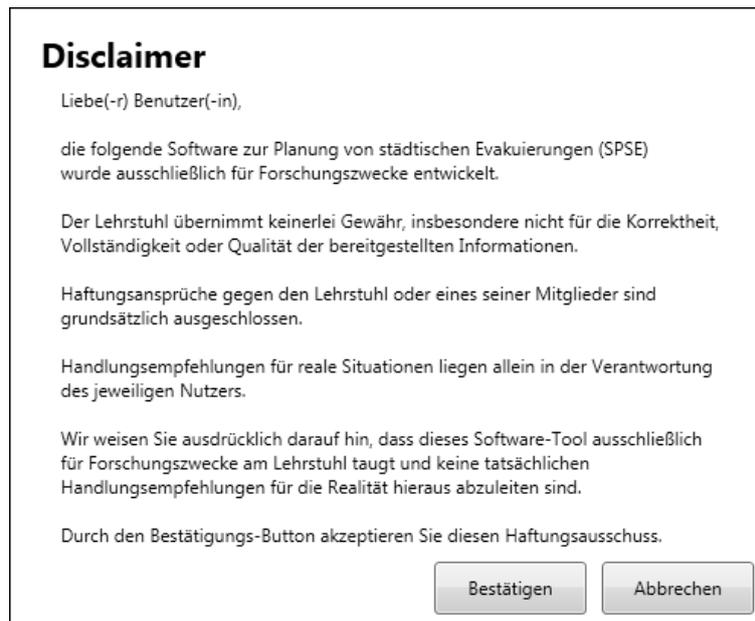


Abbildung 6: Darstellung des Disclaimers

wird darauf hingewiesen, dass aus den Ergebnissen der Software keine tatsächlichen Handlungsempfehlungen für die Realität abzuleiten sind. Die Software wurde hauptsächlich für Forschungszwecke entwickelt. Für die Realität ist lediglich eine untere Schranke für die Evakuierungsdauer bzw. für die Gesamtgefährdung der Bevölkerung abzuleiten. Der Benutzer muss den Disclaimer zunächst bestätigen bevor die Software genutzt werden kann. Nach dem Bestätigen des Disclaimers wird der Benutzer auf die Oberfläche der Software weitergeleitet. Die Oberfläche ist eine Weltkarte, welche voreingestellt Deutschland und die angrenzenden Länder anzeigt (siehe Abbildung 7). Innerhalb dieser Weltkarte kann der Benutzer zu einem beliebigen Ort auf der Welt navigieren. Indem man die rechte Maustaste gedrückt hält, kann man durch die Bewegung mit der Maus die Karte in die gewünschte Richtung verschieben. Mit Hilfe des Mausekzes kann man innerhalb der Karte hinein- und hinauszoomen. Wenn man den Bereich, der evakuiert werden soll, erreicht hat, muss die Evakuierungszone noch genauer bestimmt werden. Um diese Evakuierungszone zu bestimmen, sind in der Software drei Auswahlmöglichkeiten hinterlegt. Diese werden im folgenden Kapitel 3.2 erläutert.

3.2 Auswahl des Gefahrenbereiches

In diesem Kapitel wird auf die Auswahl des Evakuierungsbereiches eingegangen. Die Auswahl dieses Bereiches und die Gefahrenverteilung sind innerhalb der Software stark verknüpft. Daher wird in diesem Kapitel die Verteilung der Gefahr jeweils direkt beschrieben. Innerhalb der Software sind drei Optionen hinterlegt, um das Gebiet,

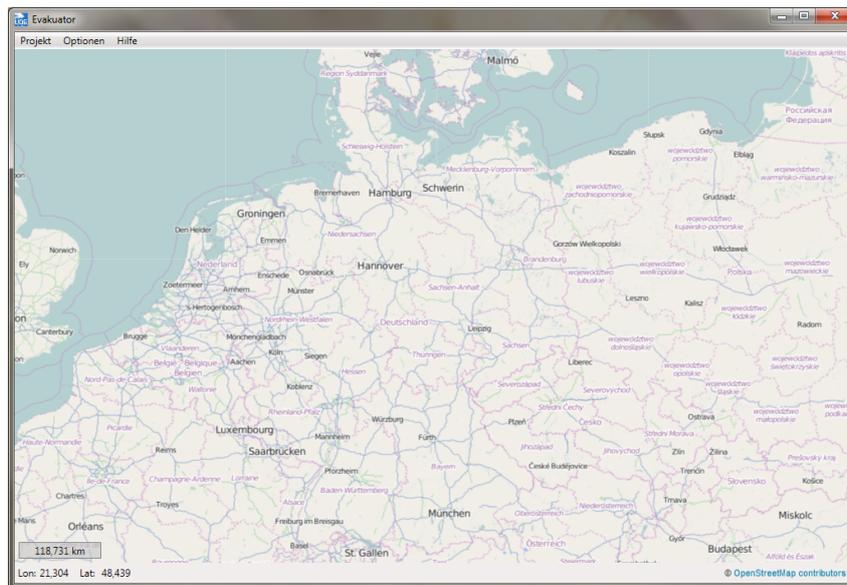


Abbildung 7: Darstellung des Startbildschirms

welches evakuiert werden soll, auszuwählen. Die erste Option orientiert sich an einer Evakuierungssituation im Fall einer Bombe (Kapitel 3.2.1), für die zweite Option wird die Ausbreitung eines Giftstoffes (Kapitel 3.2.2) betrachtet und die dritte Option ist die freie Auswahl (Kapitel 3.2.3), bei der der Benutzer das Gefahrengebiet völlig frei bestimmen kann. Abschließend wird in Kapitel 3.2.4 auf die manuelle Gefahrenverteilung eingegangen.

3.2.1 Auswahloption: „Bombe“

Die erste voreingestellte Möglichkeit den Gefahrenbereich in der SPSE auszuwählen, ist die „Bombe“. Unter der Beschreibung „Bombe“ ist nicht zwangsläufig ein Fund oder die Explosion einer Bombe zu verstehen, sondern gekennzeichnet ist der Gefahrenbereich dieser Option dadurch, dass die Gefahr in der Mitte der Gefahrenzone am höchsten ist und zum Rand des Gefahrenbereiches abnimmt. Die Gefahr breitet sich dabei kreisförmig aus. Dies ist die typische Gefahrenausbreitung einer Bombe, allerdings kann man sich auch andere Gefährdungen (wie z.B. einen Chemieunfall oder einen Brand) darunter vorstellen. Zur Vereinfachung wird aber im Folgenden eine Evakuierung aufgrund einer Bombe angenommen.

Um einen Gefahrenbereich festzulegen, muss der Benutzer zunächst mit der rechten Maustaste in die Karte klicken. Dadurch öffnet sich ein kleines Auswahlfenster, welches die drei Auswahlmöglichkeiten anzeigt (siehe Abbildung 8). In diesem Fall wird die „Bombe“ ausgewählt. Nachdem „Bombe“ ausgewählt wurde, muss der Benutzer eine Stelle in der Karte festlegen, wo sich die Bombe, also der Gefahrenherd, befindet. In Abbildung 9 ist dies als kleiner Kreis zu erkennen.

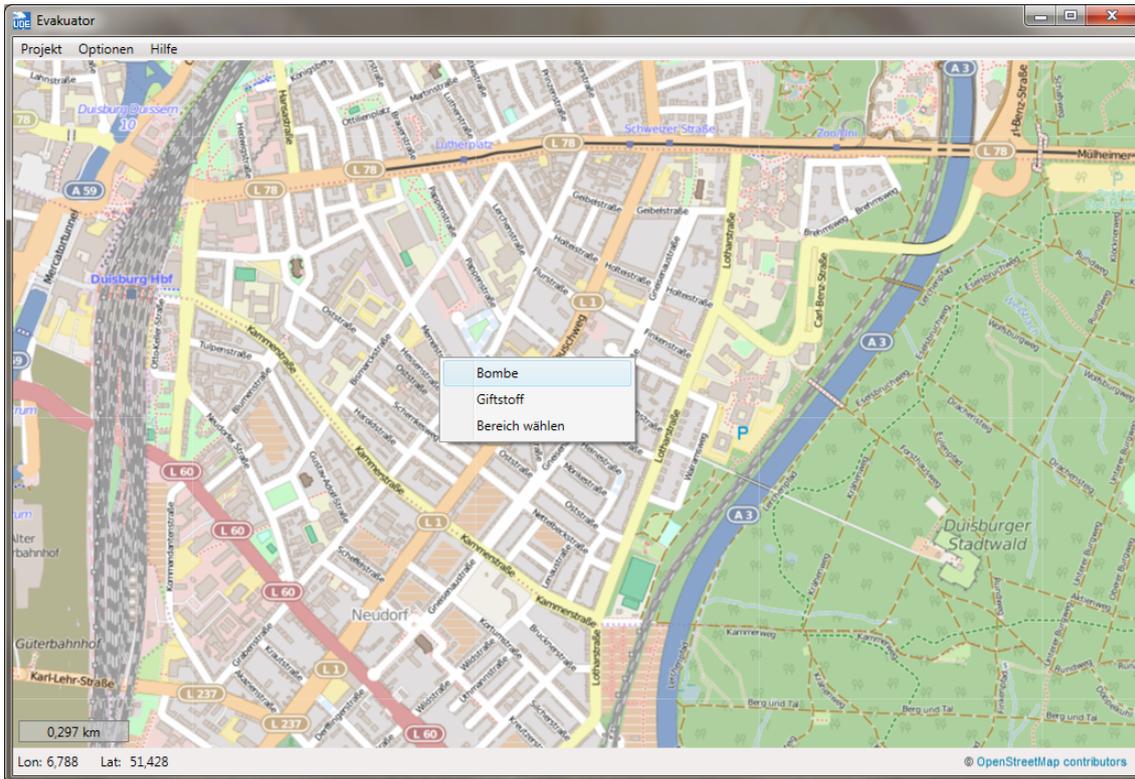


Abbildung 8: Darstellung der Auswahloption: „Bombe“

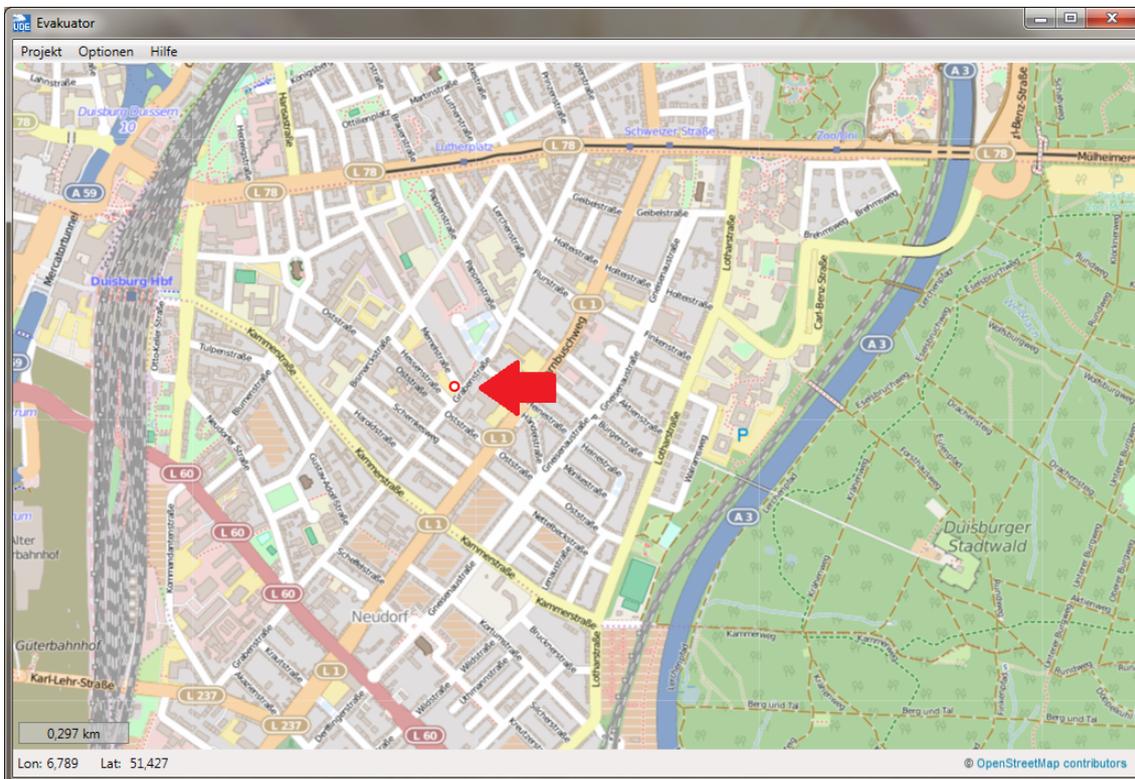


Abbildung 9: Auswahl des Gefahrenmittelpunkts für die Auswahloption „Bombe“

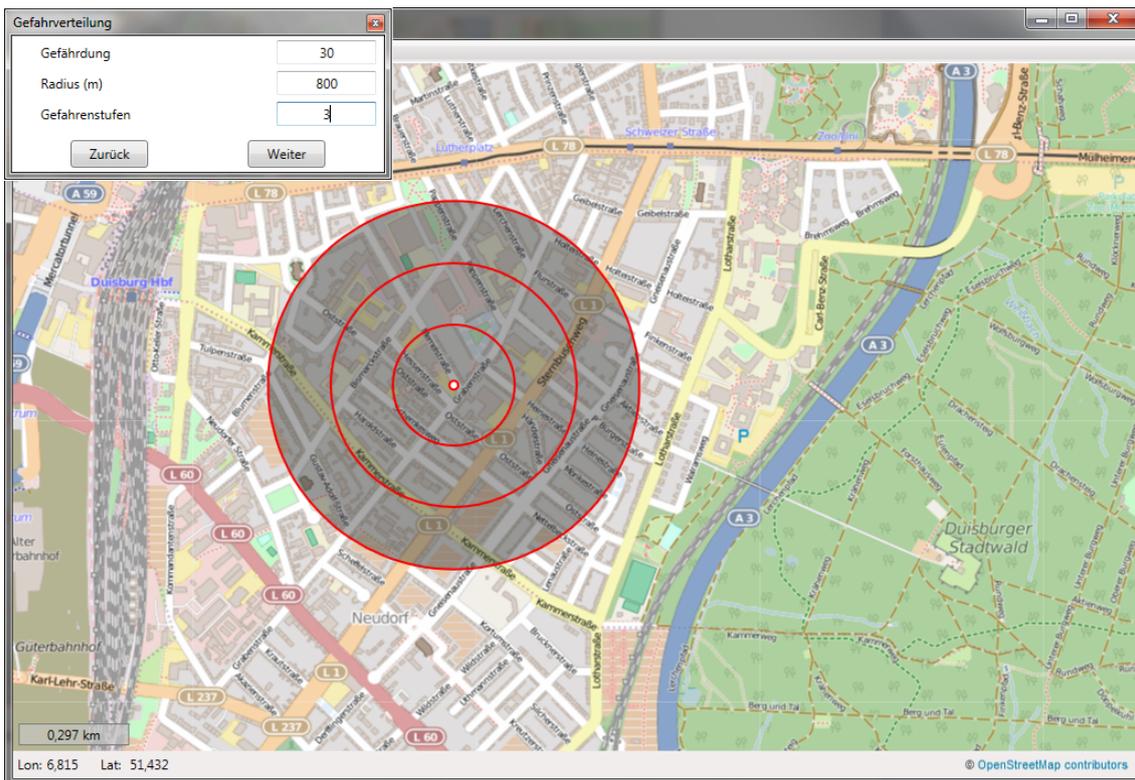


Abbildung 10: Definition des Gefahrenbereichs für die Auswahloption „Bombe“

Sobald der Benutzer den Gefahrenherd platziert hat, entsteht um diese Stelle ein kreisförmiges Gefahrengebiet mit unterschiedlichen Gefahrenzonen. Zusätzlich öffnet sich ein weiteres Auswahlfenster „Gefahrenverteilung“ (siehe Abbildung 10), um den Gefahrenbereich genauer bestimmen zu können.

Der „Radius“ bestimmt wie groß die Gefahrenzone um den Gefahrenherd herum ist. Die Angabe ist in „Metern“ einzugeben. Im Feld „Gefahrenstufen“ kann man die Anzahl der unterschiedlichen Gefahrenstufen definieren. Vorab sind standardmäßig fünf Gefahrenzonenstufen eingestellt. Die Anzahl der Gefahrenstufen kann zwischen einer und zehn variiert werden. Mit Hilfe der Option „Gefährdung“ wird der Wert für die höchste Gefahrenstufe (d_{max}), dort wo die Bombe platziert wurde, festgelegt. Die Gefahrenwerte d_k für einen Gefahrenbereich k berechnen sich mit folgender Formel:

$$d_k = \frac{d_{max}}{|K|} \cdot k \quad (26)$$

Wobei $|K|$ der Anzahl der Gefahrenstufen entspricht, die niedrigste Gefahrenstufe $k = 1$ ist und dementsprechend die höchste Gefahrenstufe $k = |K|$ ist. Bestimmt man z.B. drei Gefahrenstufen und wählt für die maximale Gefährdung $d_{max} = 30$, dann erhält man die folgenden Gefahrenwerte: $d_1 = 10$, $d_2 = 20$ und $d_3 = 30$. Allen Zellen bzw. Straßenabschnitten, die sich in einem Gefahrenbereich befinden, wird dann die Ge-

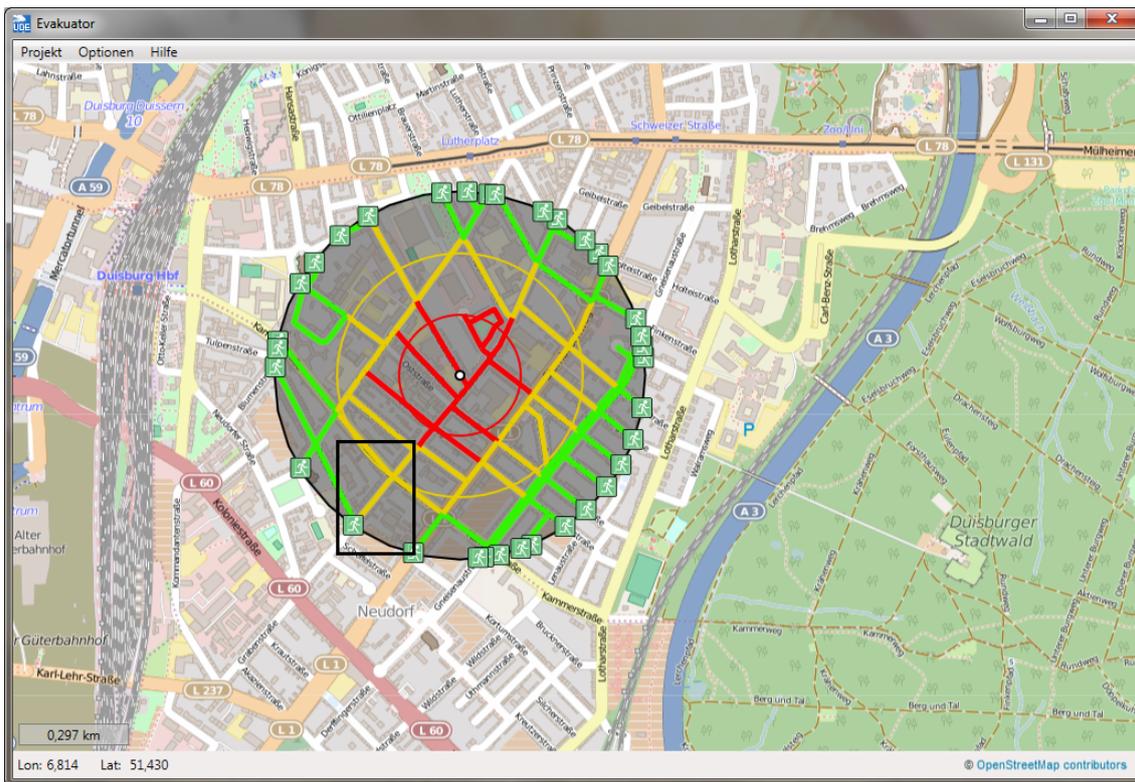


Abbildung 11: Darstellung der Gefahrenstufen der Auswahloption „Bombe“

fährdung des jeweiligen Gefahrenbereiches zugeordnet. Wenn sich eine Zelle in zwei oder mehreren Gefahrenbereichen befindet, dann wird der Zelle immer der Gefahrenwert mit der höheren Gefährdung zugeordnet.

In Abbildung 11 ist ein Netzwerk dargestellt bei welchem die Straßen entsprechend der Gefährdungsstufen gekennzeichnet sind. Innerhalb des Rechtecks in der Abbildung ist beispielhaft eine Straße markiert, die durch zwei Gefahrenzonen führt. Der Gefahrenwert der Straße ist dementsprechend der gefährlicheren Zone zugeordnet.

3.2.2 Auswahloption: „Giftstoff“

Eine weitere Gefahrensituation, die implementiert wurde, ist die Betrachtung eines Giftstoffes, welcher sich z.B. bei einem Chemieunfall freisetzen kann. Als Ausbreitungsmodell des Giftstoffes wird dabei das sog. Gauß-Modell angenommen, welches eine analytische Lösung für die Verbreitung eines Schadstoffes darstellt. Es wird dabei von einer nicht-beweglichen Gefahrenquelle ausgegangen, von welcher kontinuierlich ein Schadstoff in die Luft entweicht.³³ Die wichtigsten Eingabeparameter sind die Festlegung des Gefahrenortes, die Konzentration, mit welcher der Schadenstoff entweicht und die Windrichtung bzw. -stärke. Nachfolgend wird erläutert wie diese Parameter

³³Vgl. VDI-3782-1, (1992).

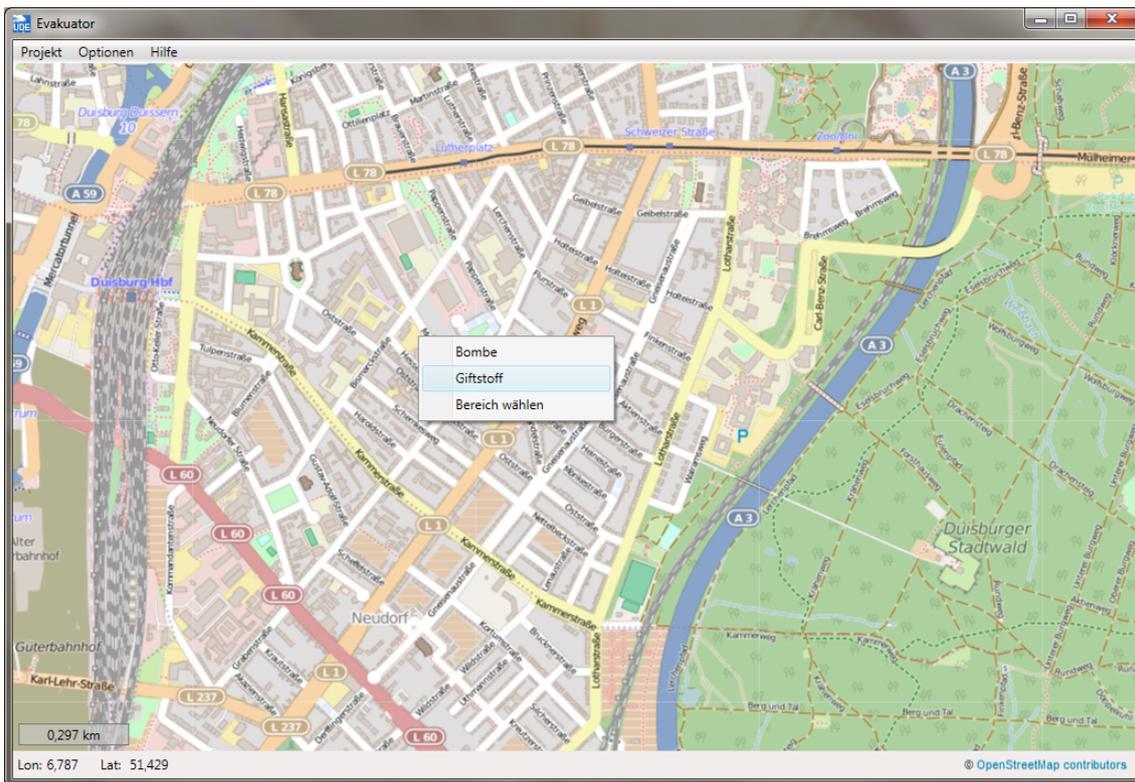


Abbildung 12: Darstellung der Auswahloption: „Giftstoff“

mit Hilfe der Software eingegeben werden. Zusätzlich sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass das Gauß-Modell nur eine Vereinfachung der Realität ist (z.B. da Höhenunterschiede der Ebene oder die Dichte des Schadenstoffes nicht berücksichtigt werden) und daher diese Abbildung nur eine Annäherung der Realität darstellt. Für weitere Information zur Modellierung wird auf Razi/Hiroshi³⁴ und zur Umsetzung auf das Handbuch³⁵, der dazu entwickelten Software, verwiesen.

Um die Auswahloption „Giftstoff“ anzuwählen, klickt man wiederum mit der rechten Maustaste auf die Karte, sodass sich das bekannte Auswahlfenster öffnet. Nun wählt man, wie in Abbildung 12 dargestellt, die Option „Giftstoff“ aus. Auch bei dieser Gefahrenereinteilung muss die Quelle des Giftstoffes durch das Klicken mit der linken Maustaste auf eine Stelle in der Karte festgelegt werden. In Abbildung 13 ist diese Auswahl dargestellt. Nach dem Klicken auf die Karte muss eine „Linie“ festgelegt werden. Mit dieser Linie wird die Windrichtung und -stärke bestimmt. Indem man die Linie dreht, wird die Windrichtung ausgewählt. Durch das Verlängern oder Verkürzen der Linie wird die Windstärke definiert. Beides ist im Nachhinein noch anpassbar. Nachdem die Ausrichtung und Länge der Linie (mit Hilfe der linken Maustaste) eingegeben wurde, wird mit Hilfe des Gauß-Modells die Gefahrenzone abgeschätzt.

³⁴Vgl. Razi/Hirsohi (2012).

³⁵Vgl. METI (2005).

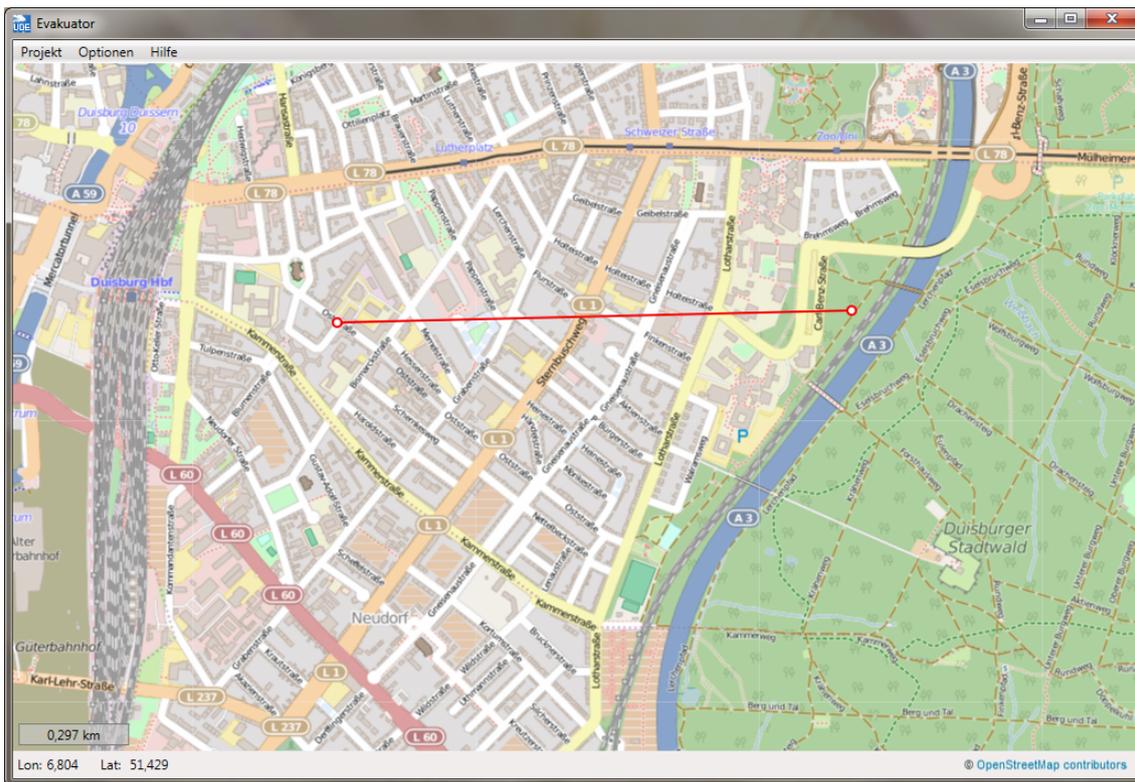


Abbildung 13: Festlegung der Windrichtung und -stärke

Dies ist beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt. Anschließend öffnet sich wieder das Auswahlfenster „Gefahrenverteilung“ mit welchem der Benutzer die Windstärke (= Windgeschwindigkeit in m/s), die Konzentration des Schadstoffes (= Gefährdung) und die Anzahl der Gefahrenstufen eingeben kann. Die Konzentration des Schadstoffes entspricht keiner realen Messeinheit. Alle Anpassungen werden umgehend in der Software umgesetzt.

Anders als man intuitiv vermuten würde, wird der Gefahrenbereich bei einer hohen Windgeschwindigkeit kleiner und bei einer geringen Windgeschwindigkeit größer. Dies ist darin begründet, dass sich bei starkem Wind der Giftstoff schneller in der Luft verteilt, wodurch der Giftstoff nur in der Nähe der Gefahrenquelle tatsächlich gefährlich ist. Bei geringem Wind hingegen verteilt sich der Gefahrenstoff nicht so stark, so dass das gefährdete Gebiet größer ist.

Die Verteilung der Gefährdung erfolgt analog wie bei der Gefahrenauswahl „Bombe“. Die größte Gefährdung ist in der Gefahrenzone um den Giftstoff und diese nimmt stetig ab. Die Verteilung der Gefährdung des in Abbildung 14 gewählten Bereichs ist in Abbildung 15 dargestellt.

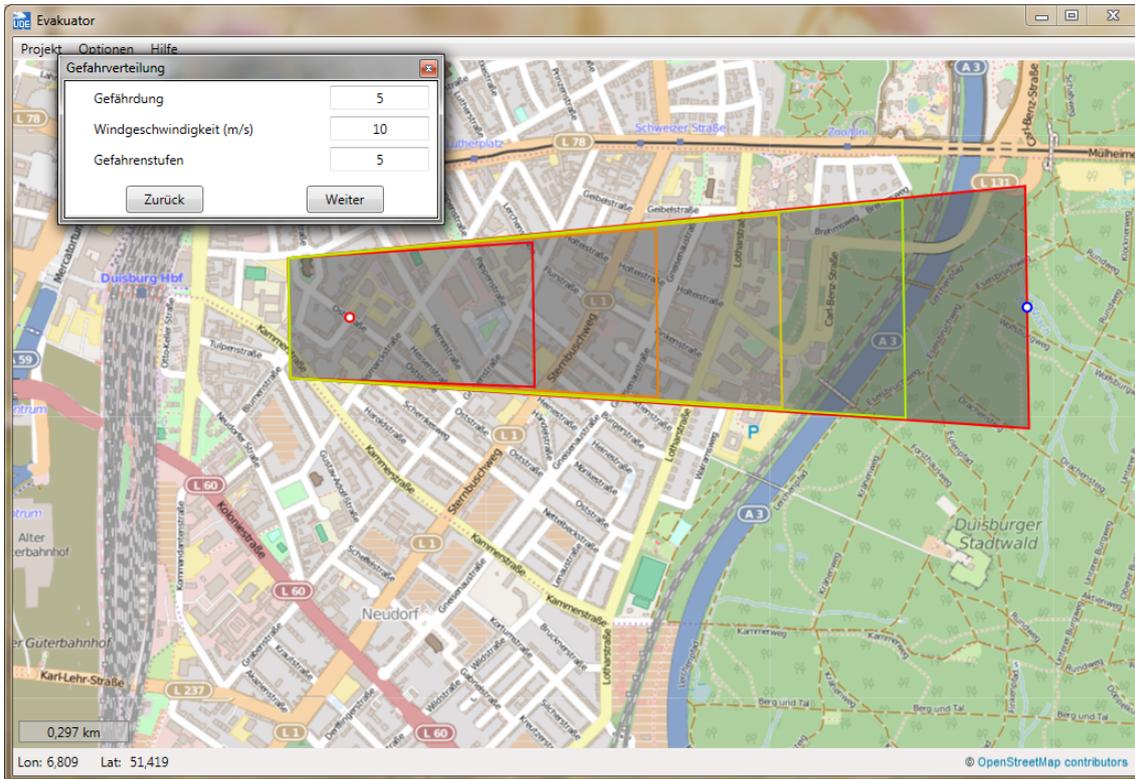


Abbildung 14: Definition des Gefahrenbereichs für die Auswahloption „Giftstoff“

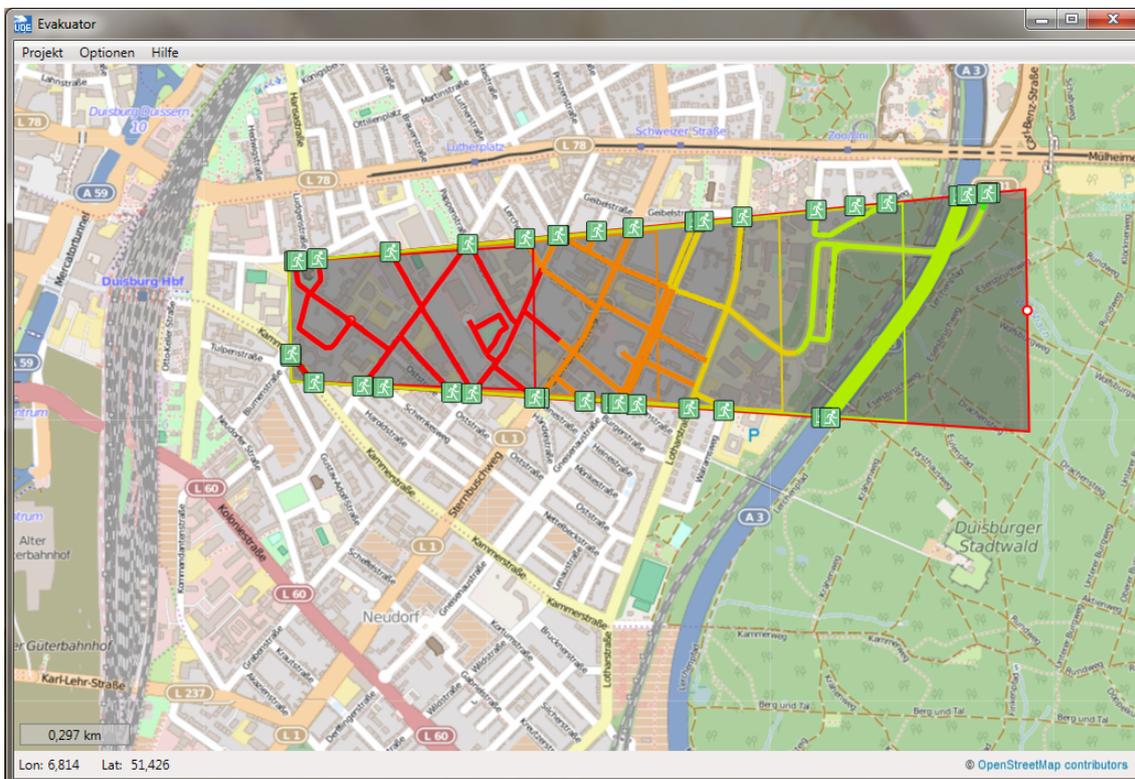


Abbildung 15: Darstellung der Gefahrenstufen für die Auswahloption „Giftstoff“

3.2.3 Auswahloption: „Freie Auswahl“

Die letzte Möglichkeit den Gefahrenbereich auszuwählen ist gleichzeitig auch die flexibelste. Wiederum muss der Benutzer mit der rechten Maustaste auf die Karte klicken und die Auswahl „Bereich wählen“ mit der linken Maustaste auswählen (siehe Abbildung 16).

Mit dieser Variante hat der Benutzer die Möglichkeit ein beliebiges Gefahrengebiet auszuwählen, welches als ein Vieleck definiert ist. Der Benutzer beginnt damit einen Punkt auf die Karte zu setzen, der den Beginn des Bereiches bildet (siehe Abbildung 17 (1)). Jeder weitere Punkt (siehe (2)-(6)), der von dem Benutzer gesetzt wird, wird automatisch mit dem vorherigen Punkt verbunden. Dieses Vieleck kann beliebig viele Punkte erhalten und kann daher beliebig genau definiert werden. Durch das Betätigen der rechten Maustaste wird der letzte gesetzte Punkt wieder gelöscht. Um den Gefahrenbereich abzuschließen, muss der letzte Punkt wieder mit dem ersten gesetzten Punkt (1) verbunden werden, sodass ein geschlossener Gefahrenbereich entsteht. Nach Abschluss der Auswahl wird der gefährdete Bereich grau eingefärbt (siehe Abbildung 18). Zusätzlich öffnet sich das Fenster „Gefahrenverteilung“ mit den Eingabemöglichkeiten „Durchschnittliche Gefährdung (μ)“ und „Durchschnittliche Abweichung (σ) (der Gefährdung)“. Bei dieser Auswahlmöglichkeit wird davon ausgegangen, dass die Gefährdung in allen Zellen normal-verteilt, mit einem Erwartungswert von μ und einer Standardabweichung von σ , ist. Wenn σ auf Null gesetzt wird, dann ist die Gefährdung in allen Zellen identisch. Nichtsdestotrotz kann die Gefährdung in den Zellen im Nachhinein auch noch angepasst werden (wie im folgenden Kapitel 3.2.4 beschrieben wird).

Eine zufällig generierte Gefahrenverteilung ist beispielsweise in Abbildung 19 zu sehen.

3.2.4 Verteilung der Gefahr

In den Kapiteln zuvor wurde beschrieben wie der Gefahrenbereich für alle drei Auswahlmöglichkeiten bestimmt wird und wie die Gefährdung für alle drei Möglichkeiten festgelegt wurde. Die maximale Gefährdung (bei „Bombe“ und bei „Giftstoff“) bzw. die durchschnittliche Gefährdung (bei „Freie Auswahl“) kann im Nachhinein im Fenster „Parametereingabe“ (siehe Abbildung 20) angepasst werden. Zusätzlich kann man in diesem Fenster die Ansicht zu „Gefährdung“ (unten rechts) ändern, sodass die Zellen entsprechend der jeweiligen Gefährdung eingefärbt werden. Diese Darstellung wurde in den vorherigen Abbildungen 11, 15 und 19 gewählt. Die unterschiedlichen Farben zeigen an, wie hoch die entsprechende Gefährdung ist. In den Voreinstellungen des Programms sind die Farben grün, gelb und rot für wenig, mittlere und

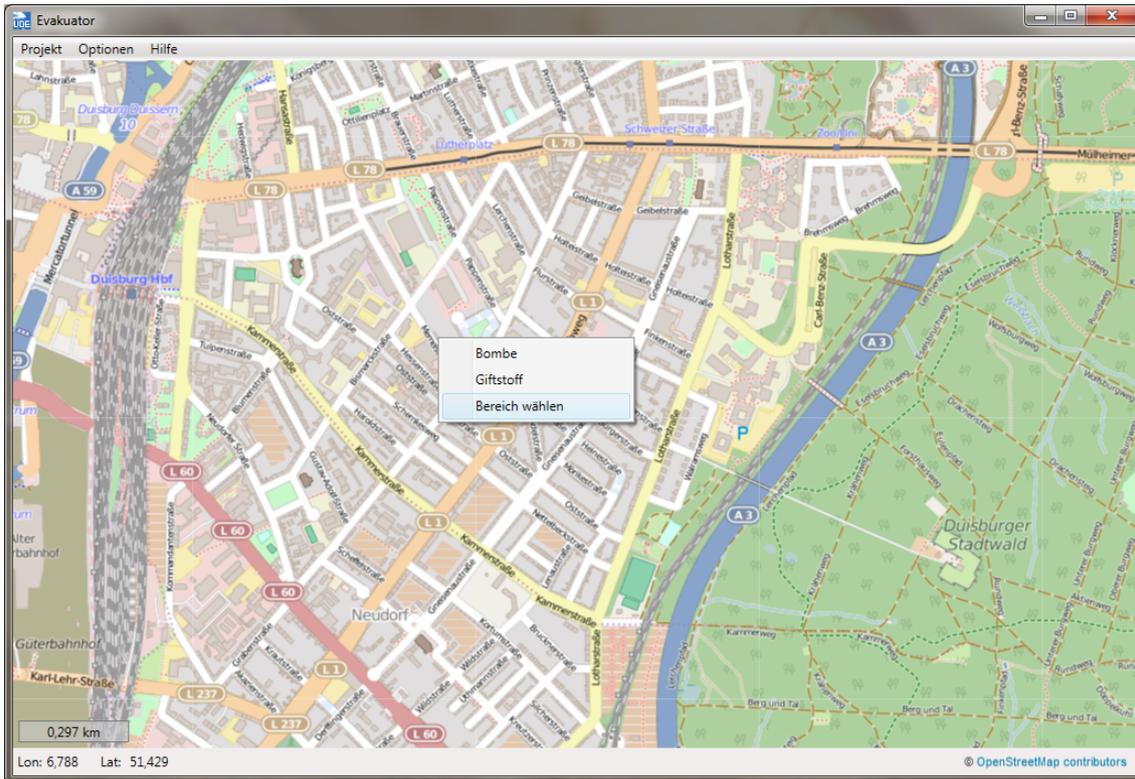


Abbildung 16: Darstellung der Auswahloption: „Freie Auswahl“

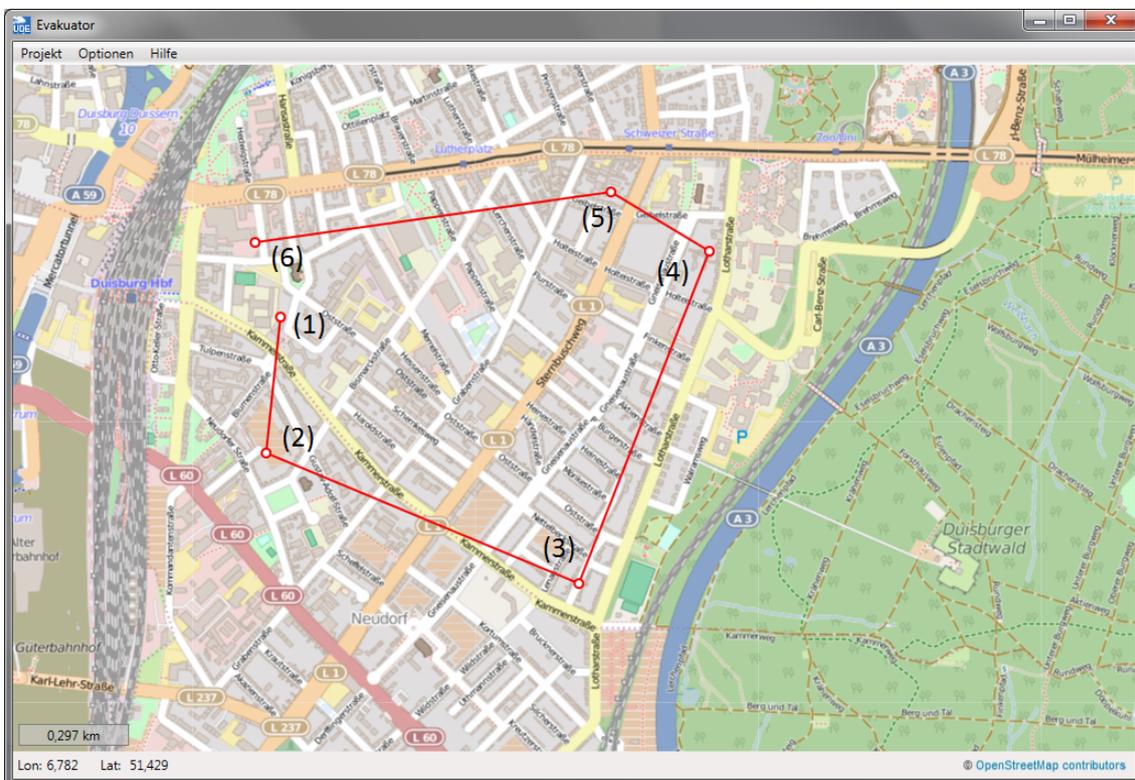


Abbildung 17: Definition des Gefahrenbereichs

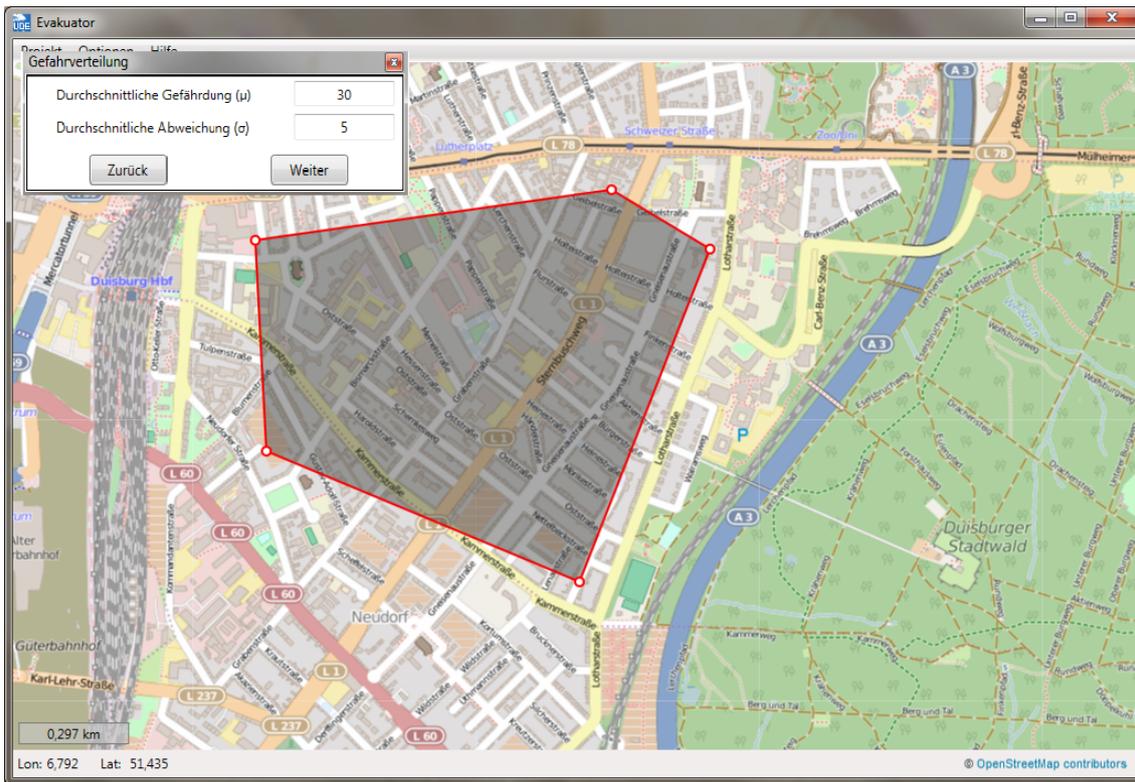


Abbildung 18: Eingabe der Gefahrenparameter

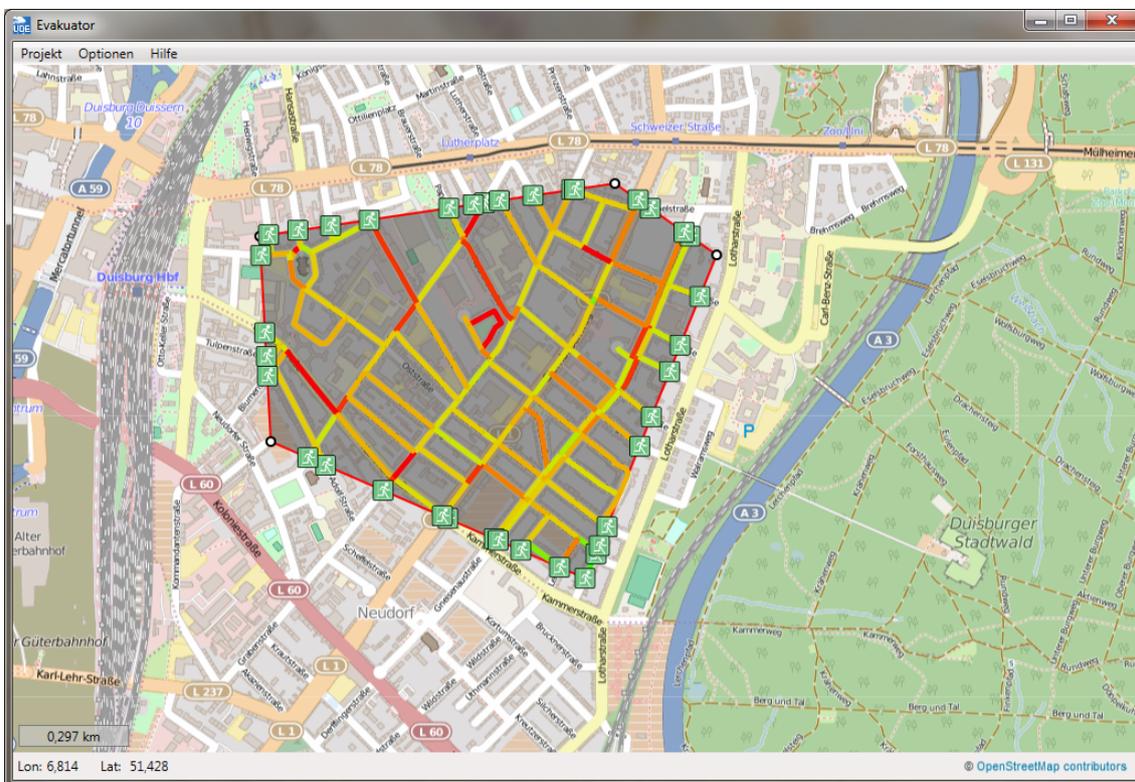


Abbildung 19: Darstellung der Verteilung der Gefährdung in der Auswahloption „Freie Auswahl“

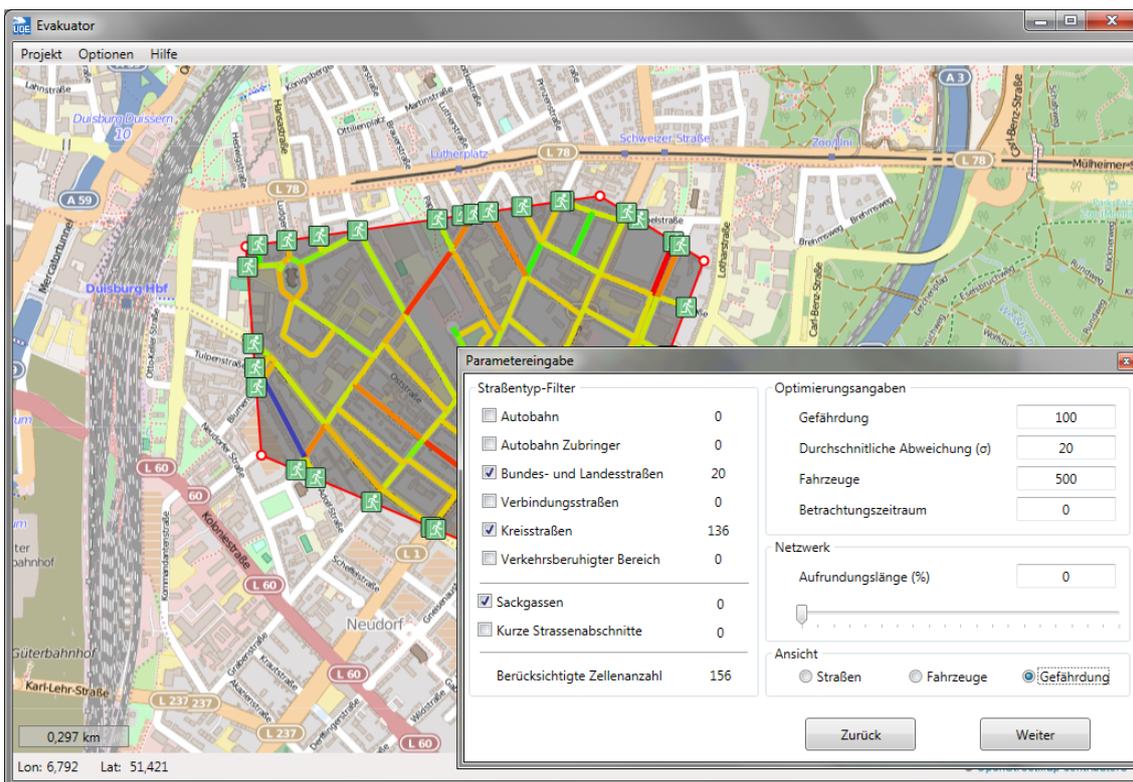


Abbildung 20: Darstellung und Änderung der Gefahrenparameter

hohe Gefahr (und entsprechende Abstufungen) eingestellt. Diese Farben lassen sich im Fenster Optionen unter dem Reiter „Gefahrenzone“, wie in Abbildung 21 gezeigt wird, individualisieren. Hier lässt sich auch die Farbe des Randes des Gefahrengebietes anpassen. Die Verteilung der Gefährdung ist für jede Katastrophe unterschiedlich. Um eine möglichst realistische Abbildung der Evakuierungssituation zu ermöglichen, wurde in der SPSE zusätzlich die Option eingefügt die Gefährdung für jede Zelle manuell zu ändern. Dazu muss zunächst mit der linken Maustaste eine Zelle angewählt und anschließend mit der rechten Maustaste die Eigenschaften der Zelle aufgerufen werden. Danach öffnet sich ein Fenster, welches Informationen zu jeder Zelle enthält (siehe Abbildung 22). In der Zeile Gefährdung kann man dann den entsprechenden Gefahrenwert anpassen.

3.3 Verteilung der Fahrzeuge

Die Anzahl und Verteilung der Bevölkerung innerhalb des Straßennetzwerkes hat einen enormen Einfluss auf den Evakuierungsprozess und ist immer vom jeweiligen Evakuierungsszenario abhängig. Eine automatische Herleitung der Verteilung bzw. der Anzahl der Bevölkerung ist für ein reales Evakuierungsszenario nicht möglich. In der SPSE muss daher der Benutzer die Anzahl der Autos, die für ein Szenario betrach-

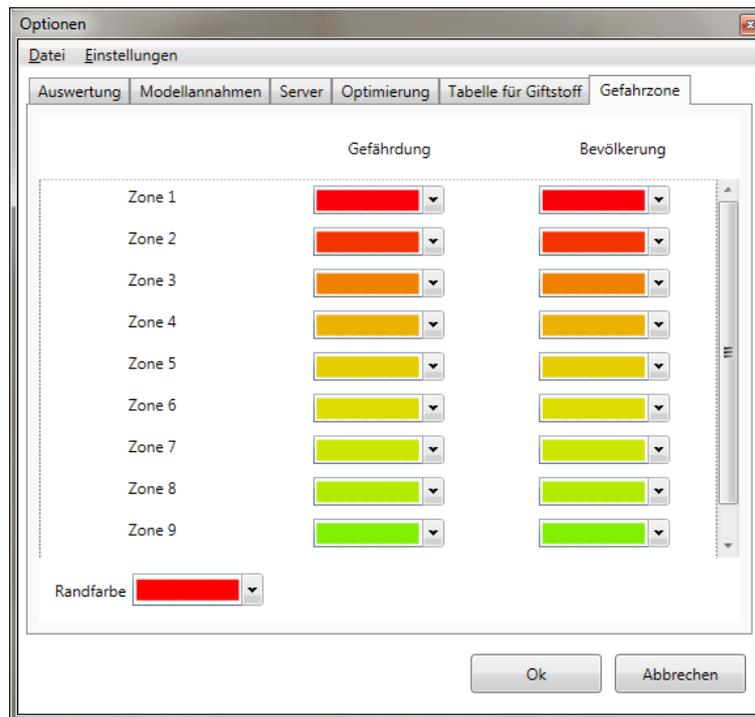


Abbildung 21: Änderung der Farben in der Gefahrenzone

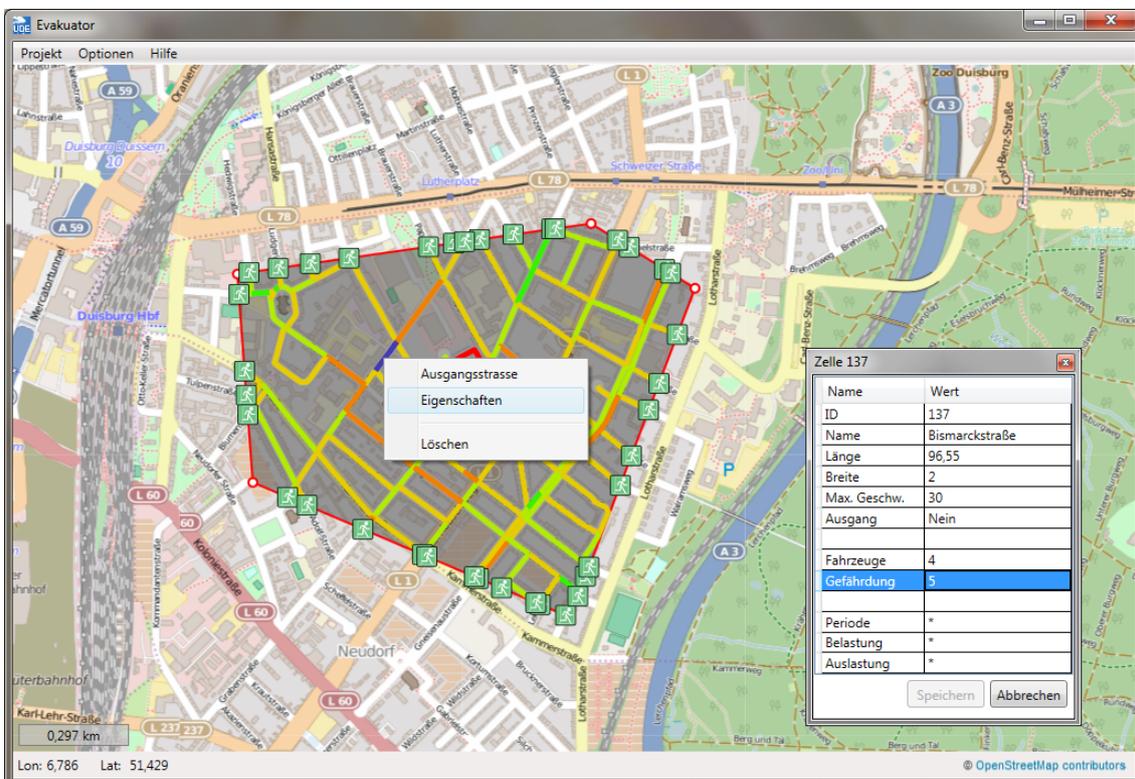


Abbildung 22: Manuelle Anpassung der Gefährdung einer Straße

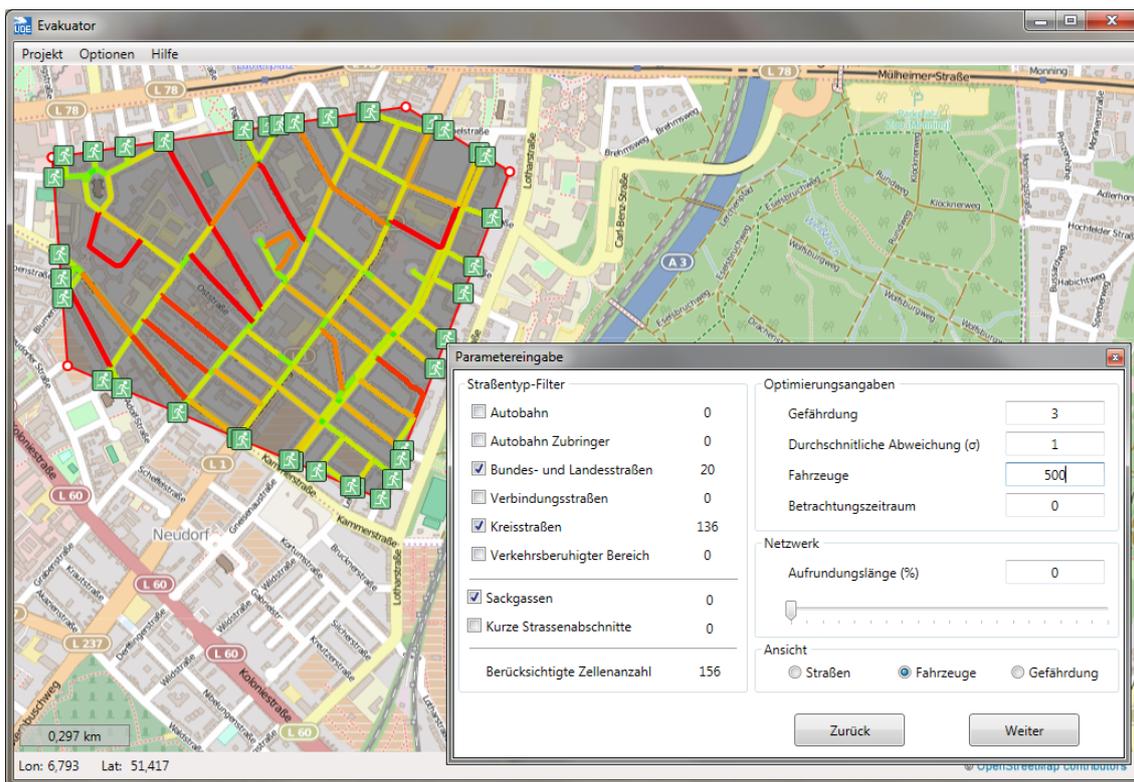


Abbildung 23: Gesamtanzahl der Fahrzeuge im Gefahrenbereich definieren

tet werden sollen, selbstständig festlegen (unter „Fahrzeuge“ siehe Abbildung 23). Die Anzahl der Autos wird dann durch die Software gleichmäßig auf das Netzwerk verteilt.³⁶ Möglicherweise ist eine Gleichverteilung der Bevölkerung nicht für jedes Szenario passend, wenn sich sehr viele Menschen an einem Ort befinden (z.B. an der Universität während des Semesters). Daher wurde zusätzlich die Funktion implementiert, die Anzahl der Fahrzeuge für jede Zelle manuell zu editieren. Diese Funktion wurde auf die selbe Art und Weise eingefügt wie das Editieren der Gefährdung einer Zelle. Der Benutzer klickt also mit der rechten Maustaste auf die jeweilige Zelle und wählt, wie in Abbildung 24 zu sehen ist, mit der linken Maustaste das Fenster „Eigenschaften“ aus. In diesem Fenster kann der Benutzer anschließend die Anzahl der Fahrzeuge beliebig verändern (siehe Abbildung 24). Dadurch verändert sich zudem die Gesamtanzahl aller betrachteten Autos im Netzwerk.

Um einen Überblick über die Verteilung der Fahrzeuge im Netzwerk zu erhalten, kann in dem Fenster „Parametereingaben“ die Ansicht „Fahrzeuge“ ausgewählt werden. Die Straßen bzw. Zellen des Netzwerkes werden dann entsprechend der Farbeinstel-

³⁶In der SPSE werden nicht einzelne Personen, sondern nur vollständige Fahrzeuge betrachtet. Es wird also z.B. davon ausgegangen, dass 500 PKWs evakuiert werden. Dies lässt aber keinen konkreten Rückschluss auf die Anzahl der Gesamtbevölkerung zu, da sich in jedem Auto eine unterschiedliche Anzahl von Menschen befinden kann. In der Software wird daher immer die Gesamtzahl der Fahrzeuge betrachtet.

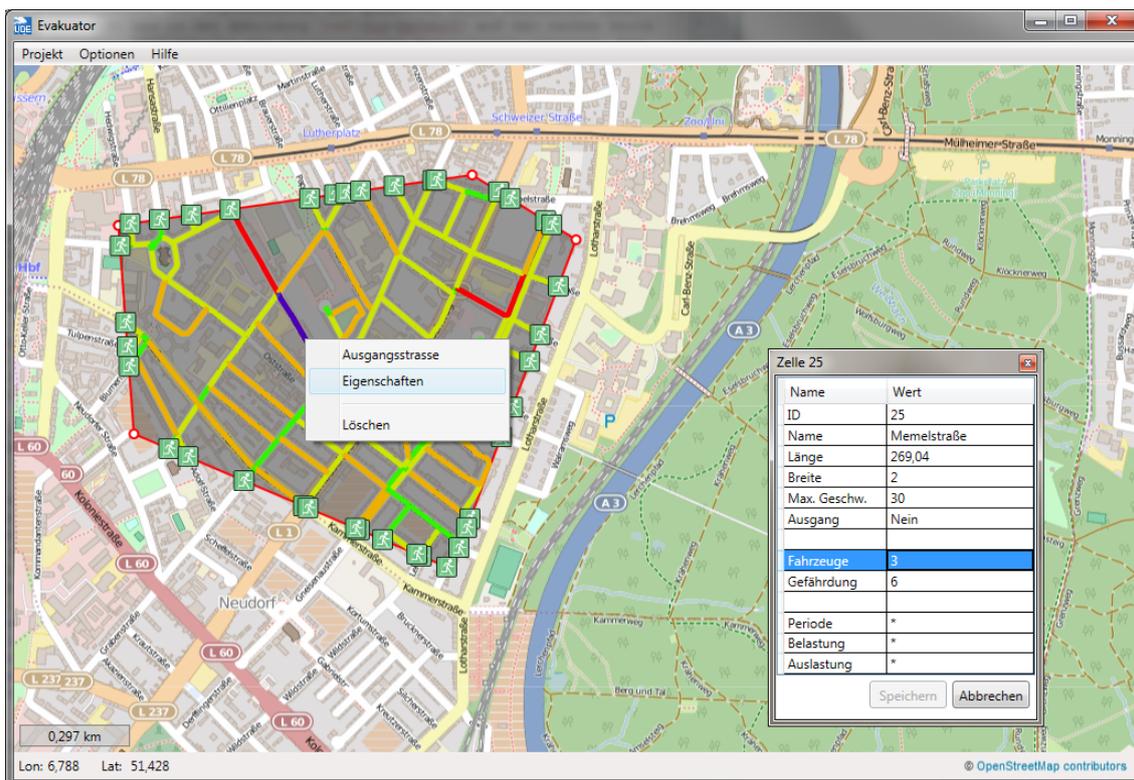


Abbildung 24: Anzahl der Fahrzeuge in einer Straße manuell anpassen

lungen, die man unter den Optionen „Gefahrenzone“ anpassen kann, dargestellt. Die Zelle mit den meisten Autos wird entsprechend der Farbe 1 eingefärbt und die Zelle mit den wenigsten Autos entsprechend der Farbe 10.

3.4 Anpassungen des Straßennetzwerkes

Nachdem das Netzwerk ausgewählt wurde, wird die Karte direkt von dem OSM-Server heruntergeladen. Dafür wird ein Zwischenbildschirm (siehe Abbildung 25) eingeblendet, da der Vorgang, in Abhängigkeit der Netzwerkgröße, einige Augenblicke in Anspruch nehmen kann.

Zur individuellen Anpassung des Netzwerkes sind in der Software diverse Möglichkeiten eingerichtet worden. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.4 erläutert.

3.4.1 Abwahl von Ausgängen

Nachdem der Gefahrenbereich definiert und die Karte aus dem Netz geladen wurde, werden die möglichen Ausgänge in der Evakuierungskarte dargestellt. Die Ausgänge sind durch grüne Fluchtschilder gekennzeichnet, wie man in der Abbildung

Daten (KB)	5515.964
Zeit	00:00:07
<input type="button" value="Abbrechen"/>	

Abbildung 25: Ladevorgang des gewählten Kartenausschnitts von den OSM-Servern

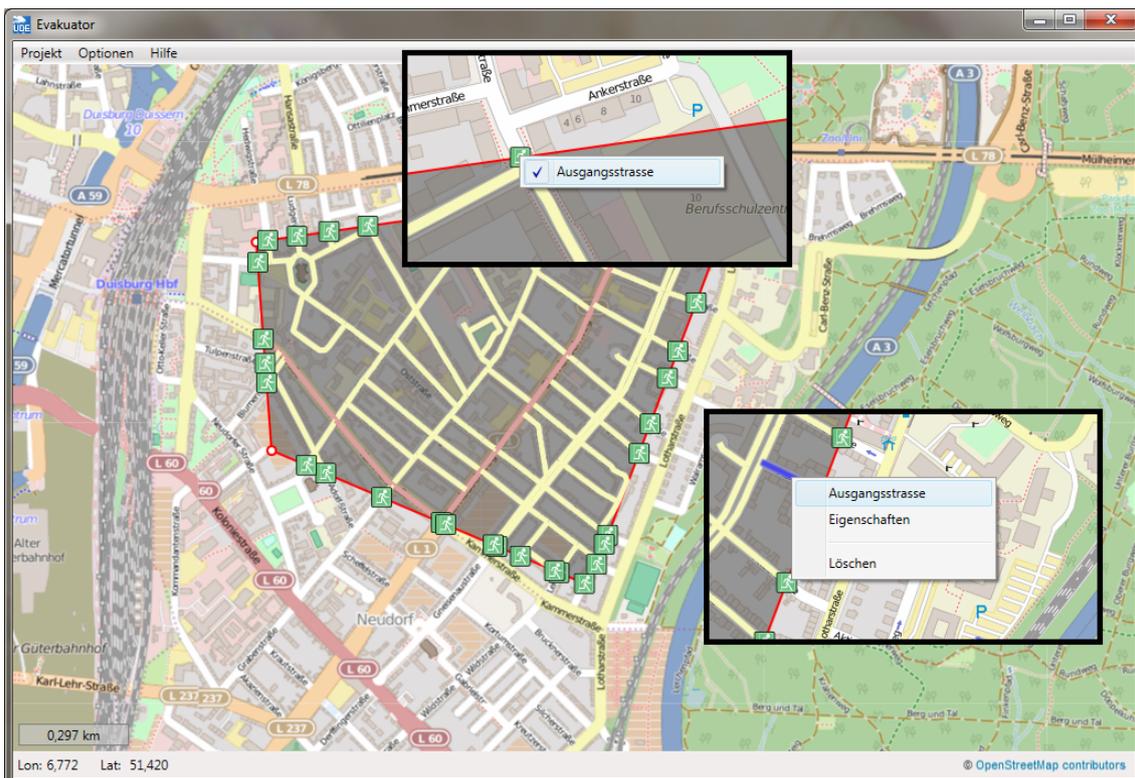


Abbildung 26: Hinzu- und Abwahl eines Ausgangs

26 erkennen kann. In der SPSE wird automatisch ein Ausgang aus dem Gefahrengebiet eingerichtet, wenn eine Straße aus dem gefährdeten Gebiet hinausführt bzw. eine Straße den Rand des Gefahrengebietes schneidet. In Abhängigkeit des jeweiligen Evakuierungsszenarios können einige dieser automatisch ermittelten Ausgänge nicht erwünscht sein, falls diese z.B. in eine Sackgasse oder in schon evakuierte Gebiete führen. Daher wurde die Möglichkeit eingerichtet die vorab-definierten Ausgänge wieder abzuwählen. Um einen Ausgang abzuwählen, klickt man mit der rechten Maustaste auf das grüne Fluchtschild. Daraufhin öffnet sich ein Fenster (siehe Abbildung 26 oberes Zoomfenster), in dem man durch das Entfernen des Hakens mit der linken Maustaste den Ausgang abwählen kann. Falls man fälschlicherweise einen Ausgang abgewählt hat, kann man diesen natürlich auch wieder als Ausgang definieren. Dazu klickt man mit der rechten Maustaste auf die entsprechende Straße, worauf sich ein Fenster öffnet,

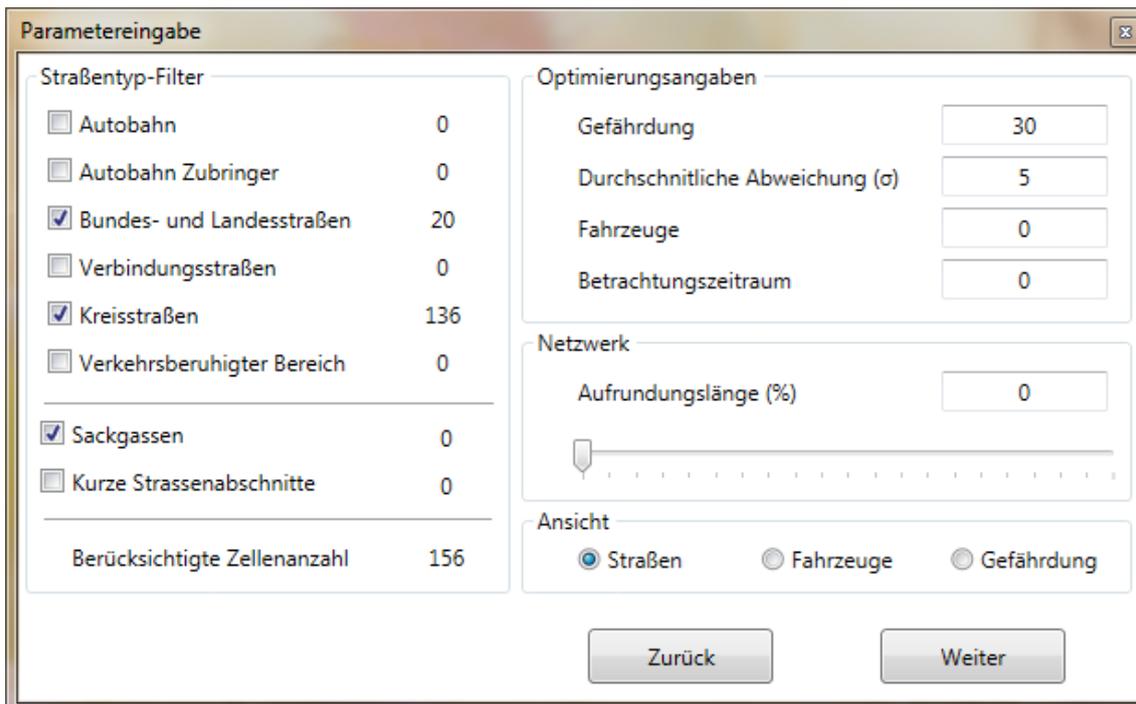


Abbildung 27: Eingabefenster Parametereingabe

in dem man durch das Klicken mit der linken Maustaste auf „Ausgangsstraße“ den Ausgang wieder hinzufügen kann (siehe Abbildung 26, unteres Zoomfenster).

3.4.2 Auswahl von unterschiedlichen Straßentypen

Eine weitere Option, um die Gefahrenzone anzupassen, ist das Filtern verschiedener Straßentypen. Die Straßen in SPSE sind in verschiedene Kategorien eingeteilt. Es gibt Autobahnen, Zubringer, Bundes- und Landstraßen, Verbindungsstraßen, Kreisstraßen und verkehrsberuhigte Bereiche. Diese unterscheiden sich durch die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit (siehe Kapitel 2.4). Nach der Auswahl einer Gefahrenzone besteht die Möglichkeit im Fenster „Parametereingabe“ (siehe Abbildung 27) unterschiedliche Straßentypen zu filtern. In diesem Fenster sind alle in der Gefahrenzone vorhandenen Straßentypen durch einen Haken ausgewählt. Zudem ist angegeben, wie viele Zellen jedes Straßentyps es im Netzwerk gibt, sodass man die Auswirkungen durch die Abwahl eines Straßentyps direkt abschätzen kann. Soll nun ein Straßentyp herausgefiltert werden, entfernt man den Haken dieses Straßentyps durch Klicken mit der linken Maustaste auf das jeweilige Kästchen. Straßen, welche gefiltert wurden, werden dann in der Karte nicht mehr hervorgehoben. In den Abbildungen 28 und 29 ist der direkte Vergleich zu erkennen, wenn (wie in diesem Beispiel) der Straßentyp „Bundes- und Landstraßen“ hinausgefiltert wurde. Diese Straßen werden nicht mehr dargestellt und sind daher nicht mehr Teil des Evakuierungsplanes.

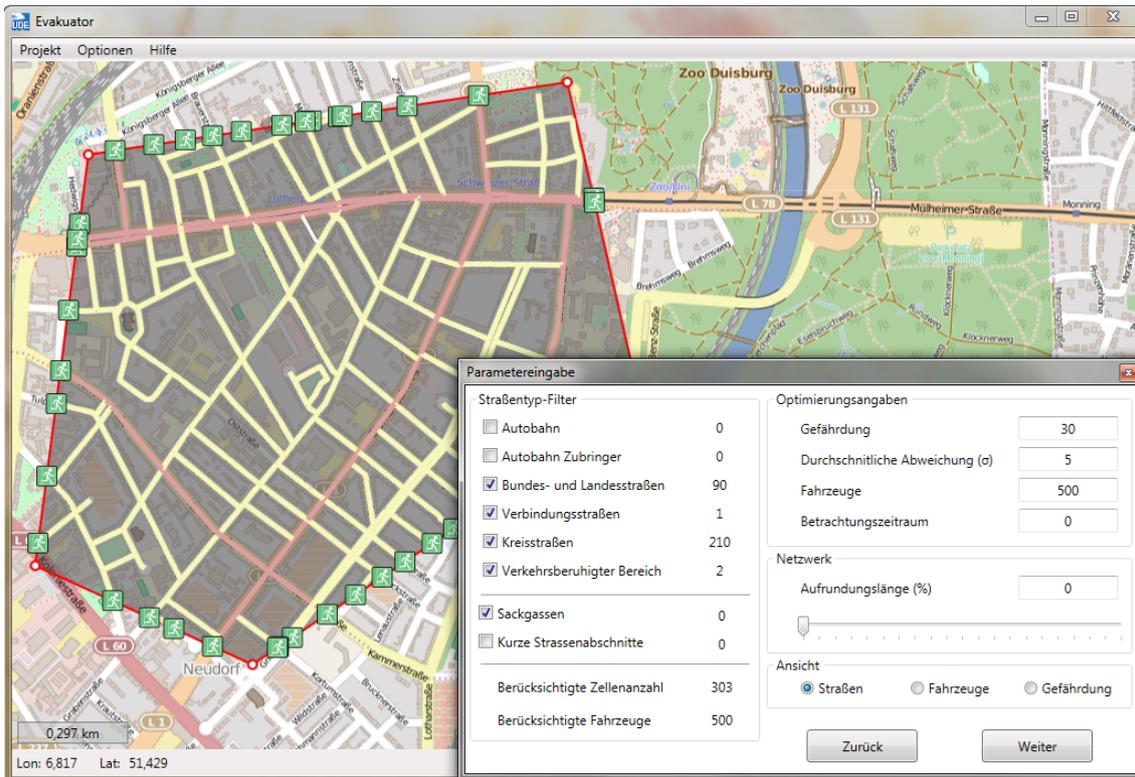


Abbildung 28: Straßenkarte vor dem Filtern der Bundes- und Landstraßen

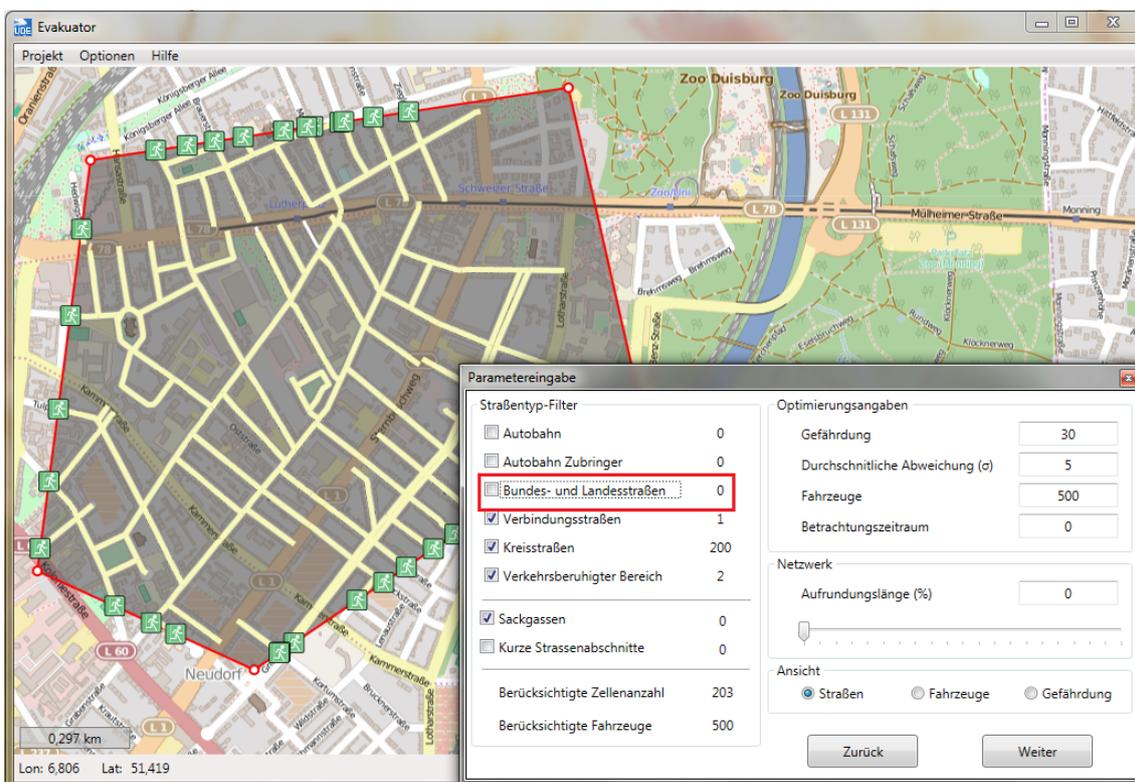


Abbildung 29: Straßenkarte nach dem Filtern der Bundes- und Landstraßen

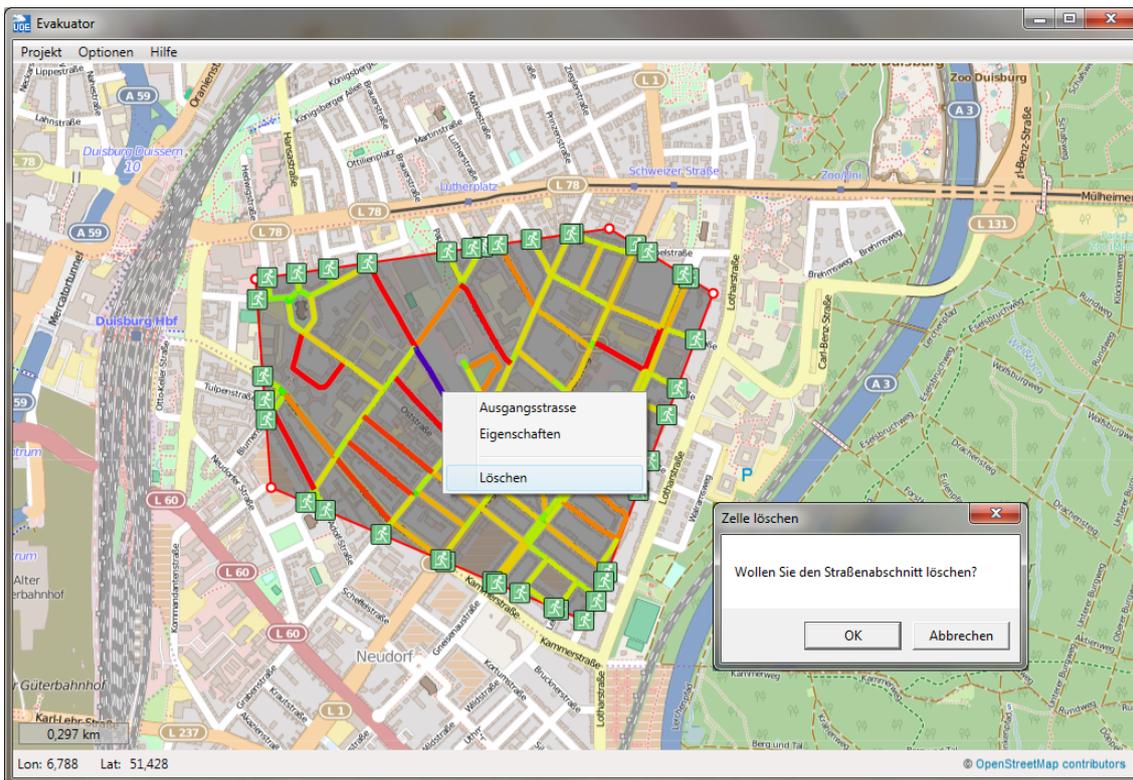


Abbildung 30: Manuelles Löschen einer Zelle

3.4.3 Löschen von einzelnen Zellen

In der SPSE ist die Option implementiert worden einzelne Straßenabschnitte des Gefahrenbereiches löschen zu können. Diese manuelle Anpassung des Netzwerkes ist dann relevant, wenn man nicht alle Straßen eines Typs löschen möchte oder einzelne Straßen (-abschnitte) nicht betrachtet werden sollen. Bei dem Löschen von einzelner Straßenabschnitte muss der Benutzer beachten, dass keine einzelnen „Inseln“ entstehen (siehe Kapitel 4.4). Dadurch könnte das Evakuierungsproblem nicht mehr lösbar werden.

Um einen Straßenabschnitt zu löschen klickt man, wie in Abbildung 30 dargestellt, mit der rechten Maustaste in diesen Straßenabschnitt und wählt im sich öffnenden Fenster „Löschen“ mit der linken Maustaste aus. Da es nicht möglich ist, einen gelöschten Straßenabschnitt wieder zum Netzwerk hinzuzufügen, muss das endgültige Löschen des Straßenabschnitts bestätigt werden.

3.4.4 Abwahl von Sackgassen

Zur Vereinfachung des Netzwerkes und zur Reduktion der Zellenanzahl gibt es in SPSE die Option Sackgassen aus der Karte zu löschen. Alle Straßenabschnitte, die nur mit einer weiteren Straße (in eine Richtung) verbunden sind, zählen als Sackgassen. Sack-

gassen müssen nicht Teil des Optimierungsprozesse sein, da keine Entscheidung über die Fluchtrichtung getroffen werden muss. Daher werden Sackgassen von der SPSE automatisch erkannt. Die Anzahl der Sackgassen in dem Netzwerk werden im Fenster „Parametereingabe“ (siehe Abbildung 27) angezeigt. Durch das Klicken auf das Kontrollhäkchen werden alle Sackgassen aus dem Netzwerk gelöscht.

Wenn eine Sackgasse herausgefiltert wurde und zuvor Fahrzeuge dieser Sackgasse zugeordnet waren, werden die Fahrzeuge automatisch zu der Zelle hinzugefügt, die mit der Sackgasse verbunden ist.

3.5 Eingabe der Periodenanzahl

Wie in Kapitel 2 erläutert, läuft das Optimierungsmodell über einen vorgegeben Zeithorizont. Dieser Zeithorizont entspricht im Optimierungsmodell der Periodenanzahl $|T|$. Dieser Zeithorizont muss vom Nutzer vorab eingegeben werden, bevor der Optimierungsprozess begonnen werden kann. Die Eingabe der Periodenanzahl erfolgt im Fenster „Parametereingabe“ (siehe Abbildung 27) unter den Optimierungsangaben. Das Problem bei der Eingabe ist, dass die Periodenanzahl, die notwendig wäre eine vollständige Evakuierung sicherzustellen, vorab nicht bekannt ist und von dem Evakuierungsszenario abhängt. So hat z.B. die Netzwerkauswahl, die Anzahl der Fahrzeuge oder auch die Anzahl der Ausgänge einen Einfluss auf die Periodenanzahl.

Daher muss der Benutzer den Betrachtungszeitraum selbstständig abschätzen. Es hat sich allerdings gezeigt, dass man relativ schnell eine gute Vorstellung dafür bekommt, wie groß der Betrachtungszeitraum gewählt werden muss. Grundsätzlich gilt, dass der Betrachtungszeitraum mit der Anzahl der Fahrzeuge und der Anzahl der Zellen ansteigt. Zusätzlich ist zu beachten, dass ein zu großer Betrachtungszeitraum möglicherweise die Rechenzeit negativ beeinträchtigt, aber keinen Einfluss auf die Evakuierungsergebnisse hat. Andersherum führt ein zu kurzer Betrachtungszeitraum dazu, dass das Modell möglicherweise nicht lösbar ist und kein Evakuierungsplan ermittelt werden kann. In dem Fall wird im Optimierungsfenster (siehe Kapitel 4.4) eine Fehlermeldung angezeigt und der Benutzer wird zur Parametereingabe zurückgeführt. Weitere Ausführungen zu der Fehlerauswertung folgen in Kapitel 4.4. Wenn der Betrachtungszeitraum zu groß gewählt wird, werden die überflüssigen Perioden nicht in der Evakuierungsdarstellung berücksichtigt. Tendenziell sollte man daher den Betrachtungszeitraum eher zu groß als zu klein wählen.

Wenn man keinen Betrachtungszeitraum eingibt, dann erscheint eine Fehlermeldung, dass man eine positive Periodenanzahl eingeben muss.

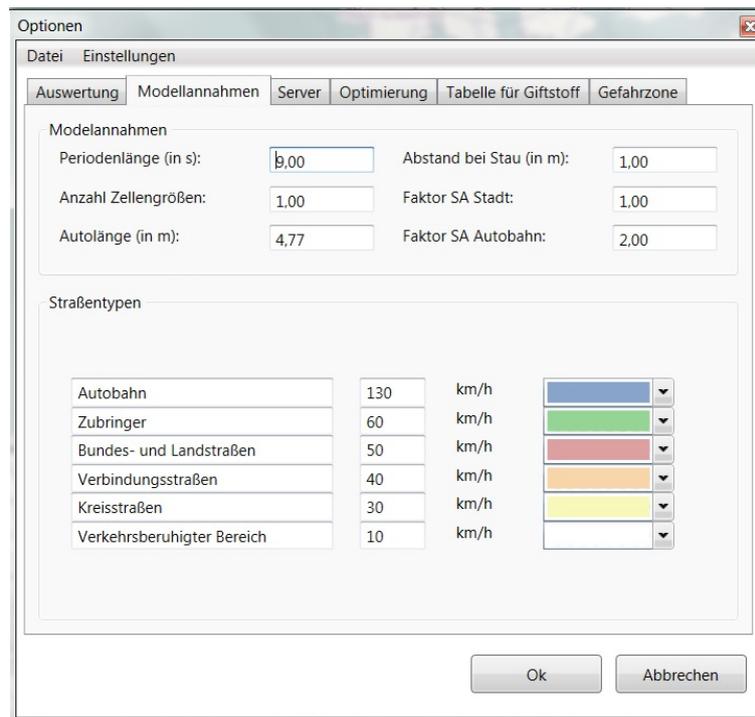


Abbildung 31: Darstellung des Optionsfensters: „Modellannahmen“

3.6 Anpassungen an das Zellenmodell

In Kapitel 2.3 wurde ausführlich das CTM beschrieben, auf welchem das Evakuierungsmodell beruht. Zur Einteilung des Straßennetzwerkes in Zellen müssen vorab einige Parameter definiert werden, wie z.B. die durchschnittliche Autolänge, die Periodenlänge, die angenommene Geschwindigkeit auf den jeweiligen Straßenabschnitten oder der Sicherheitsabstand bei freiem Verkehrsfluss. In der Software sind Standardwerte für diese Parameter hinterlegt, wie man in der Abbildung 31 erkennen kann. Diese Werte können innerhalb des Optionsfensters „Modellannahmen“ von dem Benutzer individuell angepasst werden, falls dieser z.B. eine andere Periodenlänge annehmen möchte. Die Werte müssen angepasst werden, bevor das Netzwerk ausgewählt wird. Es erfolgt keine dynamische Anpassung der Werte, wenn das Netzwerk schon ausgewählt wurde.

3.7 Auf- und Abrunden von Zellen

Eine Schwierigkeit bei der Übertragung der realen Welt in das in der SPSE verwendete Zellenformat ist, dass die realen Gegebenheiten nicht immer in dieses Zellenformat passen. Um eine möglichst genaue Abbildung der Realität zu erreichen, kann man eine sehr geringe Länge für eine Standardzelle festlegen. Der Nachteil bei diesem Vorgehen ist jedoch, dass dann durch steigende Rechenzeiten die Größe der lösbaren Netzwerke

abnimmt. Wählt man die Zellenlänge größer aus, gibt es viele kleine Straßenabschnitte, die nur einen geringen Anteil der vorgegebenen Zellengröße enthalten. Um das reale Straßennetz bestmöglich abbilden zu können, werden in der Voreinstellung von SPSE alle Straßenabschnitte zur nächst möglichen Zellengröße aufgerundet. Eine andere Möglichkeit mit diesen Zellen umzugehen ist Straßenabschnitte, welche keine ganze Zelle ausmachen, aus der Karte hinaus zu löschen und die vorher mit diesem kurzen Stück verbunden Zellen miteinander zu verbinden. Damit der Benutzer von SPSE selbst bestimmen kann, wann ein Straßenabschnitt aus dem Netzwerk gelöscht wird und wann dieser zu einer vollen Zelle aufgerundet wird, ist die Option implementiert, angeben zu können wie viel Prozent einer Zelle vorhanden sein muss, damit diese aufgerundet wird. Dies kann im Fenster „Parametereingabe“ mit Hilfe der „Aufrundungslänge“ ausgewählt werden. Wählt man z.B. eine Aufrundungslänge von 20% aus, dann werden alle Straßenabschnitte, die nicht mindestens 20% der entsprechenden Zellenlänge haben aus der Karte gelöscht. Alle anderen Straßenabschnitte werden zu einer vollständigen Zelle aufgerundet. Die Anzahl der Straßenabschnitte, welche dieses Mindestmaß nicht erreichen, wird im Fenster Parametereingabe unter „Kurze Straßenabschnitte“ aufgeführt. Hier kann der Benutzer entscheiden, ob die durch den Filter bestimmte Anzahl an Zellen akzeptabel ist. Die Zellen werden gelöscht, wenn der Haken bei „Kurze Straßenabschnitte“ gesetzt wird.

4 Berechnung der Evakuierungsergebnisse

In Kapitel 3 wurde vorgestellt wie die relevanten Daten für ein Evakuierungsszenario in das Programm eingepflegt werden. In Kapitel 5 wird präsentiert wie die Ergebnisse in dem Programm dargestellt werden. Zwischen diesen beiden Bausteinen in dem Programm findet die Optimierung (=Berechnung) der Evakuierungsergebnisse statt. Die Berechnung der Ergebnisse erfolgt mit Hilfe der Programmiersprache AMPL³⁷ und der angebundenen Solver. Zunächst wird kurz in Kapitel 4.1 die Programmiersprache AMPL vorgestellt und beschrieben, warum sich für diese entschieden wurde. In Kapitel 4.2 folgt die kurze Erläuterung, wie die Vollversion von AMPL und der Solver in die Software eingebunden werden. Danach wird in Kapitel 4.3 erläutert wie die unterschiedlichen Modelle in der Software eingepflegt sind bzw. wie diese aufgerufen werden können. Zusätzlich wird in diesem Kapitel erklärt, worauf geachtet werden muss, wenn man ein neues Modell implementieren möchte. In Kapitel 4.4 wird auf den Ablauf der Optimierung innerhalb der Software eingegangen und wie mögliche Fehlermeldung behoben werden können.

4.1 AMPL - A Mathematical Programming Language

AMPL ist eine Programmiersprache, die entwickelt wurde, um umfangreiche mathematische Optimierungsprobleme für unterschiedliche Anwendungsgebiete (z.B. Transportsysteme, Produktion, Finanzen) zu lösen. Besonders in der Wissenschaft ist AMPL eine etablierte Programmiersprache. Aber auch in der Praxis hat AMPL einen nicht zu-verachtenden Stellenwert erreicht, wenn rechnerunterstützt Kosten gesenkt oder die Effizienz gesteigert werden soll.³⁸

Besonders der intuitive, mathematische Aufschrieb macht diese Programmiersprache sehr einsteigerfreundlich. Am Lehrstuhl für Logistik und Operations Research der Universität Duisburg-Essen ist AMPL ein fester Bestandteil der Lehre und die meisten Mitarbeiter des Lehrstuhls modellieren ihre Problemstellung mit Hilfe von AMPL. Da zu dem Zeitpunkt der Entscheidung (und auch bis heute) alle absehbaren Optimierungsaufgaben des Projektes mit AMPL lösbar waren, wurde sich dafür entschieden AMPL auch für dieses Projekt als Schnittstelle zwischen der Datenaufarbeitung und der Optimierung durch den Solver zu verwenden. Ein weiterer Vorteil ist, dass der Lehrstuhl die Lizenz der Software schon besitzt und daher keine kostspielige Neuanschaffung notwendig war.

Üblicherweise wird ein größeres Projekt bzw. eine größere Problemstellung in AMPL

³⁷Vgl. Fourer et al. (2003).

³⁸Vgl. AMPL (2015).

in vier Bausteine unterteilt, die sich dann auf vier unterschiedliche Dateien aufteilen: Die Mod-, Dat-, Run- und Sol-Datei. In der Mod-Datei wird gewöhnlicherweise das mathematische Optimierungsmodell gespeichert. Die Dat-Datei enthält die notwendigen Parameter, die sich für das jeweils betrachtete Szenario unterscheiden können. Über die Run-Datei werden die wichtigen Befehle aufgerufen, die notwendig sind um das Programm auszuführen, wie z.B. die Solvereinstellungen oder das Aufrufen der Mod- und Dat-Datei. Abschließend werden die relevanten Optimierungsergebnisse in einer Sol-Datei gespeichert. Diese Dateien können mit einem kostenlosen Text-Editor (z.B. NotePad) geöffnet und bearbeitet werden. Die Ausführung von AMPL erfolgt über ein MS-DOS Fenster.

4.2 Einbindung von AMPL

Die SPSE funktioniert nur mit einer Vollversion der Programmiersprache AMPL und einem kompatiblen Solver (z.B. Cplex oder Gurobi), welche man beispielsweise auf der Homepage von AMPL (www.AMPL.com) erwerben kann. Wenn der Benutzer die entsprechende Lizenz erworben hat, müssen die entsprechenden Dateien (die Exe und Lizenz Datei von AMPL und dem Solver) in dem Ordner AMPL, wie in Abbildung 32 zu sehen, abgespeichert werden.

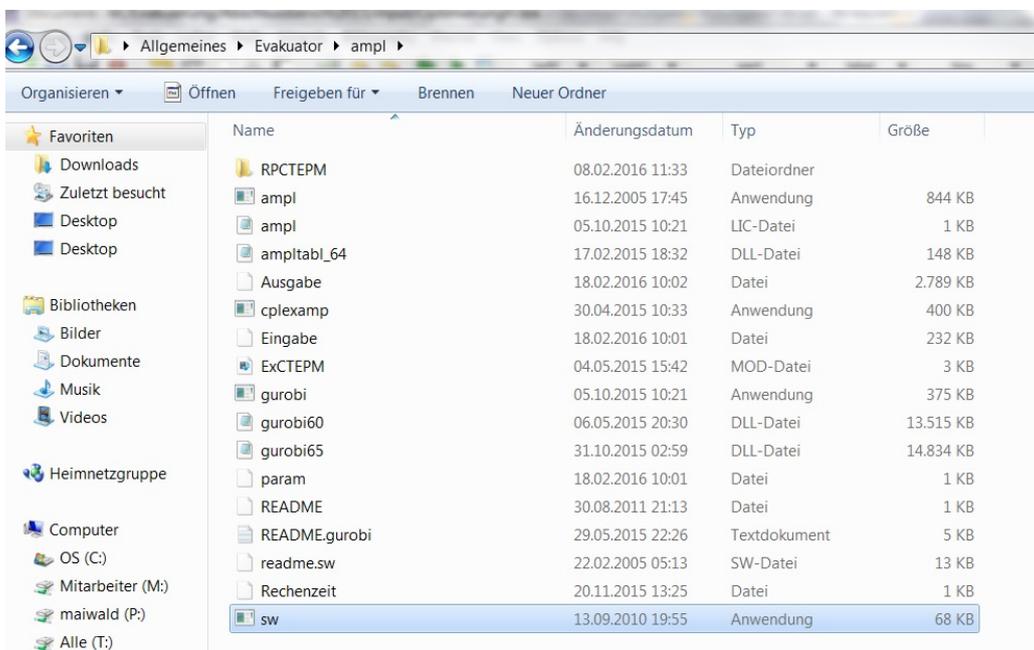


Abbildung 32: Darstellung des AMPL-Ordners

4.3 Implementierung der Optimierungssoftware

Das Ziel der SPSE ist es die Abläufe so weit wie möglich zu automatisieren. Dieses Ziel wurde auch bei der Umsetzung des Optimierungsvorgangs berücksichtigt, daher läuft der Optimierungsvorgang selbstständig ab, sodass der Benutzer keine weiteren Eingaben tätigen muss. Dennoch wurde zusätzlich der Aspekt berücksichtigt, dass man die Software bzw. in diesem Fall die Optimierungsmodelle möglicherweise (in der Zukunft) anpassen bzw. abändern möchte. Innerhalb der Software sind zwei Modelle standardmäßig hinterlegt, die der Benutzer auswählen kann. Die Umsetzung dieser beiden Modelle wird in Kapitel 4.3.1 und Kapitel 4.3.2 beschrieben. In Kapitel 4.3.3 werden Hinweise dazu gegeben, wenn ein Benutzer ein eigenes Modell einbinden möchte oder ein vorhandenes Modell verändern möchte.

4.3.1 Das erweiterte Evakuierungsmodell in AMPL

Die Implementierung des ExCTEPM unterteilt sich in die angesprochene vierstufige Datenstruktur. Das mathematische Optimierungsmodell, welches in Kapitel 2.5.2 beschrieben ist, ist in der Datei „ExCTEPM“ hinterlegt. Diese Datei befindet sich im Ordner „AMPL“ und entspricht der angesprochenen Mod-Datei. Änderungen in dieser Mod-Datei, wie beispielsweise eine neue Zielfunktion und das Hinzufügen von Restriktionen, können direkt in dieser Mod-Datei vorgenommen werden. Die Dat-Datei „Daten“ befindet sich ebenso in diesem Ordner. Die Datei wird erstellt bzw. aktualisiert, sobald alle notwendigen Eingabedaten für das Programm bestimmt worden sind und der Benutzer den Optimierungsvorgang startet. Alle relevanten Daten der Eingabe, wie die Verteilung der Gefahr und der Bevölkerung, die Netzwerkstruktur und die notwendigen Kapazitätsparameter sind in dieser Datei enthalten. Die Run-Datei, die zur Steuerung und Durchführung des Optimierungsvorgangs notwendig ist, ist direkt in der SPSE eingebunden. Die Datei kann über das Optionsfenster „Optimierung“ direkt aufgerufen werden (siehe Abbildung 33).

Standardmäßig sind zunächst die Eingaben hinterlegt, die notwendig sind, um das ExCTEPM auszuführen. Diese Eingaben können nun teilweise (siehe Kapitel 4.3.3) verändert werden. Mit Hilfe des Buttons „ExCTEPM“ können alle Veränderungen auf die Ausgangseinstellungen zurückgesetzt werden. Nachfolgend werden kurz die einzelnen Programmzeilen der Abbildung 33 erläutert:

- (1) Löscht alle Daten die zuvor von AMPL eingelesen worden sind. Diese Zeile ist notwendig, falls das Programm mehrmals hintereinander ausgeführt wird, damit vorab geladene Informationen gelöscht werden.
- (2) Wählt den Solver aus. Es kann wahlweise zwischen „option solver gurobi“ oder

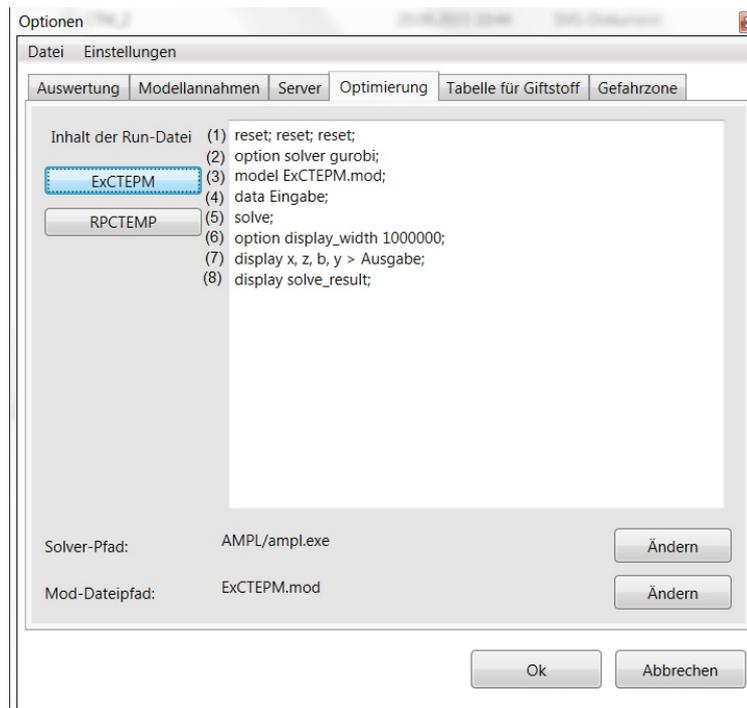


Abbildung 33: Darstellung des Optionsfensters: Optimierung - ExCTEPM

„option solver cplexamp“ ausgewählt werden.

- (3) Lädt die Mod-Datei, die das ExCTEPM-Optimierungsmodell beinhaltet.
- (4) Lädt die Dat-Datei, die alle relevanten Parameter für das definierte Evakuierungsszenario enthält.
- (5) Startet die Optimierung.
- (6) Legt die maximale Breite für die Ausgabedatei fest. Dies ist wichtig, da sonst unerwartete Zeilenumbrüche entstehen können und dadurch die Daten in der Sol-Datei nicht mehr gelesen werden können.
- (7) Speichert die relevanten Variablenwerte in der Sol-Datei (Ausgabe). Wenn andere Modelle angewendet werden, müssen die Werte der Variablen immer auf diese Variablen(-struktur) zurückgeführt werden.
- (8) Gibt das Resultat der Optimierung aus. Dieser Befehl ist notwendig, da dadurch die SPSE erkennt, ob das Modell erfolgreich gelöst wurde. Nur bei einem erfolgreichen Resultat (=solved) wird der Benutzer zum Ausgabebildschirm weitergeleitet. Wenn dieser Befehl nicht hinterlegt ist, erkennt das Programm nicht, ob die Problemstellung erfolgreich gelöst wurde.

Anschließend werden alle Ergebnisse der Variablen der Optimierung in einer Sol-Datei gespeichert. Diese Sol-Datei kann hilfreich sein, falls der Benutzer sehr detaillierte Ergebnisse für einzelne Straßenabschnitte benötigt. Die Sol-Datei kann unter „AMPL ⇒ Ausgabe“ aufgerufen werden.

4.3.2 Das resiliente Evakuierungsmodell in AMPL

Neben dem ExCTEPM ist auch das RPCTEPM in der SPSE hinterlegt. Wie man in Abbildung 34 erkennt, weicht der Ablauf teilweise von dem ExCTEPM ab. Der Grund dafür ist u.a., dass für das RPCTEPM zunächst Pfade ermittelt werden müssen, bevor das Modell gelöst werden kann. Diese Abweichungen werden nachfolgend erläutert:

- (3) Lädt die notwendigen Modelle, zusätzliche Parameter und die Daten des Evakuierungsszenarios.
- (4) Legt den zulässigen Anstieg der Gesamtgefährdung für die Bevölkerung fest.
- (5) Legt die maximale Anzahl der Pfade für einen Pfadgenerierungsalgorithmus fest.
- (6) Legt die Anzahl der Wiederholungen des Pfadgenerationsalgorithmus fest in denen sich der Zielfunktionswert des Masterproblems nicht verbessern muss bis der Algorithmus abbricht.
- (7) Startet die Berechnung der Lösung für das RPCTEPM. Zunächst werden Evakuierungspfade berechnet und anschließend der Evakuierungsplan mit Hilfe des RPCTEPM.

Die übrigen Zeilen (1)-(2) und (9)-(11) sind identisch zu den Zeilen des ExCTEPM.

4.3.3 Anpassungen in den Modellen

Wie bereits erwähnt sind Änderungen in den Modellen problemlos möglich. Dies beinhaltet z.B. das Anpassen von Nebenbedingungen oder das Ändern der Zielfunktion. Weitere Anpassungen können auch direkt über das Run-Fenster (Optionen „Optimierung“) durchgeführt werden. So ist beispielsweise der Austausch des Solvers (z.B. von Gurobi zu Cplex) möglich. Bei den Anpassungen ist allerdings wichtig, dass die Zeilen (1)-(2) und (6)-(8) aus Abbildung 33 bzw. die Zeilen (1)-(2) und (9)-(11) aus Abbildung 34 nicht gelöscht werden. Ohne diese Zeilen ist eine korrekte Ausführung der SPSE nicht möglich.

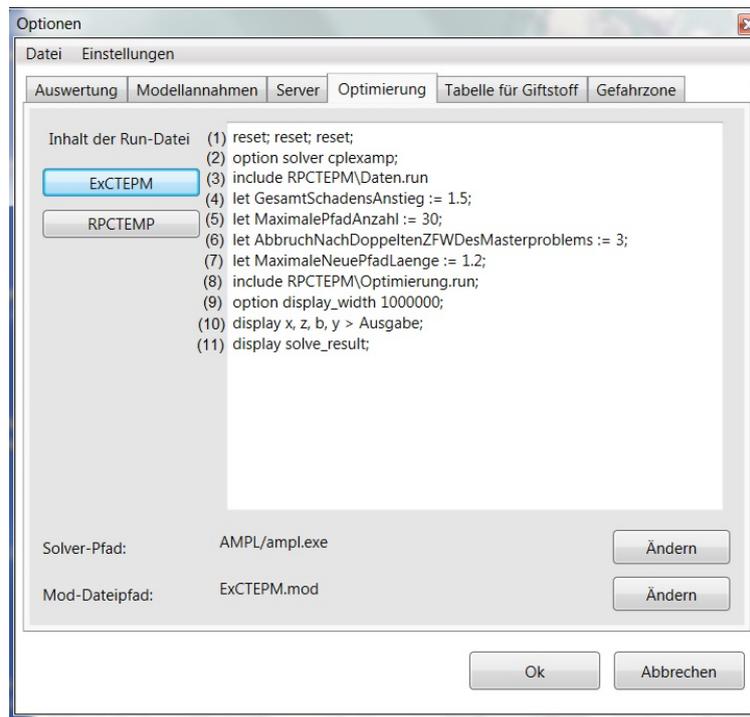


Abbildung 34: Darstellung des Optionsfensters: Optimierung - RPCTEPM

4.4 Ablauf des Optimierungsvorganges

Innerhalb des Programmablaufes wird der Optimierungsvorgang automatisch ausgeführt. Mögliche Anpassungen (siehe Kapitel 4.3) an die Optimierung bzw. die Auswahl des Optimierungsmodells müssen vor dem Start des Optimierungsvorgangs vorgenommen werden.

Nachdem der Optimierungsvorgang gestartet ist, öffnet sich automatisch eine Art "MS-DOS-Fenster" (Siehe Abbildung 35) über welches die relevanten Informationen des Optimierungsvorgangs angezeigt werden. Zunächst werden die Parameter und die entsprechenden Modelldaten geladen, welche zuvor ausgewählt worden sind. Wenn der Optimierungsvorgang beginnt, wird der folgende Text eingeblendet: „Optimization started“. Es kann dann abhängig vom Evakuierungsszenario einige Zeit in Anspruch nehmen bis die optimale Lösung ermittelt worden ist. Diese Lauf- bzw. die Restlaufzeit kann nicht direkt ermittelt bzw. angezeigt werden. Damit der Benutzer allerdings erkennt, dass der Solver noch die optimale Lösung ermittelt, verändert sich das Mausymbol, wenn man den Mauszeiger über das Fenster bewegt.

Sobald der Solver die optimale Lösung ermittelt hat, wird der optimale Zielfunktionswert, die notwendigen Rechenschritte und das Solve-Resultat angezeigt (siehe Abbildung 35). Wenn das Problem ordnungsgemäß gelöst wurde, wird in dem Fenster „Solved“ und „Optimization ended“ angezeigt. Nun kann sich der User mit Hilfe des „Weiter“-Buttons die Optimierungsergebnisse anzeigen lassen.

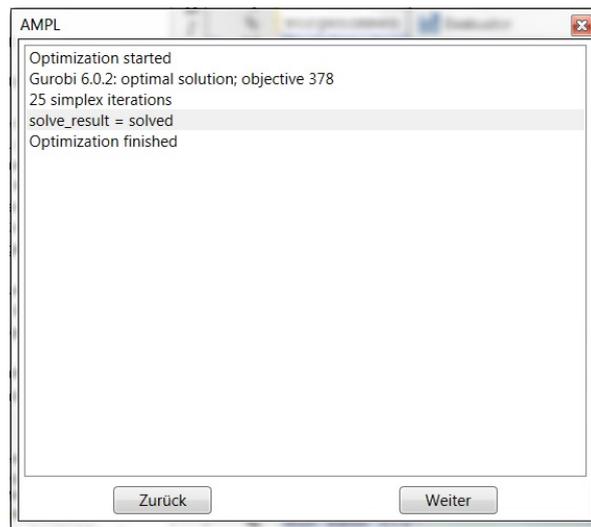


Abbildung 35: Darstellung des AMPL-Optimierungsfensters

Falls das Problem nicht ordnungsgemäß gelöst wurde, sind in AMPL die folgenden Fehlermeldungen automatisch hinterlegt:

- *infeasible* - Die Nebenbedingungen konnten nicht erfüllt werden.
- *unbounded* - Das Problem ist unbeschränkt.
- *limit* - Der Optimierungsprozess wurde aufgrund eines vorgegebenen Limits (z.B. Rechenzeit oder Iterationsanzahl) beendet.
- *solved?* - Die optimale Lösung ist erkennbar, aber ein Fehler ist aufgetreten.
- *failure* - Der Optimierungsprozess wurde aufgrund eines Fehlers des Solvers beendet.

Der einzige Fehler, der in den Testfällen aufgetreten ist, war *infeasible*. Dieser Fehler kann auch weiterhin auftreten und kann aufgrund der folgenden zwei Gründe hervorgerufen werden. Zum einen kann der Benutzer den Betrachtungszeitraum zu klein wählen, sodass mit der vorgegebenen Periodenanzahl nicht alle Fahrzeuge die Evakuierungszone verlassen können. Dadurch wird die Problemstellung unlösbar. In Kapitel 3.5 sind Tipps zur Bestimmung des Betrachtungszeitraums aufgeführt. Zum anderen kann es vorkommen, dass der Benutzer das Netzwerk derart modifiziert hat, dass sogenannte „Inseln“ (siehe Abbildung 36) in dem Netzwerk vorhanden sind. Diese „Inseln“ liegen dann vor, wenn eine oder mehrere Zelle(-n) keine Verbindung zu einem Ausgang besitzen. Wenn dies der Fall ist, wird das Problem unlösbar. Der Fehler *unbounded* kann auftreten, wenn die Nebenbedingungen des Problems verändert worden sind und das Problem dadurch unbeschränkt wird. Dieser Fehler kann nur entstehen,

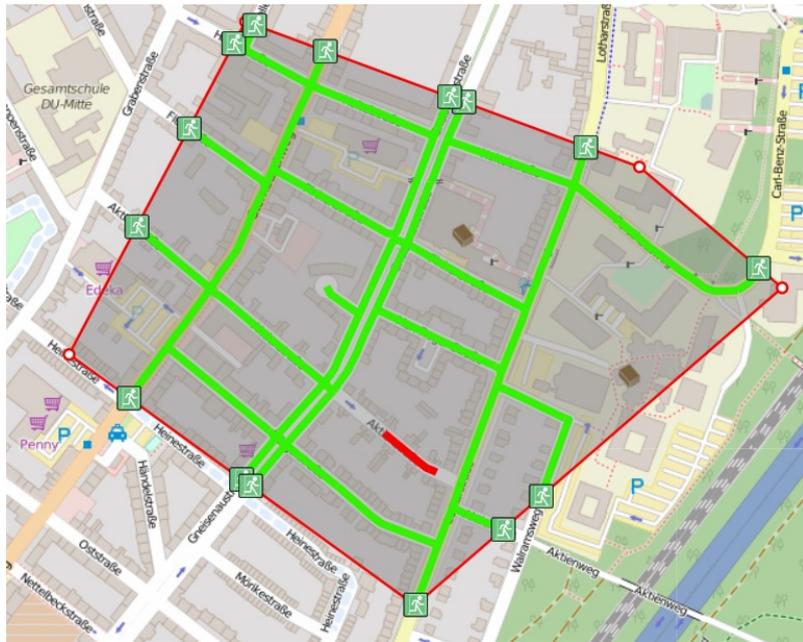


Abbildung 36: Eingabefehler: „Inseln“

wenn der Benutzer die Mod-Datei verändert hat. Der Fehler *limit* tritt nur auf wenn man z.B. die Rechenzeit oder Iterationsanzahl beschränkt. Die Fehler *solved?* und *failure* sind in unseren Tests nie aufgetreten. Beide Fehler sind auf Fehler von AMPL oder des Solvers zurückzuführen.

Innerhalb der SPSE ist es nicht möglich direkt Befehle über AMPL auszuführen. Ansonsten hätte man den Optimierungsprozess nicht vollständig automatisieren können. Dennoch ist es möglich AMPL selbstständig im Ordner „AMPL“ zu starten und die Run-Datei direkt über das bekannte MS-Dos Fenster zu steuern. Dies kann hilfreich sein, wenn man selbst Modelle verändern möchte oder nach möglichen (daraus resultierenden) Fehlern innerhalb der Programmierung suchen möchte.

5 Darstellung der Evakuierungsergebnisse

In diesem Abschnitt wird auf die Darstellung des Evakuierungsplanes detaillierter eingegangen. Dem Benutzer stehen zwei unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten zur Verfügung: Zum einen kann ein Übersichtsplan angezeigt werden, welcher einen aggregierten Evakuierungsplan über alle Perioden darstellt und den Evakuierungsvorgang möglichst übersichtlich auf einer Karte zusammenfasst. Zum anderen kann ein Evakuierungsplan für jede einzelne Periode angezeigt werden. Die angedeuteten Optimierungsergebnisse sind die Kennzahlen für die Belastung, die Auslastung und die Ausrichtung der jeweiligen Straßenabschnitte. Die Berechnung dieser Kennzahlen wird in Kapitel 5.1 vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 5.2 beschrieben wie das Problem gelöst wurde die Evakuierungskarte entsprechend der gewünschten Farben bzw. Straßenbreiten einzufärben. Kapitel 5.3 beschreibt wie der Benutzer die Darstellung der Evakuierungskarte beeinflussen kann und in Kapitel 5.4 wird erläutert wie die relevanten Ergebnisse gespeichert werden können.

5.1 Konvertierung der optimalen Evakuierungsergebnisse

Die optimale Lösung enthält die Informationen, wann sich wie viele Autos von einem Straßenabschnitt in einen anderen Straßenabschnitt bewegen, wann die Autos auf dem jeweiligen Straßenabschnitt mit der Evakuierung beginnen und wann sich auf welchem Straßenabschnitt wie viele Autos stauen. Diese Informationen sind zunächst nur in großen, unübersichtlichen Matrizen „versteckt“. Aus diesen Matrizen wird die Auslastung, die Belastung und die Ausrichtung für alle Straßenabschnitte abgeleitet.

Für die Berechnung der Auslastung eines Straßenabschnittes wird die absolute Anzahl der Autos auf diesem Straßenabschnitt durch die Kapazität dieses Straßenabschnittes geteilt. Durch diese Kennzahl können Engpässe in dem Netzwerk identifiziert werden. Die Belastung eines Straßenabschnittes misst hingegen die absolute Anzahl der Autos auf diesem Straßenabschnitt. Diese Kennzahl signalisiert, auf welchem Straßenabschnitt der größte, absolute Verkehr herrscht. Die kombinierte Darstellung der beiden Kennzahlen ist wichtig, damit die Ergebnisse nicht falsch interpretiert werden. Wird beispielsweise nur die Belastung betrachtet, wird diese auf einer Autobahn, im Vergleich zu einem Wohngebiet, viel höher sein. Die höhere Belastung einer Autobahn ist aber aufgrund der größeren Kapazität möglicherweise unproblematisch. Andererseits kann die Auslastung in einem Wohngebiet sehr hoch sein. Dies muss allerdings aufgrund der viel kleineren Kapazität nicht zwangsweise problematisch sein. Besonders die Straßenabschnitte mit einer hohen Aus- und Belastung sind problematisch.

Wie zuvor bereits erwähnt, können zwei unterschiedliche Evakuierungspläne darge-

stellt werden: Eine Übersicht über alle Perioden und eine detaillierte Darstellung für jede Periode. Daher sind zwei unterschiedliche Formeln für jede Kennzahl notwendig, welche im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

Die Auslastung (a_{it}) eines Straßenabschnittes i für jede Periode t berechnet sich aus der Anzahl der Autos, die sich auf diesem Straßenabschnitt in der Periode t befinden, geteilt durch die maximal-zulässige Kapazität (N_i) des Straßenabschnittes i :

$$a_{it} = \frac{b_{it} + \sum_{j \in I} y_{jit-1} + x_{it-1}}{N_i}. \quad (27)$$

Die Anzahl der Autos, die sich auf einem Straßenabschnitt i in einer Periode t befinden, berechnet sich aus der Summe der Anzahl der Autos, die in der Periode t in Straßenabschnitt i mit der Evakuierung starten (b_{it}), der Anzahl der Autos, die in der vorherigen Periode $t - 1$ von allen benachbarten Straßenabschnitten j in den Straßenabschnitt i gefahren sind ($\sum_{j \in I} y_{jit-1}$) und der Anzahl der Autos, die sich in der vorherigen Periode $t - 1$ noch auf dem Straßenabschnitt i befunden haben (x_{it-1}).

Die durchschnittliche Auslastung über alle Perioden berechnet sich dementsprechend aus der Summe der Auslastung aller Perioden geteilt durch die Anzahl der zur Evakuierung benötigten Perioden $|T|$:

$$\bar{A}_i = \frac{\sum_{t \in T} a_{it}}{|T|} = \frac{\sum_{t \in T} (b_{it} + \sum_{j \in I} y_{jit-1} + x_{it-1})}{N_i \cdot |T|}. \quad (28)$$

Zur Berechnung der Belastung eines Straßenabschnittes wird die absolute Anzahl der Autos in einer Periode betrachtet. Im Gegensatz zur Auslastung eines Straßenabschnittes wird die Anzahl der Autos nicht durch die Kapazität der Zelle geteilt, sondern durch die Zellengröße n_i . Dieser Parameter entspricht der Größe der Zelle i im Vergleich zu einer Standardzelle. Gilt für $n_i = 1$, dann entspricht die Zelle i der Größe einer Standardzelle. Wenn allerdings z.B. für den Parameter $n_i = 5$ gilt, dann ist die Zelle i fünfmal so groß wie eine Standardzelle. Diese Vereinheitlichung der Belastung ist notwendig, da sonst eine identische Belastung von zwei Zellen zu unterschiedlichen Ergebnissen, aufgrund von unterschiedlichen Zellengrößen, führen würden.

$$be_{it} = \frac{b_{it} + \sum_{j \in I} y_{jit-1} + x_{it-1}}{n_i}. \quad (29)$$

Analog dazu die Berechnung der durchschnittlichen Belastung über alle Perioden:

$$\bar{B}e_i = \frac{\sum_{t \in T} be_{it}}{|T|} = \frac{\sum_{t \in T} (b_{it} + \sum_{j \in I} y_{jit-1} + x_{it-1})}{n_i \cdot |T|}. \quad (30)$$

Die Ausrichtung eines Straßenabschnittes signalisiert die Fahrtrichtung der Autos auf diesem Straßenabschnitt in einer Periode. Wenn also in einer Periode t mindestens ein Auto von dem Straßenabschnitt i auf den Straßenabschnitt j fährt ($y_{ijt} > 0$), dann wird das mit entsprechenden Pfeilen in der Evakuierungskarte dargestellt. Es gilt die Annahme, dass innerhalb einer Periode ein Straßenabschnitt nur in eine Richtung befahren werden kann. In seltenen Ausnahmekonstellationen kann ein Straßenabschnitt zu Beginn einer Evakuierung zunächst von i nach j und im weiteren Verlauf von j nach i (oder andersherum) befahren werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in der Übersichtskarte nur die dominierende Fahrtrichtung angezeigt.

5.2 Technische Umsetzung der Evakuierungskarte

Eine anspruchsvolle Teilaufgabe des Projektes war die Implementierung einer Schnittstelle, um die Ergebnisse des Evakuierungsmodells darstellen zu können. Dabei wurde zunächst die Idee verfolgt, die Ergebnisse in einer OSM-ähnlichen Straßenkarte darzustellen, um keinen Darstellungsbruch zwischen Datenein- bzw. -ausgabe hervorzurufen und die Ergebnisse im Kontext des ausgewählten Stadtbereiches problemlos und schnell interpretieren zu können. Die erste Idee war auf die OSM-Datensätze zurückzugreifen, die berechneten Evakuierungsergebnisse direkt in die OSM-Datensätze einfließen zu lassen und selbstständig eine neue Karte zu zeichnen. Diese erste Idee war allerdings nicht umsetzbar, da es nicht vorgesehen ist eigene Informationen in die Darstellung von OSM-Karten einfließen zu lassen. Deshalb wird nun mit Hilfe des Open-Source-Zeichenprogramm „Inkscape“ das Straßennetzwerk des ausgewählten Bereiches nachgezeichnet. Die Straßen werden dann entsprechend der ermittelten Optimierungsergebnisse aus Kapitel 5.1 eingefärbt, sodass eine eigene Evakuierungskarte entsteht. Diese Karte wird anschließend über die ursprüngliche OSM-Karte gelegt und es wird sichergestellt, dass die Evakuierungsrouten exakt auf den Straßen der OSM-Karte verlaufen. So entsteht der Eindruck, dass nur eine Karte existiert.

5.3 Darstellung der Evakuierungsergebnisse

In Kapitel 5.1 wurde auf die Berechnung der Aus- und Belastung eingegangen. In diesem Kapitel wird beschrieben wie diese Ergebnisse übersichtlich in der Evakuierungskarte dargestellt werden.

Wie zuvor erläutert, wird das Straßennetzwerk selbstständig gezeichnet und entspricht exakt dem Straßennetzwerk, welches für die Evakuierung ausgewählt wurde. Die Auslastung wird nun durch die Einfärbung der Straßenabschnitte und die Belastung durch

die Breite der Straßenabschnitte gekennzeichnet.

Die Werte für die Auslastung liegen immer zwischen null und eins. Der Wert null bedeutet, dass sich kein Auto auf diesem Straßenabschnitt befindet und der Wert eins, dass die Kapazität des Straßenabschnittes vollständig ausgelastet ist. Die Werte für die Belastung schwanken zwischen 0 und der maximalen Kapazität einer Zelle und sind daher nicht einheitlich für alle Zellen. Aufgrund der unterschiedlichen Einstellungsmöglichkeiten (z.B. Periodenlänge und Anzahl der Zellentypen) innerhalb der Software konnte keine einheitlich Farben- bzw. Straßenbreitendefinition gefunden werden, die für alle Evakuierungsszenarien eine gute Lösung darstellt. Es wurde daher unter den Optionen „Darstellung“ (siehe Abbildung 37) eine Möglichkeit eingerichtet, die Werte individuell festzulegen, sodass der Benutzer die Einstellungen individuell für ein Szenario anpassen kann.

Im oberen Bereich des Darstellungsfensters (siehe Abbildung 37) können die Ein-

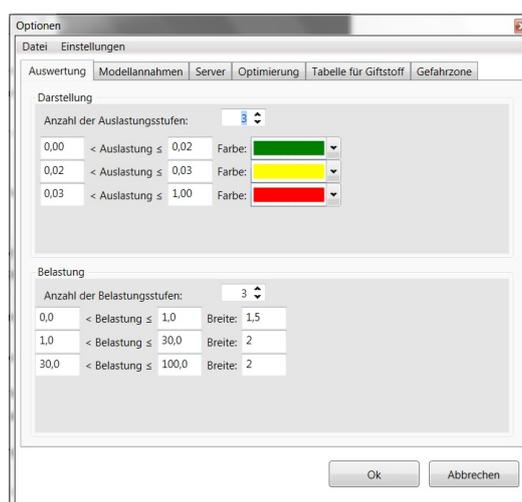


Abbildung 37: Darstellung des Optionsfensters: „Darstellung“

stellungen für die Darstellung der Auslastung angepasst werden. Zunächst muss der Benutzer die Anzahl der unterschiedlichen Auslastungsstufen festlegen. Jede Auslastungsstufe wird in der SPSE durch eine andere Farbe unterschieden. Es sind maximal sieben unterschiedliche Stufen auswählbar. Anschließend kann der Benutzer jeweils die obere Grenze für die unterschiedlichen Auslastungsstufen variieren. Die Eingabe wurde so angepasst, dass die untere Grenze der Stufe i immer der oberen Grenze der Stufe $i - 1$ entspricht. Dadurch wird sichergestellt, dass keine undefinierten Bereiche innerhalb der Auslastungsstufen vorliegen. Außerdem wurde festgelegt, dass die untere Grenze der niedrigsten Stufe immer 0 ist und die obere Grenze der höchsten Stufe immer 1 ist. Nachdem alle Grenzen der Auslastungsstufen festgelegt worden sind, kann der Benutzer die Farbe der jeweiligen Stufe individuell anpassen. Hier kann der Benutzer eine vorgeschlagene Farbe auswählen oder einen Farbcode mit Hilfe der

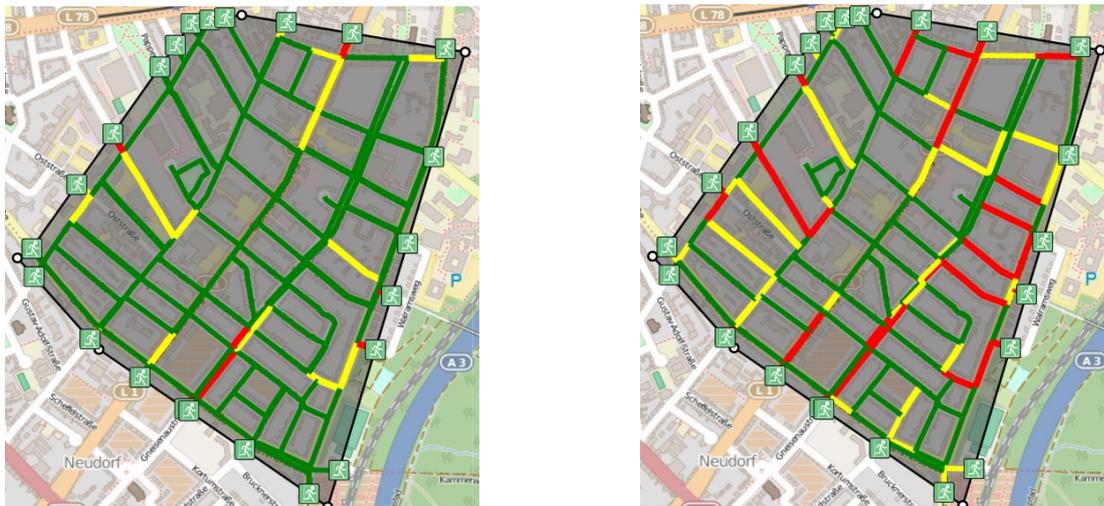


Abbildung 38: Beispiel zur Darstellung des identischen Evakuierungsplans mit unterschiedlicher Einstellung der Farb- bzw. Breitenparameter

RGB-Werte eingeben.

Die Bestimmung der Belastungsstufen erfolgt analog wie die Bestimmung der Auslastungszonen. Die einzelnen Stufen unterscheiden sich in der Darstellung nun nicht durch unterschiedliche Farben, sondern durch die unterschiedlichen Breiten der Straßen. Abschließend ist in Abbildung 38 jeweils der identische Evakuierungsplan dargestellt, welcher sich lediglich durch die verschiedenen Einstellungen der Farb- bzw. Breitenparameter unterscheidet. Der enorme Einfluss der Auswahl der Parameter ist offensichtlich.

Neben der visuellen Darstellung der Evakuierungskarte wurde zusätzlich ein Diagramm des Evakuierungsverlaufs in die Software integriert, welches die Anzahl der evakuierten Fahrzeuge in Abhängigkeit der abgelaufenen Zeit darstellt. Dieses Diagramm kann angezeigt werden, wenn das Feld „Evakuierungsverlauf anzeigen“ aktiviert wird. Wie in der Abbildung 39 zu erkennen ist, ist auf der y-Achse die kumulierte Anzahl der Autos zu sehen, die die gefährdete Zone zu der jeweiligen Periode verlassen haben und auf der x-Achse ist die jeweilige Periode dargestellt.

5.4 Speichern der Evakuierungsergebnisse

Für das Speichern der Ergebnisse existieren zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Zum einen kann die aktuelle Darstellung des Bildschirms (wie eine Art Screenshot im JPG-Format) gespeichert werden. Dafür muss nur das Feld „Bild speichern“ betätigt werden und ein Speicherort für das Bild ausgewählt werden. Zum anderen kann das vollständige Projekt gespeichert werden. Dadurch kann das Ergebnis wiederum mit der SPSE aufgerufen werden und die Ergebnisse können erneut dargestellt werden. Diese

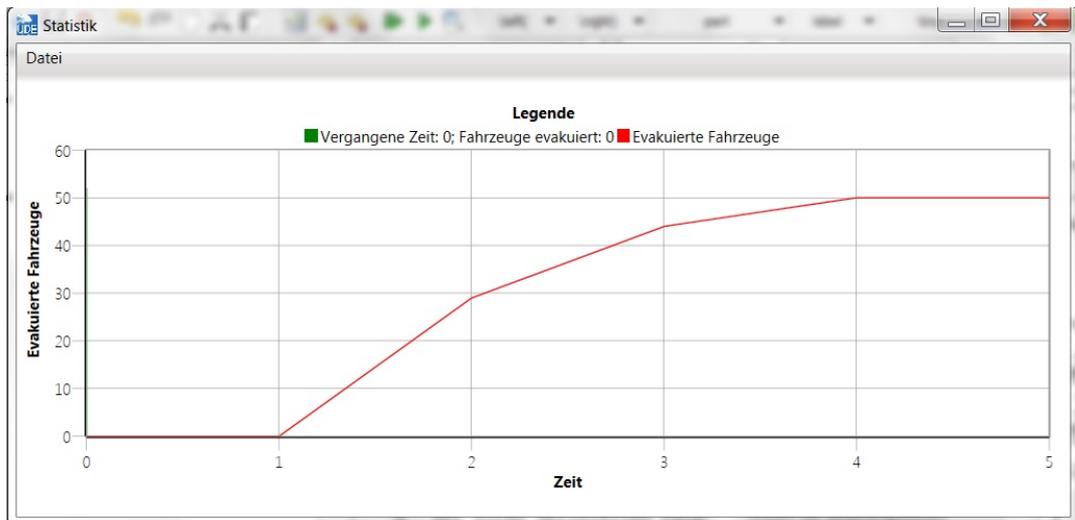


Abbildung 39: Darstellung des Optionsfensters: „Evakuierungsverlauf“

Option ist unter dem Reiter Projekt „Speichern“ anwählbar.

Alternativ werden die detaillierten Ergebnisse der Optimierung in der Sol-Datei gespeichert, die in dem Ordner „AMPL“ hinterlegt ist.

6 Schlussbemerkung: Praktische Einsetzbarkeit

Die SPSE ist für alle urbanen Stadtgebiete einsetzbar, die in den OSM-Karten hinterlegt sind. Inzwischen sind aber nahezu alle Städte der Welt sehr detailgetreu eingepflegt. Durch die hohe Flexibilität der SPSE können alle relevanten Parameter innerhalb der Software an die unterschiedlichen Gegebenheiten angepasst werden. Hier zählen z.B. die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten der einzelnen Straßen, die leicht an die landesspezifischen Gegebenheiten angepasst werden können.

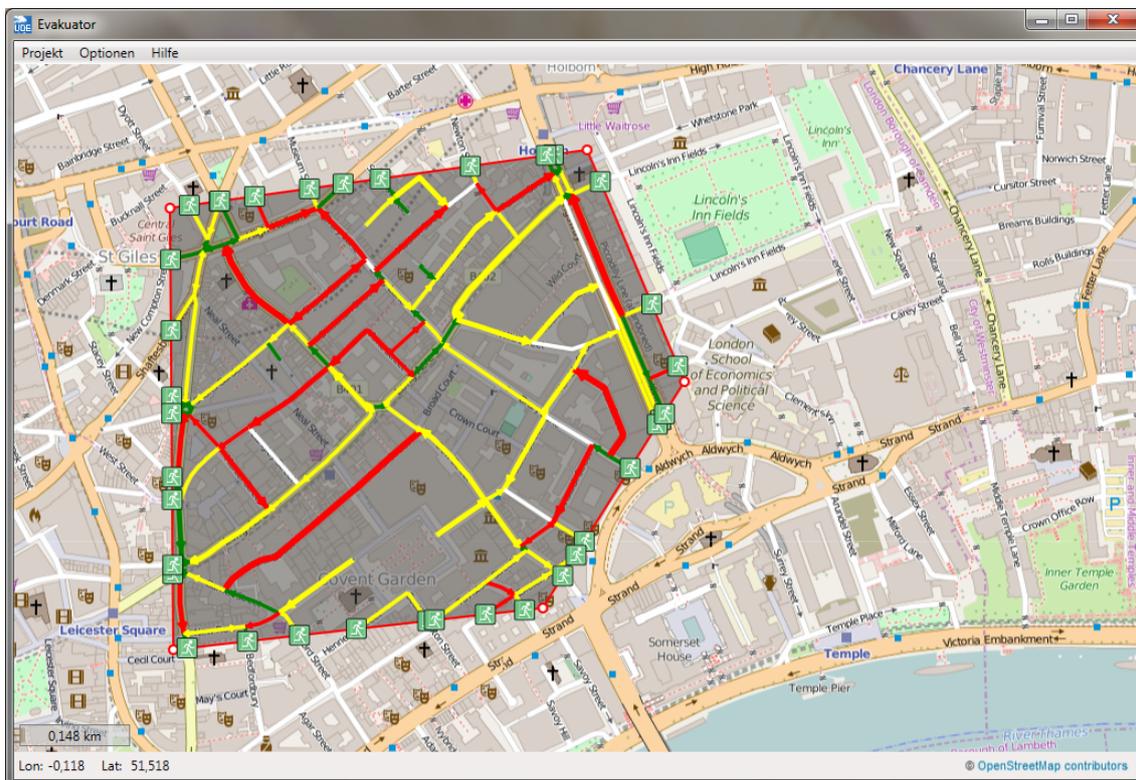


Abbildung 40: Evakuierungsplan für ein Szenario in London

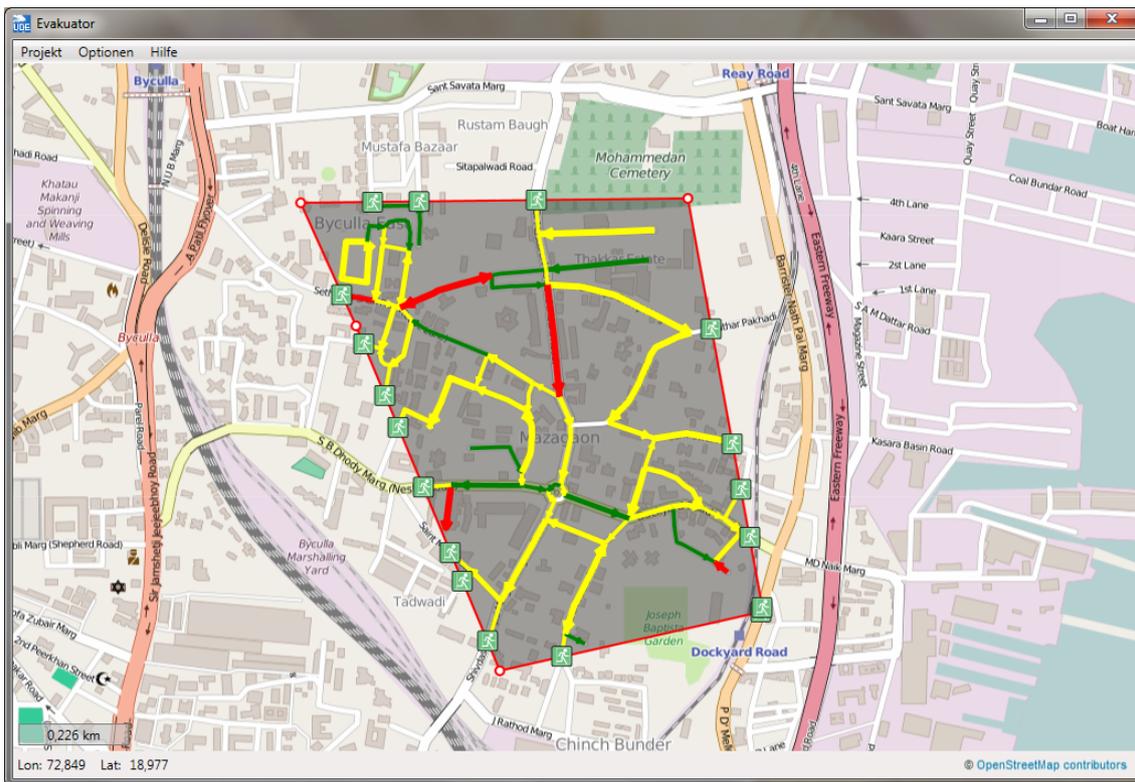


Abbildung 41: Evakuierungsplan für ein Szenario in Mumbai

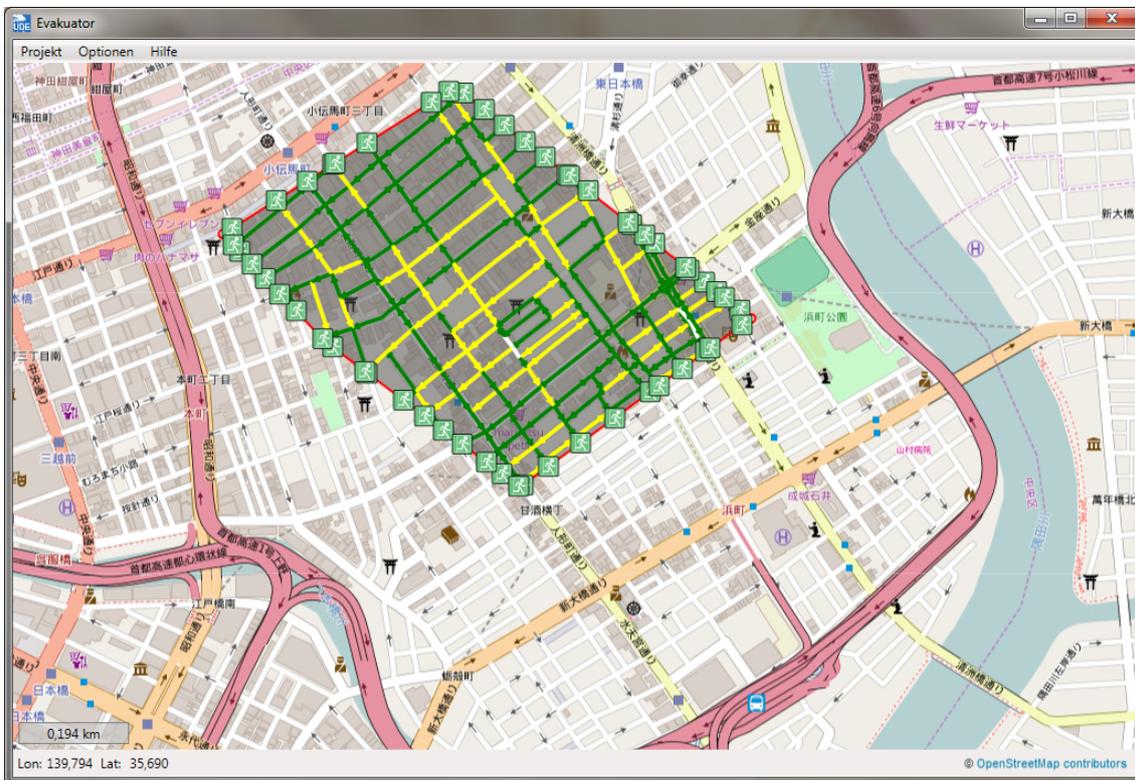


Abbildung 42: Evakuierungsplan für ein Szenario in Tokio

Die Abbildungen 40, 41 und 42 verdeutlichen beispielsweise die weltweite Einsetzbarkeit der Software anhand möglicherweise Evakuierungskarten für London, Mumbai und Tokio.

Durch die anwendungsfreundliche und intuitive Oberfläche kann die Software, nach kurzer Einweisung, von Praktikern verwendet werden. Somit kann die Software prinzipiell an Praktiker weitergegeben werden, sodass diese selbstständig Evakuierungspläne für beliebige Gebiete auf der Erde ermitteln können. Ein Problem ist allerdings, dass die SPSE zur Berechnung der Evakuierungspläne auf die Optimierungssoftware AMPL zurückgreift. Diese Software bzw. die Lizenz der Software kann vom Lehrstuhl nicht an Praktiker weitergegeben werden. Daher müsste ein Praktiker die Lizenz für diese oder eine andere Optimierungssoftware selbstständig erwerben. Des Weiteren kann der Lehrstuhl für die entwickelte Software keine Wartung durchführen und es können auch keine Schulungen für mögliche Anwendung durch den Lehrstuhl angeboten werden.

Die Software kann also durchaus für praxisrelevante Szenarien angewendet werden, allerdings müssen die oben genannten Einschränkungen beachtet werden.

Literatur

- [1] AMPL, (2015), <http://AMPL.com>, 30.09.2015.
- [2] Fourer, R., Gay, D.M., Kernighan, B.W., (2003), AMPL - A Modeling Language for Mathematical Programming, Thomson, Pacific Grove.
- [3] Barron, C., Neis, P., Zipf, A., (2013), iOSMAnalyzer ein umfassendes Werkzeug für intrinsische OSM Qualitätsuntersuchungen. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebener, G.(Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2013. Beiträge zum 25. AGIT-Symposium Salzburg, Heidelberg, VDE Wichmann Verlag, (im Druck).
- [4] Daganzo, C. F., (1994), The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory, Transportation Research Part B, Vol. 28, pp. 269-287.
- [5] Kimms, A., Maassen, K. C. (2011a), Optimization and Simulation of Traffic Flows in the Case of Evacuating Urban Areas. OR spectrum, 33(3), 571-593
- [6] Kimms, A., Maassen, K.-C., (2011b), Extended Cell-Transmission-Based Evacuation Planning in Urban Areas, Pesquisa Operacional, Vol. 31 , pp. 405-441.
- [7] Kimms, A., Maiwald, M., (2015), Bi-Objective Safe and Resilient Urban Evacuation Planning, submitted to European Journal of Operational Research.
- [8] Lighthill, M. J., Whitham, G. B. (1955), On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, Vol. 229, No. 1178, pp. 317-345. The Royal Society.
- [9] Maassen, K.-C., (2011) Optimizing and Simulating Evacuation in Urban Areas, PhD Thesis, University of Duisburg-Essen.
- [10] Ministry of Economy, Trade and Industry, (2005), <https://www.aistriss.jp/projects/METI-LIS/20050630METI-LIS%20Operation%20Manual.pdf>, 28.09.2015.
- [11] Mooney, P., Corcoran, P., Winstanley, A. (2010), A Study of Data Representation of Natural Features in Openstreetmap, Proceedings of GIScience (Vol. 150).
- [12] Neis, P., Zielstra, D., Zipf, A., Strunck, A., (2010), Empirische Untersuchungen zur Datenqualität von OpenStreetMap - Erfahrungen aus zwei Jahren Betrieb mehrerer OSM-Online-Dienste. In: Strobel, J., Blaschke, T., Griesebener,

- G.(Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2010. Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg, Heidelberg, VDE Wichmann Verlag, pp.44-51.
- [13] Neis, P., Zielstra, D., Zipf, A., (2012) The Street Network Evolution of Crowd-sourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007-2011, *Future Internet*, Vol. 4, pp. 1-21.
- [14] OpenStreetMap, (2015a), <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Portal:Press>, 30.09.2015.
- [15] OpenStreetMap, (2015b), <http://www.openstreetbugs.org>, 21.08.2015.
- [16] OpenStreetMap, (2015c), <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Research>, 01.09.2015.
- [17] Over, M., Schilling, A., Neubauer, S., Zipf, A., (2010), Generating web-based 3D City Models from OpenStreetMap: The current situation in Germany, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 34, pp. 496-507.
- [18] Roick, O., Neis, P., Zipf, A., (2011) Volunteered Geographic Information - Datenqualität und Nutzungspotentiale am Beispiel von OpenStreetMap, Kommission „Angewandte Kartographie - Geovisualisierung“ der Deutschen Gesellschaft für Kartographie (DGfK) - Symposium Königslutter.
- [19] Razi, K., Hiroshi, M., (2012), Modeling of Atmospheric Dispersion of Mercury from Coal-Fired Power Plants in Japan, *Atmospheric Pollution Research*, Vol. 3, pp. 226-237.
- [20] Ramm, F., Topf, J., (2009) *OpenStreetMap - Die freie Weltkarte nutzen und mitgestalten*, Lehmanns Media, Berlin, 2. Aufl.
- [21] Richards, P. I. (1956), Shock Waves on the Highway. *Operations research*, 4(1), pp. 42-51.
- [22] Schuster, A., Sattler, J., Hoffmann, S., (2012), Benötigen wir ein neues PKW-Bemessungsfahrzeug für den Entwurf von Anlagen für den ruhenden Verkehr, *Straßenverkehrstechnik*, Vol. 1, pp. 5-10.
- [23] Soden, V., Doiron, N., Meißer, M. (2011), OpenStreetMap - Nutzung des freien OSM-Projektes - nicht nur im Katastrophenfall, *Bevölkerungsschutz*, Vol. 3, pp. 18-23.
- [24] Universität Duisburg-Essen, (2013), Nix wie raus aus dem Gedränge, *Pressemittlung* vom 24. Januar 2013.

- [25] VDI-3782-1, (1992), Ausbreitung von Luftverunreinigungen in der Atmosphäre - Gaußsches Ausbreitungsmodell für Luftreinhaltepläne, Beuth Verlag, Berlin.
- [26] Westdeutsche Allgemeine Zeitung, (2013), Neudorf wäre in wenigen Minuten leer, Lokalteil Duisburg, 14.März 2013, pp.4.
- [27] Westfälische Nachrichten: Eine Million Kartenzeichner, Deutsche Presse Agentur, 17. Januar 2013.
- [28] Zielstra, D., Zipf, A., (2010), Quantitative Studies on the Data Quality of OpenStreetMap in Germany, Sixth International Conference GIScience 2010, Zuerich.