

Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät  
Geographisches Institut der Universität Zürich  
Abteilung Geographische Informationssysteme

---

# **Algorithmen zur automatischen Selektion von Strassennetzwerken**

**Lösungen für den Übergang vom Topografischen Landschaftsmodell  
(TLM) zu Massstab 1:50'000**

GEO511 – Masterarbeit

**Verfasser:**

Stefan A. Benz  
Matrikel- Nr.: 06-912-463

**Betreuer und Fakultätsvertreter:**

Prof. Dr. Robert Weibel  
Geographisches Institut der Universität Zürich

Eingereicht am: 30. August 2013

*“What do you call life dedicated to hockey? I call it time well spent.”*

Sidney Crosby

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, welche mich im Rahmen dieser Masterarbeit und allgemein während der Studienzeit tatkräftig, aber auch moralisch unterstützt haben.

Ein grosser Dank geht an Prof. Dr. Robert Weibel, der mir während der Masterarbeit als Betreuer zur Seite gestanden ist und mich mit seinem fachlichen Wissen unterstützt hat.

Weiter bedanke ich mich bei den Expertinnen und Experten bei swisstopo, insbesondere bei Dominik Käuferle, meiner ersten Ansprechperson bei swisstopo, aber auch Stefan Wullschleger, Daniel Josi und Marianne Berger für Ihre Unterstützung.

Meinen Eltern, die mir Das Studium ermöglicht haben und mit deren Unterstützung ich jederzeit rechnen konnte, gebührt ein besonderer Dank, ebenso meiner Schwester, Andrea.

Ein weiteres Dankeschön geht an Roy Weiss. Mit ihm zusammen wurde das Prinzip des 'Kreiseldetektionsalgorithmus' entwickelt. Weiter entstanden fruchtbare Diskussionen über den programmiertechnischen Teil der Arbeit. In diesem Zusammenhang gebührt ein weiterer Dank Oliver Zihler, der bei programmiertechnischen Problemen unterstützend zur Seite gestanden ist.

Zuletzt bedanke ich mich bei all meinen Freunden und bei der grossartigen Sportart des Eishockeys, die für die notwendige Ablenkung gesorgt haben.





# Zusammenfassung

Obwohl die automatische Generalisierung von Strassennetzwerken schon seit mehreren Jahrzehnten in der Forschung diskutiert wird, werden auch heute noch viele Generalisierungsarbeiten manuell getätigt, so auch bei swisstopo, dem Bundesamt für Landestopografie der Schweiz. Diese manuelle Arbeit ist zeitintensiv und teuer, vor allem in einer sich stets verändernden Umwelt.

Diese Arbeit fokussiert auf Algorithmen zur automatischen Selektion von Strassennetzwerken. In einer ersten Runde wurden drei aus der Literatur bekannte Algorithmen, ein Stroke-Ansatz, ein Maschen-Ansatz und ein integrierter Stroke-Maschen Kombinationsansatz in Java implementiert. Dabei wurden die Stärken und die Schwächen der Algorithmen herausgearbeitet um die Frage zu beantworten, welcher der drei Algorithmen die besten Ergebnisse produziert. Die Algorithmen wurden an insgesamt vier unterschiedlichen Testgebieten getestet. Als Datengrundlage diente das hochaufgelöste und detaillierte Topografische Landschaftsmodell 3D (TLM3D), eine räumliche Datenbank von swisstopo mit einem nominellen Massstab von ca. 1:5'000 bis 1:25'000. Das Ziel war die Erzeugung eines Strassendatensatzes für den Massstab 1:50'000. Als Basis für die Evaluierung der Resultate wurde in Zusammenarbeit mit swisstopo eine Reihe von Anforderungen definiert, denen die Ergebnisse genügen sollten. Dabei hat sich ergeben, dass der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz die besten Resultate erzielt. Im Gegensatz zum Stroke-Ansatz entstehen keine lokalen Unterbrüche und es werden keine neuen Sackgassen generiert. Weiter behandelt er, im Gegensatz zum Maschen-Ansatz, auch lineare Segmente (z.B. Sackgassen).

Obschon der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz die verhältnismässig besten Resultate erzielt hat, konnte auch er nicht alle Anforderungen zufriedenstellend erfüllen. Daher wurde in einer zweiten Runde analysiert, inwiefern weitere Regeln und Algorithmen die Selektionsresultate verbessern können. Dabei wurden insgesamt vier weitere Algorithmen aus den Daten des Strassennetzwerkes selbst abgeleitet und implementiert. Einer dieser Algorithmen betrifft eine veränderte Herangehensweise an die linearen Segmente im integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz, während die anderen drei Algorithmen neue Konzepte diskutieren. Unter anderem wird ein neuer Kreisel-Detektionsalgorithmus vorgestellt, welcher fähig ist, alle Kreisel in allen vier Testgebieten zu detektieren.

Zudem wurden zwei Algorithmen entwickelt und implementiert, welche externe Feature Klassen herbeiziehen. Die Verwendung von externen Feature Klassen bei der automatischen Selektion von Strassennetzwerken ist selten, birgt aber viel Potential, weil in ihnen zusätzliche Informationen vorhanden sind, welche das Strassennetzwerk alleine nicht bieten kann. Konkret wurde ein Algorithmus implementiert und ausgewertet, der sicherstellt, dass sogenannte POIs (*points of interest*) auch im generalisierten Resultat noch erschlossen sind. Weiter wurde mit Hilfe von Siedlungsgebieten ein Modell entwickelt, welches eine verhältnismässig ausgewogene Ausdünnung in urbanen Siedlungsgebieten und in ländlicheren Gebieten garantiert und damit die Strukturen besser erhält. Alle weiteren Regeln und Algorithmen wurden quantitativ und qualitativ ausgewertet. Durch die zusätzlichen Algorithmen konnten bessere Resultate erzielt werden. Schlussendlich wurden die finalen Generalisierungsergebnisse von KartographInnen der swisstopo evaluiert. Hierbei konnte eruiert werden, dass das finale Verfahren sehr gute Ergebnisse generiert und nur ca. 5 bis 10 % der Segmente manuell überarbeitet werden müssten.

# Summary

Even though automated generalization of road networks has been discussed in research for decades, much of the generalization process is still done manually. That is also the case for swisstopo, the national mapping agency of Switzerland. This manual work is time-consuming and expensive, especially in a rapidly changing environment.

This thesis focusses on algorithms for the automated selection of road networks. In a first round, three algorithms from the literature, a stroke-based approach, a mesh-based approach and an integrated stroke-mesh combination approach were implemented in Java. The aim was to gain knowledge about the strengths and weaknesses of the three algorithms and to answer the question of which one produces the best results. The algorithms were tested on four different test areas. As a basis, the topographical landscape model 3D (TLM3D) was used, a detailed spatial database with a high resolution and a nominal scale between 1:5'000 and 1:25'000. The aim was to derive a road network for the scale of 1:50'000. In order to evaluate the results, a set of requirements the results should fulfill was formulated in collaboration with swisstopo. It could be shown that the integrated stroke-mesh combination approach produces the best results. In contrast to the stroke-based approach, no roads are disconnected locally and no new dead-end roads appear. Furthermore, unlike the mesh-based approach, linear segments (e.g. dead-end roads) are handled, too.

Although, the integrated stroke-mesh combination approach generates the best results, not all of the requirements could be fulfilled satisfactorily. Hence, it was analyzed in a second round to what extent additional rules and algorithms can improve the selection results. For that matter, four additional algorithms were derived and implemented based on data extracted from the road network itself. One of these algorithms incorporates a different approach for handling the linear segments using the integrated stroke-mesh combination approach, while the other three algorithms discuss new concepts. Inter alia, a new roundabout-detection-algorithm is presented, which is able to detect all roundabouts in all four test areas.

Moreover, two algorithms were developed and implemented which use external feature classes. Although external feature classes for the automated selection of road networks are rarely used, they provide much potential because they contain additional information the road network alone cannot offer. Specifically, an algorithm was implemented which ensures that so called POIs (points of interests) are accessible even in the generalized result. Furthermore, a model was developed using settlement areas, which assures a proportionally balanced selection in urban settlement areas und rural areas in order to better retain the structures. All additional rules and algorithms were evaluated quantitatively und qualitatively. Better results could be achieved using the additional algorithms. Ultimately, the final generalization results were evaluated by swisstopo cartographers. It could be determined that the final methodology generates very good results and only about 5 to 10 % of the segments need to be revised manually.

# Inhalt

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>I</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>II</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>VI</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVATION UND PROBLEMSTELLUNG .....	1
1.2 ZIELSETZUNG.....	2
1.3 AUFBAU DER ARBEIT.....	3
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b> .....	<b>5</b>
2.1 FORSCHUNGSSTAND UND –KONTEXT.....	5
2.1.1 Prinzip der Generalisierung .....	5
2.1.2 Phasen der Generalisierung.....	6
2.1.3 Operatoren der kartographischen Generalisierung.....	7
2.1.4 Automatische Generalisierung .....	8
2.1.5 Automatische Selektion von Strassennetzwerken .....	9
2.1.5.1 Semantik-basierte Algorithmen .....	9
2.1.5.2 Graphen-basierte Algorithmen .....	10
2.1.5.3 Stroke-basierte Algorithmen.....	12
2.1.5.4 Weitere Algorithmen .....	12
2.2 FORSCHUNGSLÜCKEN.....	12
2.3 FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN .....	13
<b>3 DATENGRUNDLAGE UND ANFORDERUNGEN</b> .....	<b>15</b>
3.1 TOPOGRAFISCHES LANDSCHAFTSMODELL 3D (TLM3D) .....	15
3.2 KARTOGRAFISCHES REFERENZMODELL 25 (KRM25) .....	16
3.3 ANFORDERUNGSANALYSE .....	17
3.3.1 Constraint-basierte Generalisierung.....	17
3.3.2 Anforderungen .....	17
3.3.2.1 Harte Anforderungen.....	17
3.3.2.2 Weiche Anforderungen.....	18
3.3.3 Grad der Selektion .....	19
3.3.3.1 Wurzelgesetz von Töpfer .....	20
3.3.3.2 Expertenmeinungen von Fachpersonen der swisstopo .....	21
3.4 TESTGEBIETE .....	21
3.5 STRUKTUREN IN STRASSENNETZWERKEN .....	27
3.6 AVERAGE CONNECTIVITY .....	28
<b>4 BASISALGORITHMEN UND SOFTWARE PROTOTYP</b> .....	<b>29</b>
4.1 SOFTWARE TOOLS.....	29
4.2 GRAPH-DATENSTRUKTUR ALS GRUNDLAGE .....	30
4.3 SOFTWARE PROTOTYP .....	30
4.4 STROKES .....	33
4.4.1 Prinzip eines Strokes .....	33
4.4.2 Strokes als Mittel zur Generalisierung.....	34

4.4.3 Strategien der Stroke Generierung .....	34
4.4.3.1 Geometrischer Ansatz .....	34
4.4.3.2 Thematischer Ansatz .....	35
4.4.3.3 Hybrider Ansatz .....	35
4.4.3.4 Gewählter Ansatz im Prototyp .....	36
4.4.3.5 Wahl des Grenzwert-Winkels .....	36
4.4.4 Stroke-Algorithmus .....	38
4.4.4.1 Bildung von Strokes .....	38
4.4.4.2 Selektionskriterien .....	39
4.4.5 Resultate des Stroke-Ansatzes .....	40
4.4.6 Diskussion der Resultate .....	45
4.5 MASCHEN-ANSATZ .....	46
4.5.1 Definition der Masche .....	46
4.5.2 Die Maschendichte als Basis der Selektion .....	47
4.5.3 Entfernung der unbedeutendsten Flächensegmente in den Maschen .....	48
4.5.4 Maschen-Algorithmus .....	49
4.5.4.1 Graph mit Halbkanten als grundlegende Datenstruktur .....	50
4.5.4.2 Extrahierung der Maschen .....	51
4.5.4.3 Entfernung der Segmente .....	52
4.5.5 Resultate des Maschen-Ansatzes .....	53
4.5.6 Diskussion der Resultate .....	58
4.6 INTEGRIERTER STROKE-MASCHEN KOMBINATIONSANSATZ .....	59
4.6.1 Konstruktion von linearen Hierarchien .....	59
4.6.2 Konstruktion von Flächenhierarchien .....	60
4.6.3 Konstruktion von hybriden Hierarchien .....	60
4.6.4 Selektion durch Traversierung der integrierten Hierarchien .....	61
4.6.5 Integrierter Stroke-Maschen Kombinationsansatz im Prototyp .....	62
4.6.5.1 Aufbau und Traversierung der Hierarchien im Prototyp .....	62
4.6.5.2 Bestimmung der Maschendichte und des Stroke-Länge Grenzwertes .....	63
4.6.6 Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes .....	64
4.6.7 Diskussion der Resultate .....	69
4.7 PROBLEME DER BASISALGORITHMEN .....	70
<b>5 ERWEITERUNGEN DES INTEGRIERTEN KOMBINATIONSANSATZES .....</b>	<b>71</b>
5.1 TOP-DOWN VS. BOTTOM-UP ANSATZ IN LINEAREN HIERARCHIEN .....	71
5.1.1 Problem des Top-Down Ansatzes .....	71
5.1.2 Bottom-Up Ansatz .....	72
5.1.3 Erzielte Verbesserungen durch den Bottom-Up Ansatz .....	73
5.2 LINEARE HIERARCHIEN AN DICHTEN MASCHEN .....	75
5.2.1 Problematik bei linearen Hierarchien an dichten Maschen .....	75
5.2.2 Lösung durch Berechnung des kürzesten Pfades .....	76
5.2.2.1 A*-Algorithmus .....	77
5.2.2.2 Verbindung der linearen Hierarchien ins Netzwerk durch einen Stroke-Reconnection-Algorithmus .....	78
5.2.3 Erzielte Ergebnisse durch den Stroke-Reconnection-Algorithmus .....	79
5.3 BEHANDLUNG VON ISOLIERTEN STROKES .....	82
5.3.1 Problem der Ignorierung von isolierten Segmenten .....	82
5.3.2 Selektion isolierter Segmente .....	83
5.3.3 Erzielte Verbesserungen durch die Behandlung isolierter Strokes .....	84
5.4 KORRUPT E KREISEL .....	85
5.4.1 Auflösung von Kreiseln .....	85
5.4.2 Kreisel-Korrektur Algorithmus .....	86
5.4.2.1 Detektion von Kreiseln .....	87

5.4.2.2 Wiederherstellung von korrupten Kreisel.....	90
5.5 ERSCHLIESSUNG VON POIS .....	90
5.5.1 Definition POI und Datengrundlage .....	90
5.5.2 POI Erschliessungs-Algorithmus .....	91
5.5.3 Erzielte Verbesserungen des POI Erschliessungs-Algorithmus.....	93
5.6 STRUKTURERHALTUNG STADT-LAND .....	95
5.6.1 Problem der zu starken Ausdünnung in urbanen Gebieten .....	95
5.6.2 Einbezug von Siedlungsgebieten .....	97
5.6.2.1 Verteilung der Maschendichten in Siedlungs- und Landgebieten.....	98
5.6.2.2 Verhältnisse der Segmente und Segmentlängen in Siedlungs- und Landgebieten .....	98
5.6.3 Reduktion der Maschendichte mit konstantem Faktor .....	99
5.6.3.1 Optimaler Maschendichte-Faktor .....	100
5.6.4 Bestimmung von Siedlungsgebieten aus dem Strassennetzwerk.....	106
5.6.4.1 Dichte-Algorithmus .....	106
5.6.4.2 Wahl der optimalen Input-Parameter.....	108
<b>6 RESULTATE UND DISKUSSION .....</b>	<b>115</b>
6.1 RESULTATE .....	115
6.2 DISKUSSION .....	121
6.2.1 Evaluierungsmethoden.....	121
6.2.2 Quantitative Evaluierung.....	122
6.2.3 Qualitative Evaluierung durch swisstopo Fachpersonen .....	123
6.2.3.1 Testgebiet Zürcher Unterland .....	124
6.2.3.2 Testgebiet Winterthur Tösstal .....	125
6.2.3.3 Testgebiet Sursee.....	125
6.2.3.4 Testgebiet Engadin.....	126
6.2.3.5 Problembereiche.....	126
6.2.3.6 Gelungene Beispiele .....	129
6.2.3.7 Fazit.....	130
6.2.4 Wanderweg-Problematik .....	131
6.3 BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN .....	134
<b>7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....</b>	<b>139</b>
7.1 ERREICHTES .....	139
7.2 ERKENNTNISSE .....	140
7.3 FAZIT .....	141
7.4 AUSBLICK .....	141
<b>LITERATUR .....</b>	<b>143</b>
<b>ANHANG A .....</b>	<b>149</b>
<b>ANHANG B .....</b>	<b>153</b>
<b>ANHANG C .....</b>	<b>157</b>
<b>ANHANG D .....</b>	<b>161</b>
<b>PERSÖNLICHE ERKLÄRUNG.....</b>	<b>170</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Produktionsprozess von swisstopo .....	2
Abb. 2: Prinzip der Generalisierung .....	5
Abb. 3: Phasen der Generalisierung .....	7
Abb. 4: Klassifizierung der Generalisierungsoperatoren nach Spiess et al. (2002) .....	8
Abb. 5: Semantik-basierte Selektion von Strassensegmenten .....	9
Abb. 6: Beispiel eines Graphen .....	10
Abb. 7: Repräsentation eines primären Graphs und der dazugehörige duale Graph .....	11
Abb. 8: Entstehung eines Unterbruchs .....	18
Abb. 9: Vergleich zwischen einer erlaubten und einer nicht erlaubten Entfernung .....	18
Abb. 10: Das Prinzip einer Sammelstrasse .....	19
Abb. 11: Visualisierung des Wurzelgesetzes .....	20
Abb. 12: Testgebiet ZU .....	23
Abb. 13: Testgebiet WT .....	24
Abb. 14: Testgebiet SU .....	25
Abb. 15: Testgebiet EN .....	26
Abb. 16: Übersicht der GeoTools Bibliothek .....	29
Abb. 17: UML Klassendiagramm des Prototypen mit den wichtigsten Klassen .....	31
Abb. 18: Abbiegungswinkel $\alpha$ zwischen zwei Strassensegmenten .....	33
Abb. 19: Strokes aus dem Strassennetzwerk der Innenstadt von Zürich .....	33
Abb. 20: Prinzip der Generalisierung basierend auf der Selektion von Strokes .....	34
Abb. 21: Vier verschiedene Strassensegmente an einer Kreuzung .....	35
Abb. 22: Anzahl gebildeter Strokes in Abhängigkeit des Grenzwert-Winkels .....	37
Abb. 23: Problematik der Stroke-Generierung bei unterschiedlicher Wahl des Startsegments .....	38
Abb. 24: UML Aktivitätsdiagramm des implementierten Stroke-Ansatzes .....	39
Abb. 25: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet ZU .....	41
Abb. 26: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet WT .....	42
Abb. 27: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet SU .....	43
Abb. 28: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet EN .....	44
Abb. 29: Beispiel von Maschen in einem realen und in einem hypothetischen Netzwerk .....	46
Abb. 30: Prinzip der Fusionierung von Maschen nach Chen et al. (2009) .....	47
Abb. 31: Prinzip der Generalisierung mit dem Maschen-Ansatz .....	48
Abb. 32: UML Aktivitätsdiagramm des implementierten Maschen-Ansatzes .....	50
Abb. 33: Strassennetzwerk und dessen Abbildung auf einen Graphen mit Halbkanten .....	51
Abb. 34: Prinzip des Extrahierens einer Masche mit Halbkanten .....	51
Abb. 35: Äussere Masche in einem Graphen .....	52
Abb. 36: Prinzip des Mechanismus' von nicht entfernbaren Flächensegmenten in einer Masche .....	53
Abb. 37: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet ZU .....	54
Abb. 38: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet WT .....	55
Abb. 39: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet SU .....	56
Abb. 40: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet EN .....	57
Abb. 41: Konnektivität-Problematik des Maschen-Ansatzes .....	58
Abb. 42: Lineare Struktur und deren Übersetzung in die Baumhierarchie nach Li und Zhou (2012) .....	59
Abb. 43: Aufbau der räumlichen Hierarchie für flächenartige Strukturen nach Li und Zhou (2012) .....	60
Abb. 44: Prinzip der linearen Brücken und der Flächenbrücken nach Li und Zhou (2012) .....	61
Abb. 45: UML Aktivitätsdiagramm des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsalgorithmus .....	62
Abb. 46: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet ZU .....	65
Abb. 47: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet WT .....	66
Abb. 48: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet SU .....	67
Abb. 49: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet SU .....	68
Abb. 50: Entstehung von Sackassen in linearen Strukturen .....	69

Abb. 51: Konzeptionelle Problematik des Top-Down Ansatzes in linearen Hierarchien .....	72
Abb. 52: Illustrierung des Bottom-Up Ansatzes .....	73
Abb. 53: UML Aktivitätsdiagramm des Bottom-Up Ansatzes .....	73
Abb. 54: Verbesserte Resultate durch die Verwendung des Bottom-Up Ansatzes .....	74
Abb. 55: Zwei Beispiele von nicht selektierten linearen Strukturen an dichten (nicht erhaltenen) Maschen .....	76
Abb. 56: UML Aktivitätsdiagramm des A*-Algorithmus' von Hart et al. (1968) .....	78
Abb. 57: UML Aktivitätsdiagramm des Stroke-Reconnection-Algorithmus .....	79
Abb. 58: Beispiele der durch den SR-Algorithmus erzielten Verbesserungen (1).....	80
Abb. 59: Beispiele der durch den SR-Algorithmus erzielten Verbesserungen (2).....	81
Abb. 60: Isolierte Strokes .....	83
Abb. 61: UML Aktivitätsdiagramm für die Behandlung isolierter Strokes .....	84
Abb. 62: Vergleich der Resultate ohne und mit Behandlung isolierter Strokes.....	84
Abb. 63: Korrupter Kreisel .....	86
Abb. 64: Kreisel auf der Landeskarte 1:50'000 .....	86
Abb. 65: Stroke-Bildung bei Kreiseln und einfallenden Strassen .....	87
Abb. 66: UML-Aktivitätsdiagramm des Kreisel Detektions-Algorithmus .....	88
Abb. 67: Schlecht digitalisierter Kreisel und einfallender Stroke.....	89
Abb. 68: Falsch detektierter Kreisel.....	90
Abb. 69: UML Aktivitätsdiagramm des Kreisel Wiederherstellungs-Algorithmus .....	90
Abb. 70: POI Erschliessungs-Algorithmus .....	92
Abb. 71: Beispiele der Resultate des POI Erschliessungs-Algorithmus für die Testgebiete ZU und WT .....	93
Abb. 72: Beispiele der Resultate des POI Erschliessungs-Algorithmus für die Testgebiete SU und EN .....	94
Abb. 73: Beispiele von zu stark ausgedünnten Siedlungsgebieten.....	96
Abb. 74: Effekt der zu starken Ausdünnung in Siedlungsgebieten .....	97
Abb. 75: Testserie mit sechs verschiedenen Maschendichte-Faktoren.....	100
Abb. 76: Abhängigkeit des Verhältnisses der Anzahl resp. Länge der Segmente vom Maschendichte-Faktor (1).....	102
Abb. 77: Abhängigkeit des Verhältnisses der Anzahl resp. Länge der Segmente vom Maschendichte-Faktor (2).....	104
Abb. 78: Visualisierung der Similarity Werte für die vier Testgebiete .....	109
Abb. 79: Resultate des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet ZU.....	110
Abb. 80: Resultat des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet WT.....	111
Abb. 81: Resultat des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet SU.....	112
Abb. 82: Resultat des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet EN.....	113
Abb. 83: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet ZU.....	116
Abb. 84: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet WT.....	117
Abb. 85: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet SU.....	119
Abb. 86: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet EN.....	120
Abb. 87: Parallele Sackgassen.....	126
Abb. 88: Parallele Maschen .....	127
Abb. 89 Nicht selektierte intuitive Verbindungsstrasse (1) .....	127
Abb. 90: Nicht selektierte intuitive Verbindungsstrasse (2) .....	128
Abb. 91: Entfernte Abkürzung .....	128
Abb. 92: Parallele Strassen .....	129
Abb. 93: Gelungene Beispiele .....	130
Abb. 94: Entfernung wichtiger Strassen .....	132
Abb. 95: Selektion zusätzlicher Wanderwege.....	132
Abb. 96: Problematik der Strukturhaltung bei Berücksichtigung von Wanderwegen.....	133

# Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zusammenstellung der verschiedenen Objektklassen im TLM3D .....	15
Tab. 2: Attribute des KRM25 und deren Ausprägungen .....	16
Tab. 3: Harte Anforderungen und deren Übersetzung auf das KRM25 .....	17
Tab. 4: Weiche Anforderungen und deren Übersetzung auf das KRM25 .....	19
Tab. 5: Kennzahlen der vier Testgebiete.....	26
Tab. 6: Klassifikationsschema von Strassenstrukturen gemäss Li und Zhou (2012) .....	27
Tab. 7: Übersicht der wichtigsten Klassen im Prototypen .....	32
Tab. 8: Resultate des Stroke-Ansatzes für die Testgebiete ZU und WT .....	43
Tab. 9: Resultate des Stroke-Ansatzes für die Testgebiete SU und EN .....	44
Tab. 10: Resultate des Maschen-Ansatzes für die Testgebiete ZU und WT.....	56
Tab. 11: Resultate des Maschen-Ansatzes für die Testgebiete SU und EN.....	57
Tab. 12: Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für die Testgebiete ZU und WT.....	67
Tab. 13: Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für die Testgebiete SU und EN.....	68
Tab. 14: Veränderungen in den linearen Strukturen durch die Anwendung des Bottom-Up Ansatzes .....	75
Tab. 15: Klassierung der Knoten im A*-Algorithmus .....	77
Tab. 16: Veränderungen in den linearen Strukturen durch die Anwendung des SR-Algorithmus.....	82
Tab. 17: Veränderungen in den linearen Strukturen durch die Behandlung isolierter Strokes .....	85
Tab. 18: Vergleich der Maschendichten von Kreiseln und den restlichen Maschen .....	86
Tab. 19: Detektierte Kreisel .....	89
Tab. 20: POI Feature Klasse des Vector200 Datensatzes.....	91
Tab. 21: POIs in den Testgebieten .....	91
Tab. 22: Anzahl durch den POI Erschliessungs-Algorithmus erschlossene POIs .....	95
Tab. 23: Landcover Feature Klasse des Vector200 Datensatzes .....	98
Tab. 24: Kennzahlen zur Verteilung der Maschendichten in Siedlungs (SG)- und Landgebieten (LG).....	98
Tab. 25: Verhältniszahlen für Segmente in Siedlungs (SG)- und Landgebieten (LG).....	99
Tab. 26: Optimale Input Parameter für die vier Testgebiete .....	109
Tab. 27: Resultate des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (ZU und WT) .....	118
Tab. 28: Resultate des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (SU und EN) .....	121



# Abkürzungen

BU	Bottom-Up
DKM	Digitales Kartografisches Modell
EN	Engadin
FF	Forschungsfrage
H	Hypothese
IA	Integrierter Stroke-Maschen Kombinationsansatz
IS	Isolierte Strokes
KDE	Kernel Density Estimation
KRM	Kartografisches Referenzmodell
LG	Landgebiet
MA	Maschen-Ansatz
POI	Point of interest
SA	Stroke-Ansatz
SG	Siedlungsgebiet
SU	Sursee
SR	Stroke-Reconnection
TD	Top-Down
TG	Testgebiet
TLM	Topografisches Landschaftsmodell
WT	Winterthur Tösstal
ZU	Zürcher Unterland



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Problemstellung

Obwohl Ansätze und Regeln zur automatischen Generalisierung von Karten von grossen zu kleinen Massstäben schon seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts existieren (Brassel und Weibel 1998, Buttenfield und McMaster 1991), wird auch heute noch ein grosser Teil der Generalisierungsarbeit manuell getätigt, so auch bei swisstopo, dem Bundesamt für Landestopografie der Schweiz. Swisstopo ist für die schweizerische Landesvermessung verantwortlich und produziert und verwaltet räumliche Daten in verschiedenen Massstabebenen (swisstopo 2013a). Räumliche Datensätze werden bei swisstopo voneinander abgeleitet. So werden aus einem Datensatz mit grossem Massstab entsprechende Datensätze mit kleinerem Massstab generalisiert, an interaktiven Systemen mit teilweise halbautomatischer Computerunterstützung. Obwohl bereits Automatismen eingesetzt werden, ist ein grosser Teil dieser Arbeit immer noch manuell. Diese manuelle Bearbeitung ist sehr zeitaufwändig und daher teuer, vor allem in einer Umwelt die sich stetig ändert. So wird beispielsweise das topografische Landschaftsmodell (TLM) von swisstopo gemäss einem Nachführungszyklus von sechs Jahren aktualisiert und verbessert (swisstopo 2013b). Ein Ansatz, welcher eine automatische Generalisierung vornimmt und eine ähnlich gute Qualität erreicht wie die manuelle Generalisierung, kann daher Zeit und Kosten sparen, oder aber auch als Hilfsmittel für die manuelle Vor- oder Nachbereitung des Generalisierungsprozesses dienen. Idealerweise müsste nur noch der Datensatz mit dem grössten Massstab aktualisiert werden und alle kleineren Massstäbe könnten automatisch davon abgeleitet werden. Diese Vision besteht schon seit Jahrzehnten (Beard 1987), konnte sich aber bis heute noch nicht vollständig durchsetzen. Weiter wären mit einer automatischen Generalisierung auch kontinuierliche Übergänge zwischen verschiedenen Massstabebenen möglich, im Gegensatz zu der heutzutage üblichen Herangehensweise, bei denen räumliche Datensätze in verschiedenen diskreten Massstabebenen vorliegen (z.B. 1:10'000, 1:25'000; 1:50'000, 1:100'000, etc.).

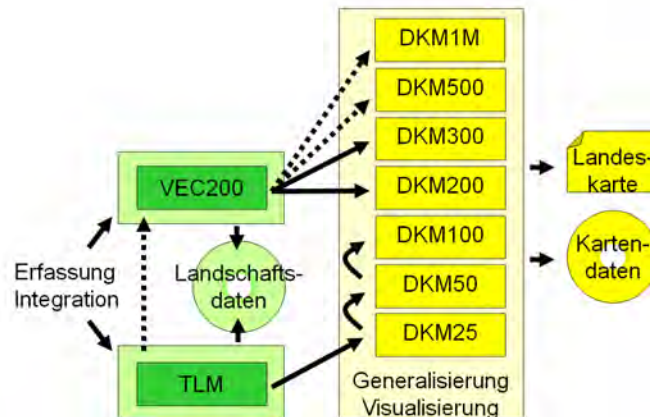
Das Strassennetzwerk ist in einem räumlichen Datensatz eines der wichtigsten Elemente (Zhang 2004, Touya 2010) und dessen Generalisierung wird als besonders herausfordernd betrachtet, da es sich um ein offenes und irreguläres Netzwerk handelt (DeLucia und Black 1987, Thomson und Richardson 1999, Thomson und Brooks 2000). Strassen sind stets miteinander verbunden und bilden ein kohärentes Netzwerk. Die Selektion von einzelnen Strassensegmenten ohne Betrachtung des ganzen Netzwerkes resultiert in Unterbrüchen. Weiter haben Strassen immer eine bestimmte Form, Länge und Ausrichtung und nicht nur einen Standort. Diese Faktoren machen die Generalisierung von Strassennetzwerken zu einem nicht-trivialen Prozess (Chaudhry und Mackaness 2005). Der Fokus in dieser Masterarbeit liegt in der Generalisierung, respektive in der *Selektion*<sup>1</sup> von Strassennetzwerken. Es ist der Prozess bei dem die wichtigeren Elemente (in diese Falle Strassen) beibehalten werden, währenddessen unwichtigere Strassen entfernt werden, wobei aber der Grundcharakter und die Strukturen (Zhang 2004, Touya 2010), sowie die essentiellen topologischen, geometrischen und semantischen Eigenschaften des Strassennetzwerkes erhalten werden sollten (Chen et al. 2009).

Bei swisstopo gibt es diverse verschiedene räumliche Datensätze und Produkte. Abb. 1 zeigt den zukünftig geplanten und teilweise schon umgesetzten Produktionsprozess und wie die einzelnen räumlichen Datensätze

---

<sup>1</sup> In der Schweizer Kartografie ist dafür auch der Begriff „Redaktion“ gebräuchlich.

miteinander in Beziehung stehen. Grün dargestellt ist einerseits das TLM (Topografisches Landschaftsmodell) und andererseits das Vector200 Modell. Beide Modelle sind Landschaftsmodelle, wobei das TLM in einem grossen Massstabsbereich von 1:5'000 bis 1:25'000 angesiedelt ist (swisstopo 2013b) und das das Vector200 Modell in einem kleinen Massstabsbereich von 1:200'000 (swisstopo 2013d). Gelb dargestellt sind die digitalen kartografischen Modelle (DKM) in verschiedenen Massstäben. Diese werden aus den beiden Landschaftsmodellen und voneinander abgeleitet und bilden die Basis für die Herstellung der effektiven Landeskarten und Kartendaten.



**Abb. 1: Produktionsprozess von swisstopo**

Grün dargestellt sind die Landschaftsmodelle (TLM, Vector200), welche die Basis für die Ableitung der digitalen kartografischen Modelle (DKM) in verschiedenen Massstäben bilden, aufgrund derer dann die Landeskarten und Kartendaten erstellt werden. *Quelle: swisstopo 2013f.*

Die Ableitung der einzelnen Produkte, insbesondere die Generalisierung von Strassennetzwerken, wird zurzeit bei swisstopo immer noch zu einem grossen Teil manuell bzw. teilweise halbautomatisch und interaktiv am Computer getätigt. Dieser Produktionsprozess könnte optimiert und effizienter gestaltet werden, falls weitere Teile davon automatisiert werden oder zumindest durch automatische Ansätze in der Vor- oder Nachbereitung unterstützt werden können. Dies ist das Ziel dieser Masterarbeit. Konkret werden Ansätze geprüft, weiter entwickelt und verbessert um eine automatische Selektion des Strassennetzwerkes vorzunehmen.

Prinzipiell stellt sich aber das Problem, ob die Selektion von Strassennetzwerken überhaupt erfolgreich automatisiert werden kann. Die Analyse der Fachliteratur (Kapitel 2) hat gezeigt, dass schon viele automatische Ansätze vorhanden sind (einige schon seit Jahrzehnten), sich aber kein Konzept gegenüber den Anderen wirklich behaupten konnte.

Weiter bietet die manuelle Generalisierung den Kartographinnen und Kartographen, welche die effektive Generalisierung, respektive Selektion, vornehmen, viel Flexibilität. So können in der Regel qualitativ hochstehende Resultate erzielt werden. Es stellt sich daher grundsätzlich die Frage, ob mit einem automatischen Ansatz überhaupt vergleichbare, qualitativ hohe, Resultate erzielt werden können, oder ob ein automatischer Ansatz nur unterstützend im Vor- oder Nachbereitungsprozess der manuellen Generalisierung dienen kann.

## 1.2 Zielsetzung

Die Ziele dieser Arbeit können in zwei Teilbereiche unterteilt werden:

**Teil 1** In einem ersten Schritt sollen drei automatische Ansätze zur Selektion von Strassennetzwerken aus der Fachliteratur implementiert werden (drei Basisalgorithmen), um deren Resultate zu prüfen und zu analysieren.

Es handelt sich dabei um den Stroke-basierten Ansatz von [Thomson und Richardson \(1999\)](#), den Maschen-basierten Ansatz von [Hu et al. \(2007\)](#) und [Chen et al. \(2009\)](#), sowie einen relativ neuen Ansatz von [Li und Zhou \(2012\)](#), einen integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz. Die Prüfung der Resultate erfolgt quantitativ und qualitativ. Dabei soll analysiert werden, inwiefern die Resultate grundlegende Anforderungen an das Resultat erfüllen, welche Ansätze sich gar nicht eignen und welche Ansätze zufriedenstellende Resultate erzielen.

**Teil 2** In einem zweiten Schritt soll derjenige Ansatz, welcher sich als am geeignetsten erwiesen hat, erweitert, sowie durch den Einbezug zusätzlicher Regeln und Constraints verbessert werden. Hierbei sollen neben dem Strassennetzwerk selbst auch andere Feature Klassen eingesetzt werden, um die Resultate zu optimieren beziehungsweise um die Anforderungen an das Resultat zu erfüllen. [Van Kreveld und Peschier \(1998\)](#) betonen, dass für eine erfolgreiche Generalisierung sowohl geometrische, topologische als auch semantische Information in den Prozess mit einbezogen werden müssen. Dieses Ziel soll verfolgt werden. Die finalen Resultate werden dann zusätzlich von swisstopo Expertinnen und Experten evaluiert.

Diese Masterarbeit erfolgte in Zusammenarbeit mit swisstopo. Swisstopo stellte einerseits die Datengrundlage zur Verfügung (siehe auch Kapitel 3), andererseits aber auch Expertinnen und Experten, welche unterstützend zur Seite standen. Der Fokus lag auf der Selektion von Strassennetzwerken auf Basis des TLMs der swisstopo für einen Zielmasstab von 1:50'000. Das TLM ist für einen Masstabsbereich zwischen 1:5'000 und 1:25'000 konzipiert ([swisstopo 2013b](#)). Der Masstabsprung zum Zielmasstab ist daher eher gering. Die Anforderungen, denen die Resultate genügen müssen und die auch als Basis für die Evaluation der Ergebnisse dienen, wurden in Zusammenarbeit mit Experten der swisstopo erarbeitet und basieren auf einem Regelwerk von [Spiess et al. \(2002\)](#).

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Nach der Einleitung in Kapitel 1 werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen, also der aktuelle Forschungsstand und –kontext, diskutiert. Darauf basierend werden die Forschungslücken ausgearbeitet, mit Hilfe derer die Forschungsfragen formuliert werden.

Kapitel 3 stellt die von swisstopo zur Verfügung gestellte Datengrundlage vor, sowie die Anforderungen denen die generierten Resultate genügen müssen.

In Kapitel 4 werden die drei Basisalgorithmen diskutiert. Einerseits wird die Implementation behandelt, andererseits aber auch die dadurch generierten Resultate analysiert und ausgewertet. Weiter werden die grundlegenden Probleme der Basisalgorithmen ausgearbeitet.

Kapitel 5 behandelt die intrinsischen (aus dem Strassennetzwerk selbst) und extrinsischen (aus anderen Feature Klassen) Erweiterungen und Verbesserungen, welche auf Basis des geeignetsten Basisalgorithmus implementiert wurden.

In Kapitel 6 werden die finalen Resultate sowohl qualitativ als auch quantitativ evaluiert. Die Evaluierung beinhaltet auch eine Beurteilung von swisstopo Expertinnen und Experten. Weiter werden die Forschungsfragen abschliessend diskutiert.

Die Arbeit endet in Kapitel 7 mit den Schlussfolgerungen und einem Ausblick auf noch offene Probleme und weitere mögliche Forschungsthemen.



# 2 Theoretische Grundlagen

## 2.1 Forschungsstand und -kontext

### 2.1.1 Prinzip der Generalisierung

Die Generalisierung von räumlichen Daten ist ein unscharfes Konzept (Brassel und Weibel 1988) und wird daher in der Literatur auch unterschiedlich beschrieben und definiert. Gemäss Buttenfield und McMaster (1991) bezweckt die Generalisierung räumliche Daten und geographische Informationen, welche auf einer grossen Skala erhoben worden sind, auf einer kleineren Skala dem Verwendungszweck entsprechend zu repräsentieren. Touya (2010) beschreibt die Generalisierung als Prozess, der versucht, geographische Daten aus einer geographischen Datenbank sinnvoll zusammenzufassen, so dass sie für eine weniger detaillierte Datenbank oder eine Karte mit kleinerem Massstab sinnvoll genutzt werden können. Jiang und Claramunt (2004) erklären die Generalisierung als Prozess, der die Komplexität von räumlichen Daten im Rahmen einer Skalenreduktion reduziert. Spiess et al. (2002) definieren die Generalisierung als die massstabgerechte inhaltliche und graphische Vereinfachung der komplexen Wirklichkeit auf der Grundlage digitaler Landschaftsmodelle, von Plänen oder Karten grösseren Massstabs. Der Prozess besteht hauptsächlich aus der zweckentsprechenden Auswahl und Zusammenfassung der Objekte, sowie der möglichst lagegenauen, charakteristischen, richtigen und eindeutigen graphischen Darstellung.

Abb. 2 verdeutlicht das Prinzip der Generalisierung anhand eines Beispiels mit zwei Karten, die verschiedene Massstäbe haben. Die linke Karte ist ein Ausschnitt der Landeskarte von swisstopo und stellt Zürich und die nähere Umgebung im Massstab 1:50'000 dar. Viele Details innerhalb der Stadt Zürich, vor allem im Strassennetzwerk, sind noch gut zu erkennen. Dem gegenübergestellt ist die rechte Karte, auch eine Landeskarte von swisstopo, welche Zürich und die Umgebung in einem kleinen Massstab (1:1'000'000) darstellt. Details sind keine mehr zu erkennen. Eine Navigierung innerhalb der Stadt Zürich ist mit dieser Karte nicht mehr möglich, weil nur noch die grobe Struktur dargestellt wird. Die Vereinfachung des Inhalts und der Struktur der Karte ist für einen kleinen Massstab aber zwingend notwendig um die Interpretation und Lesbarkeit zu garantieren (Töpfer und Pillewizer 1966).



**Abb. 2: Prinzip der Generalisierung**

Zürich auf zwei verschiedenen Landeskarten der swisstopo mit unterschiedlichen Massstäben (links: 1:50'000, rechts: 1:1'000'000). Die Karten sind nicht massstäblich wiedergegeben. *Quelle:* map.geo.admin.ch, Zugriff: 06.03.2013.

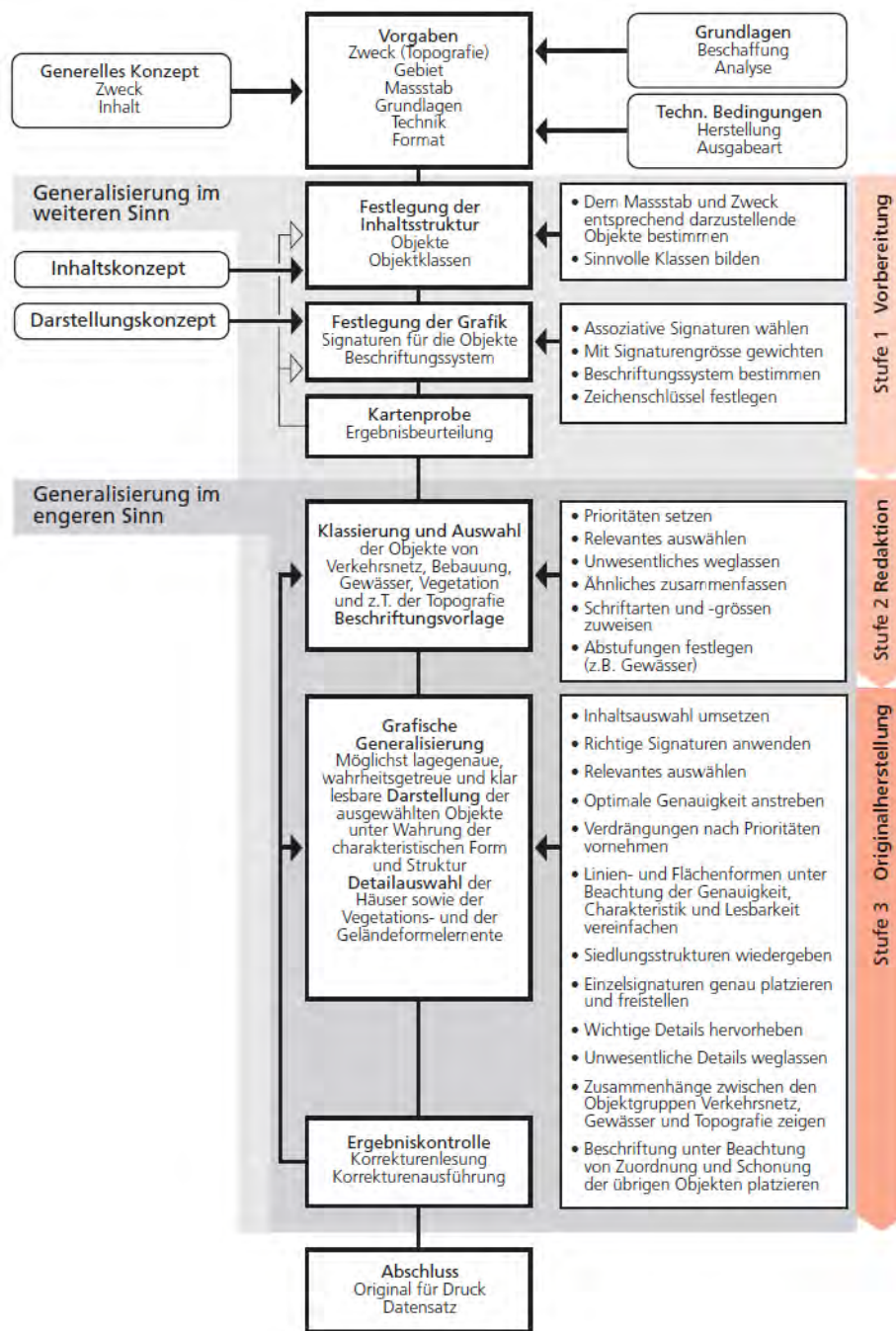
Die Generalisierung versucht nun die geographischen Daten (Strassennetzwerk, Flussnetzwerk, Seen, Gebäudeobjekte, Waldflächen, etc.) im grossen Massstab sinnvoll so zusammenzufassen und zu vereinfachen, dass sie auch für die Karte im kleinen Massstab zweckmässig darstellbar und lesbar sind. Die Generalisierung ist also ein Prozess, der versucht einen Kompromiss, zwischen einerseits der detaillierten und umfangreichen räumlichen Datenbank und andererseits der kartographischen Darstellung geographischer Information, zu finden. Das Ziel ist es, die kartographische Darstellung und Visualisierung der in den räumlichen Daten enthaltenen geographischen Informationen für eine gegebene Darstellungsform (z.B. eine Karte oder ein Display) und einen gegebenen Zweck (beispielsweise die Navigation) zu optimieren (Buttenfield und McMaster 1991).

### 2.1.2 Phasen der Generalisierung

Der Generalisierungsprozess kann gemäss Weibel (1995) in zwei Phasen eingeteilt werden: die Modellgeneralisierung und die kartographische Generalisierung. Die Modellgeneralisierung ist der kartographischen Generalisierung vorgelagert und umfasst das Filtern der Daten, respektive die Selektion oder die Entfernung von einzelnen Elementen bei einer sich ändernden Skala. In Abb. 2 sind z.B. kleinere Strassen innerhalb der Stadt Zürich im grossen Massstab noch dargestellt. Im kleineren Massstab wurden sie aber entfernt und werden nicht mehr dargestellt. Die kartographische Generalisierung hingegen beschäftigt sich mit der graphischen Repräsentation auf visueller Ebene. Dies umfasst diverse Aspekte, wie unter anderem die Vereinfachung einzelner Objekte, aber auch die Verschiebung von Objekten um eine einfachere Interpretation zu ermöglichen. Gut erkennbar ist die kartographische Generalisierung am Beispiel in Abb. 2. So sind z.B. die Strassen entlang des Zürichsee-Ufers in ihrer Form stark vereinfacht worden.

Spiess et al. (2002) beschreiben die Phasen mittels drei verschiedenen Stufen: (1) Vorbereitung, (2) Redaktion und (3) Originalherstellung. Die drei Phasen sind in Abb. 3 dargelegt. Die Phasen der Modellgeneralisierung und der kartographischen Generalisierung nach Weibel (1995) entsprechen grundsätzlich denen der Redaktion und der Originalherstellung.





**Abb. 3: Phasen der Generalisierung**

Die Phasen der Generalisierung können in drei Stufen unterteilt werden: (1) Vorbereitung, (2) Redaktion und (3) Originalherstellung. *Quelle: Spiess et al. 2002.*

### 2.1.3 Operatoren der kartographischen Generalisierung

Die verschiedenen Tätigkeiten der Generalisierung werden mit Hilfe von Generalisierungsoperatoren beschrieben. Die Klassierung ist aber je nach Autor unterschiedlich (Mackaness 1991, Spiess et al. 2002, Kraak und Ormeling 2003, Tyner 2010). Es gibt daher kein eindeutiges Schema.

Spiess et al. (2002) schlagen die in Abb. 4 ersichtliche Klassifikation vor. Insgesamt werden neun verschiedene Operatoren unterschieden.



**Abb. 4: Klassifizierung der Generalisierungsoperatoren nach Spiess et al. (2002)**  
(Grafik leicht verändert)

Der Fokus in dieser Arbeit liegt auf der automatischen Selektion von Strassennetzwerken (eine Kombination von „Relevantes auswählen“ und „Unwesentliches Weglassen“ gemäss Spiess et al. (2002)). Die anderen Operatoren werden nicht behandelt. Daher wird der Fokus der Diskussion in den folgenden Abschnitten auf die automatische Selektion von Strassennetzwerken gesetzt.

### 2.1.4 Automatische Generalisierung

Die Automatisierung des Generalisierungsprozesses wird schon seit Jahrzehnten, sowohl in der Wissenschaft, aber auch in der Industrie, erforscht (Buttenfield und McMaster 1991, Müller et al. 1995, AGENT 1998, Van Kreveld und Peschier 1998). Obwohl Ansätze und Regeln zur automatischen Generalisierung von räumlichen Daten schon seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts existieren (Brassel und Weibel 1988, Buttenfield und McMaster 1991), wird auch heute noch ein grosser Teil der Generalisierungsarbeit manuell getätigt, wie auch bei swisstopo, dem Bundesamt für Landestopografie der Schweiz. So werden aus einem Datensatz mit grossem Massstab entsprechende Datensätze mit kleinerem Massstab generalisiert. Obwohl bei swisstopo Automatismen vereinzelt bereits eingesetzt werden ist die manuelle Bearbeitung sehr zeitaufwändig und teuer, vor allem in einer Umwelt die sich stetig ändert und Datensätze daher oft aktualisiert werden müssen. Ein Ansatz, der vermehrt auf eine automatische Generalisierung setzt kann daher Zeit und Kosten sparen, oder aber auch als Hilfsmittel für die manuelle Vor- oder Nachbereitung des Generalisierungsprozesses dienen.

Idealerweise führt die automatische Generalisierung dazu, dass bei einer sich verändernden Umwelt nur noch der Grundlagen-Datensatz im grössten Massstab verändert werden muss und alle kleineren Massstäbe nicht manuell, sondern automatisch davon abgeleitet werden können (Jiang und Claramunt 2004). Weiter vorstellbar sind dann auch kontinuierliche Übergänge zwischen verschiedenen Massstabsebenen. Heutzutage ist es üblich, dass nur für bestimmte, festgesetzte Massstäbe Karten produziert werden (z.B. 1:10'000, 1:25'000, 1:50'000, etc.). Die Vision einer einzelnen Datenbank mit einem grossem Massstab, aufgrund derer Datensätze für kleinere Massstäbe automatisch abgeleitet werden können, existiert schon seit über 25 Jahren (Beard 1987), ist aber bis heute noch nicht vollständig und zufriedenstellend gelöst. Die grosse Herausforderung liegt darin die

geometrische, topologische und semantische Konsistenz und damit den Grundcharakter und die allgemeine Struktur zwischen zwei Datensätzen mit verschiedenen Massstäben sicherzustellen (Mackaness 1995).

### 2.1.5 Automatische Selektion von Strassennetzwerken

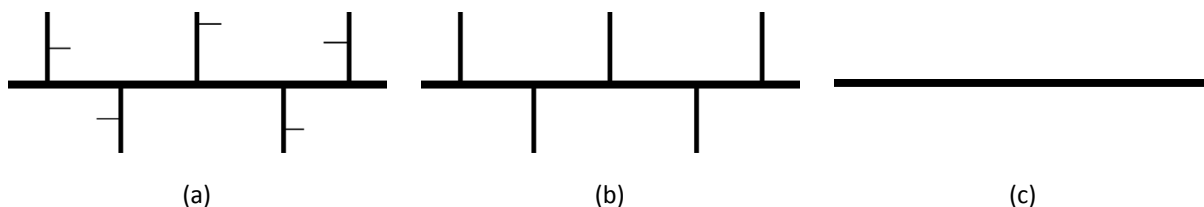
Die Selektion von Strassen aus einem Strassennetzwerk ist ein grundsätzlicher Generalisierungs-Operator (van Kreveld und Peschier 1998) und eine Voraussetzung für andere Operationen, wie z.B. der Vereinfachung der Form der Strassen (Jiang und Harrie 2004, Liu et al. 2010). Es ist ein Prozess, bei dem die wichtigeren Strassen bei einem kleiner werdenden Massstab selektiert werden, währenddessen weniger wichtige Strassen entfernt werden und somit der Detaillierungsgrad reduziert wird, wobei aber der Grundcharakter und die Strukturen (Zhang 2004, Touya 2010), sowie die essentiellen topologischen, geometrischen und semantischen Eigenschaften des Netzwerkes beibehalten werden sollten (Mackaness 1995, Chen et al. 2009). Es muss also entschieden werden, welche Strassen in einem kleineren Massstab für einen bestimmten Zweck noch dargestellt werden sollen und welche nicht und wie man den Voraussetzungen der Charakter- und Strukturhaltung gerecht wird. Hierzu müssen die Strassen gemäss einem oder mehreren Kriterien gemäss ihrer Wichtigkeit geordnet werden.

Die automatische Generalisierung von Strassen ist ein umfangreicher und komplexer Prozess, bei dem, wie bereits dargelegt, vielfältige Aspekte beachtet werden müssen. Er wird daher in der aktuellen Forschung breit diskutiert.

Es existieren diverse Algorithmen zur automatischen Selektion von Strassen. Liu et al. (2010) unterteilen sie in drei grundlegende Gruppen: (1) Semantik-basierte Algorithmen, (2) Graphen-basierte Algorithmen und (3) Stroke-basierte Algorithmen. Alle drei Prinzipien weisen spezifische Vor- und Nachteile auf und werden in den folgenden Abschnitten diskutiert.

#### 2.1.5.1 Semantik-basierte Algorithmen

Die automatische Selektion von Strassensegmenten mit semantik-basierten Methoden ist das einfachste Konzept der drei Gruppen. Es beruht darauf, dass Strassensegmente aufgrund der relativen Wichtigkeit ihrer semantischen Attribute für einen kleineren Massstab selektiert oder entfernt werden (Zhang 2005). Mögliche Attribute sind die Strassenklasse (Autobahn, Autostrasse, Hauptstrasse, Nebenstrasse, etc.) oder auch die Anzahl Spuren (Jiang und Claramunt 2004). Abb. 5 zeigt ein hypothetisches und veranschaulichendes Beispiel. Abb. 5(a) repräsentiert das ungeneralisierte Strassennetzwerk mit Strassensegmenten die in eine von drei, gemäss ihrer Wichtigkeit sortierbaren, Attributklassen eingeteilt sind. In einem ersten Schritt werden für einen kleineren Massstab alle Strassensegmente selektiert, welche zur ersten oder zweiten Klasse gehören. Segmente, die zur dritten Attributklasse und daher zur unwichtigsten gehören, werden entfernt (Abb. 5(b)). In einem nächsten Schritt, bei noch kleiner werdendem Massstab, werden dann nur noch die Strassensegmente der ersten Klasse selektiert und alle Strassensegmente der zweiten Klasse werden entfernt (Abb. 5(c)).



**Abb. 5: Semantik-basierte Selektion von Strassensegmenten**

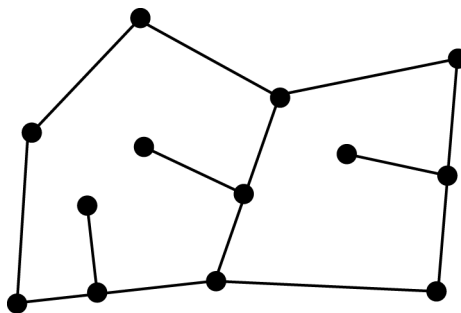
Die unterschiedliche Dicke der Linien symbolisiert die Attributzugehörigkeit der Strassensegmente. Dünne Linien widerspiegeln Attribute mit geringer Wichtigkeit und dicke Linien repräsentieren Attribute mit grösserer Wichtigkeit. Mit kleiner werdendem Massstab werden nur noch Strassensegmente mit relativ wichtigen Attributen selektiert.

Dieses Prinzip ist konzeptionell sehr einfach, weist aber diverse Nachteile auf. Semantik-basierte Algorithmen sind stets von der Verfügbarkeit sinnvoller Attributstrukturen in den räumlichen Datensätzen abhängig,

aufgrund derer eine sinnvolle Selektion getätigt werden kann. Aber selbst wenn diese vorhanden sind ergeben sich Probleme. Das Prinzip, wie es in [Abb. 5](#) dargelegt ist, ist stark vereinfachend, weil bei jedem Schritt einfach alle Strassensegmente der kleinsten übrig gebliebenen Attributklasse nicht mehr selektiert werden. Möchte man aber nun die Strassensegmente in einem räumlichen Datensatz für einen Zielmassstab, der irgendwo zwischen dem in [Abb. 5\(a\)](#) und [Abb. 5\(b\)](#) angesiedelt ist, selektieren, stellt sich die Frage, welche Strassensegmente der kleinsten Klasse selektiert werden und welche nicht. Diese Entscheidung kann dann aber nicht mehr mit Hilfe der Attribute getätigt werden. Es bräuchte also noch weitere Entscheidungskriterien, die unabhängig von der Semantik sind. Zudem beachten rein semantik-basierte Algorithmen keine weiteren Informationen, die im Strassennetzwerk vorhanden sind, wie beispielsweise die Geometrie oder auch die Topologie. Diverse Forscher ([Liu et al. 2003](#), [Ai 2007](#)) haben gezeigt, dass die Vernachlässigung solcher Informationen zu ungenügenden Resultaten führt.

### 2.1.5.2 Graphen-basierte Algorithmen

Die Gruppe der Graphen-basierten Algorithmen basiert auf der Abbildung eines Strassennetzwerkes auf einen Graphen. Ein Graph  $G(K, E)$  kann abstrakt definiert werden als eine endliche Menge  $K$  von Knoten,  $k = \{k_1, k_2, k_3, \dots\}$ , und eine endliche Menge  $E$  von Paaren von Knoten,  $e = \{(k_i, k_j), (k_k, k_l), \dots\}$ , bezeichnet als Kanten. Mit Hilfe eines Graphen können Beziehungen und Verbindungen zwischen Paaren der Menge aller Knoten modelliert werden ([Goodrich et al. 2004](#)). [Abb. 6](#) zeigt einen Graphen visuell. Die Punkte repräsentieren Knoten und die Verbindungen zwischen den Knoten widerspiegeln die Kanten. Die Graphen-Theorie ist ein Gebiet der Mathematik und der theoretischen Informatik. Für eine ausführliche Diskussion der Struktur und Algorithmen von Graphen sei auf [Goodrich et al. \(2004\)](#) oder [Wilson \(1979\)](#) verwiesen.



**Abb. 6: Beispiel eines Graphen**

Ein Graph weist einerseits Knoten (symbolisiert durch Punkte) auf und andererseits Kanten (symbolisiert durch die Verbindungen zwischen den Knoten), welche jeweils zwei Knoten miteinander verbinden.

**Primärer Ansatz** Die Abbildung eines Strassennetzwerkes auf einen Graphen erfolgt im primären Ansatz so, dass einzelne Strassensegmente die Kanten bilden und dort wo sich verschiedene Strassensegmente kreuzen oder die Attribute ändern ein Knoten gesetzt wird. Der grosse Vorteil der Abbildung von Strassennetzwerken auf Graphen ist, dass man Eigenschaften von Strassennetzwerken direkt mit Hilfe von bewährten Algorithmen aus der Graphen-Theorie ableiten kann ([Mackaness und Beard 1993](#)) und geometrische und topologische Konzepte behandelt werden können ([Jiang und Harrie 2004](#)).

Die Anwendung von primären Graphen in der Generalisierung von Strassennetzwerken ist weit verbreitet. [Mackaness und Beard \(1993\)](#) und [Mackaness \(1995\)](#) nutzen die Graphen-Theorie um einfache Strukturen aus Strassennetzwerken zu extrahieren und Aspekte der Konnektivität zu analysieren, welche im Generalisierungsprozess verwendet werden können. So impliziert ein Knoten mit einem Grad von 1 (der Grad eines Knotens ist definiert über die Anzahl Kanten an diesem Knoten) z.B. eine Sackgasse. Weiter kann in einem Zyklus (definiert als Folge von Kanten dessen Start- und Endknoten identisch sind) eine Kante entfernt werden, ohne dabei eine Kante, respektive ein Strassensegment, zu isolieren.

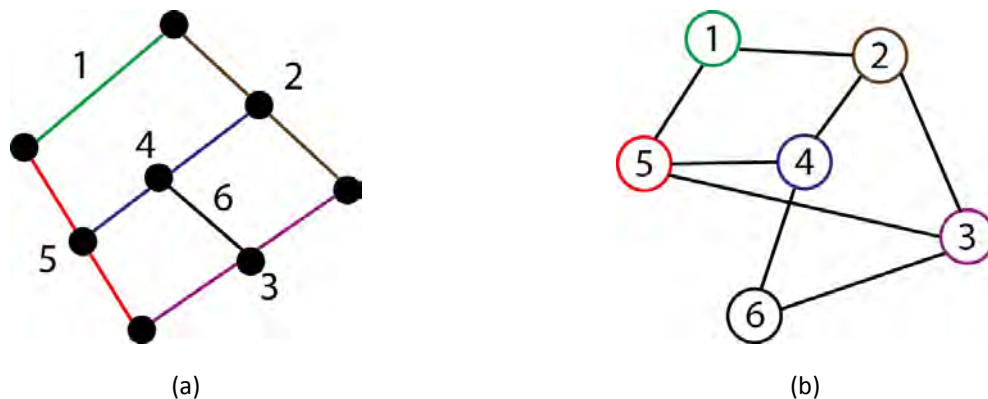


Thomson und Richardson (1995) nutzen das Konzept des minimalen Spannbaums um verhältnismässig wichtige Strassensegmente innerhalb eines Strassennetzwerkes zu selektieren. Ein Spannbaum ist definiert als ein Baum (ein zusammenhängender zyklusfreier Graph), der jeden Knoten eines verbundenen Graphen beinhaltet und ein minimaler Spannbaum ist ein Spannbaum mit dem kleinsten totalen Gewicht der Kanten (Goodrich et al. 2004). Die Gewichtung der Kanten widerspiegelt die Wichtigkeit eines Strassensegmentes. Ein einfaches Beispiel wäre die Länge eines Strassensegmentes. Es gibt aber weitere mögliche Arten die einzelnen Kanten zu gewichten. Morisset und Ruas (1997) beispielsweise modellieren die Wichtigkeit in Abhängigkeit des „Strassengebrauchs“.

Chaudhry und Mackaness (2005) generieren Strokes (Verkettung von Strassensegmenten), die dem Prinzip der *Good Continuation* folgen, auf der Basis eines Graphen. Das Prinzip der Strokes bildet auch eine Grundlage für diese Arbeit und wird daher ausführlich in Abschnitt 4.4 diskutiert.

Van Kreveld und Peschier (1998) bilden Stassennetzwerke auf Graphen ab um räumliche Konflikte zwischen Strassensegmenten zu analysieren und behandeln weitere Konzepte der Graphen-Theorie, wie z.B. Dijkstra's Kürzester Pfad Algorithmus um sicherzustellen, dass wichtige Objekte erschlossen sind. Das Prinzip des kürzesten Pfades in einem Graphen ist auch Teil dieser Arbeit und wird ausführlicher in Abschnitt 5.2.2 diskutiert.

**Dualer Ansatz** Der duale Graph verwendet einen anderen Abbildungsmechanismus. So werden im dualen Graph ganze Strassen auf Knoten abgebildet und falls sich zwei Strassen kreuzen wird zwischen diesen Strassen, respektive Knoten, eine Kante gesetzt (Porta et al. 2006). Abb. 7 verdeutlicht dieses Prinzip. Abb. 7(a) ist ein hypothetisches Strassennetzwerk, abgebildet auf einen primären Graphen. Abb. 7(b) zeigt den entsprechenden dualen Graph. Die Strassen, repräsentiert mit Nummern und verschiedenen Farben in Abb. 7(a) (welche aus mehreren einzelnen Strassensegmenten bestehen können) werden beim dualen Graphen in Abb. 7(b) mit Knoten modelliert und die Kanten repräsentieren die Kreuzungen zwischen zwei Strassen.



**Abb. 7: Repräsentation eines primären Graphs und der dazugehörige duale Graph**

Die Zahlen und die verschiedenen Farben in (a) repräsentieren Strassen. Die Zahlen in (b) sind die auf Knoten abgebildeten Strassen und die Kanten in (b) sind die Verbindungen der einzelnen Strassen.

Duale Graphen eignen sich insbesondere für strukturelle Analysen mit Fokus auf topologische Beziehungen. Jiang und Claramunt (2004) extrahieren drei Zentralitätsmasse aus dem dualen Graphen: (1) Grad, (2) Closeness und (3) Betweenness. Alle drei Masse können bei der Selektion von Strassensegmenten behilflich sein, da sie die relative Wichtigkeit der Strassen modellieren.

Der **Grad** (oder die Konnektivität) eines Knotens im dualen Graphen, definiert über die Anzahl Kanten am betreffenden Knoten, analysiert die lokale Konnektivität der Strasse. Strassen mit hohem Grad und deshalb besserer Konnektivität sind Strassen von grösserer Wichtigkeit und werden daher eher selektiert. Ersichtlich ist

dieser Sachverhalt auch in [Abb. 7\(b\)](#). Die Strassen mit der Nummer 4 und 3 haben den höchsten Grad aller Knoten, nämlich einen Grad von 3 (kreuzen sich also mit 3 anderen Strassen).

Die **Closeness** für einen Knoten im dualen Graphen berechnet die kleinste Anzahl Kanten von einem Knoten zu allen anderen Knoten und widerspiegelt daher die kürzeste Distanz vom betreffenden Knoten zu allen anderen Knoten. Die Closeness reflektiert also wie weit eine Strasse von allen anderen Strassen entfernt ist. Je näher ein Knoten zu allen anderen Knoten ist, desto besser ist er in das Strassennetzwerk eingegliedert und desto eher wird die Strasse für einen kleineren Massstab selektiert.

Die **Betweenness** misst wie oft ein Knoten innerhalb eines Pfades zwischen zwei anderen Knoten ist. Knoten mit einer hohen Betweenness liegen folglich oft innerhalb eines Pfades zwischen zwei anderen Knoten und haben deshalb die Rolle einer Brücke und werden daher bei einer Selektion für einen kleineren Massstab bevorzugt.

### 2.1.5.3 Stroke-basierte Algorithmen

Das Prinzip der Strokes wurde von [Thomson und Richardson \(1999\)](#) eingeführt. Ein Stroke ist eine Kette von Strassensegmenten, welche dem Prinzip der *Good Continuation* folgt. Die Stroke-basierten Algorithmen bilden auch die Basis für diese Arbeit und werden daher ausführlicher in Abschnitt 4.4 diskutiert.

### 2.1.5.4 Weitere Algorithmen

Eine weitere Gruppe von Algorithmen bilden die agenten-basierten Methoden von [Lamy et al. \(1999\)](#). Ein Agent kann als eine Sammlung von einfachen Operationen verstanden werden, die in einer koordinierten Art und Weise zusammen mit anderen Agenten ein Ziel anstreben. Metaphorisch betrachtet funktioniert ein Agent in einem Multi-Agenten System wie eine Ameise in einem Ameisenhaufen. Der Agent leistet individuelle Aufgaben, strebt aber mit anderen Agenten ein gemeinsames Ziel an. Übertragen auf den kartographischen Design-Prozess in der Generalisierung löst ein Agent lokale Design-Probleme und die Menge aller Agenten die globalen Design-Probleme. [Morisset und Ruas \(1997\)](#) nutzten das Prinzip der agenten-basierten Algorithmen für die Selektion von Strassennetzwerken. Sie evaluierten die Wichtigkeit von Strassen in Abhängigkeit davon wie oft sie genutzt werden anhand einer agenten-basierten Simulation.

Ein relativ neuer Ansatz von [Hu et al. \(2007\)](#) und [Chen et al. \(2009\)](#) beruht auf der Verwendung der Maschendichte. Hierfür werden in einem Strassennetzwerk die sogenannten Maschen extrahiert und deren Dichte, definiert über das Verhältnis aus Umfang und Fläche, berechnet. Maschen in einem Strassennetzwerk können als „Häuserblocks“ verstanden werden und bestehen konzeptionell aus den kleinsten Subregionen in einem Strassennetzwerk, die von einzelnen Strassensegmenten umgeben sind. Die Dichte der Masche dient als Grundlage zur Selektion. Strassensegmente, die zu einer Masche mit einer sehr grossen Dichte gehören, sind im Selektionsprozess dann potentielle Kandidaten für eine Entfernung. Der Maschen-Ansatz bildet auch eine Basis für diese Arbeit und wird daher ausführlicher in Abschnitt 4.5 diskutiert.

[Zhou \(2012\)](#) und [Li und Zhou \(2012\)](#) haben die Prinzipien der Stroke- und Maschen-basierten Algorithmen kombiniert und dabei vielversprechende Resultate generiert. Auch diese Kombination dient als Basis für diese Arbeit und wird daher in Abschnitt 4.6 ausführlicher diskutiert.

## 2.2 Forschungslücken

Die meisten Ansätze aus der Fachliteratur verwenden im Selektionsprozess ausschliesslich nur das Strassennetzwerk und beachten andere Feature Klassen nicht. Es gibt zwar vereinzelte Ansätze, welche andere Feature Klassen verwenden, doch sind sie, soweit dem Autor bekannt, eher selten. So hat [Touya \(2010\)](#) z.B. einen Ansatz von [Thomson und Richardson \(1995\)](#) aufgegriffen, bei dem wichtige Strassen mit Hilfe von kürzesten Pfaden zwischen sogenannten *attraction points* extrahiert werden. Diese *attraction points* wurden aber direkt einem Knoten im Graphen des Strassennetzwerkes zugewiesen, sind im expliziten Sinne daher nicht extern. Insbesondere in der Forschung etablierte Algorithmen, wie der Stroke-Ansatz von [Thomson und](#)

Richardson (1999) oder vielversprechende Algorithmen wie der Maschen-Ansatz von Hu et al. (2007) und Chen et al. (2009) und auch der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von Li und Zhou (2012) nutzen keine anderen Feature Klassen. Es könnte aber interessant sein auch andere Feature Klassen in den Selektionsprozess einzubinden. So kann eine Strasse beispielsweise, auch wenn sie keine Hauptachse im Verkehrsnetz ist, potentiell wichtig sein, weil sie wichtige Intrastruktur erschliesst (z.B. ein Spital oder eine touristische Attraktion). Falls nur das Strassennetzwerk alleine betrachtet wird, fehlt diese Information aber. Es ergibt sich daher die Frage, wie man mit Hilfe von anderen Feature Klassen weitere Constraints und Regeln ableiten kann und wie diese in bewährte automatische Ansätze mit eingebunden werden können um die Resultate zu verbessern.

Strassennetze an verschiedenen Orten auf der Welt haben teils völlig unterschiedliche Strukturen (Zhang 2004). Je nach Struktur sind unterschiedliche automatische Ansätze geeignet (Zhou 2012). Für die Strassennetzwerk Strukturen der Schweiz wurden, soweit dem Autor bekannt, noch keine Ansätze zur automatischen Selektion von Strassen ausführlich an grösseren und dichten Testdatensätzen getestet. Die Strassennetzwerk Strukturen in der Schweiz sind je nach Region sehr unterschiedlich, von sehr dicht besiedelten Gebieten in den Agglomerationen der grösseren Städte, über flache und weniger dicht besiedelte ländliche Gebiete im Mittelland bis zu den Hochgebirgsregionen in den Alpen. Es ist interessant zu analysieren, was für Resultate die drei Basisalgorithmen, angewandt auf Strassennetzwerk Strukturen in der Schweiz, generieren. Weiter argumentieren beispielsweise auch Li und Zhou (2012) und Zhou (2012), welche einen vielversprechenden Ansatz zur automatischen Selektion von Strassennetzen entwickelten (der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz), dass ihr Ansatz zwar für je ein Strassennetzwerk in Neuseeland und Hong-Kong teilweise sehr gute Resultate produzierte, aber unbedingt für weitere Testgebiete geprüft werden muss. Die Strassennetze der Schweiz, modelliert im TLM von swisstopo, bilden hierfür eine gute Basis. Einerseits gibt es, wie bereits erwähnt, eine breite Palette an verschiedenen Strukturen, andererseits weist das TLM eine hohe Qualität und eine grosse Genauigkeit auf (siehe auch Kapitel 3) und die einzelne Objekte (Strassensegmente) sind in einer grossen Dichte verfügbar.

## 2.3 Forschungsfragen und Hypothesen

Basierend auf der Einleitung und Zielsetzung, der Literaturrecherche und den Forschungslücken wurden folgende Forschungsfragen (FF) formuliert. Die Forschungsfragen können in zwei Blöcke eingeteilt werden.

**Basisalgorithmen** Hierbei soll geprüft werden, inwiefern drei Algorithmen aus der Fachliteratur, der Stroke-Ansatz von Thomson und Richardson (1999), der Maschen-Ansatz von Hu et al. (2007) und Chen et al. (2009), sowie der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von Li und Zhou (2012) Resultate generieren können, welche die Anforderungen an das Generalisierungsergebnis erfüllen können und wo die spezifischen Problembereiche liegen. Dabei soll evaluiert werden, welcher der drei Basisalgorithmen die besten Resultate erzielt.

---

*Inwiefern können die drei Basisalgorithmen für den Zielmasstab von 1:50'000*  
**FF<sub>1</sub>** *zufriedenstellende Resultate generieren? Welcher der drei Basisalgorithmen generiert die besten Resultate?*

---

**Zusätzliche Regeln und Algorithmen** Der zweite Frageblock prüft auf Basis der Resultate von  $FF_1$ , inwiefern weitere Regeln und Algorithmen die Resultate optimieren können. Dabei sollen einerseits intrinsische Regeln und Algorithmen aus dem Strassennetzwerk selbst entwickelt werden, welche die Resultate optimieren können. Andererseits sollen aber auch die Informationen aus externen Feature Klassen verwendet werden um weitere Regeln abzuleiten. Daraus ergeben sich  $FF_2$  und  $FF_3$ .

---

**FF<sub>2</sub>** *Inwiefern können weitere intrinsische, aus dem Strassennetzwerk abgeleitete, Regeln und Algorithmen das Resultat verbessern?*

---

---

**FF<sub>3</sub>** *Wie können Informationen aus anderen Feature Klassen und daraus abgeleitete extrinsische Regeln und Algorithmen das Resultat optimieren?*

---



# 3 Datengrundlage und Anforderungen

Die räumlichen Daten für diese Arbeit wurden von swisstopo, dem Bundesamt für Landestopografie der Schweiz, zur Verfügung gestellt.

## 3.1 Topografisches Landschaftsmodell 3D (TLM3D)

Als Ausgangslage für die Daten dient das grossmassstäbliche TLM3D. TLM steht für *Topografisches Landschaftsmodell*. Es ist für den Massstabsbereich zwischen 1:5'000 und 1:25'000 konzipiert und umfasst die natürlichen und künstlichen Objekte wie auch die Namendaten in vektorieller Form. Mit einer hohen räumlichen Genauigkeit (0.2 - 1.5 m für gut definierte Objekte wie z.B. Strassen und Gebäude, 1 – 3 m für nicht klar abgrenzbare Objekte wie beispielsweise Wald) und dem Einbezug der dritten räumlichen Dimension ist es der genaueste und umfassendste 3D-Vektordatensatz der Schweiz. Das TLM3D deckt die gesamte Fläche der Schweiz und des Fürstentum Liechtensteins ab. Es beschreibt ungefähr sechs Millionen Objekte mit deren Lage und Form, den dazugehörigen Objektklassen und zahlreichen weiteren Attributen (swisstopo 2013b). Eine Zusammenstellung über den thematischen Inhalt ist in Tab. 1 ersichtlich.

**Tab. 1: Zusammenstellung der verschiedenen Objektklassen im TLM3D**

Quelle: swisstopo 2013b.

Thema	Beschreibung
Strassen und Wege	Strassen- und Wegnetz, Fuss- und Fahrradwege
Öffentlicher Verkehr	Eisenbahnlinien und andere Bahnen, Schifffahrtswege und Haltestellen des öffentlichen Verkehrs
Bauten	Gebäude, Mauern, Dämme, Konstruktionen im Zusammenhang mit Transport, Kommunikation, Energie, Sport und Freizeit
Areale	Bereiche mit einer speziellen Landnutzung (Transport, Lebensraum, Industrie, etc.)
Bodenbedeckung	Bodenbedeckung unabhängig der Landnutzung
Gewässernetz	Wasserläufe und Seeumrisse
Einzelobjekte	Selektion markanter Objekte, welche zur Orientierung beitragen (Kreuze, Quellen, Höhlen)
Namen	Unterschiedliche Namen

## 3.2 Kartografisches Referenzmodell 25 (KRM25)

Als Quelldatensatz für die Evaluation der Algorithmen dient nicht das TLM3D direkt, sondern die Geodatenbank des KRM25, respektive das Thema Strassennetzwerk des KRM25. KRM steht für *kartografisches Referenzmodell* und ist eine Ableitung des TLM3D. Die Form der Geometrie ist identisch mit der des TLM3D. Das KRM25 umfasst aber weniger Objektklassen und Attribute und ist teilweise etwas anders strukturiert. So sind z.B. im TLM3D viele Namen in verknüpften Relationen abgelegt, wohingegen im KRM25 diese direkt beim betreffenden Objekt stehen. Das KRM25 ist auch das Modell mit dem die Kartographinnen und Kartographen bei swisstopo die Selektion vornehmen.

Das Strassennetzwerk des KRM25 umfasst, neben einigen Standardattributen, die auch in anderen Objektklassen erfasst sind, wie z.B. eine eindeutige ID oder das Datum der Erstellung, die in [Tab. 2](#) dargelegten grundlegenden Attribute. Im Modell sind die Attributausprägungen jeweils mit Hilfe von Ganzzahlen und Strings codiert.

**Tab. 2: Attribute des KRM25 und deren Ausprägungen**  
(© swisstopo)

Attribut	Beschreibung der Attributausprägungen
OBJEKTART („abnehmende Wichtigkeit“)	Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt, Raststätte, 10m-Strasse, 8m-Strasse, 6m-Strasse, 4m-Strasse, 3m-Strasse, 2m-Weg, 2m-Wegfragment, 1m-Weg, 1m-Wegfragment, Autozug, Klettersteig, Fähre, Markierte Spur, Platz
BELAGSART	Hartbelag, Naturbelag
STUFE	Relative vertikale Lage sich kreuzender Strassen
IM_BAU	Angabe ob sich ein Strassensegment im Bau befindet oder nicht
KUNSTBAUTE	Keine, Brücke, Brücke_Galerie, Brücke_gedeckt, Brücke_Treppe, Furt, Galerie, Treppe, Tunnel, Unterführung, Unterführung_Treppe
KREISEL	Angabe ob ein Strassensegment zu einem Kreisel gehört oder nicht
RICHTUNGSGETRENNT	Angabe ob ein Strassensegment richtungsgetreunt ist oder nicht
ROUTE	Zugehörigkeit eines Strassensegments zu einer bestimmten Route (z.B. Autobahn A1)
SACKGASSE_BIS50M	Angabe ob ein Strassensegment eine maximal 50m lange Sackgasse bildet oder nicht
VERKEHRSEDEUTUNG	Allgemein, Durchgangsstrasse, Verbindungsstrasse
VERKEHRSEBSCHRÄNKUNG	Keine, Allgemeine_Verkehrsbeschränkung, Allgemeines_Fahrverbot, Fussgängerzone, Fussweg, Gebührenpflichtig, Gesicherte_Kletterpartie, Lastwagenfahrverbot, Militärstrasse, Panzerpiste, Radweg, Radweg_Fussweg, Reitweg, Reitweg_Fussweg, Rennstrecke, Teststrecke, Wintersperre, Wohnstrasse, Zeitlich_geregelt
WANDERWEG	Kein, Wanderweg, Bergwanderweg, Alpinwanderweg, Andere

Das Strassennetzwerk im KRM25 ist aus einzelnen Strassensegmenten zusammengesetzt und weist für alle Attribute einen eindeutigen Wert auf. Ein Strassensegment kann mit einem oder mehreren anderen Strassensegmenten verbunden sein, wie z.B. an einer Kreuzung oder wenn sich die Attribut-Struktur einer Strasse ändert (beispielsweise wenn sich eine 10m-Strasse zu einer 8m-Strasse verengt). Ein Strassensegment kann aber auch isoliert vorliegen, also keine weitere Verbindung zu anderen Strassensegmenten aufweisen.

## 3.3 Anforderungsanalyse

### 3.3.1 Constraint-basierte Generalisierung

Van Kreveld und Peschier (1998) und Weibel und Dutton (1998) argumentieren, dass es notwendig sei, die Anforderungen und Kriterien, welche den Generalisationsprozess steuern, sauber zu definieren, weil sie die Basis für die Entwicklung von guten Algorithmen bilden. Diese Sichtweise führte zum Prinzip der Generalisierungs-Constraints und zur Constraint-basierten Generalisierung. Diese Prinzipien werden schon seit Jahrzehnten in der Fachliteratur diskutiert (Brassel und Weibel 1988, Beard 1991, Weibel und Dutton 1998, Lamy et al. 1999, Peter und Weibel 1999, Barrault et al. 2001, Schmid 2008). Weibel und Dutton (1998) definieren ein *Constraint* als eine Einschränkung, welche die Anzahl akzeptabler Lösungen für ein Problem reduziert. Sie betrachten ein Constraint als eine Spezifikation, welche ein Generalisierungsergebnis erfüllen sollte. Sie spezifizieren also, wie eine Lösung ausschauen sollte. Ein grosser Vorteil ist, dass sie auch benutzt werden können um Resultate zu evaluieren. So kann geprüft werden, inwiefern die Resultate die Constraints erfüllen. Kann ein Resultat die Spezifikationen überhaupt nicht erfüllen, so ist es tendenziell ein eher schlechtes Resultat. Ein Ergebnis, welche alle Constraints erfüllt, ist in Bezug auf die definierten Constraints ein optimales Resultat. Dieses Prinzip wird auch in dieser Arbeit verfolgt. Die Resultate wurden unter anderem auch hinsichtlich der definierten Constraints bewertet. Ein Constraint-basierter Ansatz versucht möglichst viele Constraints zu erfüllen (Harrie und Weibel 2007). Constraints können auf verschiedene Arten charakterisiert werden (Weibel und Dutton 1998, Harrie und Weibel 2007). Für diese Arbeit wurden Constraints in zwei Klassen eingeteilt, sogenannte harte Constraints, welche das Resultat zwingend erfüllen muss, und weiche Constraints, welche das Resultat nicht zwingend erfüllen muss, aber sofern möglich, sollte. In diesem Zusammenhang, wird aber fortan nicht mehr von Constraints gesprochen, sondern von *Anforderungen*.

### 3.3.2 Anforderungen

Die Anforderungen, welche die Resultate erfüllen müssen, wurden in Zusammenarbeit mit Fachpersonen der swisstopo erarbeitet und basieren hauptsächlich auf Spiess et al. (2002), die eine Lehrschrift mit Titel „Topografische Karten – Kartengrafik und Generalisierung“ verfasst haben. In der Schrift wird sauber dargelegt, welche Anforderungen Karten in verschiedenen Massstäben erfüllen müssen, damit eine hohe Qualität erreicht werden kann. Die Anforderungen sind für den Zielmassstab von 1:50'000 ausgelegt.

#### 3.3.2.1 Harte Anforderungen

Harte Anforderungen sind Anforderungen, die zwingend erfüllt werden müssen. Die folgende Auflistung (Tab. 3) zeigt harte Anforderungen, welche direkt aus den Attributen des KRM25 abgeleitet werden können.

**Tab. 3: Harte Anforderungen und deren Übersetzung auf das KRM25**

Strassensegmente mit einer der aufgelisteten Attributausprägung müssen selektiert werden.

Anforderung	Übersetzung auf das KRM25
(1) Selektion aller Autobahnen und Autostrassen	Selektion aller Strassensegmente bei Zugehörigkeit zu einer der folgenden Objektarten: Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt oder Raststätte
(2) Selektion aller Strassenrouten	Selektion aller Strassensegmente mit einer Routenzugehörigkeit
(3) Selektion aller Durchgangs- und Verbindungsstrassen	Selektion aller Strassensegmente, die zu einer Durchgangs- oder Verbindungsstrasse gehören
(4) Selektion aller Tunnels die länger als 50 m sind	Selektion aller Strassensegmente bei Zugehörigkeit zur Kunstbaute Tunnel und einer minimalen Länge von 50 m

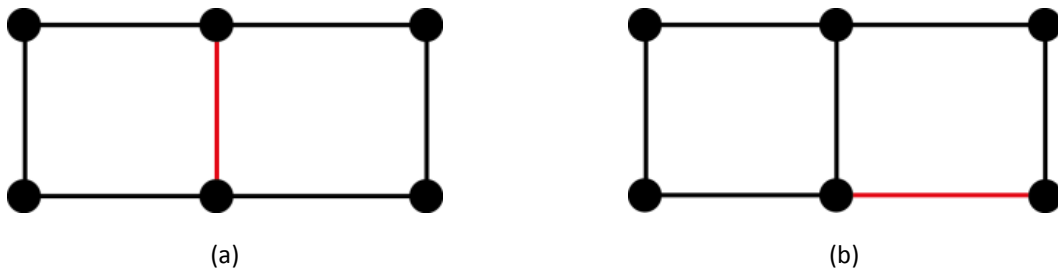
Weitere harte Anforderungen betreffen die Konnektivität des Strassennetzwerkes und sind miteinander gekoppelt. So dürfen:

- (5) keine neuen Unterbrüche im Strassennetzwerk entstehen. **Abb. 8** zeigt eine Situation die nicht entstehen darf. Wird das rot markierte Strassensegment entfernt, so entsteht in der Strasse ein Unterbruch.
- (6) keine neuen Sackgassen entstehen, ausser es handelt sich um Erschliessungsstrassen (wie z.B. Hauptzufahrten zu Bahnhöfen oder anderer wichtiger Infrastruktur). Eine Situation, wie sie in **Abb. 9(a)** dargestellt ist, ist eine erlaubte Entfernung, weil hier keine neue Sackgasse entsteht. Die Situation wie sie in **Abb. 9(b)** dargestellt ist darf hingegen nicht entstehen, weil hier im Süd-Osten des Netzwerkes eine neue Sackgasse entsteht.
- (7) Weiter muss sichergestellt sein, dass es im generalisierten Strassennetzwerk einen Pfad zwischen einem beliebigen Segment *A* und *B* gibt, sofern es bereits einen Pfad im ungeneralisierten Strassennetzwerk zwischen Segment *A* und *B* gibt. Diese Anforderung ist stark an die Anforderung gekoppelt, die fordert, dass im Strassennetzwerk keine Unterbrüche entstehen dürfen. Sie ist aber nicht dasselbe. So kann es sein, dass es trotz eines Unterbruchs innerhalb einer Strasse einen weiteren Pfad gibt, der zwei Segmente *A* und *B* miteinander verbindet.



**Abb. 8: Entstehung eines Unterbruchs**

Die Entfernung des rot markierten Segments bewirkt einen nicht erlaubten Unterbruch im Strassennetzwerk.



**Abb. 9: Vergleich zwischen einer erlaubten und einer nicht erlaubten Entfernung**

Rot symbolisiert ist das entfernte Segment. Die Situation in (a) zeigt eine erlaubte Entfernung, wohingegen die Situation in (b) eine nicht erlaubte Entfernung zeigt, weil eine neue Sackgasse entsteht.

Swisstopo selektiert auf ihren Landeskarten mit Massstab 1:50'000 sämtliche Wanderwege. Diese Anforderung wurde in dieser Arbeit aber nicht verfolgt, weil sie eine gewisse Problematik bedingt, welche genauer in Abschnitt 6.2.4 dargelegt wird. Insbesondere die Analyse der Auswirkungen der Algorithmen auf die geometrischen und topologischen Strukturen der Strassennetzwerke wäre nicht möglich gewesen.

### 3.3.2.2 Weiche Anforderungen

Die folgenden Ausführungen beschreiben weiche Anforderungen, also Anforderungen die für das Resultat nicht zwingend erforderlich sind, aber sofern möglich, erfüllt werden sollten. **Tab. 4** zeigt Anforderungen, welche wieder direkt aus den Attributen des KRM25 abgeleitet werden können.

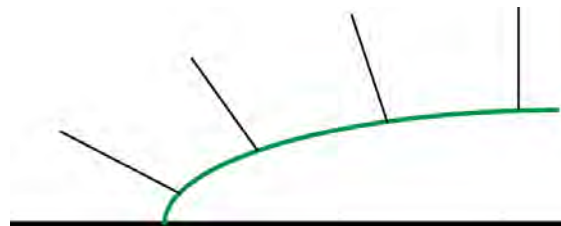
**Tab. 4: Weiche Anforderungen und deren Übersetzung auf das KRM25**

Strassensegmente mit einer der aufgelisteten Attributausprägungen sollten, sofern möglich, selektiert (respektive entfernt) werden beziehungsweise gegenüber anderen Strassensegmenten bevorzugt (respektive benachteiligt) werden. Eine Selektion (respektive Entfernung) ist aber nicht zwingend.

Anforderung	Übersetzung auf das KRM25
(8) Bevorzugung von Brücken	Bevorzugung von Strassensegmenten bei Zugehörigkeit zur Kunstbaute Brücke, Brücke_Galerie oder Brücke_gedeckt
(9) Bevorzugung kurzer Tunnels	Bevorzugung aller Strassensegmente bei Zugehörigkeit zur Kunstbaute Tunnel und einer maximalen Länge von 50 m
(10) Bevorzugung von Unterführungen	Bevorzugung aller Strassensegmente bei Zugehörigkeit zur Kunstbaute Unterführung
(11) Benachteiligung von Treppen gegenüber anderen Strassensegmenten	Benachteiligung aller Strassensegmente mit einer Zugehörigkeit zur Kunstbaute Treppe

Weitere weiche Anforderungen sind eher unscharf definiert und können somit nicht direkt aus dem KRM25 abgeleitet werden. So sollten:

- (12) wichtige Verbindungsstrassen, die ein potentieller Nutzer der Karte intuitiv als solche interpretieren könnte, aber nicht explizit im Attribut „Verkehrsbedeutung“ als eine Verbindungs- oder Durchgangsstrasse deklariert ist, selektiert werden.
- (13) wichtige Sammelstrassen selektiert werden. Das Prinzip einer Sammelstrasse ist in [Abb. 10](#) dargelegt und bezeichnet Strassen, die in Verbindungs- oder Durchgangsstrassen münden und in die selbst weitere Strassen münden. Sie stellt die Konnektivität zur wichtigen Verbindungsstrasse sicher.
- (14) keine kurzen Sackgassen selektiert werden.
- (15) Hauptzufahrten zu Bahnhöfen und allgemeinen Haltestellen (Bahn, Schiff, Tram, etc.), sowie weiterer wichtiger Infrastruktur selektiert werden. Hierbei dürfen auch neue Sackgassen entstehen, sofern dies notwendig ist.
- (16) die grundlegenden Strukturen des Strassennetzwerkes erhalten bleiben.



**Abb. 10: Das Prinzip einer Sammelstrasse**

Eine Sammelstrasse (grün symbolisiert) ist eine Strasse, welche in eine wichtige Verbindungs- oder Durchgangsstrasse (schwarz und dick symbolisiert) mündet und in welche selbst weitere Strassen münden. Sie „sammelt“ weitere Strassen auf und stellt deren Konnektivität zu einer Verbindungs- oder Durchgangsstrasse sicher.

### 3.3.3 Grad der Selektion

Bei der Generalisierung von Strassennetzwerken stellt sich die grundsätzliche Frage, wie viele Strassensegmente für den Zielmasstab selektiert und wie viele entfernt werden sollen.

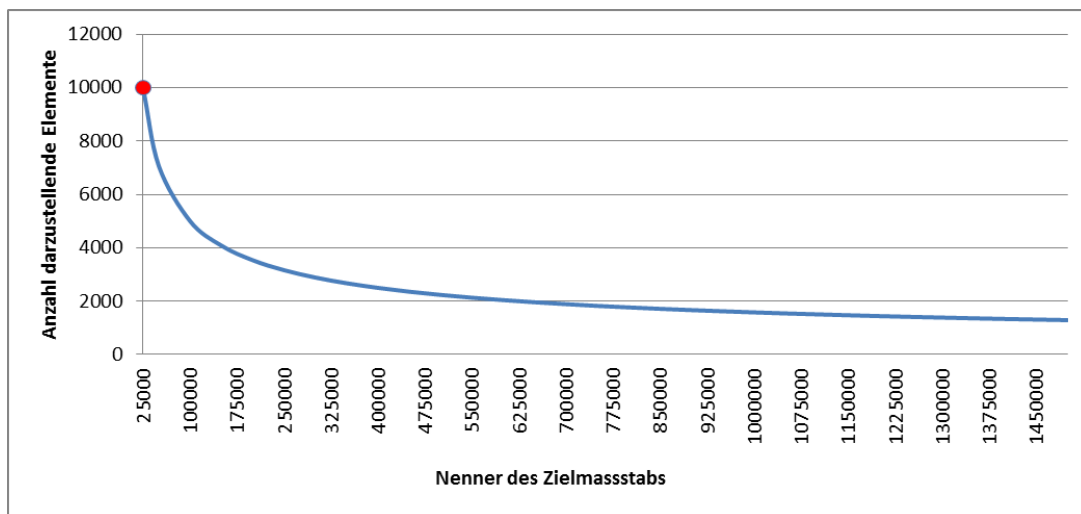
### 3.3.3.1 Wurzelgesetz von Töpfer

Das „Prinzip der Selektion“ bildet einen fundamentalen quantitativen Ansatz, dargestellt durch das sogenannte **Wurzelgesetz** der kartographischen Generalisierung von F. Töpfer. Es wird ausführlich in [Töpfer und Pillewizer \(1966\)](#) und [Töpfer \(1974\)](#) beschrieben. Das Wurzelgesetz ist eine Quantifizierung von Erkenntnissen aus dem Studium von verschiedenen Karten aus verschiedenen Ländern. Dabei wurde analysiert, inwiefern die Anzahl Kartenelemente auf den Karten (mit Elemente sind Kartenelemente aller Art gemeint und nicht nur Strassen) in Abhängigkeit des Massstabs variiert. Die grundlegende Erkenntnis war, dass die Anzahl Kartenelemente mit kleiner werdendem Massstab gemäss einer negativen geometrischen Progression abnimmt. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde das Wurzelgesetz in seiner einfachsten Form definiert als:

$$n_f = n_a \sqrt{\frac{M_a}{M_f}} \quad (1)$$

wobei  $n_f$  die Anzahl der Kartenelemente ist, die für den Zielmassstab selektiert werden,  $n_a$  die Anzahl der Kartenelemente im Quellmassstab,  $M_a$  der Nenner des Quellmassstab und  $M_f$  der Nenner des Zielmassstabs. Das Wurzelgesetz ist rein quantitativer Natur. Es sagt aus wie viele Kartenelemente für einen Zielmassstab selektioniert werden sollen, aber nicht welche.

**Abb. 11** zeigt eine Visualisierung des Wurzelgesetzes. Als Basis diente ein Quellmassstab von 1:25'000 mit einer Menge von 10'000 Kartenelementen. Gut ersichtlich ist die negative progressive Abnahme der darzustellenden Kartenelemente bei kleiner werdendem Massstab.



**Abb. 11: Visualisierung des Wurzelgesetzes**

Der Quellmassstab (1:25'000) und die darin enthaltenen Kartenelemente (10'000) dienen als Ausgangslage und sind mit einem roten Punkt symbolisiert.

[Töpfer und Pillewizer \(1966\)](#) argumentieren, dass das Wurzelgesetz in seiner simplen Form nur für Zielmassstäbe geeignet sei, in denen die Symbole der Kartenelemente mehr oder weniger die reale Form der repräsentierten Objekte darlegen. Für sehr kleine Massstäbe, wie sie oft in Atlas-Karten vorzufinden sind, haben sie das Gesetz mit zwei Konstanten erweitert, welche die Symbolisierung miteinbeziehen. In dieser Arbeit ist der Zielmassstab mit 1:50'000 aber relativ gross. Die Symbole (in diesem Falle die Linien, welche die Strassen repräsentieren) zeigen in Karten mit einem solchen Massstab, selbst nach der kartographischen Generalisierung, noch mehr oder weniger die reale Form, so dass die simple Form des Wurzelgesetzes, gemäss Gleichung 1, genügt.

Wird Gleichung 1 umgeformt, so erhält man das Verhältnis aus den zu selektierenden Kartenelementen für den Zielmasstab und der Anzahl Kartenelemente aus dem Quellmasstab in Abhängigkeit der Masstäbe.

$$\frac{n_f}{n_a} = \sqrt{\frac{M_a}{M_f}} \quad (2)$$

Der Zielmasstab in dieser Arbeit ist 1:50'000. Der Quellmasstab ist der Masstab, für den das TLM3D konzipiert ist. Er kann nicht exakt definiert werden, da es sich um keine kartographische Datenquelle handelt. Er befindet sich im Bereich zwischen 1:5'000 und 1:25'000. Setzt man die beiden Extrema (1:5'000 und 1:25'000) in Gleichung 2 ein, so erhält man ein Ergebnis der prozentual zu selektierenden Kartenelemente von 31.6% für einen Quellmasstab von 1:5'000 und 70.7 % für einen Quellmasstab von 1:25'000. Das Intervall zwischen 31.6 % und 70.7 % ist sehr gross und eine eindeutige Aussage bezüglich der Anzahl zu selektierenden Kartenelemente für diese Arbeit kann nicht gemacht werden. Das grosse Intervall ist durch die Form von Gleichung 1 begründet. Weiter beachtet das Wurzelgesetz die Dichte der Kartenelemente im Quellmasstab zu wenig genau. So kann es sein, dass eine Karte selbst in einem sehr grossen Masstab nur wenige Kartenelemente enthält, da beispielsweise das repräsentierte Gebiet der Karte sehr dünn besiedelt ist. Eine Ausdünnung der Kartenelemente ist dann bei kleinen Masstabssprüngen gar noch nicht notwendig, da noch genügend Platz vorhanden ist. Da die Schweiz aber, abgesehen von den alpinen Gebieten, relativ dicht besiedelt ist und das Strassennetzwerk des TLM3D jeden noch so kleinen Weg modelliert, spielt dieser Aspekt hier eine eher untergeordnete Rolle.

Das Wurzelgesetz sollte allgemein eher als Richtlinie verstanden werden und nicht als harte Regel (João 1998). Li und Choi (2002) haben für Karten von Testgebieten in China untersucht, wie gross der Unterschied der Anzahl Strassensegmente zwischen den Masstäben 1:50'000 und 1:10'000 ist und es mit den Resultaten des Wurzelgesetzes verglichen. Das Wurzelgesetz verlangt eine Selektion von ca. 45 % der Segmente, wohingegen die tatsächlichen Karten ca. 65 % selektiert haben. Der grosse Unterschied zeigt, dass das Wurzelgesetz keine Allgemeingültigkeit aufweist.

### 3.3.3.2 Expertenmeinungen von Fachpersonen der swisstopo

Die Kartographinnen und Kartographen bei swisstopo verfolgen einen eher konservativen Ansatz. Die Anzahl zu entfernender Kartenelemente ist im Vergleich zum Wurzelgesetz eher gering, da sie enge Platzverhältnisse auch oft durch die kartographische Generalisierung korrigieren. Das geht so weit, dass sie z.B. in Zukunft auch einen Ansatz verfolgen, bei welchem in einer Situation mit zwei parallelen Strassen nicht prinzipiell die weniger wichtige Strasse entfernt wird, sondern die beiden Strassen so übereinandergelegt werden, dass die Signatur der wichtigeren Strasse über die Signatur der weniger wichtigen Strasse gelegt wird und sie somit die weniger wichtige Strasse verdeckt.

Eine ausführliche Diskussion mit den Experten bei swisstopo hat ergeben, dass in dieser Arbeit ein Ansatz verfolgt werden soll, bei dem ca. 70 % der Strassensegmente im Quellmasstab für den Zielmasstab selektiert werden. Diese 70 % befinden sich im oberen Teil des durch das Wurzelgesetz berechneten Intervalls. Für diese Arbeit wird also auch ein eher konservativer Ansatz verfolgt.

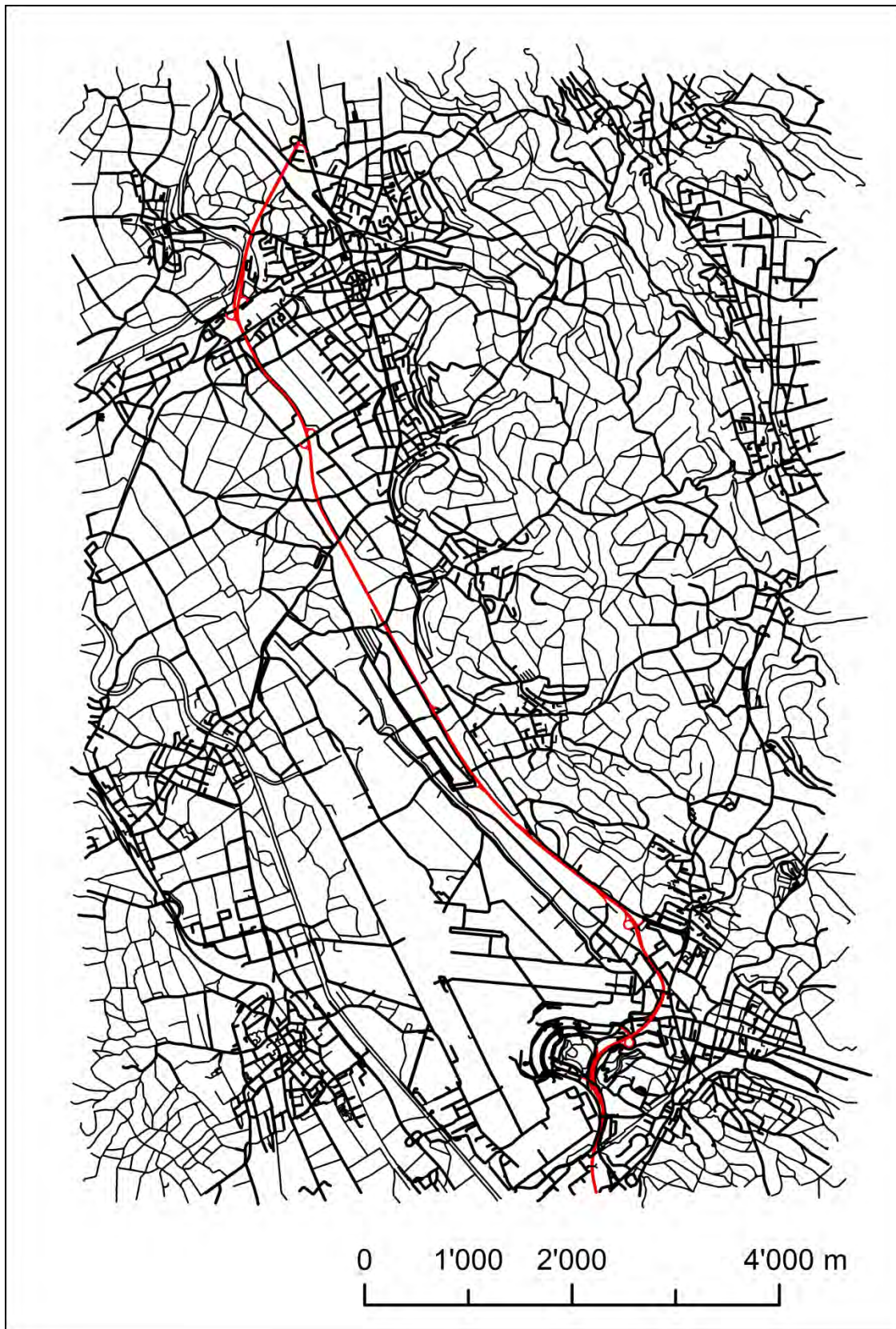
## 3.4 Testgebiete

Für diese Arbeit wurden insgesamt vier Testgebiete ausgewählt, an denen die Algorithmen getestet und analysiert werden sollen. Die Auswahl der Testgebiete erfolgte nach verschiedenen Gesichtspunkten und nach Absprache mit den Experten von swisstopo. Sie sollten eine relativ grosse Bandbreite an verschiedenen Strukturen abdecken, damit Aussagen getätigt werden können, wie sich die Anwendung der Algorithmen auf verschiedene Strukturen auswirkt. Der Strassenbau in der Schweiz ist weitgehend durch die Geschichte und Rechtslage der Kantone und Gemeinden geprägt. Es ist deshalb sinnvoll, wenn Testgebiete aus verschiedenen

Kantone ausgewählt werden. Weiter ist die Schweiz topografisch gesehen sehr diversifiziert. Die Schweiz hat durch die Alpen ein grosses Gebirge, aber auch ein etwas ebeneres Mittelland, sowie das kleinere Jura-Gebirge. Weiter gibt es in der Schweiz die dicht besiedelten Städte, die dazugehörigen Agglomerationen, aber auch ländlichere Regionen. Aufgrund dieser Überlegungen wurden folgende vier Testgebiete ausgewählt (dargestellt in [Abb. 12](#) bis [Abb. 15](#)).

- (1) *Zürcher-Unterland (ZU)*: Dieses kleinere Testgebiet soll eine typische Agglomeration im schweizerischen Mittelland repräsentieren. Weiter kenne ich dieses Testgebiet persönlich sehr gut, da ich im Zürcher Unterland beheimatet bin. Eine qualitative Interpretation der Ergebnisse der Algorithmen fällt für dieses Testgebiet daher einfacher aus.
- (2) *Winterthur-Tösstal (WT)*: Dieses etwas grössere Testgebiet beinhaltet einen dicht besiedelten städtischen Teil (Winterthur) im Nord-Westen und einen eher schwach besiedelten ländlichen Abschnitt (Tösstal) südöstlich von Winterthur. Dieses Testgebiet soll eine Mischung aus Stadt und Land mit einer nicht-uniformen Dichtestruktur repräsentieren. An diesem Testgebiet soll vor allem auch untersucht werden, was für Resultate die Algorithmen generieren, wenn die Dichteverhältnisse nicht gleichverteilt sind.
- (3) *Sursee (SU)*: Dieses Testgebiet soll ein typisches ländliches Gebiet im Mittelland repräsentieren und umfasst Sursee und das Gebiet westlich vom Sempachersee.
- (4) *Engadin (EN)*: Dieses Testgebiet repräsentiert ein Gebiet aus dem Gebirge, sprich den Alpen, im Kanton Graubünden. Es umfasst das Gebiet rund um St. Moritz und Samedan, weist diverse Passstrassen auf und ist von der Struktur her fundamental anders als die anderen drei Testgebiete.

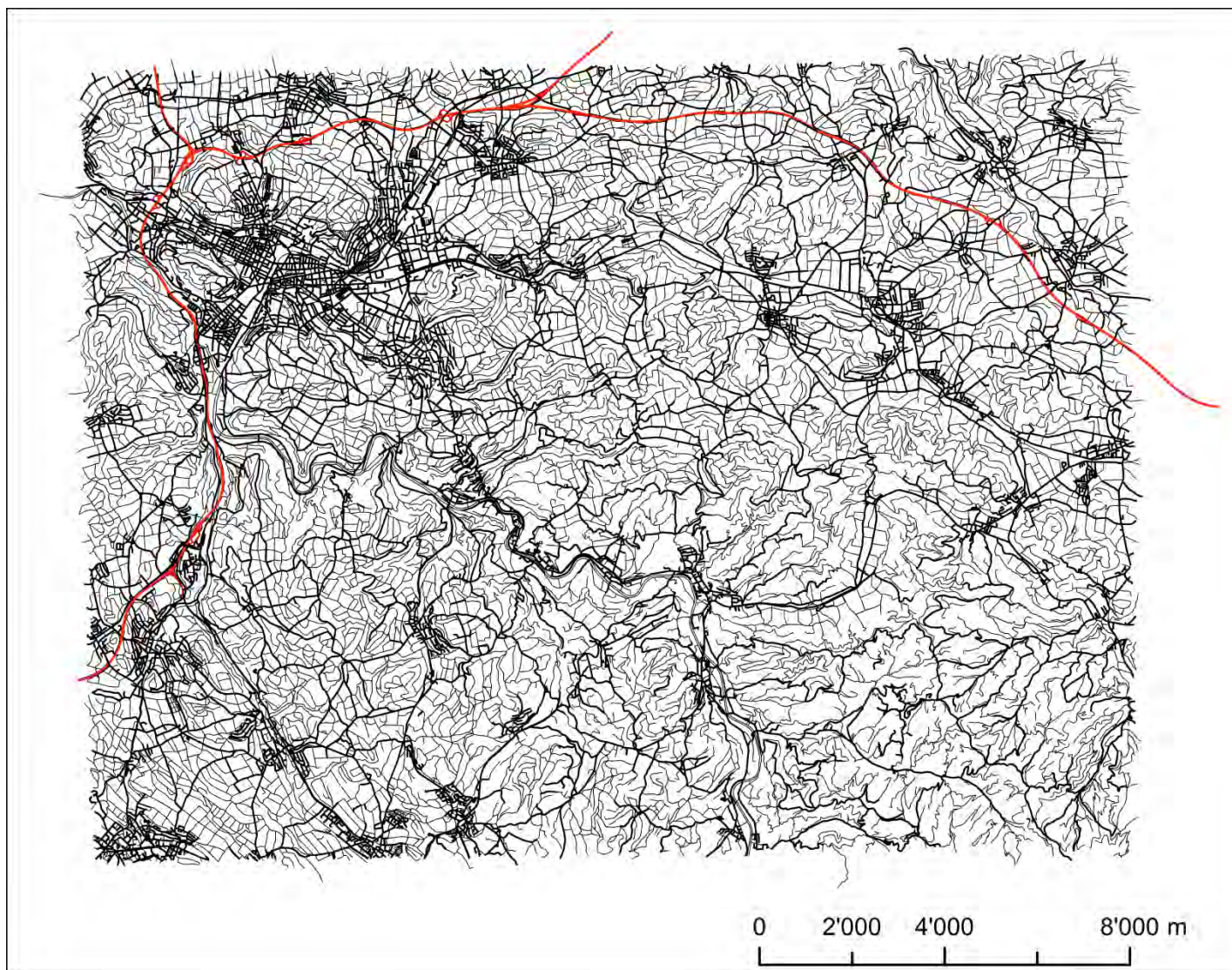




**Abb. 12: Testgebiet ZU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)

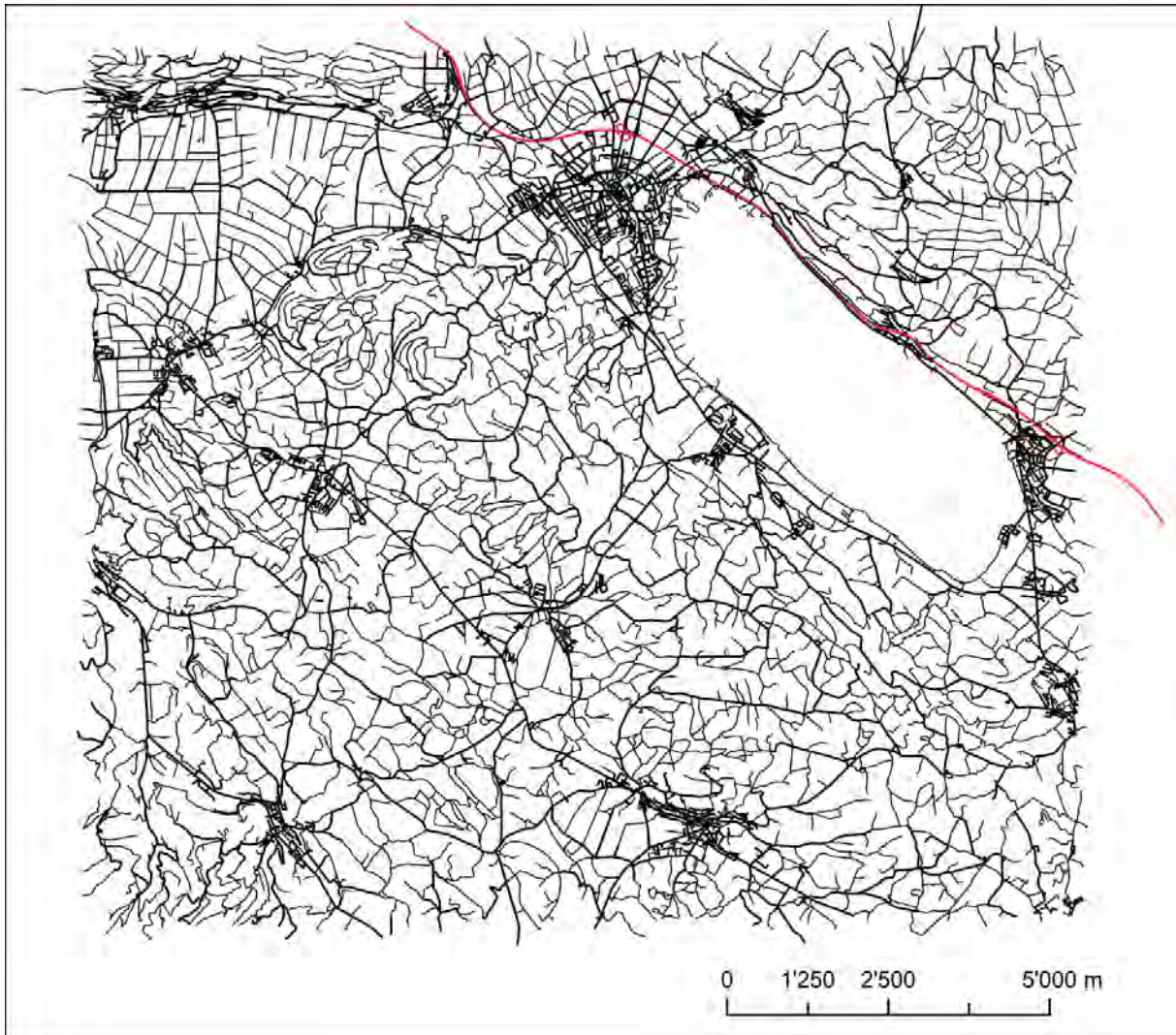




**Abb. 13: Testgebiet WT**

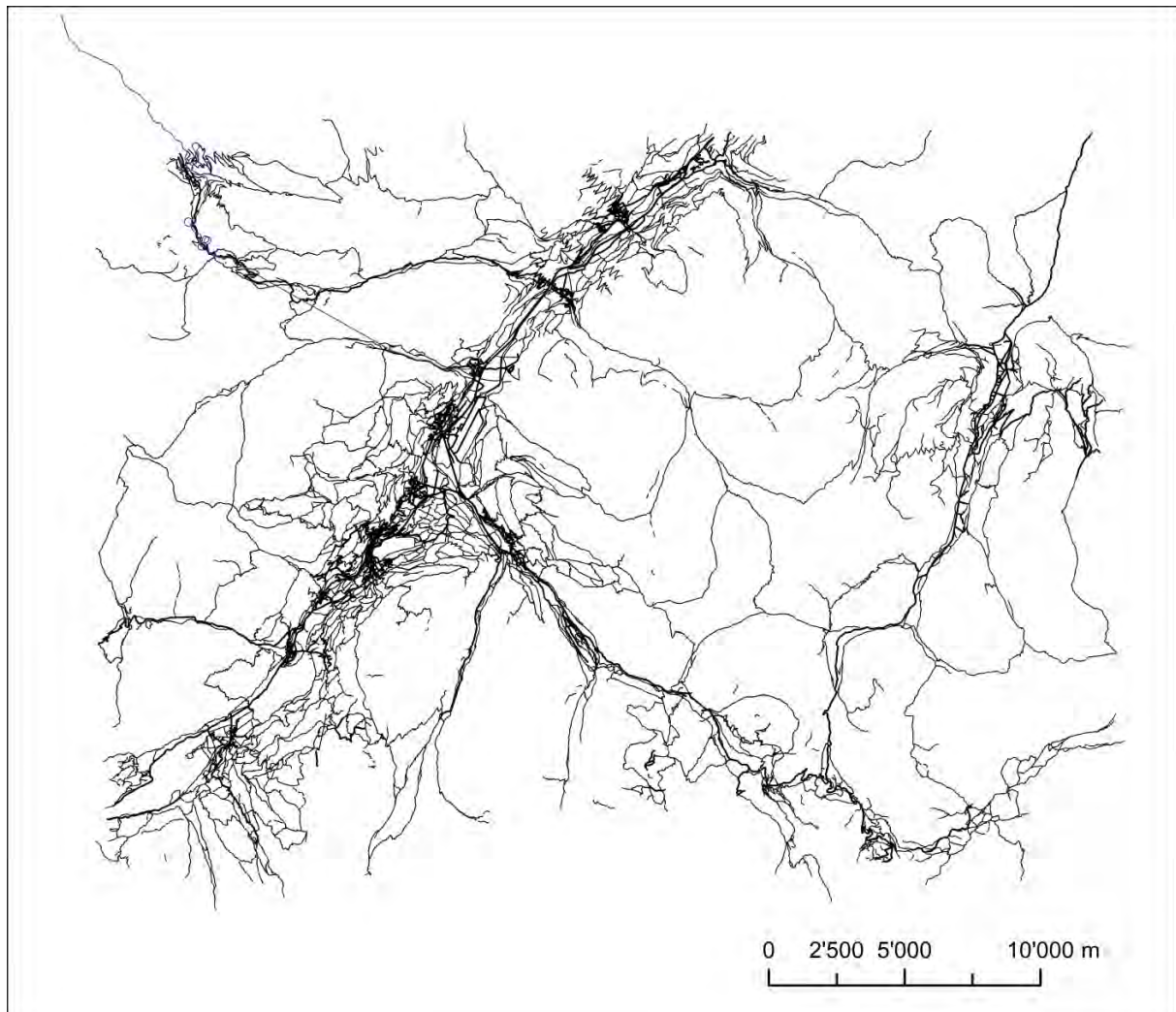
Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststutte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dunnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)





**Abb. 14: Testgebiet SU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)



**Abb. 15: Testgebiet EN**

Die Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. Blau symbolisiert sind Autozüge. (© swisstopo)

Kennzahlen zu den vier Testgebieten sind in [Tab. 5](#) ersichtlich. Die Bedeutung von linearen Segmenten und Flächensegmenten, sowie das Mass der Average Connectivity werden in Abschnitt 3.5 und 3.6 erläutert.

**Tab. 5: Kennzahlen der vier Testgebiete**

Kennzahl	ZU	WT	SU	EN
Anzahl Segmente total	8'694	30'780	11'129	8'975
Anzahl lineare Segmente	945	2'951	1'897	1'520
Anzahl Flächensegmente	7'749	27'829	9'232	7'455
Länge Segmente total [m]	992'752	4'368'784	1'582'041	2'183'795
Länge lineare Segmente [m]	119'009	502'478	302'108	429'530
Länge Flächensegmente [m]	873'743	3'866'306	1'279'933	1'754'265
Anzahl nicht entfernbare Segmente	588	1665	684	445
Anzahl bevorzugte Segmente	195	634	309	659
Anzahl Treppensegmente	16	27	18	18
Anzahl Sackgassen	801	2'507	1'533	1'302
Average Connectivity	0.99905	0.99761	0.99680	0.90888

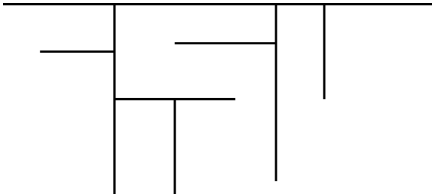
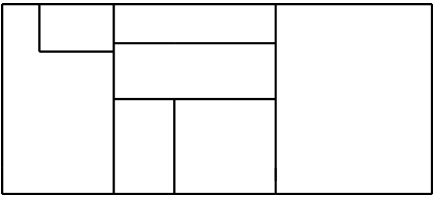
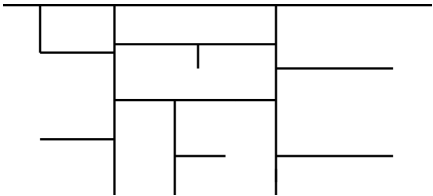
### 3.5 Strukturen in Strassennetzwerken

In Tab. 5 sind Kennzahlen notiert, welche sich auf lineare und Flächensegmente beziehen. Diese zwei Arten von Segmenten sind spezifische Strukturen und dienen der Beschreibung und der quantitativen Evaluierung der Resultate. Weiter unterscheidet der in Abschnitt 4.4 diskutierte Maschen-Ansatz zwischen verschiedenen Klassen von Segmenten. Daher wird hier kurz der Unterschied zwischen linearen und flächenartigen Strukturen erläutert.

Strukturen innerhalb von Strassennetzwerken werden in der Forschung breit diskutiert und sind von grosser Bedeutung in der Generalisierung (Mackanness und Edwards 2002). Es gibt diverse Interpretationen wie Strukturen klassifiziert werden sollen (Zhang 2004, Heinze et al. 2005, Marshall 2005). Diese Arbeit baut auf dem Klassifikationsschema von Li und Zhou (2012) auf. Sie teilen Strassenstrukturen in lineare, flächenartige und hybride Strukturen auf. Tab. 6 zeigt exemplarisch Beispiele für jede der drei Klassen auf. Lineare Strukturen bestehen aus einem oder mehreren verbundenen linearen Segmenten. Lineare Segmente sind Segmente, die nicht Teil einer Masche sind, also keine Masche begrenzen. Typische lineare Segmente sind Sackgassen. Flächenartige Strukturen bestehen aus einem oder mehreren verbundenen Flächensegmenten. Flächensegmente sind Segmente, die Teil einer Masche sind und diese somit begrenzen. Typische Flächensegmente sind z.B. die Segmente, welche Häuserblocks begrenzen. Eine hybride Struktur weist sowohl verbundene Flächensegmente, als auch lineare Segmente auf. Die meisten realen Strassennetze weisen eine hybride Struktur auf, wie auch alle Testgebiete dieser Arbeit. Der Fokus dieser Arbeit liegt aber nicht grundsätzlich auf den Strukturen der Makro-Ebene, sondern auf den Strukturen der Mikro-Ebene, also auf der Unterscheidung zwischen linearen und Flächensegmenten. Sie bilden die Basis für die Algorithmen und den dazugehörigen Auswertungen.

**Tab. 6: Klassifikationsschema von Strassenstrukturen gemäss Li und Zhou (2012)**

Strassennetze haben eine lineare (bestehend aus linearen Segmenten), eine flächenartige (bestehend aus Flächensegmenten) oder eine hybride Struktur (bestehend aus linearen Segmenten und Flächensegmenten).

Lineare Struktur		Anz. Segmente total: 15 Anz. lineare Segmente: 15 Anz. Flächensegmente: 0
Flächenartige Struktur		Anz. Segmente total: 18 Anz. lineare Segmente: 0 Anz. Flächensegmente: 18
Hybride Struktur		Anz. Segmente total: 26 Anz. lineare Segmente: 13 Anz. Flächensegmente: 13

### 3.6 Average Connectivity

Die Average Connectivity ist ein Mass aus der Graphen-Theorie und wurde auch schon von Li und Zhou (2012) verwendet um die Konnektivität von Strassennetzwerken zu quantifizieren. Im Gegensatz zur binären Interpretation der Konnektivität eines Strassennetzwerkes (das Strassennetzwerk ist verbunden oder ist nicht verbunden) quantifiziert das Mass der Average Connectivity die Konnektivität genauer, falls der Graph *nicht* verbunden ist. Sie ist folgendermassen definiert (Li und Zhou 2012):

$$\text{Average Connectivity} = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N; i \neq j} a_{ij}}{N(N-1)} \quad (3)$$

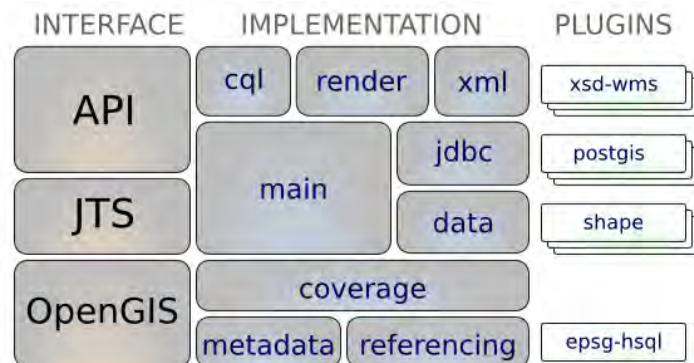
wobei  $i$  und  $j$  Knoten im Graphen sind,  $a_{ij} \in \{1, 0\}$ , wobei  $a_{ij} = 1$  (respektive  $a_{ij} = 0$ ) bedeutet, dass es zwischen den Knoten  $i$  und  $j$  einen (respektive keinen) Pfad gibt und  $N$  ist die Anzahl Knoten im Graphen. Die Average Connectivity quantifiziert also wie viele Paare von Knoten miteinander über einen Pfad verbunden sind, summiert und normalisiert diese auf einen Wert zwischen 0 und 1. Ein Wert von 0 bedeutet, dass *keine* Knoten miteinander verbunden sind, währenddessen ein Wert von 1 widerspiegelt, dass *alle* Knoten miteinander verbunden sind. Tab. 5 zeigt, dass alle Testgebiete eine Average Connectivity unter 1 aufweisen. Keines der Testgebiete ist also vollständig verbunden; alle haben isoliert vorliegende Segmente.

# 4 Basisalgorithmen und Software Prototyp

In einer ersten Runde wurden für diese Arbeit drei verschiedene Algorithmen (die Basisalgorithmen) implementiert und für die vier Testgebiete gerechnet. Die drei Algorithmen umfassen den Stroke-Ansatz von Thomson und Richardson (1999), den Maschen-Ansatz von Hu et al. (2007) und Chen et al. (2009), sowie den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz von Li und Zhou (2012). Die genaue Methodik, sowie die Resultate und die Diskussion der Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten für alle drei Algorithmen beschrieben. Von den drei Algorithmen soll derjenige ausgewählt werden, auf dessen Grundlage dann die Erweiterungen und Veränderungen zur Optimierung der Ergebnisse (Kapitel 5) entwickelt werden.

## 4.1 Software Tools

Für die Implementierung der Algorithmen sowie die Auswertung der Resultate wurde eine Kombination von verschiedenen Software Tools benutzt. Die Implementation sämtlicher Algorithmen basiert auf der objektorientierten Programmiersprache Java<sup>1</sup> und einer Reihe von Open Source Bibliotheken. GeoTools<sup>2</sup> ist die grösste verwendete Bibliothek und stellt Methoden für die Manipulation von räumlichen Daten zur Verfügung und implementiert die Spezifikationen des Open Geospatial Consortium (OGC)<sup>3</sup>. Abb. 16 gibt einen Überblick über die GeoTools Bibliothek.



**Abb. 16: Übersicht der GeoTools Bibliothek**

Quelle: docs.geotools.org, Zugriff: 05.06.2013.

Als Entwicklungsumgebung wurde Eclipse<sup>4</sup> verwendet. Weiter wurde von den Möglichkeiten von Maven<sup>5</sup> Gebrauch gemacht, einem Software Project Management Tool. JUnit<sup>6</sup> wurde für das systematische Testen

<sup>1</sup> <http://www.java.com>

<sup>2</sup> <http://geotools.org>

<sup>3</sup> <http://www.opengeospatial.org/>

<sup>4</sup> <http://www.eclipse.org/>

<sup>5</sup> <http://maven.apache.org/>

<sup>6</sup> <http://junit.org>



von Software Modulen verwendet. ArcGIS 10.1<sup>1</sup>, eine kommerzielle GIS-Software von Esri<sup>2</sup>, wurde verwendet um die räumlichen Datensätze zu verwalten und darzustellen. Als Schnittstelle auf die räumlichen Daten und für deren Export wurde das Shapefile<sup>3</sup> von Esri verwendet. Microsoft Excel 2010<sup>4</sup> und SPSS<sup>5</sup> von IBM wurde für die Erstellung von statistischen Berechnungen und für Visualisierungen genutzt.

### 4.2 Graph-Datenstruktur als Grundlage

Als grundlegende Datenstruktur für alle Algorithmen wurde ein primärer Graph implementiert, wie er in Abschnitt 2.1.5.2 beschrieben ist. Die Strassennetze werden auf einen Graphen abgebildet. Die Kanten des Graphen widerspiegeln die einzelnen Strassensegmente. Knoten verbinden verschiedene Strassensegmente oder repräsentieren Sackgassen. Die Manipulation der Strassennetze durch die Algorithmen basiert stets auf der Grundlage dieses Graphen, entweder in seiner einfachen primären Version (wie in Abschnitt 2.1.5.2 beschrieben) für den Stroke-Ansatz, oder aber in einer etwas komplizierteren Variante für den Maschen- und den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz, wie er ausführlicher in Abschnitt 4.5.4.1 erläutert wird.

### 4.3 Software Prototyp

Sämtliche Algorithmen wurden in einem Software Prototyp implementiert. Der Prototyp, beziehungsweise die Algorithmen, wurden mit Hilfe von Design Patterns von [Gamma et al. \(1994\)](#) implementiert. Unter anderem wurden das Visitor-Pattern, das Decorator-Pattern, das Strategy-Pattern, das Factory-Pattern und das Template-Pattern verwendet. Generell, jedoch nicht ausschliesslich, wurde von Code-Vererbung (Bilden von Subklassen) abgesehen, sondern entweder die Interface-Vererbung (subtyping) oder das Prinzip der Aggregation und Komposition verwendet. Weiter wurde versucht nach dem „Open-Closed“ Prinzip zu programmieren ([Meyer 1988](#)). Klassen sollten dabei offen für Erweiterungen sein, aber geschlossen für Veränderungen. In diesem Zusammenhang wurde versucht ein möglichst modulares Design zu gestalten und Abhängigkeiten untereinander, so gut wie möglich, zu vermeiden. Generell wurde nach dem Konzept „*eine Klasse, eine Funktion*“ programmiert und die entsprechende Funktion in der Klasse gekapselt ([Martin 2003](#)). Zudem wurde gemäss dem Liskov'schen Substitutionsprinzip verfahren ([Liskov und Wing 1994](#)). Wo immer möglich, wurde anstelle von konkreten Subtypen (beispielsweise `ArrayList<T>` aus der Java Bibliothek) der Basistyp verwendet (`List<T>` aus der Java Bibliothek). Diese Herangehensweise garantiert, dass die Basistypen in einer anderen Implementation durch alle Klassen, welche das Interface des Basistyps implementieren, ersetzt werden können.

Ein Klassendiagramm des Prototyps mit den wichtigsten Klassen ist in [Abb. 17](#) dargestellt. Eine Beschreibung der Funktion der einzelnen Klassen ist in [Tab. 7](#) ersichtlich.

---

<sup>1</sup> <http://www.esri.com/software/arcgis>

<sup>2</sup> <http://www.esri.com/>

<sup>3</sup> <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>

<sup>4</sup> <http://office.microsoft.com/en-us/excel/>

<sup>5</sup> <http://www-01.ibm.com/software/ch/de/analytics/spss/>



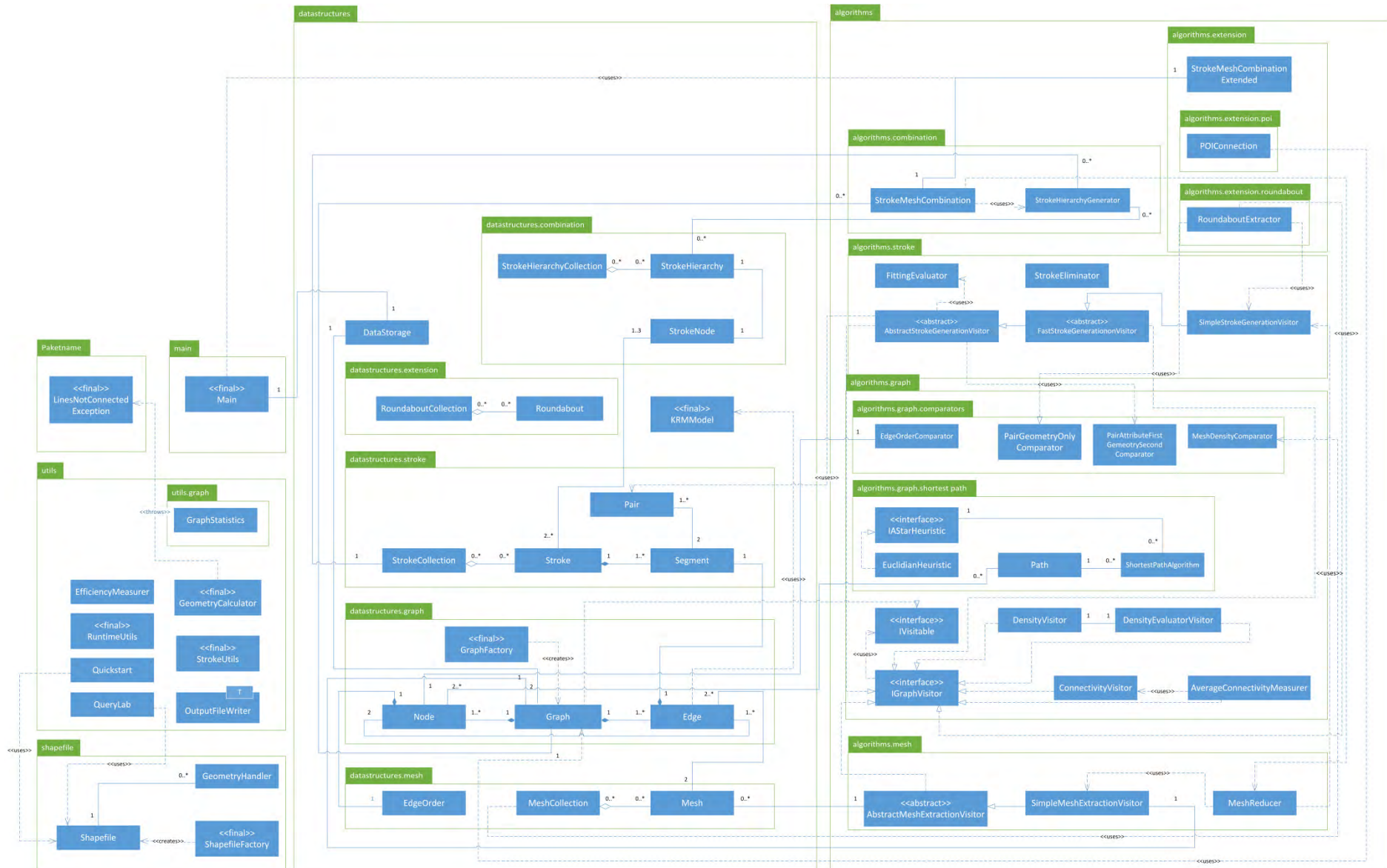


Abb. 17: UML Klassendiagramm des Prototypen mit den wichtigsten Klassen

Tab. 7: Übersicht der wichtigsten Klassen im Prototypen

Package	Klasse	Funktion
algorithms.combination	StrokeHierarchyGenerator	Generiert Stroke Hierarchien in linearen Strukturen
algorithms.combination	StrokeMeshCombination	Modelliert integrierten Stroke-Maschen Kombinationsalgorithmus von <a href="#">Li und Zhou (2012)</a>
algorithms.extension	StrokeMeshCombinationExtended	Modelliert den erweiterten Stroke-Maschen Kombinationsalgorithmus von <a href="#">Li und Zhou (2012)</a>
algorithms.extension.poi	POIConnection	Stellt Erschliessung von POIs sicher
algorithms.extension.roundabout	RoundaboutExtractor	Extrahiert Kreisel aus dem Strassennetz
algorithms.graph	AverageConnectivityMeasurer	Berechnet die Average Connectivity eines Graphen
algorithms.graph	ConnectivityVisitor	Prüft Graph auf Konnektivität
algorithms.graph	DensityEvaluatorVisitor	Evaluert Ergebnisse der DensityVisitor Klasse
algorithms.graph	DensityVisitor	Berechnet dichte Segmente in Siedlungsgebieten
algorithms.graph	IGraphVisitor	Graph Visitor Interface
algorithms.graph	IVisitable	Visitable Interface des Visitor Pattern
algorithms.graph.comparators	EdgeOrderComparator	Comparator für das Sortieren von Kanten
algorithms.graph.comparators	MeshDensityComparator	Comparator für das Sortieren von Maschen
algorithms.graph.comparators	PairAttributeFirstGeometrySecondComparator	Comparator für die Stroke Bildung nach dem <i>attribute first geometry second</i> Prinzip
algorithms.graph.comparators	PairGeometryOnlyComparator	Comparator für geometrische Stroke Bildung
algorithms.graph.shortestPath	EuclidianHeuristic	Euklidische Heuristik des A*-Algorithmus
algorithms.graph.shortestPath	IAStarHeuristic	Interface für Heuristik des A*-Algorithmus
algorithms.graph.shortestPath	Path	Pfad in einem Graphen
algorithms.graph.shortestPath	ShortestPathAlgorithm	Implementation des A*-Algorithmus
algorithms.mesh	AbstractMeshExtractionVisitor	Extrahiert Maschen aus einem Graphen
algorithms.mesh	MeshReducer	Fusioniert Maschen in einem Graphen
algorithms.mesh	SimpleMeshExtractionVisitor	Impl. von AbstractMeshExtractionVisitor
algorithms.stroke	AbstractStrokeGenerationVisitor	Legt Basis für Generierung von Strokes
algorithms.stroke	FastStrokeGenerationVisitor	Implementierung von AbstractStrokeGenerationVisitor
algorithms.stroke	FittingEvaluator	Verkettet Segmente zu Strokes
algorithms.stroke	SimpleStrokeGenerationVisitor	Erweiterung des FastStrokeGenerationVisitor
algorithms.stroke	StrokeEliminator	Entfernt die kurzen Strokes
datastructures	DataStorage	Speichert Daten
datastructures	KRMModel	Helper-Klasse für Zugriff aus das KRM Model
datastructures.combination	StrokeHierarchy	Modelliert Stroke-Hierarchien in linearen Strukturen
datastructures.combination	StrokeHierarchyCollection	Kollektion von StrokeHierarchien
datastructures.combination	StrokeNode	Modelliert Knoten in einer linearen Baumhierarchie
datastructures.extension	Roundabout	Modelliert einen Kreisel
datastructures.extension	RoundaboutCollection	Kollektion von Kreiseln
datastructures.graph	Edge	Modelliert eine Kante in einem Graphen
datastructures.graph	Graph	Modelliert einen Graphen
datastructures.graph	GraphFactory	Factory zur Erstellung von Graphen
datastructures.graph	Node	Modelliert einen Knoten in einem Graphen
datastructures.mesh	EdgeOrder	Sortiert Kanten um einen Graphen
datastructures.mesh	Mesh	Modelliert eine Masche
datastructures.mesh	MeshCollection	Kollektion von Maschen
datastructures.stroke	Pair	Paar von Segmenten an einem Knoten
datastructures.stroke	Segment	Modelliert ein Segmente eines Strokes
datastructures.stroke	Stroke	Modelliert einen Stroke
datastructures.stroke	StrokeCollection	Kollektion von Strokes
exceptions	LinesNotConnectedException	Exception für nicht verbundene Segmente
main	Main	Main-Methode für den Start der Software
shapefile	GeometryHandler	Manipulation von Shapefiles
shapefile	Shapefile	Modelliert ein Shapefile
shapefile	ShapefileFactory	Factory zur Erstellung von Shapefiles
utils	EfficiencyMeasurer	Misst Laufzeit von Algorithmen
utils	GeometryCalculator	Stellt geometrische Funktionen zur Verfügung
utils	OutputFileWriter	Erstellt CSV-Files
utils	QueryLab	GUI zur Abfrage von Attributen in Shapefiles
utils	Quickstart	Einfaches GUI für die Darstellung von Shapefiles
utils	RuntimeUtils	Liefert Information über das System
utils	StrokeUtils	Helper Klasse für Strokes
utils.graph	GraphStatistics	Erstellt Graph Statistiken/Kennzahlen

## 4.4 Strokes

### 4.4.1 Prinzip eines Strokes

Thomson und Richardson (1999) haben das Konzept der *Strokes* eingeführt. Ein Stroke ist eine Kette von Strassensegmenten, welche dem Prinzip der *Good Continuation* folgt und ist in der Gestalt Theorie begründet. Das Prinzip besteht darin, dass ein Stroke mit einer flüssigen Bewegung und ohne dramatische Änderung des Stils gezeichnet werden kann. Thomson und Brooks (2000) nehmen als Kriterium für die Stroke Generierung den Abbiegungswinkel zwischen zwei Strassensegmenten (Abb. 18). Ist dieser kleiner als ein vordefinierter Grenzwert, so können die Strassensegmente zu einem Stroke zusammengekettet werden. Abb. 19 zeigt ein Beispiel eines Strassennetzwerkes und die Menge der dazugehörigen Strokes.

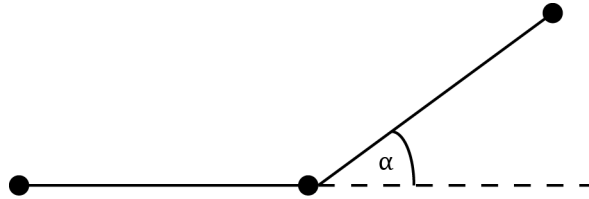


Abb. 18: Abbiegungswinkel  $\alpha$  zwischen zwei Strassensegmenten

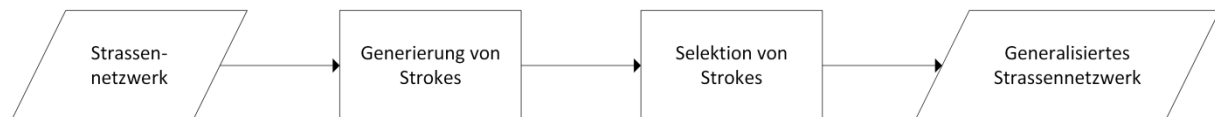


Abb. 19: Strokes aus dem Strassennetzwerk der Innenstadt von Zürich  
Die Strokes sind zufällig mit unterschiedlichen Farben eingefärbt. (© swisstopo)

#### 4.4.2 Strokes als Mittel zur Generalisierung

Strokes können für verschiedene Anwendungen benutzt werden. So werden sie oft für die Detektion von Strukturen innerhalb eines Strassennetzwerkes verwendet (Heinzle et al. 2005, Thom 2005, Yang et al. 2011) wie z.B. für die Extrahierung von komplexen Kreuzungen und parallelen Strassenverläufen, aber auch für die Extrahierung von verschiedenen Mustern wie sternförmige oder gitterförmige Anordnungen von Strassen. Weiter werden sie für die topologische Analyse von Strassennetzwerken eingesetzt (Touya 2010) und für die hierarchische Modellierung von Strassen innerhalb eines Netzwerkes (Tomko et al. 2008, Jiang 2009). Auch in dieser Arbeit werden Strokes für die Detektion von Strukturen verwendet (Abschnitt 5.4).

Am meisten verbreitet sind Strokes aber als Basis der Generalisierung von Strassennetzwerken (Thomson und Richardson 1999, Edwardes und Mackaness 2000, Thomson und Brooks 2000, Misund et al. 2003, Chaudhry und Mackaness 2005, Heinzle et al. 2005, Liu et al. 2010, Touya 2010, Yang et al. 2011, Li und Zhou 2012, Zhou und Li 2012). Die grundlegende Überlegung besteht darin, dass ein Stroke konzeptionell eine Strasse nachbildet. Strassen werden in räumlichen Datenbanken meist nicht als einzelne Objekte dargestellt, sondern als eine Sammlung von Strassensegmenten mit unterschiedlichen Attributen. Ein Stroke soll daher die Strasse aus den Strassensegmenten rekonstruieren. Die effektive Selektion erfolgt dann auf der Ebene der Strokes. Das heisst, dass ein Stroke für den kleineren Masstab entweder selektiert oder entfernt wird. Abb. 20 zeigt das Prinzip der Generalisierung mit Hilfe von Strokes.



**Abb. 20: Prinzip der Generalisierung basierend auf der Selektion von Strokes**

Die Generalisierung erfolgt in zwei Schritten: (1) Generierung von Strokes und (2) die Selektion auf Basis der generierten und geordneten Strokes.

Es stellt sich die Frage, nach welchen Regeln ein Stroke selektiert oder entfernt wird. In der Literatur werden verschiedene Masse diskutiert. Im direkten Ansatz wird oft die Länge als Kriterium hinzugezogen. Die Idee ist, dass ein langer Stroke insofern wichtig ist, als dass ihm eine bedeutende Rolle in der Strassennetzwerk-Konnektivität zugeschrieben wird. Ein langer Stroke, der eine lange Strasse abbildet, ist eine potentiell wichtige Verbindungsstrasse und sollte daher nicht entfernt werden. Einem kleinen Stroke wird diese Funktion nicht zugeschrieben. Ein kurzer Stroke kann deshalb eher entfernt werden, ohne dass die Konnektivität eingeschränkt wird oder die allgemeine Struktur des Strassennetzwerkes verloren geht.

#### 4.4.3 Strategien der Stroke Generierung

Thomson und Richardson (1999) und Thomson und Brooks (2000) definieren eher ungenau, wie ein Stroke generiert werden soll. Sie beschränken sich darin, dass ein Stroke in einer flüssigen Bewegung und ohne dramatische Änderung des Stils gezeichnet werden kann und benutzen hierzu den Abbiegungswinkel zwischen Strassensegmenten (Abb. 18). Um dies zu erreichen, gibt es aber diverse Strategien. Zhou und Li (2012) unterscheiden drei verschiedene Ansätze: (1) Geometrischer Ansatz, (2) Thematischer Ansatz und (3) Hybrider Ansatz, welche in den folgenden Abschnitten kurz erläutert werden.

##### 4.4.3.1 Geometrischer Ansatz

Der geometrische Ansatz verkettet Strokes aufgrund geometrischer Kriterien zu Strassensegmenten. Strassensegmente werden dann zu einem Stroke verkettet, wenn der Abbiegungswinkel zwischen den Segmenten kleiner als ein bestimmter Grenzwert ist. Jiang et al. (2008) diskutieren drei verschiedene Strategien, welche ausschliesslich auf geometrischen Kriterien beruhen: (1) *self-fit*, (2) *self-best-fit* und (3) *every-best-fit*.



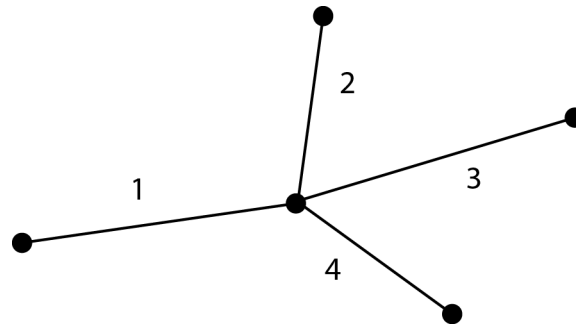


Abb. 21: Vier verschiedene Strassensegmente an einer Kreuzung

**Self-fit** Diese Strategie beginnt mit einem Segment (z.B. Segment 1 in Abb. 21) an einem Knoten und wählt zufälligerweise ein weiteres Segment an der Kreuzung, bei welchem der Abbiegungswinkel kleiner als ein bestimmter Grenzwert ist (z.B. Segment 4). Eine Konsequenz dieser Strategie ist, dass das zufällig ausgewählte Segment nicht unbedingt die beste Lösung im Sinne eines möglichst flüssigen Verlaufs des Strokes liefert. Daher gibt es verschiedene Lösungen, je nachdem welches Segment das Startsegment ist, was nicht genauer definiert ist. Ein Vorteil liegt aber darin, dass diese Strategie algorithmisch schneller als die self-best-fit- und every-best-fit Strategie ist.

**Self-best-fit** Die Self-best-fit Strategie wählt für das Startsegment (beispielsweise Segment 4 in Abb. 21) dasjenige Segment aus allen Segmenten am betreffenden Knoten, mit welchem es den kleinsten Abbiegungswinkel bildet (Segment 1). Ein Nachteil dieser Strategie ist, dass das Startsegment, welches wieder zufällig gewählt wird, bevorzugt behandelt wird.

**Every-best-fit** Die Every-best-fit Strategie behandelt jedes mögliche Paar von Strassensegmenten an einer Kreuzung und wählt dann das Paar mit dem kleinsten Abbiegungswinkel. Den kleinsten Abbiegungswinkel in Abb. 21 bilden die Segmente 1 und 3, welche in einem ersten Schritt zu einem Stroke verkettet werden. In einem zweiten Schritt werden die Segmente 2 und 4 zu einem Stroke verkettet. Im Gegensatz zu den Self-fit und Self-best Strategien ist die Every-best-fit Strategie unabhängig vom Startsegment, weil alle möglichen Segmentpaare geprüft und aus allen Paaren die optimalen Zusammensetzungen ausgesucht werden. Ein Nachteil ist der vergrösserte algorithmische Rechenaufwand.

#### 4.4.3.2 Thematischer Ansatz

Im thematischen Ansatz werden thematische Attribute verwendet um Strokes zu bilden. Mögliche Attribute wären z.B. der Strassenname oder die Strassenklasse. An einer Kreuzung werden diejenigen Segmente verkettet, welche dieselben Attribute haben. Yang et al. (2011) und Zhou und Li (2012) weisen auf folgende Probleme (v.a. mit Strassenamen) hin:

- 1) Die Namen von Strassen sind nicht immer verfügbar, was auch bei den Daten in dieser Arbeit der Fall ist.
- 2) Die Namen von gewissen langen Strassen können unterteilt sein.
- 3) Manchmal gibt es an Kreuzungen mehr als nur zwei Strassensegmente mit gleichem Namen.

Der dritte Punkt ist auch von Bedeutung bei der Strassenklasse als Attribut. So können an einer Kreuzung mehr als nur zwei Strassensegmente mit gleicher Strassenklasse aufeinandertreffen.

#### 4.4.3.3 Hybrider Ansatz

Der hybride Ansatz verwendet eine Kombination aus dem geometrischen und thematischen Ansatz. Zhou und Li (2012) unterteilen den hybriden Ansatz in einen (1) thematisch-geometrischen und (2) geometrisch-thematischen Ansatz. Bei der ersten Variante werden die thematischen Attribute als primäres und die

geometrischen Kriterien als sekundäres Entscheidungskriterium verwendet. Wenn an einer Kreuzung mehr als nur zwei Strassensegmente mit demselben thematischen Attribut aufeinandertreffen wird die Entscheidung mit Hilfe von geometrischen Kriterien getätigt. Bei der zweiten Variante werden geometrische Kriterien als primäre und thematische Kriterien als sekundäre Entscheidungskriterien verwendet.

### 4.4.3.4 Gewählter Ansatz im Prototyp

Zhou und Li (2012) haben eine ausführliche Analyse durchgeführt um zu testen welcher Ansatz oder welche Kombination von Ansätzen die besten Resultate liefert. In ihrer Analyse haben sie für drei reale Testdatensätze von Gebieten innerhalb von Hong-Kong insgesamt 17 verschiedene Ansätze und Kombinationen davon getestet und diese mit aufgestellten Evaluationsmassen ausgewertet. Ihre Resultate haben gezeigt, dass der thematisch-hybride Ansatz mit der Every-best-fit Strategie in Kombination mit der Strassenklasse als Attribut die besten Ergebnisse liefert. Insbesondere ist die Strassenklasse besser geeignet als der Strassenname. Diese Resultate stehen im Widerspruch zu den Ergebnissen von Jiang et al. (2008). In ihrer Analyse haben die Self-fit und Self-best-fit Strategien bessere Resultate erzielt. Allerdings haben sie Strokes nicht für die Generalisierung von Strassennetzwerken verwendet, sondern um den Verkehrsfluss hervorzusagen.

Aufgrund der Ergebnisse der Analyse von Zhou und Li (2012) wurde für diese Arbeit ein hybrider, thematisch-geometrischer Ansatz auf Basis der Every-best-fit Strategie verwendet. Da in den Testdatensätzen die Strassenklasse nicht im Sinne einer ordinalen Klassierung vorhanden ist, wurde die Objektart (Unterscheidung der Strassenbreiten, siehe auch Tab. 2) gewählt. Sie ist dem Prinzip der Strassenklasse am ähnlichsten. Der Ansatz funktioniert gemäss folgenden Regeln:

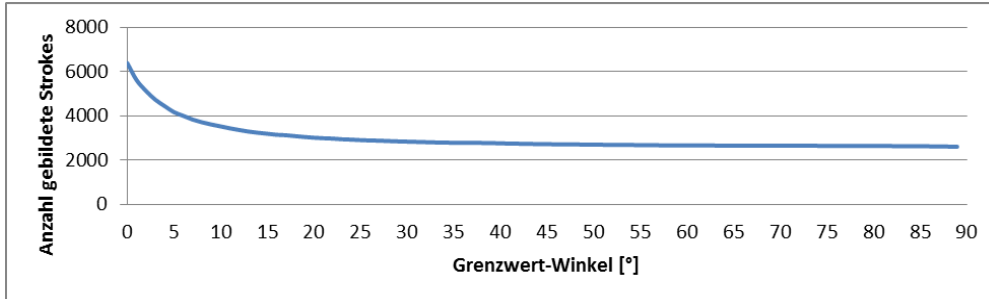
- 1) Haben zwei Segmente  $a$  und  $b$  an einer Kreuzung einen Winkel über dem Grenzwert-Winkel, so werden sie in keinem Falle zu einem Stroke verkettet.
- 2) Zwei Segmente  $a$  und  $b$  werden an einer Kreuzung verkettet, sofern sie einen Winkel unter dem Grenzwert-Winkel haben, die gleiche Objektart aufweisen und es kein anderes mögliches Paar  $a - c$  oder  $b - c$  gibt, bei dem die Objektart gleich wäre und der Winkel kleiner.
- 3) Haben zwei Segmente  $a$  und  $b$  an einer Kreuzung einen Winkel unter dem Grenzwert-Winkel und weisen nicht die gleiche Objektart auf, so werden sie dann miteinander verbunden, wenn es (1) kein weiteres Segment  $c$  gibt, mit welchem ein Paar  $a - c$  oder  $b - c$  gebildet werden kann, so dass  $a$  und  $c$  respektive  $b$  und  $c$  die gleichen Objektarten aufweisen und der Winkel von  $a - c$  respektive  $b - c$  kleiner ist als der Grenzwert-Winkel oder (2) wenn es kein weiteres Segment  $d$  gibt, mit welchem ein Paar  $a - d$  oder  $b - d$  gebildet werden kann, so dass  $a$  und  $d$  respektive  $b$  und  $d$  unterschiedliche Objektarten aufweisen und der Winkel von  $a - d$  respektive  $b - d$  kleiner ist als der Winkel von  $a - b$ .

Regel 1) stellt sicher, dass das Prinzip der *Good Continuation* nicht verletzt wird. Regel 2) und Regel 3) stellen sicher, dass die Objektart stärker gewichtet wird als der Abbiegungswinkel, sofern der Grenzwert-Winkel nicht überschritten wird.

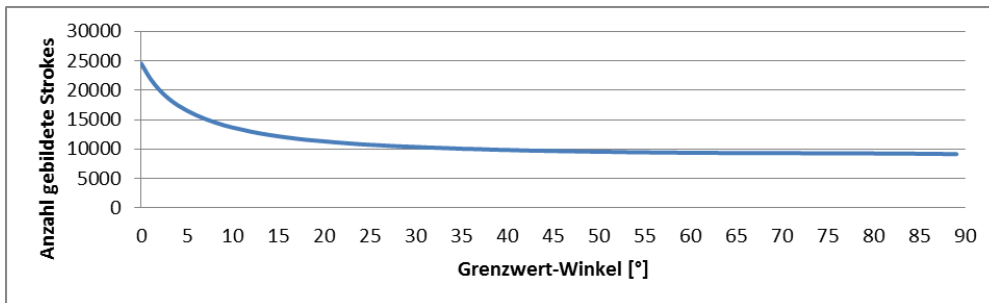
### 4.4.3.5 Wahl des Grenzwert-Winkels

Die Wahl des Grenzwert-Winkels ist insofern wichtig, als dass sie die Einhaltung der Grundidee des Strokes bestimmt, das Prinzip der *Good Continuation*. In der Literatur findet man verschiedene Vorschläge zur Bestimmung des optimalen Grenzwert-Winkels. Zhou und Li (2012) wählen einen Winkel von  $60^\circ$  und Thom (2006) setzte einen Winkel von  $120^\circ$  als Grenzwert. Allerdings ist bei Thom (2006) nicht klar, ob es sich um den „entgegengesetzten“ Winkel ( $180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$ ) handelt. Chaudhry und Mackaness (2005) schlagen einen Winkel zwischen  $40^\circ$  und  $60^\circ$  vor, basierend auf durchgeführten Experimenten von Field et al. (1993), die das Prinzip der *Good Continuation* aus einer psychologischen Betrachtungsweise untersucht haben. Jiang et al. (2008) haben gezeigt, dass sich die Anzahl der gebildeten Strokes innerhalb der Spannbreite zwischen  $30^\circ$  und  $75^\circ$  nicht gross unterscheiden. Eine ähnliche Schlussfolgerung kann auch für die vier Testgebiete dieser Arbeit gezogen werden. Abb. 22 zeigt für jedes der vier Testgebiete die Anzahl der gebildeten Strokes in Abhängigkeit

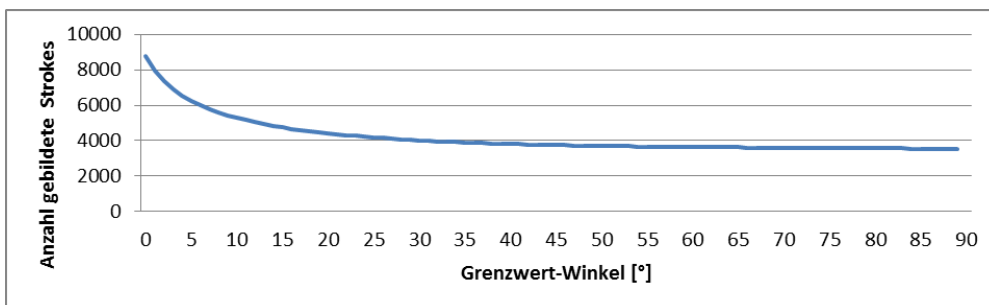
des Grenzwert-Winkels. Es ist dasselbe Muster für alle Testgebiete ersichtlich. Bei einem kleinen Winkel werden verhältnismässig viele Strokes gebildet. Doch sobald der Winkel steigt, sinkt die Anzahl der gebildeten Strokes sehr stark. Ab ca. 35° bleibt die Anzahl Strokes dann mehr oder weniger stabil, bei leicht sinkender Tendenz. Aufgrund der Angaben in der Literatur und der empirischen Analyse, dargelegt in [Abb. 22](#), wurde für diese Arbeit ein fixer Winkel von 60° gewählt.



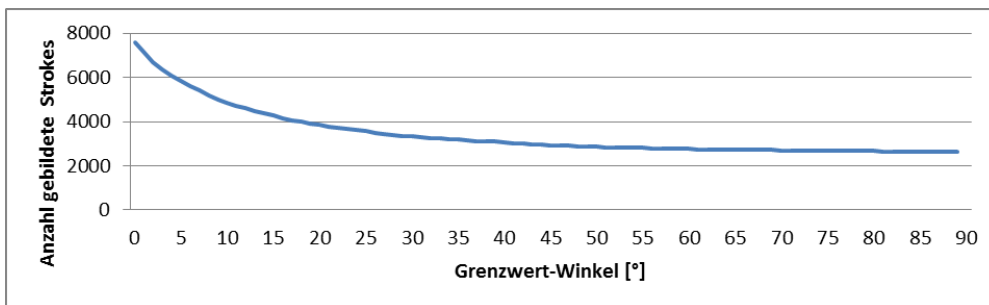
ZU



WT



SU



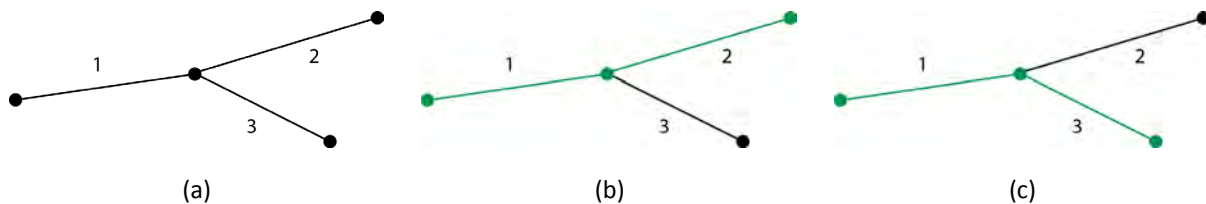
EN

Abb. 22: Anzahl gebildeter Strokes in Abhängigkeit des Grenzwert-Winkels

#### 4.4.4 Stroke-Algorithmus

##### 4.4.4.1 Bildung von Strokes

Eine weit verbreitete Methodik in der Literatur ist, dass bei einem zufälligen Segment gestartet wird und dann an einer Kreuzung das optimale Nachfolge-Segment ausgewählt wird (Chaudhry und Mackaness 2005, Heinzle et al. 2005), mit dem das Startsegment verkettet wird (Self-best-fit Strategie). Dieser Prozess wird solange wiederholt bis alle Segmente prozessiert wurden. Diese Herangehensweise hat zur Folge, dass je nachdem welches Segment das Startsegment ist, unterschiedliche Resultate entstehen können. Abb. 23(a) zeigt eine Ausgangslage mit drei Segmenten. Ist Segment 1 das Startsegment, wird es an der nächsten Kreuzung, aufgrund des kleineren Abbiegungswinkels, mit dem Segment 2 verbunden (Abb. 23(b)). Ist das Startsegment aber Segment 3, so wird dieses mit Segment 1 verbunden (Abb. 23(c)). Man erhält zwei unterschiedliche Resultate, abhängig vom Startsegment.

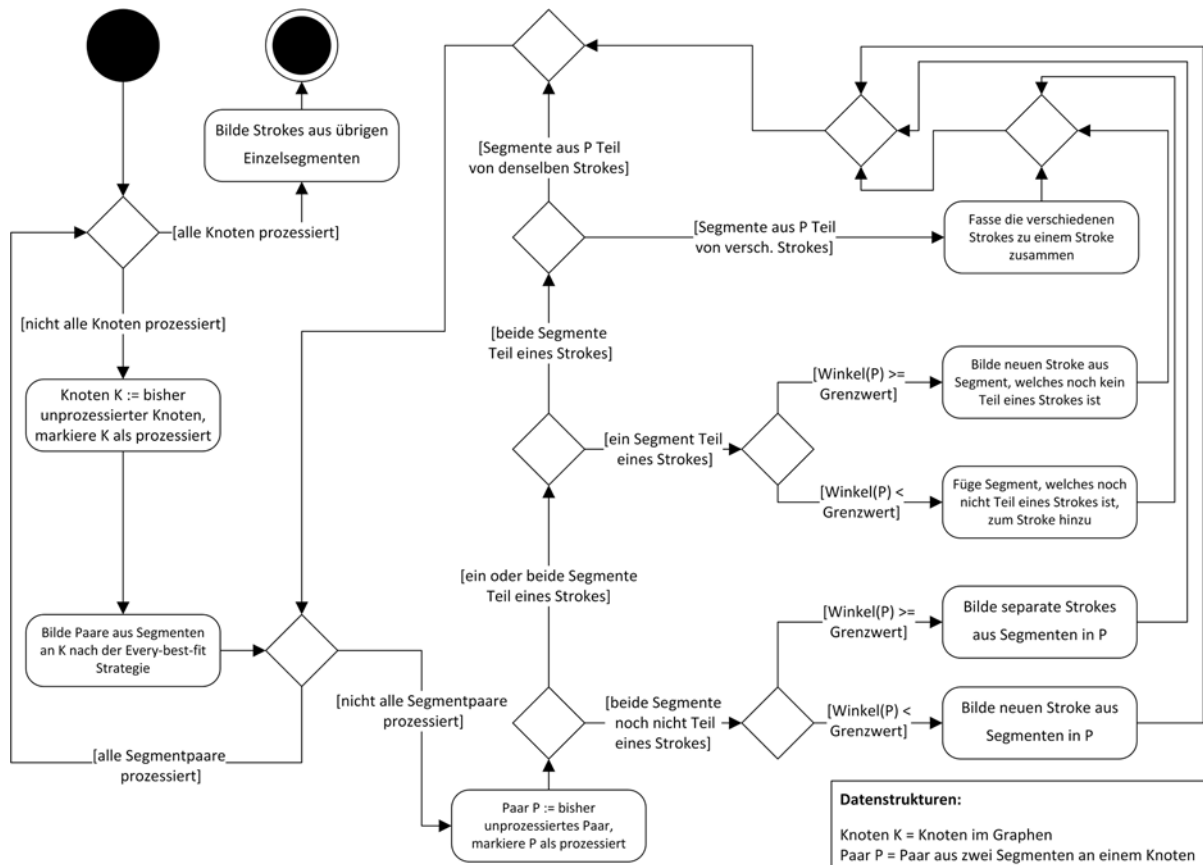


**Abb. 23: Problematik der Stroke-Generierung bei unterschiedlicher Wahl des Startsegments**

Die klassische Stroke-Bildung mit der Ausgangslage dargestellt in (a) kann je nach Wahl des Startsegmentes unterschiedliche Resultate generieren. Wird Segment 1 als Startsegment gewählt, so wird es mit Segment 2 zu einem Stroke verkettet (b). Wird Segment 3 als Startsegment gewählt, so wird es mit Segment 1 verkettet (c).

Da in dieser Arbeit aber die Every-best-fit Strategie verwendet wird, wurde eine andere Herangehensweise gewählt, wie sie auch schon von Thomson und Brooks (2000) und Zhang (2005) angedacht wurde. Das Prinzip ist im UML Aktivitätsdiagramm in Abb. 24 dargelegt. Als Basis dienen nicht die Kanten des Graphen (die Strassensegmente), sondern dessen Knoten, über welche der Algorithmus iteriert. An einem Knoten mit einem Grad grösser als eins werden in einem ersten Schritt alle möglichen Paare von Segmenten gebildet. Unter Berücksichtigung des Grenzwert-Winkels werden dann aus allen Paaren diejenigen ausgesucht, die dem thematisch-geometrischen Ansatz und der Every-best-fit Strategie entsprechen. Diese Paare werden dann in einem nächsten Schritt weiter prozessiert. Der Algorithmus prüft für jedes Paar ob ein oder beide Segmente schon zu einem Stroke gehören. Sind beide Segmente noch nicht Teil eines anderen Strokes, so kann ein neuer Stroke aus dem betroffenen Paar gebildet werden. Ist eines der beiden Segmente schon Teil eines anderen Strokes (dies ist der Fall, wenn der andere Knoten des betroffenen Segmentes schon prozessiert worden ist und das Segment in einen Stroke integriert wurde), so kann das andere Segment den Stroke erweitern. Sind beide Segmente schon Teil eines Strokes, so können zwei verschiedene Fälle unterschieden werden. Sind beide Segmente Teil desselben Strokes, so muss nichts mehr weiter getan werden. Sind sie aber beide Teile von unterschiedlichen Strokes, so müssen die beiden Strokes zusammengefügt werden. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis alle Paare an jedem Knoten des Graphen prozessiert wurden. In einem letzten Schritt müssen noch Strokes aus Segmenten gebildet werden, welche noch nicht in einen Stroke integriert wurden. Dies sind Segmente die zu keinem anderen Segment einen kleineren Winkel als den Grenzwert-Winkel bilden oder aber keinen Segment-Partner finden konnten, weil es am betreffenden Knoten stets andere Segmente hatte, die aufgrund der Every-best-fit Strategie bessere Paare gebildet haben. Eine solche Situation wäre z.B. in Abb. 23(a) ersichtlich. Prozessiert man dort den Knoten, an dem die Segmente 1, 2 und 3 zusammentreffen, so werden die Segmente 1 und 2 miteinander zu einem Stroke verkettet, Segment 3 aber aussen vorgelassen. Sind aus allen diesen Rest-Segmenten einzelne Strokes gebildet worden, terminiert der Algorithmus. Ein Beispiel-Resultat ist in Abb. 19 ersichtlich.





**Abb. 24: UML Aktivitätsdiagramm des implementierten Stroke-Ansatzes**

Der Algorithmus iteriert über alle Knoten und verkettet dort jeweils basierend auf der thematisch-geometrischen Every-best fit Strategie die optimalen Segmente zu Strokes.

#### 4.4.4.2 Selektionskriterien

Nach der Generierung der Strokes erfolgt die Selektion der verhältnismässig wichtigen Strokes. Die Frage ist nun, nach welchem Kriterium Strokes selektiert oder entfernt werden, respektive wie man die Strokes gemäss ihrer Wichtigkeit ordnet. In der Literatur werden verschiedene Ansätze diskutiert. Thomson und Richardson (1999) wählen die Strassenklasse als primäres und die Länge als sekundäres Kriterium, wobei sie die Strassenklassen in drei verschiedene Gruppen (sehr wichtig, wichtig, nicht wichtig) einteilen. Thomson und Brooks (2000) wählen die Länge des Strokes als primäres Kriterium. Als sekundäres Kriterium wählen sie die Strassenklasse der Segmente innerhalb des Strokes. Sind zwei Strokes genau gleich lang, so wird der Stroke, der Segmente mit einer höheren Strassenklasse aufweist, für die Selektion bevorzugt. Hier gilt es aber anzumerken, dass die Wahrscheinlichkeit in einem realen Datensatz mit einer genügend grossen räumlichen Auflösung zwei Strokes vorzufinden, welche genau die gleiche Länge haben, äusserst gering ist. Chaudhry und Mackaness (2005) und Li und Zhou (2012) wählen als Basis die Länge des Strokes. Die Überlegung dahinter ist, dass Hauptverkehrsachsen, die prinzipiell eher selektiert werden sollten, selten grosse Richtungsänderungen aufweisen und daher durch lange Strokes repräsentiert werden.

In dieser Arbeit wurde ein hybrider Ansatz aus thematischen Attributen und der Länge gewählt. Die Ordnung der Strokes bezüglich ihrer Wichtigkeit wurde nach folgenden Regeln erstellt:

- 1) Hat ein Stroke ein Segment, welches gemäss der Anforderungsanalyse nicht entfernt werden darf (Tab. 3) oder sollte (Tab. 4), so ist er höher eingeordnet als ein Stroke, der kein solches Segment enthält, unabhängig von der Länge.

- 2) Haben beide Strokes ein Segment, welches gemäss der Anforderungsanalyse nicht entfernt werden darf oder sollte, so wird der Stroke mit der grösseren Länge als wichtiger eingeordnet.
- 3) Haben beide Strokes kein Segment, welches gemäss der Anforderungsanalyse nicht entfernt werden darf oder sollte, so wird der Stroke mit der grösseren Länge als wichtiger eingeordnet.

Regel 1) stellt sicher, dass die Segmente, die im Zielmassstab zwingend erhalten bleiben müssen (Tab. 3) oder sollten (Tab. 4), nicht oder nur bei einer extremen Ausdünnung entfernt werden. Die Semantik wird somit stärker gewichtet als die Länge.

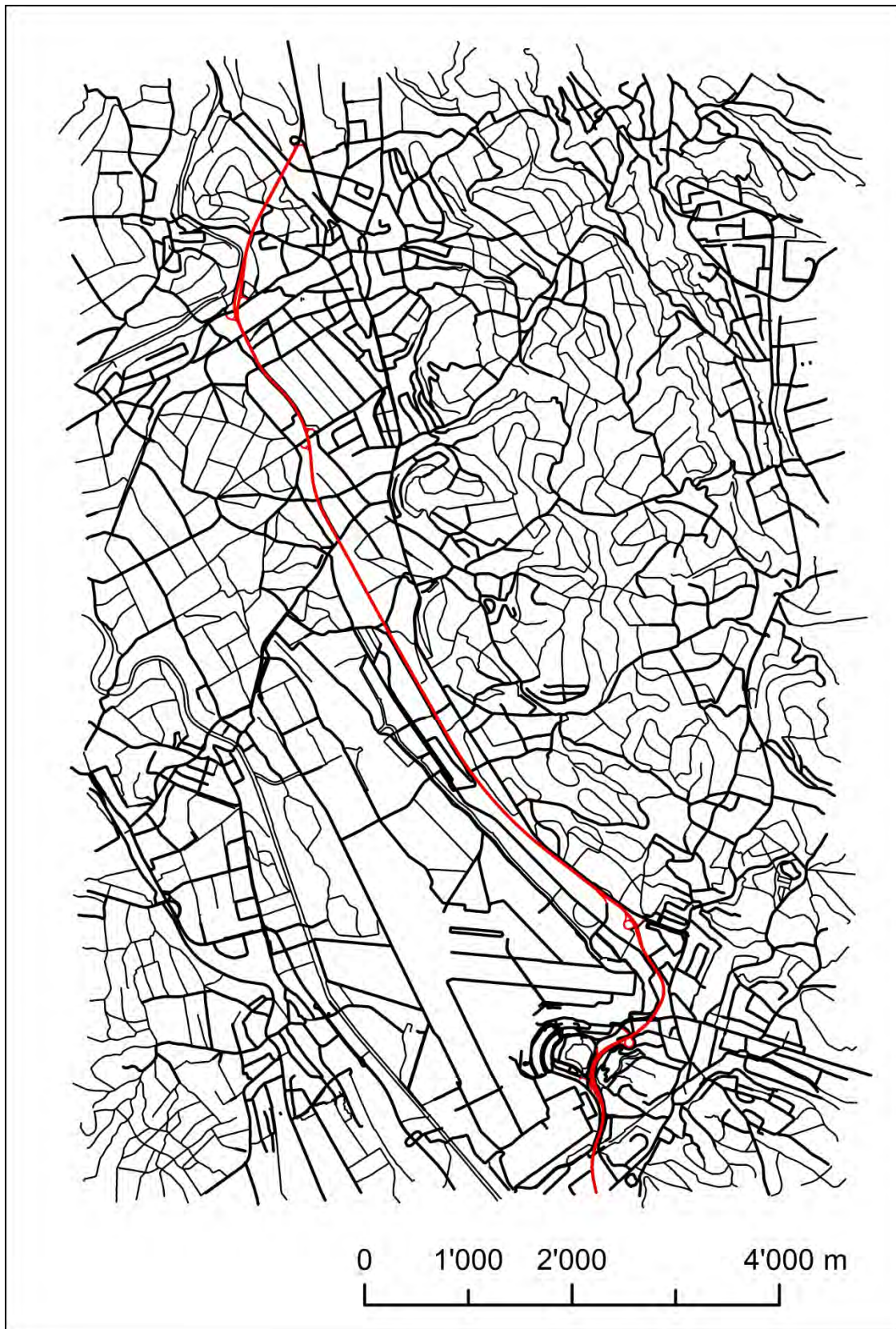
Ein Vorteil des Stroke-Ansatzes ist, dass ein Grossteil der weichen Anforderungen (Anforderungen 12 bis 14) implizit erfüllt wird. So sind wichtige Verbindungsstrassen, die ein Nutzer einer Karte als solche interpretieren würde, wohl vor allem diejenigen Strassen, die einen langen und flüssigen Verlauf bilden, also genau die Strassen, die durch das Prinzip der Strokes extrahiert werden. Kleine Sackgassen bilden fast immer sehr kurze Strokes, die aus nur einem Segment bestehen, da sie einen Abbiegungswinkel von ca. 90° (und damit über dem Grenzwert-Winkel) mit der Strasse bilden, zu der die Sackgasse einseitig verbunden ist. Kleine Sackgassen werden daher tendenziell eher entfernt.

Strassensegmente, welche eher nicht selektioniert werden sollen (Anforderung 11 aus der Anforderungsanalyse, Treppen-Segmente), wurden nicht weiter speziell beachtet, weil Treppen in aller Regel keine langen Strokes bilden und daher nicht selektiert werden. Prinzipiell wäre es aber möglich, dass Strokes, welche Segmente beinhalten, die entfernt werden sollten, tiefer als alle anderen eingestuft werden. Diese Herangehensweise könnte unter Umständen aber zu Konflikten führen, wenn derselbe Stroke auch Segmente enthält, welche nicht entfernt werden dürfen oder sollen.

Um gemäss der Anforderungsanalyse ca. 70 % der Strassensegmente zu selektieren, werden mit abnehmender Wichtigkeit bezüglich der Ordnung solange Strokes selektiert, bis insgesamt 70 % der Strassensegmente selektiert wurden.

### 4.4.5 Resultate des Stroke-Ansatzes

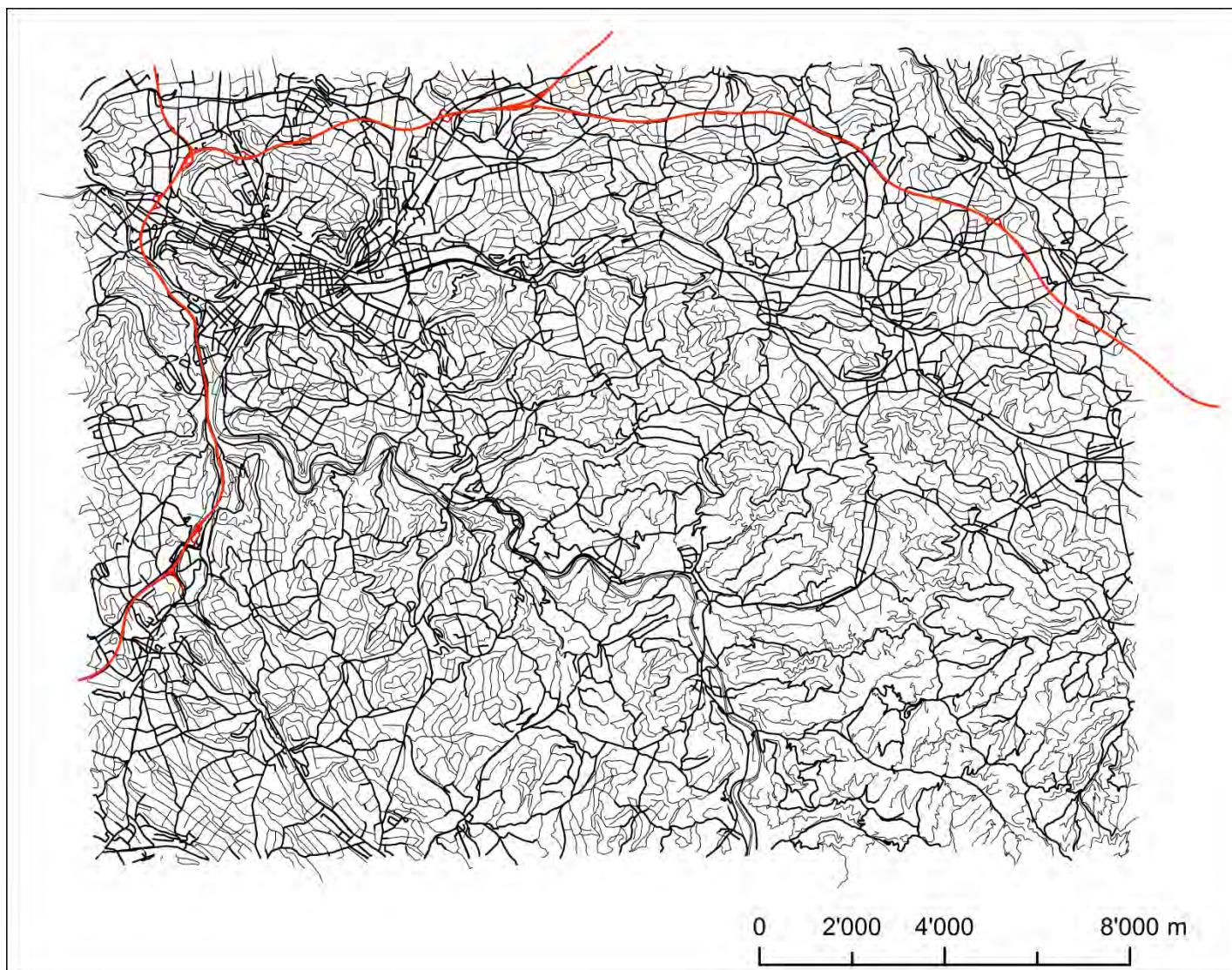
Die Resultate des Stroke-Ansatzes für die vier Testgebiete sind in Abb. 25 bis Abb. 28 und die dazu passenden statistischen Analysen in Tab. 8 und Tab. 9 ersichtlich.



**Abb. 25: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet ZU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)





**Abb. 26: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet WT**

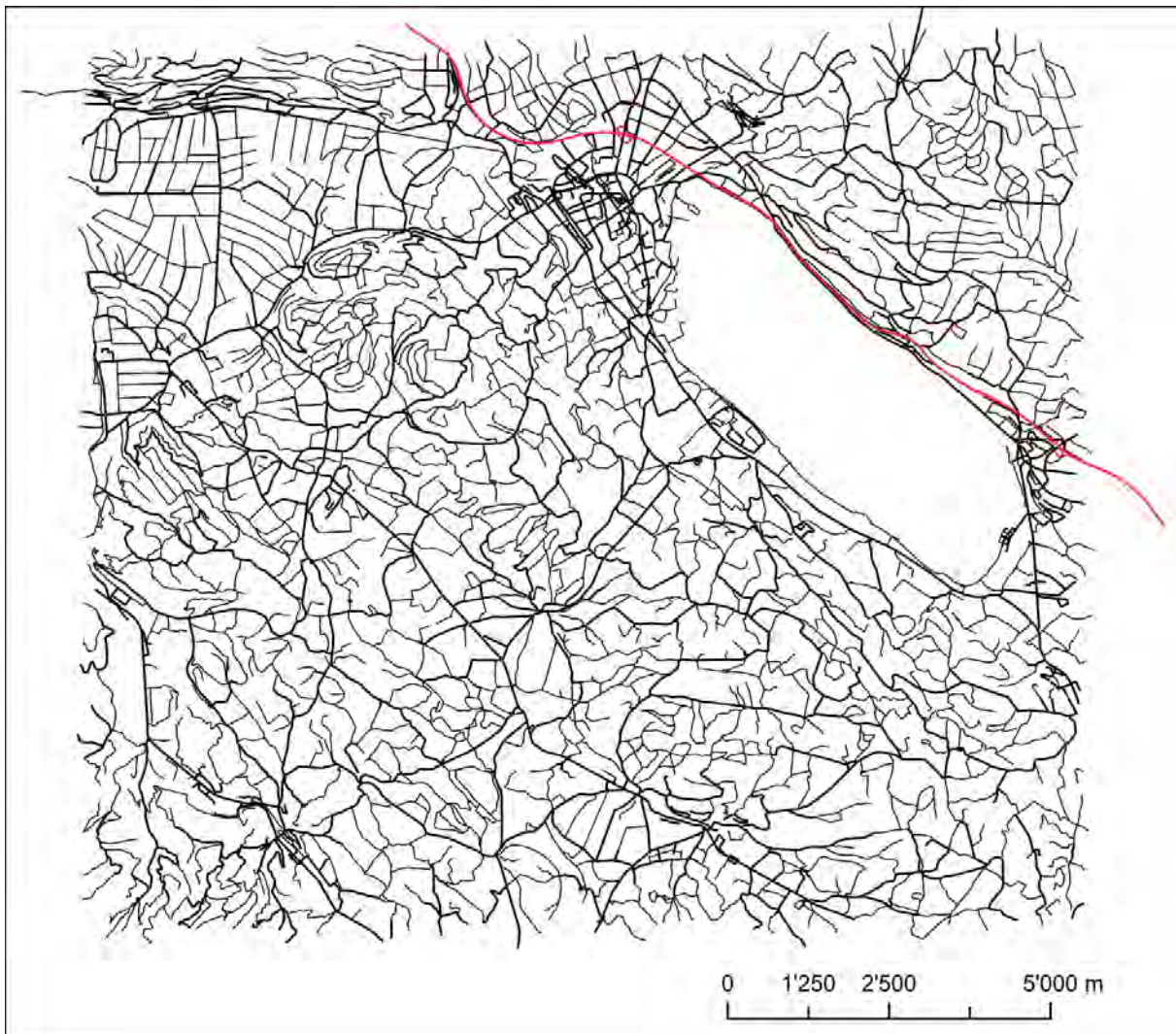
Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)



**Tab. 8: Resultate des Stroke-Ansatzes für die Testgebiete ZU und WT**

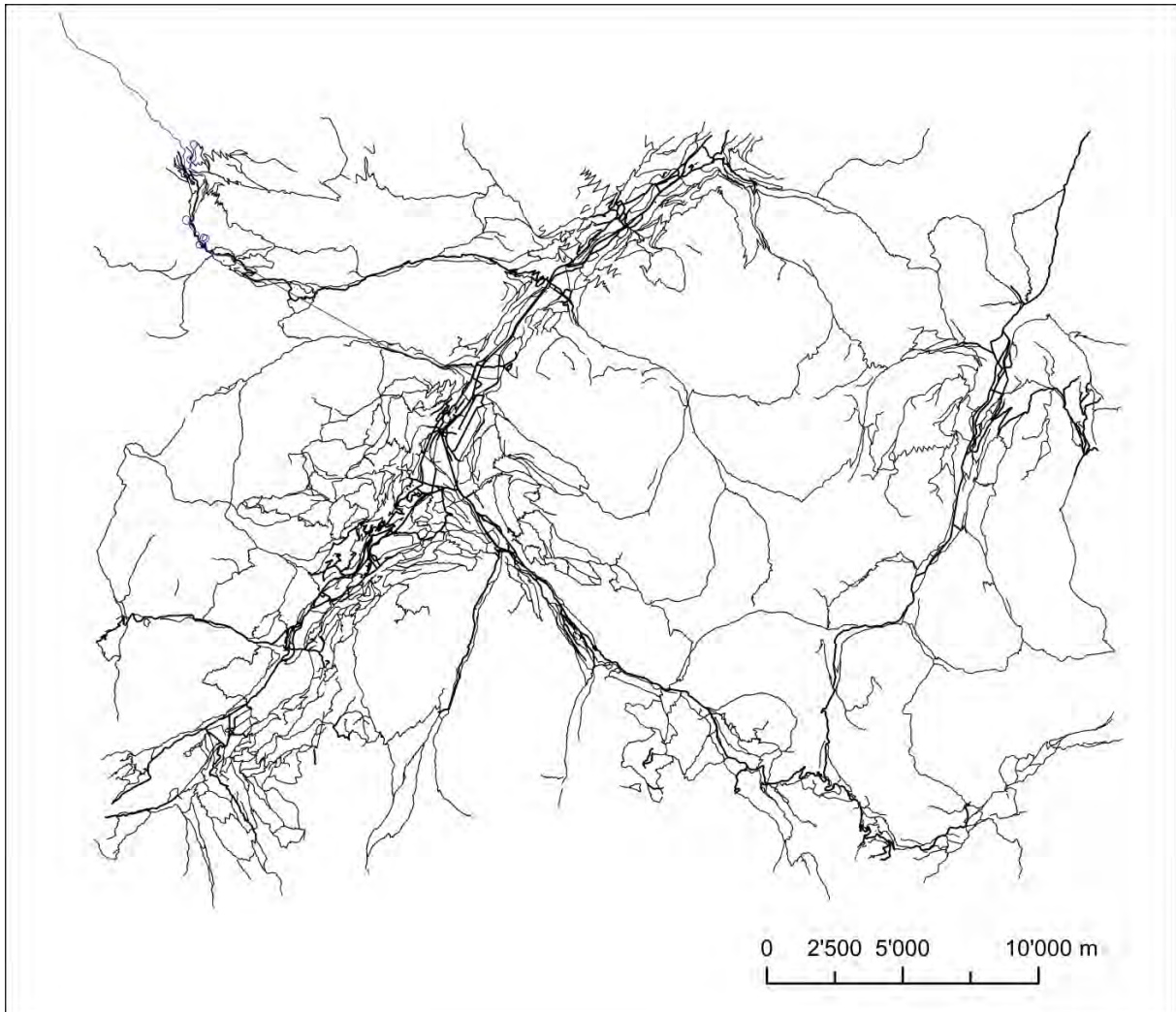
Gegenübergestellt sind jeweils das ungeneralisierte Testgebiet (-TG) und die Ergebnisse des Stroke-Ansatzes (-SA).

Kennzahl	ZU-TG	ZU-SA	WT-TG	WT-SA
Anzahl Segmente total	8'694	6'085	30'780	21'542
Anzahl lineare Segmente	945	938	2'951	2'810
Anzahl Flächensegmente	7'749	5'147	27'829	18'732
Länge Segmente total [m]	992'752	778'134	4'368'784	3'374340
Länge lineare Segmente [m]	119'009	128'699	502'478	504'263
Länge Flächensegmente [m]	873'743	649'435	3'866'306	2'870'077
Anzahl nicht entfernbare Segmente	588	588	1'665	1'665
Anzahl bevorzugte Segmente	195	195	634	634
Anzahl Treppensegmente	16	8	27	6
Anzahl Sackgassen	801	454	2'507	1'297
Anzahl neue Sackgassen	-	216	-	618
Average Connectivity	0.99905	0.95394	0.99761	0.97560


**Abb. 27: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet SU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert.

(© swisstopo)



**Abb. 28: Resultat des Stroke-Ansatzes für das Testgebiet EN**

Die Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. Blau symbolisiert sind Autozüge. (© swisstopo)

**Tab. 9: Resultate des Stroke-Ansatzes für die Testgebiete SU und EN**

Gegenübergestellt sind jeweils das ungeneralisierte Testgebiet (-TG) und die Ergebnisse des Stroke-Ansatzes (-SA).

Kennzahl	SU-TG	SU-SA	EN-TG	EN-SA
Anzahl Segmente total	11'129	7'789	8'975	6'282
Anzahl lineare Segmente	1'897	1'679	1'520	1'584
Anzahl Flächensegmente	9'232	6'110	7'455	4'698
Länge Segmente total [m]	1'582'041	1'285'993	2'183'795	1'810'832
Länge lineare Segmente [m]	302'108	296'199	429'530	509'697
Länge Flächensegmente [m]	1'279'933	989'794	1'754'265	1'301'135
Anzahl nicht entfernbare Segmente	684	684	445	445
Anzahl bevorzugte Segmente	309	309	659	659
Anzahl Treppensegmente	18	0	18	2
Anzahl Sackgassen	1'533	801	1'302	671
Anzahl neue Sackgassen	-	273	-	246
Average Connectivity	0.99680	0.94219	0.90888	0.91827

Die Zahlen in [Tab. 8](#) und [Tab. 9](#) zeigen, dass in jedem Testgebiet rund 70 % der Strassensegmente selektiert wurden. Interessant ist aber, dass die totale Länge aller Segmente verhältnismässig weniger stark gesunken ist. Dies liegt darin begründet, dass der Stroke-Ansatz lange Strokes selektiert und kurze Strokes entfernt. Weiter spannend ist der Fakt, dass die Anzahl lineare Segmente weniger stark abgenommen hat, als die Anzahl der Flächensegmente. Im Falle des Testgebietes EN hat die Anzahl linearer Segmente sogar zugenommen. Bezogen auf die totale Länge, haben alle, mit Ausnahme des Testgebietes SU, zugenommen. Diese Sachlage deutet darauf hin, dass aus Flächensegmenten lineare Segmente entstanden sind. Direkt damit gekoppelt ist die Entstehung neuer Sackgassen. Die totale Anzahl Sackgassen geht zwar in allen Testgebieten zurück, weil kleine Sackgassen entfernt werden, aber so sind in allen Testgebieten diverse neue Sackgassen entstanden. Besonders in den dichteren Stadtzentren ist gut ersichtlich, dass neue Sackgassen entstanden sind. Dies verstösst gegen Anforderung 6 aus der Anforderungsanalyse. Neue Sackgassen dürfen nicht entstehen, weil einem Kartennutzer vermittelt wird, dass die Strasse dort endet, obwohl dies real nicht der Fall ist.

Die Average Connectivity ist mit Ausnahme des Testgebietes EN überall gesunken. Der leichte Anstieg im Testgebiet EN begründet sich durch die grosse Anzahl isoliert vorliegender Segmente im ungeneralisierten Testgebiet. Viele dieser isolierten Segmente sind relativ kurz und bilden daher auch keine langen Strokes und werden folglich nicht selektiert. Nichtsdestotrotz hat das Testgebiet EN, sowie auch alle anderen, keine vollständige Konnektivität (was einer Average Connectivity von 1 entsprechen würde). Eine Verschlechterung der Konnektivität bedeutet, dass Segmente, welche im ungeneralisierten Testgebiet noch miteinander verbunden sind, jetzt nicht mehr miteinander verbunden sind. Dies ist durch entstandene Strassenunterbrüche im Generalisierungsergebnis zu begründen. Ehemals durch einen Pfad verbundene Segmente sind nicht mehr miteinander verbunden. Diese Sachlage verstösst gegen die Anforderungen 5 und 7 aus der Anforderungsanalyse.

Kein Problem hingegen stellt die Selektion von nicht entfernbaren ([Tab. 3](#)) und bevorzugten Segmenten ([Tab. 4](#)) dar. Diese konnten in allen Testgebieten selektiert werden. Weiter ist auch die Anzahl Treppensegmente in allen Testgebieten gesunken.

#### 4.4.6 Diskussion der Resultate

Die Selektion aller nicht entfernbaren und bevorzugten Segmente ist mit dem Stroke-Ansatz einfach zu handhaben und kann somit sichergestellt werden. Diesbezüglich werden alle Anforderungen erfüllt. Problematisch ist aber der Fakt, dass der Stroke-Ansatz die Topologie nicht beachtet. Er selektiert einfach lange Strokes, ohne zu beachten, dass dadurch die Konnektivität verloren gehen kann, diverse neue Sackgassen entstehen und es zu Unterbrüchen im Strassennetzwerk kommt. Dies verstösst gegen die Anforderungen 5 bis 7 aus der Anforderungsanalyse. Direkt damit gekoppelt ist, wie bereits erwähnt, die Entstehung von neuen linearen Segmenten aus ehemaligen Flächensegmenten.

[Thomson und Brooks \(2000\)](#) haben einen Mechanismus vorgestellt, der einzelne Strokes so entfernt, dass die Konnektivität erhalten bleibt. Auch [Yang et al. \(2011\)](#) lösen das Problem der Konnektivität, indem sie mit Hilfe eines minimalen Spannbaums die isolierten Segmente miteinander verbinden. Beide Ansätze lösen aber nicht die Probleme der Unterbrüche und das Problem der neu entstehenden Sackgassen.

Was mit dem Stroke-Ansatz aber sehr gut funktioniert, ist die Entfernung von kurzen Sackgassen. Kurze Sackgassen bilden ebenso kurze Strokes, welche nicht selektiert werden und deshalb entfernt werden. Wenn man die Resultate in [Abb. 25](#) bis [Abb. 28](#) betrachtet, so ist relativ gut ersichtlich, dass die langen Strokes selektiert wurden, also prinzipiell die verhältnismässig längeren Verkehrsachsen.

Die Beurteilung inwiefern wichtige Verbindungsstrassen, die ein potentieller Nutzer der Karte intuitiv als solche interpretieren könnte (Anforderung 12 aus der Anforderungsanalyse), selektiert wurden, ist schwierig. Die gleiche Argumentation gilt auch für die Sammelstrassen (Anforderung 13). Prinzipiell selektiert der Stroke-Ansatz aber längere Strassen sehr gut, vor allem bei einer relativ schwachen Ausdünnung, wie es beim Zielmassstab von 1:50'000 der Fall ist. Es stellt sich noch die Frage, inwiefern Hauptzufahrten zu wichtiger



Infrastruktur selektiert wurden (Anforderung 15). Hierzu kann aber noch keine Aussage getätigt werden, weil entsprechende Daten (die Infrastruktur) nicht in den Selektionsprozess miteinbezogen worden sind.

Anforderung 16 aus der Anforderungsanalyse verlangt, dass die grundlegende Struktur des Strassennetzwerkes erhalten bleibt. Eine genaue Beurteilung ist auch hier schwierig, weil nicht weiter genau definiert ist, was *grundlegende Struktur* bedeutet. Unscharfe Formulierungen von Anforderungen sind in der Generalisierung häufig (Touya 2010). Ersichtlich ist aber, dass vor allem in den dichteren Stadtzentren eine verhältnismässig stärkere Ausdünnung stattgefunden hat, was nachvollziehbar ist, weil kurze Strokes vermehrt in Stadtzentren auftauchen. Diesbezüglich kann man argumentieren, dass die Dichteverteilung nicht genügend erhalten bleibt.

## 4.5 Maschen-Ansatz

Edwardes und Mackaness (2000) haben erstmals das Konzept der *areal partition* vorgestellt. Im Gegensatz zu den Stroke-basierten Methoden, die prinzipiell für Strassennetzwerke mit linearer Dimension konzipiert sind, fokussierte ihr Ansatz auf der Extrahierung von sogenannten Arealen. Sie definierten ein Areal über einen geschlossenen Zyklus von einzelnen Strassen der als Basis für die Generalisierung dient. Anschaulich gesehen ist ein typisches Areal z.B. ein Häuserblock. Falls ein solches Areal so klein ist, dass es von Auge für einen bestimmten Zielmasstab nicht mehr klar ersichtlich ist, werden Teile davon aufgelöst und mit einem Nachbarsareal zu einem neuen und grösseren Areal fusioniert. Schon Edwardes und Mackaness (2000) haben darauf aufmerksam gemacht, dass ein grosser Vorteil dieses Ansatzes darin besteht, dass diese Art von Generalisierung die Konnektivität des Netzwerkes nicht beeinträchtigt und die zyklische Natur von Netzwerken nicht verloren geht.

Hu et al. (2007) und Chen et al. (2009) haben diesen Ansatz aufgegriffen und den Maschen-Ansatz entwickelt. Die konzeptionelle Basis für den Maschen-Ansatz bildet die Strassendichte und wurde bereits von Regnauld (2000) als ein wichtiges Kriterium in der Generalisierung dargelegt. Den Fokus bildet aber nicht die Dichte bezogen auf ein ganzes Gebiet, sondern eine möglichst lokale Dichte. Deshalb haben Hu et al. (2007) und Chen et al. (2009) das Konzept der Masche und der Maschendichte eingeführt.

### 4.5.1 Definition der Masche

Eine Masche ist die kleinste mögliche Einheit einer Subregion. Im Kontext von Strassennetzwerken ist die Masche die kleinste mögliche geschlossene Region, welche keine weitere Region beinhaltet. Illustriert ist dieses Konzept in Abb. 29. Im realen Beispiel sind drei Maschen unterschiedlicher Grösse rot hervorgehoben und im hypothetischen Strassennetzwerk sind fünf nummerierte Maschen dargestellt. Konzeptionell entsprechen Maschen den Arealen im Ansatz von Edwardes und Mackaness (2000).

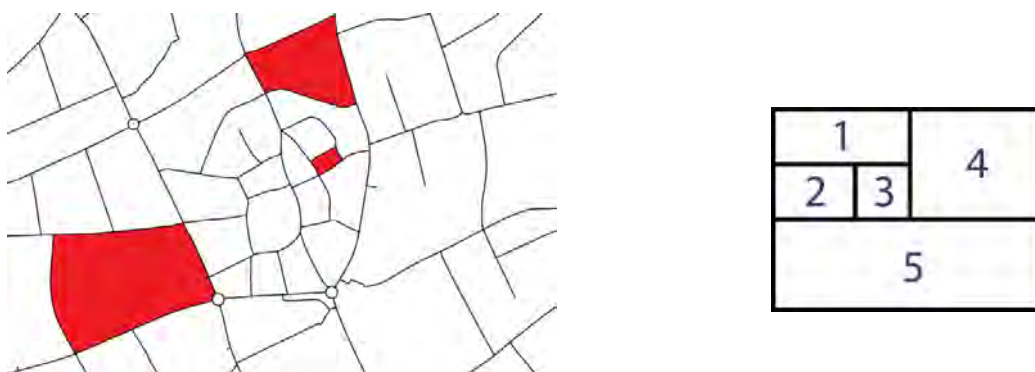


Abb. 29: Beispiel von Maschen in einem realen und in einem hypothetischen Netzwerk  
Beispiel links: (© swisstopo)



Maschen zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur durch Flächensegmente begrenzt sind. Lineare Segmente können zwar in ein Flächensegment einer Masche münden, bilden aber nicht den äusseren Grenzverlauf der Masche ab. Für die Definition der Masche sind sie nicht von Bedeutung (Chen et al. 2009).

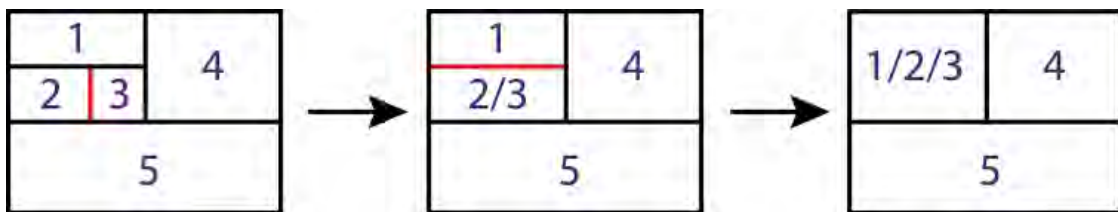
**Definition der Maschendichte** Die Maschendichte ist definiert über:

$$D = \frac{P}{A} \quad (4)$$

wobei  $D$  die Maschendichte ist,  $P$  der Umfang der Masche und  $A$  die Fläche der Masche.

#### 4.5.2 Die Maschendichte als Basis der Selektion

Für die Selektion von Strassennetzwerken wird die Masche als Basiseinheit interpretiert. Die Maschendichte dient als Entscheidungsgrundlage dafür, welche Maschen potentielle Kandidaten für eine Entfernung derer begrenzenden Flächensegmente sind. Chen et al. (2009) zeigen auf, dass eine Masche auf einer Karte, abhängig vom Masstab, eine gewisse Grösse haben muss, damit sie von Auge noch zweckmässig erkennbar ist. Normalerweise wird daher, abhängig von der Skala, ein Grenzwert definiert, welcher die Dichte einer Masche höchstens haben darf. Maschen, welche diesen Grenzwert überschreiten sind dann Kandidaten für eine Auflösung und Fusionierung mit Nachbarsmaschinen, indem begrenzende Flächensegmente entfernt werden. Der Selektionsprozess startet mit der dichtesten Masche und wird iterativ fortgeführt, bis alle Maschen, respektive deren Maschendichten, den Grenzwert nicht mehr überschreiten. Abb. 30 illustriert diesen Prozess.

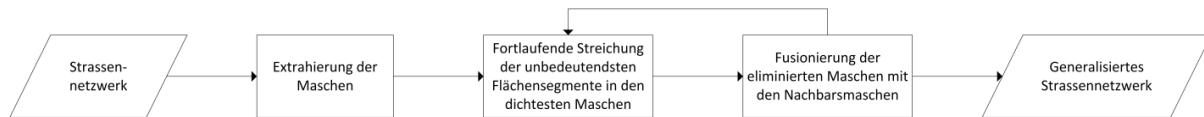


**Abb. 30: Prinzip der Fusionierung von Maschen nach Chen et al. (2009)**

Masche 3 weist die grösste Maschendichte auf und eines ihrer Flächensegmente (rot) wird daher entfernt und die Masche mit der Nachbarsmaschine 2 zu einer neuen und weniger dichten Masche 2/3 fusioniert. Masche 1 weist nun die grösste Maschendichte auf. Sie wird in einem nächsten Schritt mit der Masche 2/3 zu einer neuen Masche 1/2/3 fusioniert.

In dieser Arbeit wird der Ansatz verfolgt, dass ca. 70 % der Strassensegmente für den kleineren Masstab selektiert werden. Daher kann der Ansatz über den Grenzwert der Maschendichte nicht direkt verfolgt werden. Um der Anforderung der Selektion von 70 % der Strassensegmente gerecht zu werden, werden die dichtesten Maschen solange ausgedünnt, bis 30 % der Strassensegmente entfernt wurden. Abb. 31 zeigt den Selektionsprozess mit dem Maschenansatz schematisch auf.

Chen et al. (2009) argumentieren stets mit Hilfe des Grenzwertes, nämlich dass eine Masche mit einer zu grossen Maschendichte je nach Masstab nicht mehr erkennbar ist. Sie gehen aber überhaupt nicht auf die Möglichkeiten ein, welche die Phase der kartographischen Generalisierung gemäss der Einteilung von Weibel (1995) bietet, nämlich die graphische Repräsentation der Strassen auf visueller Ebene, wie z.B. die Vereinfachung Strassen um die optische Darstellung zu optimieren. Hierbei bietet sich die Möglichkeit, die Darstellung allfällig dichter Maschen für den Zielmasstab zweckmässig zu verbessern.



**Abb. 31: Prinzip der Generalisierung mit dem Maschen-Ansatz**

Die Generalisierung erfolgt in drei wesentlichen Schritten: (1) die Extrahierung der Maschen aus dem Strassennetzwerk, (2) die fortlaufende Streichung der relativ unbedeutendsten Flächensegmente innerhalb der dichtesten Maschen und (3) die Fusionierung der eliminierten Maschen mit den Nachbarmaschen.

### 4.5.3 Entfernung der unbedeutendsten Flächensegmente in den Maschen

In Abschnitt 4.5.2 wurde dargelegt, dass die begrenzenden Flächensegmente von dichten Maschen entfernt und die Maschen dadurch mit Nachbarmaschen fusioniert werden. Allerdings wurde nicht aufgezeigt, wie diese Entscheidung sinnvoll getroffen wird. Aus konzeptionellen Überlegungen sollten diejenigen Flächensegmente entfernt werden, deren relative Wichtigkeit am kleinsten ist. Die relative Wichtigkeit ist von mehreren Faktoren abhängig, wie z.B. ihrer Bedeutung bezüglich der topologischen Konnektivität, ihren Attributen (z.B. Strassenklasse) oder ihrer Länge. Das Problem bei Attributen ist, dass sie nicht verallgemeinerbar sind und eine flächendeckende Verfügbarkeit nicht immer garantiert ist (Chen et al. 2009). Ein weiteres Mass bildet der Grad eines Strokes, zu welchem ein Flächensegment gehört. Er ist durch die Anzahl Segmente innerhalb eines Strokes definiert (Chen et al. 2009). Ein hoher Grad eines Strokes bedeutet generell, dass der Stroke eine grosse Anzahl von Verbindungen mit anderen Strassen hat und ihm deshalb die Rolle einer bedeutenden Verbindungsstrasse zugeschrieben werden kann, die prinzipiell nicht unterbrochen werden sollte. Die Strassensegmente, welche einen solchen Stroke bilden, sollten also tendenziell nicht entfernt werden. Andere mögliche Parameter sind die Länge der Flächensegmente oder die relative Bedeutung des Strokes (welche unterschiedlich definiert sein kann, im klassischen Ansatz aber über die Länge definiert ist) innerhalb dessen ein Flächensegment eingegliedert ist (Edwardes und Mackaness 2000, Chen et al. 2009). Edwardes und Mackaness (2000) und Zhou (2012) wählen als Entscheidungskriterium die relative Bedeutung des Strokes. Sinnvoll ist aber auch eine Kombination von verschiedenen Massen. Chen et al. (2009) wählten eine Kombination mit abnehmender Wichtigkeit aus (1) der Strassenklasse, (2) Grad eines Strokes, (3) Länge des Strokes innerhalb dessen das Flächensegment eingegliedert ist und (4) die Länge des Segmente.

In dieser Arbeit wurde ein Ansatz gewählt, welcher den Anforderungen möglichst gerecht wird. Folgende Regeln mit abnehmender Wichtigkeit wurden aufgestellt.

- 1) Ist ein Flächensegment eine Treppe, so hat dieses gegenüber anderen Flächensegmenten eine kleinere relative Bedeutung.
- 2) Darf ein Flächensegment prinzipiell nicht entfernt werden (Tab. 3), so hat es gegenüber anderen Flächensegmenten eine grössere relative Wichtigkeit.
- 3) Gehört ein Flächensegment einem Attribut an, welches gegenüber anderen bevorzugt werden soll (Tab. 4), so hat es eine grössere relative Wichtigkeit.
- 4) Ein Flächensegment mit höherem Stroke-Grad hat gegenüber einem Flächensegment mit kleinerem Stroke-Grad eine grössere relative Wichtigkeit.
- 5) Ein Flächensegment mit einer grösseren Objektart hat gegenüber einem Flächensegment mit einer kleineren Objektart eine grössere relative Wichtigkeit.
- 6) Ein längeres Flächensegment hat gegenüber einem kürzeren Flächensegment eine grössere relative Wichtigkeit.

**Beachtung der Anforderungen** Regel 1) bis 3) beziehen sich auf Anforderungen, die sich nur auf die konkreten Attribute KRM25 beziehen, also nicht auf alle möglichen Datensätze verallgemeinerbar sind. Mit Regel 1) kann elegant sichergestellt werden, dass Treppen-Segmente gestrichen werden, sofern sie innerhalb einer dichten Masche sind, und damit Anforderung 11 erfüllt werden. Regel 2) und 3) stellen sicher, dass Flächensegmente die nicht entfernt werden dürfen oder sollten bevorzugt behandelt werden. Um dieser Anforderung gerecht zu

werden wurde zusätzlich noch ein weiterer Mechanismus implementiert, der in Abschnitt 4.5.4.3 weiter erläutert wird. Regel 4) bis Regel 6) beziehen sich auf Anforderungen, die sich nicht direkt auf die konkreten Attribute des KRM25 beziehen, sondern verallgemeinerbar sind. Mit Regel 4) soll sichergestellt werden, dass Strassen, welche eine grosse Anzahl Verbindungen mit anderen Strassen haben (und deshalb einen hohen Grad des Strokes) nicht unterbrochen werden. Insbesondere kann hier die Anforderung 12 (Selektion intuitiv wichtiger Verbindungsstrassen) direkt behandelt werden. Der Grad des Strokes wurde absichtlich höher als die Objektart (Regel 5) gewichtet. Die Objektart darf nicht mit dem klassischen Attribut der *Strassenklasse* verwechselt werden. Eine Strassenklasse (z.B. eine Hauptstrasse) kann aus Segmenten verschiedener Objektarten bestehen. So kann eine Hauptstrasse sowohl 10m-Segmente, aber auch 8m-Segmente bis hin zu 4m-Segmente aufweisen. Würde man Regel 5) stärker gewichten als Regel 4), kann es sein, dass wichtige Verbindungsstrassen unterbrochen würden und damit Anforderung 12 verletzt würde. Regel 6) ist die Entscheidungsgrundlage falls mit Regeln 1) bis 5) keine Entscheidung gefunden werden konnte.

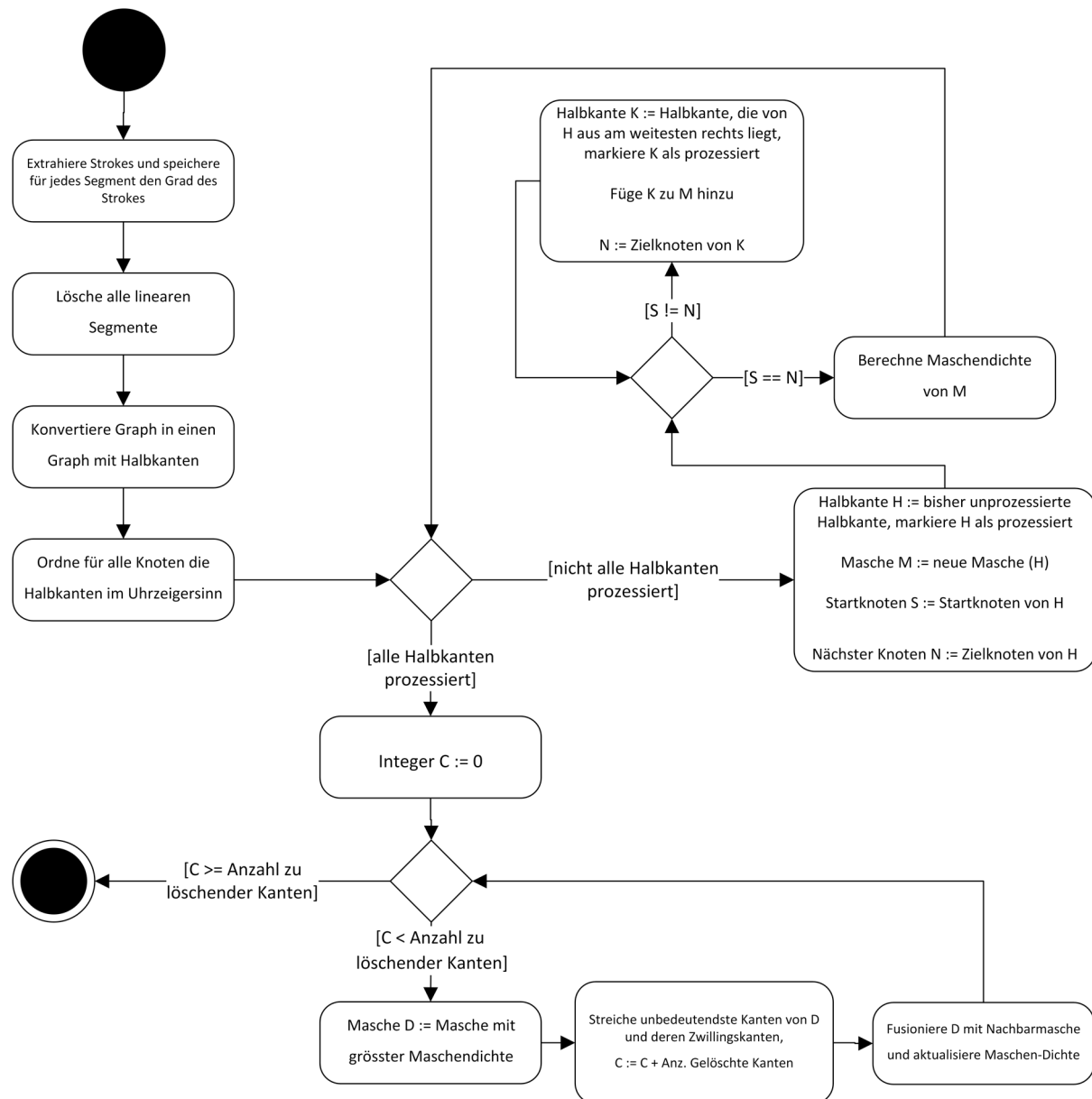
Ein Vorteil ist, dass die Anforderungen 5, 6 und 14 implizit erfüllt werden. Kurze Sackgassen betreffen stets lineare Segmente und diese werden im Maschen-Ansatz nicht weiter behandelt. Eine Sackgasse kann auch nicht neu generiert werden, weil bei einer Ausdünnung einer dichten Masche stets eine Fusionierung mit einer Nachbarsmasche stattfindet und Knoten mit einem Grad von 1 dabei gar nicht entstehen können. [Chen et al. \(2009\)](#) argumentieren, dass die Konnektivität stets erhalten bleibt. Damit wäre Anforderung 7 erfüllt. Allerdings haben schon [Li und Zhou \(2012\)](#) und [Zhou \(2012\)](#) richtig darauf hingewiesen, dass es Situationen gegen kann, bei der die Konnektivität nicht erhalten bleibt. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 4.5.6 diskutiert.

#### 4.5.4 Maschen-Algorithmus

Der implementierte Maschen-Ansatz ist umfangreicher, komplizierter und weniger schnell als der Stroke-Ansatz. Teile des Algorithmus entsprechen konzeptionell einem Algorithmus aus der Boost C++ Bibliothek<sup>1</sup> und wurde in die Java Programmiersprache übersetzt, sowie an die Datenstrukturen angepasst. Er ist im UML Aktivitätsdiagramm in [Abb. 32](#) dargestellt und wird in den folgenden Abschnitten genauer erläutert.

---

<sup>1</sup> [http://www.boost.org/doc/libs/1\\_54\\_0/boost/graph/planar\\_face\\_traversal.hpp](http://www.boost.org/doc/libs/1_54_0/boost/graph/planar_face_traversal.hpp)



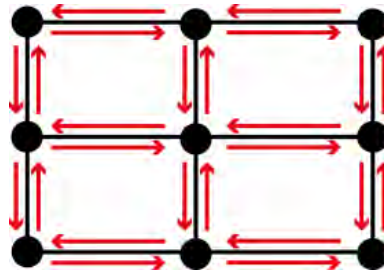
**Abb. 32: UML Aktivitätsdiagramm des implementierten Maschen-Ansatzes**

Der Maschen-Ansatz besteht aus der Extrahierung der Maschen mit Hilfe der Halbkanten und aus der kontinuierlichen Ausdünnung der dichtesten Maschen.

#### 4.5.4.1 Graph mit Halbkanten als grundlegende Datenstruktur

Wie auch der Stroke-Ansatz, basiert der Maschen-Ansatz auf Basis eines Graphen. Allerdings wird hierfür eine spezielle Form eines Graphen verwendet, nämlich ein Graph mit Halbkanten.

Halbkanten zeichnen sich dadurch aus, dass zwischen zwei Knoten nicht eine einzelne ungerichtete Kante besteht, sondern jeweils zwei entgegengesetzte gerichtete Kanten, sogenannte Halbkanten (half edges). [Abb. 33](#) zeigt ein Strassennetzwerk und dessen Abbildung auf einen Graphen mit Halbkanten. Schwarz dargestellt ist das Strassennetzwerk mit seinen Segmenten. Rot dargestellt sind die entsprechenden Halbkanten, welche für jedes Segment gebildet werden und jeweils eine entgegengesetzte Richtung aufweisen. Der Startknoten einer Halbkante ist also jeweils der Zielknoten der entgegengesetzten Halbkante (Zwillingkante). Die Halbkanten werden benötigt um die Maschen zu extrahieren.

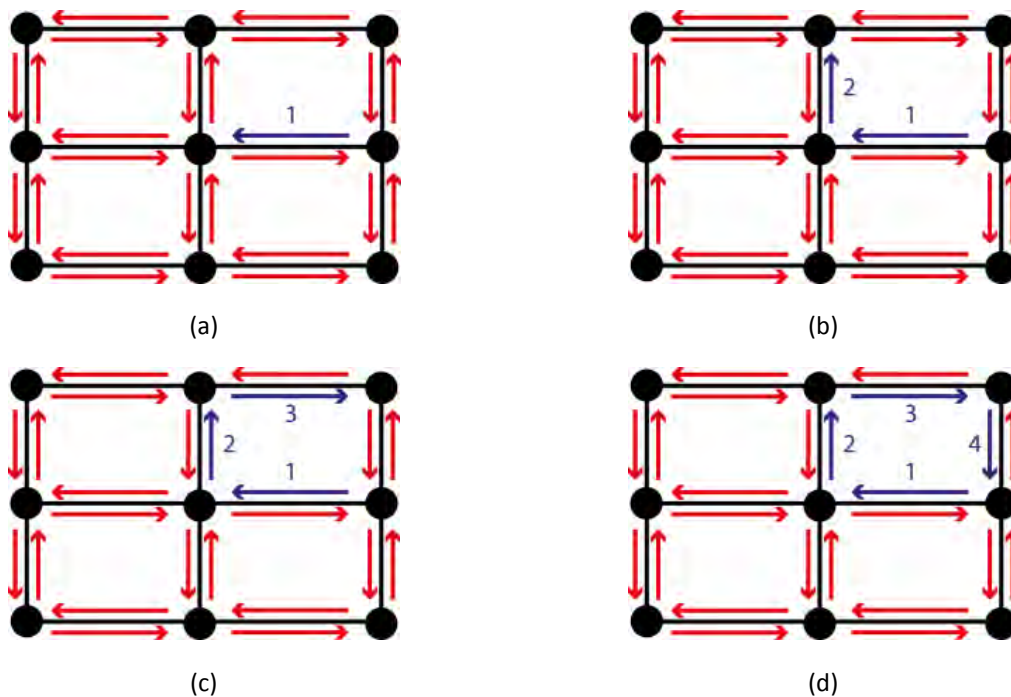


**Abb. 33: Strassennetzwerk und dessen Abbildung auf einen Graphen mit Halbkanten**

Schwarz dargestellt ist das Strassennetzwerk. Rot symbolisiert sind die Halbkanten, jeweils zwei pro Segment, die stets eine entgegengesetzte Richtung aufweisen.

#### 4.5.4.2 Extrahierung der Maschen

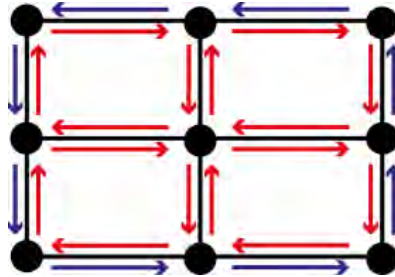
Die Extrahierung der Maschen startet mit der Abbildung des Strassennetzwerkes auf einen Graphen. Danach werden alle linearen Segmente entfernt, da sie im Maschen-Ansatz nicht behandelt werden. In einem zweiten Schritt wird der Graph in einen Graphen mit Halbkanten konvertiert. Die Extrahierung der Maschen erfolgt dann iterativ. Gestartet wird mit Halbkante 1 (Abb. 34(a)). Die Kante und ihr Startknoten bilden den Ausgangspunkt. Am Zielknoten der aktuellen Halbkante wird diejenige Halbkante gewählt, die von der aktuellen Kante her betrachtet, diejenige ist, die am weitesten rechts liegt (Halbkante 2 in Abb. 34(b)). Am Zielknoten dieser Kante wird wiederum diejenige Halbkante ausgewählt, die von ihr aus betrachtet, am weitesten rechts liegt (Halbkante 3 in Abb. 34(c)). Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis man wieder den ursprünglichen Ausgangspunkt erreicht (Abb. 34(d)). Ist der Algorithmus dort angekommen, wurde eine Masche extrahiert. Die Maschendichte kann anschliessend mit Hilfe räumlicher Algorithmen berechnet werden. Anhand der den Halbkanten zugrunde liegenden Flächensegmente wird ein Polygon gebildet, mit Hilfe dessen die Maschendichte berechnet werden kann. Die anderen Maschen können analog extrahiert werden, so lange bis alle Halbkanten prozessiert wurden.



**Abb. 34: Prinzip des Extrahierens einer Masche mit Halbkanten**

Die Extraktion startet mit einer noch nicht traversierten Halbkante (a) und wählt als Nachfolgekante jeweils diejenige Halbkante aus, die am weitesten rechts liegt (b), (c), solange bis man wieder am Ursprungsknoten angekommen ist (d).

Es gilt zu beachten, dass es in jedem Graphen mit Halbkanten eine spezielle Masche gibt (Abb. 35). Es ist diejenige Masche, welche extrahiert wird, wenn die äussersten Kanten des Graphen traversiert werden. Konzeptionell steht sie für den Bereich, der ausserhalb des eigentlichen Graphen liegt, also in dessen äusseren Umgebung. Diese Masche kann im Generalisierungsprozess vernachlässigt werden, da sie keine Masche im klassischen Sinne repräsentiert.



**Abb. 35: Äussere Masche in einem Graphen**

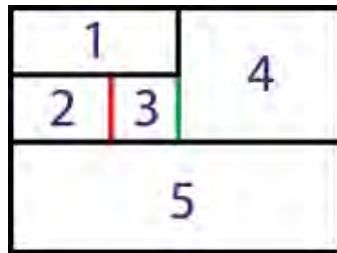
Die äussere Masche des Graphen steht konzeptionell für den äusseren (unendlichen) Bereich des Graphen.

#### 4.5.4.3 Entfernung der Segmente

Die Entfernung der Segmente erfolgt dann über einen Zähler. Solange die gewünschte Anzahl Segmente noch nicht entfernt worden ist, werden die dichtesten Maschen kontinuierlich ausgedünnt und mit den Nachbarmaschen fusioniert. Hierbei kann es vorkommen, dass durch die Entfernung eines Flächensegmentes lineare Segmente entstehen (wenn z.B. in Abb. 33 die rechte untere Kante entfernt wird), die dann konsequenter Weise auch entfernt werden müssen, damit der Graph in einem korrekten Zustand verbleibt (nur Flächensegmente). Nach der Ausdünnung und Fusion mit einer Nachbarmasche müssen die Maschendichten aktualisiert werden.

Um sicherzustellen, dass Sammelstrassen bevorzugt selektiert werden und keine zwingend zu selektierenden Flächensegmente entfernt werden (Tab. 3), wurde ein zusätzlicher Mechanismus eingebaut. Und zwar wird eine Masche, die ein Flächensegment enthält, welches nicht entfernt werden darf, in der Ordnung der Maschen so eingeordnet, dass sie weniger dicht als eine Masche ist, welche kein solches Flächensegment hat. Diese Herangehensweise hat zwei Vorteile. Erstens kann so die Selektion von Sammelstrassen indirekt gewährleistet werden. Verbindungs- und Durchgangsstrassen weisen mit Abstand die grösste Anzahl an nicht entfernbaren Segmenten auf. Der erwähnte Mechanismus kann so sicherstellen, dass Zufahrten zu Verbindungs- und Durchgangsstrassen, respektive diejenigen Segmente welche in die Verbindungs- oder Durchgangsstrasse münden (Sammelstrassen) und daher Teil einer Masche mit einem nicht entfernbaren Segment sind, etwas bevorzugter behandelt werden und daher eher selektiert werden. Zufahrten zu Autobahnen (und Routen, welche hauptsächlich auch auf Autobahnen sind) sind stets Segmente, welche ebenfalls gemäss Tab. 3 selektiert werden müssen. Diesbezüglich findet also keine Einschränkung statt. Weiter bewirkt dieses Verfahren einen enormen Performance-Gewinn. Das Problem besteht darin, dass bei der Entfernung eines Flächensegments lineare Segmente entstehen können, welche, wie oben erwähnt, ebenfalls entfernt werden müssen. Dies ist bei Segmenten, welche nicht entfernt werden dürfen, problematisch. Die Hervorsage von solchen Situationen ist in komplizierteren Verhältnissen nicht trivial und rechnerisch aufwändig. Daher ist die Umstrukturierung der Ordnung eine elegante Lösung. Weiter kann trotz des eingebauten Mechanismus eine Masche mit einem nicht entfernbaren Flächensegment ausgedünnt werden. Abb. 36 verdeutlicht dieses Prinzip. Grün dargestellt ist ein Flächensegment der Masche 3, welches gemäss der Anforderungsanalyse nicht entfernt werden darf. Masche 3 kann aber indirekt trotzdem ausgedünnt werden, nämlich dann wenn eine Nachbarmasche (z.B. Masche 2) ausgedünnt wird, respektive das rot markierte Flächensegment entfernt wird. Da das rot markierte Flächensegment auch ein Flächensegment der Masche 3 ist, wird indirekt auch die Masche 3 ausgedünnt. Der eingebaute Mechanismus verhindert also nicht per se, dass eine Masche mit einem Segment, welches nicht entfernt werden darf, nicht ausgedünnt werden kann,

selektiert aber die Segmente, welche spezifisch in Verbindungs- und Durchgangsstrassen münden und daher Teile von Sammelstrassen bilden, bevorzugter.



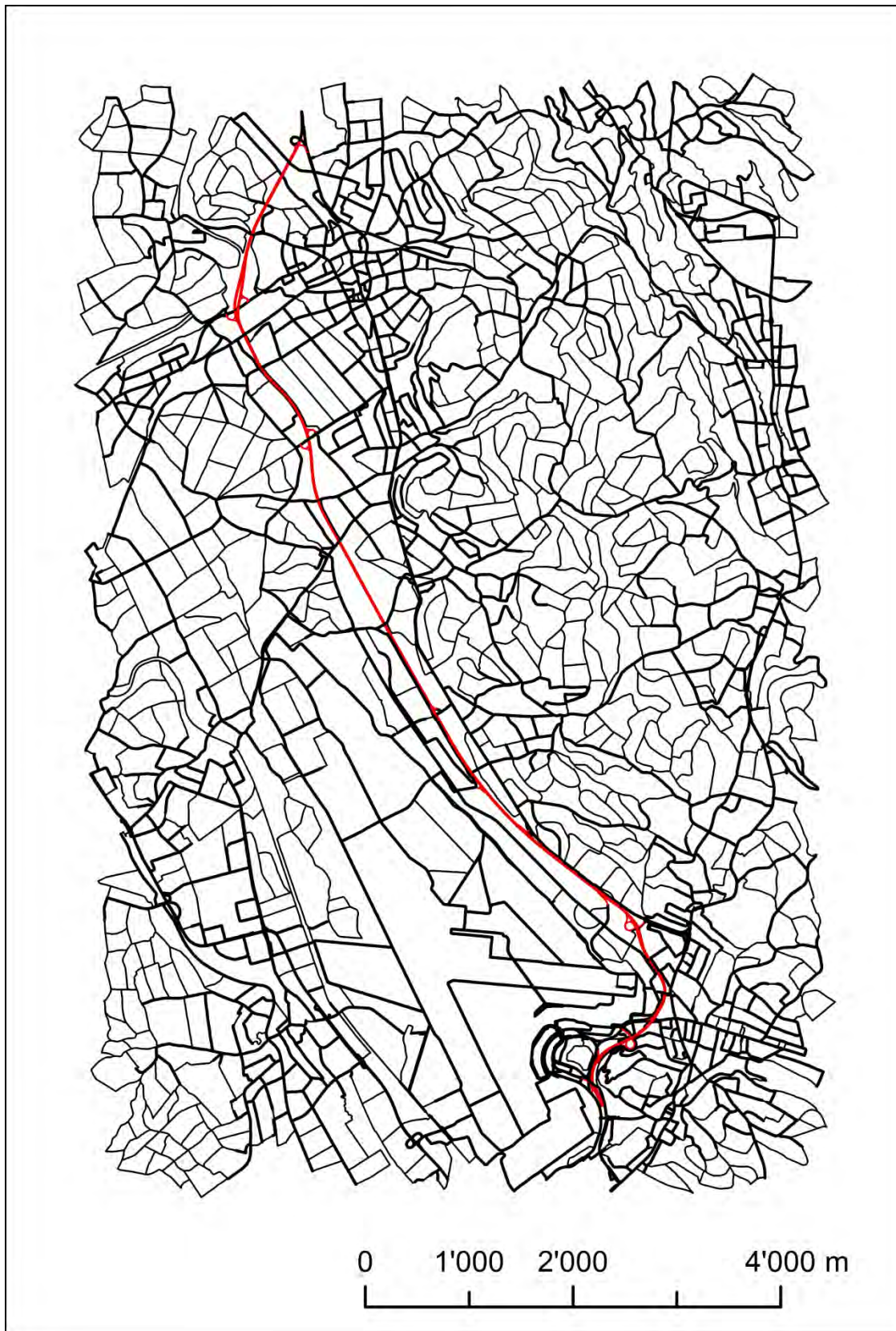
**Abb. 36: Prinzip des Mechanismus' von nicht entfernbaren Flächensegmenten in einer Masche**

Grün dargestellt ist ein Flächensegment, welches nicht entfernt werden darf. Eine betroffene Masche (z.B. Masche 3) kann aber indirekt trotzdem ausgedünnt werden, falls eine ihrer Nachbarmaschen (z.B. Masche 2) ausgedünnt wird.

#### 4.5.5 Resultate des Maschen-Ansatzes

Die Resultate des Maschen-Ansatzes für die vier Testgebiete sind in [Abb. 37](#) bis [Abb. 40](#) und die dazu passenden statistischen Analysen in [Tab. 10](#) und [Tab. 11](#) ersichtlich.

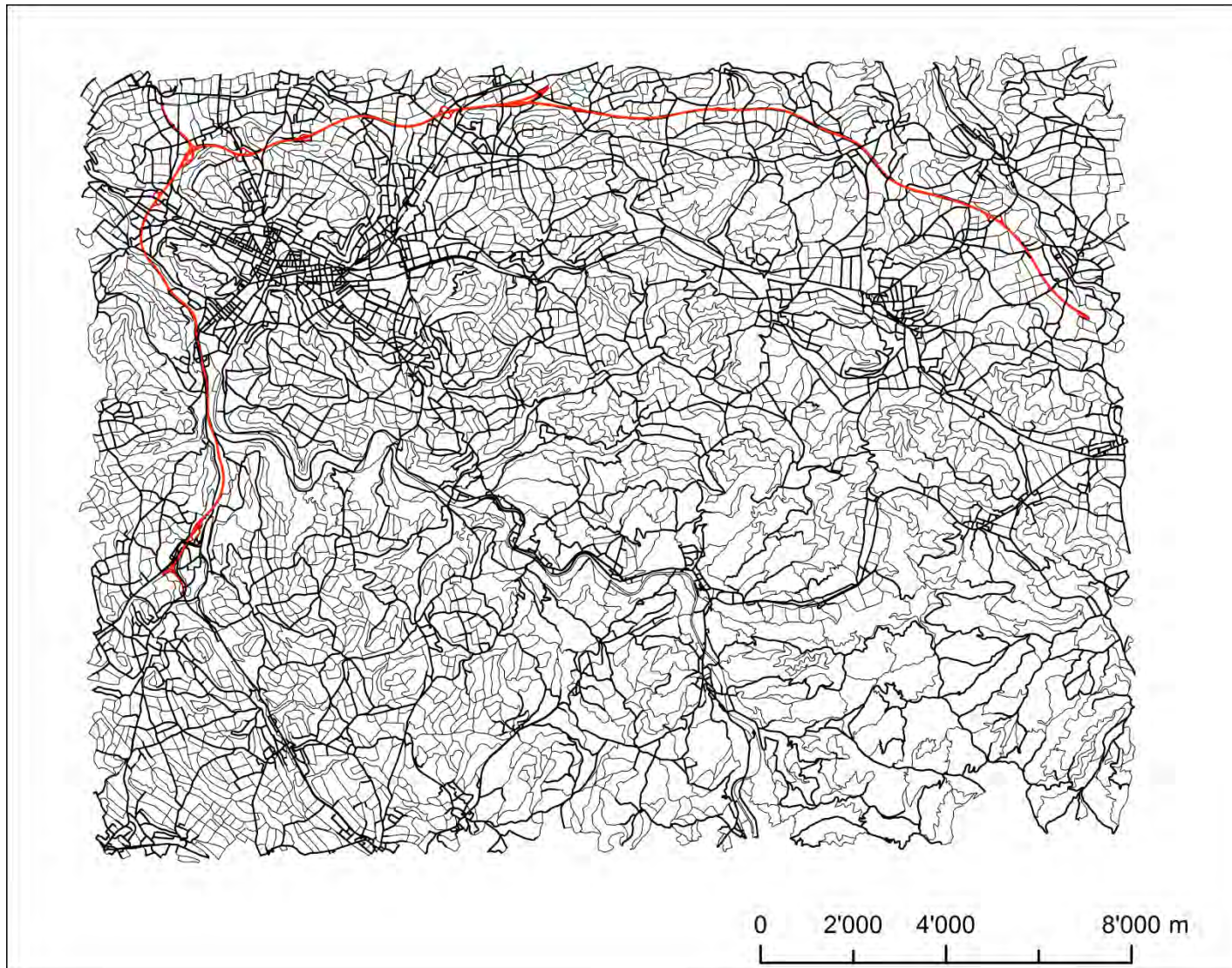




**Abb. 37: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet ZU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)





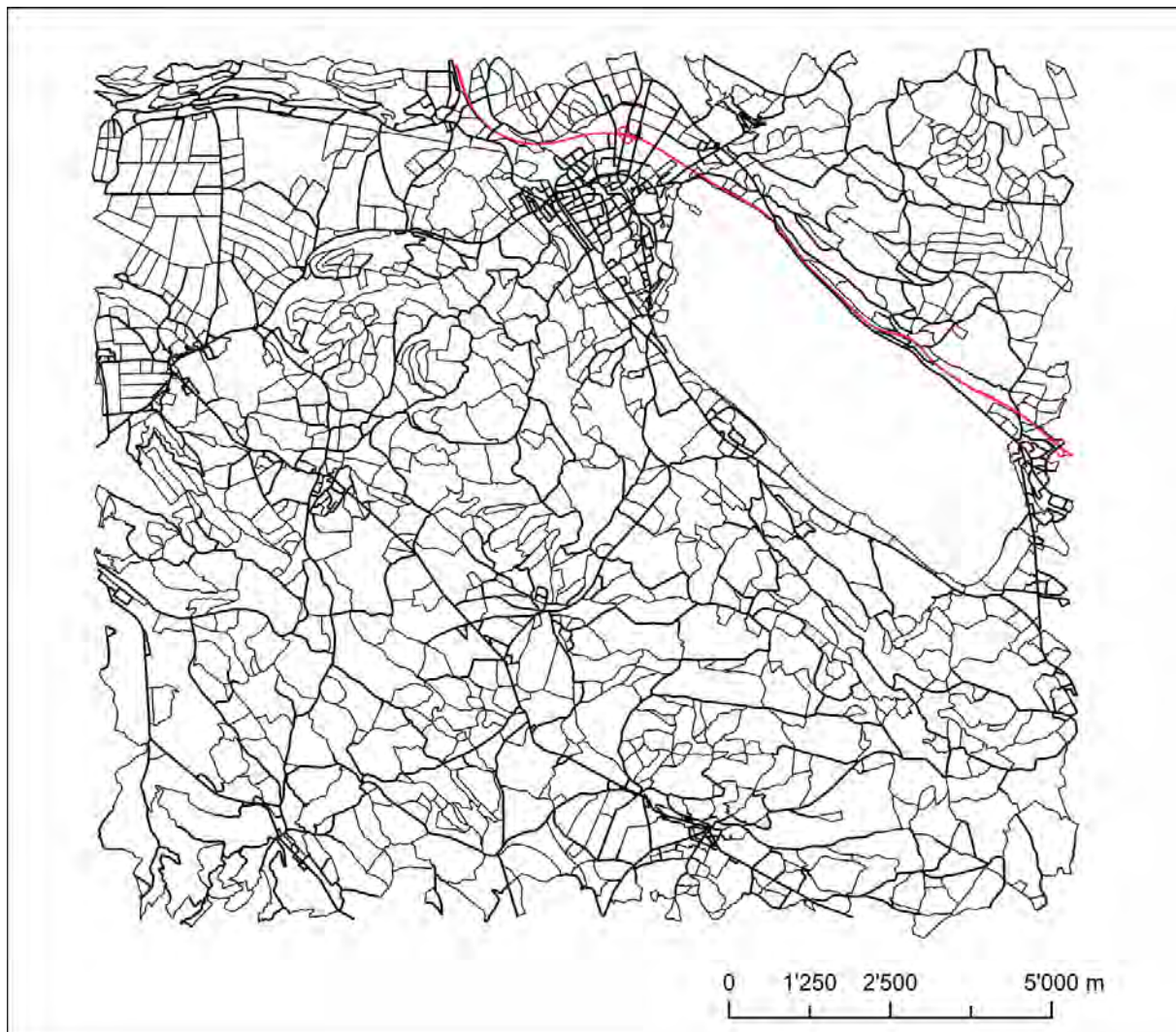
**Abb. 38: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet WT**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)

**Tab. 10: Resultate des Maschen-Ansatzes für die Testgebiete ZU und WT**

Gegenübergestellt sind jeweils die ungeneralisierten Testgebiete (TG) und die Resultate des Maschenansatzes (MA).

Kennzahl	ZU-TG	ZU-MA	WT-TG	WT-MA
Anzahl Segmente total	8'694	6'089	30'780	21'550
Anzahl lineare Segmente	945	0	2'951	0
Anzahl Flächensegmente	7'749	6'089	27'829	21'550
Länge Segmente total [m]	992'752	721'557	4'368'784	3'173'543
Länge lineare Segmente [m]	119'009	0	502'478	0
Länge Flächensegmente [m]	873'743	721'557	3'866'306	3'173'543
Anzahl nicht entfernbare Segmente	588	576	1'665	1'621
Anzahl bevorzugte Segmente	195	157	634	437
Anzahl Treppensegmente	16	5	27	4
Anzahl Sackgassen	801	0	2'507	0
Anzahl neue Sackgassen	-	0	-	0
Average Connectivity	0.99905	1.00000	0.99761	1.00000

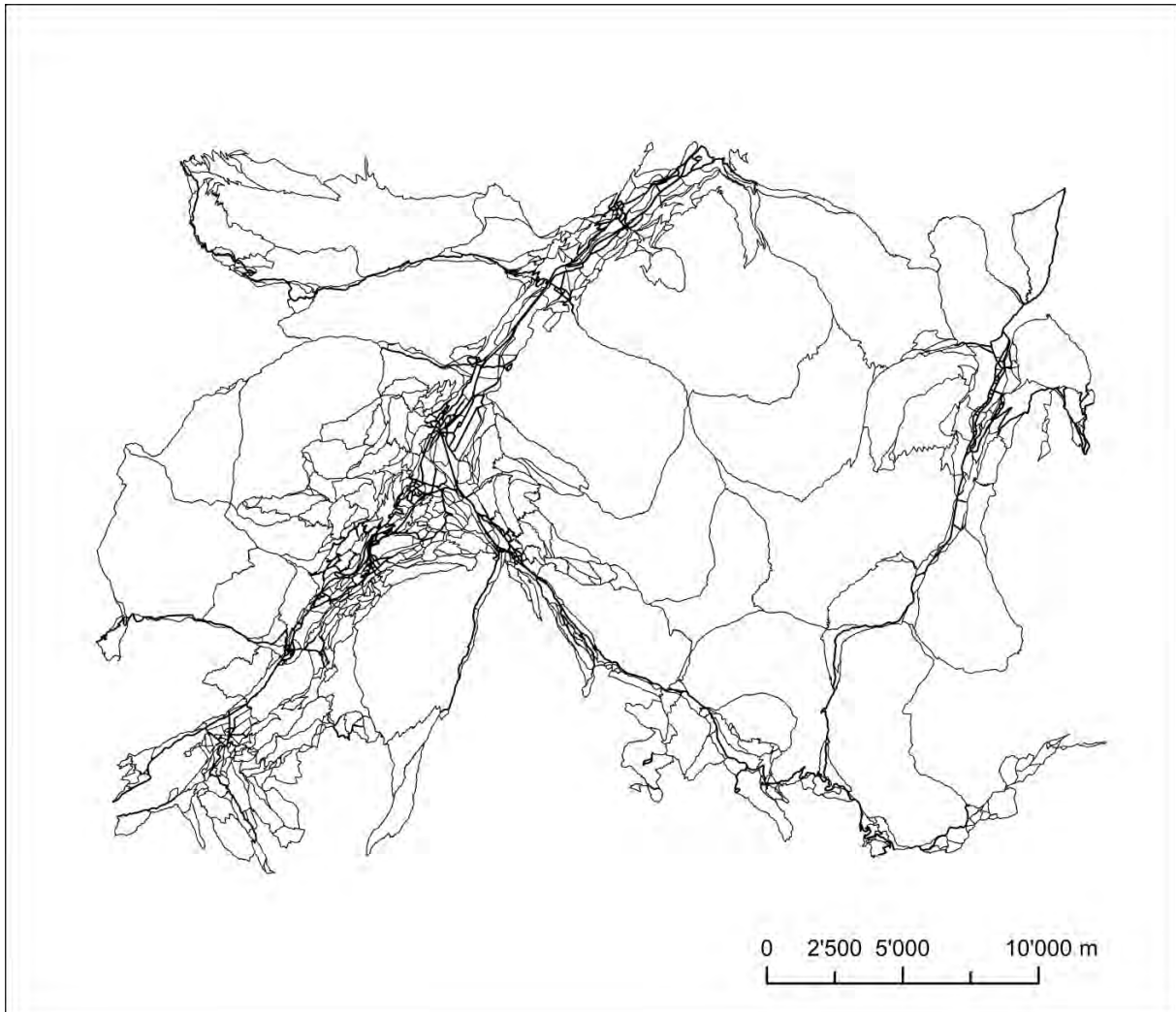


**Abb. 39: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet SU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert.

(© swisstopo)





**Abb. 40: Resultat des Maschen-Ansatzes für das Testgebiet EN**

Die Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)

**Tab. 11: Resultate des Maschen-Ansatzes für die Testgebiete SU und EN**

Gegenüberegestellt sind jeweils die ungeneralisierten Testgebiete (TG) und die Resultate des Maschenansatzes (MA).

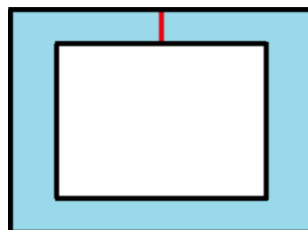
Kennzahl	SU-TG	SU-MA	EN-TG	EN-MA
Anzahl Segmente total	11'129	7'786	8'975	6'289
Anzahl lineare Segmente	1'897	0	1'520	0
Anzahl Flächensegmente	9'232	7'786	7'455	6'289
Länge Segmente total [m]	1'582'041	1'166'262	2'183'795	1'606'512
Länge lineare Segmente [m]	302'108	0	429'530	0
Länge Flächensegmente [m]	1'279'933	1'166'262	1'754'265	1'606'512
Anzahl nicht entfernbare Segmente	684	662	445	431
Anzahl bevorzugte Segmente	309	209	659	490
Anzahl Treppensegmente	18	5	18	2
Anzahl Sackgassen	1'533	0	1'302	0
Anzahl neue Sackgassen	-	0	-	0
Average Connectivity	0.99680	1.00000	0.90888	1.00000

Die statistischen Analysen zeigen den für den Maschen-Ansatz typischen Sachverhalt, nämlich, dass lineare Segmente nicht behandelt werden können. Die Anzahl linearer Segmente (und dadurch auch die totale Länge der linearen Segmente) ist 0. Das heisst, dass die Resultate ausschliesslich aus Flächensegmenten bestehen. Dieser Sachverhalt ist sehr gut in allen Resultaten (Abb. 37 bis Abb. 40) ersichtlich. Das Muster der Resultate weist eine „schachbrett-förmige“ Erscheinung auf. Direkt damit gekoppelt ist der Fakt, dass keine neuen Sackgassen entstanden sind weil die Resultate gar keine Sackgassen aufweisen können. Sackgassen sind immer Teile von linearen Segmenten und wo keine linearen Segmente vorhanden sind, kann es keine Sackgassen geben. Weiter konnten in den Resultaten nicht alle nicht entfernbaren Segmente selektiert werden. Dies liegt darin begründet, dass es auch lineare Segmente gibt, welche nicht entfernt werden dürfen, diese aber nicht behandelt werden. Die Anzahl bevorzugter Segmente ist ebenfalls gesunken, hauptsächlich durch die Problematik der Vernachlässigung linearer Segmente, andererseits aber auch dadurch, dass der implementierte Maschen-Ansatz eine Selektion nicht zwingend vornimmt, so wie bei den nicht entfernbaren Segmenten, was auch erlaubt ist, da es sich hier nur um eine schwache Anforderung handelt. Die Anzahl Treppensegmente konnte in allen Testgebieten verkleinert werden. Zudem weisen alle Testgebiete eine vollständige Konnektivität auf (Average Connectivity von 1).

### 4.5.6 Diskussion der Resultate

Der grosse Vorteil ist der Fakt, dass keine neuen Sackgassen entstehen. Dies hat zwei Gründe. Einerseits werden lineare Segmente erst gar nicht beachtet und andererseits funktioniert der Prozess der Maschen-Ausdünnung so, dass eine Masche, respektive die eine Masche begrenzenden Flächensegmente, so entfernt werden, dass die Masche komplett mit einer ihrer Nachbarsmaschen fusioniert wird. Hierbei kann keine neue Sackgasse entstehen. Damit gekoppelt ist auch der Sachverhalt, dass es zu keinen Unterbrüchen im Strassennetzwerk kommen kann und somit Anforderung 5 ebenfalls erfüllt ist. Diese Vorteile haben aber auch einen Nebeneffekt, nämlich die Ignorierung linearer Segmente. Obwohl die Anzahl linearer Segmente in den ungeneralisierten Testgebieten im Verhältnis zur Anzahl Flächensegmente sehr viel kleiner ist, ist es unzulässig, dass eine bestimmte Menge an Segmenten einfach nicht behandelt wird. Dies widerspiegelt sich auch darin, dass nicht alle nicht entfernbaren Segmente selektiert wurden. Dies ist eine Verletzung der Anforderungen 1 bis 4.

Die Average Connectivity ist für alle Resultate 1. Folglich weisen alle eine vollständige Konnektivität auf. Dies deutet darauf hin, dass, im Gegensatz zum Stroke-Ansatz, der Maschen-Ansatz die Konnektivität implizit erhält. [Chen et al. \(2009\)](#) betonten dies und für die vier Testgebiete war dies auch der Fall. Doch [Li und Zhou \(2012\)](#) und [Zhou \(2012\)](#) haben richtig darauf hingewiesen, dass es Fälle geben kann, bei denen die Konnektivität nicht erhalten bleibt. Diese Fälle sind sehr selten, können aber vorkommen. [Abb. 41](#) zeigt ein illustrierendes und hypothetisches Beispiel. Dargestellt ist ein kleines Strassennetzwerk mit zwei Maschen, die innere weisse und weniger dichte Masche, sowie eine dichte, in hellblau dargestellte Masche. Der Maschen-Ansatz geht nun so vor, dass er versucht die dichtere hellblaue Masche auszudünnen. Hierzu wählt er das rot dargestellte Segment und entfernt es. Dies ist aber problematisch, weil hier die Konnektivität unterbrochen wird. Die Flächensegmente, welche die innere weisse Masche begrenzen sind nicht mehr mit dem Rest des Strassennetzwerkes verbunden. Die Anforderung 7 ist verletzt.



**Abb. 41: Konnektivitäts-Problematik des Maschen-Ansatzes**

Die Konnektivität des Strassennetzwerkes bleibt nicht erhalten, wenn das rote Segment entfernt wird.

Eine Beurteilung, inwiefern intuitiv wichtige Verbindungsstrassen selektiert wurden ist erneut schwierig zu gestalten, weil nicht per se klar ist, wer welche Strasse intuitiv als wichtige Verbindungsstrasse interpretiert. Sammelstrassen hingegen können mit Hilfe des in Abschnitt 4.5.4.3 erwähnten Prinzips bevorzugt selektiert werden. Inwiefern Hauptzufahrten zu Bahnhöfen und andere wichtiger Infrastruktur selektiert worden sind, kann ohne weitere Datengrundlage nicht beurteilt werden.

Die grundlegenden Strukturen der Strassennetze sind klar nicht erhalten geblieben, alleine schon durch den Fakt, dass sämtliche lineare Segmente nicht selektiert wurden. Insbesondere für die Testgebiete SU und EN, welche verhältnismässig viele lineare Segmente aufweisen, ist dies visuell klar ersichtlich.

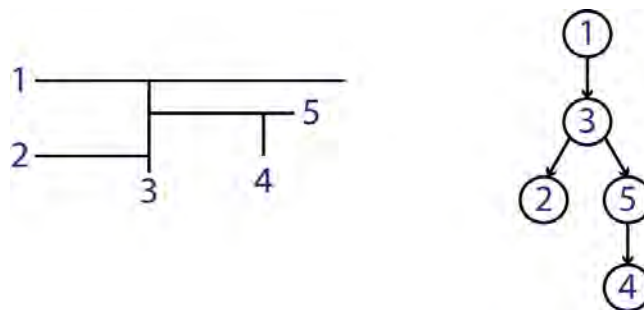
## 4.6 Integrierter Stroke-Maschen Kombinationsansatz

Zhou (2012) und Li und Zhou (2012) haben einen Ansatz entwickelt, welcher den Stroke- und Maschen-Ansatz in einem integrierten Konzept kombiniert. Die folgenden Abschnitte zeigen das Prinzip des Ansatzes auf und diskutieren die Stärken und Schwächen.

Der Ansatz basiert auf räumlichen Hierarchien, welche sich auf lineare, flächenartige und hybride Strukturen (Tab. 6) beziehen. Der Stroke-Ansatz behandelt dabei die linearen Strukturen und der Maschen-Ansatz die flächenartigen Strukturen innerhalb einer hybriden Struktur.

### 4.6.1 Konstruktion von linearen Hierarchien

Lineare Strukturen in einem Strassennetzwerk werden mit Hilfe des Stroke-Ansatzes auf eine lineare räumliche Hierarchie, eine Baum-Datenstruktur, abgebildet. Die linearen Segmente einer linearen Struktur werden in einem ersten Schritt zu Strokes verkettet. Diese Strokes werden dann gemäss ihrer Tiefe geordnet. Die Tiefe ist ein Mass, welches in der Analyse von Strukturen in Netzwerken weit verbreitet ist (Hillier und Hanson 1984, Marshall 2005). In der Konstruktion von linearen Hierarchien gemäss Li und Zhou (2012) bezieht sie sich aber auf die Anzahl topologische Schritte zwischen einem beliebigen Stroke und dem sogenannten *Ausgangs-Stroke*. In erster Linie muss daher definiert werden, welcher Stroke innerhalb einer linearen Struktur der *Ausgangs-Stroke* ist. Weist das Strassennetzwerk eine reine lineare Struktur auf, so kann es z.B. der längste Stroke sein (Stroke 1 in Abb. 42). Dieser Stroke bildet zugleich den Wurzelknoten (Tiefe 0) in der dazugehörigen Baumstruktur. Die restliche Struktur des Baumes ist von diesem *Ausgangs-Stroke* abhängig. Die direkten Child-Knoten des *Ausgangs-Stroke*s sind die Strokes, welche direkt mit dem *Ausgangs-Stroke* verbunden sind (Stroke 3 in Abb. 42, Tiefe 1). Die Child-Knoten dieses Strokes wiederum sind die mit ihm direkt verbundenen Strokes (Stroke 2 und 5 in Abb. 42, Tiefe 2). Dieses Prinzip wird dann so lange verfolgt, bis alle Strokes in der linearen Struktur auf die räumliche Hierarchie (Baum) abgebildet worden sind. Den tiefsten Knoten (Tiefe 3) in Abb. 42 bildet Stroke 4, welcher keine weiteren Child-Knoten aufweist. Diese räumliche Baumhierarchie bildet dann die Datenstruktur, mit Hilfe dessen lineare Strukturen generalisiert werden (siehe Abschnitt 4.6.4).

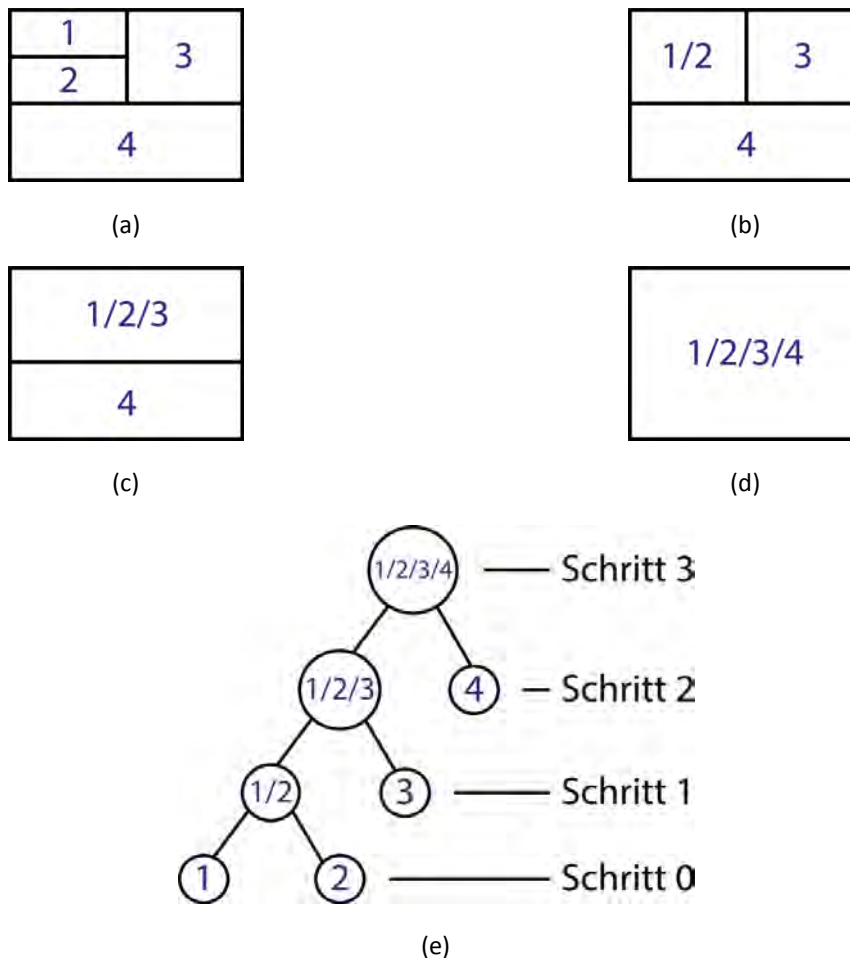


**Abb. 42: Lineare Struktur und deren Übersetzung in die Baumhierarchie nach Li und Zhou (2012)**

Stroke 1 bildet den *Ausgangs-Stroke* (Wurzelknoten). Stroke 3 ist direkt mit Stroke 1 verbunden und deshalb ein Child-Knoten von Stroke 1. Stroke 2 und 5 sind direkt mit Stroke 3 verbunden und daher Child-Knoten von Stroke 3. Stroke 4 ist mit Stroke 5 verbunden und daher ein Child-Knoten von Stroke 5.

### 4.6.2 Konstruktion von Flächenhierarchien

Flächenartige Strukturen in einem Strassennetzwerk werden mit Hilfe des Maschen-Ansatzes in eine räumliche Hierarchie übersetzt (Li und Zhou 2012). Auch hierfür wird eine Baum-Datenstruktur verwendet. Abb. 43 illustriert die Konstruktion der räumlichen Hierarchie. Abb. 43(a) zeigt eine flächenartige Struktur mit vier Maschen. Masche 1 ist die Masche mit der grössten Maschendichte und wird daher mit Masche 2 zu einer neuen Masche 1/2 fusioniert (Abb. 43(b)). Die Maschen 1 und 2 bilden daher die Blatt-Knoten des Baumes mit der grössten Tiefe und die fusionierte Masche 1/2 ihren Parent-Knoten (Abb. 43(e)). In einem nächsten Schritt wird die Masche 1/2 mit der Masche 3 zu einer neuen Masche 1/2/3 fusioniert (Abb. 43(c)). Die gebildete Masche ist wiederum der Elternknoten der Maschen 1/2 und 3 (Abb. 43(e)). Gemäss diesem Schema wird solange verfahren bis alle Maschen ausgedünnt wurden, respektive nur noch die äusserste Hülle übrig ist (Abb. 43(d)).



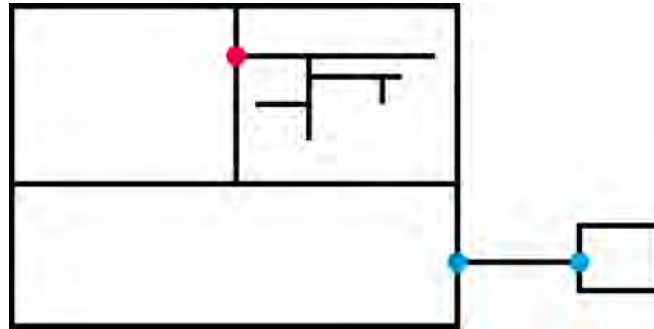
**Abb. 43: Aufbau der räumlichen Hierarchie für flächenartige Strukturen nach Li und Zhou (2012)**

Den Ausgangspunkt des Aufbaus bilden die Maschen mit der grössten Maschendichte, die kontinuierlich mit den Nachbarmaschen fusioniert werden. Ein Parent-Knoten ist das Resultat zweier fusionierter Kind-Knoten.

### 4.6.3 Konstruktion von hybriden Hierarchien

In Abschnitt 4.6.1 und 4.6.2 wurde aufgezeigt wie man räumliche Hierarchien für lineare und flächenartige Strukturen bilden kann. Da die meisten realen Strassennetze aber eine hybride Struktur aufweisen ist es naheliegend, dass die beiden Hierarchien miteinander kombiniert werden. Li und Zhou (2012) haben argumentiert, dass denjenigen Segmenten, welche eine lineare und eine flächenartige Struktur miteinander verbinden eine besondere Rolle zugeschrieben wird, weil sie die Funktion einer Brücke einnehmen. Abb. 44 zeigt eine hybride Struktur eines Strassennetzes, bestehend aus linearen und flächenartigen Strukturen. Die grössere lineare Struktur ist über den rot markierten Knoten mit dem Rest des Netzwerkes verbunden. Die Flächensegmente an diesem Knoten übernehmen also eine Brückenfunktion und werden von Li und Zhou

(2012) als *Flächenbrücken (areal bridges)* bezeichnet. Auch die kleinere räumliche Struktur ist mit der grösseren räumlichen Struktur über ein spezielles Brückensegment verbunden, welches durch die beiden blauen Knoten markiert ist. Li und Zhou (2012) definieren es als *lineare Brücke (linear bridge)*. Die Brückensegmente sind insofern wichtig, als dass eine Entfernung derer zu einem Unterbruch im Netzwerk führt. Deshalb werden diese, respektive die rot und blau markierten Knoten, benutzt um lineare und flächenartige Strukturen zu integrieren.



**Abb. 44: Prinzip der linearen Brücken und der Flächenbrücken nach Li und Zhou (2012)**

Der rote Knoten hat die Funktion einer Flächenbrücke (areal bridge), weil die lineare Struktur dort mit der flächenartigen Struktur verbunden ist. Die blauen Knoten grenzen eine lineare Brücke (linear bridge) ab. Sie stellt die Verbindung zwischen zwei flächenartigen Strukturen sicher.

Die Integration erfolgt nach folgender Vorgehensweise (Li und Zhou 2012):

- 1) Konstruiere alle Flächenhierarchien gemäss Abschnitt 4.6.2.
- 2) Prüfe die Flächensegmente in den Flächenhierarchien ob sie die Rolle einer Flächenbrücke übernehmen.
- 3) Konstruiere die linearen Hierarchien gemäss Abschnitt 4.6.1 und benutze als Ausgangs-Stroke denjenigen Stroke, welcher direkt mit einer Flächenbrücke verbunden ist (der Stroke in Abb. 44, welcher mit dem roten Knoten verbunden ist).
- 4) Suche den kürzesten Pfad in einer linearen Struktur, welcher zwischen zwei flächenartigen Strukturen angegliedert ist (Segment zwischen den beiden blauen Knoten in Abb. 44). Markiere die Segmente dieses Pfades als lineare Brücke.
- 5) Terminiere den Prozess, wenn alle Strassensegmente prozessiert wurden.

#### 4.6.4 Selektion durch Traversierung der integrierten Hierarchien

Li und Zhou (2012) selektieren das Strassennetzwerk für kleinere Massstäbe, indem sie die integrierte hybride Hierarchie traversieren. Die Traversierung erfolgt gemäss folgender Vorgehensweise:

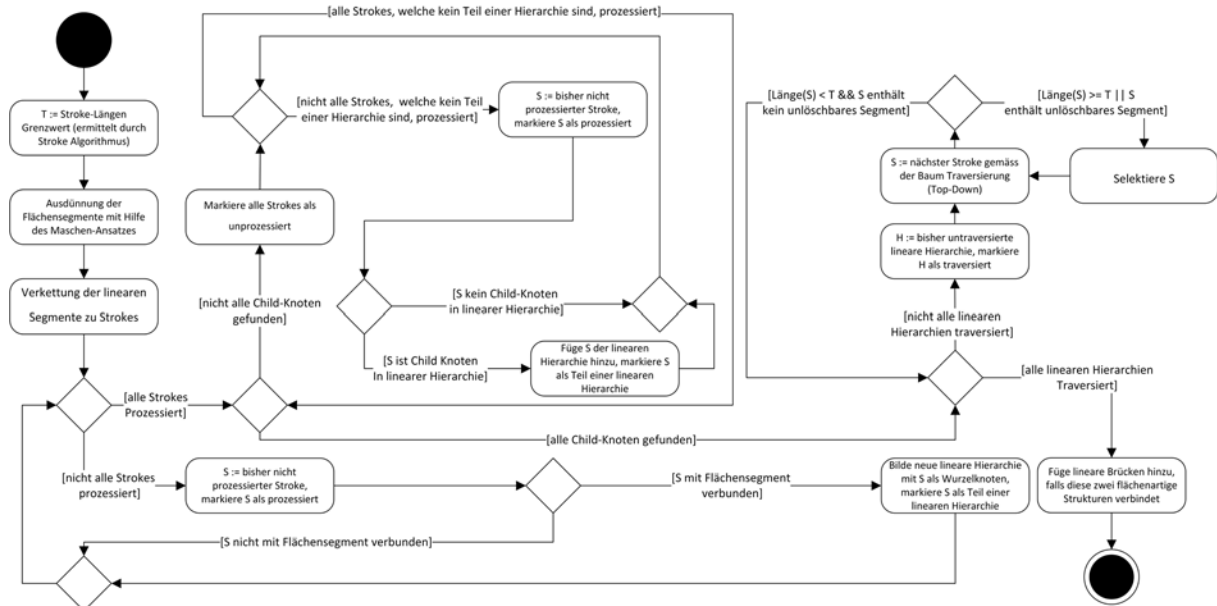
- 1) Durchsuche die Flächenhierarchien des Strassennetzwerkes. Starte mit dem Wurzelknoten der Flächenhierarchie (z.B. Knoten 1/2/3/4 in Abb. 43(d)). Falls die Maschendichte des aktuellen Knotens kleiner als ein vordefinierter Grenzwert ist (Maschendichte-Grenzwert), bleiben alle Flächensegmente der Masche erhalten. Die Traversierung fährt dann mit den Child-Knoten des aktuellen Knotens analog weiter, solange bis der aktuelle Knoten keine weiteren Child-Knoten mehr hat oder die maximale Maschendichte aller Child-Knoten grösser als der Maschendichte-Grenzwert ist.
- 2) Eine lineare Hierarchie wird traversiert, falls sie über eine Flächenbrücke, welche im ersten Schritt erhalten blieb, verbunden ist. Die Traversierung startet mit dem Ausgangs-Stroke, welcher mit der erhaltenen Flächenbrücke verbunden ist. Ist die Länge des aktuellen Strokes länger als ein vordefinierter Grenzwert (Stroke-Längen-Grenzwert), so wird der Stroke selektiert. Die Traversierung erfolgt dann analog mit den Child-Knoten des aktuellen Strokes, solange bis der aktuelle Knoten keine Child-Knoten mehr aufweist oder die Länge kürzer als der Stroke-Längen-Grenzwert ist.



- 3) Erhalte die linearen Brücken zwischen zwei flächenartigen Strukturen, sofern diese im ersten Schritt selektiert wurden.

### 4.6.5 Integrierter Stroke-Maschen Kombinationsansatz im Prototyp

Der im Prototyp verwendete Algorithmus ist im UML Aktivitätsdiagramm in [Abb. 45](#) dargelegt und einzelne, hauptsächlich von [Li und Zhou \(2012\)](#) leicht abweichende Aspekte davon werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher beschrieben.



**Abb. 45: UML Aktivitätsdiagramm des integrierten Stroke-Maschen Kombinalgorithmus**

Der Ansatz widmet sich zuerst der Ausdünnung von flächenartigen Strukturen mit Hilfe des Maschen-Ansatzes und generalisiert anschliessend die linearen Strukturen mit Hilfe des Stroke-Ansatzes.

#### 4.6.5.1 Aufbau und Traversierung der Hierarchien im Prototyp

Die hybride Hierarchie von [Li und Zhou \(2012\)](#) ist vor allem dann geeignet, wenn eine Generalisierung in Echtzeit geschehen soll, also innerhalb von Bruchteilen von Sekunden, und über mehrere Masstabebenen. Eine Generalisierung in Echtzeit ist dann von Bedeutung, wenn Benutzer die Unterschiede zwischen den verschiedenen Masstabebenen sofort sehen wollen. Ein klassisches Beispiel ist das Zoomen. Wenn die hybride Hierarchie im Speicher abgelegt ist, ist die anschliessende Selektion mit Hilfe der Traversierung sehr schnell ([Li und Zhou 2012](#)), weil alles schon vorgerechnet ist, und ein potentieller Nutzer kann das Resultat sofort sehen.

Die hybride Hierarchie weist aber auch einige Nachteile auf. Der Aufbau (hauptsächlich) der Flächenhierarchien ist, vor allem für grössere Testgebiete, extrem rechen- und speicherintensiv, weil der ganze Prozess der Ausdünnung, vom ungeneralisierten Strassennetzwerk soweit bis nur noch eine (äussere) Masche übrig ist, vorgerechnet und alle Zwischenresultate im Speicher abgelegt werden müssen. Bei kleineren Testgebieten ist dies vertretbar, bei grösseren Testgebieten aber umständlich. Wenn der Fokus aber nicht auf einer Echtzeit-Generalisierung liegt und die Ausdünnung nicht mit Hilfe eine Maschendichte-Grenzwertes erfolgt, sondern eine bestimmte Anzahl Strassensegmente (30 %) entfernt müssen, ist die komplette Vorberechnung der Flächenhierarchie bis zur äussersten Hülle gar nicht notwendig, weil das Strassennetzwerk verhältnismässig wenig ausgedünnt wird. Konzeptionell wäre es zwar relativ einfach umzusetzen, in dem jedem Flächensegment der Schritt zugewiesen wird, bei dem es entfernt wird ([Abb. 43\(e\)](#)). Anschliessend könnte die Flächenhierarchie mit Hilfe dieser Schritte in umgekehrter Reihenfolge und in Echtzeit aufgebaut und entsprechend traversiert werden. Weil dies aus den oben erwähnten Gründen aber gar nicht notwendig ist und die Handhabung der in

Abschnitt 5.6 diskutierten Erweiterung so einfacher zu handhaben ist, wurde in dieser Arbeit ein leicht anderer Ansatz verfolgt, bei der die Flächenhierarchien nicht vorgängig vollständig berechnet und im Speicher abgelegt werden. Die Ausdünnung der flächenartigen Strukturen wird mit Hilfe des Maschen-Ansatzes *direkt* ausgeführt. Auf die generierten Resultate hat dies aber keinen Einfluss. [Li und Zhou \(2012\)](#) starten mit dem Wurzelknoten (die grosse äussere Masche) der Flächenhierarchie und traversieren den Baum solange, bis die Maschendichten der Maschen grösser als der Maschendichte-Grenzwert sind. In dieser Arbeit wird bei den Maschen mit grösster Maschendichte gestartet. Diese werden direkt mit Hilfe des Maschenansatzes ausgedünnt, solange bis die gewünschte Anzahl Flächensegmente entfernt worden sind. Weil nur ca. 30 % der Segmente entfernt werden müssen, ist dieser Ansatz schneller, als wenn vorgängig die ganze Hierarchie berechnet werden muss und anschliessend wieder 70 % der Segmente selektiert werden müssen. In einem zweiten Schritt werden dann die linearen Hierarchien, wie sie von [Li und Zhou \(2012\)](#) definiert wurden, aufgebaut. Ein weiterer Vorteil besteht jetzt darin, dass *nur* diejenigen linearen Hierarchien berechnet werden müssen, bei denen der Ausgangs-Stroke an ein Flächensegment, welches im vorhergehenden Schritt selektiert worden ist, verbunden ist. Diese Anzahl linearer Hierarchien ist stets kleiner oder gleich gross, als die Anzahl linearer Hierarchien im ungeneralisierten Netzwerk. Die Berechnung ist dadurch schneller und weniger speicherintensiv. Um die linearen Hierarchien aufzubauen, werden zuerst alle linearen Segmente zu Strokes verkettet. Für alle diese Strokes wird anschliessend geprüft, ob sie mit einer Flächenbrücke verbunden sind. Ist dies der Fall, so wird eine neue Hierarchie gebildet mit dem entsprechenden Stroke als Wurzelknoten. In einem nächsten Schritt werden die Child-Knoten der gebildeten Hierarchien gesucht, und, falls vorhanden, der entsprechenden Hierarchie hinzugefügt.

Wenn alle linearen Hierarchien vollständig aufgebaut worden sind, können sie traversiert werden. Gestartet wird mit dem Wurzelknoten der Hierarchie. Ist dieser länger als der Stroke-Längen-Grenzwert oder beinhaltet ein Segment, welches gemäss der Anforderungsanalyse nicht entfernt werden darf oder soll, wird er selektiert. Nach dem gleichen Prinzip wird mit den Child-Knoten fortgefahren, solange bis der aktuell traversierte Stroke kleiner als der Stroke-Längen-Grenzwert ist oder keine weiteren Child-Knoten mehr vorhanden sind.

Nach der Traversierung der linearen Hierarchien werden alle linearen Brücken, sofern sie zwei flächenartige Strukturen miteinander verbinden, selektiert. Die Extrahierung von linearen Brücken ist trivial. Strassensegmente, deren Halbkanten zur selben Masche gehören sind potentielle lineare Brücken. Um zu prüfen, ob die lineare Brücke auch wirklich zwei selektierte flächenartige Strukturen verbindet, kann die lineare Brücke eingefügt und anschliessend geprüft werden, ob eine neue Sackgasse gebildet wurde. Ist dies der Fall, so verbindet die lineare Brücke keine erhaltenen flächenartigen Strukturen und muss somit wieder entfernt werden. Ist aber keine neue Sackgasse gebildet worden, so handelt es sich um eine reguläre lineare Brücke, die zwei flächenartige Strukturen miteinander verbindet.

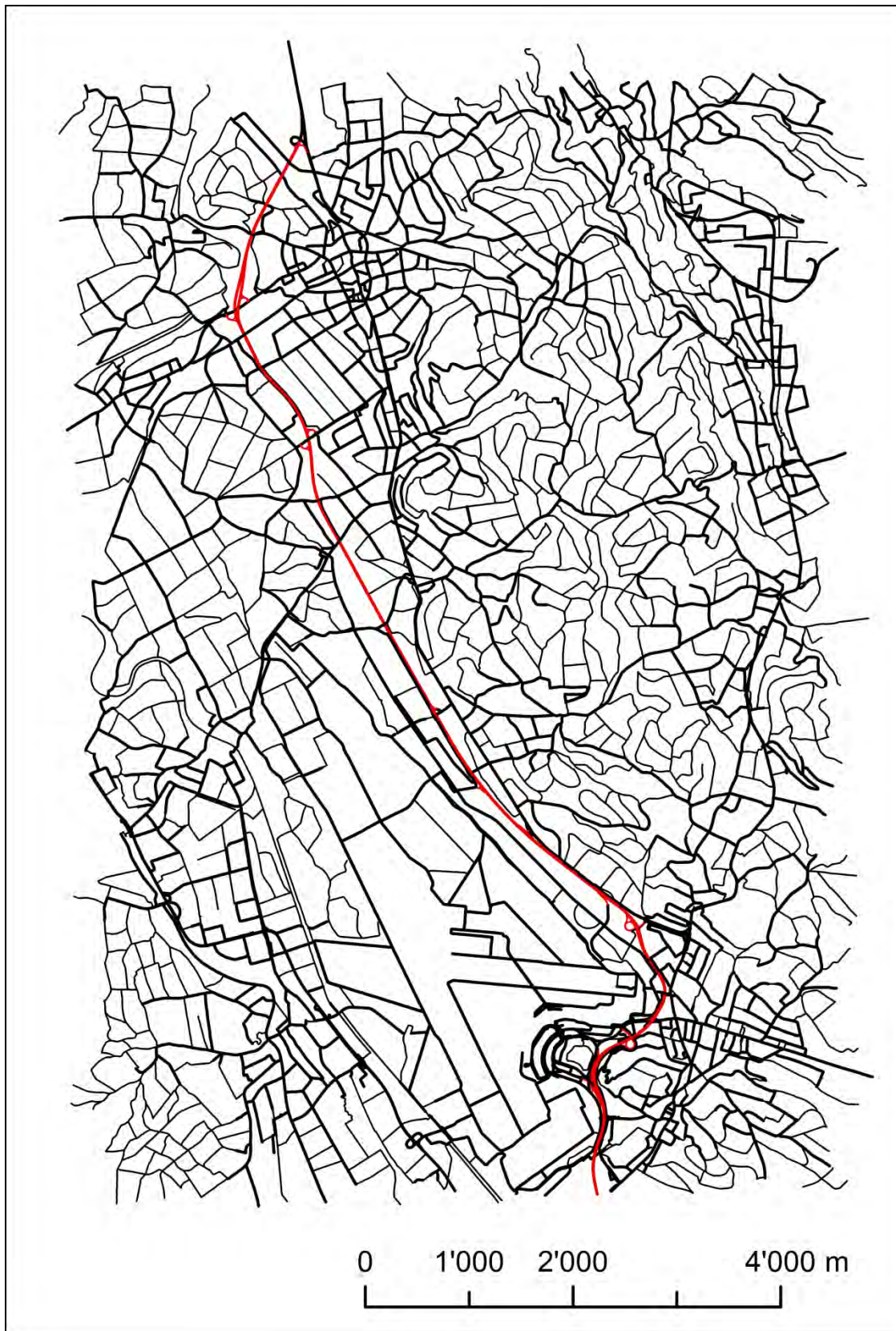
#### 4.6.5.2 Bestimmung der Maschendichte und des Stroke-Länge Grenzwertes

[Li und Zhou \(2012\)](#) fixieren die Grenzwerte der Maschendichte und Stroke-Länge so, dass die entsprechenden Resultate die grösste Ähnlichkeit mit vorgegebenen, manuell generalisierten Strassennetzwerken ergeben, welche sie als optimale Lösungen interpretieren. Da dieser Ansatz aber etwas problematisch ist (siehe auch Abschnitt 6.2.1) und auch keine manuell generalisierten Strassennetzwerke vorhanden sind und in dieser Arbeit das Prinzip verfolgt wurde, dass stets 70 % aller Strassensegmente für den Zielmasstab selektiert werden, musste ein leicht anderer Ansatz verfolgt werden. Der Stroke-Längen-Grenzwert wird mit Hilfe des Stroke-Ansatzes bestimmt. Der Stroke-Ansatz und die darauf beruhende Selektion werden für ein Strassennetzwerk ausgeführt und die Länge des kürzesten noch selektierten Strokes definiert den Stroke-Längen-Grenzwert. Diese Vorgehensweise ist unabhängig von vordefinierten manuell generalisierten Strassennetzwerken. Da der Stroke-Längen-Grenzwert durch diese Vorgehensweise festgesetzt ist, muss der Maschendichte-Grenzwert flexibel sein, damit die Anforderung 70 % aller Strassensegmente für den Zielmasstab zu selektieren erfüllt werden kann. Deswegen wurde der Ansatz verfolgt, dass die flächenartigen Strukturen solange ausgedünnt werden, bis mit dem darauf folgenden Schritt der Selektion der linearen Segmente in den linearen Hierarchien, insgesamt 70 % der Strassensegmente selektiert wurden.

**Beachtung der Anforderungen** Um den in der Anforderungsanalyse erstellten Anforderungen möglichst gerecht zu werden, wurden für den Maschen-Ansatz, welcher die flächenartigen Strukturen behandelt, dieselben Mechanismen verwendet wie auch für den reinen Maschen-Ansatz. Zudem wurde auch für den Stroke-Ansatz, welcher die linearen Strukturen behandelt, dieselbe Stroke-Ordnung verwendet, wie für den reinen Stroke-Ansatz. Somit kann sichergestellt werden, dass ein Stroke, welcher ein Strassensegment beinhaltet, das nicht entfernt werden darf oder sollte, stets hoch eingeordnet ist. Konkret wurde dies im integrierten Ansatz so gehandhabt, dass bei der Traversierung einer linearen Struktur ein Stroke mit einem Strassensegment, welches nicht entfernt werden darf oder sollte, stets selektiert wird, unabhängig der Länge.

### 4.6.6 Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes

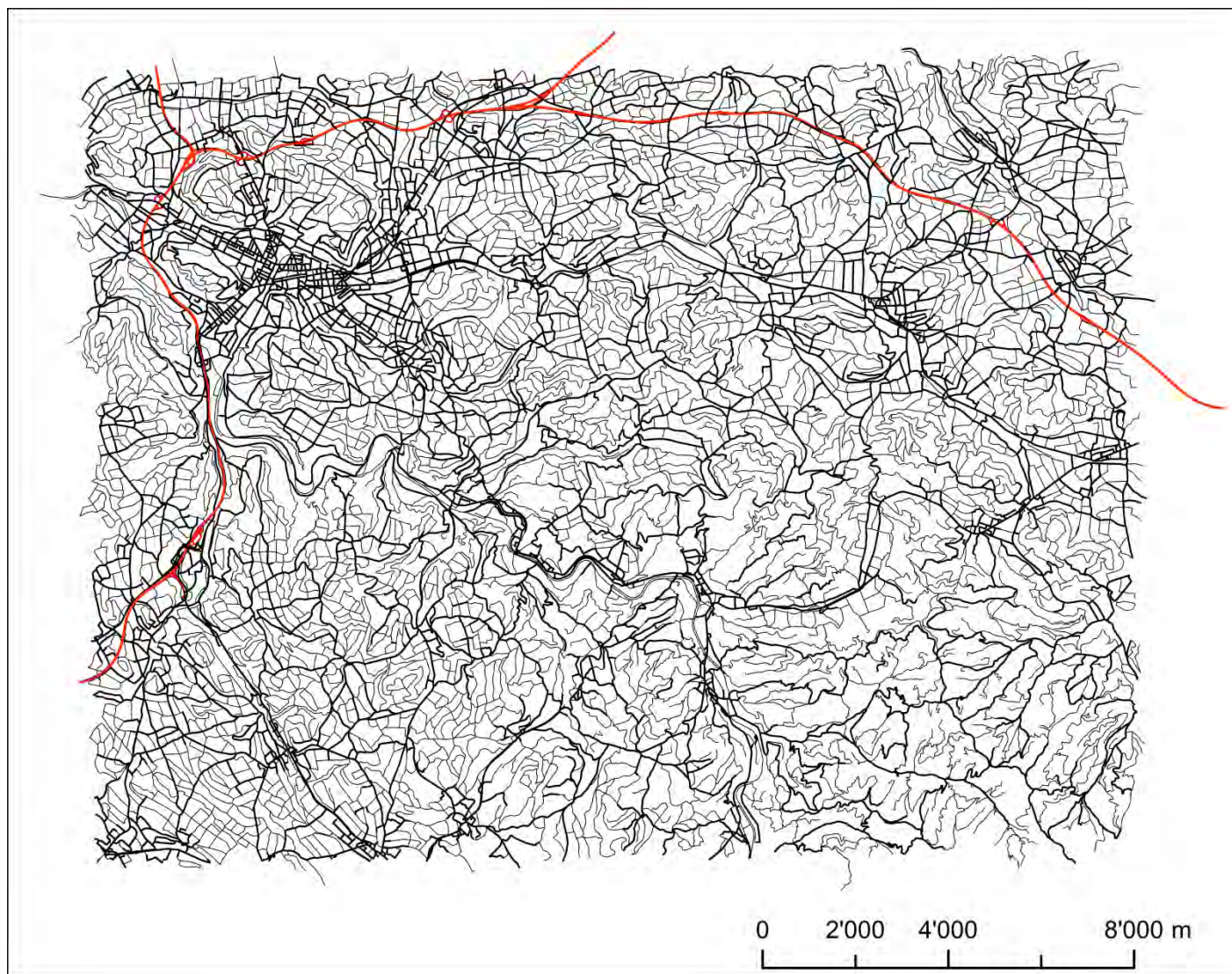
Die Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für die vier Testgebiete sind in [Abb. 46](#) bis [Abb. 49](#) und die dazu passenden statistischen Analysen in den [Tab. 12](#) und [Tab. 13](#) ersichtlich.



**Abb. 46: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet ZU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)





**Abb. 47: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet WT**

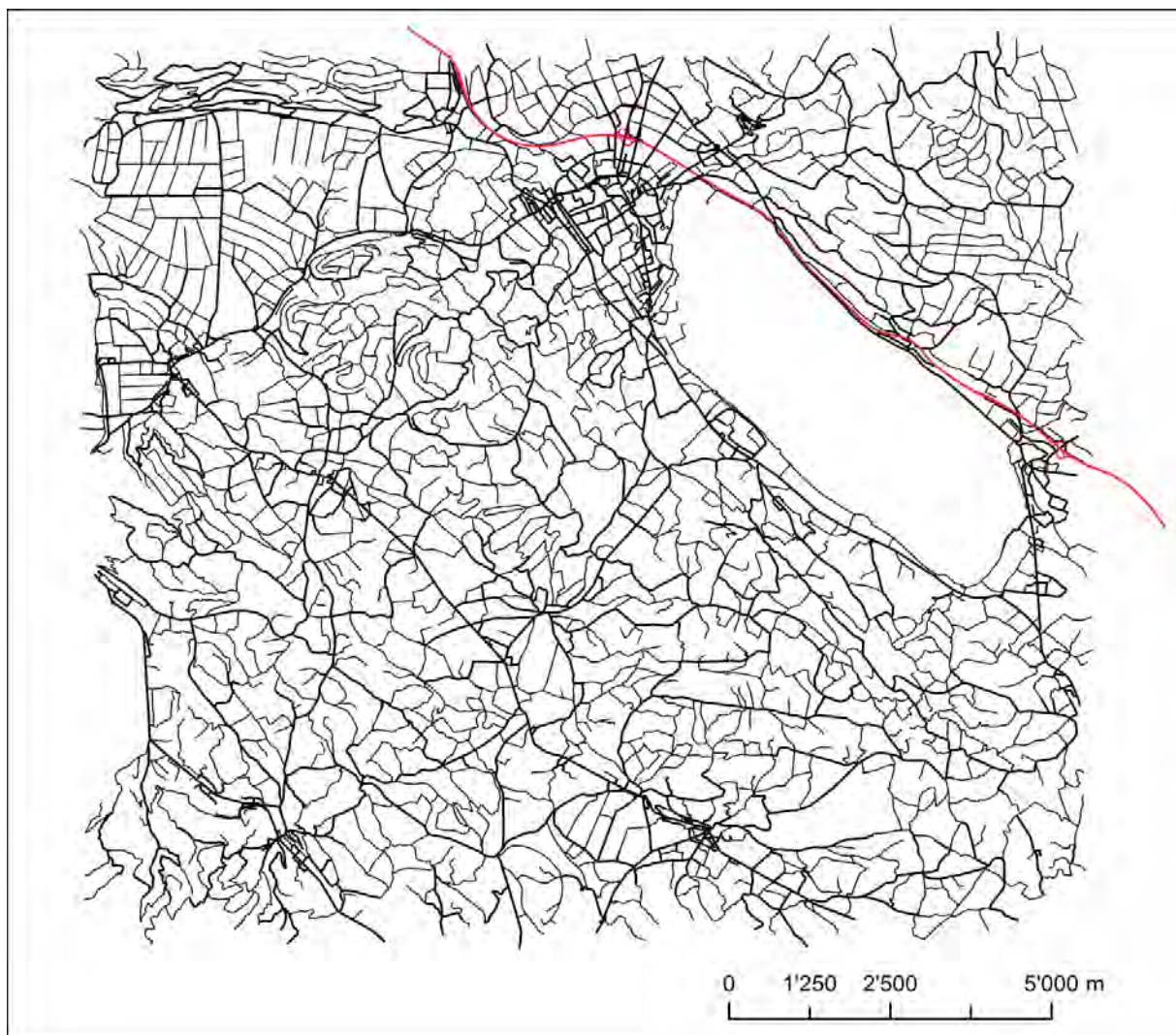
Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)



**Tab. 12: Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für die Testgebiete ZU und WT**

Gegenübergestellt sind die ungeneralisierten Testgebiete (TG) und die Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (IA).

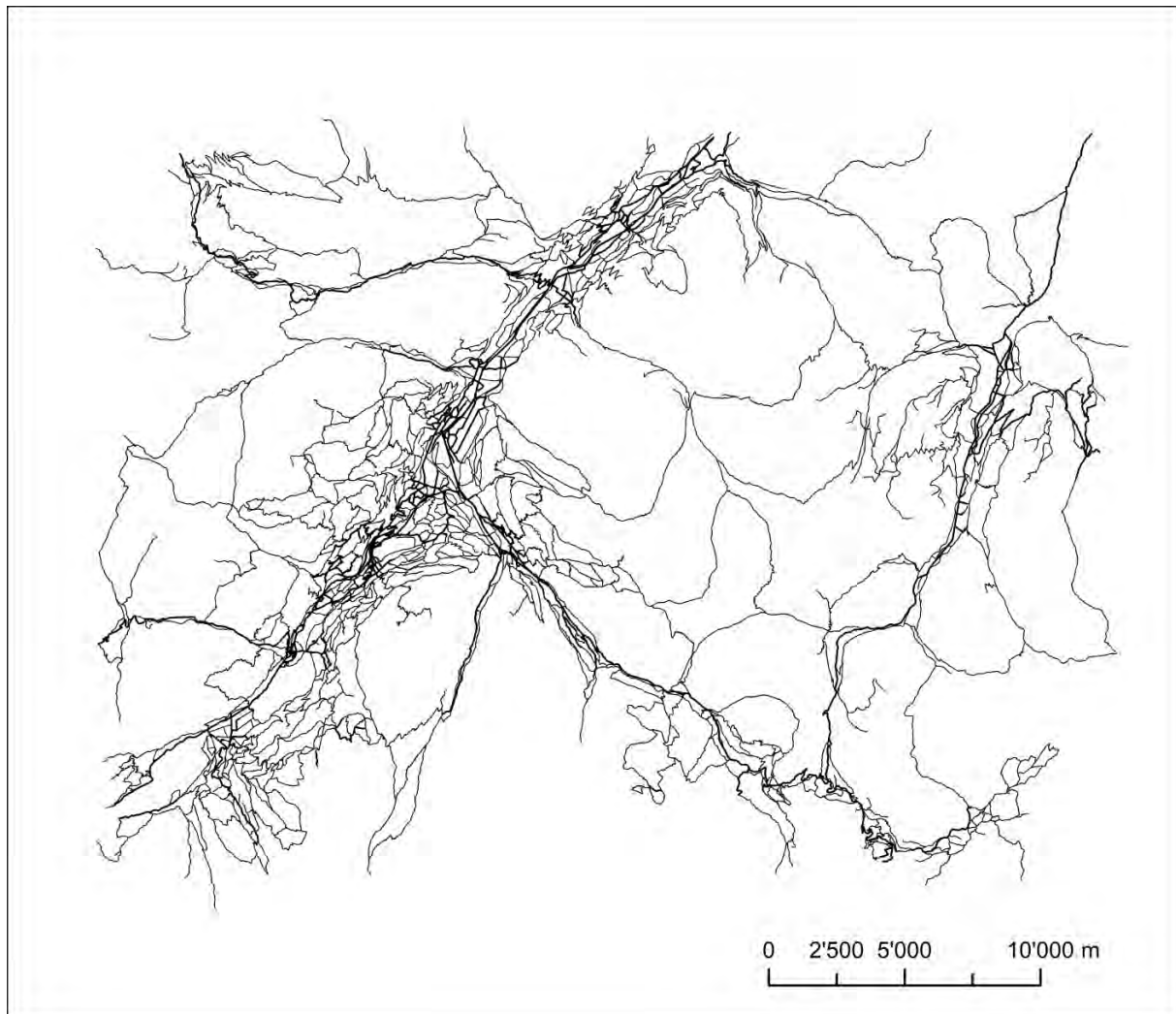
Kennzahl	ZU-TG	ZU-IA	WT-TG	WT-IA
Anzahl Segmente total	8'694	6'084	30'780	21'537
Anzahl lineare Segmente	945	170	2'951	557
Anzahl Flächensegmente	7'749	5'914	27'829	20'980
Länge Segmente total [m]	992'752	738'645	4'368'784	3'253'144
Länge lineare Segmente [m]	119'009	42'321	502'478	177'105
Länge Flächensegmente [m]	873'743	696'324	3'866'306	3'076'039
Anzahl nicht entfernbare Segmente	588	588	1'665	1'665
Anzahl bevorzugte Segmente	195	166	634	482
Anzahl Treppensegmente	16	5	27	4
Anzahl Sackgassen	801	108	2'507	353
Anzahl neue Sackgassen	-	0	-	1
Average Connectivity	0.99905	1.00000	0.99761	1.00000


**Abb. 48: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet SU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert.

(© swisstopo)





**Abb. 49: Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet SU**

Die Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)

**Tab. 13: Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für die Testgebiete SU und EN**

Gegenüber gestellt sind jeweils die ungeneralisierten Testgebiete (TG) und die Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (IA).

Kennzahl	SU-TG	SU-IA	EN-TG	EN-IA
Anzahl Segmente total	11'129	7'787	8'975	6'274
Anzahl lineare Segmente	1'897	581	1'520	473
Anzahl Flächensegmente	9'232	7'206	7'455	5'801
Länge Segmente total [m]	1'582'041	1'230'825	2'183'795	1'721'987
Länge lineare Segmente [m]	302'108	147'259	429'530	204'129
Länge Flächensegmente [m]	1'279'933	1'083'566	1'754'265	1'517'858
Anzahl nicht entfernbare Segmente	684	684	445	442
Anzahl bevorzugte Segmente	309	250	659	538
Anzahl Treppensegmente	18	5	18	1
Anzahl Sackgassen	1'533	368	1'302	353
Anzahl neue Sackgassen	-	6	-	1
Average Connectivity	0.99680	1.00000	0.90888	1.00000

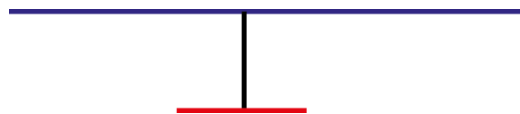
Die Kennzahlen zeigen, dass erneut ca. 70 % der Segmente selektiert wurden. Im Gegensatz zum reinen Maschen-Ansatz selektiert der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz aber auch lineare Segmente. Dieser Sachverhalt ist sehr gut auch in den Resultaten zu erkennen. Vor allem die Testgebiete SU und EN, welche im ungeneralisierten Testgebiet verhältnismässig viele lineare Segmente aufweisen, zeigen nun ein Muster, bei dem die linearen Segmente im Gegensatz zum Maschen-Ansatz wieder klar ersichtlich sind. In allen Testgebieten, abgesehen vom Testgebiet EN, konnten alle Segmente, welche selektiert werden müssen, auch effektiv selektiert werden. Der Grund, dass für das Testgebiet EN drei Segmente nicht selektiert wurden, die selektiert hätten werden müssen, wird in Abschnitt 5.3 genauer erläutert. Weiter konnte in allen Testgebieten ein grosser Teil der bevorzugten Segmente selektiert, sowie der grösste Teil der Treppensegmente entfernt werden. Die Anzahl der Sackgassen ist in allen Testgebieten stark gesunken. Vereinzelt sind wenige neue Sackgassen entstanden. Dies sind aber nicht Sackgassen im klassischen Sinne, wie sie z.B. im Stroke-Ansatz auftauchen, sondern Sackgassen in linearen Strukturen. Weiter ist für alle Testgebiete eine vollständige Konnektivität gegeben (Average Connectivity von 1). Dies ist aber durch das Prinzip des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes implizit gegeben.

#### 4.6.7 Diskussion der Resultate

Der grosse Vorteil des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes ist der Fakt, dass er die jeweiligen Vorteile des Stroke- und Maschen-Ansatzes kombiniert (Li und Zhou 2012). So entstehen keine neuen Unterbrüche im Strassennetzwerk und eine komplette Konnektivität (Average Connectivity von 1) ist gegeben. Weiter werden auch, im Gegensatz zum Maschen-Ansatz, die linearen Segmente behandelt.

Die Kennzahlen haben gezeigt, dass mit Ausnahme des Testgebietes EN alle zwingend zu selektierenden Segmente auch selektiert wurden. Das Problem bei den drei nicht selektierten Segmente im Testgebiet EN liegt darin, dass es sich bei den drei Segmenten um Segmente handelt, welche isoliert vorliegen, also nicht mit dem Rest des Strassennetzwerkes verbunden sind. Vollständig isolierte Segmente werden durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz nicht behandelt und können daher nicht selektiert werden. Abschnitt 5.3 geht auf diesen Sachverhalt genauer ein und stellt eine entsprechende Lösung vor.

Die statistischen Analysen haben ebenfalls gezeigt, dass vereinzelt neue Sackgassen entstanden sind. Diese sind aber ausschliesslich Sackgassen innerhalb von linearen Strukturen. Abb. 50 zeigt ein Beispiel. Blau dargestellt sei das Flächensegment über welches die lineare Struktur, bestehend aus dem schwarzen und roten Stroke, verbunden ist. Wird nun der rote Stroke aufgrund seiner unzureichenden Länge entfernt, entsteht eine neue Sackgasse. Dieses Vorkommnis ist aber, wie die Zahlen in Tab. 12 und Tab. 13 zeigen, sehr selten und betrifft meistens die Randgebiete, also diejenigen Gebiete, an denen das Testgebiet begrenzt wurde. Diese Art von Sackgassen sind konzeptionell nicht so schlimm, wie die Sackgassen innerhalb von flächenartigen Strukturen, weil sie prinzipiell nicht eine neue Sackgasse generieren, wo vorher keine war und somit einen potentiellen Kartennutzer in die Irre leiten könnten, sondern die Sackgasse nur *vorher* ansetzen (im Sinne einer Einkürzung). Eine lineare Struktur weist im übertragenen Sinne nur Sackgassen auf. Es ist nicht möglich über eine lineare Struktur zu einem anderen Flächensegment zu gelangen, als über dasjenige Flächensegment worüber die lineare Struktur mit der flächenartigen Struktur verbunden ist. Lineare Strukturen können keine Verbindungsstrassen sein, weshalb hier eine neue Sackgasse weniger schwerwiegend ist.



**Abb. 50: Entstehung von Sackgassen in linearen Strukturen**

Blau dargestellt ist ein Flächensegment, über welches eine kleine lineare Struktur (der schwarze und rote Stroke) verbunden ist. Wird der rote Stroke entfernt, entsteht eine neue Sackgasse.

Eine Beurteilung, inwiefern intuitiv wichtige Verbindungsstrassen selektiert wurden ist erneut schwierig, weil nicht per se klar ist, wer welche Strasse intuitiv als wichtige Verbindungsstrasse interpretiert. Sammelstrassen hingegen können mit Hilfe des in Abschnitt 4.5.4.3 erwähnten Prinzips bevorzugt selektiert werden. Inwiefern Hauptzufahrten zu Bahnhöfen und anderen wichtigen Infrastrukturen selektiert worden sind, kann ohne weitere Datengrundlage nicht beurteilt werden. Abschnitt 5.5 wendet sich diesem Thema genauer zu.

Die Entfernung von kurzen Sackgassen lässt sich durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz elegant lösen. Da kurze Sackgassen stets in linearen Strukturen vorhanden sind, kann mit dem Stroke-Längen-Grenzwert bestimmt werden, ab welcher Länge ein Stroke (und somit eine Sackgasse) noch selektiert wird. Der Ansatz ist diesbezüglich also flexibel. Obwohl die grundlegende Struktur visuell besser erhalten worden ist, als im reinen Stroke- und Maschen-Ansatz, gibt es auch in den Resultaten des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes Situationen bei denen die allgemeine Struktur nicht erhalten geblieben ist. Insbesondere die verstärkte Ausdünnung in dichteren Siedlungsgebieten, im Vergleich zu ländlicheren und weniger dicht besiedelten Gebieten, ist auffällig (wie auch bei den Resultaten des reinen Stroke- und Maschen-Ansatzes). Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 5.6 genauer analysiert und ein entsprechendes Lösungsmodell wird vorgeschlagen.

Der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz weist im Gegensatz zum reinen Stroke- und Maschen-Ansatz mit Abstand die wenigsten Schwächen auf. Im folgenden Abschnitt werden zusammenfassend noch einmal die grundlegenden Probleme der drei Basisalgorithmen erläutert um dann zu entscheiden, welcher Ansatz als Basis genutzt wird, um die Veränderungen und Erweiterungen zu implementieren.

### 4.7 Probleme der Basisalgorithmen

Der Stroke-Ansatz weist zwei grundlegende Probleme auf. Einerseits wird die Konnektivität nicht erhalten. Ehemals verbundene Segmente liegen im Resultat isoliert vor, was zu Unterbrüchen im Strassennetzwerk führt. Die Average Connectivity wird in allen Testgebieten, mit Ausnahme des Testgebietes EN, kleiner. Damit gekoppelt ist das zweite Problem: es entstehen in allen Testgebieten viele neue Sackgassen. Diese zwei Probleme verletzen die Anforderungen 5 bis 7 aus der Anforderungsanalyse. Die Erhaltung der Konnektivität könnte mit dem von [Thomson und Brooks \(2000\)](#) vorgestellten Mechanismus gelöst werden, oder mit Hilfe eines minimalen Spannbaums, so wie es [Yang et al. \(2011\)](#) umgesetzt haben. Aber auch dann wären das Problem der Unterbrüche im Strassennetzwerk und das Problem der Entstehung neuer Sackgassen nicht gelöst.

Das Hauptproblem des Maschen-Ansatzes ist der Fakt, dass lineare Segmente nicht behandelt werden. Dies ist einerseits eine unzulässige Vernachlässigung einer weiter undefinierbaren Menge von Segmenten und hat als Folge, dass nicht alle Segmente, die selektiert werden müssen, auch selektiert werden können. Dies ist eine Verletzung der Anforderungen 1 bis 4. Obwohl in den vier Testgebieten dieser Arbeit die Konnektivität erhalten bleibt (Average Connectivity von 1), kann der Maschen-Ansatz dies nicht garantieren (siehe auch [Abb. 41](#)). Das bedeutet, dass es zu einer Verletzung der Anforderung 7 kommen kann.

Der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz kombiniert die Vorteile des Stroke-Ansatzes und des Maschen-Ansatzes in einem integrierten Konzept. Weiter sind die Hauptprobleme des Stroke-Ansatzes (Verlust der Konnektivität und Generierung neuer Sackgassen) und des Maschen-Ansatzes (Vernachlässigung der linearen Segmente und allfälliger Verlust der Konnektivität) im integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz nicht mehr vorhanden. Aufgrund dieser Sachlage wurde entschieden, dass der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz als der Algorithmus ausgewählt wird, welcher am geeignetsten ist für die in [Abschnitt 5](#) vorgestellten Verbesserungen und Erweiterungen. Der reine Stroke- und der reine Maschen-Ansatz werden nicht mehr weiter verfolgt werden. Es ist aber nicht so, dass der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz keine Nachteile aufweist. Teilweise sind es auch Probleme, die den Stroke- und Maschen Ansatz ebenfalls betreffen würden. Diese werden aber in Abschnitt 5 genauer unter die Lupe genommen und dementsprechend durch den Vorschlag von Lösungsmodellen verbessert.

# 5 Erweiterungen des integrierten Kombinationsansatzes

In diesem Kapitel werden weitere Schwächen des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes diskutiert. Einerseits sollen die Probleme ausgearbeitet und andererseits entsprechende Lösungen vorgeschlagen, sowie deren Resultate diskutiert werden. Teile der Probleme würden auch den Stroke- und Maschen-Ansatz betreffen. Diese beiden Ansätze werden aber nicht mehr weiter verfolgt, weil die Nachteile zu gross sind und sich der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz als Basis besser eignet. Einerseits werden intrinsische Probleme des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes diskutiert, andererseits aber auch extrinsische Faktoren untersucht. Insbesondere werden die Thematiken der Hauptzufahrten zu wichtiger Infrastruktur (Anforderung 15) und die Strukturhaltung (Anforderung 16) genauer analysiert.

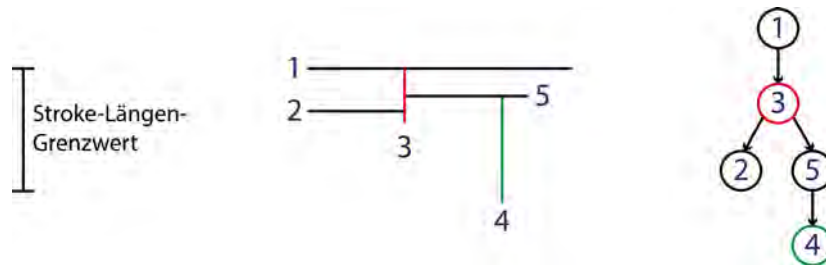
## 5.1 Top-Down vs. Bottom-Up Ansatz in linearen Hierarchien

### 5.1.1 Problem des Top-Down Ansatzes

Li und Zhou (2012) verwenden einen Top-Down Ansatz für die Traversierung der linearen Hierarchien. Gestartet wird mit dem Stroke, welcher über eine erhaltene Flächenbrücke mit einem Flächensegment verbunden ist. Ist dieser Stroke länger als ein vordefinierter Grenzwert (Stroke-Längen-Grenzwert), so wird er selektiert. Die weitere Traversierung erfolgt analog mit den Child-Knoten dieses Strokes, solange bis der aktuelle Knoten keine Child-Knoten mehr hat oder die Länge des aktuellen Strokes kürzer als der Grenzwert ist.

Für diese Vorgehensweise ergibt sich eine gewisse konzeptionelle Problematik. Die Traversierung von Strokes stoppt, sobald die Länge eines Strokes kürzer als der Stroke-Längen-Grenzwert ist. Problematisch ist dieser Ansatz in Situationen, bei denen lange Strokes oder Strokes welche zwingend selektiert werden müssen in den unteren Ebenen einer Baumhierarchie vorkommen. Im schlechtesten Fall ist der Wurzelknoten der Baumhierarchie ein sehr kurzer Stroke, welcher aufgrund seiner kurzen Länge nicht selektiert wird. In diesem Fall stoppt die Traversierung schon beim Wurzelknoten. Dadurch wird eine potentiell grosse Menge von Strokes, welche eine grössere Tiefe in der Baumhierarchie aufweisen, gar nicht weiter betrachtet. Die Problematik ergibt sich aber nicht nur beim Wurzelknoten, sondern kann auch in grösseren Tiefen der Baumhierarchie auftreten. Abb. 51 verdeutlicht die Problematik graphisch an einem Beispiel. Dargestellt ist eine lineare Struktur aus fünf Strokes unterschiedlicher Länge mit der dazu passenden linearen Baumhierarchie. Der rote Stroke 3 repräsentiert einen Stroke mit einer Länge unter dem Stroke-Längen-Grenzwert. Der grüne Stroke 4 repräsentiert ein Stroke, welcher zwingend selektiert werden muss (weil er z.B. Segmente enthält, welche zwingend selektiert werden müssen). Stroke 3 hat in der Baumhierarchie eine Tiefe von 1, wohingegen Stroke 4 eine Tiefe von 3 hat. Die Traversierung des Baumes mit einem Top-Down Ansatz startet bei Stroke 1. Dieser wird aufgrund seiner Länge (grösser als der Stroke-Längen-Grenzwert) selektiert. Die Traversierung fährt mit dem Child-Knoten (Stroke 3) weiter. Weil dieser aber nun kleiner als der Stroke-

Längen-Grenzwert ist, wird er nicht selektiert und die Traversierung stoppt. Für diese Baumhierarchie wurde nun lediglich Stroke 1 selektiert. Die Strokes 2, 4 und 5 wurden gar nicht weiter in Betracht gezogen, obwohl alle länger als der Stroke-Längen-Grenzwert sein können und Stroke 4 sogar zwingend hätte selektiert werden müssen. Diese Vorgehensweise bevorzugt indirekt Strokes welcher in der Baumhierarchie eine kleinere Tiefe aufweisen, weil für sie die Wahrscheinlichkeit grösser ist, dass sie überhaupt noch traversiert werden. Prinzipiell sollten aber alle Strokes in der Hierarchie betrachtet werden.



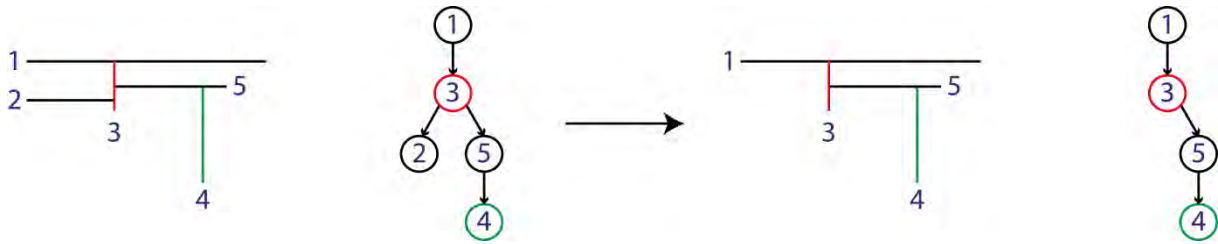
**Abb. 51: Konzeptionelle Problematik des Top-Down Ansatzes in linearen Hierarchien**

Der rote Stroke 3 repräsentiert einen Stroke der kürzer als der Stroke-Längen-Grenzwert ist. Der grüne Stroke 4 ist ein Stroke, der zwingend selektiert werden muss. Die Problematik des Top-Down Ansatzes besteht darin, dass Stroke 4 nicht mehr traversiert wird und daher gar nicht selektiert werden kann, weil die Traversierung bei Stroke 3 abbricht, da dieser kürzer als der Stroke-Längen-Grenzwert ist.

### 5.1.2 Bottom-Up Ansatz

Um der Problematik des Top-Down Ansatzes zu begegnen gibt es prinzipiell verschiedene Möglichkeiten. Die einfachste Variante wäre den Top-Down Ansatz zu verwenden und anschliessend alle Strokes, welche nicht selektiert wurden, aber entweder länger als der Stroke-Längen-Grenzwert sind oder aus anderen Gründen zwingend selektiert werden müssen, im Nachhinein einzeln zu selektieren. Diese sehr einfache Herangehensweise ist aber ebenfalls problematisch und kann mit Hilfe von [Abb. 51](#) gut gezeigt werden. Der Top-Down Ansatz selektiert in dieser Hierarchie lediglich Stroke 1. Wenn nun im Nachhinein Stroke 4 einzeln selektiert wird, wird die Konnektivität unterbrochen und eine neue Sackgasse generiert. Stroke 4 ist isoliert und nicht mit dem restlichen Netzwerk verbunden. Dies widerspricht den Anforderungen 5 bis 7 aus der Anforderungsanalyse.

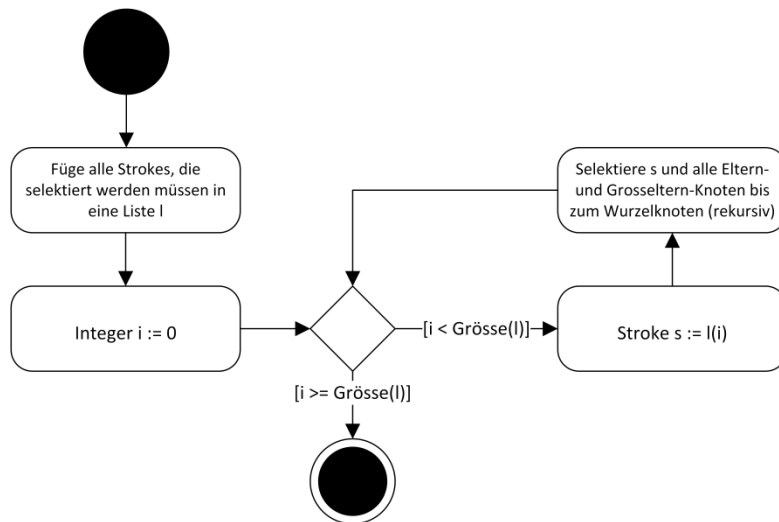
Eine elegante Lösung für das Problem kann gefunden werden, wenn man anstelle des Top-Down Ansatzes einen Bottom-Up Ansatz verwendet. Und zwar startet die Traversierung nicht beim Wurzelknoten in der Baumhierarchie, sondern bei den Blatt-Knoten. Handelt es sich beim aktuellen Blatt-Knoten um einen Stroke, der länger als der Stroke-Längen-Grenzwert ist oder aus anderen Gründen zwingend selektiert werden muss, so wird dieser Stroke selektiert und dessen Parent- und Grandparent-Knoten bis zum Wurzelknoten. Diese Vorgehensweise wird analog für alle Parent-Knoten der Blatt-Knoten, basierend auf einer Bottom-Up Traversierung, durchgeführt. Dieser Ansatz garantiert, dass alle Strokes, welche selektiert werden sollten, auch sicher selektiert werden und diese auch zwingend mit dem Strassennetzwerk verbunden sind und daher die Anforderungen 5, 6 und 7 aus der Anforderungsanalyse erfüllen können. [Abb. 52](#) illustriert den Bottom-Up Ansatz. Links dargestellt ist die Ausgangssituation mit dem kurzen roten Stroke 3 und dem zwingend zu selektierenden Stroke 4. Die Anwendung des vorgestellten Bottom-Up Ansatzes startet bei den Blatt-Knoten 2 und 4. Stroke 2 wird aufgrund seiner kurzen Länge nicht selektiert. Stroke 4 wird selektiert und um die Konnektivität zum Strassennetzwerk sicherzustellen, werden auch Strokes 5, 3 und 1 (die Parent- und Grandparent-Knoten von Stroke 4) selektiert. Fortgefahren wird mit Stroke 3 und Stroke 5 (die direkten Blatt-Knoten von Stroke 2 und 4). Da beide bereits selektiert wurden, müssen sie nicht weiter prozessiert werden. Schlussendlich wird Stroke 1 traversiert (Wurzelknoten). Auch er ist bereits selektiert und muss daher nicht mehr prozessiert werden. Das Resultat ist rechts in [Abb. 52](#) dargestellt.



**Abb. 52: Illustrierung des Bottom-Up Ansatzes**

Links dargestellt ist die Ausgangslage mit dem kurzen und roten Stroke 3 und dem zwingend zu selektierenden Stroke 4. Der Bottom-Up Ansatz selektiert Stroke 4 und dessen Parent- und Grandparent-Knoten bis zum Wurzelknoten. Das resultierende Ergebnis ist auf der rechten Seite ersichtlich.

Der Bottom-Up Ansatz kann auf unterschiedliche Art und Weise implementiert werden. Das UML Aktivitätsdiagramm in [Abb. 53](#) zeigt die Vorgehensweise für den Prototypen dieser Arbeit. In einem ersten Schritt wurden alle linearen Hierarchien traversiert und die Strokes, welche selektiert werden müssen (aufgrund ihrer Länge oder weil sie ein nicht entferbares oder bevorzugtes Segment enthalten), respektive ihre Referenzen, in einer Liste gesammelt. Durch diese Liste kann anschliessend iteriert werden. Bei jedem Stroke in dieser Liste werden der Stroke selbst und anschliessend rekursiv alle Parent- und Grandparent-Knoten selektiert.



**Abb. 53: UML Aktivitätsdiagramm des Bottom-Up Ansatzes**

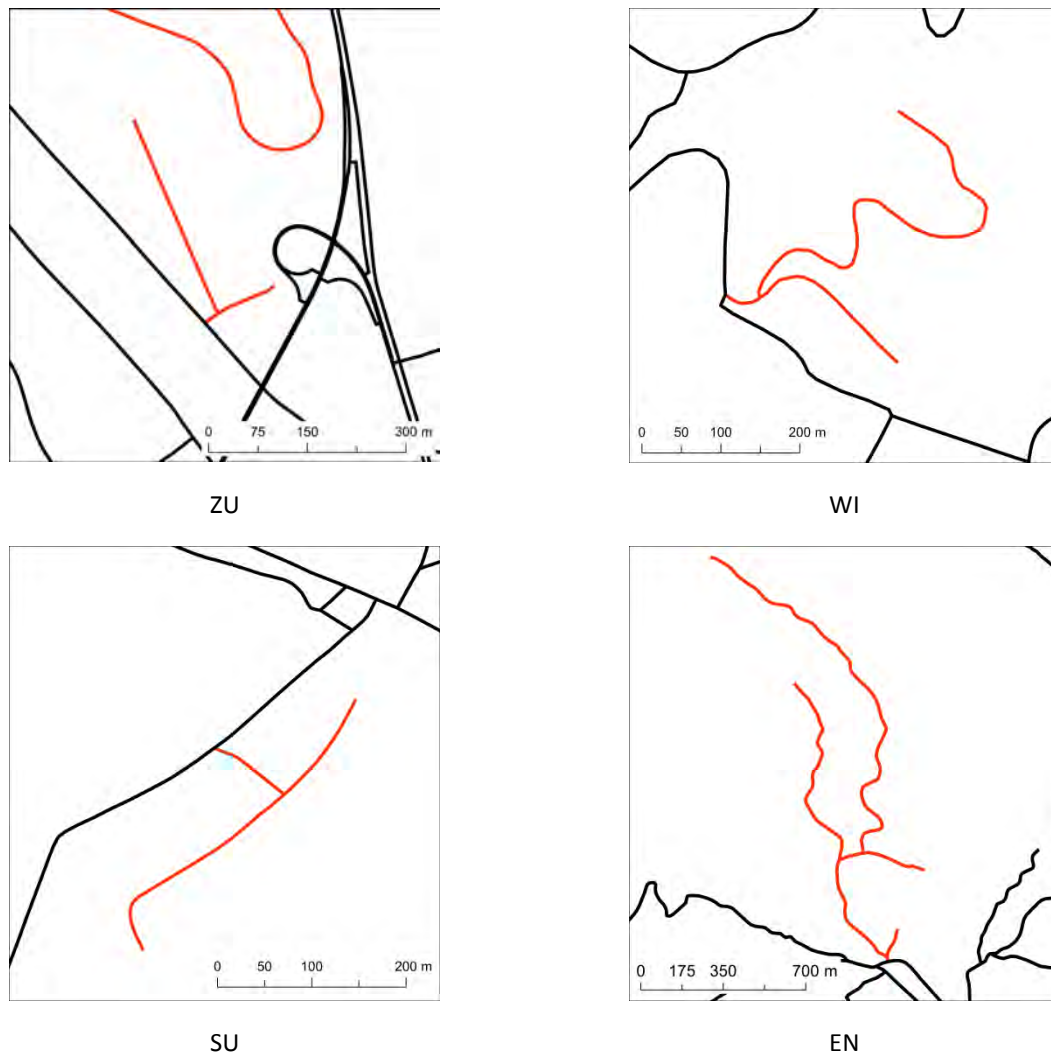
In einem ersten Schritt werden alle zu selektierenden Strokes in einer Liste gesammelt um anschliessend diese und alle ihre Parent- und Grandparent-Knoten rekursiv zu selektieren.

### 5.1.3 Erzielte Verbesserungen durch den Bottom-Up Ansatz

In [Abb. 54](#) werden beispielhaft durch den Bottom-Up Ansatz verbesserte Resultate aus den vier Testgebieten dargelegt und kurz diskutiert. Sie geben einen Eindruck über die Verbesserungen. Rot dargestellt sind jeweils die linearen Strukturen, welche mit dem Bottom-Up Ansatz, aber nicht mit dem Top-Down Ansatz, selektiert werden. Die Beispiele für die Testgebiete ZU, WI und SU zeigen jeweils einfachere lineare Strukturen mit zwei Strokes und einer Tiefe von 1, also ein Wurzelknoten und ein Child-Knoten. In allen Beispielen ist die Länge des Wurzel-Knotens kleiner als der Stroke-Längen-Grenzwert. Die Länge des entsprechenden Child-Knotens ist aber grösser. Die Verwendung des Bottom-Up Ansatzes garantiert die Selektion des Child-Knotens und die Konnektivität dessen mit dem Rest des Strassennetzwerkes durch die Selektion des kurzen Wurzel-Knotens. Das Beispiel aus dem Testgebiet EN zeigt eine kompliziertere lineare Struktur mit 4 Strokes und einer Tiefe von 3. Hier wird das volle Ausmass der Problematik des Top-Down Ansatzes illustriert. Der Wurzelknoten ist im Gegensatz zu allen Child-Knoten bedeutend kürzer als der Stroke-Längen-Grenzwert, was zur Folge hat, dass



sämtliche Kind-Knoten nicht selektiert werden, obwohl sie bedeutend länger als der Stroke-Längen-Grenzwert sind, ein relativ grosses Gebiet in den Alpen erschliessen und daher selektiert werden sollten. Der Bottom-Up Ansatz löst dieses Problem elegant.



**Abb. 54: Verbesserte Resultate durch die Verwendung des Bottom-Up Ansatzes**

Rot dargestellt sind durch den Bottom-Up Ansatz erhaltene linearen Strukturen, welche mit dem Top-Down Ansatz nicht selektiert werden. (© swisstopo)

Die erzielten Ergebnisse lassen sich auch quantitativ beziffern. So bewirkt der Bottom-Up Ansatz (bei sonst gleich bleibenden Parametern), dass etwas mehr lineare Segmente selektiert werden. Tab. 14 gibt eine kurze Übersicht über die Veränderungen in den linearen Strukturen für jedes Testgebiet. Ersichtlich ist, dass die Anzahl der linearen Segmente, welche selektiert werden, für alle Testgebiete grösser werden. Über alle Testgebiete werden durchschnittlich ca. 8% mehr lineare Segmente selektiert und die totale Länge steigt um ca. 5% an. Weiter konnte sichergestellt werden, dass einige Segmente, welche bevorzugt selektiert werden sollten (Anforderungen 8 bis 10), zusätzlich selektiert werden. Die Menge ist relativ gering. Es gilt aber zu beachten, dass die totale Anzahl an bevorzugten Segmenten in linearen Strukturen verhältnismässig klein ist. So weisen die ungeneralisierten Testgebiete ZU, WT, SU und EN insgesamt nur 12, 52, 57 respektive 77 bevorzugte Segmente in linearen Strukturen auf. Die Segmente, welche zwingend selektiert werden müssen (Anforderungen 1 bis 4), sind selten lineare Segmente und wenn, dann meistens in verhältnismässig geringen Tiefen der Baumhierarchie. Der Bottom-Up Ansatz hat für die vier Testgebiete dieser Arbeit keinen Einfluss auf die Selektion dieser Segmente. Theoretisch könnte es aber sein, dass andere Testgebiete durchaus solche Segmente in grösseren Tiefen der Baumhierarchie aufweisen.

**Tab. 14: Veränderungen in den linearen Strukturen durch die Anwendung des Bottom-Up Ansatzes**

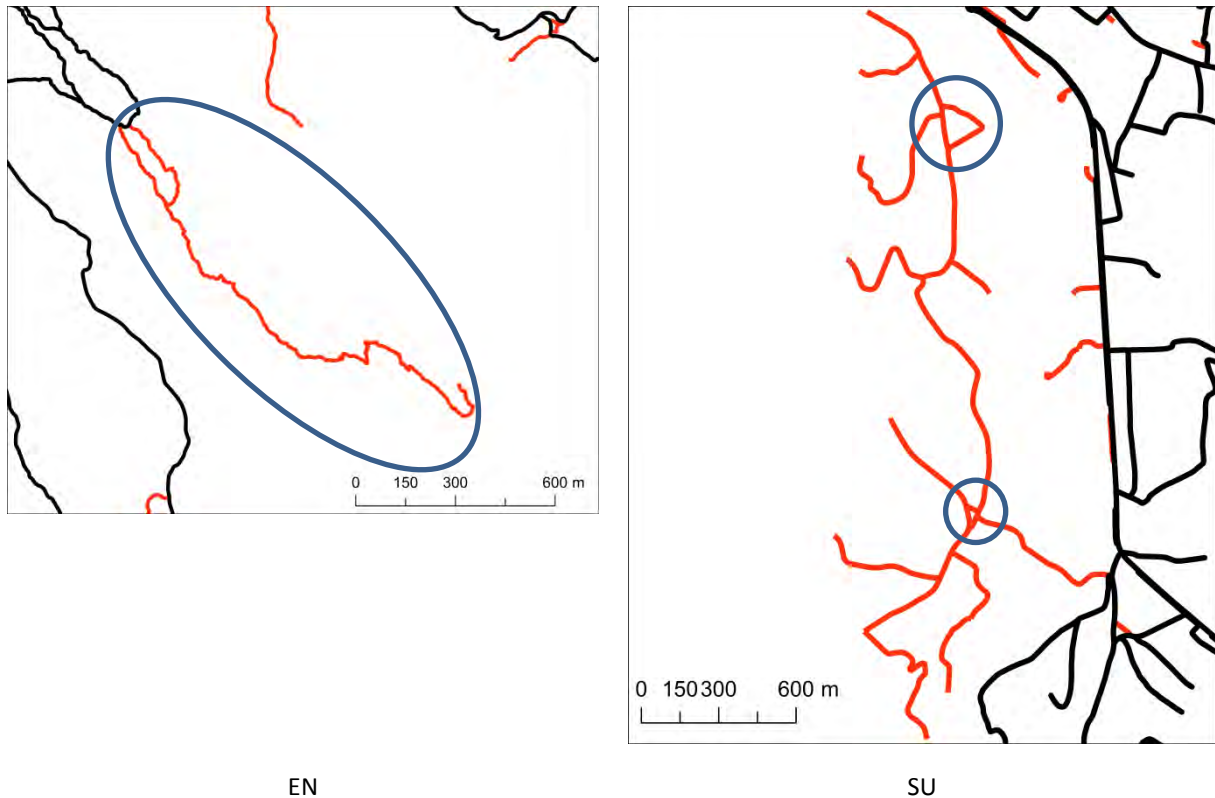
Kennzahlen für lineare Segmente und Strukturen des Top-Down (TD) Ansatzes werden denjenigen des Bottom-Up (BU) Ansatzes gegenübergestellt. Der Bottom-Up Ansatz bewirkt, dass eine grössere Menge linearer Segmente selektiert wird und zusätzliche bevorzugte Segmente selektiert werden.

Testgebiet-Ansatz	ZU-TD	ZU-BU	WT-TD	WT-BU	SU-TD	SU-BU	EN-TD	EN-BU
Anzahl lineare Segmente	170	187	557	597	581	618	473	511
Länge lineare Segmente [m]	42'321	44'215	177'105	186'067	147'259	152'738	204'129	214'181
Anzahl bevorzugte Segmente	166	167	482	483	250	253	538	545

## 5.2 Lineare Hierarchien an dichten Maschen

### 5.2.1 Problematik bei linearen Hierarchien an dichten Maschen

Li und Zhou (2012) traversieren lineare Strukturen nur, wenn diese nach dem ersten Schritt des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (Ausdünnung der Maschen) noch über eine Flächenbrücke mit einem Flächensegment verbunden sind. Andernfalls werden sie nicht weiter betrachtet und daher auch nicht selektiert. Diese Herangehensweise weist ähnliche Probleme auf, wie der in Abschnitt 5.1 diskutierte Top-Down Ansatz. So kann es sein, dass ein langer Stroke oder ein Stroke, welcher zwingend oder bevorzugt selektiert werden muss, in einer linearen Struktur auftritt, welche nach dem ersten Schritt des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes nicht mehr über eine Flächenbrücke mit dem Strassennetzwerk verbunden ist. Die Missachtung solcher linearer Strukturen führt zu unbefriedigenden Resultaten, wovon zwei Beispiele in Abb. 55 dargestellt sind. Schwarz dargestellt sind die Ergebnisse des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes. Rot dargestellt sind die entfernten Segmente. Das linke Beispiel aus dem Testgebiet EN zeigt eine lineare Struktur mit einem Stroke an einer entfernten Masche (blaue Ellipse). Der Stroke wurde nicht selektiert beziehungsweise erst gar nicht betrachtet, weil er an eine Masche grenzt, welche ausgedünnt worden ist. Das rechte Beispiel aus dem Testgebiet SU zeigt ein komplizierteres Beispiel aus linearen Strukturen an zwei dichten und daher ausgedünnten Maschen (blaue Kreise). Auch hier werden die linearen Strukturen nicht selektiert, obwohl sie Strokes beinhalten, welche klar über dem Stroke-Längen-Grenzwert liegen. Diese Herangehensweise schliesst bestimmte lineare Strukturen aus, was konzeptionell problematisch ist, einerseits weil solche Strukturen über dem Stroke-Längen-Grenzwert liegende Strokes aufweisen können, aber auch weil diese Segmente beinhalten können, welche gemäss der Anforderungsanalyse zwingend oder bevorzugt selektiert werden müssen. Das heisst nicht, dass eine Struktur an einer entfernten Masche zwingend selektiert werden muss. Falls eine lineare Struktur an einer dichten und daher ausgedünnten Masche liegt, welche nur sehr kurze Strokes beinhaltet, so ist es legitim, sowohl die Masche als auch die ganze Struktur zu entfernen. Das Problem betrifft also hauptsächlich die langen Strokes in linearen Strukturen, welche über eine ausgedünnte Masche mit dem Strassennetzwerk verbunden sind.



**Abb. 55: Zwei Beispiele von nicht selektierten linearen Strukturen an dichten (nicht erhaltenen) Maschen**

Schwarz dargestellt sind die Resultate aus dem integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz. Rot dargestellt sind die entfernten Segmente. Beide Beispiele zeigen lineare Strukturen, welche entfernt wurden, weil sie über dichte (ausgedünnte) Maschen mit dem Strassennetzwerk verbunden sind. (© swisstopo)

### 5.2.2 Lösung durch Berechnung des kürzesten Pfades

Um lange und zwingend zu selektierende Strokes in linearen Strukturen, welche über eine ausgedünnte Masche mit dem Strassennetzwerk verbunden sind, zu selektieren, sind erneut verschiedene Vorgehensweisen möglich. Die einfachste Variante wäre erneut die über dem Stroke-Längen-Grenzwert liegenden oder die zwingend und bevorzugt zu selektierenden Strokes im Nachhinein einzeln zu selektieren. Das ergibt aber wiederum das Problem, dass diese Strokes dann nicht mehr mit dem Hauptnetzwerk verbunden sind und dadurch die Anforderungen 5 bis 7 verletzen. Eine weitere Möglichkeit wäre, die „Problemmaschen“, über welche lineare Strukturen mit den zu selektierenden Strokes verbunden sind, im ersten Schritt des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes nicht auszudünnen, sondern komplett zu erhalten und dann gemäss dem Bottom-Up Ansatz aus Abschnitt 5.1 fortfahren. Dies widerspricht aber zu einem gewissen Grad dem Prinzip des Maschen-Ansatzes, nämlich dass sehr dichte Maschen aufgelöst werden sollten, weil sie im Zielmasstab von blossen Auge nicht mehr gut erkennbar sind. Aus diesen Gründen wurde ein anderer Ansatz verfolgt.

Der Ansatz folgt dem Prinzip des kürzesten Pfades in einem Graphen. Der kürzeste Pfad in einem Graphen zwischen zwei Knoten ist ein Pfad, bei dem die Summe der Gewichte (oder Kosten) der betroffenen Kanten minimal ist (Goodrich et al. 2004). Weil in dieser Arbeit der Graph das Strassennetzwerk repräsentiert, entspricht das Gewicht einer Kante der effektiven Länge des abgebildeten Strassensegmentes. Deshalb entspricht der kürzeste Pfad im Graphen auch dem real kürzesten Pfad im Strassennetzwerk. Die Verwendung von kürzesten Pfaden ist in der GIScience und insbesondere auch in der Generalisierung von Strassennetzwerken weit verbreitet (Richardson und Thompson 1996, Reynes 1997, van Kreveld und Peschier 1998, Touya 2010).

Es gibt diverse Algorithmen, welche kürzeste Pfade in einem Graphen extrahieren können. Bekannte Algorithmen sind unter anderem der Bellman-Ford Algorithmus, welcher sogar funktioniert, wenn die Kanten negative Gewichte haben, der Algorithmus von Dijkstra, der Floyd-Warshall Algorithmus, der Algorithmus von Johnson oder der A\*-Algorithmus. Gallo und Pallottino (1988) und Cherkassky et al. (1996) geben einen umfassenden Überblick über diese und weitere Algorithmen.

### 5.2.2.1 A\*-Algorithmus

Der Algorithmus, welcher in dieser Arbeit verwendet wurde, ist der A\*-Algorithmus und wird deshalb etwas ausführlicher beschrieben. Das erste Mal vorgestellt wurde er von Hart et al. (1968). Der A\*-Algorithmus findet den kürzesten Pfad zwischen zwei Knoten (Start- und Zielknoten) mit positiven Kanten-Gewichten. Sehr gut beschrieben ist er auch in Wikipedia (2013b).

Der A\*-Algorithmus hat den Vorteil, dass er eine Schätzfunktion, auch Heuristik  $h(x)$  genannt, verwendet um die Laufzeit zu optimieren, beziehungsweise denjenigen Knoten als nächstes untersucht, welcher *wahrscheinlich* am schnellsten zum Ziel führt. Um diesen Knoten zu ermitteln, wird eine Funktion  $f(x)$  folgendermassen definiert:

$$f(x) = g(x) + h(x) \tag{5}$$

wobei  $x$  ein Knoten ist,  $g(x)$  die bisherigen Kosten vom Startknoten zu  $x$  und  $h(x)$  die geschätzten Kosten (Heuristik) von  $x$  bis zum Zielknoten. Die Heuristik kann unterschiedlich implementiert sein, darf die Kosten aber nicht überschätzen. Die Heuristik, welche in dieser Arbeit verwendet wurde, ist die euklidische Distanz, also die Luftlinie zwischen dem Knoten  $x$  und dem Zielknoten. Andere Heuristiken wären aber auch vorstellbar. Der Knoten mit dem niedrigsten  $f$ -Wert ist dann der Knoten, welcher wahrscheinlich am schnellsten zum Ziel führt und deshalb als nächstes traversiert wird.

Abb. 56 zeigt ein UML Aktivitätsdiagramm des implementierten A\*-Algorithmus. Die Implementierung basiert auf einer Einteilung der Knoten in verschiedene Klassen (Tab. 15), die in entsprechenden Datenstrukturen verwaltet werden.

**Tab. 15: Klassierung der Knoten im A\*-Algorithmus**

Die Knoten werden in drei verschiedene Klassen eingeteilt und mittels drei verschiedenen Datenstrukturen verwaltet.

Klasse	Betroffene Knoten	Datenstruktur
Unbekannte Knoten	Knoten, welche während der Suche noch nicht gefunden wurden. Jeder Knoten, abgesehen vom Startknoten, ist am Anfang unbekannt.	Hashed Map
Bekannte Knoten	Knoten, zu denen ein (allenfalls suboptimaler Weg) bekannt ist. Die Knoten und ihr $f$ -Wert werden in der <i>openList</i> gespeichert.	Heap-basierter Priority Queue
Abgeschlossene Knoten	Knoten, zu denen der kürzeste Weg bekannt ist. Die Knoten werden in der <i>closedList</i> gespeichert, damit sie nicht mehrfach untersucht werden.	Hashed Set

Zusätzlich zu den drei Klassen und deren Verwaltung in den Datenstrukturen hat jeder Knoten einen Zeiger auf seinen Vorgängerknoten. Ist der Algorithmus am Zielknoten angekommen, kann der Pfad mit Hilfe dieses Zeigers rekonstruiert werden.

Der Algorithmus fügt als erstes den Startknoten in die *openList* ein. Er ist der erste bekannte Knoten. Zu Beginn ist der Startknoten der einzige Knoten in der *openList*. Später muss dies aber nicht zwingend der Fall sein. In einem nächsten Schritt wird der Knoten in die *closedList* eingefügt und expandiert. Bei der Expansion eines Knotens wird für jeden Nachbarknoten geprüft, ob er bereits in der *closedList* ist. Ist dies der Fall, so wird der Knoten nicht weiter behandelt. Er ist bereits abschliessend untersucht worden. Ist der Nachbarknoten bereits in der *openList*, so wird der Knoten, respektive der  $f$ -Wert und sein Zeiger auf den Vorgängerknoten, nur dann

aktualisiert, wenn der neue Weg dorthin kürzer ist. Falls der Nachbarsknoten weder auf der *openList*, noch auf der *closedList* ist, wird er und sein *f*-Wert in die *openList* eingefügt. Nachdem der Knoten abschliessend expandiert worden ist, wird dasselbe Prozedere mit dem optimalsten Knoten aus der *openList* wiederholt, solange bis entweder der Zielknoten gefunden wurde und der Pfad mit Hilfe des Zeigers zurückverfolgt werden kann oder aber die *openList* leer ist und somit alle Knoten abschliessend untersucht wurden, dabei aber kein Pfad gefunden wurde.

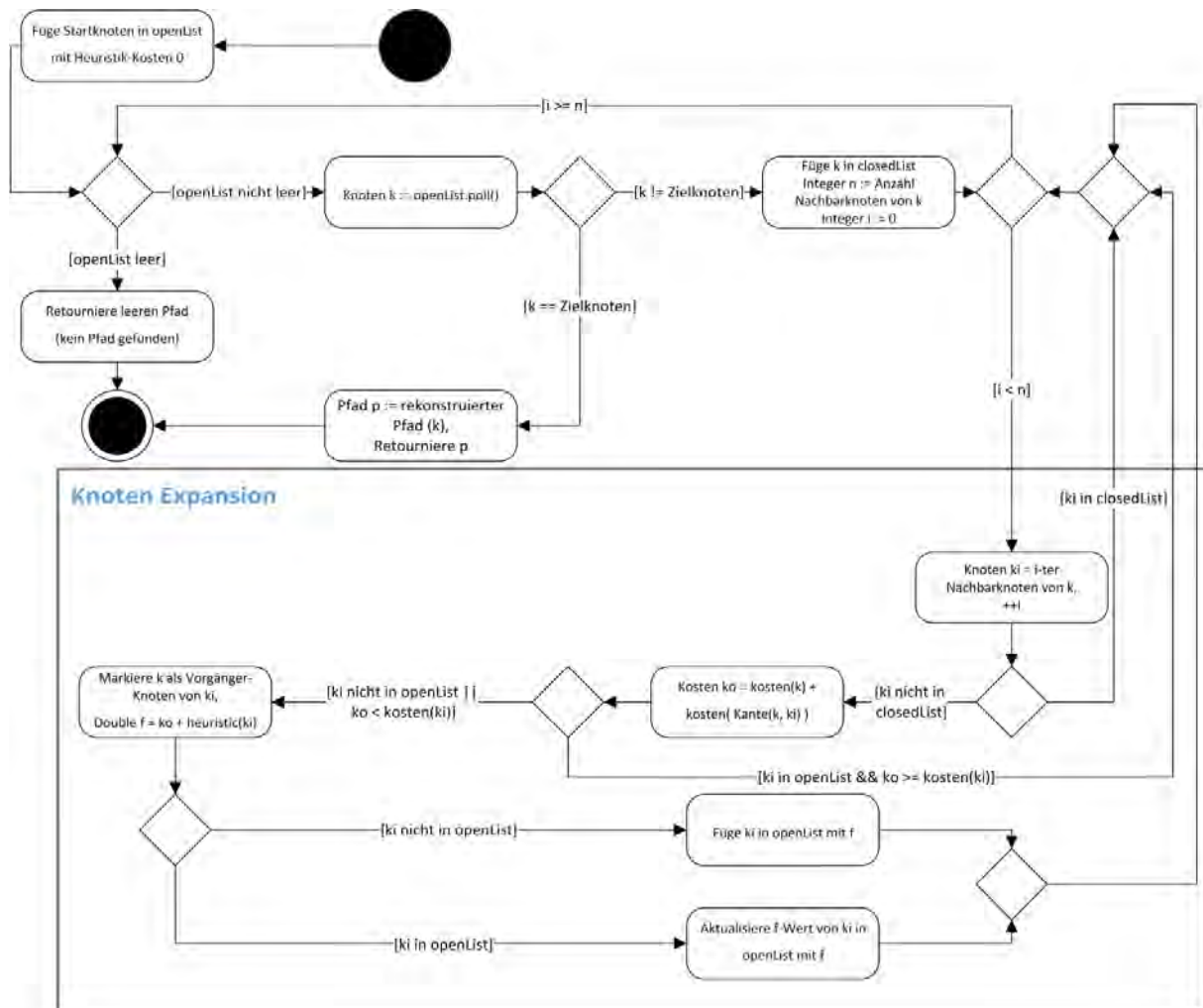


Abb. 56: UML Aktivitätsdiagramm des A\*-Algorithmus' von Hart et al. (1968)

Der Algorithmus optimiert die Laufzeit durch die Verwendung einer Heuristik, welche die Kosten vom aktuellen Knoten bis zum Zielknoten schätzt.

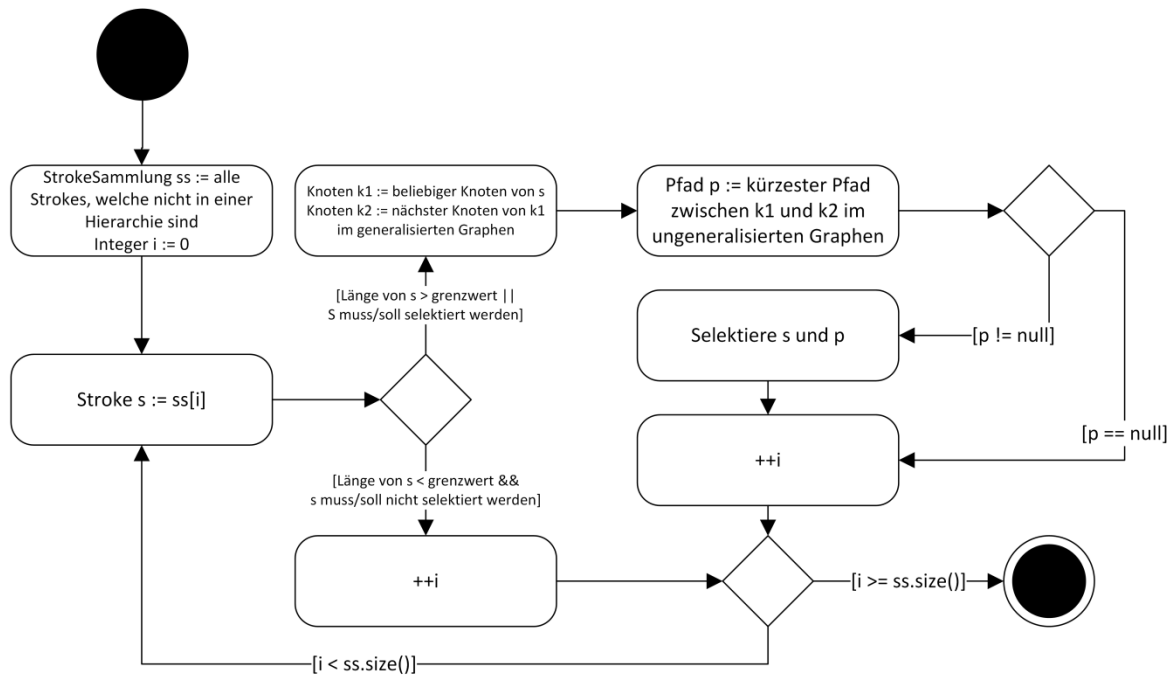
Der grosse Vorteil des A\*-Algorithmus ist, dass immer derjenige Knoten in der *openList* als nächstes untersucht und expandiert wird, welcher gemäss dem *f*-Wert die kleinsten Kosten aufweist. Der Algorithmus arbeitet zielgerichtet und die Laufzeit kann dadurch optimiert werden.

### 5.2.2.2 Verbindung der linearen Hierarchien ins Netzwerk durch einen Stroke-Reconnection-Algorithmus

Es stellt sich nun die Frage, wie und weshalb ein kürzester Pfad verwendet werden kann um das in Abschnitt 5.2.1 diskutierte Problem zu beheben. Der gewählte Ansatz funktioniert folgendermassen:

Im ungeneralisierten Graphen (das vollständige Strassennetzwerk) wird der kürzeste Pfad gesucht, und zwar zwischen einem beliebigen Knoten innerhalb des zu selektierenden Strokes und dem Knoten im bereits (durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz) generalisierten Graphen, welcher die kleinste

euklidische Distanz zum Knoten des Strokes hat. Dieser Pfad, sowie der zu selektierende Stroke, werden dann selektiert. Diese Herangehensweise garantiert einerseits die Selektion des zu selektierenden Strokes, andererseits aber auch eine Verbindung mit dem Strassennetzwerk. Die Wahl des kürzesten Pfades liegt darin begründet, dass es das Ziel sein sollte, möglichst wenige weitere Segmente (beziehungsweise eine möglichst geringe Länge an zusätzlichen Segmenten) zu selektieren. Dies liegt darin begründet, dass alle Segmente, welche, abgesehen von den Segmenten des zu selektierenden Strokes, zusätzlich selektiert werden müssen, eigentlich bereits durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz entfernt wurden. Der kürzeste Pfad kann garantieren, dass der Stroke über den kürzesten Weg wieder an das Strassennetzwerk angeschlossen wird. **Abb. 57** illustriert den Ansatz schematisch in einem UML Aktivitätsdiagramm. In einem ersten Schritt werden alle Strokes gesammelt, welche nicht in einer linearen Baumhierarchie vorhanden sind. Für jeden dieser Strokes wird dann geprüft, ob er selektiert werden muss (also entweder länger als der Stroke-Längen-Grenzwert ist oder aufgrund seiner Attribute selektiert werden muss oder sollte). Ist dies nicht der Fall, kann mit dem nächsten Stroke fortgefahren werden. Andernfalls wird zwischen einem beliebigen Knoten des Strokes und dem am nächsten gelegenen Knoten im generalisierten Graphen der kürzeste Pfad im ungeneralisierten Strassennetzwerk berechnet. Falls ein Pfad existiert, werden der Pfad und der Stroke selektiert. Andernfalls handelt es sich um einen Stroke, welcher isoliert vorliegt, also gar nicht mit dem Strassennetzwerk verbunden werden kann. Dieser Fall wird ausführlich in Abschnitt 5.3 diskutiert.



**Abb. 57: UML Aktivitätsdiagramm des Stroke-Reconnection-Algorithmus**

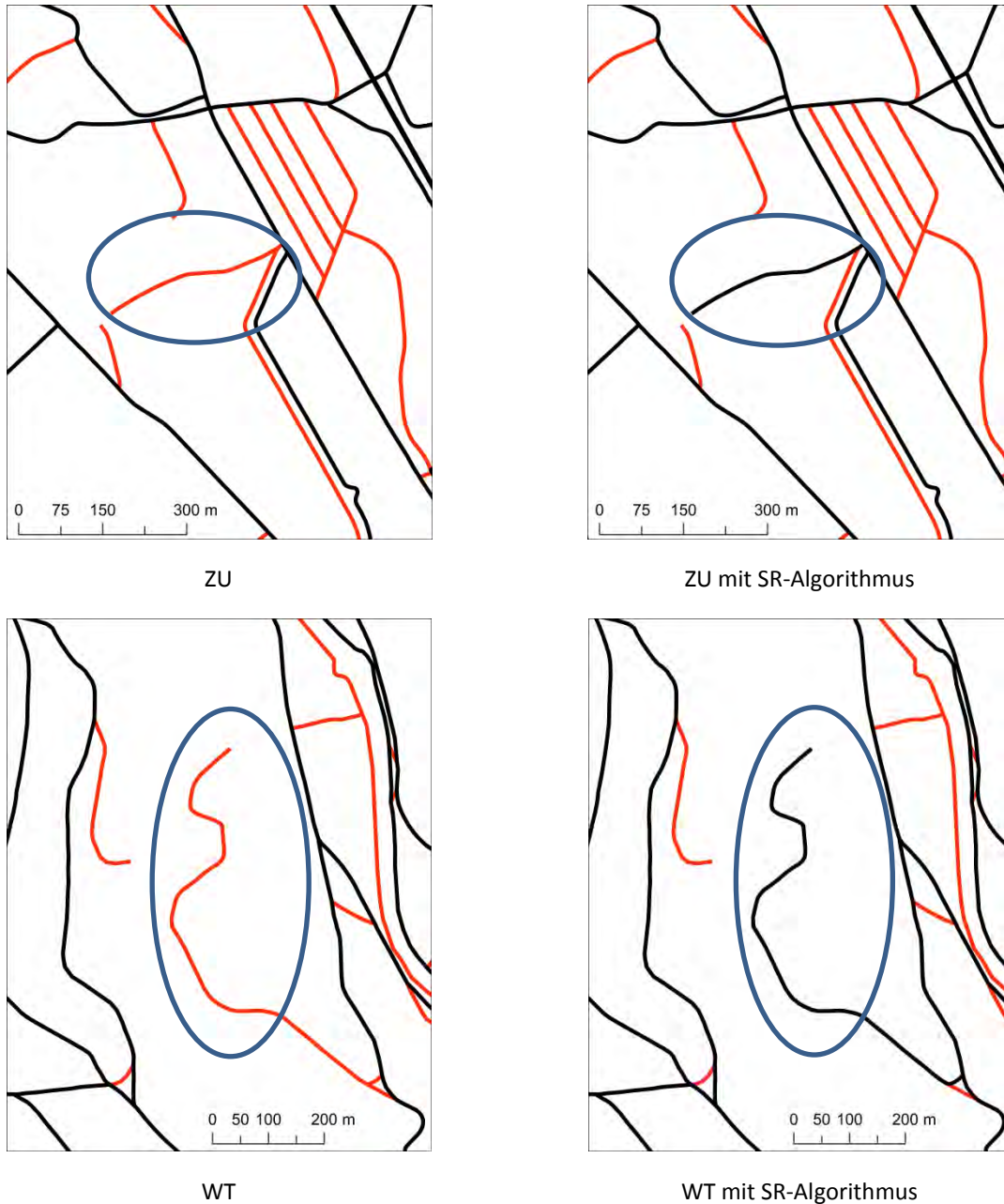
Der Algorithmus iteriert durch alle Strokes, welche nicht Teil einer linearen Baumhierarchie sind und selektiert sie und den kürzesten Pfad zurück ins Strassennetzwerk, sofern der Stroke aufgrund seiner Länge oder seiner Attribute selektiert werden muss oder sollte.

### 5.2.3 Erzielte Ergebnisse durch den Stroke-Reconnection-Algorithmus

**Abb. 58** und **Abb. 59** zeigen beispielhaft Ergebnisse des Stroke-Reconnection-Algorithmus für die vier Testgebiete. Auf der linken Seite sind jeweils die Resultate ohne und rechts die Resultate mit der Verwendung des SR-Algorithmus dargestellt. Rot symbolisiert sind die entfernten Strassensegmente. In den blauen Ellipsen sind jeweils die betroffenen Strokes dargestellt. Das Beispiel für ZU zeigt einen Stroke an einer ausgedünnten Masche, die hauptsächlich durch zwei lange parallele Strassen begrenzt ist. Der lange Stroke wird durch den SR-Algorithmus aber trotzdem selektiert. Ein ähnliches Beispiel ist für das Testgebiet WT ersichtlich. Ein mehrere 100 m langer Stroke grenzt an eine kleine und dichte Masche, welche ausgedünnt wurde. Der SR-Algorithmus



selektiert den Stroke aber trotzdem und verbindet ihn wieder mit dem Strassennetzwerk, indem ein Segment der ehemals ausgedünnten Masche wieder selektiert wird. Gut ersichtlich ist hier auch ein kleiner Nebeneffekt. Und zwar wird ein Segment, welches ehemals ein Flächensegment war (und daher eine Masche begrenzt hat) im Rahmen der Anwendung des SR-Algorithmus zu einem linearen Segment, weil es von nun an keine Masche mehr begrenzt. Problematisch ist dieser Effekt aber nicht, weil es zu keinem Strassenunterbruch kommt und daher auch keine der Anforderungen 5 bis 7 verletzt werden.

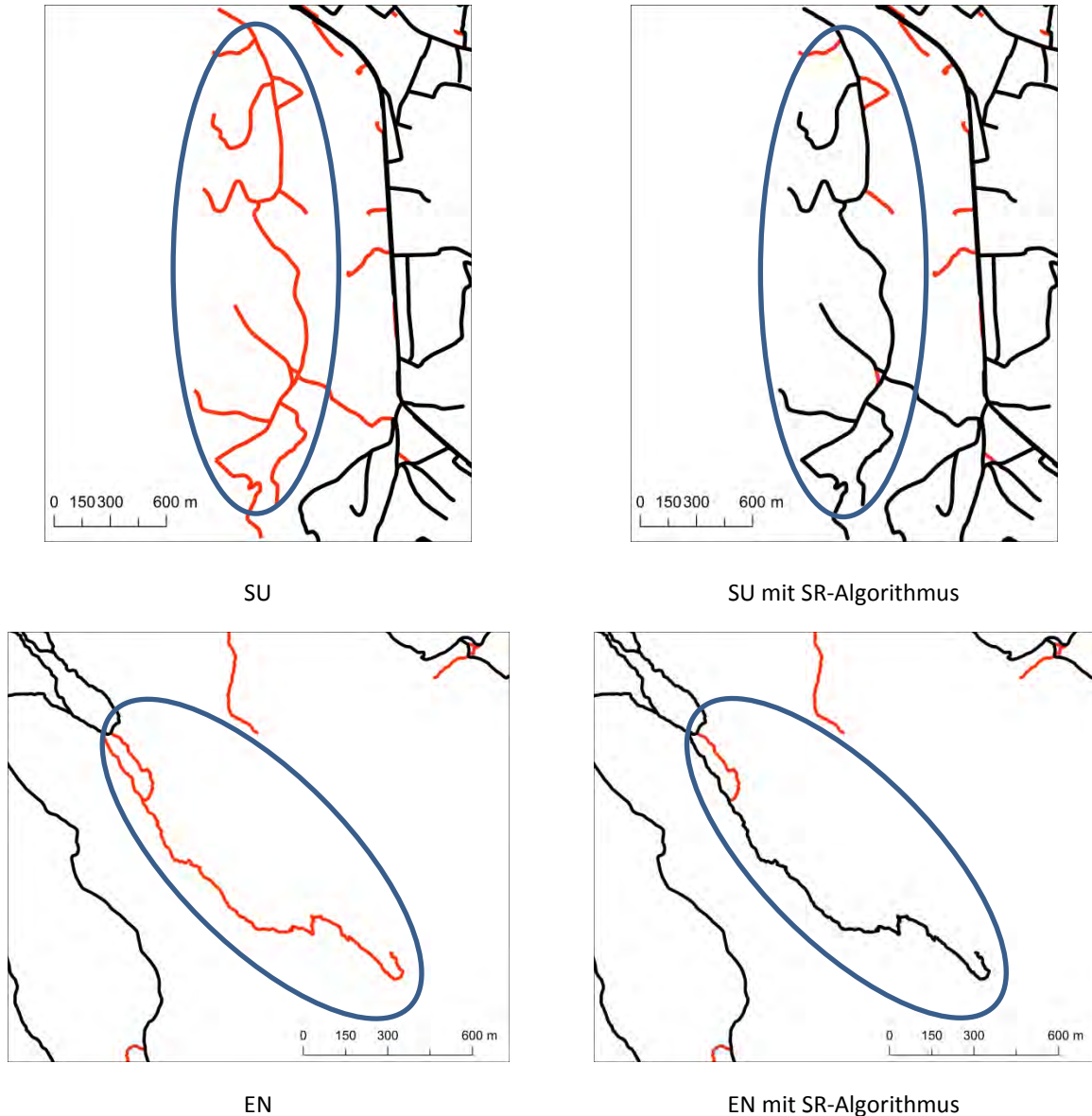


**Abb. 58: Beispiele der durch den SR-Algorithmus erzielten Verbesserungen (1)**

Links dargestellt ist das Resultat ohne den SR-Algorithmus und rechts das Resultat mit dem SR-Algorithmus. Rot dargestellt sind die entfernten Segmente. Die Ellipsen zeigen die durch den SR-Algorithmus betroffenen Strokes. (© swisstopo)

Das Beispiel für das Testgebiet SU zeigt eine komplexere Situation. Zwei dichte Maschen (eine im Norden und eine im Süden) sind mit mehreren linearen Strukturen verbunden. Sämtliche lineare Strukturen werden ohne die Verwendung des SR-Algorithmus entfernt, wohingegen die Verwendung des SR-Algorithmus sämtliche über dem Stroke-Längen-Grenzwert liegenden Strokes selektiert und mit dem Strassennetzwerk verbindet. Die

betroffenen Maschen hingegen werden sauber ausgedünnt. Für das Testgebiet EN ist der Effekt des SR-Algorithmus besonders stark, weil es in diesem Testgebiet im Verhältnis zur totalen Anzahl Segmente besonders viele *weit* über dem Stroke-Längen-Grenzwert liegende Strokes gibt, welche an dichte Maschen grenzen. Das Beispiel in *Abb. 59* zeigt einen Stroke an einer dichten und daher ausgedünnten Masche mit einer Länge von insgesamt 1871 m. Der SR-Algorithmus garantiert auch hier eine Selektion des Strokes und eine korrekte Verbindung ins Strassennetzwerk.



**Abb. 59: Beispiele der durch den SR-Algorithmus erzielten Verbesserungen (2)**

Links dargestellt ist das Resultat ohne den SR-Algorithmus und rechts das Resultat mit dem SR-Algorithmus. Rot symbolisiert sind die entfernten Segmente. Die Ellipsen zeigen die durch den SR-Algorithmus betroffenen Strokes. (© swisstopo)

Die erzielten Effekte des SR-Algorithmus lassen sich auch quantitativ beurteilen. *Tab. 16* zeigt einzelne Kennzahlen der durch den SR-Algorithmus erzielten Resultate und vergleicht sie mit den Resultaten, bei denen der SR-Algorithmus nicht angewandt wurde. Im Testgebiet ZU wurden am wenigsten zusätzliche Strokes (21) selektiert. Dies liegt darin begründet, dass das Testgebiet ZU in Relation zu den anderen Testgebieten eher klein ist und zusätzlich auch ein stark überbautes Gebiet repräsentiert, bei dem grosse lineare Strukturen eher selten vorkommen. In den anderen drei Testgebieten (WT, SU und EN) ist die Anzahl durch den SR-Algorithmus

selektieren Strokes grösser, einerseits begründet durch die Grösse des Testgebietes selbst (WT) und andererseits durch den ländlicheren Charakter der Testgebiete (SU und EN), bei denen grössere lineare Strukturen mit langen Strokes an dichten Maschen häufiger vorkommen. Eine Konsequenz der Selektion zusätzlicher Strokes ist, dass eine grössere Anzahl linearer Segmente selektiert wird und sich daher auch die Gesamtlänge der linearen Segmente vergrössert. Hier spielt auch der Effekt, dass ehemalige Flächensegmente nun lineare Segmente sind, weil sie im Rahmen der Herstellung der Verbindung des betroffenen Strokes zum Strassennetzwerk selektiert werden. Weiter kann der SR-Algorithmus in allen vier Testgebieten sicherstellen, dass weitere Segmente, welche selektiert werden sollten, auch effektiv selektiert werden. Diese Segmente befinden sich alle in linearen Strukturen, welche über eine dichte (ausgedünnte) Masche mit dem Strassennetzwerk verbunden sind.

**Tab. 16: Veränderungen in den linearen Strukturen durch die Anwendung des SR-Algorithmus**

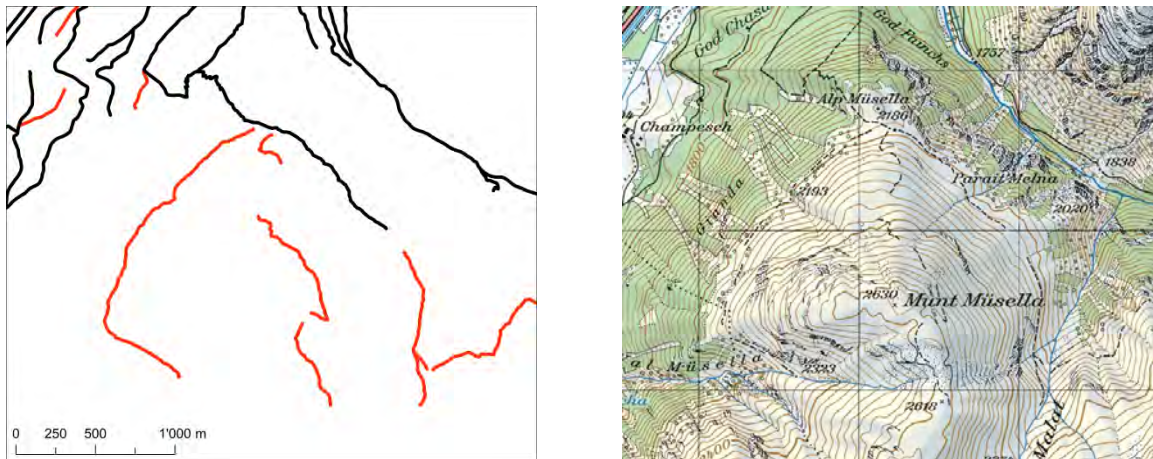
Die Tabelle stellt einzelne Kennzahlen bei Anwendung des SR-Algorithmus (SR) den Resultaten gegenüber, welche ihn nicht verwenden. Als Grundlage dient der in Abschnitt 5.1 diskutierte Bottom-Up Ansatz, welcher beiden Varianten zugrunde liegt. Der SR-Algorithmus bewirkt, dass in allen Testgebieten zusätzliche Strokes selektiert werden. Daraus erklärt sich auch die grössere Anzahl an linearen und bevorzugten Segmenten.

Testgebiet-Ansatz	ZU	ZU-SR	WT	WT-SR	SU	SU-SR	EN	EN-SR
Anzahl zusätzliche Strokes	-	21	-	64	-	54	-	49
Anzahl lineare Segmente	187	256	597	794	618	782	511	684
Länge lineare Segmente [m]	44'215	55'818	186'067	227'815	152'738	186'641	214'181	275'521
Anzahl bevorzugte Segmente	167	171	483	496	253	262	545	561

## 5.3 Behandlung von isolierten Strokes

### 5.3.1 Problem der Ignorierung von isolierten Segmenten

In der Literatur wird oft das Konzept vertreten, dass ein generalisiertes Strassennetzwerk eine vollständige Konnektivität aufweisen muss (Average Connectivity von 1) (z.B. Thomson und Brooks 2000, Chaudhry und Mackaness 2005, Li und Zhou 2012). So garantiert auch der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von Li und Zhou (2012), dass das Generalisierungsergebnis vollständig verbunden ist, sofern es keine Masche gibt, welche isoliert vorliegt, also nicht mit dem Rest des Strassennetzwerkes verbunden ist. Dieses Prinzip ist auch für diese Arbeit gültig, in diesem Sinne, wie es die Anforderung 7 aus der Anforderungsanalyse darlegt. Gibt es in der räumlichen Datenbank aber Segmente, welche bereits in der Ausgangslage nicht mit dem Rest des Strassennetzwerkes verbunden sind, so verstösst es gegen keine Anforderungen, wenn man solche Segmente selektiert. Abb. 60 zeigt links ein Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes aus dem Testgebiet EN. Der Ausschnitt zeigt diverse Segmente, welche aufgrund ihrer Isolation nicht selektiert wurden. Rechts dargestellt ist der entsprechende Ausschnitt der Landeskarte 1:50'000 von swisstopo. Dort ist gut ersichtlich, dass auch isolierte Segmente selektiert wurden. Generalisierte Strassennetzwerke von swisstopo für den Zielmasstab von 1:50'000 müssen also nicht zwingend eine vollständige Konnektivität aufweisen. Es dürfen auch isolierte Segmente für den Zielmasstab selektiert werden.



**Abb. 60: Isolierte Strokes**

Links zu sehen ist das Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet EN (rot symbolisiert sind die entfernten Segmente). Das Resultat weist diverse entfernte Strokes auf, welche isoliert vorliegen. Rechts dargestellt ist ein Ausschnitt aus der Landeskarte 1:50'000 von swisstopo bei dem auch isolierte Segmente dargestellt sind. Bei der Interpretation ist etwas Vorsicht geboten, weil dem Ausschnitt der Landeskarte eine leicht andere Datengrundlage zugrunde liegt. (© swisstopo), *Quelle Karte*: map.geo.admin.ch, Zugriff: 14.08.2013.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass es für das Testgebiet EN Segmente gibt, welche zwingend selektiert werden müssen (Tab. 3), mit dem integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz aber nicht selektiert werden (siehe auch Tab. 13). Das sind Segmente, welche isoliert vorliegen (konkret sind es Tunnel-Abschnitte). Weiter gibt es diverse isolierte Segmente, welche selektiert werden sollten (Tab. 4), durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz aber nicht beachtet werden. Meist sind es kleine Brücken, welche über Flüsse führen. Aufgrund dieser Tatsachen macht es Sinn, wenn isolierte Segmente ebenfalls behandelt werden.

### 5.3.2 Selektion isolierter Segmente

Isolierte Segmente sind meist lineare Segmente. Isolierte Flächensegmente (also Maschen, welche nicht mit dem Rest des Strassennetzwerkes verbunden sind) sind in den vier Testgebieten sehr selten und werden bereits durch den ersten Schritt im integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz behandelt. Isolierte lineare Segmente hingegen werden nicht behandelt und bedürfen deshalb einer gesonderten Behandlung.

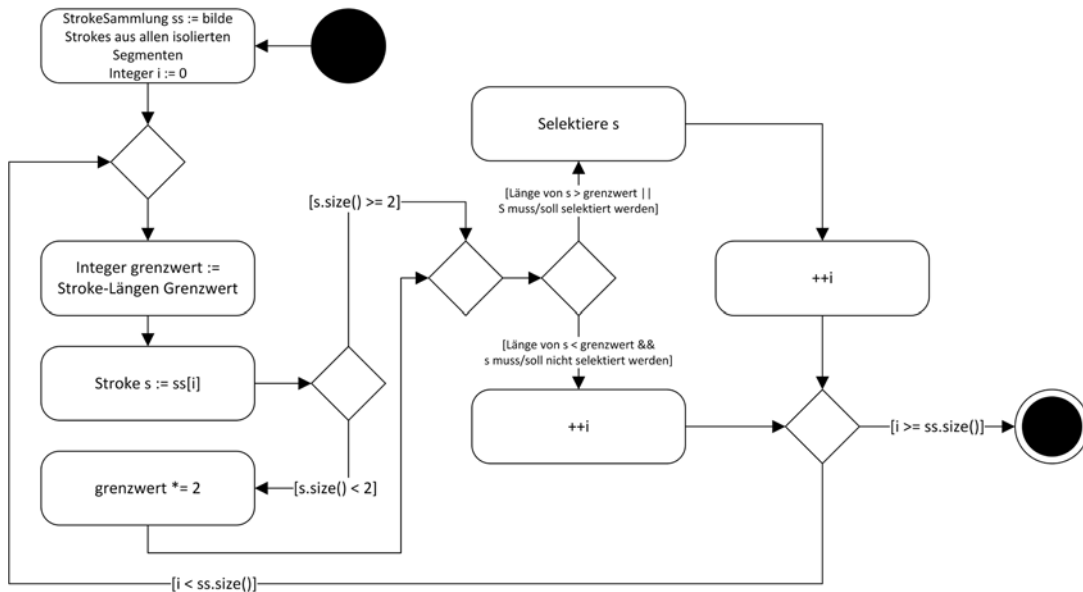
#### 5.3.2.1 Selektionskriterien

Die einfachste Variante wäre erneut, isolierte Segmente einzeln zu selektieren, sofern es entsprechende Gründe dazu gibt, wie beispielsweise eine gewisse Länge oder entsprechende Attribute, welche eine Selektion notwendig machen. Li und Zhou (2012) haben gezeigt, dass der Stroke-Ansatz insbesondere für lineare Strukturen gute Resultate hervorbringt. Deshalb macht es Sinn, dass auch isolierte lineare Strukturen mit Hilfe des Stroke-Ansatzes behandelt werden.

Der Ansatz, welcher für diese Arbeit verwendet wurde, ist im UML Aktivitätsdiagramm in Abb. 61 ersichtlich. Andere (ähnliche) Ansätze wären aber auch denkbar. In einem ersten Schritt werden aus den isolierten Segmenten Strokes gebildet. Diese bilden die Basis für die Selektion. Um zu entscheiden ob ein Stroke selektiert werden soll, wird der in Abschnitt 4.6.5.2 beschriebene Stroke-Längen-Grenzwert und die Attributzugehörigkeit der im Stroke enthaltenen Segmente verwendet. Enthält der Stroke Segmente, welche selektiert werden müssen oder sollen, wird er selektiert, andernfalls entfernt. Eine weitere spezielle Massnahme wurde getätigt um die Selektion isolierter Segmente etwas konservativer zu gestalten. Besteht ein Stroke aus nur einem isolierten Segment, so muss dieses Segment doppelt so lang sein wie der Stroke-Längen Grenzwert oder ein Attribut aufweisen, welches eine Selektion notwendig macht, damit er effektiv selektiert wird. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass einzelne isolierte Segmente eine höhere Hürde nehmen müssen, damit sie selektiert werden. Die Überlegung dahinter ist, dass isolierte Segmente für die Struktur und



Konnektivität des generalisierten Strassennetzwerkes eine weniger grosse Rolle spielen und daher etwas behutsamer selektiert werden.

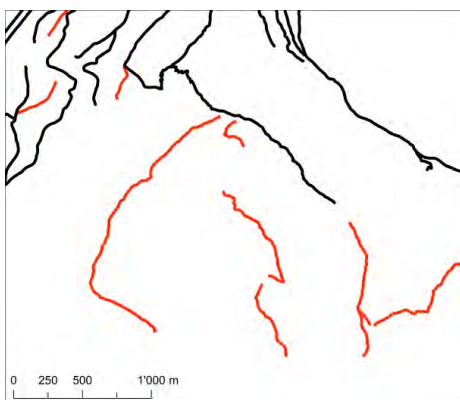


**Abb. 61: UML Aktivitätsdiagramm für die Behandlung isolierter Strokes**

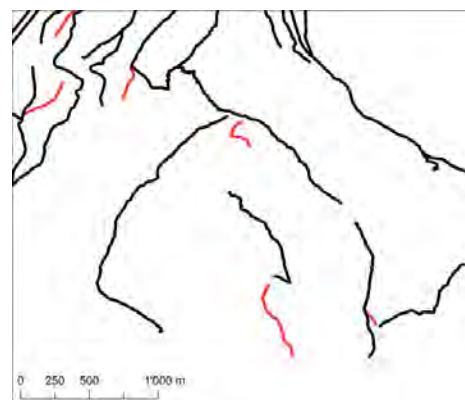
Als Basis werden aus den isolierten Segmenten Strokes gebildet. Diese werden selektiert, sofern sie über dem Stroke-Längen-Grenzwert liegen oder entsprechende Attribute aufweisen. Besteht ein Stroke aus nur einem einzelnen isolierten Segment und weist kein Attribut auf, welches eine Selektion rechtfertigt, so muss dieses für eine Selektion doppelt so lang sein wie der Stroke-Längen-Grenzwert.

### 5.3.3 Erzielte Verbesserungen durch die Behandlung isolierter Strokes

Abb. 62 zeigt die durch die Behandlung isolierter Strokes veränderten Ergebnisse in einem Ausschnitt des Testgebiet EN bei sonst gleich bleibenden Parametern und mit den Erweiterungen, welche in Abschnitt 5.1 und 5.2 vorgestellt wurden. Gut ersichtlich wird, wie nun isolierte Strokes ebenfalls selektiert werden. Die Veränderungen sind in Relation zu den anderen Testgebieten vor allem für das Testgebiet EN gross, weil hier mit Abstand am meisten isolierte Segmente auftreten.



Keine Behandlung isolierter Strokes



Behandlung isolierter Strokes

**Abb. 62: Vergleich der Resultate ohne und mit Behandlung isolierter Strokes**

Links dargestellt ist das Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für einen Ausschnitt des Testgebiets EN ohne Behandlung isolierter Strokes. Rechts gegenübergestellt ist das Resultat mit Behandlung isolierter Strokes gemäss dem vorgestellten Ansatz in Abschnitt 5.3.2. Rot dargestellt sind die jeweils entfernten Segmente. (© swisstopo)

Tab. 17 zeigt die quantitativen Veränderungen in den linearen Strukturen. Das Testgebiet ZU weist keine Veränderungen auf. Die Begründung liegt darin, dass kein einziger isolierter Stroke selektiert wurde. Auch das Testgebiet WT weist nur sehr kleine Veränderungen auf. Insgesamt wurden drei isolierte Strokes selektiert. Das Testgebiet SU selektiert fünf isolierte Strokes, wobei hier aber auch fünf zusätzliche bevorzugte Segmente selektiert werden. Die grössten Veränderungen weist das Testgebiet EN auf. 45 isolierte Strokes werden selektiert, wobei drei zwingend zu selektierende Segmente nun auch effektiv selektiert werden. Somit werden nun auch für das Testgebiet EN alle 445 Segmente, welche zwingend selektiert werden müssen, selektiert. Weiter können zusätzliche 31 bevorzugte Segmente selektiert werden. Eine Folge der Selektion isolierter Strokes ist, dass das Strassennetzwerk als Ganzes nicht mehr verbunden ist. Ersichtlich ist das auch in der Average Connectivity. Während sie für das Testgebiet ZU bei 1 bleibt (vollständige Konnektivität), sinkt sie bei den anderen drei Testgebieten leicht. Der grösste Unterschied ist für das Testgebiet EN vorzuweisen, weil hier verhältnismässig besonders viel isolierte Strokes selektiert werden.

**Tab. 17: Veränderungen in den linearen Strukturen durch die Behandlung isolierter Strokes**

Die Tabelle stellt Kennzahlen der Resultate bei der Behandlung von isolierten Strokes (IS) den Resultaten gegenüber, welche ihn nicht verwenden. Als Grundlage dient der in Abschnitt 5.1 diskutierte Bottom-Up Ansatz und der in Abschnitt 5.2 erwähnte SR-Algorithmus, welcher beiden Varianten zugrunde liegt. Die Behandlung von Strokes bewirkt, dass in allen Testgebieten (abgesehen von ZU) zusätzliche Strokes selektiert werden. Zusätzlich bewirkt die Behandlung von isolierten Strokes, dass im Testgebiet EN drei zwingend zu selektierende Segmente selektiert werden. Weiter werden für die Testgebiete SU und EN weitere bevorzugte Segmente selektiert.

Testgebiet-Ansatz	ZU	ZU-IS	WT	WT-IS	SU	SU-IS	EN	EN-IS
Anzahl zusätzliche Strokes	-	0	-	3	-	5	-	45
Anzahl lineare Segmente	256	256	794	803	782	789	684	744
Länge lineare Segmente [m]	55'818	55'818	227'815	229'433	186'641	186'988	275'521	324'869
Anzahl nicht entfernbare Segmente	588	588	1'665	1'665	684	684	442	445
Anzahl bevorzugte Segmente	171	171	496	496	262	267	561	591
Average Connectivity	1.0	1.0	1.0	0.9987	1	0.9964	1.0	0.9643

Insgesamt sind die Veränderungen, vor allem auch im Vergleich zu den in Abschnitt 5.1 und 5.2 diskutierten Resultaten, eher klein. Nichtsdestotrotz ist es ein Ansatz, der isolierte Segmente elegant mit einem bewährten Algorithmus (Stroke-Ansatz) behandelt. Im Falle des Testgebiet EN ist er sogar notwendig, weil zwingend zu selektierende Segmente in isolierten Strokes vorkommen. Weiter kann das Ergebnis durch die zusätzliche Selektion von bevorzugten Segmenten verbessert werden. Der Effekt ist umso grösser, je mehr isolierte Segmente vorliegen, was in Gebirgsregionen besonders häufig ist.

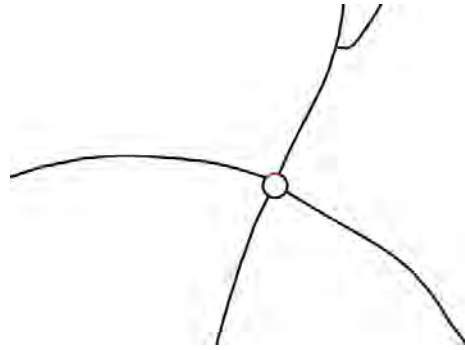
## 5.4 Korrupte Kreisel

### 5.4.1 Auflösung von Kreiseln

Ein Kreisel, oder auch Kreisverkehr genannt, wird im Duden online definiert als besonders geregelter, kreisförmiger Verkehr um einen Platz herum (duden 2013). Kreisel sind hauptsächlich in europäischen Strassennetzwerken verbreitet und sind auch in jedem der vier Testgebiete vorzufinden.

Kreisel stellen ein spezifisches Problem dar, einerseits für den Maschen-Ansatz und andererseits für den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz, der den Maschen-Ansatz verwendet. Die beiden Ansätze führen zu unerwünschten Resultaten in Form von korrupten Kreiseln. Abb. 63 zeigt ein Beispiel aus dem Testgebiet ZU. Es kommt aber in allen Testgebieten systematisch vor. Einzelne Segmente der Kreisel (rot markiert) werden entfernt und die Kreisel sind nicht mehr als vollständige Objekte vorhanden, sondern nur noch als korrupte Bruchstücke.





**Abb. 63: Korrupter Kresel**

Ausschnitt des Testgebietes ZU mit einem korrupten Kreseln (das rote Segmente wurde entfernt). (© swisstopo)

Solche Resultate sind für den Zielmassstab von 1:50'000 aber unerwünscht. Die Landeskarte 1:50'000 von swisstopo stellt Kresel immer noch als ganze und vollständige Objekte dar. **Abb. 64** zeigt einen Ausschnitt aus der Landeskarte 1:50'000 von swisstopo mit einem vollständig dargestellten Kresel.



**Abb. 64: Kresel auf der Landeskarte 1:50'000**

Quelle: <http://map.geo.admin.ch/>, Zugriff: 07.05.2013.

Das Problem der korrupten Kreseln wird weder von [Chen et al. \(2009\)](#), noch von [Li und Zhou \(2012\)](#) erwähnt. Dies könnte darin begründet liegen, dass ihre Testgebiete keine Kresel beinhalteten. Das Problem ist aber zumindest für die vier Testgebiete in dieser Arbeit systematisch. Das Phänomen ist darin begründet, dass Kresel sehr hohe Maschendichten aufweisen. **Tab. 18** zeigt für jedes Testgebiet die mittlere Maschendichte der Kresel und die mittlere Maschendichte aller Maschen. Die Mann Whitney U Statistik zeigt stark signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Die hohe Maschendichte der Kresel hat zur Folge, dass Kresel, respektive einzelne Segmente davon, durch den Maschen-Ansatz entfernt werden und mit Nachbarmaschen zu weniger dichten Maschen fusioniert werden. Die Folge davon sind korrupte Kresel, wie sie in **Abb. 63** dargestellt sind.

**Tab. 18: Vergleich der Maschendichten von Kreseln und den restlichen Maschen**

Die Tabelle zeigt für jedes der vier Testgebiete die mittlere Maschendichte einerseits der Kresel und andererseits aller Maschen. Die Mann Whitney U Statistik, welche die Mittelwerte der beiden Klassen vergleicht, und der dazugehörige p-Wert weisen auf stark signifikante Unterschiede.

Testgebiet	Mittlere Maschendichte Kresel	Mittlere Maschendichte ganzes Testgebiet	Mann Whitney U Statistik	p-Wert
ZU	0.2868	0.0875	5192.0	< 0.001
WT	0.2997	0.0627	10469.0	< 0.001
SU	0.2977	0.0743	4127.5	< 0.001
EN	0.2682	0.0631	974.0	< 0.001

#### 5.4.2 Kresel-Korrektur Algorithmus

Um die Entstehung von korrupten Kreseln zu verhindern gibt es prinzipiell zwei Herangehensweisen. Entweder behandelt man Maschen, die von Kreseln gebildet werden, im ersten Schritt des integrierten Stroke-Maschen

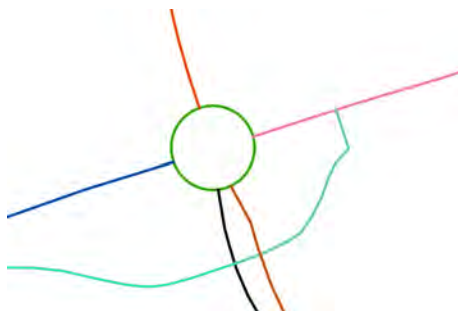
Kombinationsansatz nicht, in dem man sie ignoriert, oder man korrigiert sie anschliessend wieder, indem man die Segmente, die bei korrupten Kreiseln entfernt wurden, wieder einfügt. Der erste Ansatz ist konzeptionell aber problematisch. Er schliesst die vollständige Eliminierung eines Kreisels aus. So kann es aber sein, dass eine vollständige Eliminierung eines Kreisels aufgrund der Struktur des Strassennetzwerkes im unmittelbaren Umfeld des Kreisels (viele dichte Nachbarmaschen) durchaus sinnvoll ist. Aufgrund dieser Überlegung wurde die zweite Herangehensweise gewählt.

Um korrupte Kreisel wieder zu korrigieren, müssen die Kreisel zuerst als solche aus dem Strassennetzwerk extrahiert werden. Dieser Schritt wäre auch notwendig, wenn die erste Herangehensweise gewählt würde. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder sind die Segmente, welche die Kreisel formen, als solche in den Attributen in der räumlichen Datenbank vermerkt oder man extrahiert sie aus der räumlichen Struktur des Strassennetzwerkes. Weil entsprechende Attribute nicht immer in allen räumlichen Datenbanken vorhanden sind und um eine Verallgemeinerbarkeit zu garantieren, wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher die Kreisel aus der Struktur des Strassennetzwerkes extrahiert.

In der Fachliteratur gibt es einige Ansätze, welche komplexe Kreuzungen (darin eingeschlossen auch Kreisel) extrahieren. [Mackaness und Mackechnie \(1999\)](#) definieren komplexe Kreuzungen basierend auf der Abbildung des Strassennetzwerkes auf einen normalen Graphen. Eine relativ dichte Sammlung von Knoten in diesem Graphen, wobei jeder dieser Knoten einen Grad von mindestens drei aufweist, ist dann ein Kandidat für eine komplexe Kreuzung. Die Sammlungen dichter Knoten und die dazugehörigen Kanten werden dann mit Hilfe eines Cluster-Algorithmus extrahiert. Auch [Yang et al. \(2011\)](#) verwenden einen Cluster-Algorithmus zur Detektion von komplexen Strassenkreuzungen und insbesondere auch Kreiseln, nämlich einen erweiterten DBSCAN-Algorithmus. Beide Methoden sind aber ungeeignet, weil sie neben Kreiseln auch diverse weitere komplexere Kreuzungen extrahieren, welche hier gar nicht notwendig sind. [Heinzle et al. \(2007\)](#) behandeln Kreisel insofern, als dass sie Strokes, welche in einen Kreisel münden, im Schwerpunkt des Kreisels künstlich zusammenführen. Allerdings erläutern sie nicht weiter mit welcher Methodik sie die Kreisel explizit extrahieren. [Touya \(2010\)](#) detektiert Kreisel mit Hilfe eines Kompaktheitsmasses, welches für die Maschen des Strassennetzwerkes gerechnet wird. Sehr kompakte Maschen sind dann Kandidaten für Kreisel. In dieser Arbeit wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher als Basis keine Clustering-Mechanismen verwendet, sondern Strokes. Er besteht einerseits aus der Detektion von Kreiseln im Strassennetzwerk und andererseits aus der korrekten Wiederherstellung von korrupten Kreiseln.

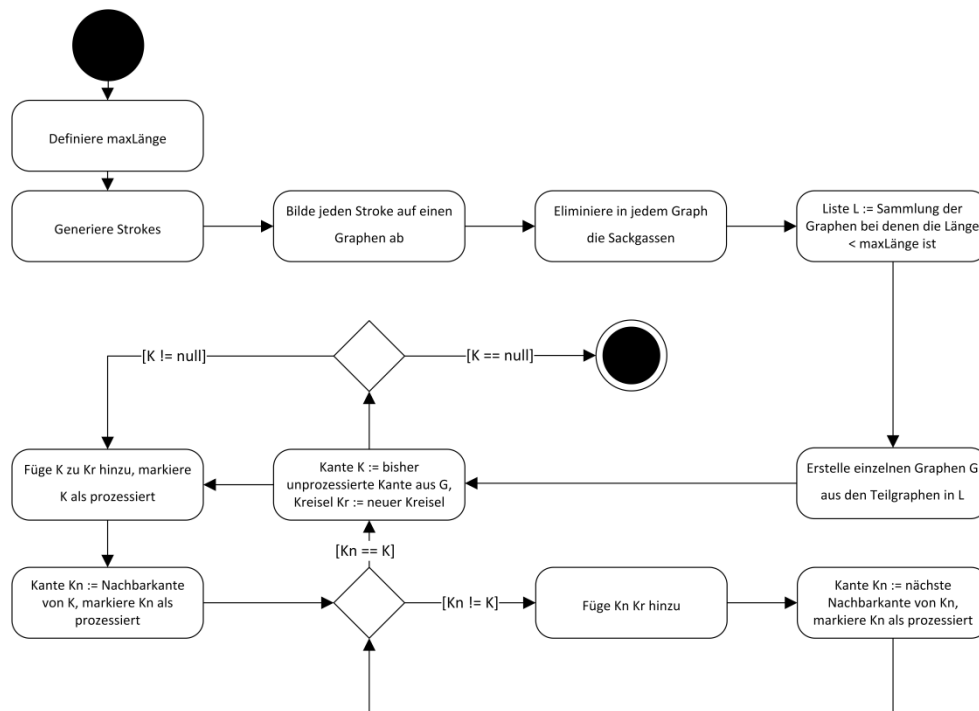
#### 5.4.2.1 Detektion von Kreiseln

Der Algorithmus macht sich zur Hilfe, dass Kreisel einzelne und zirkuläre Strokes bilden. [Abb. 65](#) zeigt ein typisches Beispiel eines Kreisels und den einfallenden Strassen. Unterschiedlich gefärbt sind die abgeleiteten Strokes. Der Kreisel bildet einen einzelnen und zirkulären Stroke. Dies ist dadurch begründet, dass die einfallenden Strassen mit dem Kreisel einen relativ grossen Winkel bilden (ca. 90°) und daher nicht verkettet werden. Die einzelnen Segmente des Kreisels jedoch bilden flache Abbiegungswinkel, weshalb sie zu einem einzelnen und zirkulären Stroke verkettet werden. Der Detektions-Algorithmus bedient sich dieses Phänomens. [Abb. 66](#) zeigt das UML Diagramm des Algorithmus.



**Abb. 65: Stroke-Bildung bei Kreiseln und einfallenden Strassen**

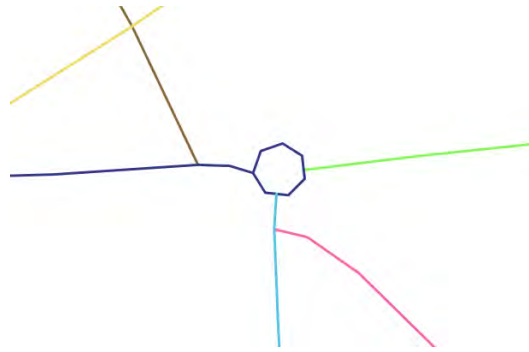
Unterschiedlich gefärbt sind die Strokes, wobei der Kreisel einen zirkulären Stroke bildet. (© swisstopo)



**Abb. 66: UML-Aktivitätsdiagramm des Kreisel Detektions-Algorithmus**

Die Detektion von Kreiseln basiert auf der Generierung von Strokes und der anschliessenden Extrahierung von zirkulären Loops innerhalb dieser Strokes.

In einem ersten Schritt werden Strokes generiert. Hierbei wird aber ein rein geometrischer Ansatz gewählt, bei dem die Attribute die Verkettung nicht beeinflussen. Dies stellt sicher, dass auch diejenigen Segmente zu Strokes verkettet werden, welche die kleinsten Abbiegungswinkel haben (die Segmente der Kreisel). Diese dienen als Ausgangslage um sich des Phänomens, abgebildet in [Abb. 65](#), zu bedienen. Anschliessend werden alle Strokes auf separate Graphen abgebildet. In diesen werden alle Sackgassen entfernt (solange im Graphen Knoten mit Grad 1 vorhanden sind, kann man die betreffende Kante am Knoten, sowie den Knoten selbst entfernen). Dies führt dazu, dass die Graphen, respektive Strokes, welche keinen zirkulären Loop beinhalten, gelöscht werden. Prinzipiell wäre es auch möglich, dass man Graphen, welche einen Knoten mit Grad 1 haben, gar nicht weiter betrachtet, da diese intuitiv keinen zirkulären Stroke und damit auch keinen Kreisel bilden. Es gibt aber Situationen, die vor allem bei schlecht digitalisierten Kreiseln auftauchen, bei denen die Entfernung von Sackgassen notwendig ist. [Abb. 67](#) zeigt eine Situation bei der eine einfallende Strasse zusammen mit dem Kreisel einen Stroke bildet. Solche Situationen bedingen, dass man die Sackgasse im Stroke (die einfallende Strasse) entfernt, damit nur der Kreisel extrahiert wird. Als zusätzliche Bedingung werden diejenigen Strokes, bei der die Gesamtlänge einen gewissen Grenzwert überschreitet, ebenfalls entfernt, damit Strokes, welche einen grösseren Loop und dadurch keinen Kreisel bilden, nicht als potentieller Kreisel extrahiert werden. Diese Situation ist selten, kommt aber vor. Für die Testgebiete in dieser Arbeit erwies sich ein Grenzwert von 90 m als sinnvoll.



**Abb. 67: Schlecht digitalisierter Kreis und einfallender Stroke**

Diese Situation zeigt einen schlecht digitalisierten Kreis, wodurch der Kreis alleine keinen einzelnen Stroke bildet. Die im Westen des Kreises einfallende Strasse wird mit dem Segment des Kreises ebenfalls verkettet. Die Folge ist ein Stroke mit einem zirkulären Loop *und* einer einfallenden Strasse. (© swisstopo)

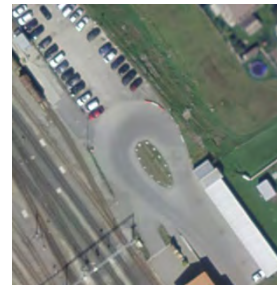
In einem nächsten Schritt wird ein neuer Graph aus allen Teilgraphen (welche jetzt nur noch die Kreise beinhalten) erstellt. Dieser bildet die Grundlage für die effektive Extrahierung einzelner Kreise. Prinzipiell wäre es aber auch möglich, die einzelnen Teilgraphen weiter zu prozessieren, welche effektiv schon die Kreise modellieren. Aus software-design-spezifischen Gründen und um die Kreise in eine geordnete Datenstruktur zu überführen (bei der die Kreis-Segmente geordnet sind) wurde aber ein Ansatz verfolgt, bei dem die einzelnen Teilgraphen in einem neuen Graphen zusammengefasst werden. Die Überführung in eine Kreis-Datenstruktur erfolgt dann folgendermassen: Solange noch nicht alle Kanten prozessiert wurden, sind noch nicht alle Kreise extrahiert. Daher erstellt man einen neuen Kreis mit einer bisher nicht prozessierten Kante. Als nächste Kante wird diejenige Kante eingefügt, welche eine direkte Nachbarkante ist. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis man wieder bei der Ausgangs-Kante ist. Dann ist der Kreis effektiv extrahiert und in einer geordneten Datenstruktur gespeichert. Dieser Prozess wird nun solange wiederholt bis alle Kanten prozessiert wurden. Dieser Detektions-Algorithmus entdeckt sämtliche Kreise in allen vier Testgebieten. Insgesamt wurden 92 Kreise detektiert. Eine detaillierte Übersicht gibt [Tab. 19](#).

**Tab. 19: Detektierte Kreise**

Anzahl der durch den Kreis-Detektions-Algorithmus detektierten Kreise in den vier Testgebieten.

Testgebiet	Anzahl detektierte Kreise
ZU	24
WT	29
SU	25
EN	14

Allerdings gibt es auch ein extrahiertes Objekt im Testgebiet EN, welches nicht ein Kreis im klassischen Sinne ist. [Abb. 68](#) zeigt das Phänomen. Die falsche Detektion ist aber nicht weiter hinderlich, wenn man den eigentlichen Zweck betrachtet, nämlich die Korrektur von korrupten Kreisen. Sollte nämlich ein Segment des Objektes durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinations-Ansatz selektiert werden, macht es jetzt in diesem Fall durchaus Sinn auch das zweite Segment nachträglich wieder einzufügen.

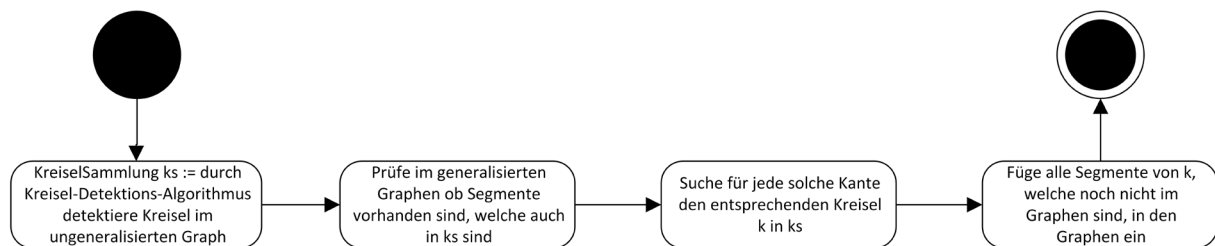


**Abb. 68: Falsch detektierter Kreisel**

Im linken Bild ist der falsch detektierte Kreisel ersichtlich (rot eingefärbt). Im rechten Bild ist die entsprechende Situation auf dem Luftbild. (© swisstopo), *Quelle Luftbild:* <http://map.geo.admin.ch/>, Zugriff: 08.05.2013.

### 5.4.2.2 Wiederherstellung von korrupten Kreiseln

Der Algorithmus zur Wiederherstellung von Kreiseln ist relativ trivial (Abb. 69). Zuerst werden sämtliche Kreisel im ungeneralisierten Strassennetzwerk mit dem Kreisels-Detektions-Algorithmus extrahiert. Anschliessend wird für alle Kanten im generalisierten Graphen geprüft, ob sie auch in den extrahierten Kreiseln enthalten sind. Ist eine solche Kante gefunden, so gehört sie zu einem Kreisel, welcher möglicherweise korrupt ist. Daher wird für jedes Segment im entsprechenden extrahierten Kreisel aus dem ungeneralisierten Graph geprüft, ob es auch im generalisierten Graphen vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall, so werden die Segmente nachträglich eingeführt und der Kreisel damit wieder hergestellt.



**Abb. 69: UML Aktivitätsdiagramm des Kreisels Wiederherstellungs-Algorithmus**

Der Algorithmus detektiert zuerst alle Kreisels im ungeneralisierten Strassennetzwerk. Anschliessend korrigiert er korrupte Kreisels im generalisierten Graphen, in dem die entsprechenden Kanten wieder eingeführt werden.

## 5.5 Erschliessung von POIs

Die meisten Ansätze zur automatischen Selektion von Strassennetzwerken verwenden als Input nur das Strassennetzwerk selbst. Weitere Input-Daten, in Form von zusätzlichen Feature Klassen, werden selten verwendet. Dies ist insofern schade, als dass solche Feature Klassen weitere Informationen beinhalten können, welche das Selektionsresultat optimieren können. Dieser Abschnitt wendet sich dieser Thematik zu. Insbesondere wird hier auch die Anforderung 15 aus der Anforderungsanalyse genauer betrachtet, nämlich die Sicherstellung der Erschliessung von Bahnhöfen und sonstiger wichtiger Infrastruktur.

### 5.5.1 Definition POI und Datengrundlage

Eine mögliche externe Feature Klasse ist ein Punkt-Layer, welcher sogenannte *Points of Interests* (POIs) beinhaltet.

**Definition POI** Wikipedia (2013a) definiert einen *Point of Interest* (POI) als: „POIs sind Orte, die für den Nutzer einer Karte oder eines Navigationssystems Bedeutung haben könnten.“

Die Bedeutung von POIs ist insofern für Karten oder Navigationssysteme wichtig, als dass sie über das Strassennetzwerk erreichbar sein sollten. Da POIs aber nicht immer an wichtigen Verbindungsstrassen liegen,



sondern durchaus auch etwas abgelegen sein können (z.B. ein touristisches Restaurant in einer Bergregion) kann eine Erschliessung derer mit Hilfe des Strassennetzwerkes alleine nicht zwangsläufig sichergestellt werden. Deshalb ist es sinnvoll, diese in Form einer weiteren Feature Klasse in den Selektionsprozess einzubinden und einen Algorithmus zu entwickeln, welcher die Erschliessung der POIs sicherstellt.

Für diese Arbeit wird u.a. eine Feature Klasse des Vector200 Datensatzes der swisstopo verwendet. Der Vector200 Datensatz ist ein zweidimensionales Landschaftsmodell, welches die natürlichen und künstlichen Objekte der Landschaft in einem hohen Generalisierungsgrad wiedergibt (Massstab 1:200'000) (swisstopo 2013c). Der Vector200 Datensatz umfasst unter anderem auch eine POI Feature Klasse. Tab. 20 gibt über die verschiedenen POIs einen Überblick.

**Tab. 20: POI Feature Klasse des Vector200 Datensatzes**

Beschreibungen der verschiedenen POIs in der Vector200 Feature Klasse. *Quelle:* swisstopo 2013d.

POIs			
Antenne	Höhle	Observatorium	Spital
Bauernhof	Kirche	Pumpwerk	Stadion
Berghütte	Kloster	Regierungsstelle	Thermalbad
Campingplatz	Kraftwerk	Rennbahn	Turm
Denkmal	Leuchtturm	Ruine	Verarbeitungsanlage
Deponie	Museum	Schloss	Vergnügungspark
Friedhof	Nichtchristlicher Platz	Schule	

Neben der POI Feature Klasse des Vector200 Datensatzes wird für diese Arbeit ein weiterer Punkte-Layer verwendet. Es ist eine Ableitung eines Layers des Vector25 Datensatzes von swisstopo. Der Vector25 Datensatz ist ebenfalls ein digitales Landschaftsmodell der Schweiz, welches inhaltlich und geometrisch auf der Landeskarte 1:25'000 basiert (swisstopo 2013e). Der eigentliche Layer umfasst Bahnhöfe, Flughäfen und Flughafenbahnhöfe basierend auf Polygonen. Der verwendete Punktdatensatz ist eine Ableitung dieser Areale. Die resultierenden Punktobjekte werden für diese Arbeit ebenfalls als POI behandelt. Das Ziel ist wiederum die Sicherstellung der Erschliessung dieser Infrastruktur Objekte. Tab. 21 zeigt die Anzahl POIs der einzelnen Testgebiete. Die räumliche Verteilung ist im Anhang A ersichtlich.

**Tab. 21: POIs in den Testgebieten**

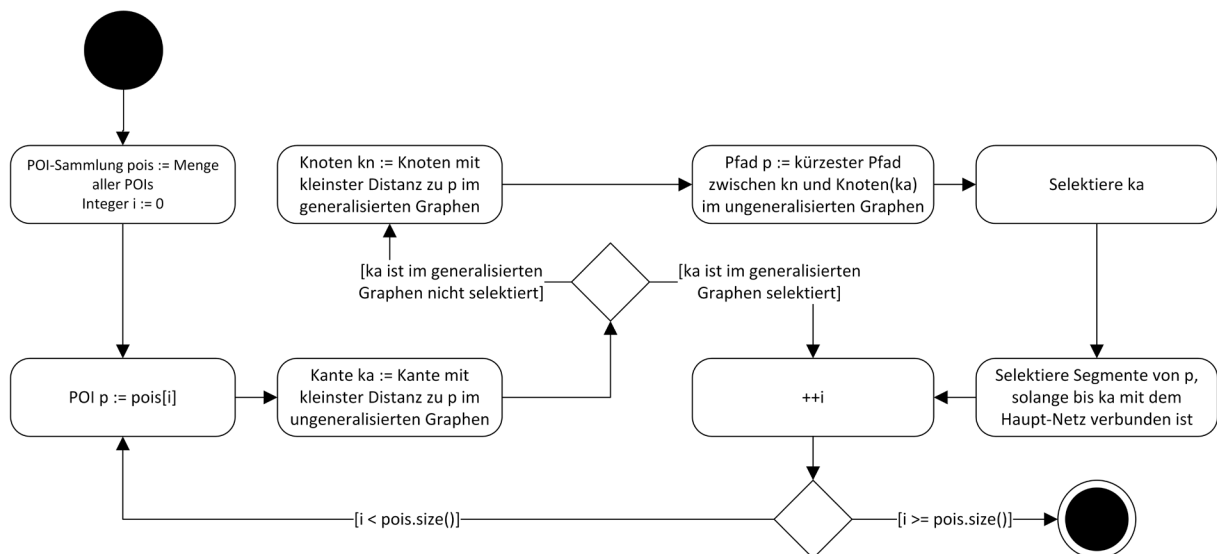
Testgebiet	Anzahl POIs
ZU	21
WT	123
SU	33
EN	60

### 5.5.2 POI Erschliessungs-Algorithmus

Um einen Algorithmus zu entwickeln, welcher die Erschliessung eines POI sicherstellt, muss zuerst definiert werden, was *Erschliessung* bedeutet. Für diese Arbeit ist ein POI bestmöglich erschlossen, falls dasjenige Strassensegment, welches dem POI im ungeneralisierten vollständigen Strassennetzwerk am nächsten liegt, sprich die kleinste euklidische Distanz zum POI aufweist, selektiert ist und nicht isoliert vorliegt, also mit dem Haupt-Strassennetzwerk verbunden ist. Prinzipiell kann es sein, dass der POI nicht wirklich erschlossen ist, weil das nächstgelegene Segment im ungeneralisierten Strassennetzwerk sehr weit vom POI entfernt ist. In diesem Falle ist eine perfekte Erschliessung aber auch gar nicht möglich. Bei der Erschliessung eines POI darf gemäss Anforderungsanalyse auch eine neue Sackgasse entstehen, weil es sich um Zufahrtsstrassen zu wichtiger Infrastruktur handelt.

Der POI Erschliessungs-Algorithmus, welcher für diese Arbeit entwickelt worden ist, ist im UML Aktivitätsdiagramm in Abb. 70 ersichtlich und basiert auf dem Graphen, auf den das Strassennetzwerk abgebildet wird.

Der Algorithmus geht für jeden POI einzeln vor. Er sucht sich im ungeneralisierten Strassennetzwerk diejenige Kante, welche dem POI am nächsten liegt, also die kleinste euklidische Distanz aufweist. Ist diese Kante, respektive das abgebildete Strassensegment, bereits selektiert, so ist der POI erschlossen und es kann mit dem nächsten POI fortgefahren werden. Ist diese Kante nicht selektiert, so extrahiert der Algorithmus denjenigen Knoten im bereits generalisierten Graphen, welcher dem POI am nächsten ist. Dieser Knoten dient als Grundlage für die Erstellung einer Verbindung zwischen der Kante, welche dem POI am nächsten liegt und dem Rest des Strassennetzwerkes. Um die Verbindung zu erstellen, wird der kürzeste Pfad zwischen diesem Knoten und einem der beiden Knoten der dem POI am nächsten gelegenen Kante berechnet. Für die Berechnung des kürzesten Pfades wurde der A\*-Algorithmus verwendet, welcher in Abschnitt 5.2.2.1 vorgestellt wurde. Die Berechnung eines kürzesten Pfades ist insofern sinnvoll, als dass so sichergestellt werden kann, dass möglichst wenige zusätzliche Segmente (beziehungsweise eine möglichst geringe Länge an zusätzlichen Segmenten) wieder selektiert werden müssen um die Erschliessung sicherzustellen. Prinzipiell wäre es aber auch möglich eine andere Vorgehensweise zu wählen, bei der mehr Segmente als für die Erschliessung wirklich notwendig wäre, wieder selektiert werden. Da aber alle Segmente, welche wieder selektiert werden müssen, durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz eigentlich bereits entfernt wurden (und deshalb als relativ unwichtig für den Zielmasstab 1:50'000 interpretiert werden können), macht es Sinn, den kürzesten Pfad zwischen dem Haupt-Strassennetzwerk und der dem POI am nächsten gelegenen Kante zu wählen. Im Idealfall muss nur die dem POI am nächsten gelegene Kante selektiert werden, weil eine Verbindung zwischen der Kante und dem Rest des Strassennetzwerkes bereits gegeben ist, wenn diese Kante selektiert wird. Andernfalls muss die nächste Kante sowie der Pfad selektiert werden, wobei unter Umständen nur die Teile des Pfades effektiv selektiert werden müssen, welche für die Verbindung notwendig sind. Es sind dann die Teile des Pfades, welche die Verbindung mit dem Haupt-Strassennetzwerk sicherstellen. Dieser Fall tritt auf, wenn der Knoten mit der kleinsten euklidischen Distanz zum POI im bereits generalisierten Graphen nicht der Knoten ist, welcher dem POI topologisch am nächsten ist.

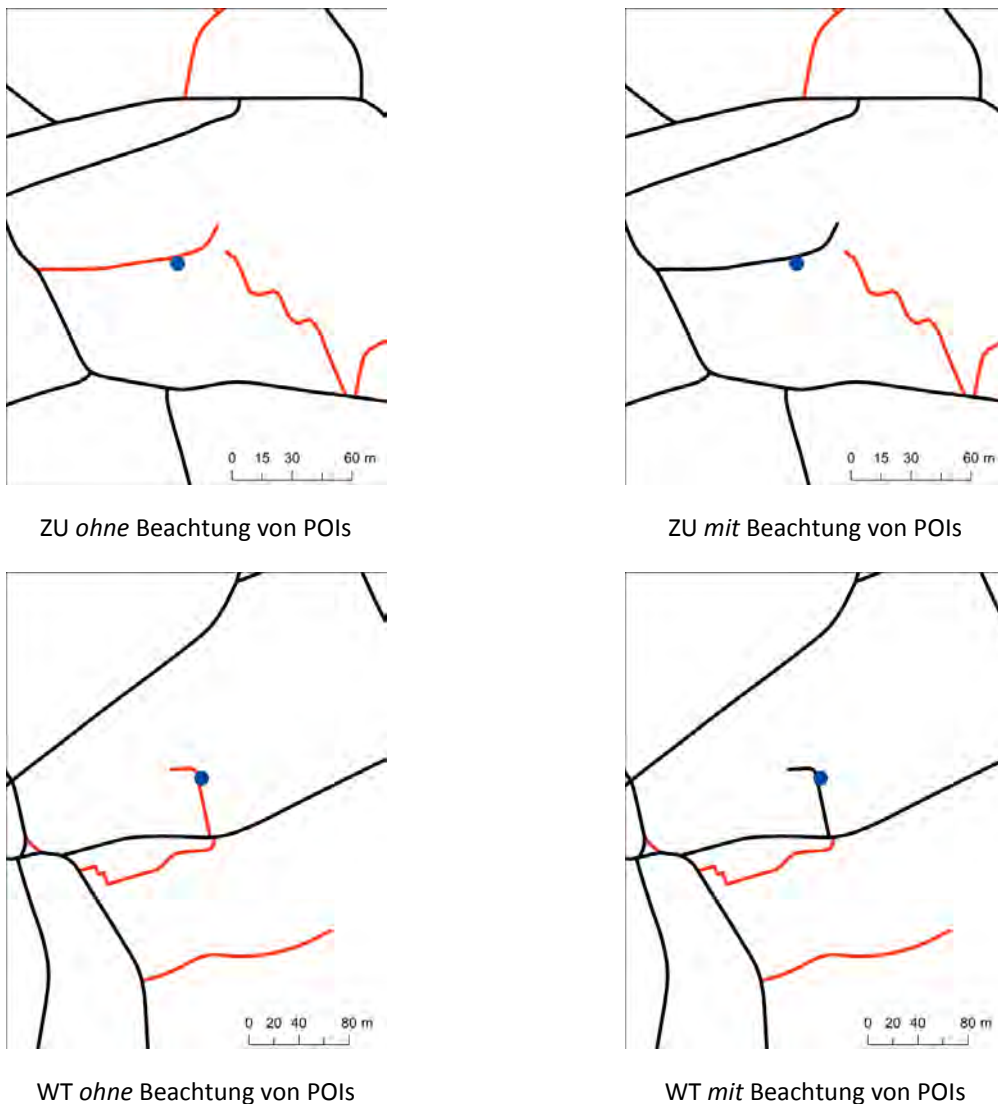


**Abb. 70: POI Erschliessungs-Algorithmus**

Der Algorithmus sucht für jeden POI den kürzesten Pfad zwischen der dem POI am nächsten gelegenen Kante im ungeneralisierten Graph und dem Knoten im bereits generalisierten Graphen mit der kleinsten euklidischen Distanz zum POI. Dieser Pfad, sowie die dem POI am nächsten gelegene Kante werden dann selektiert, sofern die Kante im generalisierten Graphen nicht bereits selektiert war.

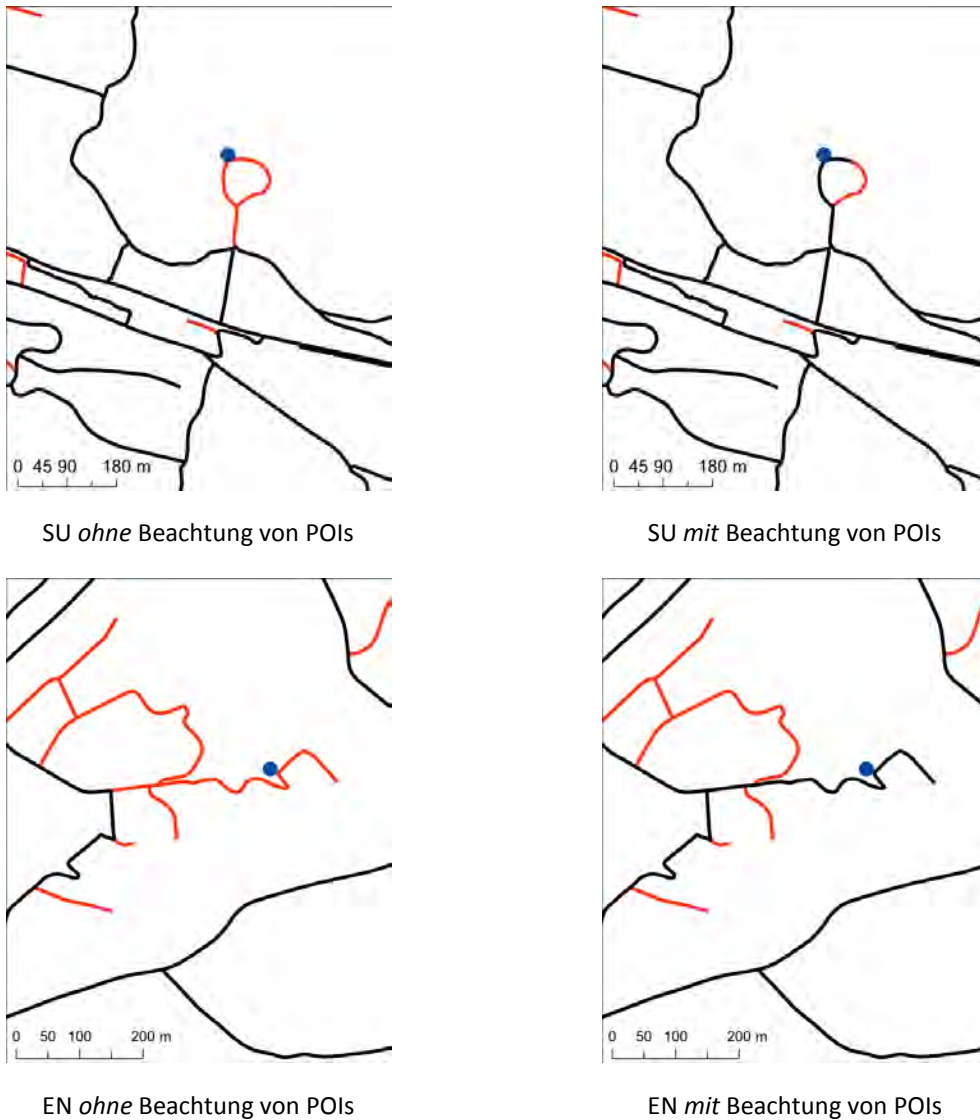
### 5.5.3 Erzielte Verbesserungen des POI Erschliessungs-Algorithmus

Abb. 71 zeigt zwei Beispiele von Ergebnissen des POI Erschliessungs-Algorithmus aus den Testgebieten ZU und WT inklusive der Anwendung der in Abschnitt 5.1 bis 5.4 vorgestellten Erweiterung mit gleich bleibenden Parametern. Sie zeigen Situationen, bei denen ein lineares Segment den blau symbolisierten POI erschliesst. Die beiden linearen Segmente bzw. die Strokes, auf welche sie im integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz abgebildet werden, sind zu kurz und werden deshalb nicht selektiert (Ausschnitte links). Der POI Erschliessungs-Algorithmus stellt aber nun sicher, dass die beiden linearen Segmente anschliessend wieder selektiert werden, weil sie den POI erschliessen (Ausschnitte rechts). Die zwei Situationen repräsentieren den in Abschnitt 5.5.2 beschriebenen Idealfall, bei dem es ausreicht, wenn nur das dem POI am nächsten gelegene Segment selektiert wird und dadurch bereits wieder eine Verbindung zum Rest des Strassennetzwerkes hergestellt ist. Solche Situationen sind in den Testgebieten ZU und WT in Relation zu den Testgebieten SU und EN häufiger vorhanden. Dies ist aber in erster Linie vom Zielmassstab abhängig. 1:50'000 ist ein verhältnismässig grosser Zielmassstab, bei dem die Ausdünnung relativ gering ist. Wäre der Zielmassstab viel kleiner, z.B. 1:200'000, so wäre auch die Ausdünnung viel stärker und daher die Wahrscheinlichkeit kleiner, dass bereits die Selektion des dem POI am nächsten gelegenen Segmentes eine Erschliessung und Verbindung mit dem Strassennetzwerk garantiert.



**Abb. 71: Beispiele der Resultate des POI Erschliessungs-Algorithmus für die Testgebiete ZU und WT**

Links dargestellt ist das Resultat ohne Anwendung des POI Erschliessungs-Algorithmus, während rechts das Resultat mit dessen Anwendung dargelegt ist. Rot symbolisiert sind die entfernten Segmente. Beide Beispiele zeigen Varianten, bei denen der POI ohne die Anwendung des POI Erschliessungs-Algorithmus nicht erschlossen ist. (© swisstopo)



**Abb. 72: Beispiele der Resultate des POI Erschliessungs-Algorithmus für die Testgebiete SU und EN**

Links dargestellt ist das Resultat ohne Anwendung des POI Erschliessungs-Algorithmus, während rechts das Resultat mit dessen Anwendung dargelegt ist. Rot symbolisiert sind die entfernten Segmente. Beide Beispiele zeigen Varianten, bei der denen POI ohne die Anwendung des POI Erschliessungs-Algorithmus nicht erschlossen ist. (© swisstopo)

Abb. 72 zeigt zwei Beispiele von Ergebnissen des POI Erschliessungs-Algorithmus aus den Testgebieten SU und EN inklusive der Anwendung der in Abschnitt 5.1 bis 5.4 vorgestellten Erweiterung mit gleich bleibenden Parametern. Dargestellt ist erneut die Situation ohne und mit der Anwendung des POI Erschliessungs-Algorithmus. Hier sind Situationen ersichtlich, bei denen die Selektion des Segmentes, welches dem blau repräsentierten POI am nächsten liegt, nicht ausreicht, weil keine Verbindung mit dem Rest des Strassennetzwerkes hergestellt wäre und das Segment isoliert vorläge. In beiden Situationen wird deshalb ein Pfad selektiert, welcher die Erschliessung des POI und eine Verbindung zum Strassennetzwerk sicherstellt. Das Beispiel aus SU zeigt unter anderem auch eine Situation, bei der eine neue Sackgasse entsteht, was in diesem Fall aber erlaubt ist, weil sie eine Zufahrt zum POI bildet.

Man könnte argumentieren, dass die Wahl des kürzesten Pfades für die Erstellung der Verbindung nicht geeignet ist, da es unter Umständen andere Pfade gibt, welche zwar länger sind, aber topologisch und strukturell bedeutender. Die Resultate haben aber gezeigt, dass der kürzeste Pfad für den Zielmasstab von 1:50'000 geeignet ist. Einerseits sind die Pfade topologisch betrachtet meist relativ kurz (enthalten wenige

Segmente) und andererseits existiert selten mehr als nur ein Pfad, der zurück ins Strassennetzwerk führt. Für kleinere Zielmassstäbe wäre aber eine strukturell und topologisch sinnvollere Wahl eines Pfades zu prüfen.

Es gibt oft auch Situationen, bei denen ein POI auch ohne Anwendung des POI Erschliessungs-Algorithmus bereits erschlossen ist, weil der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz das dem POI am nächsten gelegene Segmente nicht entfernt hat. Auch dieser Fall ist in erster Linie abhängig vom Zielmassstab. Je kleiner der Zielmassstab ist, desto grösser ist die Ausdünnung und desto kleiner die Wahrscheinlichkeit, dass ein POI auch ohne die explizite Ausführung des POI Erschliessungs-Algorithmus erschlossen ist. Einen weiteren Einfluss hat die Art des POI. Bestimmte POI (z.B. eine Schule oder ein Vergnügungspark) liegen prinzipiell eher an wichtigeren Strassen, währenddessen es POI gibt, welche prinzipiell eher abgelegen sind (beispielsweise Höhlen). [Tab. 22](#) quantifiziert diesen Effekt für die vier Testgebiete mit dem Verhältnis aus der Anzahl POI, welche durch den POI Erschliessungs-Algorithmus erschlossen worden sind, und der totalen Anzahl POI im betroffenen Testgebiet. Die Situation ist in allen Testgebieten ähnlich, ca. ein Drittel aller POI musste mit Hilfe des POI Erschliessungs-Algorithmus erschlossen werden.

**Tab. 22: Anzahl durch den POI Erschliessungs-Algorithmus erschlossene POIs**

Testgebiet	Anzahl POIs
ZU	7 / 21
WT	40 / 123
SU	12 / 33
EN	20 / 60

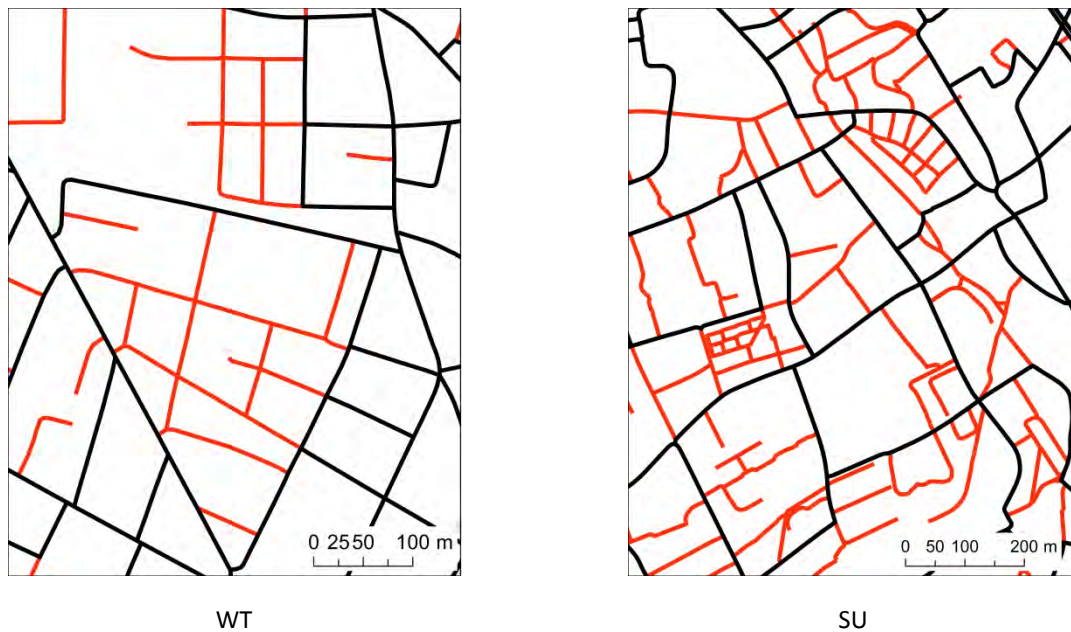
Der POI Erschliessungs-Algorithmus kann also sicherstellen, dass wichtige Infrastruktur erschlossen wird. Insbesondere kann dadurch die Anforderung 15 aus der Anforderungsanalyse erfüllt werden. In dieser Arbeit wurden nur Punkt-Features verwendet. Prinzipiell wäre es aber auch möglich, dass flächenartige Objekte (Polygone) erschlossen werden. Eine Vorgehensweise wäre den Schwerpunkt der Objekte zu bilden und sie dann als POI zu interpretieren. Eine andere Möglichkeit bestände darin, dass man sie nicht als Punkte betrachtet, sondern als Polygone belässt und das am nächsten gelegene Segment, sowie die Verbindung ins Haupt-Strassennetzwerk selektiert. Je nach Grösse des Polygons wäre dann auch vorstellbar, dass mehrere Zufahrten zum Polygon sichergestellt würden.

## 5.6 Strukturhaltung Stadt-Land

### 5.6.1 Problem der zu starken Ausdünnung in urbanen Gebieten

Der erste Schritt des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes von [Li und Zhou \(2012\)](#) löst kontinuierlich dichte Maschen auf und fusioniert sie mit Nachbarmaschen. Dichte Maschen sind vor allem in urbanen Siedlungsgebieten vorzufinden. Die Auflösung von Maschen in Siedlungsgebieten ist daher stärker als in ländlicheren Gebieten. Eine Zwischen-Diskussion mit Experten von swisstopo hat diesen Eindruck erhärtet. Sie haben bestätigt, dass die Ausdünnung der Strassensegmente in urbanen Siedlungsgebieten zu stark sei. [Abb. 73](#) zeigt zwei konkrete Beispiele von zu starken Ausdünnungen in Siedlungsgebieten, wobei die entfernten Segmente rot dargestellt sind. Der linke Ausschnitt zeigt ein Beispiel aus der Innenstadt von Winterthur. Die Experten von swisstopo waren der Meinung, dass in diesem Fall die Ausdünnung viel zu stark sei und zumindest die längeren Strassen selektioniert hätten werden müssen. Auch im rechten Ausschnitt, in der Innenstadt von Sursee, ist die Ausdünnung verhältnismässig zu stark. Diverse weitere Strassen sollten selektioniert werden.

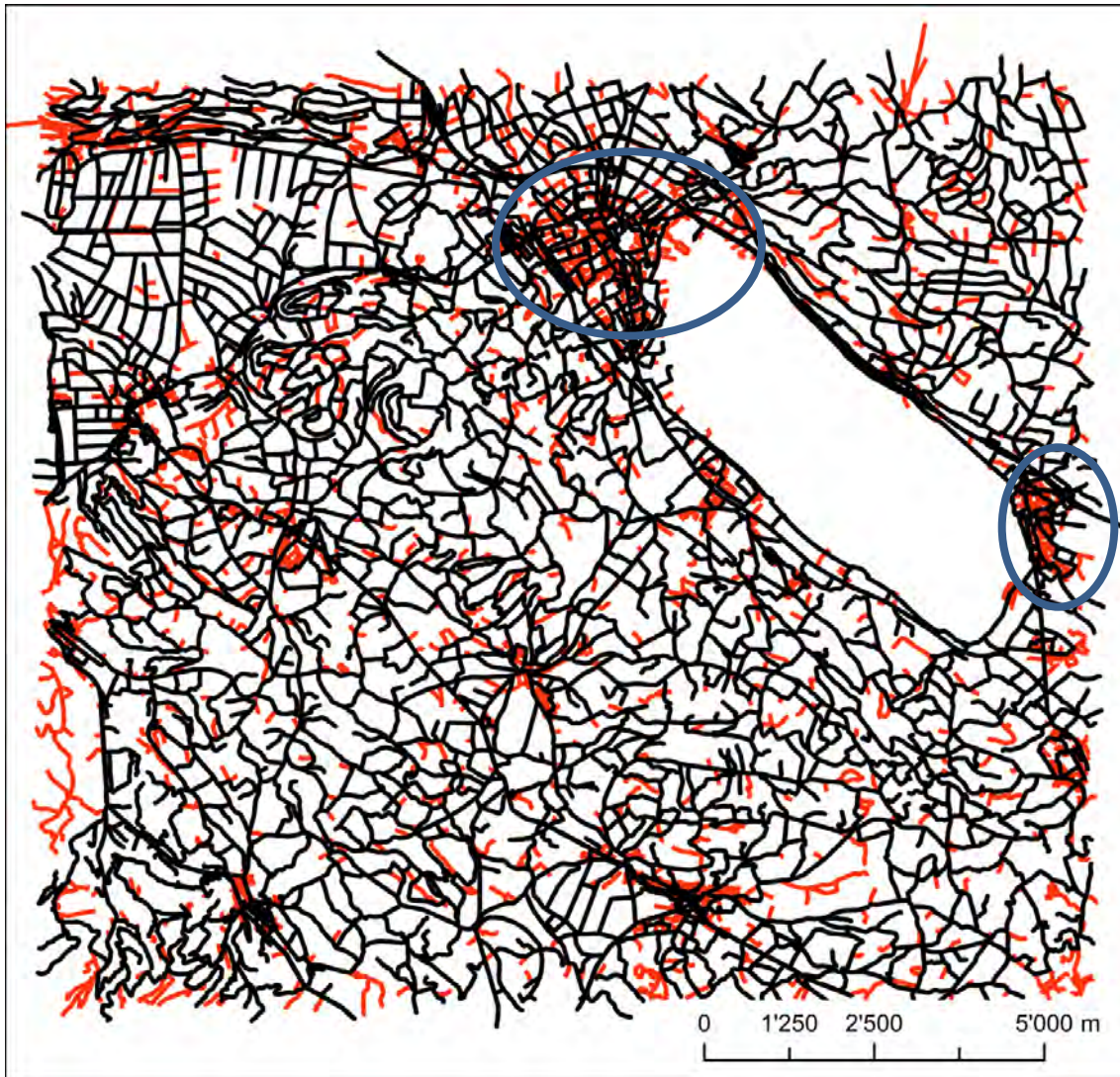




**Abb. 73: Beispiele von zu stark ausgedünnten Siedlungsgebieten**

Der linke Ausschnitt zeigt eine zu starke Ausdünnung in der Innenstadt von Winterthur und der rechte Ausschnitt eine zu starke Ausdünnung in der Innenstadt von Sursee. Rot dargestellt sind die entfernten Segmente. (© swisstopo)

Der Effekt lässt sich auch visualisieren, wenn die Ausdünnung über ein ganzes Testgebiet betrachtet wird. [Abb. 74](#) zeigt das Resultat des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes von [Li und Zhou \(2012\)](#), wobei die entfernten Segmente erneut eingefärbt sind. Hier sind zwar keine Details mehr zu erkennen, aber es ist gut ersichtlich, dass die Ausdünnung in einzelnen Clustern, respektive in den Siedlungsgebieten, vermehrt auftritt. Besonders in Sursee (blaue Ellipse nord-westlich des Sempachersees) und in Sempach (blaue Ellipse am süd-östlichen Rand des Sempachersee) ist der Effekt besonders stark, aber auch in den anderen kleineren Siedlungsgebieten ist er vorzufinden.



**Abb. 74: Effekt der zu starken Ausdünnung in Siedlungsgebieten**

Das Beispiel zeigt die verhältnismässig stärkere Ausdünnung in urbaneren Siedlungsgebieten. Rot eingefärbt sind die durch den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz entfernten Segmente. Sie tauchen vermehrt in Clustern (respektive Siedlungsgebieten) auf. (© swisstopo)

Die zu starke Ausdünnung in Siedlungsgebieten betrifft vor allem die Testgebiete ZU, WT und SU. Im Testgebiet EN ist der Effekt nicht so stark, weil es eine gebirgige Region ist, in der grössere Siedlungsgebiete nicht vorhanden sind.

### 5.6.2 Einbezug von Siedlungsgebieten

Um den Effekt der zu starken Ausdünnung zu quantifizieren, wurde zunächst eine weitere Feature Klasse herbeigezogen (in Abschnitt 5.6.4 wird eine Methode vorgestellt werden, Siedlungsgebiete aus dem Strassennetzwerk selbst abzuleiten). Konkret handelt es sich um zwei Polygon-Layer des Vector200 Modells von swisstopo aus dem Topic Landcover. Das Topic Landcover beschreibt die topografische Bodenbedeckung gemäss Tab. 23.

**Tab. 23: Landcover Feature Klasse des Vector200 Datensatzes**

 Topografische Bodenbedeckungen in der Landcover Feature Klasse im Vector200 Modell. *Quelle: swisstopo 2013d.*

Topografische Bodenbedeckungen der Landcover Feature Klasse		
Wald	See	Sumpf
Fels	Stausee	Obstanlage
Geröll	Siedlung	Reben
Gletscher	Zentren grössere Städte	

Um das Ausmass der Ausdünnung in urbanen Siedlungsgebieten genauer zu untersuchen, wurden die Themen *Siedlung* und *Zentren grösserer Städte* zu einem Polygon-Layer *Siedlungsgebiete* zusammengefasst und leicht bearbeitet. Konkret wurden einzelne Polygone aufgrund ihrer sehr kleinen Grösse gelöscht, weil in den betroffenen Siedlungsgebieten oft nur ein paar einzelne Häuser von sehr kleinen Dörfern vorhanden waren. Der Layer *Siedlungsgebiete* widerspiegelt die urbanen Siedlungsgebiete, die als Basis für die kommenden Auswertungen benutzt wurden. Die Ausdehnung und Verteilung der Siedlungsgebiete in den Testgebieten ist im Anhang B ersichtlich.

### 5.6.2.1 Verteilung der Maschendichten in Siedlungs- und Landgebieten

Tab. 24 zeigt für alle vier Testgebiete einige Kennzahlen zur Verteilung der Maschen in Siedlungs- und Landgebieten. Eine Masche ist in einem Siedlungsgebiet, sofern ein oder mehrere Segmente, welche die Masche begrenzen, in einem Siedlungsgebiet liegen, andernfalls befindet sich die Masche in einem Landgebiet. Die mittlere Maschendichte in den Siedlungsgebieten ist in allen Testgebieten grösser als in den Landgebieten, wobei der Unterschied im Testgebiet EN am kleinsten ist. Die Differenz mag klein erscheinen, jedoch ist sie hoch signifikant. Der p-Wert des Mann-Whitney U Tests ist in allen Testgebieten kleiner als 0.001. Der Mann-Whitney Test U wurde anstelle des klassischen t-Tests gerechnet, weil die Maschendichten gemäss dem Kolmogorov-Smirnov Test höchstwahrscheinlich nicht normalverteilt sind (p-Wert < 0.001 in allen Testgebieten). Die stärkere Ausdünnung in Siedlungsgebieten ist eine direkte Folge der dichteren Maschen in den Siedlungsgebieten. Als Konsequenz der zu starken Ausdünnung in Siedlungsgebieten werden umgekehrt die ländlicheren Gebiete zu wenig stark ausgedünnt.

**Tab. 24: Kennzahlen zur Verteilung der Maschendichten in Siedlungs (SG)- und Landgebieten (LG)**

Die Maschendichten in Siedlungs- und Landgebieten unterscheiden sich in allen Testgebieten signifikant.

Testgebiete-(SG/LG)	ZU-SG	ZU-LG	WT-SG	WT-LG	SU-SG	SU-LG	EN-SG	EN-LG
<b>Anzahl Maschen</b>	1212	948	3254	4788	1007	1157	465	1206
<b>Mittlere Maschendichte</b>	0.0916	0.0823	0.0670	0.0584	0.0773	0.0719	0.0651	0.0623
<b>Kolmogorov-Smirnov Z Statistik</b>	10.523	9.426	16.764	20.921	8.068	10.722	4.587	8.571
<b>Kolmogorov-Smirnov p-Wert</b>	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
<b>Mann-Whitney U Statistik</b>	435'225		5'297'301		466'886		249'889	
<b>Mann Whitney p-Wert</b>	< 0.001		< 0.001		< 0.001		< 0.001	

### 5.6.2.2 Verhältnisse der Segmente und Segmentlängen in Siedlungs- und Landgebieten

In Tab. 25 sind Verhältniszahlen für alle Testgebiete ersichtlich, welche einerseits das Verhältnis aus der Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten zeigen und andererseits das Verhältnis aus der totalen Länge der Segmente in Siedlungs- und Landgebieten. Die Verhältniszahlen sind dargestellt für die ungeneralisierten



Testgebiete und für die Resultate des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes mit den in Abschnitten 5.1 bis 5.5 beschriebenen Veränderungen und Erweiterungen für einen Selektionsgrad von 70 %.

Die Verhältnisse aus der Anzahl Segmente und der absoluten Länge der Segmente in Siedlungs- und Landgebieten zeigen klar, dass die Ausdünnung in Siedlungsgebieten stärker ist. Das Verhältnis für das generalisierte Testgebiet ist stets kleiner als für das ungeneralisierte Testgebiet. Auch das Verhältnis aus der Anzahl Flächensegmente und der absoluten Länge der Flächensegmente und besonders der Anzahl linearer Segmente in Siedlungs- und Landgebieten wird stets kleiner. Die grosse Differenz der Verhältniszahlen bei den linearen Segmenten ist dadurch zu erklären, dass lineare Segmente vor allem in ländlichen Gebieten vorkommen, insbesondere längere Strokes aus linearen Segmenten. Dieser Effekt ist auch ersichtlich, wenn man das Verhältnis der absoluten Länge der linearen Segmente in Siedlungs- und Landgebieten betrachtet. Diese Verhältniszahlen sinken massiv und widerspiegeln den Sachverhalt, dass in Siedlungsgebieten lineare Segmente hauptsächlich aus kurzen Sackgassen bestehen, welche entfernt werden (Anforderung 14 aus der Anforderungsanalyse), wohingegen ländliche Gebiete durchaus auch grössere lineare Strukturen aufweisen.

**Tab. 25: Verhältniszahlen für Segmente in Siedlungs (SG)- und Landgebieten (LG)**

Die Tabelle zeigt Verhältniszahlen für die vier Testgebiete, einerseits für das ungeneralisierte Testgebiete (TG) und andererseits für die Resultate des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (IA).

Verhältnis aus ...	ZU-TG	ZU-IA	WT-TG	WT-IA	SU-TG	SU-IA	EN-TG	EN-IA
Anzahl Segmente in SG und LG	0.988	0.862	0.511	0.418	0.517	0.389	0.258	0.183
Anzahl Flächensegmente in SG und LG	0.974	0.884	0.516	0.431	0.539	0.434	0.253	0.196
Anzahl lineare Segmente In SG und LG	1.111	0.478	0.473	0.161	0.417	0.010	0.282	0.104
Absolute Länge der Segmente in SG und LG	0.466	0.381	0.225	0.172	0.184	0.129	0.068	0.042
Absolute Länge der Flächensegmente in SG und LG	0.469	0.401	0.232	0.183	0.190	0.149	0.070	0.049
Absolute Länge der linearen Segmente in SG und LG	0.447	0.180	0.176	0.044	0.156	0.032	0.061	0.013

Die zu starke Ausdünnung in Siedlungsgebieten verletzt die Anforderung 16 aus der Anforderungsanalyse. Die grundlegende Struktur des Strassennetzwerkes wird nicht genügend erhalten. Die Ausdünnung fokussiert sich zu stark auf die Siedlungsgebiete, während die Landgebiete zu wenig ausgedünnt werden.

### 5.6.3 Reduktion der Maschendichte mit konstantem Faktor

Um dem Effekt der zu starken Ausdünnung in Siedlungsgebieten zu begegnen, aber trotzdem einen Selektionsgrad von 70 % zu erhalten, gibt es prinzipiell zwei Varianten. Der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von [Li und Zhou \(2012\)](#) besteht aus zwei Teilschritten (die Ausdünnung der Maschen und die Ausdünnung der linearen Strukturen mit Hilfe des Stroke-Ansatzes).

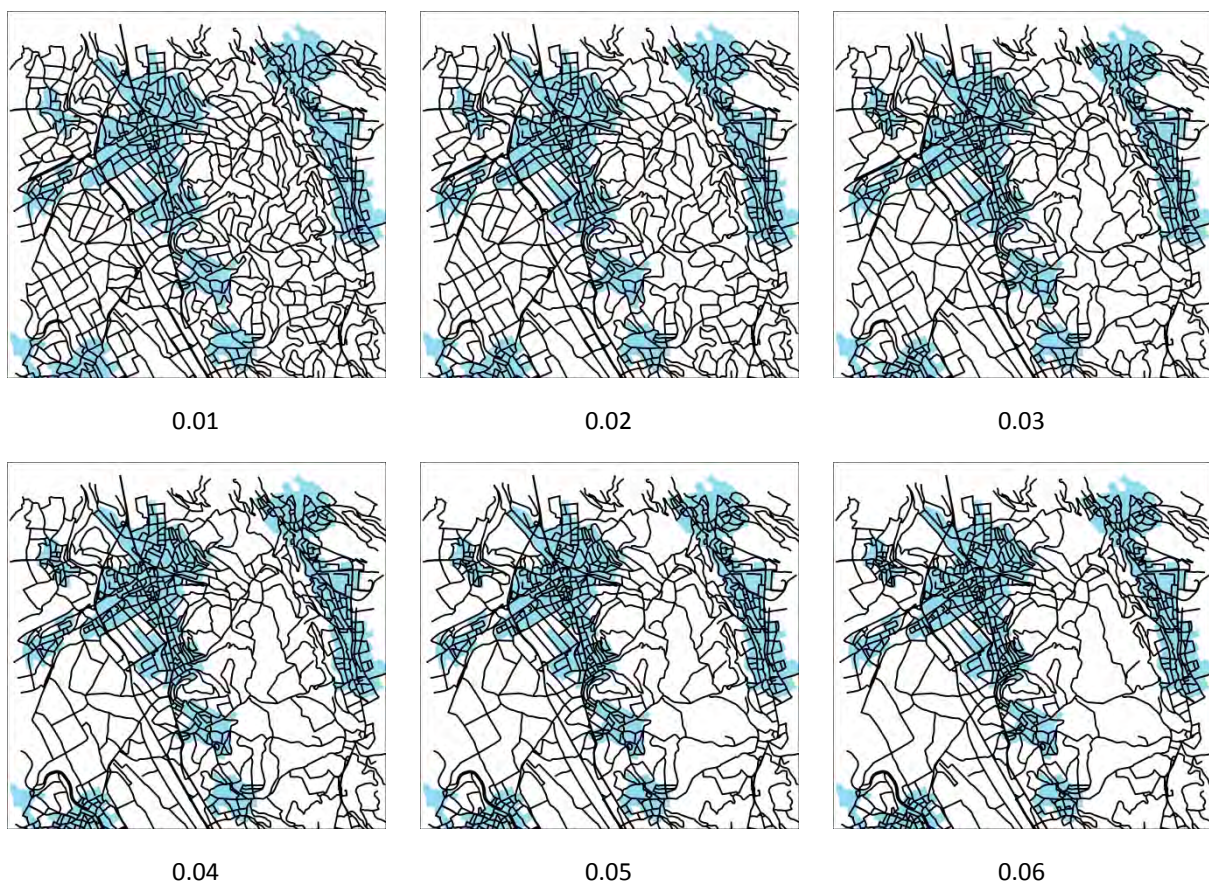
Eine Möglichkeit wäre nun, unterschiedliche Stroke-Längen-Grenzwerte für die Strokes in Siedlungs- und Landgebieten zu setzen, mit dem Ziel, dass in Siedlungsgebieten auch kürzere Strokes selektiert werden. Die andere Herangehensweise besteht darin, die Maschendichte für Maschen in Siedlungsgebieten künstlich mit einem konstanten Faktor tiefer zu setzen (oder analog die Maschendichte für Maschen in Landgebieten künstlich zu erhöhen). Die Folge wäre eine weniger starke Ausdünnung in Siedlungsgebieten. Ebenfalls möglich wäre eine Kombination der beiden Methoden.

Die erste Variante hätte zur Folge, dass in Siedlungsgebieten kürzere Strokes ebenfalls selektiert werden. Das ergibt zwei grundlegende Probleme. Einerseits verstösst es gegen die Anforderung 14 aus der

Anforderungsanalyse, welche besagt, dass kurze Sackgassen nicht selektiert werden sollten. Andererseits gibt es diverse lineare Strukturen mit einer Tiefe von 0 (nur ein Stroke, wobei in vielen Fällen diese Strokes aus nur einem Segment bestehen), welche an einer bereits ausgedünnten Masche liegen. Die Konsequenz wäre, dass der Stroke-Reconnection-Algorithmus aus Abschnitt 5.2 eine Verbindung ins erhaltene Strassennetzwerk suchen würde. Dies ist zwar erlaubt, wäre aber insofern nicht optimal, als dass keine weitere Verbindungen zwischen Strassen selektiert werden (also keine zwei Strassen über eine weitere Strasse miteinander verbunden werden), sondern eine Sackgasse. Deshalb wurde von dieser Variante abgesehen und stattdessen die zweite Variante gewählt: die künstliche Herabsetzung der Maschendichte von Maschen in Siedlungsgebieten.

### 5.6.3.1 Optimaler Maschendichte-Faktor

Die Konstante, um welche Maschendichten von Maschen in Siedlungsgebieten künstlich tiefer gesetzt werden, wird von nun an Maschendichte-Faktor genannt. Es ergibt sich die Frage, wie genau dieser Faktor gesetzt werden muss, damit ein optimales Resultat entsteht (ein optimales Gleichgewicht zwischen Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten). Deshalb muss untersucht werden, wie gross die Auswirkungen des Maschendichte-Faktors sind. [Abb. 75](#) zeigt eine Testserie mit einem Ausschnitt des Testgebietes ZU. Der erweiterte integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz wurde jeweils mit insgesamt sechs verschiedenen Maschendichte-Faktoren (0.01 bis 0.06 bei einem Intervall von 0.01) gerechnet. Die Abnahme der Ausdünnung in Siedlungsgebieten ist sehr gut ersichtlich und umso extremer, je grösser der Maschendichte-Faktor ist. Ab einem Maschendichte-Faktor von ca. 0.03 ist die Ausdünnung in Siedlungsgebieten nur noch sehr minim, dafür die Ausdünnung in Landgebieten extrem hoch. Der Maschendichte-Faktor wäre eindeutig zu hoch angesetzt.

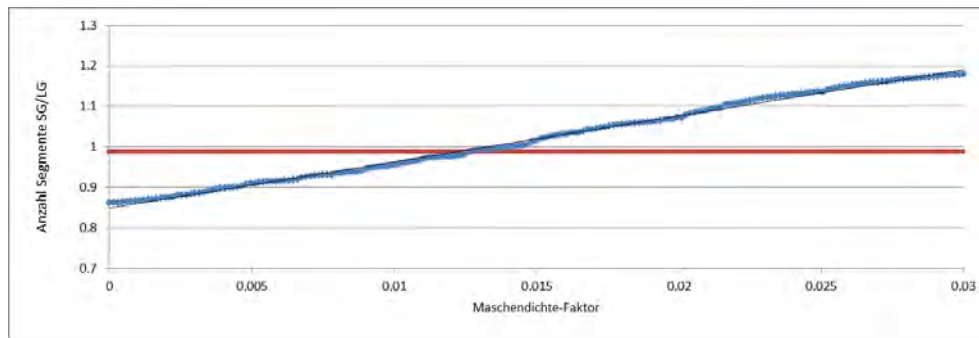


**Abb. 75: Testserie mit sechs verschiedenen Maschendichte-Faktoren**

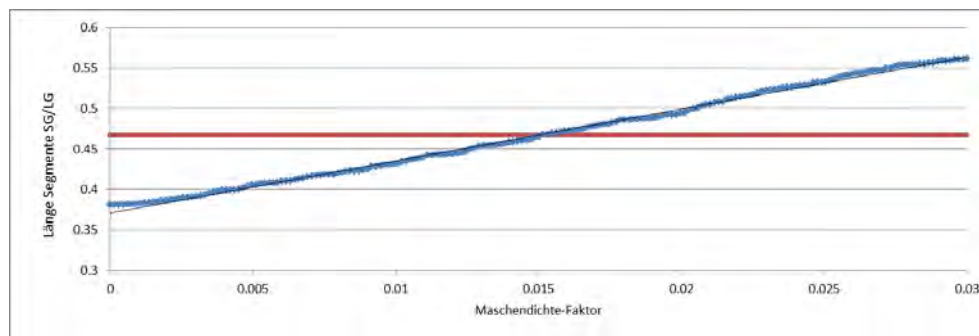
Dargestellt ist ein Ausschnitt des Testgebietes ZU mit Anwendung von sechs verschiedenen Maschendichte-Faktoren. Gut ersichtlich ist die stetige Abnahme der Ausdünnung in Siedlungsgebieten (hellblau hinterlegt). (© swisstopo)



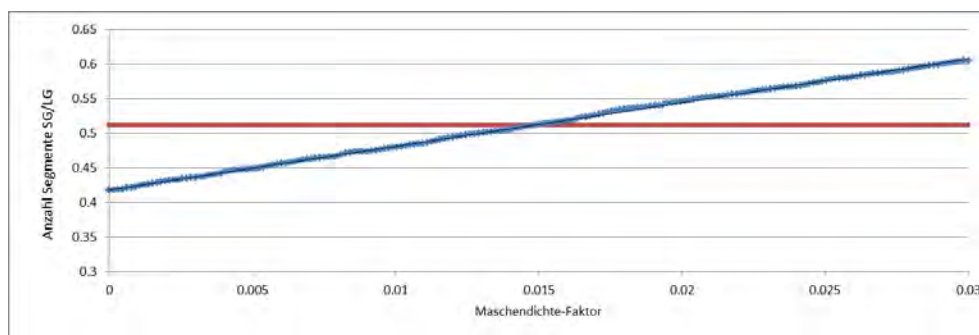
Rein auf visueller Basis zu entscheiden, welcher Maschendichte-Faktor optimal ist, ist äusserst schwierig und dürfte auch je nach Testgebiet unterschiedlich sein. Besser wäre es, wenn ein optimaler Maschendichte-Faktor empirisch begründet werden könnte. Um dies zu erreichen, muss zuerst festgelegt werden, was überhaupt ein optimales Gleichgewicht zwischen Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten ist. Ein anwendbares Modell besteht darin, dass man als Constraint setzt, dass das Verhältnis aus der Anzahl Segmenten in Siedlungs- und Landgebieten auch im Resultat ungefähr gleich gross sein muss wie im ungeneralisierten Testgebiet. Diese Herangehensweise stellt sicher, dass die Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten im Gleichgewicht, also verhältnismässig gleich gross bleibt. Weiter erfüllt es die Anforderung der Strukturhaltung (Anforderung 16). Alternativ wäre es auch denkbar, an Stelle des Verhältnisses aus der Anzahl der Segmente, das Verhältnis der totalen Länge der Segmente in Siedlungs- und Landgebieten konstant zu halten. Um zu analysieren, bei welchem Maschendichte-Faktor das Verhältnis konstant bleibt, wurde für jedes der vier Testgebiete eine Serie von insgesamt 200 Testläufen mit jeweils unterschiedlichen Maschendichte-Faktoren gerechnet und dabei die Veränderung des Verhältnisses analysiert. Dabei wurde der erweiterte Stroke-Maschen Kombinationsansatz mit den in den Abschnitten 5.1 bis 5.5 diskutierten Erweiterungen verwendet. [Abb. 76](#) zeigt die Ergebnisse für die Testgebiete ZU und WT und [Abb. 77](#) die Ergebnisse für die Testgebiet SU und EN. Blau symbolisiert ist das berechnete Verhältnis in Abhängigkeit des Maschendichte-Faktors. Rot dargestellt ist das Verhältnis des ungeneralisierten Strassennetzwerkes.



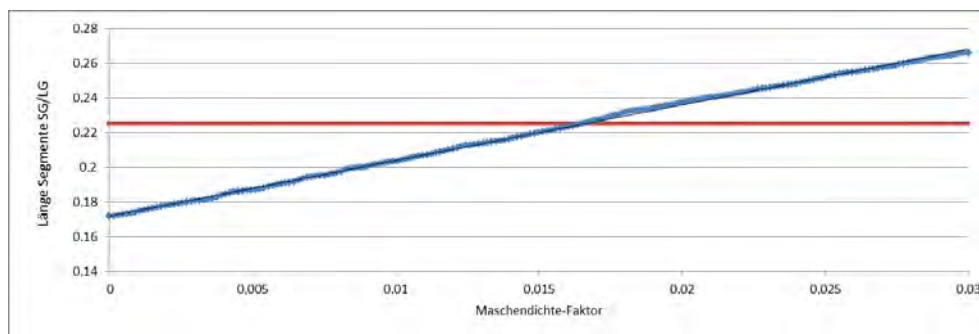
Testgebiet ZU, Verhältnis Anzahl Segmente SG/LG,  $y = 11.41x + 0.85, R^2 = 0.9965$



Testgebiet ZU, Verhältnis Länge Segmente SG/LG,  $y = 6.41x + 0.37, R^2 = 0.997$



Testgebiet WT, Verhältnis Anzahl Segmente SG/LG,  $y = 6.31x + 0.42, R^2 = 0.9995$

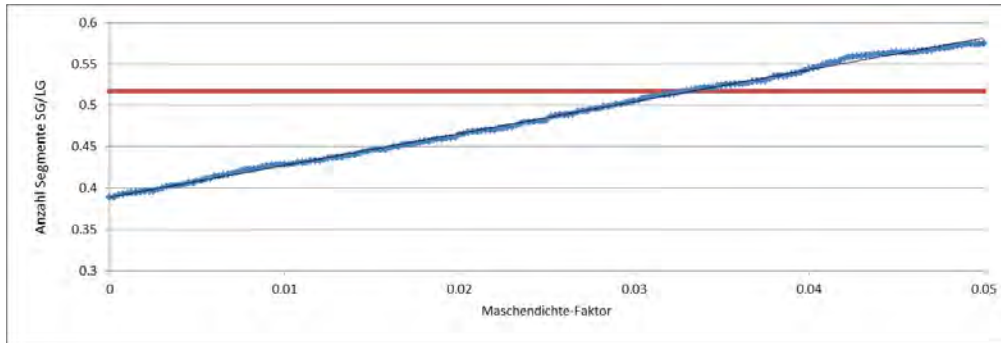


Testgebiet WT, Verhältnis Länge Segmente SG/LG,  $y = 3.21x + 0.17, R^2 = 0.9992$

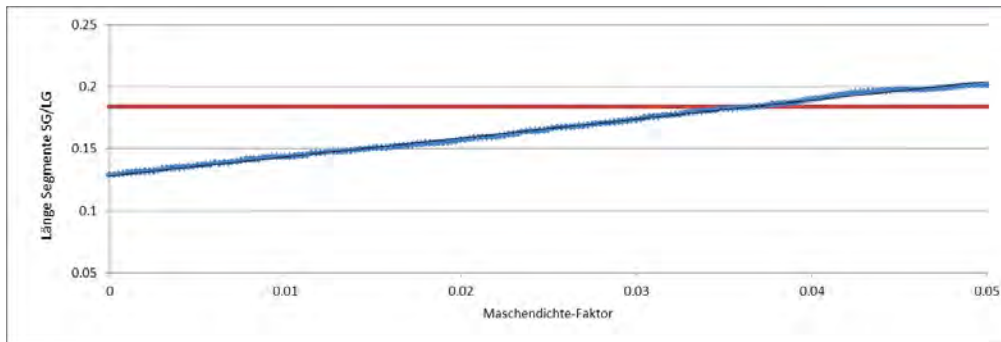
**Abb. 76: Abhängigkeit des Verhältnisses der Anzahl resp. Länge der Segmente vom Maschendichte-Faktor (1)**

Je grösser der Maschendichte-Faktor ist, umso grösser ist das Verhältnis aus der Anzahl (respektive Länge der Segmente) in Siedlungs- (SG) und Landgebieten (LG). Ein eindeutiger linearer Trend zwischen Maschendichte-Faktor und dem Verhältnis, sowie eine starke Korrelation zwischen den Verhältnissen der Anzahl und der Länge der Segmente sind vorhanden. Die rote Linie repräsentiert das Verhältnis im ungeneralisierten Testgebiet.

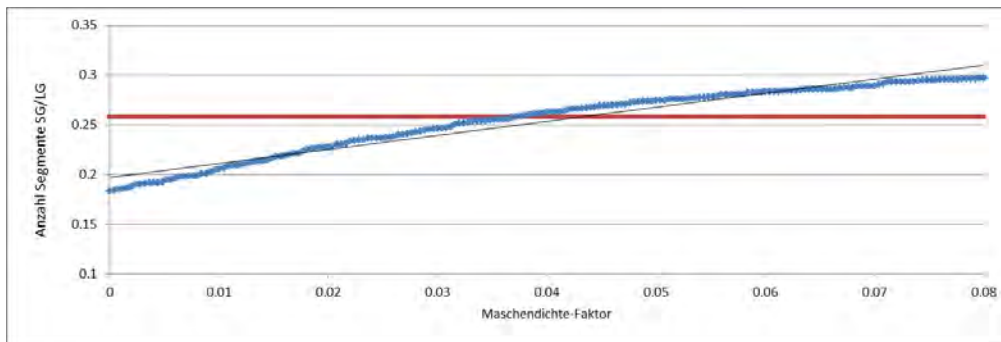
Die Resultate der Testgebiete ZU und WT sind sehr ähnlich. Es ist ein eindeutiger und klarer linearer Trend ersichtlich, sowohl für das Verhältnis der Anzahl Segmente, als auch das Verhältnis der totalen Länge der Segmente in Siedlungs- und Landgebieten. Das Bestimmtheitsmass  $R^2$  ist für alle vier Fälle grösser als 0.99, was auf einen fast perfekten Zusammenhang hindeutet. Der starke lineare Trend der Kurven zeigt auf, dass sich die Maschendichte in Siedlungs- und Landgebieten, trotz des signifikanten Unterschieds, absolut wenig unterscheiden beziehungsweise ein flüssiger Übergang zwischen der Maschendichte in Siedlungs- und der Maschendichte in Landgebieten vorzufinden ist. Eine kleine Erhöhung des Maschendichte-Faktors bewirkt bereits, dass anstelle einer (oder mehrerer) Maschen in einem Siedlungsgebiet eine Masche in einem Landgebiet aufgelöst wird. Es ist nicht der Fall, dass es zwischen der Maschendichte der Maschen in Siedlungsgebieten und der Maschendichte der Maschen in Landgebieten ein Intervall gibt, innerhalb dessen überhaupt keine Maschen vorzufinden sind. Wäre dies der Fall, so würde die Kurve einen ebeneren Verlauf nehmen und dann plötzlich sprunghaft wieder steigen (sobald der Maschendichte-Faktor so hoch ist, dass anstelle der Maschen in Siedlungsgebieten die ersten Maschen in Landgebieten aufgelöst würden). Ein linearer Trend wäre dann nicht ersichtlich. Der Trend für die Testgebiete ZU und WT verläuft aber absolut flüssig. Zu beachten gilt es aber auch, dass, wenn eine Masche aufgelöst wird, sie nicht total verschwindet. Sie wird mit einer Nachbarmasche fusioniert und erhält eine kleinere Maschendichte, welche in einem nächsten Durchgang potentiell wieder aufgelöst werden könnte. Weiter interessant ist die starke Korrelation zwischen dem Verhältnis der Anzahl und der totalen Länge der Segmente. Dies war aber zu erwarten, weil die totale Länge der Segmente in Siedlungs- und Landgebieten direkt gekoppelt ist mit der Anzahl Segmente (je mehr Segmente umso länger ist die absolute Länge aller Segmente und umgekehrt). Der optimale Maschendichte-Faktor, berechnet mit Hilfe der Regressionsgleichung, ist für das Testgebiet ZU 0.0121 für das Verhältnis der Anzahl Segmente und 0.0150 für das Verhältnis der totalen Länge der Segmente in Siedlungs- und Landgebieten. Der optimale Maschendichte-Faktor für das Testgebiet WT ist für das Verhältnis der Anzahl Segmente 0.0144 und für das Verhältnis der totalen Länge der Segmente 0.0171. Der optimale Maschendichte-Faktor, welcher für das Verhältnis der totalen Länge der Segmente etwas grösser ist (gilt für alle Testgebiete) ist darin begründet, dass die Segmente in Landgebieten tendenziell länger sind als in Siedlungsgebieten.



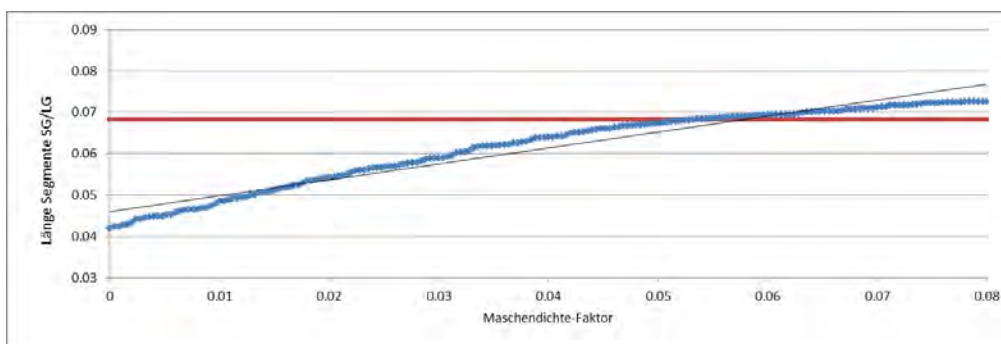
Testgebiet SU, Verhältnis Anzahl Segmente SG/LG,  $y = 3.84x + 0.39, R^2 = 0.9983$



Testgebiet SU, Verhältnis Länge Segmente SG/LG,  $y = 1.51x + 0.13, R^2 = 0.9977$



Testgebiet EN, Verhältnis Anzahl Segmente SG/LG,  $y = 1.41x + 0.20, R^2 = 0.9563$



Testgebiet EN, Verhältnis Länge Segmente SG/LG,  $y = 0.384x + 0.046, R^2 = 0.9497$

**Abb. 77: Abhängigkeit des Verhältnisses der Anzahl resp. Länge der Segmente vom Maschendichte-Faktor (2)**

Je grösser der Maschendichte-Faktor ist, umso grösser ist das Verhältnis aus der Anzahl (respektive Länge der Segmente) in Siedlungs- (SG) und Landgebieten (LG). Ein eindeutiger linearer Trend zwischen Maschendichte-Faktor und dem Verhältnis, sowie eine starke Korrelation zwischen den Verhältnissen der Anzahl und der Länge der Segmente sind vorhanden. Die rote Linie repräsentiert das Verhältnis im ungeneralisierten Testgebiet.

Auch die Resultate für das Testgebiet SU weisen einen starken linearen Trend mit einem Bestimmtheitsmass  $R^2$  von mehr als 0.99 auf. Die Begründung hierfür ist ähnlich wie für die Testgebiete ZU und WT. Interessant hierbei ist aber, dass der optimale Maschendichte-Faktor, berechnet durch die Regressionsgleichung, mit 0.0331 für das Verhältnis der Anzahl Segmente und 0.0358 für das Verhältnis der totalen Länge der Segmente grösser ist, als bei den Testgebieten ZU und WT. Dies liegt darin begründet, dass sich die Maschendichten in Siedlungs- und Landgebieten für das Testgebiet SU stärker unterscheiden, als für die Testgebiete ZU und WT. Die Maschendichten der Maschen in Siedlungsgebieten müssen stärker mit Hilfe des Maschendichte-Faktors künstlich herabgesetzt werden, damit sie weniger stark ausgedünnt werden. Aber auch hier gilt es zu beachten, dass es nicht nur die Maschen betrifft, die unverändert im ungeneralisierten Strassennetzwerk vorliegen, sondern auch die „Zwischen-Maschen“, also die Maschen, welche entstehen, wenn eine Masche ausgedünnt und mit einer Nachbarsmasche fusioniert werden, und in einer späteren Runde der Ausdünnung erneut ausgedünnt werden.

Die Ergebnisse für das Testgebiet EN weisen nicht mehr einen so eindeutig klaren linearen Trend auf wie für die anderen drei Testgebiete. Nichtsdestotrotz ist das Bestimmtheitsmass  $R^2$  mit 0.9563 für das Verhältnis der Anzahl Segmente respektive 0.9497 für das Verhältnis der totalen Länge der Segmente immer noch sehr hoch. Der weniger klare lineare Verlauf ist durch die spezielle Struktur des Testgebietes EN, welche sich von den anderen drei Testgebieten stark unterscheidet, zu begründen. Der Effekt ist besonders gut im Verlauf der Kurve mit dem Verhältnis der totalen Länge der Segmente ersichtlich. Die Kurve flacht ab einem Maschendichte-Faktor von 0.055 etwas ab. Dies deutet darauf hin, dass eine nur leichte Erhöhung des Maschendichte-Faktors nur noch wenig Auswirkung auf das Verhältnis der totalen Länge hat. Es gibt also eine Art Intervall von Maschendichten, innerhalb dessen nur wenige Maschen und „Zwischenmaschen“ vorkommen, so dass eine leichte Erhöhung des Maschendichte-Faktors keine grossen Auswirkungen auf das Verhältnis hat. Der optimale Maschendichte-Faktor, erneut mit Hilfe der Regressionsgleichung berechnet, ist für das Verhältnis der Anzahl Segmente 0.0411 und für das Verhältnis der totalen Länge der Segmente 0.0573. Beide Zahlen sind im Vergleich zu den anderen drei Testgebieten relativ hoch. Die Begründung liegt auch hier darin, dass die Maschendichten der Maschen in Siedlungsgebieten stärker mit Hilfe des Maschendichte-Faktors künstlich herabgesetzt werden müssen, damit sie weniger stark ausgedünnt werden. Diese Sachlage ist stark gekoppelt mit dem flachen Verlauf der Kurve.

Die Steigungen der Regressionsgeraden für die vier Testgebiete widerspiegeln sehr gut die Struktur, respektive die Verteilung der Maschendichten in Siedlungs- und Landgebieten. Die Steigung ist insbesondere für das Testgebiet ZU und WT verhältnismässig hoch. Eine leichte Erhöhung des Maschendichte-Faktors bewirkt bereits eine verhältnismässig starke Änderung der jeweiligen Verhältnisse. Die Maschendichten der Maschen und „Zwischenmaschen“ in Siedlungs- und Landgebieten liegen näher beieinander. Dem gegenübergestellt sind die relativ geringen Steigungen der Regressionsgeraden für das Testgebiet SU und insbesondere derjenigen für das Testgebiet EN. Eine leichte Erhöhung des Maschendichte-Faktors reicht nicht aus um die Verhältnisse stark zu beeinflussen. Die Maschendichten der Maschen und „Zwischenmaschen“ in Siedlungs- und Landgebieten liegen nicht so nahe beieinander wie in den Testgebieten ZU und WT.

Es stellt sich nun die Frage, mit Hilfe welches Maschendichte-Faktors die finalen Resultate gerechnet werden sollen, beziehungsweise ob das Verhältnis der Anzahl Segmente oder das Verhältnis der totalen Länge der Segmente konstant bleiben sollte. Weil der Fokus in dieser Arbeit immer auf der Anzahl der Segmente war (z.B. werden auch 30 % der Anzahl Segmente entfernt) wurde der optimale Maschendichte-Faktor für das Verhältnis der Anzahl Segmente gewählt. Die dadurch generierten Resultate, inklusive allen Veränderungen und Erweiterungen aus den Abschnitten 5.1 bis 5.5, bilden die End-Resultate dieser Arbeit. Sie werden ausführlich in Kapitel 6 analysiert, diskutiert und evaluiert.

Der Maschendichte-Faktor kann aber nicht nur gewählt werden, um ein optimales Verhältnis zu erreichen. Er ist allgemein geeignet, um die Ausdünnung in bestimmten Gebieten zu steuern. [Abb. 75](#) liefert einen Eindruck davon, wie sich die Resultate mit variierendem Maschendichte-Faktor verhalten. So könnte er auch genutzt



werden um die Ausdünnung in anderen, beliebigen Zonen zu steuern. Beispielsweise wäre es möglich Areale auszuwählen, innerhalb derer die Ausdünnung stärker sein darf. Vorstellbar wären z.B. grosse Friedhofs- oder Kasernenareale, welche stärker ausgedünnt werden dürften, weil sie im fertigen Kartenprodukt durch ein Flächenobjekt dargestellt würden. Der Maschendichte-Faktor bezieht sich nicht nur auf Siedlungs- und Landgebiete, sondern kann für allgemeine Flächenklassen verwendet werden um die Ausdünnung im Verhältnis zum Umfeld zu bestimmen. Möglich wäre auch ein komplizierteres Regelwert, dass je nach Flächenklasse unterschiedliche Maschendichte-Faktoren verwendet.

#### 5.6.4 Bestimmung von Siedlungsgebieten aus dem Strassennetzwerk

In Abschnitt 5.6.3 wurden Siedlungsgebiete mit Hilfe einer zusätzlichen Feature Klasse definiert um die Ausdünnung zu steuern. Solche Siedlungsgebiete sind aber nicht prinzipiell in allen räumlichen Datensätzen verfügbar. Es stellt sich daher die Frage, ob die Siedlungsgebiete auch aus dem Strassennetzwerk selbst extrahiert werden können, ohne andere Feature Klassen zu verwenden. Siedlungsgebiete sind meist durch ein dichtes und enges Strassennetz gekennzeichnet, woraus auch die stärkere Ausdünnung in Siedlungsgebieten erfolgte. Der folgende Abschnitt zeigt eine Möglichkeit auf, Siedlungsgebiete direkt aus dem Strassennetzwerk, ohne weitere Feature Klassen, zu extrahieren.

##### 5.6.4.1 Dichte-Algorithmus

Um Siedlungsgebiete zu extrahieren muss ein Mechanismus verwendet werden, mit Hilfe dessen die dichten Regionen im ganzen Strassennetzwerk extrahiert werden können. In der Literatur werden verschiedene Algorithmen diskutiert.

Liu et al. (2010) bilden auf Basis der Strassensegmente Thiessen-Polygone und berechnen eine lokale Strassendichte aus dem Verhältnis der Länge eines Strassensegmentes und der Fläche des betroffenen Thiessen-Polygons.

Die Kernel Density Estimation (KDE) ist in der GIScience weit verbreitet um Dichteverteilungen zu analysieren und zu beschreiben (O'Sullivan und Unwin 2003) und wird schon seit längerem diskutiert (Brunsdon 1995). Die KDE berechnet eine Dichtefläche auf Basis von Punkt-Beobachtungen. In der planaren KDE kann der Raum als eine Ebene betrachtet werden, innerhalb dessen die Dichte an mehreren (meist regelmässigen) Positionen berechnet wird. Die Dichte kann folgendermassen definiert werden (Xie und Yan 2008):

$$\varphi(s) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\pi r^2} k\left(\frac{d_{is}}{r}\right) \quad (6)$$

wobei  $\varphi(s)$  die Dichte am Ort  $s$  ist,  $r$  die Kernel-Bandbreite (auch Kernel-Radius) und  $k$  die Kernel-Funktion (das Gewicht eines Punktes  $i$  mit der Distanz  $d_{is}$ ). Andere Definitionen dividieren die Kernel-Funktion nicht mit der Fläche  $\pi r^2$ , sondern mit  $nr$ , wobei  $n$  die Anzahl Beobachtungen repräsentiert (Terrell und Scott 1992). Die Kernel-Funktion  $k$  bestimmt, wie stark ein Punkt  $i$  in Abhängigkeit der Distanz zu  $s$  gewichtet wird. Die Funktionen können verschiedene Formen tragen, wobei die Gauss'sche, die Quart'sche und die Minimum-Varianz-Funktion drei der meist genutzten sind (Schabenberger und Gotway 2005).

Clustering-Algorithmen sind ebenfalls weit verbreitet um Cluster aus einem Datensatz zu extrahieren (und Siedlungsgebiete in einem Strassennetzwerk sind im übertragenen Sinne schlussendlich nichts anderes als Cluster von Strassensegmenten). Es gibt zwei Typen von Cluster Algorithmen: Partitions- und hierarchische Algorithmen (Kaufman und Rousseeuw 1990, Ester et al. 1996). Partitions-Algorithmen teilen einen Datensatz mit  $n$  Beobachtungen in eine Menge von  $k$  Clustern, wobei  $k$  ein Input-Parameter ist. Sie starten normalerweise mit einer initialen Aufteilung und optimieren die Aufteilung dann iterativ. Jedes Cluster wird durch ein Zentroid repräsentiert (K-Means Algorithmen) oder durch eines der Objekte in der Nähe des Cluster-Zentroids (K-Medoid Algorithmen). Hierarchische Algorithmen bilden eine hierarchische Dekomposition, meist

repräsentiert durch ein Dendrogramm, welcher die Menge der Beobachtungen iterativ in kleinere Teilmengen unterteilt, bis alle Teilmengen nur noch eine Beobachtung enthalten.

Ein weiterer weit verbreiteter Cluster-Algorithmus in der GIScience ist der von Ester et al. (1996) vorgestellte DBSCAN (Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise). Er hat den Vorteil, dass im Vergleich zu den meisten anderen Cluster-Algorithmen die Anzahl Cluster nicht als Input-Parameter festgelegt werden muss. Da DBSCAN dichte-basiert arbeitet, weist der Algorithmus auch eine Verwandtschaft mit der KDE auf. Weil aber in dieser Arbeit kein Cluster-Algorithmus verwendet wurde, sondern ein Algorithmus, der sich eher an der KDE orientiert, sei für den interessierten Leser auf die Arbeiten von Kaufman und Rousseeuw (1990) und Ester et al. (1996) verwiesen.

Der in Abschnitt 5.6.3 vorgestellte Ansatz verwendet keine verschiedenen Dichten. Er unterscheidet nur, ob eine Masche, beziehungsweise ein Segment, in einem Siedlungs- oder einem Landgebiet liegt. Der für diese Arbeit implementierte Ansatz orientiert sich an dieser Betrachtungsweise und an der KDE. Als Basis dient nicht ein reguläres Gitter, innerhalb dessen für die einzelnen Gitterzellen die Dichte berechnet wird (wie es oft in der KDE gehandhabt wird), sondern die Strassensegmente selbst. Um zu entscheiden ob ein Strassensegment in einem Siedlungsgebiet liegt, wird das direkte Umfeld des Strassensegments betrachtet. Sind dort mehrere andere Strassensegmente vorhanden, so liegt das Strassensegment höchstwahrscheinlich in einem dichten Siedlungsgebiet. Der implementierte Algorithmus basiert aber nicht direkt auf den Strassensegmenten, sondern auf den Zentroiden der Linien. Sie bilden die Basis für die Berechnungen.

Der Zentroid einer Linie ist in der Java Topology Suite Klasse CentroidLine (JTS 2013) folgendermassen definiert:

$$\text{Zentroid} = \frac{\sum_{i \in S} M_i}{\sum_{i \in S} \text{Länge}_i} \quad (7)$$

wobei  $S$  die Menge der Liniensegmente ist, aus denen die Linie besteht,  $M$  der Mittelpunkt und  $L$  die Länge eines Liniensegmentes.

Der Algorithmus funktioniert iterativ und hat zwei Input-Parameter. Er prüft für jedes Zentroid, wie viele andere Zentroide im Umfeld, respektive in einer Distanz  $r$ , vorhanden sind. Überschreitet diese Anzahl einen Grenzwert  $g$ , so liegt das durch den Zentroid repräsentierte Strassensegment in einem Siedlungsgebiet, andernfalls in einem Landgebiet. Prinzipiell wäre es möglich die Anzahl der Punkte im Umfeld  $r$  noch durch die Fläche ( $\pi r^2$ ) zu dividieren, so wie es auch in der KDE gehandhabt wird. Da diese Fläche aber über das ganze Testgebiet konstant ist und es nicht das Ziel ist eine Dichteoberfläche zu erstellen, sondern lediglich binär zu entscheiden ob ein Segment in einem Siedlungsgebiet liegt oder nicht, reicht es aus, wenn lediglich geprüft wird, ob die Anzahl Zentroide im Umfeld den Grenzwert  $g$  überschreitet. Anstelle der Anzahl wurde unter anderem auch geprüft, ob die totale Länge aller Segmente innerhalb von  $r$  verwendet werden kann. Empirische Auswertungen haben jedoch ergeben, dass die Verwendung der Anzahl bessere Resultate produziert. Das Hauptproblem besteht darin, dass einzelne Segmente vor allem in ländlichen Gebieten sehr lange sein können und diese dadurch einen zu grossen Einfluss haben und das Resultat verschlechtern. Zusätzlich wurde eine weitere Bedingung implementiert, welche das Resultat leicht verbesserte. So wurden Segmente, welche zur Objektart Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt oder Raststätte gehören oder Kreisel-Segmente sind im Umfeld nicht miteinbezogen. Einerseits bilden vor allem Autobahnen sehr lange Segmente und sind daher durch einen Punkt (Zentroid) eher schlecht repräsentiert. Andererseits sind Kreisel, auch ausserhalb von Siedlungsgebieten, oft durch vier (oder sogar noch mehr) Segmente repräsentiert. Dadurch wurden Segmente im unmittelbaren Umfeld von Kreiseln oft als Siedlungssegmente interpretiert, obwohl sie klar ausserhalb von Siedlungsgebieten lagen.

### 5.6.4.2 Wahl der optimalen Input-Parameter

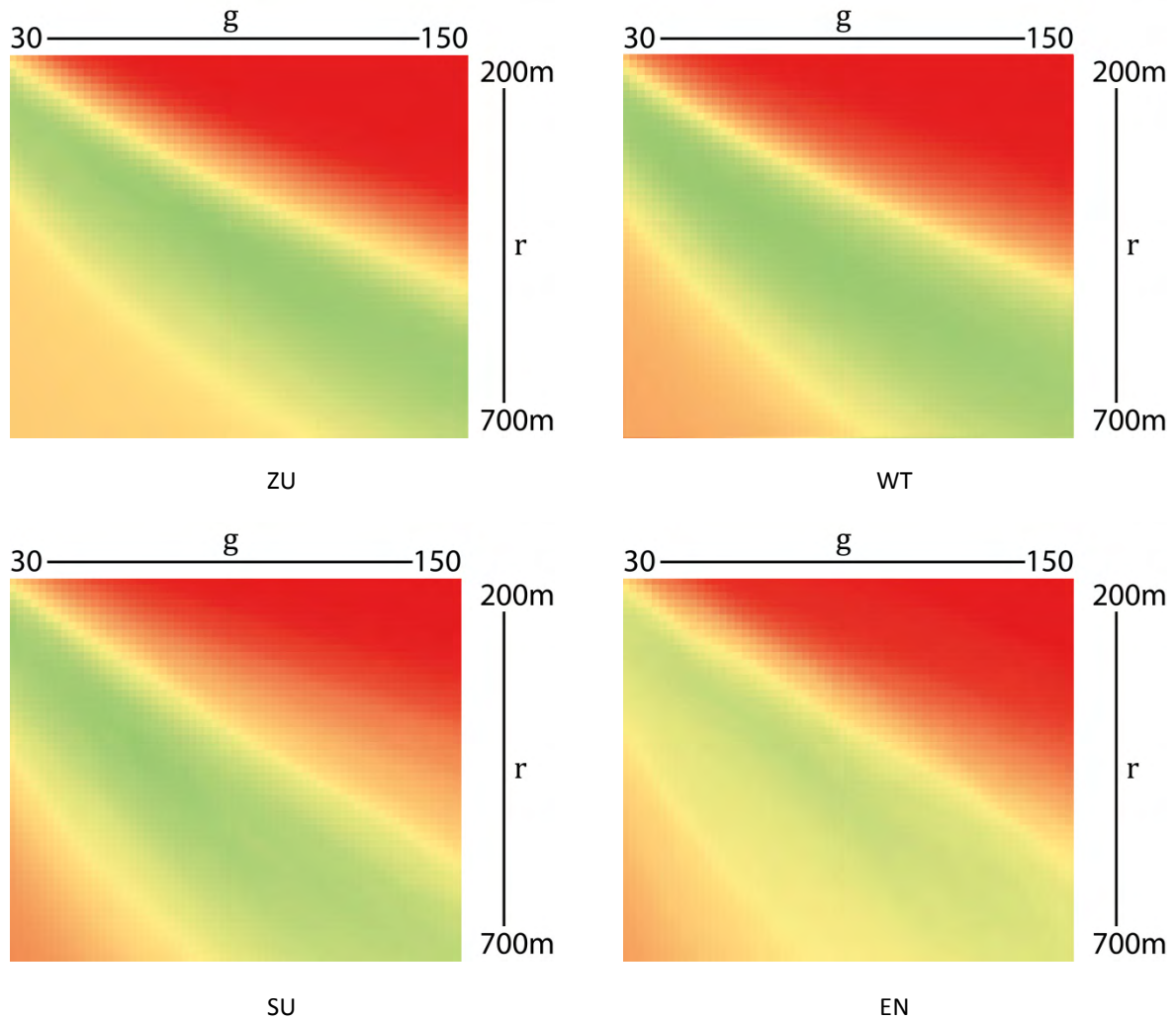
Der vorgestellte Dichte Algorithmus hat zwei Input-Parameter, einerseits das Umfeld  $r$ , innerhalb dessen die Zentroide summiert werden, und andererseits den Grenzwert  $g$ , der entscheidet, ob ein Segment in einem Siedlungsgebiet liegt oder nicht. Die Wahl dieser Input-Parameter beeinflusst das Resultat sehr stark und muss daher genauer analysiert werden.

Um quantitativ zu beurteilen, wie gut die Resultate des Dichte-Algorithmus sind, wurde ein Evaluationsmass (*Similarity*) verwendet, welches auch schon von [Li und Zhou \(2012\)](#) benutzt wurde, allerdings für einen leicht anderen Zweck. In dieser Arbeit wird die Similarity verwendet um die Resultate des Dichte-Algorithmus mit einem Benchmark zu vergleichen. Den Benchmark hierfür bilden die in Abschnitt 5.6.2 vorgestellten Siedlungsgebiete. Die Similarity ist folgendermassen definiert:

$$Similarity = \frac{A \cap B}{A + B - A \cap B} \quad (8)$$

wobei  $A$  die Anzahl Segmente ist, welche gemäss dem Dichte-Algorithmus in einem Siedlungsgebiet liegen,  $B$  die Anzahl Segmente welche effektiv in einem Siedlungsgebiet liegen (Benchmark, mit Hilfe der Siedlungsgebiete) und  $A \cap B$  die Anzahl der Segmente, die sowohl gemäss dem Dichte Algorithmus, als auch im Benchmark in einem Siedlungsgebiet liegen. Im Optimalfall (Similarity 1) werden alle effektiven Segmente in einem Siedlungsgebiet durch den Dichte-Algorithmus gefunden. Im schlechtesten Fall (Similarity 0) wird durch den Dichte-Algorithmus kein Segment extrahiert, welches effektiv in einem Siedlungsgebiet liegt.

Um die optimalen Input-Parameter zu evaluieren, wurden die Parameter nun für jedes Testgebiet systematisch variiert und dabei die Similarity berechnet. Für die Distanz  $r$  erfolgte die Variation in Schritten von 10 m, zwischen 200 m und 700 m. Für die Variation des Grenzwerts  $g$  erfolgte die Variation in 2er-Schritten von 30 bis 150. Die dabei erhaltenen Similarity Werte sind in [Abb. 78](#) visualisiert. Auffällig ist, dass alle Testgebiete ein ähnliches Muster aufweisen. Die optimalen Input-Parameter Kombinationen sind in einem Streifen vorzufinden, der quer über die Ebene verläuft (von kleinen Werten zu jeweils grossen Werten für  $r$  und  $g$ ). Die schlechtesten Similarity Werte ergeben sich stets für eine sehr grosse Wahl von  $g$  und eine kleine Wahl von  $r$ , was aber offensichtlich ist, weil die Wahrscheinlichkeit in einem sehr kleinen Umfeld eine sehr grosse Menge von Zentroiden zu finden sehr klein ist.



**Abb. 78: Visualisierung der Similarity Werte für die vier Testgebiete**

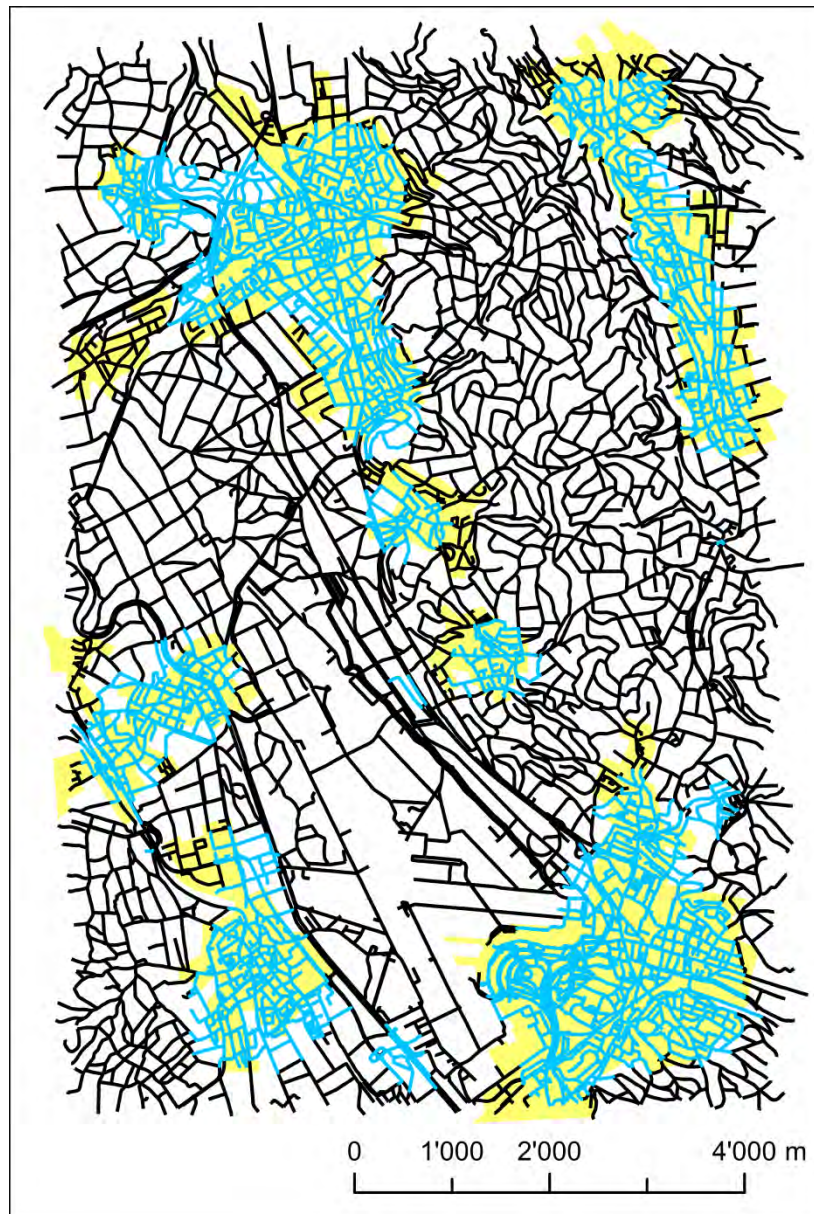
Die Abbildung visualisiert die Similarity Werte in Abhängigkeit der zwei Input-Parameter des Dichte-Algorithmus (Distanz  $r$  und Grenzwert  $g$ ). Die Visualisierung zeigt einen Farbverlauf von Rot (tiefe Werte) über Gelb (mittlere Werte) bis zu Grün (hohe Werte). Alle Testgebiete zeigen ein ähnliches Muster.

Die Input-Parameter Kombinationen, welche für die Testgebiete jeweils den grössten Similarity Wert ergeben, sind in [Tab. 26](#) ersichtlich. Die Distanz  $r$  ist in allen Testgebieten ähnlich. Der Grenzwert  $g$  unterscheidet sich jeweils leicht. Die Resultate, erzielt durch die optimalen Parameter Kombinationen, sind in den [Abb. 79](#) bis [Abb. 82](#) ersichtlich.

**Tab. 26: Optimale Input Parameter für die vier Testgebiete**

Testgebiet	Similarity	Distanz $r$ [m]	Grenzwert $g$
ZU	0.75	440	84
WT	0.69	400	64
SU	0.74	420	64
EN	0.57	440	78



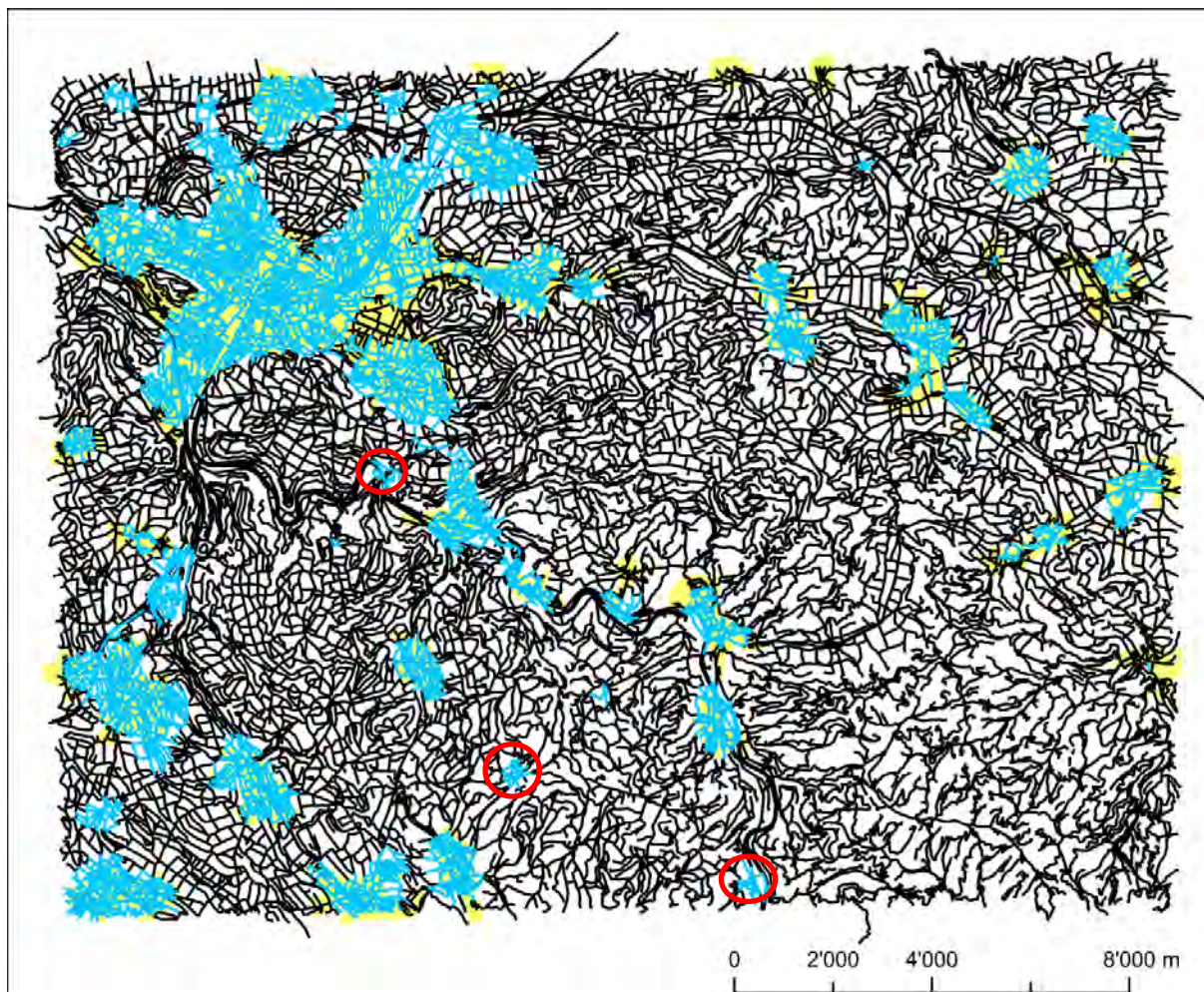


**Abb. 79: Resultate des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet ZU**

Die gemäss dem Dichte-Algorithmus in Siedlungsgebieten gelegenen Segmente sind hellblau symbolisiert. Gelb dargestellt sind die effektiven Siedlungsgebiete aus dem Vector200 Datensatz. (© swisstopo)

Die Segmente in Siedlungsgebieten für das Testgebiet ZU konnten mit dem Dichte-Algorithmus relativ gut extrahiert werden. Zwar gibt es kleine Teilbereiche, die nicht gefunden werden konnten, doch meist sind dies Randgebiete, welche verständlicherweise schwieriger zu detektieren sind, weil es vom Rand aus betrachtet eine Richtung gibt, in der keine Segmente vorzufinden sind. Insbesondere detektiert der Algorithmus keine Cluster von Segmenten in eindeutigen Landgebieten. Alle Cluster, welche er detektiert, sind eindeutig in effektiven Siedlungsgebieten vorzufinden. Die Similarity ist für dieses Testgebiet mit 0.75 auch verhältnismässig gross.



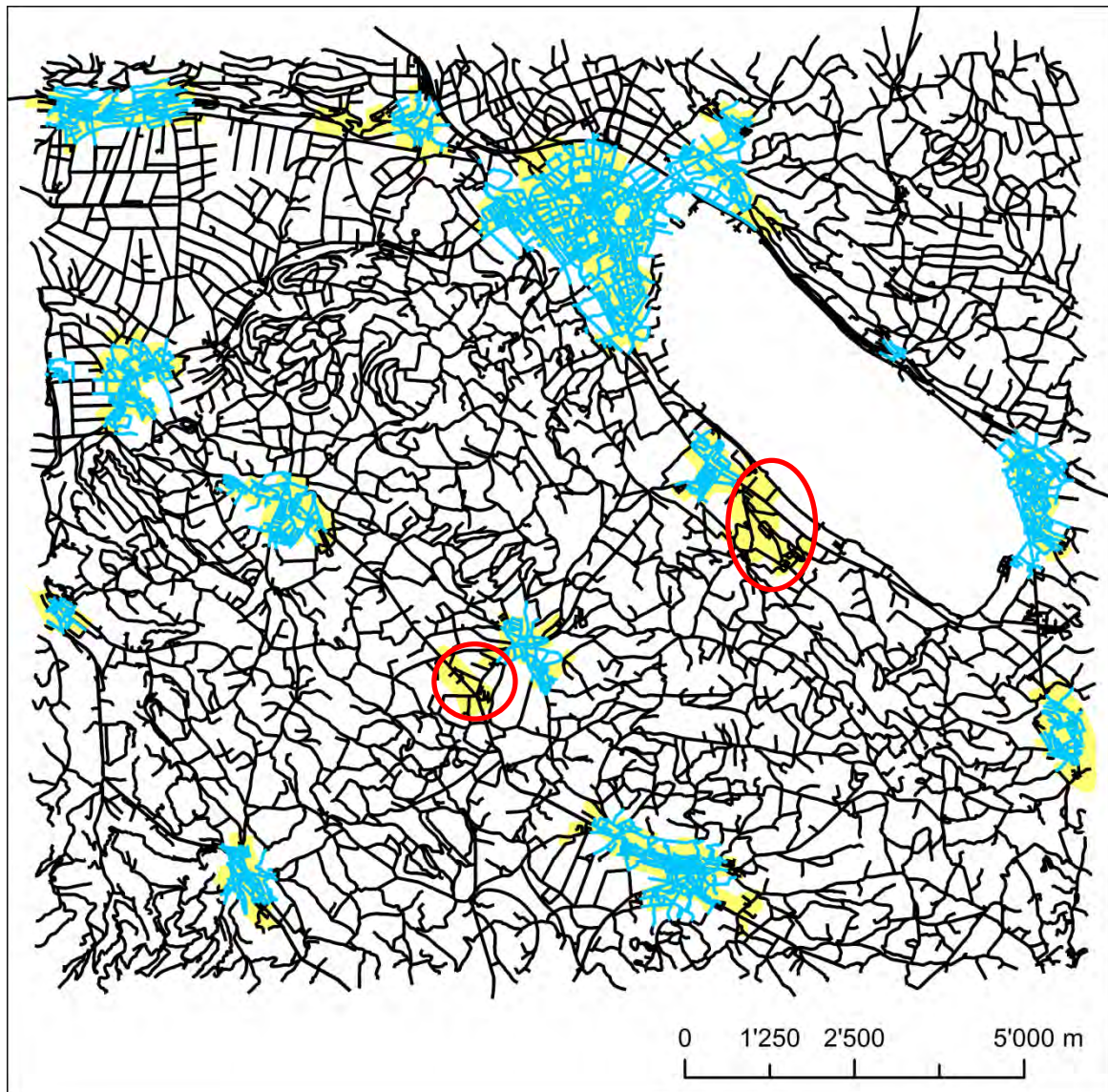


**Abb. 80: Resultat des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet WT**

Die gemäss dem Dichte-Algorithmus in Siedlungsgebieten gelegenen Segmente sind hellblau symbolisiert. Gelb dargestellt sind die effektiven Siedlungsgebiete aus dem Vector200 Datensatz. (© swisstopo)

Auch die Segmente in Siedlungsgebieten für das Testgebiet WT konnten relativ gut extrahiert werden, obwohl die Similarity mit 0.69 etwas tiefer ist. Die grösseren Siedlungsgebiete wurden eigentlich alle gefunden. Etwas problematisch sind erneut gewisse Randgebiete, an denen kleinere Siedlungsgebiete auftauchen, mit dem Dichte-Algorithmus aber nicht gefunden wurden (vor allem am nördlichen und östlichen Rand). Der Effekt ist aber relativ gering. Vereinzelt gibt es kleine Stellen, welche fälschlicherweise detektiert wurden (mittels roten Ellipsen markiert), sie sind verhältnismässig aber eher klein.

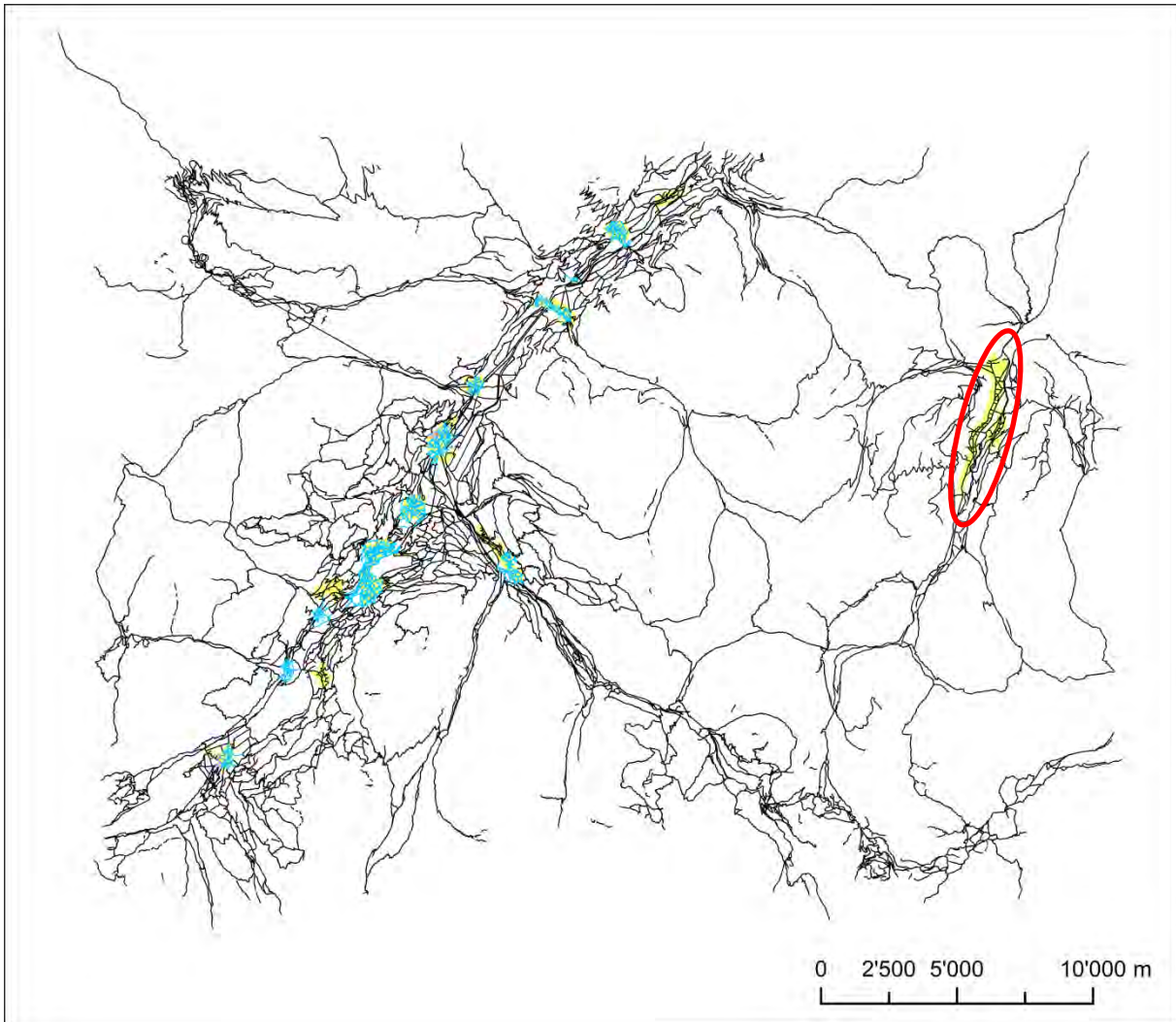




**Abb. 81: Resultat des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet SU**

Die gemäss dem Dichte-Algorithmus in Siedlungsgebieten gelegenen Segmente sind hellblau symbolisiert. Gelb dargestellt sind die effektiven Siedlungsgebiete aus dem Vector200 Datensatz. (© swisstopo)

Auch die Segmente in Siedlungsgebieten für das Testgebiet SU konnten mit dem Dichte-Algorithmus relativ gut extrahiert werden. Allerdings gibt es hier zwei kleinere Gebiete, welche nicht gefunden werden konnten (durch rote Ellipsen markiert). Beim grösseren dieser zwei Gebiete spielt sicher auch der Effekt, dass es an einem See liegt, also in einer bestimmten Richtung gar keine weitere Segmente auftreten können. Auch hier detektiert der Algorithmus keine Cluster von Segmenten in eindeutigen Landgebieten. Die Similarity ist für dieses Testgebiet mit 0.74 ähnlich gross wie für das Testgebiet ZU.



**Abb. 82: Resultat des Dichte-Algorithmus für das Testgebiet EN**

Die gemäss dem Dichte-Algorithmus in Siedlungsgebieten gelegenen Segmente sind hellblau symbolisiert. Gelb dargestellt sind die effektiven Siedlungsgebiete aus dem Vector200 Datensatz. (© swisstopo)

Die Similarity ist für das Testgebiete EN mit 0.57 mit Abstand am kleinsten. Zwar werden auch hier keine grösseren Cluster extrahiert, welche nicht in Siedlungsgebieten liegen, es gibt aber ein grösseres Siedlungsgebiet (markiert durch die rote Ellipse), innerhalb dessen kein einziges Segment durch den Dichte-Algorithmus gefunden wurde. Die verhältnismässig schlechte Detektion ist aber durch die spezielle Struktur des Testgebietes EN begründet.

Grundsätzlich kann argumentiert werden, dass der Dichte-Algorithmus durchaus geeignet ist, wenn man sich den eigentlichen Zweck in Erinnerung ruft, nämlich die Steuerung der Ausdünnung in dichteren Siedlungsgebieten. In keinem Testgebiet werden Segmente durch den Dichte-Algorithmus detektiert, obwohl sie offensichtlich in Landgebieten liegen. Die relativ grossen Siedlungsgebiete, vor allem in den Testgebieten ZU, WT und SU werden sehr zuverlässig detektiert. Obwohl der Dichte-Algorithmus nur einzelne Segmente detektiert und die Modellierung binär ist (das Segment ist in einem Siedlungs- oder Landgebiet) wäre es durchaus möglich auch Siedlungsgebiete als solches (also Polygone) zu bilden. Eine Möglichkeit z.B. bestünde darin, konvexe Hüllen um die einzelnen Cluster von Segmenten zu bilden.



# 6 Resultate und Diskussion

## 6.1 Resultate

Die finalen Resultate, generiert mit allen in Kapitel 5 erwähnten Erweiterungen und Veränderungen, sind in den [Abb. 83](#) bis [Abb. 86](#) dargestellt. Die passenden statistischen Kennzahlen sind in [Tab. 27](#) und [Tab. 28](#) zusammengetragen.

Die Kennzahlen zeigen, dass in allen Testgebieten ca. 70 % der Segmente selektiert wurden. Dabei ist die Selektion von Flächensegmenten verhältnismässig grösser als die Selektion von linearen Segmenten. Weiter wurden in allen Testgebieten sämtliche Segmente, welche selektiert werden müssen ([Tab. 3](#)) und eine grosse Anzahl derjenigen Segmente, welche selektiert werden sollen ([Tab. 4](#)), auch effektiv selektiert. Zudem konnte die Anzahl Treppensegmente stark reduziert werden.

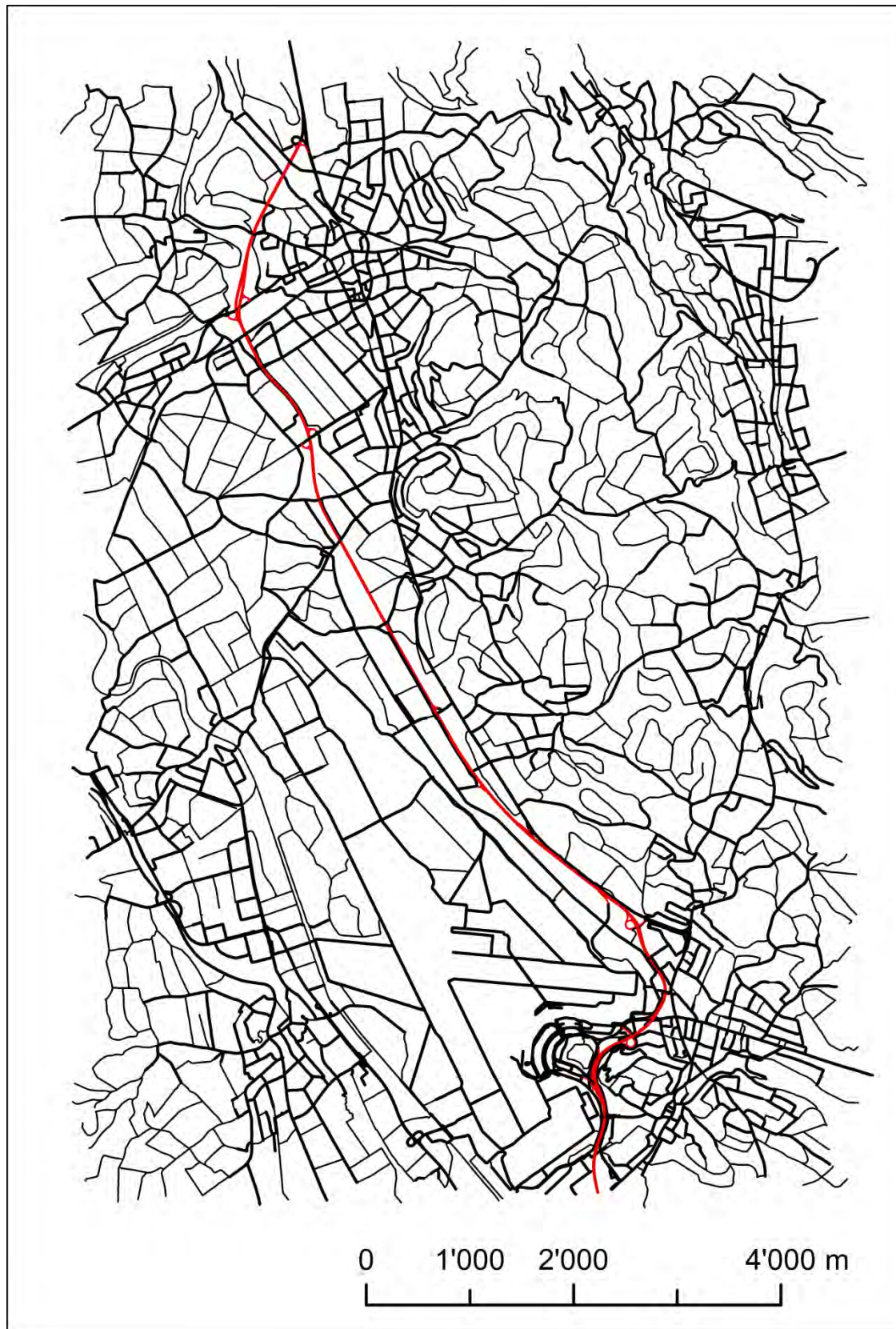
Die Anzahl der Sackgassen ist in allen Testgebieten stark zurückgegangen. In Relation zu den Ergebnissen des unveränderten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes von [Li und Zhou \(2012\)](#) in Abschnitt 4.6 weisen die finalen Resultate eine etwas grössere Anzahl neuer Sackgassen auf. Der Grund liegt einerseits in der Funktionsweise des POI Erschliessungs-Algorithmus. Hierbei dürfen auch neue Sackgassen entstehen, weil sie wichtige Infrastruktur erschliessen. Andererseits tauchen sehr selten Situationen auf, bei denen neue Sackgassen in linearen Strukturen entstehen. [Abb. 50](#) hat eine solche Situation illustrierend dargestellt. Eine solche neue Sackgasse ist aber nicht so schwerwiegend, wie eine neue Sackgasse in einer flächenartigen Struktur, weil es zu keinem Unterbruch der lokalen Konnektivität kommt.

Gut ersichtlich in allen Testgebieten ist auch der Fakt, dass kurze Sackgassen (vor allem auch in Siedlungsgebieten) relativ gut entfernt werden konnten. Besonders im Testgebiet EN sieht man, dass vor allem die langen Strokes in linearen Strukturen selektiert wurden.

Die Average Connectivity ist in allen Testgebieten relativ hoch, allerdings ist sie nicht bei 1. Es ist somit keine vollständige Konnektivität gegeben, was durch die in Abschnitt 5.3 diskutierte Handhabung von isolierten Segmenten begründet ist.

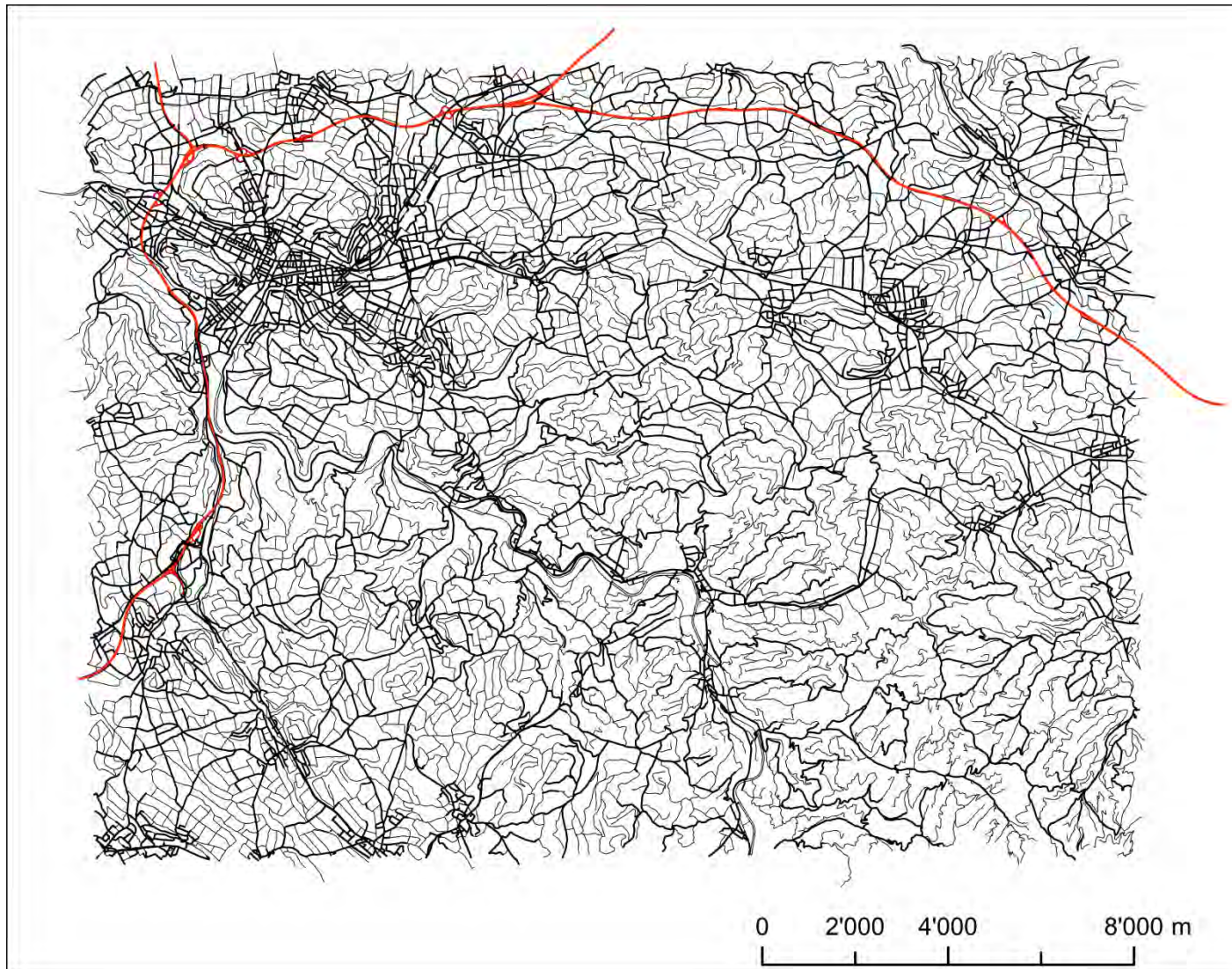
Das Verhältnis aus Segmenten in Siedlungs- und Landgebieten konnte, mit Ausnahme des Testgebietes EN, in welchem das Verhältnis leicht gesunken ist, jeweils konstant gehalten werden. Die Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten konnte also verhältnismässig gleich stark gehandhabt werden. Auch visuell betrachtet zeigen die Resultate ein gutes Gleichgewicht zwischen der Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten. Siedlungsgebiete sind selbst ohne Darstellung anderer Feature Klassen, wie z.B. Häuser, relativ gut erkennbar. Eine Diskussion der Resultate, sowohl quantitativer, als auch qualitativer Natur, folgt in Abschnitt 6.2.





**Abb. 83: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet ZU**  
Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert.  
(© swisstopo)





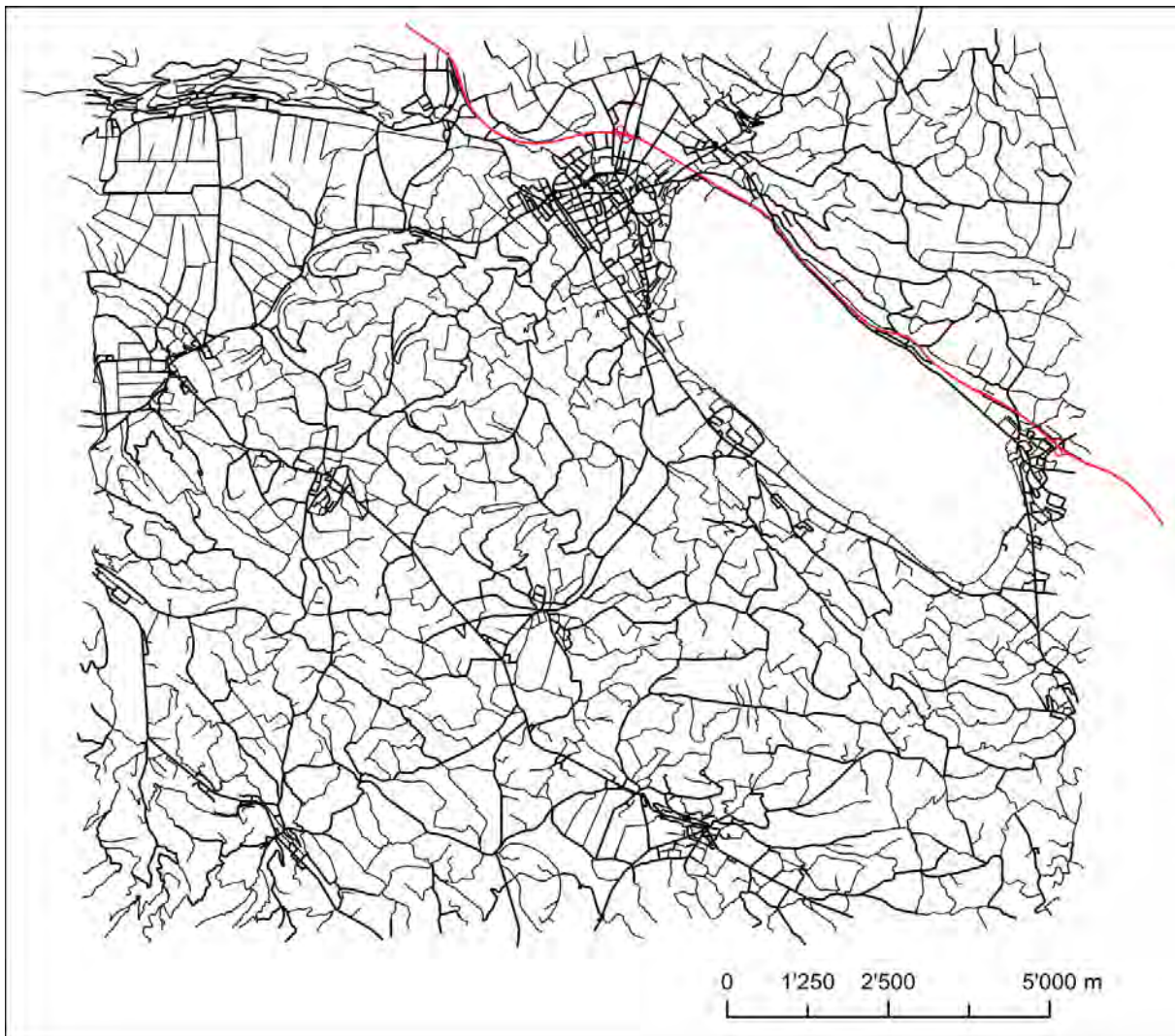
**Abb. 84: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet WT**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Weg mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)

**Tab. 27: Resultate des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (ZU und WT)**

Gegenübergestellt sind die ungeneralisierten Testgebiete (TG) und die Resultate des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (IA).

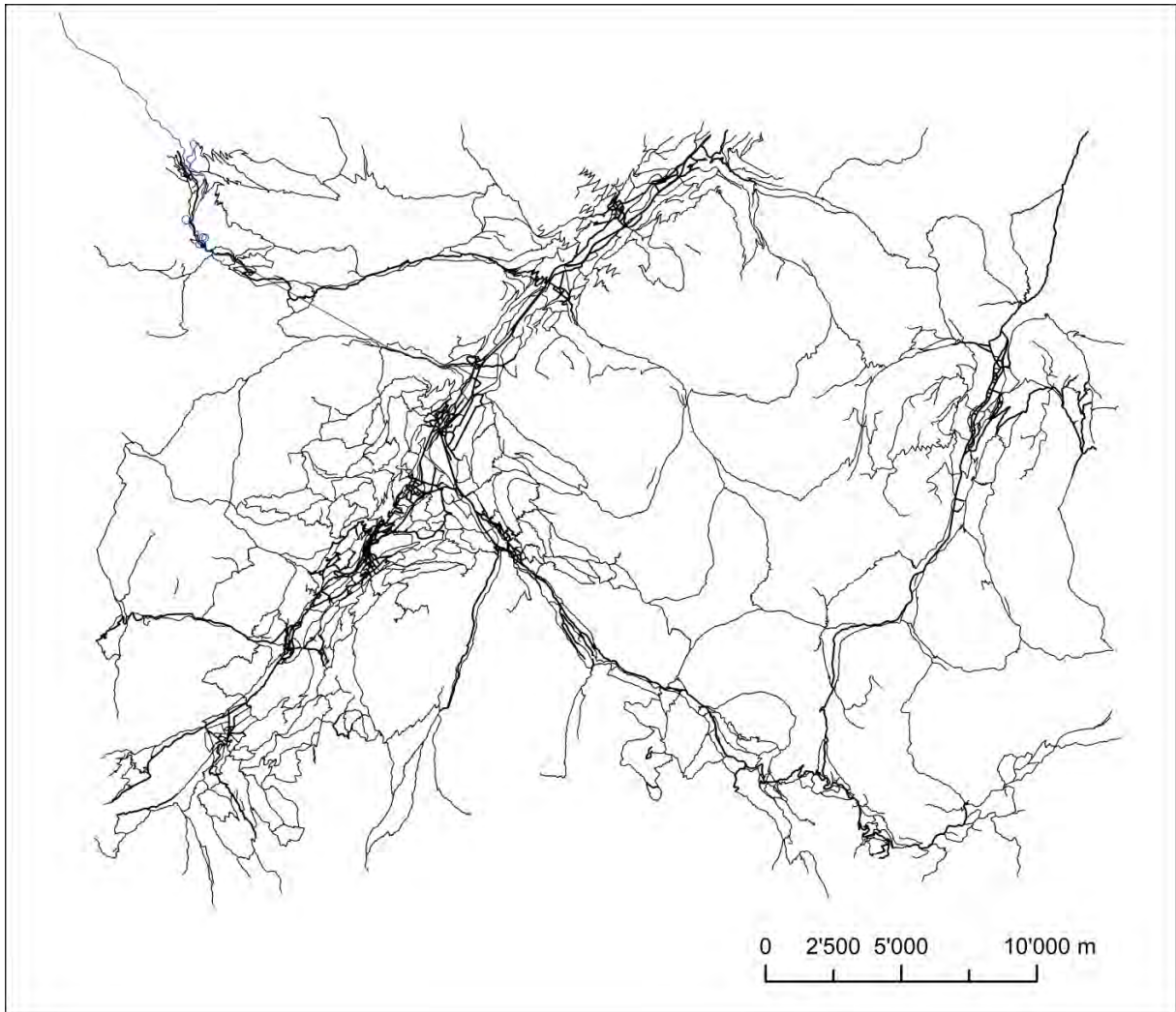
<b>Kennzahl</b>	<b>ZU-TG</b>	<b>ZU-IA</b>	<b>WT-TG</b>	<b>WT-IA</b>
Anzahl Segmente total	8'694	6'092	30'780	21'532
Anzahl lineare Segmente	945	278	2'951	861
Anzahl Flächensegmente	7'749	5'814	27'829	20'671
Länge Segmente total [m]	992'752	718'145	4'368'784	3'132'677
Länge lineare Segmente [m]	119'009	58'009	502'478	236'991
Länge Flächensegmente [m]	873'743	660'136	3'866'306	2'895'686
Anzahl nicht entfernbare Segmente	588	588	1'665	1'665
Anzahl bevorzugte Segmente	195	171	634	504
Anzahl Treppensegmente	16	5	27	8
Anzahl Sackgassen	801	146	2'507	474
Anzahl neue Sackgassen	-	3	-	15
Average Connectivity	0.99905	1.00000	0.99761	0.99876
Verhältnis Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten	0.988	0.988	0.511	0.511



**Abb. 85: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet SU**

Die Objektarten Autobahn, Autostrasse, Ausfahrt, Einfahrt, Zufahrt, Dienstzufahrt und Raststätte sind rot symbolisiert. Die anderen Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. (© swisstopo)





**Abb. 86: Resultat des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes für das Testgebiet EN**

Die Strassen sind mit einer dicken schwarzen Linie und Wege mit einer dünnen schwarzen Linie symbolisiert. Blau symbolisiert sind Autozüge. (© swisstopo)



**Tab. 28: Resultate des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (SU und EN)**

Gegenübergestellt sind die ungeneralisierten Testgebiete (TG) und die Resultate des erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes (IA).

Kennzahl	SU-TG	SU-IA	EN-TG	EN-IA
Anzahl Segmente total	11'129	7'846	8'975	6'323
Anzahl lineare Segmente	1'897	875	1'520	833
Anzahl Flächensegmente	9'232	6'971	7'455	5'490
Länge Segmente total [m]	1'582'041	1'153'835	2'183'795	1'705'090
Länge lineare Segmente [m]	302'108	202'414	429'530	351'282
Länge Flächensegmente [m]	1'279'933	951'421	1'754'265	1'353'808
Anzahl nicht entfernbare Segmente	684	684	445	445
Anzahl bevorzugte Segmente	309	266	659	552
Anzahl Treppensegmente	18	6	18	3
Anzahl Sackgassen	1'533	460	1'302	393
Anzahl neue Sackgassen	-	10	-	11
Average Connectivity	0.99680	0.99641	0.90888	0.96355
Verhältnis Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten	0.517	0.517	0.258	0.256

## 6.2 Diskussion

### 6.2.1 Evaluierungsmethoden

Die Evaluierung der Qualität von Generalisierungsergebnissen wird in der GIScience schon seit mehreren Jahrzehnten diskutiert und konnte bis heute noch nicht abschliessend beurteilt werden (Shea und McMaster 1989, Ehrliholzer 1996, Bard 2004, Mackaness und Ruas 2007, Burghardt et al. 2008, Schmid 2008, Filipovska et al. 2009, Mao et al. 2010).

Das grundlegende Problem der Evaluierung von Generalisierungsergebnissen liegt darin, dass es keinen allgemein gültigen Referenzdatensatz gibt, mit dem ein Resultat verglichen werden kann (Bard 2004). Nichtsdestotrotz gibt es Forscher, welche manuell generalisierte Referenzdatensätze als Benchmark nutzen, um ihre eigenen Ergebnisse mit diesen zu vergleichen (Li und Zhou 2012, Zhou 2012). Das Problem von Referenzdatensätzen als Grundlage einer Evaluierung ist vielfältig. Einerseits ist ein Referenzdatensatz nie vollständig objektiv, weil verschiedene KartographInnen unterschiedliche Vorstellungen und Perzeptionen darüber haben, wie generalisiert werden muss, und daher potentiell unterschiedliche Lösungen entstehen (Spiess 1995, Zhou und Li 2012). Weiter ist es auch schwierig zu beurteilen, worauf allfällige Differenzen zwischen den Resultaten und dem Referenzdatensatz beruhen. So kann der gewählte Ansatz ungenügend sein, die Anforderungen können Unsicherheiten aufweisen oder die Differenzen beruhen auf Fehlern in den Daten (Touya 2010).

In dieser Arbeit wurde bisher eine Evaluierung verfolgt, welche grundsätzlich aus zwei Teilen besteht. Einerseits wurden die Resultate mit den in der Anforderungsanalyse definierten Anforderungen verglichen. Es wurde geprüft, ob und in welchem Ausmass die Anforderungen erfüllt werden konnten. Dieses Vorgehen war quantitativer Natur. Andererseits wurde eine qualitative und visuelle Inspektion der Resultate vorgenommen und spezifische Probleme wurden bildlich hervorgehoben und diskutiert.

Die Evaluierung der definierten Anforderungen orientiert sich an der Constraint-basierten Generalisierung. Dabei wird geprüft, zu welchem Grad die Anforderungen erfüllt wurden. Sie dienen als Referenz der Qualität. Diese Vorgehensweise ist üblich (z.B. Schmid 2008 oder Burghardt et al. 2008) und wurde auch in dieser Arbeit in Kapitel 4, 5 und 6 angewandt. Diese Methode wirkt auf den ersten Blick attraktiv, doch ist sie nicht genügend, weil die Constraints sowohl die Funktionalität des Ansatzes kontrollieren (so wurde beispielsweise

sichergestellt, dass alle zwingend zu selektierenden Segmente auch wirklich selektiert werden), als auch als Basis für die Evaluation dienen, was zur Folge hat, dass die Qualität der generalisierten Resultate unter Umständen als etwas zu optimistisch betrachtet wird (Harrie und Weibel 2007). Aus diesem Grund wurde für die finalen Resultate dieser Arbeit die qualitative Evaluation noch weiter vertieft, nämlich durch eine Beurteilung der Resultate durch Fachpersonen der swisstopo (Abschnitt 6.2.3).

Die Beurteilung der Generalisierungsergebnisse durch Fachpersonen der swisstopo hat zum Ziel, allfällige Schwächen, aber auch Stärken des finalen Verfahrens, respektive dessen Resultate, in Erfahrung zu bringen. Die swisstopo Fachpersonen haben viele Jahre an praktischer Erfahrung in der Kartographie, insbesondere auch in der Selektion von Strassennetzwerken, sammeln können und weisen daher eine spezifische Fachkompetenz auf, welche die des Autors übersteigt. Während einige Stärken und Schwächen offensichtlich sein mögen, können Fachpersonen nuanciert eher gelungene und eher schlechtere Situationen erkennen, welche auf den ersten Blick nicht offensichtlich sind. Das genaue Vorgehen der qualitativen Evaluierung durch Fachpersonen der swisstopo ist in Abschnitt 6.2.3 ersichtlich.

In den folgenden Abschnitten wird sowohl eine quantitative, als auch eine qualitative Evaluierung getätigt. Der Fokus ist aber auf der qualitativen Evaluierung der Fachpersonen von swisstopo, unter anderem auch deshalb, weil viele quantitative Aspekte, vor allem die Auswirkungen der vorgestellten Erweiterungen bereits in Kapitel 5 ausführlich diskutiert wurden.

### 6.2.2 Quantitative Evaluierung

Die in Kapitel 5 vorgestellten Erweiterungen des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes von Li und Zhou (2012), sowie die prinzipielle Konzeption des Stroke- und Maschen-Ansatzes, können garantieren, dass sämtliche Segmente, welche selektiert werden müssen, auch selektiert werden. So werden diese Segmente bevorzugt behandelt und dadurch stets selektiert. Ebenfalls wird eine grosse Menge von Segmenten selektiert, bei denen eine Selektion wünschenswert aber nicht zwingend ist. In linearen Strukturen werden sogar alle selektiert, bedingt durch die Erweiterungen, welche in Abschnitt 5.1 bis Abschnitt 5.3 diskutiert wurden.

Der finale Algorithmus garantiert weiter, dass es zu keinen Unterbrüchen kommt. Dies zeigen auch die Resultate in Abb. 83 bis Abb. 86 sehr gut. Vereinzelt entstehen an Standorten, bei denen POIs durch die Anwendung des POI Erschliessungs-Algorithmus' erschlossen wurden oder in linearen Strukturen, neue Sackgassen. Im ersten Fall ist dies aber erlaubt und in letzterer Situation nicht so schwerwiegend wie in flächenartigen Strukturen (siehe auch Abb. 50).

Inwiefern alle wichtigen Verbindungsstrassen, welche ein potentieller Nutzer einer Karte intuitiv als solche interpretieren könnte (Anforderung 12), beibehalten wurden ist schwierig quantitativ zu beurteilen. Diesbezüglich haben die Fachpersonen der swisstopo mehr Input geben können (siehe Abschnitt 6.2.3). Die Selektion von Sammelstrassen (Anforderung 13) ist ebenfalls schwierig quantitativ zu beurteilen. Der in Abschnitt 4.5.4.3 vorgestellte Mechanismus kann aber garantieren, dass Strassen, welche in Verbindungs- und Durchgangsstrassen münden, bevorzugt selektiert werden.

Die Resultate aller Testgebiete zeigen sehr schön, dass kurze Sackgassen nicht selektiert wurden, es sei denn, sie erschliessen POIs. Der grosse Vorteil des Ansatzes ist, dass die Selektion von kurzen Sackgassen sehr gut mit Hilfe des Stroke-Länge-Grenzwertes in der Behandlung von linearen Strukturen bestimmt werden kann. In dieser Arbeit wurde er auf die Länge des kleinsten Strokes, welcher im reinen Stroke-Ansatz bei einem Selektionsgrad von 70 % noch selektiert würde, festgesetzt. Dies mag für andere Anwendungen (z.B. mit anderen Daten oder anderen Strukturen) nicht die optimale Lösung sein. Da der Stroke-Längen-Grenzwert aber flexibel gesetzt werden kann, können Sackgassen zweckentsprechend selektiert werden.

Weiter kann der POI Erschliessungs-Algorithmus garantieren, dass alle POIs (und damit wichtige Infrastrukturbauten) erschlossen sind (Anforderung 15). Konkret ist bei allen POIs dasjenige Segment, welches die kleinste Distanz zum POI aufweist, selektiert und mit dem Rest des Strassennetzwerkes verbunden.

Die Erhaltung der grundlegenden Struktur des Strassennetzwerkes (Anforderung 16) wurde mit Hilfe der Steuerung der Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten angegangen. Dabei zeigen die Resultate, dass in allen Testgebieten, mit Ausnahme des Testgebietes EN, das Verhältnis der Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten konstant gehalten werden konnte. Mit Hilfe des Maschendichte-Faktors kann also das Ausmass der Ausdünnung in verschiedenen Gebieten elegant gehandhabt werden. Die leichte Abweichung des Verhältnisses im Testgebiet EN lässt sich durch die sehr spezielle Struktur des Strassennetzwerkes und der darin liegenden, eher kleinen, Siedlungsgebiete begründen. [Abb. 77](#) hat gezeigt, dass das Verhältnis der Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten in Abhängigkeit des Maschendichte-Faktors nicht einen perfekten linearen Verlauf zeigt, so wie bei den anderen drei Testgebieten, sondern eine leicht gebogene Kurve. Die Erhaltung des Verhältnisses gestaltet sich dadurch etwas schwieriger. Der Vorteil des Maschendichte-Faktors liegt aber nicht nur in der Steuerung des Verhältnisses der Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten, sondern er kann generell genutzt werden, um das Ausmass der Ausdünnung in vordefinierten Gebieten zu steuern. Die Beibehaltung des Verhältnisses ist nur ein konkretes Beispiel. Vorstellbar wären aber weitere Anwendungen, wie z.B. eine verstärkte Ausdünnung in speziellen Arealen, wie grossen Friedhöfen oder Kasernen.

### 6.2.3 Qualitative Evaluierung durch swisstopo Fachpersonen

Um die Ergebnisse qualitativ zu beurteilen und zu evaluieren, wurden die Resultate zwei Fachpersonen der swisstopo vorgelegt. Beide verfügen über jahrelange Erfahrung in der topographischen Kartographie und insbesondere auch in der Selektion von Strassennetzwerken (38 Jahre respektive 24 Jahre). Die Evaluierung hat sich am Leitfaden von [Mieg und Näf \(2005\)](#) orientiert und bestand aus zwei Teilen. Einerseits wurde den Fachpersonen für jedes Testgebiet ein Fragebogen vorgelegt (vgl. Anhang C). Der Fragebogen erläutert zuerst den Sinn und Zweck dieser Masterarbeit. Anschliessend werden vier kurze Einstiegsfragen gestellt um den fachlichen Hintergrund der Fachpersonen zu erfahren. Die eigentlichen inhaltlichen Fragen (multiple choice) erfolgen dann in verschiedenen Blöcken, bei denen vor allem auch qualitative Aspekte befragt werden. Für jede Frage gab es die Möglichkeit ein Qualitätsurteil zuzuordnen. Dabei wurde folgende Klassifikation von [Ehrlhölzer \(1996\)](#) verwendet:

- Gut
- Akzeptabel
- Schlecht
- Unbrauchbar

Der erste Frageblock bezog sich auf den grundlegenden Grad der Ausdünnung, also wie gesamthaft über das ganze Testgebiet betrachtet die Ausdünnung bewertet wird. Der zweite Frageblock beschäftigt sich mit der Strukturhaltung, einerseits mit der grundlegenden Erhaltung der Struktur über das ganze Testgebiet und andererseits spezifisch mit dem Grad der Ausdünnung bezogen auf die Siedlungs- und Landgebiete. Weiter wurde gefragt, inwiefern intuitiv wichtige Verbindungsstrassen selektiert worden seien. Der letzte Frageblock enthält nur eine Frage, nämlich wie die Entfernung von kurzen Stichstrassen/Sackgassen zu beurteilen sei. Zusätzlich gab es für jede Frage die Möglichkeit eine offene Bemerkung zu notieren. Als Abschluss wurde den Fachpersonen ein grosser Dank ausgesprochen und sie gefragt, ob sie für allfällige Rückfragen zur Verfügung stehen würden und ob sie eine Kopie der fertigen Arbeit erhalten möchten. Der komplette Fragebogen ist im Anhang C einzusehen.

Der zweite Teil der Evaluierung bestand aus einer offenen Beurteilung der erzielten Resultate. Dabei haben die beiden Fachpersonen unabhängig voneinander jedes der vier Testgebiete visuell analysiert und sowohl gute

Beispiele, als auch schlechte Beispiele, direkt im Resultat mit Leuchtstift und Kugelschreiber markiert und jeweils entsprechend kommentiert. Der Fokus war aber auf der Ausarbeitung von Problemzonen, weil diese in weiterführender Forschung angegangen werden könnten. Die Resultate sind in einer ausgeklügelten Symbolisierung, die zusammen mit Dominik Käuferle, meiner ersten Ansprechperson bei swisstopo, erarbeitet wurde, dargestellt. Sie unterscheidet sich von den Symbolisierungen, wie sie in dieser Arbeit bisher erschienen sind, weil die Testgebiete massstabsgetreu (1:50'000) dargestellt und geplottet werden konnten, währenddessen dies für diese Arbeit (auf einem DIN A4 Format) nicht möglich war. Daher hätte diese Art der Symbolisierung die Darstellung unübersichtlich gemacht und teils auch dem Zweck nicht gedient. Weiter sind die Fachpersonen bei swisstopo auch mit einer für sie bestimmten Darstellung vertraut, was die Evaluierung erleichtert. Die vollständigen Plots mit den dargestellten Resultaten und den Markierungen und Kommentaren der Fachpersonen sind im Anhang D ersichtlich.

In den folgenden Abschnitten werden die Resultate der Evaluierung für jedes Testgebiet diskutiert und anschliessend gesamthaft beurteilt. Dabei werden zuerst die Resultate der Fragebögen (eingeteilt nach den Frageblöcken) und anschliessend die Evaluierungsplots analysiert. Dabei werden ausgewählte Problemkategorien, welche in allen Plots vermehrt aufgetreten sind, genauer analysiert und bildlich dargelegt. Um die Resultate der multiple choice Fragen richtig analysieren zu können, muss noch erwähnt werden, dass die Fachpersonen ein *gut* (gemäss der Einteilung von Ehrliholzer (1996)) so interpretierten, dass eine manuelle Nachbearbeitung nicht mehr oder nur sehr vereinzelt notwendig wäre. Weiter gibt es auf den Evaluierungsplots Bereiche, die gar nicht markiert sind. Solche Bereiche stellen Bereiche dar, welche keine grösseren Probleme aufweisen.

### 6.2.3.1 Testgebiet Zürcher Unterland

**Grad der Ausdünnung** Gesamthaft betrachtet haben beide Experten den Grad der Ausdünnung über das ganze Testgebiet als *gut* bezeichnet, wobei ein offener Kommentar noch beinhaltete, dass bei einigen Situationen ein manueller Eingriff noch notwendig wäre (z.B. bei Zufahrten zu Quartieren).

**Strukturerhaltung** Die grundlegende Strukturerhaltung wurde einmal als *gut* und einmal als *akzeptabel* bezeichnet. In Siedlungsgebieten wurde das Resultat als *gut* und als „zwischen *gut* und *akzeptabel*“ bewertet. Ein offener Kommentar bezog sich auch hier wieder auf potentielle manuelle Eingriffe bei Zufahrten zu Quartierstrassen. Allerdings müssten für diesen Entscheidungsprozess auch entsprechende Daten verfügbar sein, welche die einzelnen Häuser darstellen. Die Ausdünnung in Landgebieten wurde beide Male mit *akzeptabel* bewertet. Eine Fachperson war der Meinung, dass in den Landgebieten die Ausdünnung sogar noch etwas stärker hätte sein dürfen. Dieses Problem könnte mit dem Maschendichte Faktor allerdings behandelt werden. Die intuitiv wichtigen Verbindungsstrassen wurden einmal *gut* und einmal *akzeptabel* selektiert.

**Stichstrassen** Die Entfernung von kurzen Sackgassen wurde zweimal als *akzeptabel* bewertet und jeweils mit dem Kommentar versehen, dass einige kürzere Sackgassen, vor allem bei mehreren parallelen kleineren Sackgassen, beispielhaft selektiert werden sollten, wenn sie Häuser erschliessen. Hierzu bräuchte man, aber wie bereits erwähnt, die entsprechende Datengrundlage (d.h. die zusätzliche Feature Klasse Gebäude).

**Evaluierungsplots** Das Feedback der swisstopo Fachpersonen auf den Evaluierungsplots zeigte, neben den im Fragebogen erwähnten Problemen, hauptsächlich auf, dass vereinzelt einzelne Strassen, welche intuitiv als Verbindungsstrassen interpretiert werden können, nicht selektiert wurden (siehe auch [Abb. 89](#) und [Abb. 90](#)). Weiter gibt es vereinzelt Bereiche, bei denen mehrere parallel verlaufende und ausgedünnte Maschen auftreten, bei denen die Ausdünnung etwas weniger stark hätte sein können (siehe auch [Abb. 88](#)). Generell wurden aber auch ganze Ausschnitte, sowohl in Siedlungs-, als auch in Landgebieten, als sehr gelungen markiert.

### 6.2.3.2 Testgebiet Winterthur Tösstal

**Grad der Ausdünnung** Beide Fachpersonen bezeichneten die Ausdünnung gesamthaft über das ganze Testgebiet als *gut*. Allerdings gibt es einzelne Stellen, an denen ein manueller Eingriff nötig wäre.

**Strukturerhaltung** Die grundlegende Strukturerhaltung wurde einmal als *akzeptabel* und einmal als *gut* bezeichnet. In Siedlungsgebieten wurde die Ausdünnung einmal als *gut* und einmal als „zwischen *gut* und *akzeptabel*“ und in Landgebieten als *gut* und *akzeptabel* evaluiert. Im Gegensatz zum Testgebiet ZU, bei dem ein Kommentar notiert war, der besagt, dass die Ausdünnung in Landgebieten etwas stärker hätte sein können, hat eine Fachperson für das Testgebiet WT vermerkt, dass die Ausdünnung in Siedlungsgebieten etwas grösser hätte sein können. Auch das wäre prinzipiell mit Hilfe des Maschendichte-Faktors zu lösen, zeigt aber die grundlegende Problematik auf, wie genau zu bestimmen ist, wie stark die Ausdünnung in verschiedenen Gebieten im Verhältnis zueinander geregelt wird. Die Erhaltung intuitiv wichtiger Verbindungsstrassen haben beide Fachpersonen als *gut* bezeichnet.

**Stichstrassen** Die Entfernung von Stichstrassen haben beide Experten als *akzeptabel* bezeichnet, erneut aber mit dem Vermerk, dass man für eine genauere Beurteilung einen Datensatz mit Häusern bräuchte.

**Evaluierungsplots** Generell wurden auch hier diverse Bereiche in Siedlungs- und Landgebieten als gelungen bezeichnet, bei der keine weitere manuelle Überarbeitung notwendig wäre. Weiter wurden hier erneut intuitiv wichtige Verbindungsstrassen markiert, welche hätten selektiert werden können. Zudem gibt es gewisse Stellen, bei denen parallel verlaufende Strassen zusätzlich hätten selektiert werden können (siehe auch [Abb. 92](#)).

### 6.2.3.3 Testgebiet Sursee

**Grad der Ausdünnung** Beide Fachpersonen haben die gesamthafte Ausdünnung über das ganze Testgebiet als *gut* bezeichnet.

**Strukturerhaltung** Auch die grundlegende Strukturerhaltung wurde *gut* bewertet. In Siedlungsgebieten hat eine Fachperson die Ausdünnung als *gut* und eine als *akzeptabel* bezeichnet. Hierbei wurde von einer Fachperson ein Kommentar vermerkt, dass man die Ausdünnung in Siedlungsgebieten noch etwas hätte verstärken können. Die Ausdünnung in Landgebieten bewerteten beide Fachpersonen als *akzeptabel*, wobei eine Fachperson kommentiert hat, dass die Sackgassen noch etwas stärker hätten reduziert werden können. Das Testgebiet SU hat in der Tat, vor allem auch im Verhältnis zu den anderen Testgebieten (mit Ausnahme des Testgebiet EN), aufgrund seines ländlichen Charakters, viel mehr lineare Strukturen. Es wäre daher eine Überlegung wert, ob man in solchen Testgebieten den Stroke-Längen-Grenzwert etwas höher hätte ansetzen sollen, damit weitere lineare Strukturen entfernt worden wären. Die Erhaltung intuitiv wichtiger Verbindungsstrassen wurde als *gut* und *akzeptabel* bewertet, wobei ein Kommentar besagte, dass es übersichtlich und logisch ausgewählt ist.

**Stichstrassen** Die Entfernung von kurzen Stichstrassen wurde von beiden Fachpersonen als *akzeptabel* bezeichnet, mit dem gleichen Vermerk wie in den Testgebieten ZU und WT.

**Evaluierungsplots** Die meisten markierten Stellen betreffen hier die Selektion von intuitiv wichtigen Verbindungsstrassen, welche vermehrt hätten selektiert werden sollen (siehe auch [Abb. 89](#) und [Abb. 90](#)). Vereinzelt tritt auch hier das Problem auf, dass mehrere parallel verlaufende und ausgedünnte Maschen auftreten, bei denen die Ausdünnung etwas weniger stark hätte sein können (siehe auch [Abb. 88](#)). Zudem wurden auch hier diverse Stellen markiert, die als gelungen bezeichnet wurden, insbesondere vor allem auch in Siedlungsgebieten.



#### 6.2.3.4 Testgebiet Engadin

**Grad der Ausdünnung** Die gesamthafte Ausdünnung über das ganze Testgebiet wurde einmal als *gut* und einmal als *akzeptabel* bewertet, wobei vermerkt wurde, dass eine Selektion in Gebirgsregionen anspruchsvoller ist und die Abhängigkeit von Zufahrten zu Objekten grösser ist.

**Strukturerhaltung** Die grundlegende Erhaltung der Struktur wurde von beiden Fachpersonen als *gut* bezeichnet. Die Ausdünnung in Siedlungsgebieten wurde einmal als *gut* und einmal als *akzeptabel* und in Landgebieten beide Male als *akzeptabel* bewertet. Die Erhaltung intuitiv wichtiger Verbindungsstrassen wurde von beiden Fachpersonen als *gut* evaluiert.

**Stichstrassen** Die Entfernung von kurzen Sackgassen wurde einmal als *gut* und einmal als „zwischen *gut* und *akzeptabel*“ bewertet. Hierbei ist kommentiert worden, dass vor allem ausserhalb der Siedlungen, also die Gebirgsregionen sehr gut generalisiert worden sind, innerhalb der Siedlungsgebiete aber eine manuelle Überarbeitung noch notwendig wäre.

**Evaluierungsplots** Überraschenderweise wurden im Testgebiet EN am wenigsten Stellen markiert. Die Problemzonen umfassen erneut hauptsächlich einzelne Strassen, welche hätten selektiert werden können. Weiter war ein Vermerk, dass ein einzelnes Siedlungsgebiet hätte etwas stärker ausgedünnt werden können. Zudem wurden einzelne Segmente markiert, die hätten entfernt werden können. Diese wurden aber aufgrund ihrer Attribute selektiert, was für die Fachpersonen aber nicht direkt ersichtlich war.

#### 6.2.3.5 Problembereiche

In diesem Abschnitt werden einige Beispiele aus den Evaluierungsplots dargelegt. Dabei werden typische Problembereiche, aber auch gelungene Situationen gezeigt und diskutiert. Die Beispiele, vor allem die Problembereiche beziehen sich vor allem auf Situationen, welche von beiden Fachpersonen unabhängig voneinander, markiert wurden. Die kompletten Evaluierungsplots sind im Anhang D ersichtlich.

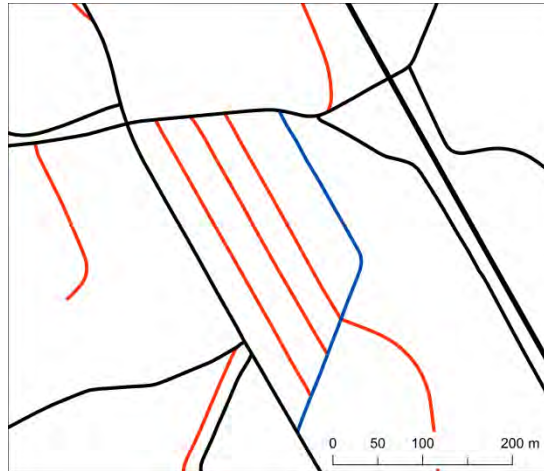
Abb. 87 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus dem Testgebiet ZU, bei dem mehrere kürzere, parallel verlaufende Sackgassen entfernt wurden. Diese Situation ist auch in den anderen Testgebieten teilweise vorhanden. Ein Feedback der swisstopo Fachpersonen diesbezüglich war, dass in einem solchen Fall ein bis zwei Sackgassen als beispielhafte Darstellung selektiert werden können. Allerdings sei dies aber auch stark davon abhängig, ob diese Sackgasse Quartiere erschliessen oder nicht. Diese Datengrundlage war für diese Arbeit aber nicht vorhanden.



**Abb. 87: Parallele Sackgassen**

Schwarz dargestellt sind selektierte und rot eingefärbt die entfernten Segmente. Von den entfernten parallelen Sackgassen hätte eine bis zwei beispielhaft selektiert werden können. (© swisstopo)

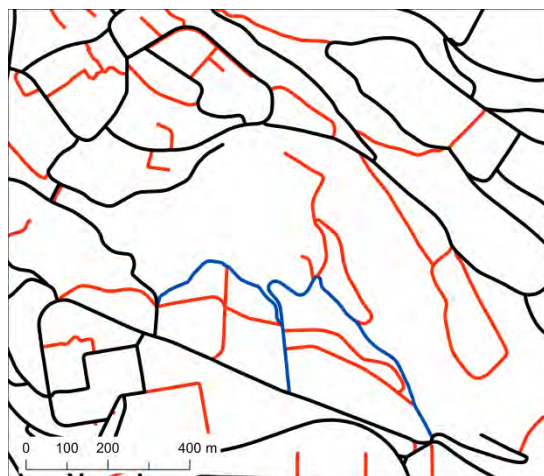
Abb. 88 zeigt eine Situation, ebenfalls aus dem Testgebiet ZU, mit mehreren parallel und länglich verlaufenden Maschen, welche ausgedünnt wurden. Die swisstopo Fachpersonen hätten in diesem Fall die blau markierte Strasse selektiert, damit der äussere Verlauf besser abgebildet wird. Solche Situationen kommen mehrfach vor. Längliche Maschen weisen eine höhere Dichte auf, weil sie im Verhältnis zur Fläche einen relativ grossen Umfang haben und daher vermehrt ausgedünnt werden. Einen Algorithmus zu implementieren, welche solche mehrere parallel verlaufende Maschen mit länglichem Verlauf erkennt und dabei dann den äusseren Verlauf selektiert, ist nicht trivial, könnte diese Problem aber lösen.



**Abb. 88: Parallele Maschen**

Schwarz dargestellt sind selektierte und rot eingefärbt die entfernten Segmente. Die blau dargestellte, ebenfalls entfernte Strasse, hätte selektiert werden können, da sie den äusseren Verlauf abbildet. (© swisstopo)

Abb. 89 zeigt ein Beispiel aus dem Testgebiet ZU, bei dem gemäss swisstopo Fachpersonen die blau markierten Strassen, welche durch den Algorithmus entfernt wurden, hätten selektiert werden können, weil sie intuitive Verbindungsstrassen darstellen. Die Form der Maschen beziehungsweise die allgemeine Situation stellt sich hier als äusserst komplex dar. Das Resultat ist insbesondere auch davon abhängig in welcher Reihenfolge die Maschen aufgelöst werden. Je nachdem welche Masche zuerst aufgelöst wird, entsteht eine andere „Zwischenmasche“, welche in einem nächsten Schritt, aufgrund ihrer hohen Dichte, weiter aufgelöst wird, oder eben nicht, weil die Masche keine hohe Dichte mehr aufweist. Eine entsprechende Regel, welche solche komplexe Situationen handhabt, wäre erneut nicht trivial.



**Abb. 89 Nicht selektierte intuitive Verbindungsstrasse (1)**

Schwarz dargestellt sind selektierte und rot eingefärbt die entfernten Segmente. Die blau dargestellten, ebenfalls entfernten Strassen, hätten selektiert werden können, da sie intuitiv wichtige Verbindungsstrassen repräsentieren. (© swisstopo)

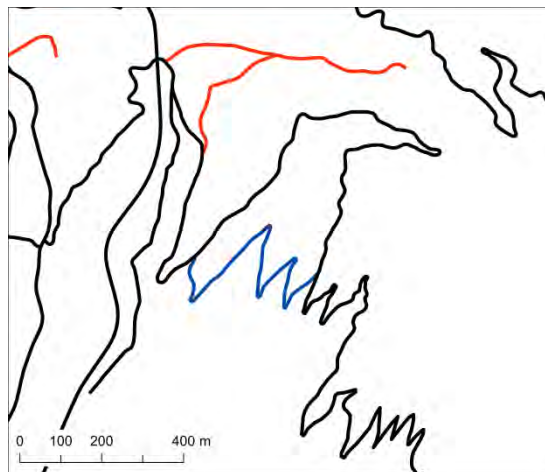
Abb. 90 zeigt ein weiteres Beispiel aus dem Testgebiet SU in einer einfacheren Gegebenheit, bei der eine intuitiv wichtige Verbindungsstrasse (blau symbolisiert) hätte selektiert werden sollen.



**Abb. 90: Nicht selektierte intuitive Verbindungsstrasse (2)**

Schwarz dargestellt sind selektierte und rot eingefärbt die entfernten Segmente. Die blau dargestellte, ebenfalls entfernte Strasse, hätte selektiert werden können, da sie eine intuitiv wichtige Verbindungsstrasse ist. (© swisstopo)

Abb. 91 zeigt ein Beispiel aus dem Untersuchungsgebiet EN. Die blau dargestellte Strasse wurde durch den Algorithmus entfernt, hätte aber selektiert werden können, weil sie eine Abkürzung bildet. Die Strecke über diese Strasse ist etwas kürzer als über die nördlich verlaufende Strasse. Diese Strasse wurde erneut entfernt, weil sie Teil einer äusserst komplexen Masche ist, welche einen verhältnismässig grossen Umfang („Zickzack“-Linien), und daher eine grosse Maschendichte, aufweist. Ein Mechanismus, welcher solche Maschen erkennt und allenfalls deren Maschendichte künstlich tiefer setzt, ist wieder nicht trivial und dürfte unter anderem auch eine grosse Rechenzeit benötigen.

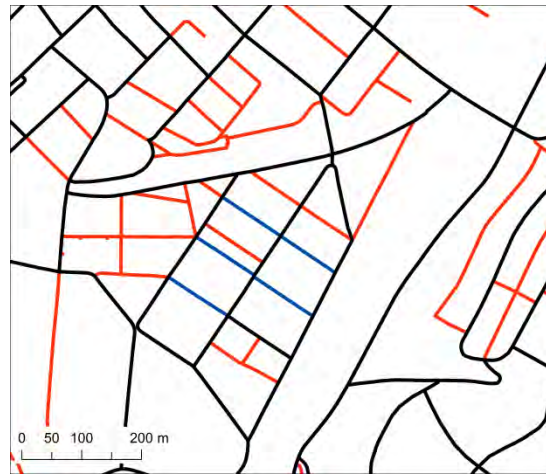


**Abb. 91: Entfernte Abkürzung**

Schwarz dargestellt sind selektierte und rot eingefärbt die entfernten Segmente. Die blau dargestellte, ebenfalls entfernte Strasse, hätte selektiert werden können, da sie eine Abkürzung darstellt. (© swisstopo)

Abb. 92 zeigt eine Situation in einem Siedlungsgebiet aus dem Testgebiet WT mit mehreren parallelen Strassen. Die blau markierten Strassen hätten nicht entfernt werden müssen, sondern hätten ebenfalls selektiert werden können. Sie stellen die Verbindung zwischen den quer verlaufenden Strassen sicher. Die Ausdünnung von

solchen Maschen ist stark abhängig von der Wahl des Maschendichte-Faktors. Wäre dieser hier noch etwas höher angesetzt worden, wären hier einige der Strassen höchstwahrscheinlich erhalten geblieben.



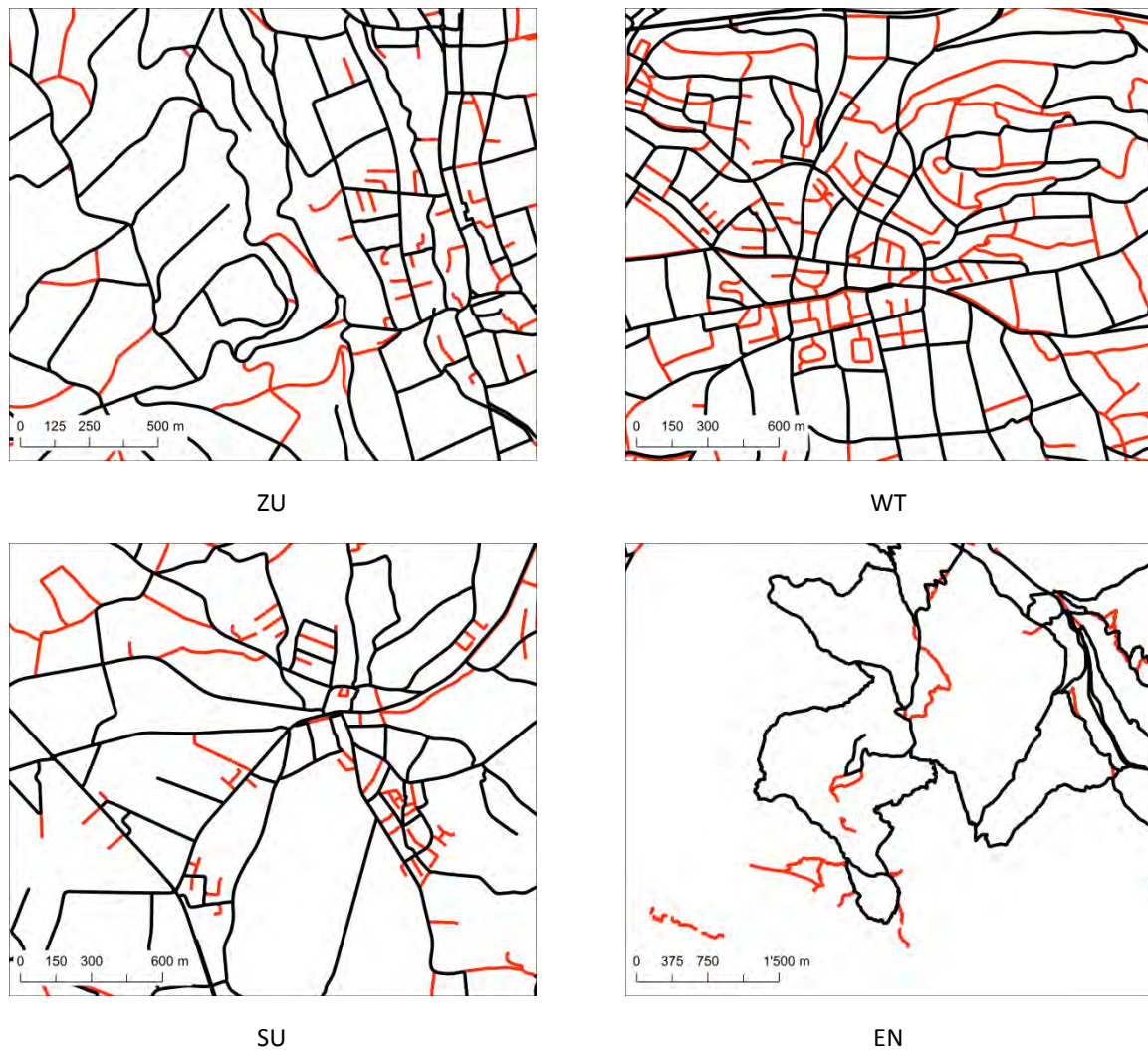
**Abb. 92: Parallele Strassen**

Schwarz dargestellt sind selektierte und rot eingefärbt die entfernten Segmente. Die blau dargestellten, ebenfalls entfernten Strassen, hätten selektiert werden können. (© swisstopo)

#### 6.2.3.6 Gelungene Beispiele

Die swisstopo Fachpersonen haben diverse Bereiche als gelungen markiert, bei denen die Selektion als besonders gut bewertet wurde. Davon ist eine Mischung aus verschiedenen Beispielen in [Abb. 93](#) dargelegt. Für die genaue Übersicht sei auf Anhang D verwiesen.





**Abb. 93: Gelungene Beispiele**

Dargestellt sind vier Beispiele aus den Testgebieten, welche die swisstopo Fachpersonen als gelungen markierten. Sie umfassen Siedlungsgebiete (WT und SU), eine Mischung von Siedlungs- und Landgebieten (ZU) und ein Beispiel aus einem Landgebiet (EN). (© swisstopo)

### 6.2.3.7 Fazit

Die swisstopo Fachpersonen haben die Resultate insgesamt als sehr gut befunden und können sich durchaus vorstellen, dass diese unterstützend in der Vor- und Nachbereitung dienen können. In den Fragebögen wurde kein einziges Mal ein Resultat als *schlecht* oder *unbrauchbar* bewertet, obwohl eine Fachperson noch vermerkt hatte, dass er die Bewertung relativ streng vorgenommen habe. Der Tenor war, dass nur ca. 5 bis 10 % manuell überarbeitet werden müsste. Hauptsächlich betrifft es einzelne intuitive Verbindungsstrassen, welche entfernt wurden, aber hätten selektiert werden sollen. Diesbezüglich stellt sich dann allerdings auch die Frage inwiefern ein Ausdünnungsgrad von 30 % geeignet ist. Eventuell würden genau diese Strassen selektiert, wenn eine weniger starke Ausdünnung verfolgt würde (z.B. 25 %). Diesbezüglich gilt es auch zu erwähnen, dass hauptsächlich vermerkt wurde, dass eine entfernte Strasse hätte selektiert werden können, wohingegen ein Vermerk, dass eine selektierte Strasse hätte entfernt werden sollen, sehr selten notiert wurde. Weiter wurden durch die Evaluation auch etwas die Grenzen des Maschen-Ansatzes aufgezeigt. Komplexere und länglich verlaufende Maschen stellten vermehrt ein Problem dar, welches nicht trivial ist. Insbesondere die Extrahierung von solchen Maschen bedürfte wohl eines komplexeren Regelwerks und einer grösseren Rechenzeit. Allenfalls wäre ein Ansatz, welcher mit Formmassen arbeitet, geeignet, um diese Problematik im Maschen-Ansatz zu berücksichtigen. Das Problem von parallel verlaufenden Sackgassen, welche bestimmte



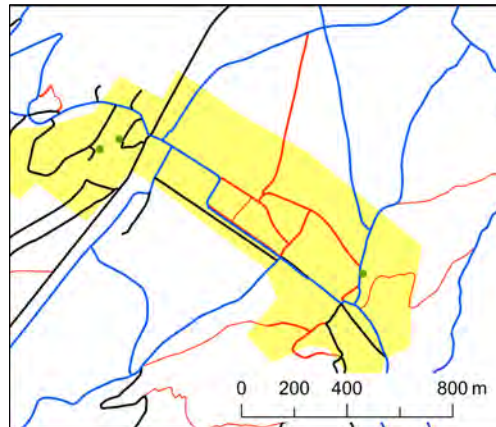
Quartiere erschliessen, kann hingegen gelöst werden. Hierzu bräuchte man allerdings die entsprechenden räumlichen Daten mit der Darstellung der Häuser, sowie einen Mechanismus der parallel verlaufende Sackgassen extrahiert. Interessant ist auch der Fakt, dass die swisstopo Fachpersonen einzelne Siedlungs- und Landgebiete als zu stark beziehungsweise zu wenig stark ausgedünnt bezeichneten, sogar im gleichen Testgebiet. Dies zeigt auf, dass ein ausgewogenes Verhältnis der Ausdünnung in verschiedenen Zonen zu finden nicht trivial ist.

#### 6.2.4 Wanderweg-Problematik

Swisstopo selektiert für ihre Landeskarten mit Massstab 1:50'000 auch sämtliche Wanderwege. Dieses Vorgehen wurde, wie in Abschnitt 3.3.2.1 erwähnt, in dieser Arbeit aber nicht verfolgt. Die Gründe bzw. die dahinterliegende Problematik sollen hier kurz aufgezeigt werden. Grundsätzlich gibt es zwei Probleme.

Das erste Problem besteht darin, dass Wanderwege nicht gleich behandelt werden können, wie andere zwingend zu selektierende Segmente, weil dies zu offensichtlich ungenügenden Resultaten führt. Wanderwege verlaufen oft auch in geringem Abstand parallel zu breiten und wichtigen Strassen. Eine Folge ist, dass die Wanderwege zusammen mit der wichtigen Strasse dichte Maschen bilden. Werden nun aber die Wanderwege bevorzugt behandelt, kann es sein, dass Teile der breiten und wichtigen Strasse entfernt werden, was aber kein wünschenswertes Resultat ergibt. Dieses Problem kann behoben werden, indem der Ansatz verfolgt wird, dass nach der Selektion durch den erweiterten integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz (aber vor der Anwendung des POI Erschliessungs- und Kreisel Detektions-Algorithmus) sämtliche fehlende Wanderweg-Segmente wieder eingefügt werden. Die Wanderwege bilden ein geschlossenes Netz aus Wegen und Strassen. Isoliert vorliegende Wanderweg-Segmente gibt es eigentlich nicht und Sackgassen in flächenartigen Strukturen sind extrem selten und wahrscheinlich eher auf Fehler in den Daten zurückzuführen. Somit können durch die nachträgliche Selektion auch keine Unterbrüche oder neue Sackgassen generiert werden. Diese Herangehensweise hätte für die Testgebiete ZU, WT und SU problemlos funktioniert. Für das Testgebiet EN jedoch hätte diese Herangehensweise nicht funktioniert, weil es verhältnismässig extrem viele Wanderweg-Segmente aufweist. Daraus ergibt sich das zweite Problem.

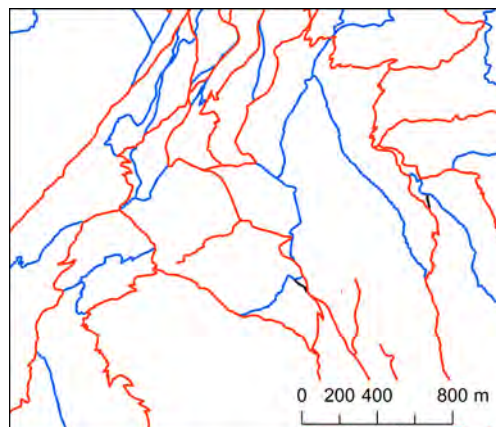
4'467 von insgesamt 8'975 Segmenten bilden im Testgebiet EN Wanderweg-Segmente. Addiert man zu dieser Anzahl auch noch die zwingend und bevorzugt zu selektierenden Segmente, erhält man insgesamt 5'103 Segmente, welche selektiert werden sollten (diese Summe ist nicht gleich der Summe aus Wanderweg-Segmenten und zwingend und bevorzugt zu selektierenden Segmenten, weil einzelne Wanderweg-Segmente auch weitere Attribute aufweisen können, welche eine Selektion notwendig machen). Um eine Selektion von 70 % der Anzahl Segmente durchzuführen, müssen rund 2'693 Segmente entfernt werden. Wenn nun aber die Auswahl derjenigen Segmente, welche entfernt werden dürfen, auf ca. 3'872 Segmente beschränkt wird, führt dies zu sehr schlechten Resultaten, weil sehr oft breitere und wichtigere Strassen entfernt werden müssen, insbesondere auch intuitiv wichtige Verbindungsstrassen, damit der Selektions-Grad von 70 % und die Selektion aller Wanderweg-Segmente noch eingehalten werden kann. [Abb. 94](#) illustriert das Problem in einem gelb gefärbten Siedlungsgebiet. Rot dargestellt sind Strassen (dick) und Wege (dünn), welche im finalen Resultat selektiert werden, bei Berücksichtigung der Wanderwege (blau) aber entfernt werden, damit ein Selektionsgrad von 70 % eingehalten werden kann. Es ist gut ersichtlich, dass diese entfernten Strassen intuitiv wichtige Verbindungsstrassen in einem Siedlungsgebiet bilden, welche für ein gutes Resultat aber zwingend selektiert werden müssen.



**Abb. 94: Entfernung wichtiger Strassen**

Blau (Wanderwege) und schwarz (restliche Strassen und Wege) dargestellt ist das Resultat, bei dem sämtliche Wanderweg-Segmente nachträglich selektiert wurden, insgesamt aber trotzdem ein Selektionsgrad von 70 % verfolgt wurde (bei einem Maschendichte-Faktor von 0.08, siehe auch [Abb. 96](#)). Rot dargestellt sind diejenigen Strassen (dick) und Wege (rot), welche im finalen Resultat selektiert wurden, im Resultat mit Berücksichtigung der Wanderwege aber nicht selektiert werden. Oft sind es Strassen, welche in Siedlungsgebieten (gelb markiert) eine wichtige Funktion einnehmen. POIs sind mit einem grünen Punkt symbolisiert. (© swisstopo)

Die Entfernung solcher wichtiger Strassen ist, wie bereits erwähnt, eine Folge davon, dass verhältnismässig viele Wanderweg-Segmente selektiert werden müssen. Gut ersichtlich ist dies in [Abb. 95](#). Abgebildet ist ein Overlay aus dem finalen Resultat (obere Ebene, rot) und dem Resultat bei Berücksichtigung der Wanderwege (untere Ebene, blau). Hier ist gut ersichtlich, dass sehr viele Wanderweg-Segmente zusätzlich selektiert werden müssen. Eine Folge davon ist, dass an anderen Standorten Segmente entfernt werden müssen, obwohl sie eigentlich wichtig sind ([Abb. 94](#)).

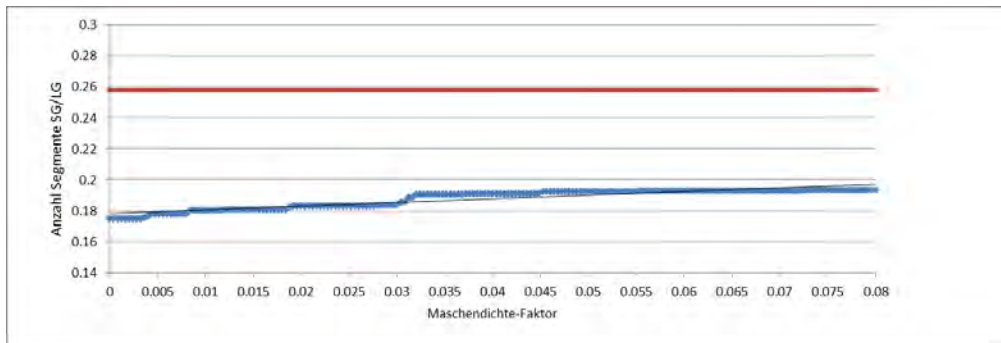


**Abb. 95: Selektion zusätzlicher Wanderwege**

Dargestellt ist ein Overlay aus dem finalen Resultat (obere Ebene, rot) und dem Resultat mit Berücksichtigung von Wanderwegen (untere Ebene, blau). Ersichtlich ist, dass bei der Berücksichtigung von Wanderwegen viele Segmente zusätzlich selektiert werden. (© swisstopo)

Die Problematik kann weiter illustriert werden, wenn man [Abb. 96](#) betrachtet. Geplottet ist das Verhältnis aus der Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten bei variierendem Maschendichte-Faktor unter Berücksichtigung der Wanderwege (nachträgliche Selektion aller Wanderweg-Segmente). Hier ist die Dominanz der Wanderwege sehr gut ersichtlich. Die Kurve verläuft extrem flach und das Verhältnis im ungeneralisierten Testgebiet (rote Linie) kann auch bei sehr grossem Maschendichte-Faktor nicht erreicht werden. Die Dominanz von Wanderweg-Segmenten in Landgebieten ist zu gross. Es gibt vereinzelt sprungartige Anstiege des

Verhältnisses. Begründet sind diese dadurch, dass ab einem gewissen Maschendichte-Faktor einzelne Maschen in Landgebieten ausgedünnt werden und im Nachhinein nicht wieder durch die Selektion der Wanderweg-Segmente *hergestellt* werden.



**Abb. 96: Problematik der Strukturhaltung bei Berücksichtigung von Wanderwegen**

Das Diagramm zeigt das Verhältnis aus der Anzahl Segmente in Siedlungs- und Landgebieten bei variierendem Maschendichte-Faktor unter Berücksichtigung der Wanderwege. Ersichtlich sind zwei Punkte: (1) sprungartige Anstiege des Verhältnisses bei steigendem Maschendichte-Faktor und (2) eine unmögliche Strukturhaltung auch bei sehr grossem Maschendichte-Faktor. Die rote Linie repräsentiert das Verhältnis im ungeneralisierten Testgebiet.

Die beiden Probleme haben zu der Entscheidung geführt, dass die Selektion der Wanderwege in dieser Arbeit nicht als harte Anforderung verfolgt wird. Das erste Problem hätte für die Testgebiete ZU, WT und SU durch die nachträgliche Selektion von Wanderweg-Segmenten gelöst werden können, insofern als dass gute Resultate hätten generiert werden können. Nichtsdestotrotz hat diese Vorgehensweise auch einen Nachteil. Ein Ziel dieser Arbeit bestand darin, verschiedene Algorithmen zur automatischen Selektion von Strassennetzwerken auszuwerten. Wenn nun aber bestimmte Segmente nachträglich wieder eingefügt werden, werden inhärente Probleme der Algorithmen (z.B. die Generierung neuer Sackgassen im Stroke-Ansatz oder die Vernachlässigung von linearen Strukturen im Maschen-Ansatz) künstlich *überspielt*. Eine sinnvolle, vergleichbare und aussagekräftige Auswertung wäre so nicht möglich gewesen. Das zweite Problem betrifft nur das Testgebiet EN. Eine Vergleichbarkeit mit den Resultaten in anderen Testgebieten und eine Analyse der Auswirkungen der Algorithmen auf die geometrischen und topologischen Strukturen wären nicht möglich gewesen, weil die Dominanz der Wanderwege zu gross ist. Ein Experte der swisstopo hat auch noch verlautet, dass ihm erst nach der Evaluation des Testgebietes EN aufgefallen sei, dass dort teils sehr spezifische Anforderungen verfolgt werden müssen. Insbesondere wäre hierbei auch zu prüfen, ob eine Strukturhaltung bezüglich Siedlungs- und Landgebieten auch hier zu 100 % verfolgt werden sollte, wenn alle Wanderwege selektiert werden. Weiter wurde in dieser Arbeit das Ziel verfolgt, dass die Algorithmen auch mit räumlichen Daten aus anderen Ländern mit anderen Anforderungen funktionieren würden. Wenn aber länderspezifische Attribute die Algorithmen derart stark einschränken, sind eine Verallgemeinerbarkeit und eine sachliche Beurteilung der eigentlichen Wirkungsweise der grundlegenden Algorithmen nicht möglich. Obwohl die Wanderwege in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden, konnte jeweils trotzdem ein sehr grosser (und erstaunlicherweise in allen Testgebieten ähnlich) grosser Anteil aller Wanderwege selektiert werden (rund 83 % für die Testgebiete ZU, WT, und SU und 82 % für das Testgebiet EN).

Für swisstopo kann das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren (inkl. der nachträglichen Selektion der Wanderwege) aber nichtsdestotrotz verwendet werden, weil es sehr flexibel ist. Das Verfahren ermöglicht eine massgeschneiderte Selektion. So kann z.B. das Testgebiet EN trotzdem sinnvoll für ihren Zweck (inkl. aller Wanderwege) selektiert werden, wenn ein anderer Selektionsgrad verfolgt wird (beispielsweise eine Selektion von 80 % bis 85 % der Anzahl Segmente).

### 6.3 Beantwortung der Forschungsfragen

In Abschnitt 2.3 wurden vier Forschungsfragen formuliert, die in diesem Abschnitt nun abschliessend diskutiert und beantwortet werden sollen.

---

*Inwiefern können die drei Basisalgorithmen für den Zielmassstab von 1:50'000*  
**FF<sub>1</sub>** *zufriedenstellende Resultate generieren? Welcher der drei Basisalgorithmen generiert die besten Resultate?*

---

Die drei Basisalgorithmen (Stroke-Ansatz von [Thomson und Richardson \(1999\)](#), Maschen-Ansatz von [Hu et al. \(2007\)](#) und [Chen et al. \(2009\)](#), sowie der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von [Li und Zhou \(2012\)](#)) generieren sehr unterschiedliche Resultate. Sie werden daher einzeln diskutiert.

**Stroke-Ansatz** Der Stroke-Ansatz von [Thomson und Richardson \(1999\)](#) kann für den Zielmassstab von 1:50'000 keine zufriedenstellenden Resultate generieren. Wichtige Anforderungen werden klar verletzt. Das grösste Problem besteht darin, dass der Stroke-Ansatz lokale Unterbrüche im Strassennetzwerk generiert. Dabei entstehen lokal neue Sackgassen an Standorten, an denen im ungeneralisierten Strassennetzwerk keine Sackgassen vorhanden sind. Dieser Sachverhalt verstösst gegen die Anforderungen 5 und 6 aus der Anforderungsanalyse. Obwohl der Stroke-Ansatz in der Literatur verbreitet ist und oft als direkte oder indirekte Basis für die Selektion dient, ([Thomson und Richardson 1999](#), [Thomson und Brooks 2000](#), [Chaudhry und Mackaness 2005](#), [Liu et al. 2010](#), [Touya 2010](#), [Yang et al. 2011](#), [Li und Zhou 2012](#), [Zhou 2012](#)), wird dieses Problem nur von verhältnismässig wenigen Autoren erwähnt ([Li und Zhou 2012](#), respektive [Zhou 2012](#)), obschon die neuen Sackgassen in den vorgestellten Resultaten sehr gut ersichtlich sind. Ein weiteres Problem besteht darin, dass der Stroke-Ansatz die Konnektivität nicht erhalten kann. Er generiert Resultate, bei denen die Strassensegmente isoliert vorliegen, also nicht mit dem Rest des Strassennetzwerkes verbunden sind, obwohl sie das im ungeneralisierten Strassennetzwerk waren. Dieser Sachverhalt verstösst gegen die Anforderung 7 aus der Anforderungsanalyse. Dieses Problem wäre insofern lösbar, als dass bereits Mechanismen vorgestellt wurden, welche garantieren können, dass das Strassennetzwerk verbunden bleibt ([Thomson und Brooks 2000](#), [Yang et al. 2011](#)). Das Problem der lokalen Unterbrüche und der Generierung von neuen Sackgassen bleibt aber dadurch bestehen. Der Stroke-Ansatz zeigt aber keine Probleme, bei der Anforderung, gewisse Strassensegmente zwingend oder bevorzugt zu selektieren. Einfache Mechanismen können die Selektion solcher Strassensegmente garantieren. Inwiefern der Stroke-Ansatz die weichen Anforderungen aus der Anforderungsanalyse erfüllen kann, ist schwieriger zu beurteilen. Intuitive Verbindungs- und Sammelstrassen werden tendenziell aber relativ gut selektiert, da sie im ungeneralisierten Strassennetzwerk meistens längere Verkehrsachsen bilden und daher bei einer eher schwachen Ausdünnung für einen Zielmassstab von 1:50'000 selektiert werden. Zudem entfernt der Stroke-Ansatz kürzere Sackgassen, welche bereits im ungeneralisierten Strassennetzwerk bestehen, sehr zuverlässig, weil kurze Sackgassen stets kürzere Strokes bilden.

Abschliessend beurteilt kann argumentiert werden, dass der Stroke-Ansatz kein zufriedenstellendes Resultat generiert, hauptsächlich wegen der Generierung lokaler Unterbrüche und damit gekoppelt neuer Sackgassen. Eine parallel verlaufende Arbeit ([Weiss 2013](#)), welche mit einem deutlich kleineren Massstab von 1:200'000 arbeitet, hat jedoch mehr Stärken für den Stroke-Ansatz finden können, insbesondere wenn er mit Zentralitätsmassen aus der Graphentheorie gekoppelt wird.

**Maschen-Ansatz** Der Maschen-Ansatz von [Hu et al. \(2007\)](#) und [Chen et al. \(2009\)](#) hat den Vorteil, dass keine neuen Sackgassen und lokale Unterbrüche generiert werden. Die ausdrücklichen Schwächen des Stroke-Ansatzes treten im Maschen-Ansatz also nicht auf. Ein potentiell Problem hingegen stellt die Tatsache, dass der Maschen-Ansatz einzelne Segmente isolieren kann ([Li und Zhou 2012](#)), die Konnektivität also nicht erhalten bleibt. Obwohl diese Situation nur selten auftaucht (in keinem der vier Testgebiete dieser Arbeit) ist dies ein

konzeptionelles Problem, welches die Anforderung 7 aus der Anforderungsanalyse verletzt. Das grundlegende Problem des Maschen-Ansatzes besteht darin, dass er lineare Segmente in linearen Strukturen nicht behandelt (Li und Zhou 2012). Dieser Sachverhalt hat auch zur Folge, dass nicht alle zwingend und bevorzugt zu selektierenden Segmente in den linearen Strukturen effektiv selektiert werden können. Eine Beurteilung, inwiefern wichtige Verbindungsstrassen, die ein potentieller Nutzer einer Karte intuitiv als solche interpretieren könnte, selektiert wurden ist schwierig zu beurteilen, weil nicht eindeutig klar ist, wer welche Strasse intuitiv als wichtige Verbindungsstrasse interpretiert und der Maschen-Ansatz im Gegensatz zum Stroke-Ansatz nicht per se die längeren Achsen selektiert. Nichtsdestotrotz können intuitiv wichtige Verbindungsstrassen durch die Bevorzugung von Segmenten, welche einen hohen Grad des Strokes aufweisen, und auch Sammelstrassen mit Hilfe des in Abschnitt 4.5.43 erwähnten Prinzips bevorzugt selektiert werden. Kurze Sackgassen werden vollständig entfernt, da diese stets aus linearen Segmenten bestehen. Die grundlegenden Strukturen der Strassennetze werden schlecht erhalten, alleine schon durch den Fakt, dass sämtliche lineare Segmente nicht selektiert werden.

Abschliessend beurteilt kann argumentiert werden, dass der Maschen Ansatz kein zufriedenstellendes Resultat generiert, hauptsächlich wegen der Missachtung der linearen Strukturen.

**Integrierter Stroke-Maschen Kombinationsansatz** Der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von Li und Zhou (2012) hat die Stärke, dass er die Vorteile des Stroke- und Maschen-Ansatzes kombiniert. Konkret werden keine lokalen Unterbrüche und keine neuen Sackgassen (mit einzelnen seltenen Ausnahmen in linearen Strukturen) generiert und die Konnektivität bleibt erhalten. Zudem werden auch die linearen Strukturen behandelt. Diese Handhabung ist aber etwas problematisch. Insbesondere der Top-Down Ansatz, aber auch die Vernachlässigung von linearen Strukturen, falls sie mit einer ausgedünnten Masche verbunden sind, sowie die Vernachlässigung von isolierten Segmenten kann konzeptionell nicht garantieren, dass alle zwingend und bevorzugt zu selektierenden Segmente in den linearen Strukturen effektiv selektiert werden. Weiter stellen Kreisel ein grundlegendes Problem dar, weil sie aufgrund ihrer hohen Maschendichte stets aufgelöst werden, in den Resultaten aber entweder gar nicht oder aber dann vollständig selektiert werden sollten. Intuitiv wichtige Verbindungsstrassen, sowie Sammelstrassen können relativ gut selektiert werden, weil derselbe Mechanismus wie im Maschen-Ansatz verwendet wurde. Zudem können kurze Sackgassen mit Hilfe des Stroke-Längen-Grenzwerts elegant und flexibel entfernt werden. Obwohl die grundlegende Struktur visuell besser erhalten worden ist als im reinen Stroke- und Maschen Ansatz, gibt es auch in den Resultaten des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes Situationen bei denen die allgemeine Struktur nicht erhalten geblieben ist. Insbesondere die verstärkte Ausdünnung in dichteren Siedlungsgebieten, im Vergleich zu ländlicheren und weniger dicht besiedelten Gebieten, ist ungenügend. Dies ist aber auch der Fall bei den Resultaten der reinen Stroke- und Maschen-Ansätze.

Abschliessend kann beurteilt werden, dass der integrierte Stroke-Maschen Ansatz von Li und Zhou (2012) teilweise zufriedenstellende Resultate generieren kann. Von den drei Basisalgorithmen produziert er klar die besten Resultate. Die Nachteile sind verhältnismässig kleiner und einfacher zu bewältigen. Daher wurde für die Erweiterungen auf dieser Basis gearbeitet.

---

**FF<sub>2</sub>** *Inwiefern können weitere intrinsische, aus dem Strassennetzwerk abgeleitete, Regeln und Algorithmen das Resultat verbessern?*

---

Insgesamt wurden vier intrinsische Regeln und Algorithmen abgeleitet. Die Verwendung eines Bottom-Up Ansatzes anstelle des von Li und Zhou (2012) verwendeten Top-Down Ansatzes bewirkt, dass lange Strokes auch selektiert werden können, falls sie in tieferen Ebenen der linearen Baumhierarchie vorkommen und in den höheren Ebenen (im Extremfall der Wurzelknoten) kurze Strokes vorhanden sind. Fast bedeutsamer ist aber der Fakt, dass dadurch Segmente in linearen Strukturen, welche zwingend erhalten bleiben müssen (Tab. 3) oder sollen (Tab. 4), auch effektiv selektiert werden können. Konkret konnten in allen Testgebieten mehr



bevorzugte Segmente selektiert werden. Zwingend zu selektierende Elemente waren nicht betroffen, da diese hauptsächlich in Flächensegmenten oder in linearen Segmenten geringer Tiefe vorkommen. Für andere Datensätze muss dies aber nicht unbedingt der Fall sein.

Ein zweiter implementierter Algorithmus war der Stroke-Reconnection-Algorithmus. Auch er bewirkt eine Veränderung in den linearen Strukturen des Strassennetzwerkes und kann das Resultat insofern verbessern, als dass lineare Strukturen, welche an dichte und daher aufgelöste Maschen grenzen, überhaupt behandelt werden können. Ob sie dann effektiv selektiert werden oder nicht ist abhängig von der Länge der Strokes oder ihrer Attributzugehörigkeit. Spezifisch konnten durch die Anwendung des SR-Algorithmus in allen Testgebieten mehr bevorzugte Segmente selektiert werden. Weiter wurde in allen Gebieten eine verhältnismässig grosse Menge an zusätzlichen Strokes aufgrund ihrer Länge selektiert. Ein Beispiel, welches die Wirkung des SR-Algorithmus sehr gut aufzeigt, ist der Stroke im Testgebiet EN mit seiner sehr grossen Länge von 1871 m, welcher nur durch die Anwendung des SR-Algorithmus selektiert werden konnte.

Die dritte implementierte Regel besagt, dass auch isolierte Segmente selektiert werden können, falls dies ihre Attributzugehörigkeit oder ihre Länge verlangt. Diese Regel verbessert das Resultat insofern, als dass z.B. im Testgebiet EN Segmente selektiert werden konnten, welche zwingend selektiert werden müssen. Weiter konnten auch zusätzliche Segmente selektiert werden, die bevorzugt selektiert werden sollten. In der Literatur wird oft die Meinung vertreten, dass isolierte Segmente entfernt werden sollten und das generalisierte Strassennetzwerk eine vollständige Konnektivität aufweisen muss (z.B. [Thomson und Brooks 2000](#), [Chaudhry und Mackaness 2005](#), [Li und Zhou 2012](#)). Dies mag für gewisse Anwendungen und Zielmasstäbe auch tatsächlich der Fall sein, doch in dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die Selektion von isolierten Segmenten durchaus möglich ist, sofern sie bereits im ungeneralisierten Strassennetzwerk isoliert vorliegen. Konkret konnte durch diese Regel, auch wenn die Auswirkungen kleiner als die Auswirkungen des Bottom-Up Ansatzes und des SR-Algorithmus sind, ein grösserer Teil der Anforderungen erfüllt werden.

Die letzte aus dem Strassennetzwerk selbst abgeleitete Regel ist die korrekte Darstellung von Kreisel und betrifft daher die Flächensegmente. So wurde als Constraint gesetzt, dass Kreisel entweder komplett selektiert werden sollten, oder aber dann vollständig entfernt werden. Die hohe Maschendichte von Kreiseln bewirkt sonst, dass einzelne Flächensegmente, welche die Kreisel begrenzen, entfernt werden. Die Kreisel liegen anschliessend in einer korrupten Form vor. Um solche korrupten Kreisel nach dem Selektionsprozess wieder komplett zu selektieren, wurde ein Kreisel Detektions-Algorithmus vorgestellt. Der Detektions-Algorithmus erweitert die schon bestehenden Varianten ([Mackaness und Mackechnie 1999](#), [Heinzle et al. 2007](#), [Touya 2010](#), [Yang et al. 2011](#)) Kreisel zu detektieren. Im Gegensatz zu der Methodik von [Mackaness und Mackechnie \(1999\)](#) und [Yang et al. \(2011\)](#), welche Cluster-basiert sind und unter anderem auch andere komplexe Kreuzungen und damit nicht nur Kreisel detektieren und der Methodik von [Touya \(2010\)](#), welche Kreisel mit Hilfe eines Kompaktheitsmasses detektiert und damit ebenfalls fehleranfällig ist, basiert der Detektionsalgorithmus dieser Arbeit auf Strokes (die genaue Methodik des von [Heinzle et al. \(2007\)](#) verwendeten Algorithmus wird nicht genauer erläutert). Er extrahiert Kreisel als zirkuläre Strokes mit einer maximal erlaubten Länge. Er ist fähig *sämtliche* Kreisel in allen Testgebieten zu extrahieren. Wie gut die Kreisel Detektions-Algorithmen aus der erwähnten Fachliteratur funktionieren, wird dort nicht erwähnt. Mit Hilfe des implementierten Kreisel Detektions-Algorithmus kann der definierte Constraint, dass Kreisel entweder komplett selektiert werden, oder dann aber vollständig entfernt werden sollen, in vollem Umfang erfüllt werden und das Generalisierungsergebnis dadurch verbessert werden.

Zusammenfassend kann argumentiert werden, dass die aus dem Strassennetzwerk abgeleiteten Regeln und Algorithmen das Generalisierungsergebnis verbessern, dadurch dass die Anforderungen besser erfüllt werden können und zusätzlich gesetzte Constraints umgesetzt werden können.

---

**FF<sub>3</sub>** *Wie können Informationen aus anderen Feature Klassen und daraus abgeleitete extrinsische Regeln und Algorithmen das Resultat optimieren?*


---

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei andere Feature Klassen eingesetzt und darauf basierend Regeln und Algorithmen abgeleitet.

Die erste Regel basiert auf einem räumlichen Datensatz mit Punkt-Objekten (POIs) und stellt sicher, dass sämtliche POIs erschlossen sind. POIs sind prinzipiell nicht immer an wichtigen Verkehrsachsen, welche im Selektionsprozess sowieso selektiert werden, sondern können durchaus auch in ländlicheren Regionen vorkommen. Daher ist eine Verwendung einer externen Feature Klasse sinnvoll. Der vorgestellte und auf dem A\*-Algorithmus basierende POI Erschliessungs-Algorithmus kann sicherstellen, dass alle definierten POIs erschlossen sind. Dadurch kann die Anforderung 15 erfüllt werden. Insgesamt musste in allen Testgebieten rund ein Drittel der POIs mit Hilfe des vorgestellten Algorithmus erschlossen werden. Die anderen zwei Drittel waren bereits schon erschlossen. Dieses Verhältnis ist aber stark massstabsabhängig. Wäre der Zielmasstab viel kleiner, würden weniger Strassen selektiert und dadurch die Wahrscheinlichkeit steigen, dass weitere POIs nicht mehr erschlossen sind und daher wieder künstlich mit Hilfe des Algorithmus erschlossen werden müssten. Der grosse Vorteil des POI Erschliessungs-Algorithmus ist der Fakt, dass er auch für flächenartige Objekte (Polygone) funktionieren würde. Hierzu könnten z.B. die Polygone auf ihren Schwerpunkt abgebildet werden und dieser anschliessend als Input des POI Erschliessungs-Algorithmus verwendet werden. Die Verwendung einer externen Punkt Feature Klasse im Selektionsprozess von Strassennetzwerken ist, gemäss Wissen des Autors, selten. Daher ist ein Vergleich mit Resultaten aus der Literatur schwierig. [Touya \(2010\)](#) hat einen Ansatz von [Thomson und Richardson \(1995\)](#) wieder aufgegriffen, welcher ein ähnliches, aber nicht dasselbe, Prinzip verfolgt. So werden zwischen sogenannten *attraction points* die kürzesten Pfade berechnet, welche dann als Basis für die Selektion dienen. Allerdings werden diese *attraction points* direkt auf einen Knoten im Strassennetzwerk abgebildet, so dass konzeptionell betrachtet der attraction point direkt auf einem Knoten im Strassennetzwerk liegt. Diese Herangehensweise hätte prinzipiell auch für den POI Erschliessungs-Algorithmus verwendet werden können, indem nicht das dem POI am nächsten gelegene Segmente betrachtet wird, sondern der am nächsten gelegene Knoten des Strassennetzwerkes. Dies wäre aber problematisch, weil es Segmente gibt, welche eine sehr grosse Länge aufweisen und daher der nächste Knoten nicht unbedingt immer ein Knoten des dem POI am nächsten gelegenen Segmentes ist. Zusammengefasst kann der POI Erschliessungs-Algorithmus das Resultat insofern optimieren, als die Anforderung 15 erfüllt werden kann. Ohne Einbezug einer externen Feature Klasse wäre dies nicht möglich gewesen.

Die zweite abgeleitete Regel mit Hilfe einer externen Feature Klasse modelliert das Verhältnis der Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten. Der reine integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von [Li und Zhou \(2012\)](#) hat die Tendenz Siedlungsgebiete aufgrund ihrer dichten Maschen verstärkt auszdünnen. Die grundlegenden Strukturen werden zu wenig gut erhalten. Anforderung 16 aus der Anforderungsanalyse wird verletzt. Der vorgestellte Ansatz, welcher mit Hilfe der Variation des Maschendichte Faktors die Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten steuert, basiert auf der Verwendung einer Feature Klasse, welche die Siedlungsgebiete modelliert. Mit Hilfe dieser Information ist es möglich, die Ausdünnung so zu konfigurieren, dass das Verhältnis der Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten konstant bleibt und damit die nicht uniform verteilte Dichtestruktur besser erhalten bleibt. Anforderung 16 kann somit besser gerecht werden. Die unterschiedliche Handhabung der Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten wird auch in der Literatur verwendet, zum Teil sogar dadurch, dass in Siedlungsgebieten komplett andere Ansätze verwendet werden als in Landgebieten ([Touya 2010](#)). Inwiefern dadurch aber bessere Resultate erzielt hätten werden können ist schwierig zu beurteilen. Es ist aber ein interessanter Ansatz der weiter verfolgt werden könnte. Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf der Verwendung einer externen Feature Klasse, welche die Siedlungsgebiete modelliert, ist aber nicht zwingend davon abhängig. So wurde ein weiterer Algorithmus aufgezeigt, der die Siedlungsgebiete, respektive Segmente in Siedlungsgebieten, direkt aus dem Strassennetzwerk extrahiert.

Dabei konnte eine relativ grosse Übereinstimmung mit der externen Siedlungsgebiete Feature Klasse erreicht werden. Nichtsdestotrotz ist eine Konfiguration mit externen Siedlungsgebieten besser, weil sie detailliertere und genauere Informationen über die Ausdehnung der Siedlungsgebiete enthalten. Die Qualität der Resultate ist daher besser.

Die beiden Erweiterungen haben dargelegt, wie externe Feature Klassen und daraus abgeleitete Regeln verwendet werden können, um die Qualität der Generalisierungsergebnisse zu steigern und weitere Anforderungen zu erfüllen. Zukünftige Algorithmen sollten von den zusätzlichen Informationen, welche in externen Feature Klassen modelliert sind, vermehrt Gebrauch machen.

# 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit bestand aus zwei Teilen. In einem ersten Teil sollten drei Algorithmen zur automatischen Selektion von Strassennetzwerken aus der Fachliteratur implementiert werden um zu prüfen welcher dieser drei Ansätze die besten Resultate generiert. Konkret handelte es sich um den Stroke-Ansatz von [Thomson und Richardson \(1995\)](#), den Maschen-Ansatz von [Hu et al. \(2007\)](#) und [Chen et al. \(2009\)](#) und den integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatz von [Li und Zhou \(2012\)](#). Auf Basis von detaillierten räumlichen Daten von swisstopo wurden die Resultate evaluiert. Dabei erzielte der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz die besten Ergebnisse. Dieser wurde im zweiten Teil mittels mehrerer weiterer Regeln und Algorithmen erweitert um die Qualität der Resultate zu optimieren. Dabei wurde auch auf externe Feature Klassen zurückgegriffen, welche zusätzliche Informationen lieferten und aufgrund derer die Ergebnisse zusätzlich verbessert werden konnten.

## 7.1 Erreichtes

Neben den in Abschnitt 1.2 formulierten Zielen wurde Folgendes erreicht:

- Diskussion der Fachliteratur bezüglich automatischer Generalisierung von räumlichen Daten und insbesondere Ansätzen zur automatischen Selektion von Strassennetzwerken.
- Ausarbeitung von aktuellen Forschungslücken und offenen Themen.
- Formulierung einer Reihe von detaillierten Anforderungen, denen die Resultate genügen müssen und die sowohl für die Entwicklung zusätzlicher Algorithmen, als auch als Basis für die Evaluierung der Ergebnisse genutzt wurden.
- Implementierung eines Stroke-Ansatzes nach [Thomson und Richardson \(1999\)](#) und eine qualitative und quantitative Auswertung der Ergebnisse an vier Testgebieten hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen und eine entsprechende Diskussion der Stärken und Schwächen
- Implementierung eines Maschen-Ansatzes nach [Hu et al. \(2007\)](#) und [Chen et al. \(2009\)](#) und eine qualitative und quantitative Auswertung der Ergebnisse an vier Testgebieten hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen und eine entsprechende Diskussion der Vor- und Nachteile.
- Implementierung eines integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes nach [Li und Zhou \(2012\)](#) und eine qualitative und quantitative Auswertung der Ergebnisse an vier Testgebieten hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen und eine entsprechende Diskussion der Stärken und Schwächen.
- Konzeptionelle Entwicklung und Implementierung von Regeln und Algorithmen zur Optimierung der Resultate auf Basis des Ansatzes von [Li und Zhou \(2012\)](#), unter anderem:
  - Ein Bottom-Up Ansatz zur Traversierung von linearen Baumhierarchien in den linearen Strukturen der Strassennetzwerke.
  - Ein Stroke-Reconnection-Algorithmus zur Selektion von linearen Strukturen, falls diese an dichte und ausgedünnte Maschen grenzen.

- Ein Ansatz zur sinnvollen Selektion von isolierten Strokes.
  - Ein Kreisel Detektions-Algorithmus zur Wiederherstellung von korrupten Kreiseln
  - Ein POI Erschliessungs-Algorithmus, welcher sicherstellt, dass POIs auch im generalisierten Resultat erschlossen bleiben.
  - Ein Model zur verhältnismässig ausgewogenen Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten durch Variation des Maschendichte-Faktors.
  - Ein Dichte-Algorithmus, der die Siedlungsgebiete aus dem Strassennetzwerk extrahiert, ohne Einbezug weiterer Feature Klassen.
- Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der entwickelten Regeln und Algorithmen.
  - Quantitative und qualitative Evaluierung der finalen Resultate, unter anderem durch swisstopo Fachpersonen.

### 7.2 Erkenntnisse

Im Rahmen dieser Arbeit wurden in einer ersten Runde drei Basisalgorithmen implementiert und an einem realen Datensatz von swisstopo (TLM3D respektive KRM25) anhand von vier unterschiedlichen Testgebieten geprüft. Dabei konnten diverse Erkenntnisse gewonnen werden.

Die grösste Schwäche des Stroke-Ansatzes von [Thomson und Richardson \(1999\)](#) besteht darin, dass neue Sackgassen generiert werden und es daher zu lokalen Unterbrüchen kommt. Die Konnektivität wird schlecht erhalten. Die grösste Stärke ist der Fakt, dass intuitiv wichtige Verbindungsstrassen relativ gut extrahiert werden können, weil sie meist längere Strokes bilden und kurze, bereits im ungeneralisierten Netzwerk bestehende Sackgassen eliminiert werden können. Weiter ist es konzeptionell einfach, Segmente, welche aufgrund ihrer Attributzugehörigkeit zwingend oder bevorzugt selektiert werden sollten, im Stroke-Ansatz auch effektiv zu selektieren.

Der Maschen-Ansatz von [Hu et al. \(2007\)](#) und [Chen et al. \(2009\)](#) hat den Vorteil, dass er die Schwächen des Stroke-Ansatzes nicht hat. Es werden keine neuen Sackgassen generiert und es kommt daher lokal auch zu keinen Unterbrüchen. Die Konnektivität wird besser erhalten. Der grösste Nachteil liegt in der Ignorierung von Segmenten in linearen Strukturen, welche nicht behandelt werden. Daher kann auch nicht garantiert werden, dass alle Segmente, die aufgrund ihrer Attributzugehörigkeit zwingend oder bevorzugt selektiert werden sollten, selektiert werden.

Der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von [Li und Zhou \(2012\)](#) kombiniert die Vorteile des Stroke- und Maschen-Ansatzes insofern, als dass er keine lokalen Unterbrüche bildet und daher auch keine neuen Sackgassen generiert werden. Weiter werden auch lineare Strukturen gehandhabt. Von den drei Basisalgorithmen produziert er die besten Resultate.

Nichtsdestotrotz weist auch der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz Schwächen auf, welche in dieser Arbeit angegangen wurden. So wurden weitere Regeln und Ansätze direkt aus dem Strassennetzwerk konzeptionell entwickelt und implementiert, welche das Generalisierungsergebnis verbessern konnten.

So wurde gezeigt, dass bei der Traversierung der Baumhierarchien in den linearen Strukturen ein Bottom-Up Ansatz besser geeignet ist, als ein Top-Down Ansatz, weil er nicht per se einzelne Segmente von der Betrachtung ausschliesst. Weiter ist die Ignorierung von linearen Strukturen, welche an dichte und daher aufgelöste Maschen grenzen, problematisch. Eine potentiell grosse Menge von Segmenten wird dadurch von der Selektion ausgeschlossen. Der vorgestellte Stroke-Reconnection-Algorithmus kann dieses Problem lösen. Zudem konnte gezeigt werden, dass, obwohl in der Literatur die Meinung weit verbreitet ist, dass ein Generalisierungsergebnis stets eine vollständige Konnektivität aufweisen muss (z.B. [Thomson und Brooks 2000](#), [Chaudhry und Mackaness 2005](#), [Li und Zhou 2012](#)), es durchaus Sinn machen kann, auch isolierte Segmente für den Zielmasstab zu selektieren, sofern diese schon im ungeneralisierten Strassennetzwerk isoliert vorliegen.



Eine zusätzliche gewonnene Erkenntnis betraf die problematische Auflösung von Kreisel. Konkret weisen Kreisel stets eine hohe Maschendichte auf und werden daher aufgelöst, was zu einer korrupten Form führt. Der neue vorgestellte Kreisel Detektions-Algorithmus, welcher auf zirkulären Strokes basiert und alle Kreisel in allen Testgebieten erfolgreich extrahieren kann, löst dieses Problem aber elegant.

Weiter konnte gezeigt werden, dass der Einbezug von externen Feature Klassen und daraus abgeleitete Regeln und neue Constraints die Generalisierungsergebnisse verbessern können. Externe Feature Klassen beinhalten Informationen, welche im Strassennetzwerk nicht enthalten sind. Diese Informationen können genutzt werden um die Generalisierungsergebnisse weiter zu verbessern. Spezifisch wurde dies anhand von zwei unterschiedlichen externen Feature Klassen gezeigt. Einerseits können POIs genutzt werden um sicherzustellen, dass diese auch im generalisierten Resultat noch erschlossen sind, auch dann wenn sie in ländlicheren und weniger gut erreichbaren Gebieten liegen. Der entwickelte POI Erschliessungs-Algorithmus ist eine Möglichkeit dies umzusetzen. Die zweite externe Feature Klasse modellierte die Siedlungsgebiete in den vier Testgebieten. Diese Information konnte genutzt werden, um zu garantieren, dass die Ausdünnung in Siedlungs- und Landgebieten in einem ausgewogenen Verhältnis steht und damit die generellen Strukturen besser erhalten werden. Eine Variation des Maschendichte-Faktors hat sich hierzu als sehr geeignet erwiesen, weil das Verhältnis aus der Anzahl Segmente in Siedlungs- und der Anzahl Segmente in Landgebieten im Resultat in Abhängigkeit des Maschendichte-Faktors stets einen linearen Verlauf bildet. Für den Fall, dass keine Siedlungsgebiete in externen Feature Klassen vorhanden sind, können Segmente in Siedlungsgebieten auch aus dem Strassennetzwerk berechnet werden. Hierbei hat sich ein Ansatz, der sich an der KDE orientiert und auf Basis der Segmente-Zentroide funktioniert, als geeignet erwiesen. Segmente in Siedlungsgebieten lassen sich so sehr gut extrahieren.

Zuletzt konnte eine Evaluierung der Resultate durch kartographische Fachpersonen einen grossen Input darüber geben, wie gut ein Algorithmus funktioniert, welche Zonen der Ansatz gut selektieren kann, wo Problembereiche entstehen und wie man diese angehen könnte. Kartographische Fachpersonen haben ein praxisbezogenes Fachwissen und können daher einen weiteren qualitativen Evaluierungs-Input geben.

### 7.3 Fazit

Die wichtigsten vier Punkte noch einmal zusammengefasst:

- 1) Von den drei Basisalgorithmen (Stroke-Ansatz von Thomson und Richardson (1995), Maschen-Ansatz von Hu et al. (2007) und Chen et al. (2009) und der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz von Li und Zhou (2012)) produziert der integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz die besten Resultate.
- 2) Auf Basis des integrierten Stroke-Maschen Kombinationsansatzes und mit der Ableitung von weiteren Regeln und Ansätzen und dem Einbezug weiterer Constraints lassen sich die Resultate entscheidend verbessern und die Anforderungen an das Generalisierungsergebnis besser erfüllen.
- 3) Der Einbezug von externen Feature Klassen und die Verwendung der darin enthaltenen Informationen, können das Generalisierungsergebnisse ebenfalls stark optimieren und die Anforderungen besser erfüllen.
- 4) Die erzielten Resultate wurden von ExpertInnen der swisstopo in einer ausgedehnten Evaluation insgesamt als sehr gut taxiert.

### 7.4 Ausblick

Obwohl automatische Ansätze zur Selektion von Strassennetzwerken schon seit Jahrzehnten bestehen, bieten sie noch immer eine sehr interessante und offene Forschungsthematik.

Insbesondere die Verwendung von externen Feature Klassen birgt noch viel Potential. So wäre es interessant eine Feature Klasse mit Gebäuden einzubeziehen und einen Ansatz zu entwickeln, der die Selektion von Zufahrten in Quartiere, vor allem bei mehreren parallelen Zufahrten, die in einer Sackgasse enden, sinnvoll regelt. Eine weitere spannende Anwendung wäre eine Feature Klasse mit Flächenobjekten einzubeziehen, innerhalb derer der quantitative Grad der Ausdünnung unterschiedlich gehandhabt wird, ähnlich wie es mit Hilfe des Maschendichte-Faktors in dieser Arbeit für Siedlungsgebiete gezeigt wurde. So könnten beispielsweise bestimmte Areale verstärkt ausgedünnt werden (z.B. Friedhofsareale) und andere Areale weniger stark (z.B. Fußgängerzonen), ohne bestimmte Verhältnisse zu erhalten. Interessant wäre es zu erforschen, was für Wechselwirkungen entstehen und ob es noch andere Ansätze gibt, als nur die Variation des Maschendichte-Faktors. Im extremen Fall wäre es sogar eine Überlegung wert ob in bestimmten Zonen völlig andere Ansätze verwendet werden sollen, so wie es beispielsweise auch [Toyua \(2010\)](#) gehandhabt hat. Hierbei stellt sich dann aber noch die Frage wie die Übergangszonen geregelt werden, so dass saubere Verbindungen bestehen.

Weiter wäre es interessant vertiefter zu analysieren, inwiefern die Wahl der Input-Parameter die Resultate beeinflusst. Der erweiterte integrierte Stroke-Maschen Kombinationsansatz mit allen in Kapitel 5 vorgestellten Erweiterungen ist stark von der Parameterwahl abhängig. Die in Kapitel 6 analysierten und diskutierten Resultate sind nur ein Output des Algorithmus, gerechnet mit bestimmten Parametern. Ein Algorithmus ist aber mehr als nur die Resultate, die er produziert. Bestimmte Probleme können auch durch eine optimale Wahl der Parameter gelöst werden, ohne dass der Algorithmus selbst neu konzipiert werden muss. Daher wäre es spannend, vertiefter und auf einer quantitativen Basis zu untersuchen, inwiefern die Resultate durch Variationen der Input-Parameter variieren. Hierbei könnte eine ähnliche Richtung angeschlagen werden, wie es [Zhou und Li \(2012\)](#) auch schon bei der empirischen Untersuchung der Stroke-Bildung verfolgt haben.

Obwohl der erweiterte Stroke-Maschen Kombinationsansatz vielversprechende Resultate generiert hat, muss er zwingend noch an Testgebieten aus anderen Regionen der Welt getestet werden. Interessant wären dabei Gebiete mit einer noch extremeren Strukturvariation als das Testgebiet aus dem Engadin.

# Literatur

- AGENT. 1998. Constraint Analysis, *ESPRIT report*, Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, Schweiz.
- AI, T. 2007. The drainage network extraction from contour lines for contour line generalization, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **62**, 93–103.
- BARD, S. 2004. Quality Assessment of Cartographic Generalisation, *Transactions in GIS*, **8**, 63-81.
- Barrault, M., Regnaud, N., Duchêne, C., Haire, K., Baejis, C., Hardy, P., Mackaness, W.A., Ruas, A., Weibel, R. 2001. Integrating multi-agent, object oriented and algorithmic techniques for improved automated map generalization, *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, Peking, China, 6-10 August.
- BEARD, M.K. 1987. How to survive on a single detailed database, *Proceedings of the International Symposium on Computer-Assisted Cartography*, Baltimore, USA, 29 März-3 April.
- BEARD, M.K. 1991. Constrains on Rule Formation. In: Buttenfield, B.P., McMaster, R.B. (eds.), *Map Generalization: Making Rules for Knowledge Representation*, London, UK, Longman.
- BUTTENFIELD, B.P., MCMMASTER, R.B. 1991. Map Generalization: Making Rules for Knowledge Representation. London, UK, Longman.
- BRASSEL, K.E., WEIBEL, R. 1988. A review and conceptual framework of automated map generalization, *International Journal of Geographical Information Systems*, **2**, 229-244.
- BRUNSDON, C. 1995. Estimating Probability Surfaces For Geographical Point Data. An Adaptive Kernel Algorithm, *Computers & Geosciences*, **21**, 877-894.
- BURGHARDT, D., SCHMID, S., DUCHÊNE, C., STOTER, J., BAELLA, B., REGNAULD, N., TOUYA, G. 2008. Methodologies for the evaluation of generalised data derived with commercial available generalisation systems, *Workshop of the ICA Commission on Generalisation and Multiple Representation*, Montpellier, Frankreich, 20-21 Juni.
- CHAUDHRY, O., MACKANESS, W.A. 2005. Rural and Urban Road Network Generalisation Deriving 1:250,000 from OS MasterMap, *Proceedings of the 22<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, La Coruña, Spanien, 10-16 Juli.
- CHEN, J., HU, Y., LI, Z., ZHAO, R., MENG, L. 2009. Selective omission of road features based on mesh density for automatic map generalization, *International Journal of Geographical Information Science*, **23**, 1013-1032.
- CHERKASSKY, B.V., GOLDBERG, A.V., RADZIK, T. 1996. Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluations, *Mathematical Programming*, **73**, 129-174.
- DELUCIA, A., BLACK, T. 1987. A comprehensive approach to automatic feature generalization, *Proceedings of the 13<sup>th</sup> Cartographic Conference*, Morelia, Mexico, 12-21 Oktober.
- DUDEN ONLINE. 2013. <http://www.duden.de>, Zugriff: 07.05.2013.
- EDUARDES, A.J., MACKANESS, W.A. 2000. Intelligent Generalisation of Urban Road Networks, *Proceedings of GIS Research UK 2000 Conference*, University of York, UK, 5-7 April.
- EHRLIHOZLER, R. 1996. Methoden für die Bewertung der Qualität von Generalisierungslösungen, *Diplomarbeit*, Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, Schweiz.

- ESTER, M., KRIEGEL, H.P., SANDER, J, XU, X. 1996. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, AAAI Press, 226–231
- FIELD, D.J., HAYES, A., HESS, R.F. 1993. Contour integration by the human visual system: Evidence for a local “association field”, *Vision Research*, **33**, 173-193.
- FILIPPOVSKA, Y., KADA, M., FRITSCH, D. 2009. Quality Evaluation of Ground Plan Generalization, *12<sup>th</sup> AGILE International Conference on Geographic Information Science*, Hannover, Deutschland, 2-5 Juni.
- GALLO, G., PALLOTTINO, S. 1988. Shortest Path algorithms, *Annals of Operations Research*, **13**, 1-79.
- GAMMA, E., HELM, R., JOHNSON, R., VLISSIDES, J. 1994. Design Patterns. Elements of Reusable Object-Oriented Software, Amsterdam, Niederlande, Addison-Wesley Longman.
- GOODRICH, M.T., TAMASSIA, R., MOUNT, D.M. 2004. Data Structures and Algorithms in C++, New Jersey, NJ, USA, Wiley.
- HARRIE, L., WEIBEL, R. 2007. Modelling the Overall Process of Generalisation, In: Mackaness, W.A., Ruas, A., Sarjakoski, L.T. (eds.), *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*, Oxford, UK, Elsevier.
- HART, P., NILSSON, N., RAPHAEL, B. 1968. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Transaction on Systems Science and Cybernetics SSC4*, **4**, 100-107.
- HEINZLE, F., ANDERS, K., SESTER, M. 2005. Graph Based Approaches for Recognition of Patterns and Implicit Information in Road Networks, *Proceedings of the 22<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, La Coruña, Spanien, 10-16 Juli.
- HEINZLE, F., ANDERS, K.H., SESTER, M. 2007. Automatic Detection of Patterns in Road Networks - Methods and Evaluation, *Proceedings of Joint Workshop Visualization and Exploration of Geospatial Data*, Stuttgart, Deutschland, 27-29 Juni.
- HILLIER, B., HANSON, J. 1984. The social logic of space. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- HU, Y., CHEN, J., LI, Z., ZHAO, R. 2007. Selection of Streets Based on Mesh Density for Digital Map Generalization, *4<sup>th</sup> International Conference on Image and Graphics*, Chengdu, China, 22-24 August.
- JIANG, B. 2009. Street hierarchies: a minority of streets account for a majority of traffic flow, *International Journal of Geographical Information Science*, **23**, 1033-1048.
- JIANG, B., CLARAMUNT, C. 2004. A structural approach to the model generalization of an urban street network, *Geoinformatica*, **8**, 157-171.
- JIANG, B., HARRIE, L. 2004. Selection of Streets from a Network Using Self-Organizing Maps, *Transactions in GIS*, **8**, 335-350.
- JIANG, B., ZHAO, S., YIN, J. 2008. Self-organized roads for predicting traffic flow: a sensitive study. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, July, P07008.
- JTS. 2013. <http://www.vividsolutions.com/jts/javadoc/com/vividsolutions/jts/algorithm/CentroidLine.html>, Zugriff: 28.06.2013.
- JOÃO, E.M. 1998. Causes and consequences of map generalization, London, UK, Taylor & Francis.

- KAUFMAN, L, ROUSSEEUW, P.J. 1990. Finding Group in Data: an Introduction to Cluster Analysis, New York, NY, USA, John Wiley and Sons.
- KRAAK, M.J., ORMELING, F.J. 2003. Cartography. Visualization of geospatial data, New York, NY, USA, Prentice Hall.
- LAMY, S., RUAS, A., DEMAZEAU, Y., JACKSON, M., MACKANESS, W.A., WEIBEL, R. 1999. The Application of Agents in Automated Map Generalisation, *19<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, Ottawa, ON, Kanada, 14-21 August.
- LI, Z., CHOI, Y.H. 2002. Topographic map generalization: association of road elimination with thematic attributes, *The Cartographic Journal*, **39**, 153-166.
- LI, Z., ZHOU, Q. 2012. Integration of linear and areal hierarchies for continuous multi-scale representation of road networks, *International Journal of Geographical Information Science*, **26**, 855-880.
- LISKOV, B.H., WING, J.M. 1994. A Behavioral Notion of Subtyping, *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, **16**, 1811-1841.
- LIU, Y., MOLENAAR, M., AI, T., LIU, Y. 2003. Categorical database generalization, *Geospatial Information Science* **6**, 1-9.
- LIU, X., ZHAN, B.F., AI, T. 2010. Road selection based on Voronoi diagrams and "strokes" in map generalization, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **12**, 194-202.
- MACKANESS, W.A. 1991. Integration and Evaluation of Map Generalization, In: Bittenfield, B.P., McMaster, R.B. (eds.), *Map Generalization: Making Rules for Knowledge Representation*, London, UK, Longman.
- MACKANESS, W.A. 1995. Analysis of Urban Road Networks to Support Cartographic Generalization, *Cartography and Geographic Information Systems*, **22**, 306-316.
- MACKANESS, W.A., BEARD, M. 1993. Use of Graph Theory to Support Map Generalization, *Cartography and Geographic Information Systems*, **20**, 210-221.
- MACKANESS, W. A., EDWARDS, G. 2002. The Importance of Modelling Pattern and Structure in Automated Map Generalisation, *ISPRS/ICA joint workshop on multi-scale representation of spatial data*, Ottawa, ON, Kanada, 7-8 Juli.
- MACKANESS, W. A., MACKECHNIE, G.A. 1999. Automating the Detection and Simplification of Junctions in Road Networks, *Geoinformatica*, **3**, 185-200.
- MACKANESS, W.A., RUAS, A. 2007. Evaluation in the Map Generalisation Process, In: Mackaness, W.A., Ruas, A., Sarjakoski, T. (eds.), *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*, Oxford, UK, Elsevier.
- MAO, B., FAN, H., HARRIE, L., BAN, Y., MENG, L. 2010. City Model Generalization Quality Assessment using Nester Structure of Earth Mover's Distance, *Workshop of the ICA commission on Generalisation and Multiple Representation*, Zürich, Schweiz, 12-13 September.
- MARSHALL, S. 2005. Streets and patterns. London, UK, Spon Press.
- MARTIN, R.C. 2003. Agile software development – Principles, patterns and practices, Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall.
- MEYER, B. 1988. Object-Oriented Software Construction, Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall.

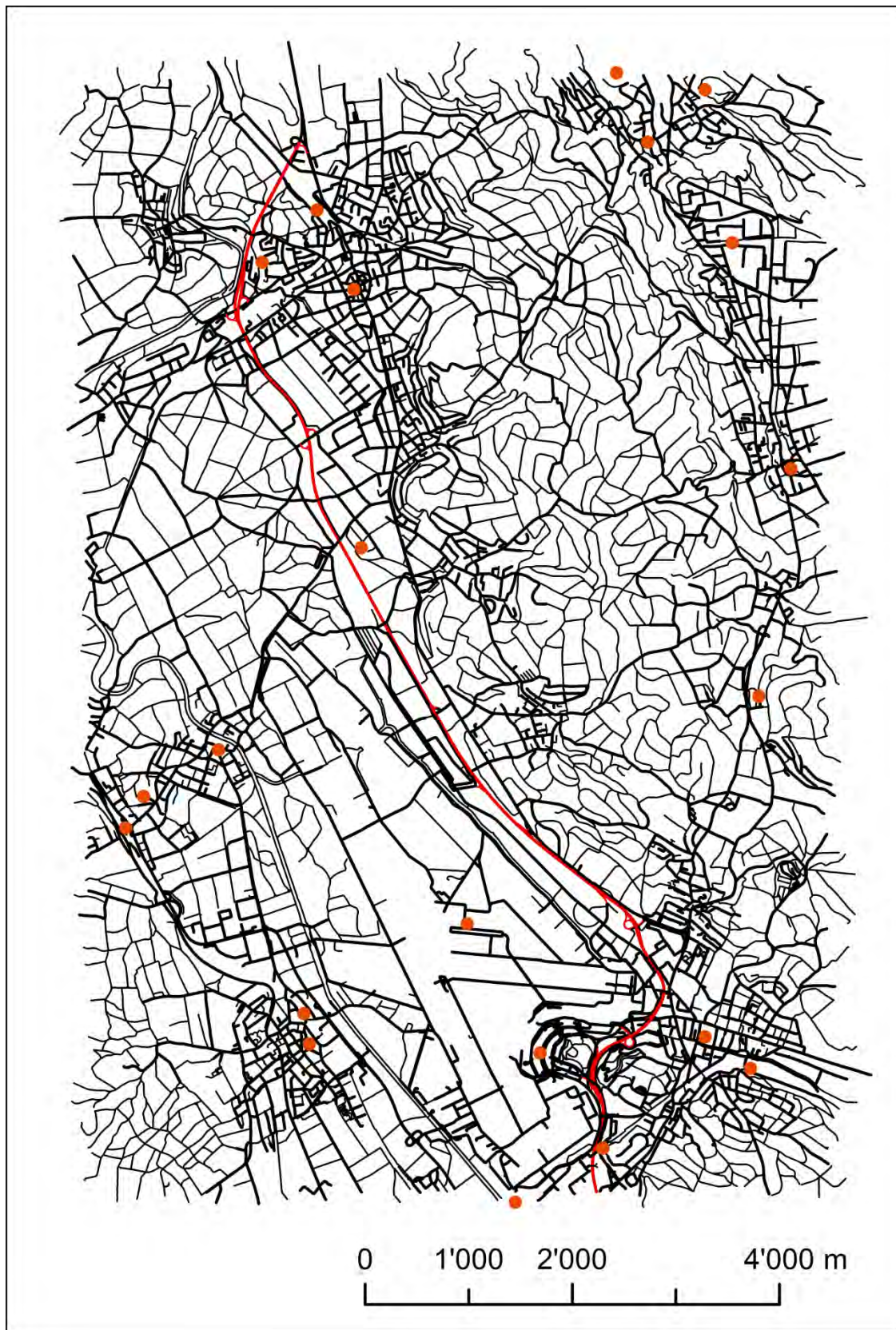


- MIEG, H.A., NÄF, M. 2005. Experteninterviews. 2. Aufl. Institut für Mensch-Umwelt-Systeme (HES), ETH Zürich, [http://www.mieg.ethz.ch/education/Skript\\_Experteninterviews.pdf](http://www.mieg.ethz.ch/education/Skript_Experteninterviews.pdf), Zugriff: 05.05.2013.
- MISUND, G., JOHNSEN, K.E., LINDH, M. 2003. Hierarchical GML modeling of transportation networks, *2<sup>nd</sup> annual GML developers' conference*, <http://www.ia.hiof.no/~gunnarmi/papers/misund2003hgm.pdf>, Zugriff: 22.03.2013.
- MORISSET, B., RUAS, A. 1997. Simulation and agent modeling for road selection in generalization. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, Stockholm, Schweden, 23-27 Juni.
- MÜLLER, J.C., LAGRANGE, J.P., WEIBEL, R. 1995. GIS and Generalization: Methodology and Practice, London, UK, Taylor & Francis.
- O'SULLIVAN, D., UNWIN, D.J. 2003. Geographic Information Analysis. New York, NY, USA, Wiley.
- PORTA, S., CRUCITTI, P., LATORA, V. 2006. The network analysis of urban streets: A dual approach, *Physica A*, **369**, 853-866.
- PETER, B., WEIBEL, R. 1999. Using Vector and Raster-Based Techniques in Categorical Map Generalization, *ICA Workshop on Progress in Automated Map Generalization*, Ottawa, ON, Kanada, 12-14 August.
- REGNAULD, N. 2000. Preserving density contrasts during cartographic generalization, In: Atkinson P., Martin, D. (eds.), *GIS and geocomputation*, 175-186, London, UK, Taylor & Francis.
- REYNES, J.L. 1997. Selection du reseau routeir en vue de la selection, *DESS Report*, University Paris, Paris, France.
- RICHARDSON, D.E., THOMSON, R.C. 1996. Integrating thematic, geometric and topological information in the generalization of road networks, *Cartographica*, **33**, 75-83.
- SCHABENBERGER, O., GOTWAY, C. 2005. Statistical methods for spatial data analysis, Boca Raton, FL, USA, Chapman & Hall.
- SCHMID, S. 2008. Automated Constraint Based Evaluation of Cartographic Generalization Solutions, *Masterarbeit*, Universität Zürich, Zürich, Schweiz.
- SHEA, K.S., MCMASTER, R.B. 1989. Cartographic Generalization In A Digital Environment: When And How To Generalize, *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Computer-Assisted Cartography*, Baltimore, MD, USA, 2-7 April.
- SPIESS, E. 1995. The need for generalization in a GIS environment, In: Müller, J.C., Lagrange, J.P., Weibel, R. (eds.), *GIS and Generalization: Methodology and Practice*, London, UK, Taylor & Francis.
- SPIESS, E., BAUMGARTNER, U., ARN, S., VEZ, C. 2002. Topografische Karten - Kartengrafik und Generalisierung, Kartografische Publikationsreihe Nr. 16, [http://www.kartographie.ch/publikationen/pdf/demo\\_no16\\_de.pdf](http://www.kartographie.ch/publikationen/pdf/demo_no16_de.pdf), Zugriff: 22.11.2012.
- SWISSTOPO. 2013a. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/swisstopo.html>, Zugriff: 06.03.2013.
- SWISSTOPO. 2013b. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/swissTLM3D.html>, Zugriff: 08.03.2013

- SWISSTOPO. 2013c. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector200.html>, Zugriff: 10.05.2013.
- SWISSTOPO. 2013d. VECTOR200 Das kleinmassstäbliche digitale Landschaftsmodell der Schweiz, <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector200.parsysrelated1.47641.downloadList.6672.DownloadFile.tmp/201305v200infod.pdf>, Zugriff: 24.06.2013.
- SWISSTOPO. 2013e. VECTOR25 Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz, <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector25.parsysrelated1.47641.downloadList.43533.DownloadFile.tmp/vector25infode.pdf>, Zugriff: 10.05.2013.
- SWISSTOPO. 2013f. Projekt Optina-LK, *Präsentation*, 30.10.2012.
- TERRELL, G.R., SCOTT, D.W. 1992. Variable Kernel Density Estimation, *The Annals of Statistics*, 20, 1236-1265.
- THOM, S. 2005. A strategy for collapsing OS Integrated Transport Network(tm) dual carriageways, *ICA workshop on generalisation and multiple representation*, La Coruña, Spanien, 7-8 Juli.
- THOM, S. 2006. Conflict identification and representation for roads based on a Skeleton, *12<sup>th</sup> international symposium on spatial data handling*, Wien, Österreich, 12-14 Juli.
- THOMSON, R.C., BROOKS, R. 2000. Efficient Generalisation and Abstraction of Network Data Using Perceptual Grouping, <http://www.geocomputation.org/2000/GC029/Gc029.htm>, Zugriff: 6. November 2012.
- THOMSON, R.C., RICHARDSON, D.E. 1995. A Graph Theory Approach To Road Network Generalization, *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, Barcelona, Spanien, 3-9 September.
- THOMSON, R.C., RICHARDSON, D.E. 1999. The ‚Good Continuation‘ Principle of Perceptual Organisation Applied to the Generalisation of Road Networks, *19<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, Ottawa, ON, Kanada, 14-21 August.
- TOMKO, M., WINTER, S., CLARAMUNT, C. 2008. Experiential hierarchies of streets, *Computers, Environment and Urban Systems*, **32**, 41-52.
- TÖPFER, F. 1974. Kartographische Generalisierung, Leipzig, Deutsche Demokratische Republik, Gotha Hermann Haack.
- TÖPFER, F., PILLEWIZER, W. 1966. The Principles of Selection, *Cartographic Journal*, **3**, 10-16.
- TOUYA, G. 2010. A Road Network Selection Process Based on Data Enrichment and Structure Detection, *Transactions in GIS*, **14**, 595-614.
- TYNER, J.A. 2010. Principles of map design, New York, NY, USA, Guilford Press.
- VAN KREVELD, M., PESCHIER, J. 1998. On the Automated Generalization of Road Network Maps, [http://www.geocomputation.org/1998/21/gc\\_21.htm](http://www.geocomputation.org/1998/21/gc_21.htm), Zugriff: 6. November 2012.
- WEIBEL, R. 1995. Three Essential Building Blocks for Automated Generalization, In: Müller, J.C., Lagrange, J.P., Weibel, R. (eds.), *GIS and Generalization: Methodology and Practice*, London, UK, Taylor & Francis.
- WEIBEL, R., DUTTON, G.H. 1998. Constraint-Based Automated Map Generalization, *8<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling*, Vancouver, BC, Kanada, 11-15 Juli.

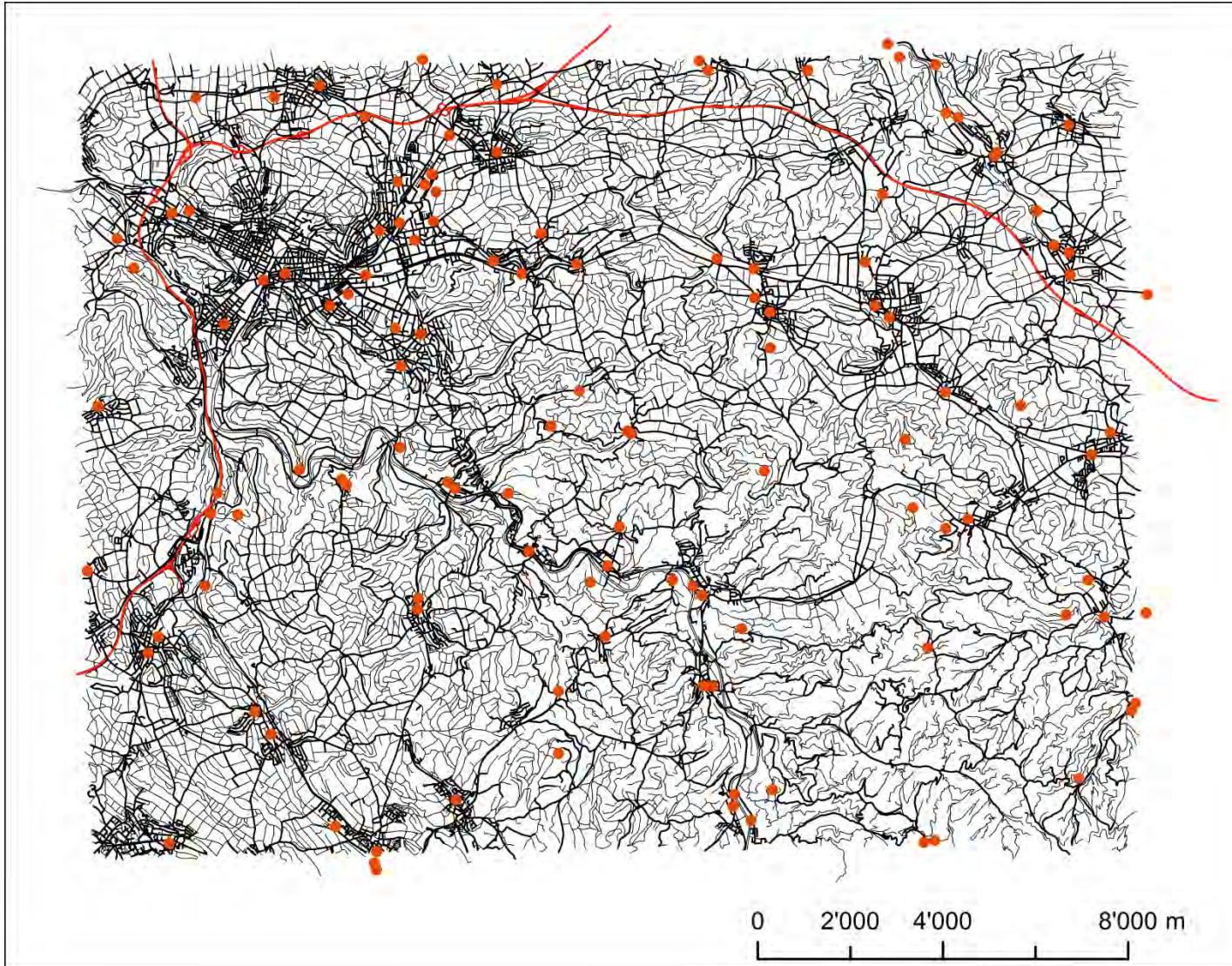
- Weiss, R. 2013, Road Network Selection for Small-Scale Maps Using an Improved Centrality Approach, *Masterarbeit*, Geographisches Institut, Universität Zürich, Zürich, Schweiz.
- WIKIPEDIA. 2013A. [http://de.wikipedia.org/wiki/Point\\_of\\_Interest](http://de.wikipedia.org/wiki/Point_of_Interest), Zugriff: 10.05.2013.
- WIKIPEDIA. 2013B. [http://de.wikipedia.org/wiki/A\\*-Algorithmus](http://de.wikipedia.org/wiki/A*-Algorithmus), Zugriff: 12.06.2013.
- WILSON, R.J. 1979. Introduction to Graph Theory, London, UK, Longman.
- XIE, Z., YAN, J. 2008. Kernel Density Estimation of traffic accidents in network space, *Computers, Environment and Urban Systems*, **32**, 396-406.
- YANG, B., LUEN, X., LI, Q. 2011. Generating hierarchical strokes from urban street networks based on spatial pattern recognition, *International Journal of Geographic Information Science*, **25**, 2025-2050.
- ZHANG, Q. 2004. Modeling Structure and Patterns in Road Network Generalization, *ICA workshop on generalization and multiple representation*, Leicester, UK, 20-21 August.
- ZHANG, Q. 2005. Road Network Generalization Based on Connection Analysis. In: Fisher, P.F. (ed.), *Developments in Spatial Data Handling*, 343-353, Berlin, Deutschland, Springer.
- ZHOU, Q. 2012. Selective omission of road networks in multi-scale representation, *Ph.D. thesis*, Hong-Kong Polytechnic University, Hong-Kong, China.
- ZHOU, Q., LI, Z. 2012. A comparative study of various strategies to concatenate road segments into strokes for map generalization, *International Journal of Geographical Information Science*, **26**, 691-715.

# Anhang A



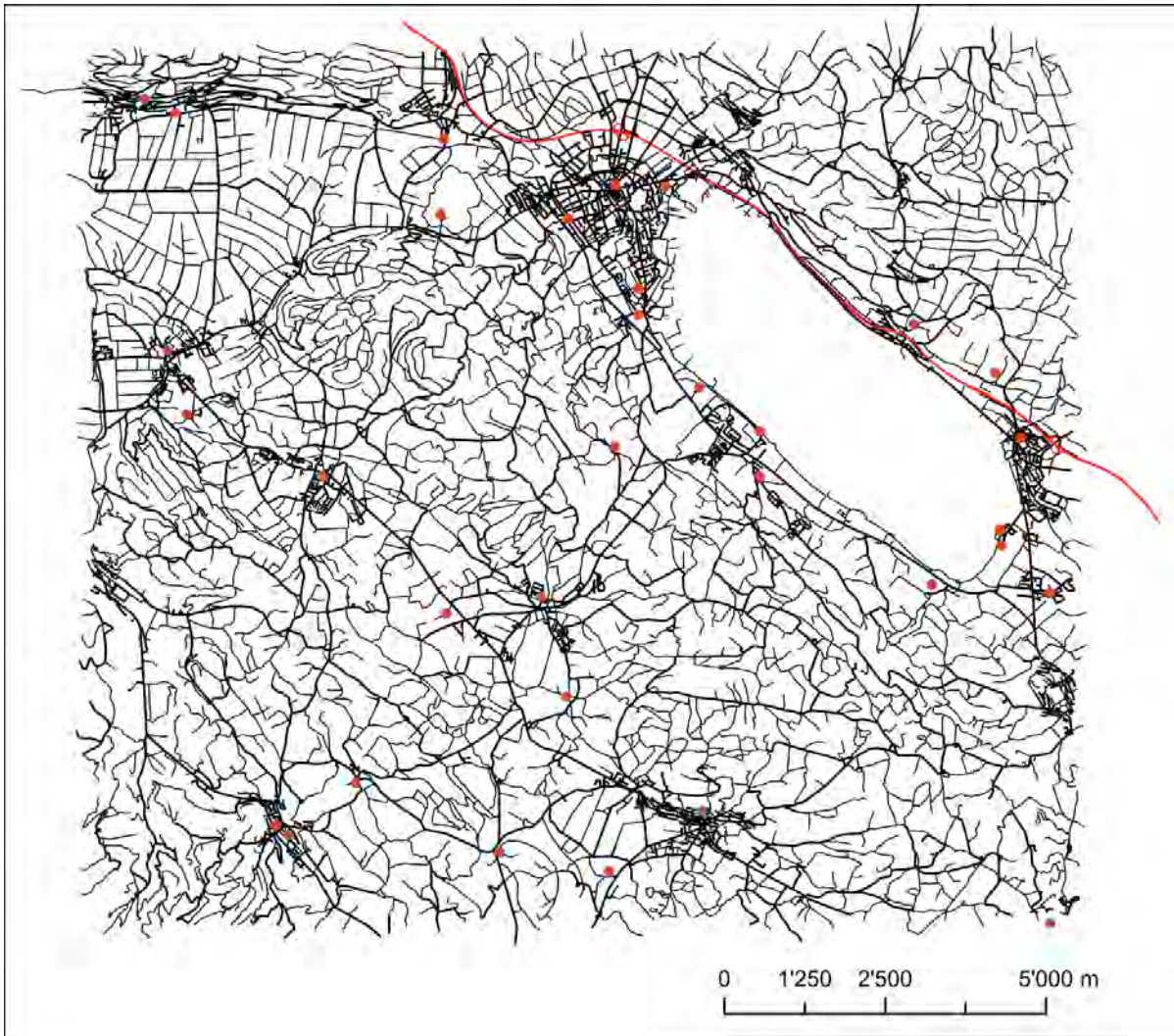
A1: Verteilung der POIs im Testgebiet ZU  
(© swisstopo)



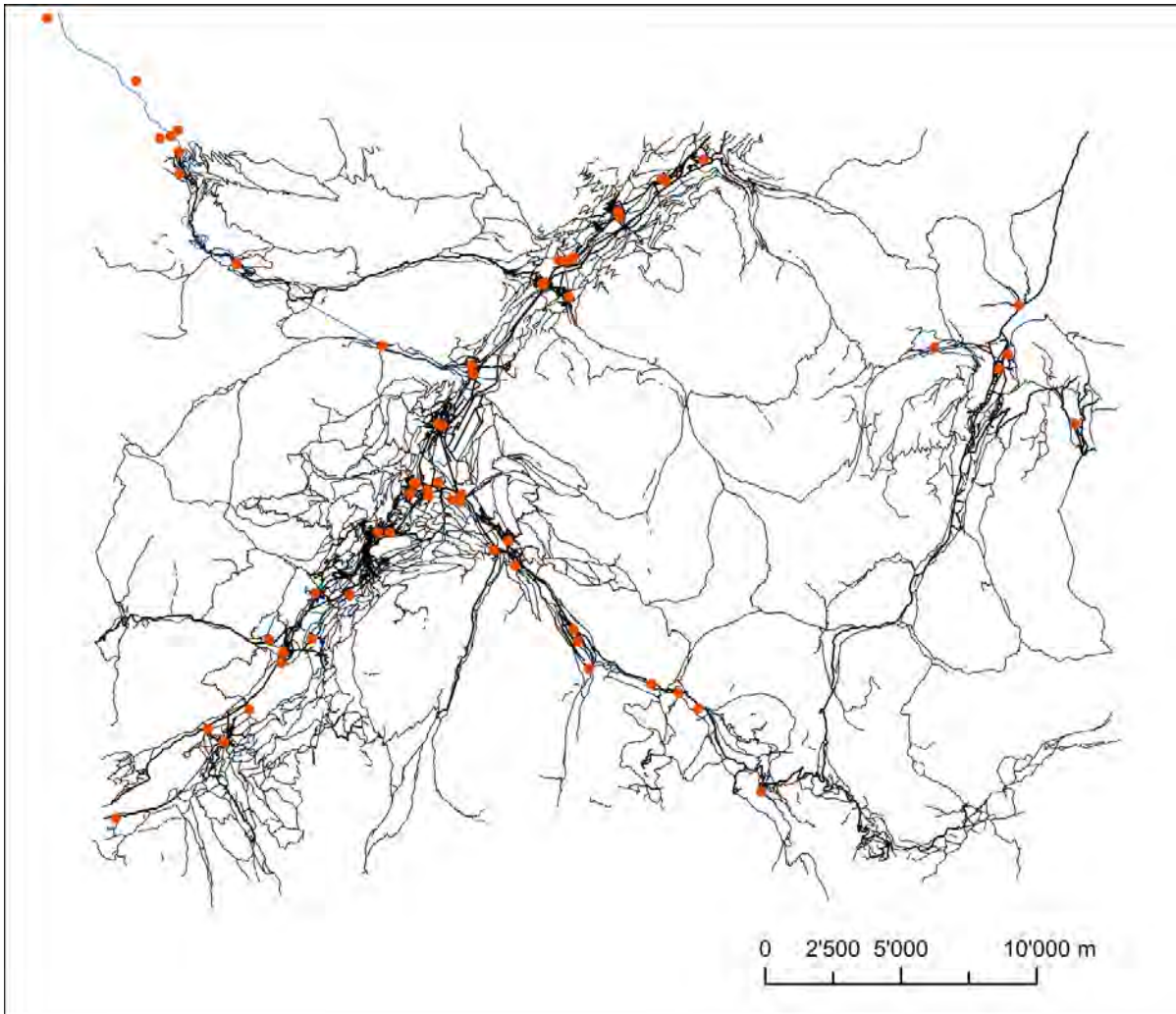


**A2: Verteilung der POIs im Testgebiet WT**  
(© swisstopo)





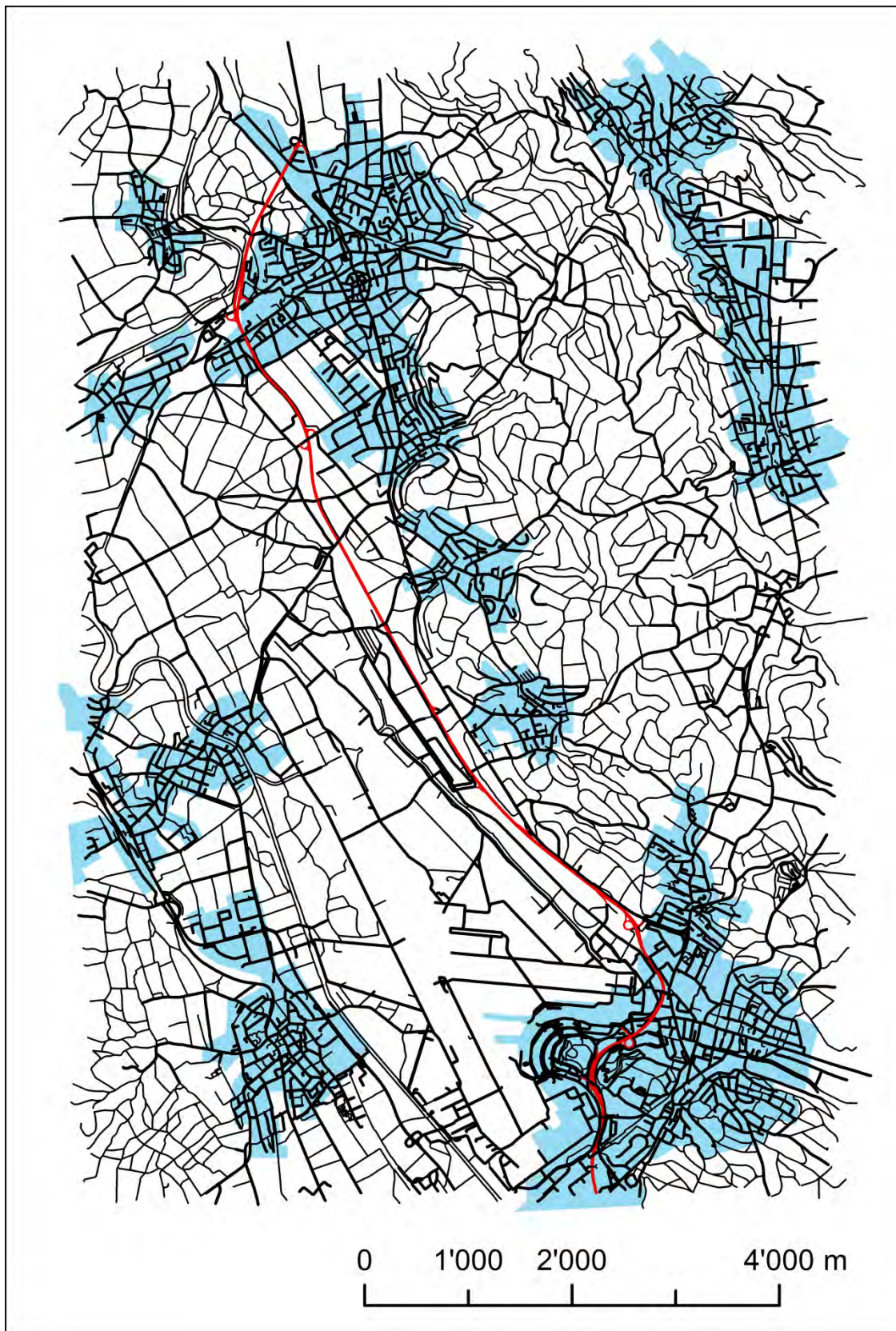
**A3: Verteilung der POIs im Testgebiet SU**  
(© swisstopo)



**A4: Verteilung der POIs im Testgebiet EN**  
(© swisstopo)

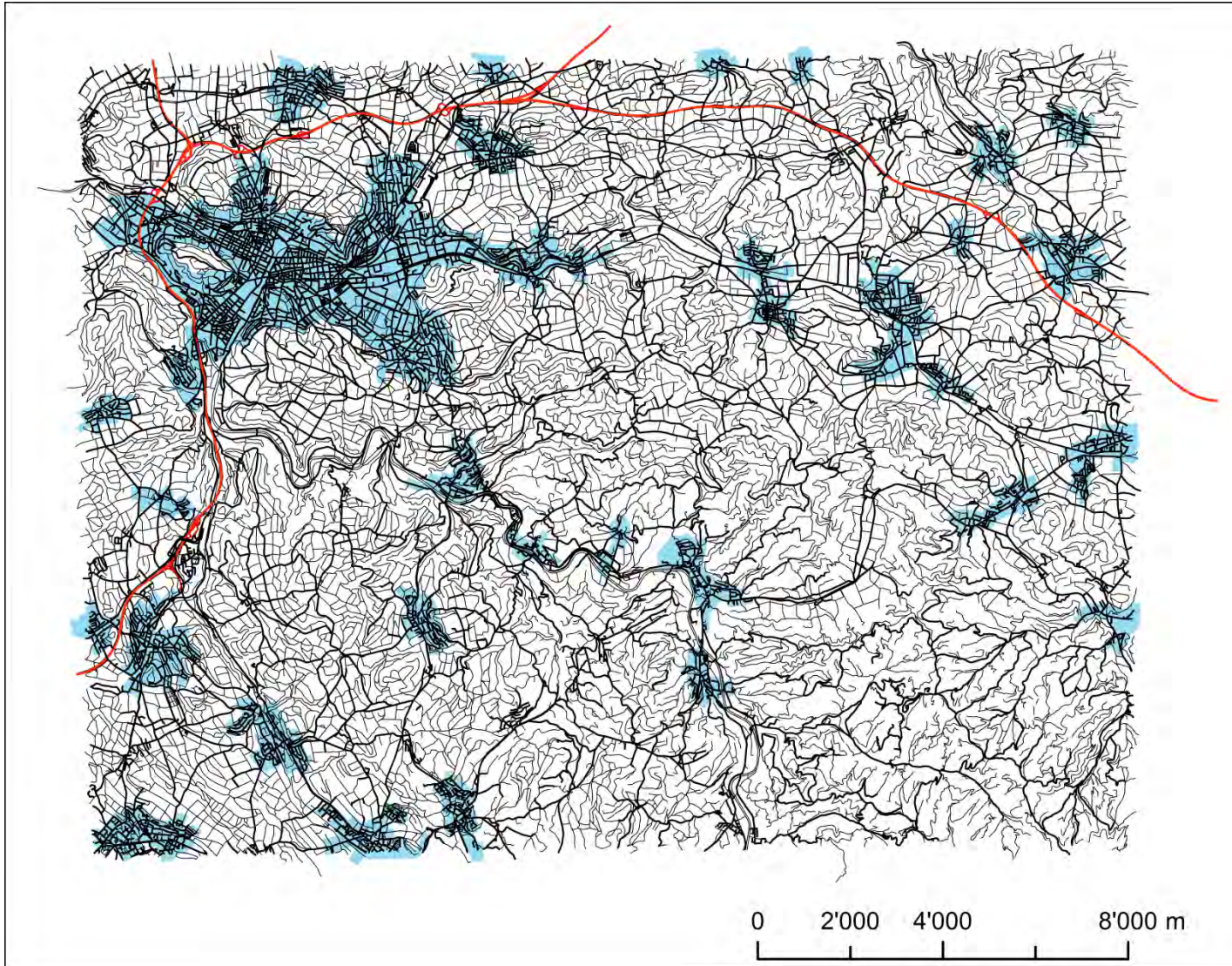


# Anhang B



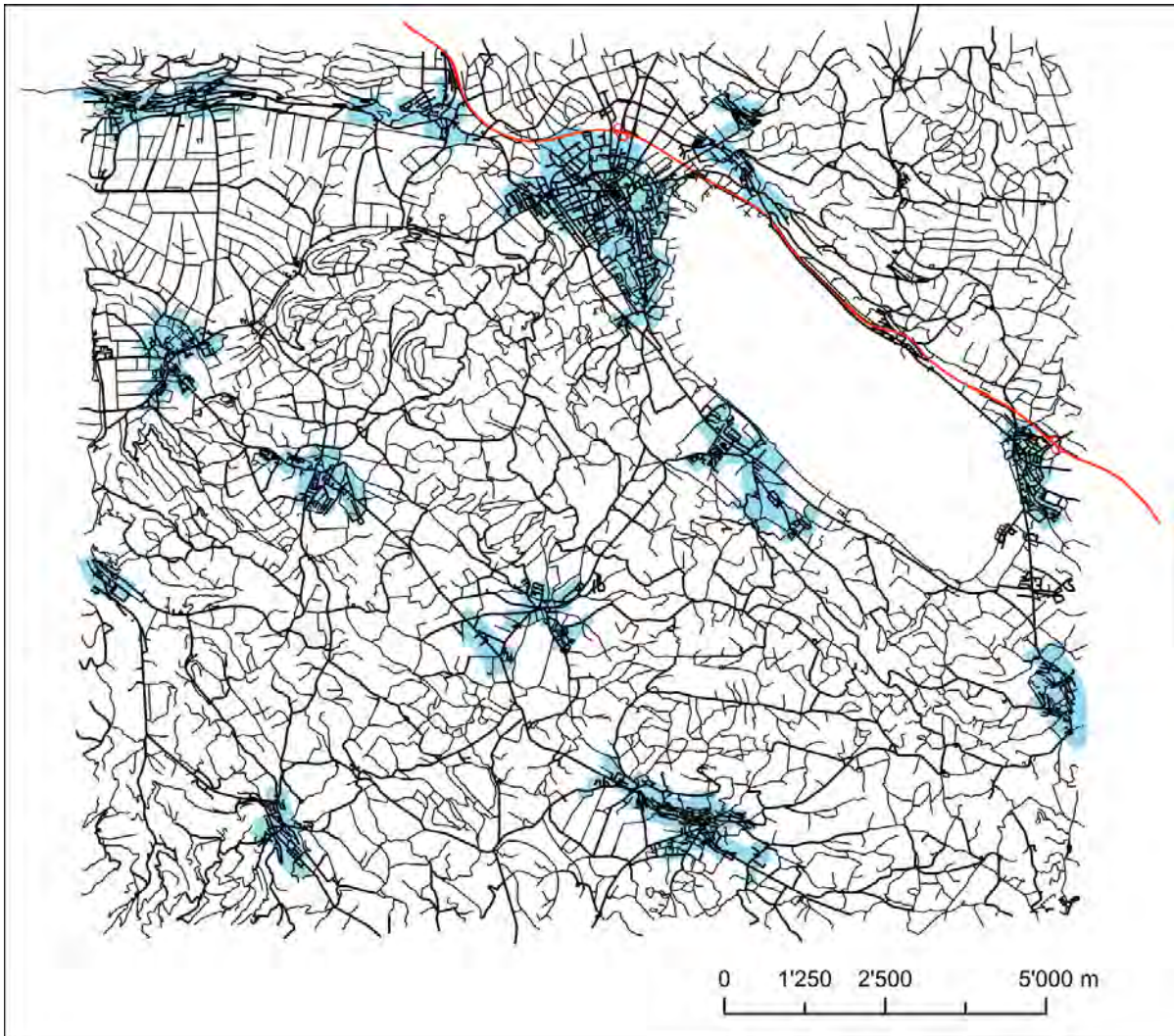
**B1: Verteilung der Siedlungsgebiete im Testgebiet ZU**  
(© swisstopo)





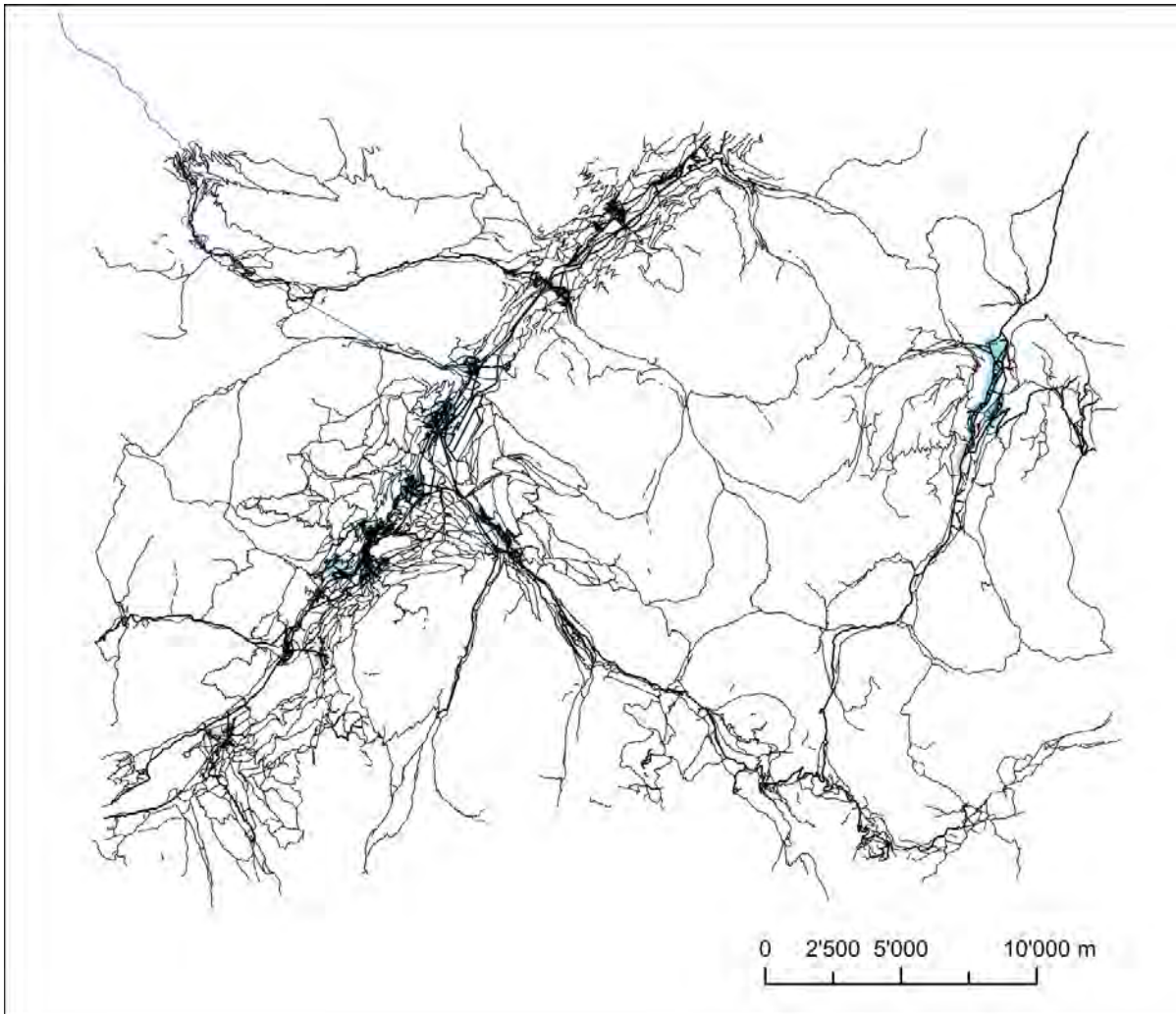
**B2: Verteilung der Siedlungsgebiete im Testgebiet WT**  
(© swisstopo)





**B3: Verteilung der Siedlungsgebiete im Testgebiet SU**  
(© swisstopo)





**B4: Verteilung der Siedlungsgebiete im Testgebiet EN**  
(© swisstopo)

# Anhang C

Masterarbeit Stefan Benz, Expertenbefragung

Juni 2013

## Expertenbefragung

### Einstieg:

Das Ziel meiner Masterarbeit ist die Ausarbeitung eines Algorithmus zur automatischen Selektierung von Strassennetzwerken, ausgehend vom topografischen Landschaftsmodell (TLM) für einen Zielmasstab von 1:50'000. Es umfasst nur die Selektion und ist deshalb kein vollständig beendetes Generalisierungsprodukt. Durch diese Expertenbefragung würde ich gerne die entstandenen Resultate von Experten qualitativ beurteilen lassen. Einerseits sollen die subjektiv-qualitativen Aspekte des Anforderungskatalogs und andererseits spezifische Beispiele in den Testgebieten evaluiert werden. Die Ergebnisse dieser Befragung sollten differenzierte Rückschlüsse über die Brauchbarkeit des Algorithmus liefern, sowie über spezifisch gelungene Bereiche und Problemzonen.

### Einstiegsfragen:

Wie lange arbeiten Sie schon im Bereich der Kartographie?

\_\_\_\_\_

In welcher Abteilung arbeiten Sie? Was ist Ihre Hauptaufgabe?

\_\_\_\_\_

Arbeiten Sie in der topographischen oder thematischen Kartographie?

\_\_\_\_\_

Wie viel Erfahrung haben Sie im Bereich der Generalisierung von Strassennetzwerken?

\_\_\_\_\_

**Testgebiet:** \_\_\_\_\_

### **Frageblock 1: Spezifische Fragen**

#### **Grad der Ausdünnung**

**Wie beurteilen Sie gesamthaft den Grad der Ausdünnung für den Zielmasstab von 1:50'000?**

- Gut
- Akzeptabel
- Schlecht
- Unbrauchbar

Kommentar:

#### **Strukturerhaltung**

**Wie beurteilen Sie die grundlegende Erhaltung der Struktur im Resultat?**

- Gut
- Akzeptabel
- Schlecht
- Unbrauchbar

Kommentar:

**Wie beurteilen Sie den Grad der Ausdünnung in dichteren Gebieten (z.B. Siedlungsgebieten)?**

- Gut
- Akzeptabel
- Schlecht
- Unbrauchbar

Kommentar:

**Wie beurteilen Sie den Grad der Ausdünnung in weniger dichten Gebieten (z.B. in ländlicheren Gebieten)?**

- Gut
- Akzeptabel
- Schlecht
- Unbrauchbar

Kommentar:

**Inwiefern sind die für Sie intuitiv wichtigen Verbindungsstrassen erhalten geblieben?**

- Gut
- Akzeptabel
- Schlecht
- Unbrauchbar

Kommentar:

### **Stichstrassen**

**Wie beurteilen sie die Redaktion von kurzen Stichstrassen/Sackgassen?**

- Gut
- Akzeptabel
- Schlecht
- Unbrauchbar

Kommentar:

**Frageblock 2: Offene Evaluation**

Gibt es im Resultat Bereiche, deren Generalisierung sie als besonders gelungen bezeichnen würden?  
Entsprechende Zonen können direkt im Resultat grün markiert und begründet werden.

Gibt es im Resultat Bereiche, deren Generalisierung Sie als problematisch bezeichnen würden?  
Entsprechende Zonen können direkt im Resultat rot markiert und begründet werden.

**Abschluss:**

**Vielen herzlichen Dank für Ihre Beurteilung!**

Würden sie für allfällige Rückfragen zur Verfügung stehen? Falls ja, wie lautet Ihre Email-Adresse?








































\_\_\_\_\_

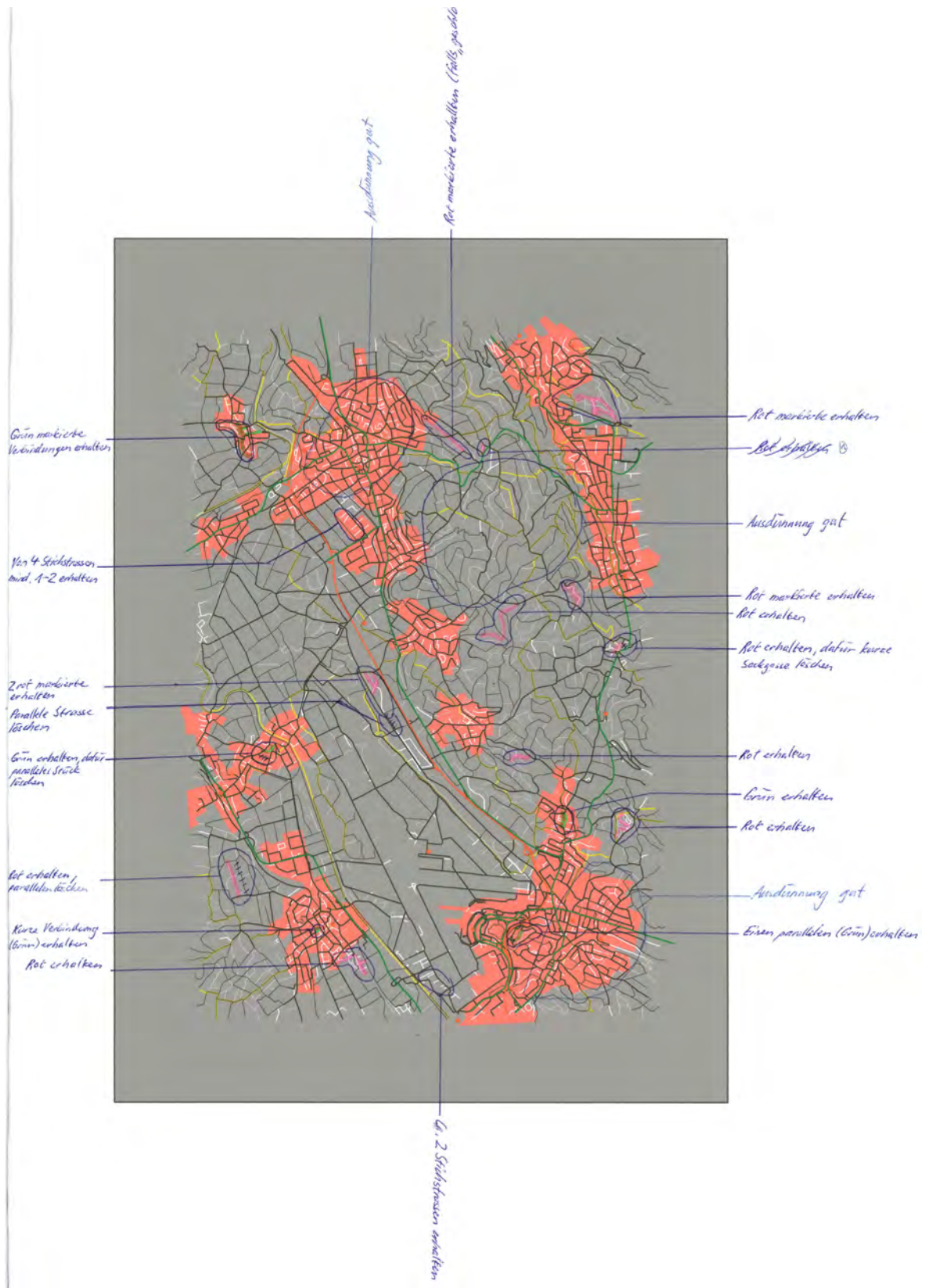
Möchten Sie eine Kopie der fertigen Arbeit? Falls ja, wie lautet Ihre Email-Adresse?

\_\_\_\_\_

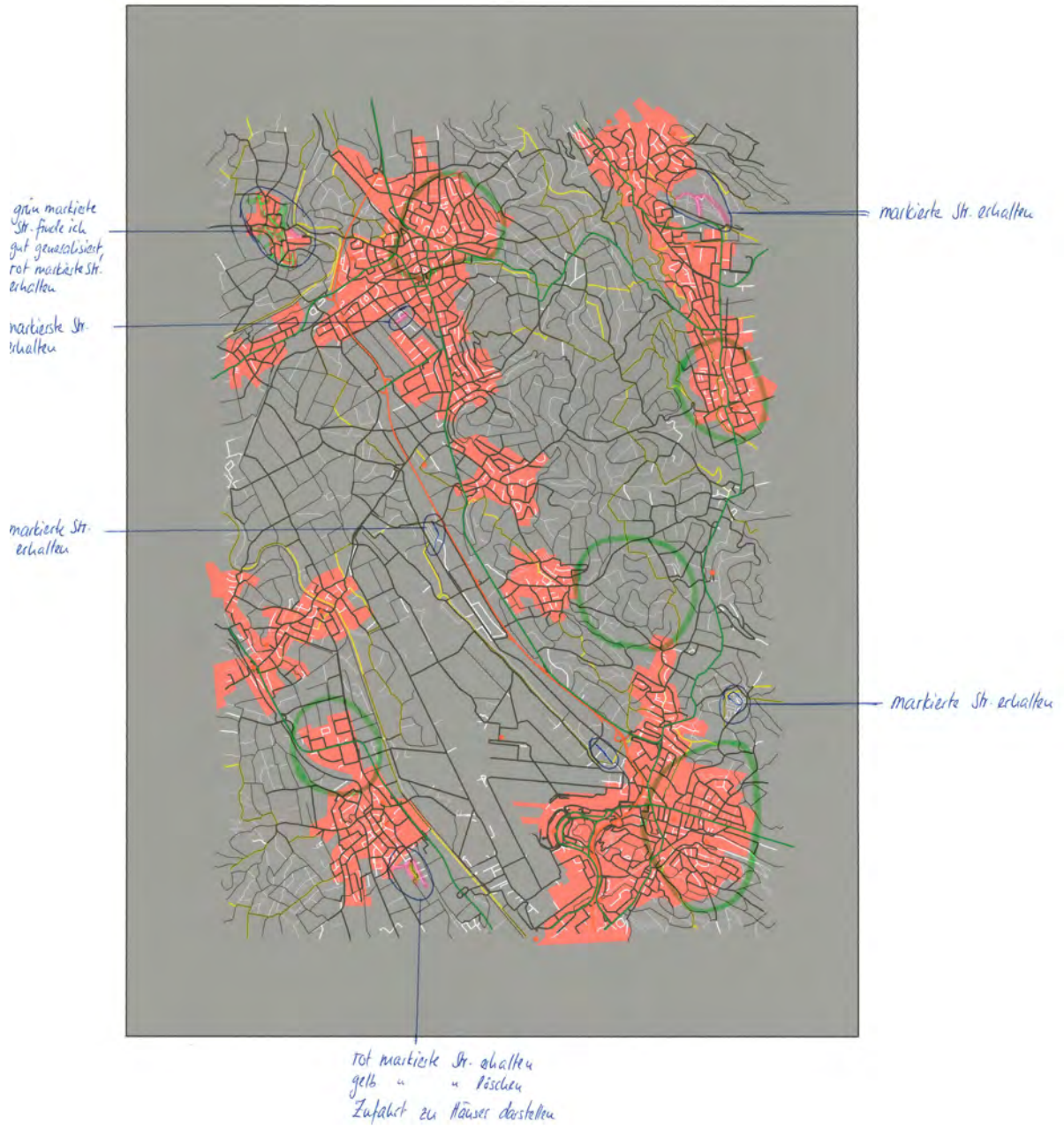


# Anhang D

Legend	
	POI
	VEC200 Siedlungsgebiete
Beibehaltene Features	
OBJEKTYP	
	100 Autobahn
	200 Autostrasse
	300 Ausfahrt
	400 Einfahrt
	500 Zufahrt
	600 Dienstzufahrt
	700 Raststaette
	1000 10m_Strasse
	1100 8m_Strasse
	1200 6m_Strasse
	1300 4m_Strasse
	1400 3m_Strasse
	1500 2m_Weg
	1600 2m_Wegfragment
	1700 1m_Weg
	1800 1m_Wegfragment
	1900 Autozug
	2100 Klettersteig
	2200 Markierte Spur
Verbindungsstrassen	
VERKEHRSSBE	
	200 Durchgangsstrasse
	300 Verbindungsstrasse
Wanderwege	
Wanderweg	
	200 Wanderweg
	300 Bergwanderweg
	400 Alpinwanderweg
	500 Andere
Gelöschte Features	
OBJEKTYP	
	1000 10m_Strasse
	1100 8m_Strasse
	1200 6m_Strasse
	1300 4m_Strasse
	1400 3m_Strasse
	1500 2m_Weg
	1600 2m_Wegfragment
	1700 1m_Weg
	1800 1m_Wegfragment
	1900 Autozug
	2100 Klettersteig
	2200 Markierte Spur



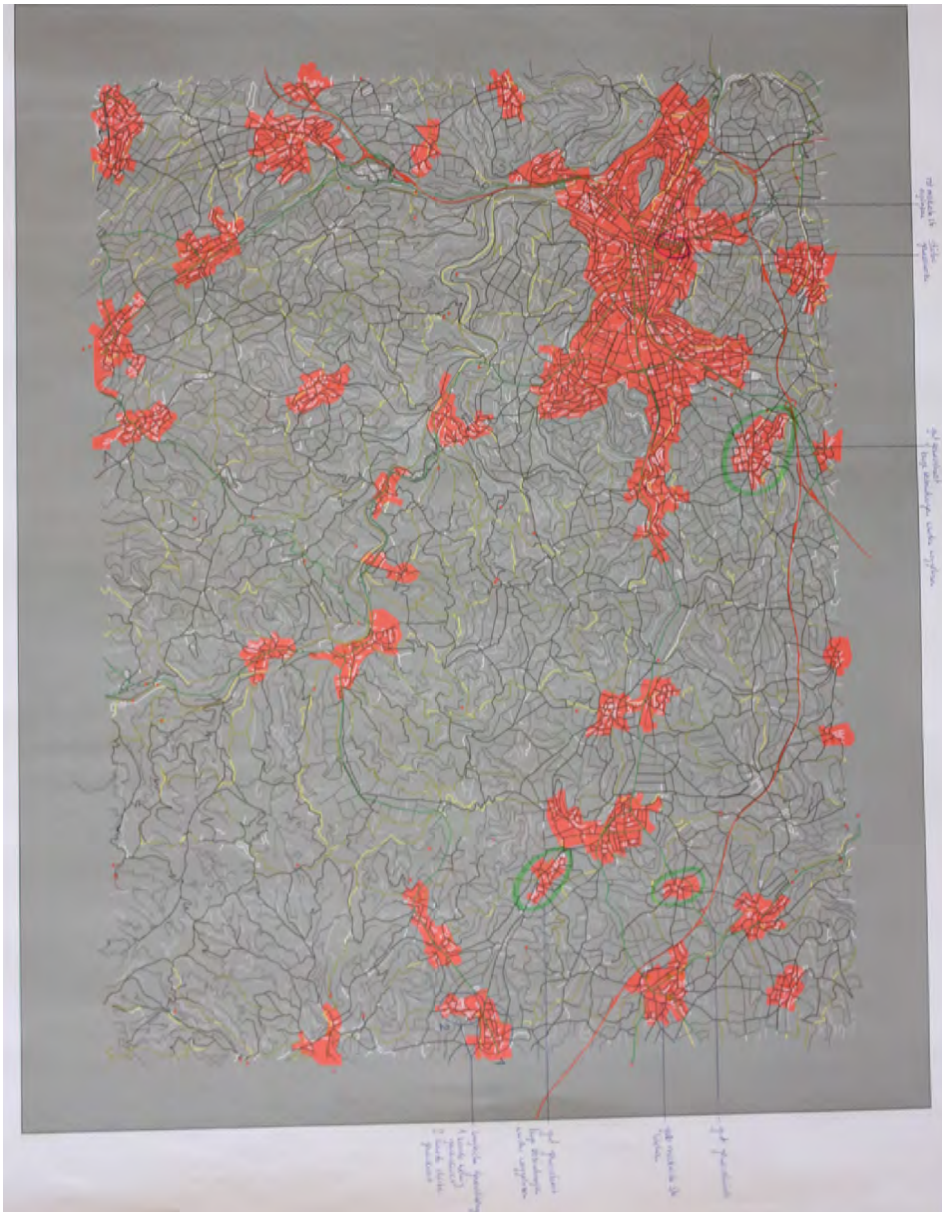
D2: Evaluierungsplot ZU (1)  
 (© swisstopo)



**D3: Evaluierungsplot ZU (2)**  
 (© swisstopo)







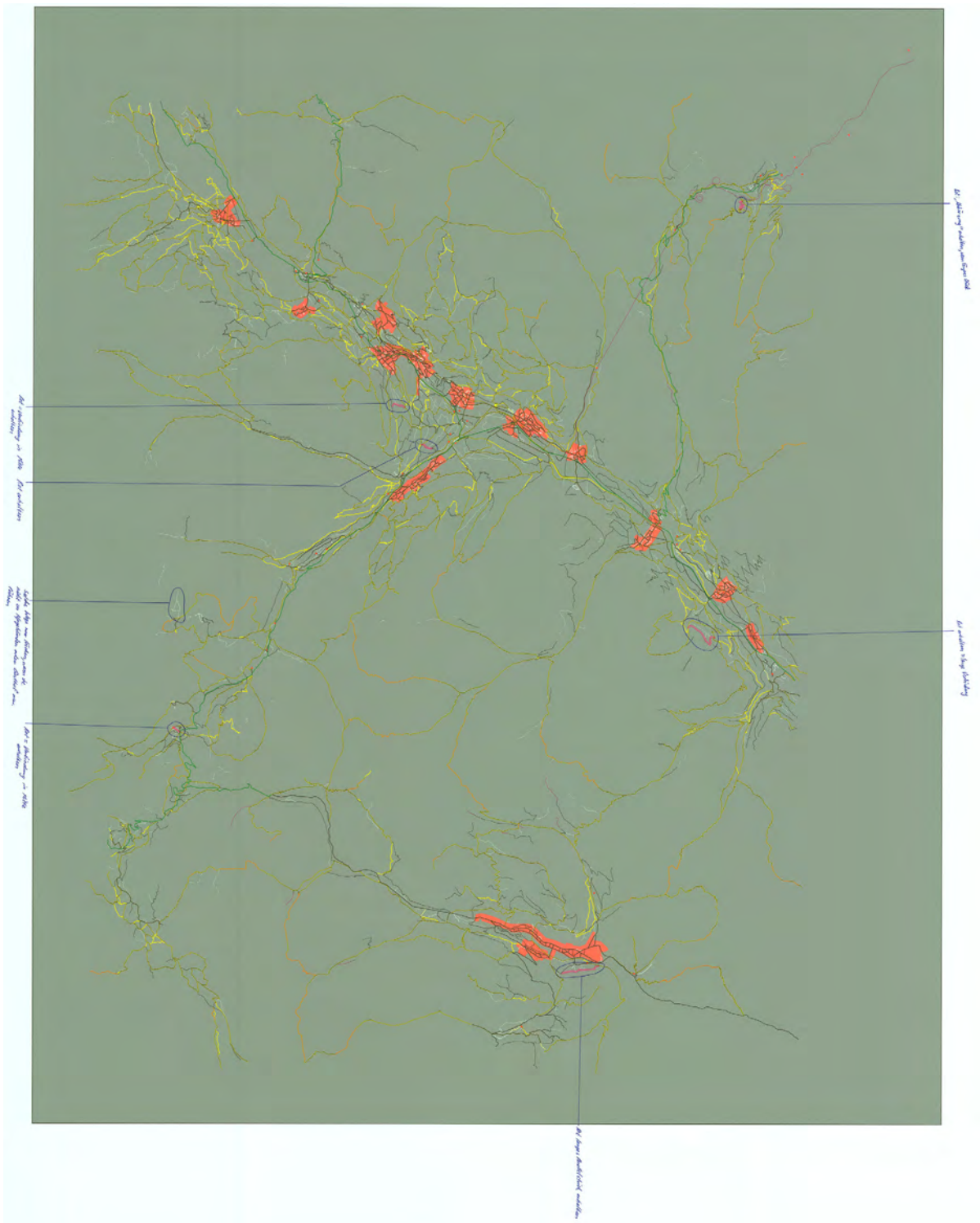
D5: Evaluierungsplot WT (2)  
 (© swisstopo)











**D8: Evaluierungsplot EN (1)**

(© swisstopo)



# Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Bülach, 30. August 2013

Stefan A. Benz