



**Analyse zur Eignung von Wanderwegen für
Menschen mit Handicap auf Grundlage von
Oberflächeninformationen aus freien Geodaten
und von Höhendaten**

Masterarbeit
im Studiengang Geoinformatik

vorgelegt von
Steffen Kappe
Matrikelnummer: 940162

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Norbert de Lange

Zweitprüfer: Dr. rer. nat. Florian Hillen

Osnabrück, den 12.05.2016

Zusammenfassung

Menschen mit Mobilitätseinschränkungen stellen eine relevante Gruppe in der deutschen Bevölkerung dar. Für die Mobilität dieser Menschen spielt die Steigung und die Oberflächenbeschaffenheit von Wegen eine entscheidende Rolle. Ein Ziel der Arbeit ist es, diese Menschen in ihrer Mobilität zu unterstützen, indem zum einen untersucht wird, wie Steigungen möglichst kleinräumig berechnet werden können. Im Zuge dessen werden auch Objekte mit einer besonderen Steigung, z.B. Treppen, berücksichtigt. Zum anderen stellt sich diese Arbeit die Frage, wie Oberflächeninformationen aus freien Geodaten abgeleitet und ausgewertet werden können. Außerdem wird untersucht, ob diese Datenquelle relevant für die Bestimmung der Oberfläche von Wanderwegen sein kann.

Die Auswertung zeigt, dass das OSM-Datenmodell großes Potential hinsichtlich der Beschreibung der Oberflächen von Wanderwegen besitzt. Mit Blick auf die Vollständigkeit der Oberflächeninformationen weisen die untersuchten Daten aber Defizite auf. Ein Sechstel der beobachteten Steigungen liegen im Bereich der Normen für barrierefreie Wege. Es wird deutlich, dass die Punktdichte, die Klassifikation der Daten, aber auch kleinere Objekte, darunter Bürgersteige, Einfluss auf das Ergebnis haben.

Abstract

Humans with reduced mobility represent a large group within the population of Germany. Regarding the mobility of these people, the slope and the surface condition of roads plays a crucial role. The goal of this work is to support these people in their mobility, by examining firstly, how inclines can be computed on a small scale. In the course of that, also objects with a particular incline, e.g. stairs, are considered. Secondly, this work approaches the question of how surface information can be derived from OpenStreetMap data and how it can be assessed afterwards. Besides, it is examined whether this data source can be relevant in determining the surface of roads.

The analysis shows that the OpenStreetMap data model has great potential regarding the description of surfaces of roads. Looking at the completeness of surface information, the examined data showed deficits. One sixth of the observed inclines were in the range of standards for barrier-free paths. It is clear that the dot density, the classification of the data, as well as smaller objects, including sidewalks, have influence on the result.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung	5
1.2 Abgrenzung zu anderen Arbeiten	6
1.3 Aufbau	8
2 Datengrundlage	9
2.1 Flugzeuggestütztes Laserscanning	9
2.2 OpenStreetMap	12
2.3 Untersuchungsgebiet	19
3 Stand der Forschung	23
3.1 Flugzeuggestütztes Laserscanning	23
3.1.1 Anwendungen von Laserscanning in der Forschung	24
3.1.2 Klassifikation von Laserscanning-Daten	26
3.2 OpenStreetMap	32
3.2.1 Datenqualität von OpenStreetMap	32
3.2.2 Oberflächeninformationen aus OpenStreetMap	35
4 Methodik	38
4.1 Untersuchte Wegtypen	38
4.2 Vorüberlegungen zur Verarbeitung der Laserscanning-Daten	41
4.2.1 Festlegung des Oberflächentyps	42
4.2.2 Steigungszellen	44
4.2.2.1 Länge der Steigungszellen	45
4.2.2.2 Breite der Steigungszellen	46
4.2.3 Klassifizierung von Steigungen	53
4.2.4 Treppen	56
4.2.5 Brücken	58
4.3 Verarbeitungsschritte von Laserscanning- und OSM-Daten	60
4.3.1 Klassifikation der Laserscanning-Daten	60
4.3.2 Erzeugung der Steigungszellen	67
4.3.3 Verarbeitung der Höhenpunkte	71
4.3.4 Auswertung der Oberflächeninformationen aus dem OSM-Datensatz	76
4.3.4.1 Auswertung des Wegtyps	77
4.3.4.2 Auswertung der Tags	81

4.3.5 Einordnung der OSM-Features in Oberflächenkategorien	89
5 Ergebnisse und Diskussion	91
Literaturverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis	XVI
Listingverzeichnis	XVII
Anhang	XVIII

1. Einführung

Der demographische Wandel wird die Altersstruktur der Bevölkerung in Deutschland stark verändern. Ausgelöst durch eine niedrige Geburtenrate und steigende Lebenserwartung steigt der Anteil älterer Menschen an der deutschen Gesamtbevölkerung (vgl. Bundesministerium der Finanzen, 2013, S. 7). Unter Annahme einer auf Basis 2013 konstanten Geburtenrate von 1,4 Kindern pro Frau (vgl. Statistisches Bundesamt, 2016c) und einer Zuwanderung von 100.000-200.000 Menschen pro Jahr, wird für das Jahr 2060 prognostiziert, dass 32-33% der Bevölkerung über 65 Jahre alt ist. Das entspricht 22,3-23,2 Millionen Menschen. Im Jahr 2013 waren es noch 16,9 Millionen (21%) (s. Abb. 1.1). Ein Blick in andere nahe Länder zeigt, dass der demographische Wandel auch eine europäische Herausforderung ist. So prognostiziert die Europäische Kommission für 2060 einen Anstieg der Bevölkerungsgruppe der über 65-jährigen in 30 untersuchten europäischen Ländern (vgl. Europäische Kommission, 2015, S. 43). Der Anteil der Bevölkerungsgruppe von über 80 Jahren steigt im Vergleich noch stärker und betrifft alle 31 untersuchten Länder.

Mobilität ist ein wichtiger Faktor für das Wohlbefinden und die Lebensqualität älterer Menschen (vgl. Gagliardi et al., 2010, S. 45). Dennoch nimmt die Mobilität im Alter immer weiter ab (vgl. Rosano et al., 2014, S. 1373). Um ein längeres aktives Leben zu ermöglichen, wird Forschung über Alterungsprozesse und die Bewältigung von Mobilitätseinschränkungen betrieben (vgl. Rosano et al., 2014, S. 1373). Doch nicht nur für ältere Menschen sind Mobilitätseinschränkungen ein Thema. Auch immobile Schwerbehinderte sind hiervon betroffen. Dem statistischen Bundesamt zufolge gab es 2013 insgesamt ca. 2,229 Millionen immobile Schwerbehinderte in Deutschland (vgl. Statista, 2016b). Dies trifft auf Personen mit einem amtlich anerkannten Behinderungsgrad von mindestens 50 Prozent zu, deren Gesundheitszustand soweit eingeschränkt ist, dass die Bewältigung von Alltagssituationen nicht mehr ohne apparative Unterstützung möglich ist. Weiterhin gibt es Menschen, deren Gehvermögen auf Strecken unter 200m eingeschränkt ist. Der Anteil dieser Gruppe an der Schweizer Gesamtbevölkerung betrug 2012 2,8% (vgl. Statista, 2016a).

Die Bevölkerungsgruppen mit Mobilitätseinschränkungen sind die Zielgruppe dieser Arbeit. Sie machen wie beschrieben, in Deutschland und im Ausland, einen beträchtlichen Teil der Bevölkerung aus. Die Personen sind oft auf Hilfsmittel, wie Gehhilfen, einen Rollator, einen Rollstuhl oder menschliche Assistenz angewiesen. Hinsichtlich der Mobilität stellen insbesondere Hindernisse, wie Treppen oder Rampen ein Problem dar. Sie besitzen i.d.R. eine höhere Steigung als andere Wege und erfordern daher mehr Kraftaufwand. Auch Patienten die sich einer Operation, bspw. im orthopädischen oder kar-

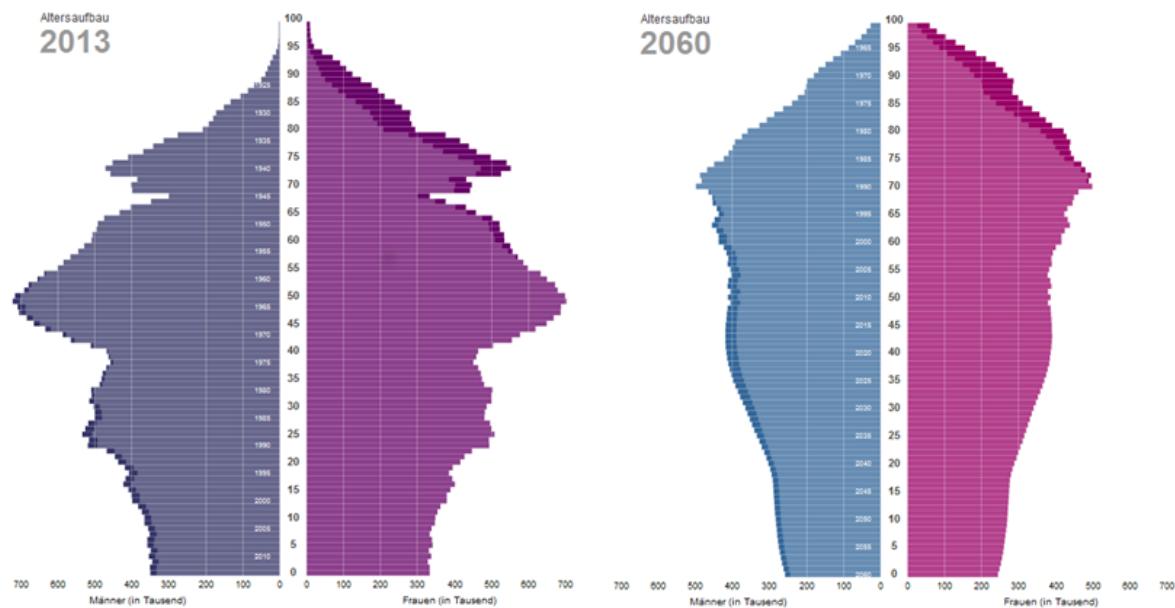


Abbildung 1.1.: Bevölkerungsstruktur in Deutschland im Jahre 2013 (links). Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland für das Jahr 2060 (rechts). Bei der Bevölkerungsvorausberechnung wird angenommen, dass die Geburtenhäufigkeit bei 1,4 Kindern je Frau liegt. Außerdem, dass der Wanderungssaldo ab 2021 +200.000 Personen beträgt. Hinsichtlich der Lebenserwartung wird bei Geburt im Jahr 2060 ein Wert von 84,8 Jahren für Jungen und 88,8 Jahren für Mädchen angenommen. Quelle: Statistisches Bundesamt, 2016a.

diologischen Bereich, unterziehen, können anschließend in ihrer Mobilität eingeschränkt sein. Das Untersuchungsgebiet, die Gemeinde Bad Rothenfelde, ist Sitz vieler Kliniken, die auch diese Fachrichtungen vertreten. Forschung für diese Personengruppen ist daher an diesem Standort besonders relevant.

Ein wichtiger Faktor für diese Bevölkerungsgruppe ist Barrierefreiheit. Die Definition der Barrierefreiheit ist auf das Gesetz zur Gleichstellung behinderter Menschen (Behindertengleichstellungsgesetz, BGG) zurückzuführen. Die Barrierefreiheit wird in § 4 beschrieben: „Barrierefrei sind bauliche und sonstige Anlagen, Verkehrsmittel, technische Gebrauchsgegenstände, Systeme der Informationsverarbeitung, akustische und visuelle Informationsquellen und Kommunikationseinrichtungen sowie andere gestaltete Lebensbereiche, wenn sie für behinderte Menschen in der allgemein üblichen Weise, ohne besondere Erschwernis und grundsätzlich ohne fremde Hilfe zugänglich und nutzbar sind“. Nach §8 des gleichnamigen Gesetzes sollen „zivile Neubauten sowie große zivile Um- oder Erweiterungsbauten des Bundes einschließlich der bundesunmittelbaren Körperschaften, Anstalten und Stiftungen des öffentlichen Rechts entsprechend den allgemein anerkannten Regeln der Technik barrierefrei gestaltet werden.“ Barrierefreiheit ist also gesetzlich verankert.

Dem Titel der Arbeit entsprechend wird eine Analyse hinsichtlich der Eignung von Wanderwegen, für die definierte Zielgruppe, durchgeführt. Die Personen der Zielgruppe leiden unter einer individuell stark ausgeprägten Mobilitätseinschränkung. Ebenso ist der Grund, der zu diesem Zustand führte, individuell. Dennoch gibt es bestimmte Faktoren, die die Mobilität aller Personen in der Zielgruppe beeinflussen: die Steigung und die Oberflächenbeschaffenheit des Weges, der gewandert wird. Jede Steigung, die bewältigt werden muss, stellt für Wanderer eine körperliche Belastung dar. Insbesondere ist das für Menschen mit Handicap der Fall. Manche von ihnen können nur kurze Distanzen bewältigen, andere müssen die Belastung, bspw. nach einer Operation, dosieren. Daher sind Informationen über die Steigung eines Weges, für den Wanderer mit Handicap, wertvoll. Nicht zielführend wäre es, einzelne Steigungswerte über eine große Fläche von bspw. über zehn Quadratmetern, zu berechnen. Denn auch kleinere Hindernisse, wie z.B. Treppen, die die Mobilität von Wanderern behindern, müssen berücksichtigt werden. Um Menschen mit Handicap in ihrer Mobilität zu unterstützen, ist es daher sinnvoll, kleinräumige Steigungen für potentielle Wanderwege auszuweisen.

Neben der Steigung hat auch die Oberflächenbeschaffenheit einen Einfluss auf die Mobilität. Ideal sind befestigte Wege, die gepflegt und ohne Spezialschuhwerk zu bewältigen sind. Auf diesen Wegen wird auch die Wetteranfälligkeit minimiert. Unbefestigte Wege hingegen, deren Oberfläche z.B. aus Sand oder Naturboden besteht, haben einen größeren Widerstand und sind daher schwerer begehbar. Außerdem können sie ein Sicherheitsrisiko darstellen. Etwa wenn Baumwurzeln hervorstehen, oder Unebenheiten einen Sturz begünstigen. Zudem können Wege mit einer Oberfläche aus Naturboden bei entsprechendem Niederschlag, z.B. im Herbst und Winter, unpassierbar sein. Neben der kleinräumigen Ausweisung von Steigungen, muss daher auch eine Analyse der Oberfläche

erfolgen.

Die Datengrundlage hierfür kann aus unterschiedlichen Quellen stammen. Zu nennen sind hier amtliche, kommerzielle und freie Geodaten. Ein wichtiger Faktor bei der Auswahl sind Kosten und Nutzungsrechte. Freie Geodaten, die u.a. das Projekt OpenStreetMap (OSM) anbietet, stehen hierbei im Kontrast zu traditionellen Kartenanbietern, wie Regierungsorganisationen oder Unternehmen, die dazu neigen hohe Preise zu verlangen und die Nutzungsrechte der Daten zu beschränken (vgl. Coast, 2010, S. 4). Freie Geodaten besitzen weiterhin den Vorteil, dass sie nicht in periodischen Zyklen aktualisiert werden, wie das bei amtlichen Daten oft der Fall ist, bspw. alle sechs Jahre für DGM in Nordrhein-Westfalen (vgl. Bezirksregierung Köln, 2016). Sie werden von freiwilligen Nutzern, unabhängig von Bearbeitungszyklen, fortgeführt und sind daher potentiell hochaktuell. In Bezug auf Fußgänger ist das wichtig, um Oberflächentypen und den Zustand des Weges kartieren zu können. Schlaglöcher etwa, können gefährlich für Fußgänger sein und hohen Schaden an Fahrzeugen verursachen (vgl. Eriksson et al., 2008). Der allgemeine Zustand einer Straße kann in OSM über Tags angegeben werden, wie z.B. „smoothness“ (vgl. OpenStreetMap, 2016h). Die potentielle Aktualität der Daten unterstreicht auch die Forschungsarbeit von Lauer et al. (2013), die Straßenarten auf Basis von gängigen Smartphone-Sensoren detektieren und sie anschließend OSM-Straßenarten zuweisen. OSM ermöglicht es, Wege, Straßen und Oberflächen abzubilden (vgl. OpenStreetMap, 2016l). Außerdem hat OSM eine hohe Relevanz in der Forschung, s. Kap. 3.2. Es ist auf Basis der aufgeführten Argumente interessant zu erfahren, welche Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit der OSM-Datenbestand für den vorliegenden Anwendungszweck liefern kann. Unklar ist, wie vollständig die Oberflächeninformationen sind. Daraus ergibt sich die Frage, inwieweit freie Geodaten in Bezug auf ihre Oberflächeninformationen sinnvoll nutzbar sind.

Eine Untersuchung der OSM-Daten hinsichtlich der Oberfläche und in Kombination mit kleinräumigen Steigungen, könnte Basis für weitere Anwendungen sein. Fußgängernavigationssysteme etwa, benötigen diese Informationen. Außerdem können die Daten die Mobilität von Rollstuhlfahrern im Allgemeinen fördern. Die Plattform „<http://wheelmap.org>“ bspw. ermöglicht es, rollstuhlgerechte Orte zu suchen, zu finden und zu markieren. Noch bevor ein Rollstuhlfahrer sich auf den Weg zu einem Ort, bspw. einem Cafe, macht, kann er hier anhand der Bewertungen des Ortes, die durch andere Nutzer eingetragen wurden, sehen, ob dieser Ort rollstuhlgerecht ist. Nach der Gründung 2010 wurden auf der Karte bis 2015 bereits 500.000 Orte markiert (vgl. Sozialhelden e.V., 2015). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit könnten eine Ergänzung für dieses Projekt sein, um mehr Informationen für dessen Nutzer bereitzustellen. Es wäre nicht nur möglich Orte zu markieren, sondern auch deren Erreichbarkeit mit Rollstuhl oder zu Fuß, basierend auf der hier durchgeföhrten Analyse von Straßen und Wegen, zu beurteilen.

1.1. Zielsetzung

Ein Untersuchungsgegenstand der Arbeit ist zu klären, wie die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Steigungen auf Wanderwegen sinnvoll eingeordnet werden können. Es soll gelingen, Wanderern, durch die Ausweisung und Einordnung von Steigungen, Mobilitätshilfen zu geben, anhand derer sie besser entscheiden können, welcher Weg für sie geeignet ist. Hierfür sind auch Gesetze und Normen auszuwerten. Sie sollen klären, welche Steigungen für barrierefreie Wege gelten dürfen.

Die Steigungen werden aus einer Punktfolge, die mit flugzeuggestütztem Laserscanning erfasst wurde, abgeleitet. Es ist in der Arbeit zu klären, ob hieraus auch eine Rasteroberfläche, wie bei den amtlichen Daten, berechnet wird. Oder aber, ob ein anderer Oberflächentyp gewählt wird. Die Punktfolge muss zudem vorverarbeitet werden, um störende Höhenpunkte, etwa durch Vegetation, zu eliminieren. Eine Fragestellung der Arbeit ist daher auch, welcher Klassifikationsalgorithmus auf der Punktfolge eingesetzt werden kann, um diese Aufgabe zu lösen. Der Fokus liegt hier auf freien Algorithmen, die eine wissenschaftliche Basis besitzen. Es werden ausgewählte Ansätze vorstellt und evaluiert.

Wie zuvor bereits erwähnt, ist es wichtig, die Steigungen so kleinräumig wie möglich zu berechnen. Dieses Vorgehen ermöglicht es, kleinere Steigungsunterschiede auf dem Weg sichtbar zu machen. Außerdem kann so eine Steigungsberechnung von besonderen Hindernissen stattfinden, die für Menschen mit Handicap wichtig sind. Hierzu zählen Treppen und Rampen. Entsprechend dieser Ausführungen setzt sich die Arbeit das Ziel, eine Datenstruktur zu schaffen, die kleinräumige Steigungen speichern kann. Sie muss die Wege in ihrer unterschiedlichen Breite abbilden und kleinräumig genug sein, um Steigungen im Abstand von wenigen Schrittängen zu speichern. Außerdem ist es ein Ziel die Steigungen auf Basis der zuvor durchgeföhrten Klassifizierung, für die Datenstruktur zu berechnen.

Weitere Zielsetzungen der Arbeit betreffen den Teil, in dem die Oberfläche näher analysiert wird. Zum einen soll geklärt werden wie die Daten des freien Geodatenportals OpenStreetMap (OSM), hinsichtlich der Oberfläche von Wanderwegen, ausgewertet werden können. Zum anderen, wie gut sich OSM-Daten zur Bestimmung der Oberfläche von Wanderrouten eignen. Die Fragestellungen beziehen sich auf das Datenmodell von OSM im Allgemeinen und dessen Fähigkeit, Informationen zur Oberfläche sinnvoll abzubilden. Es ist herauszufinden, ob es bspw. genug Tags gibt, mit denen sich Variationen bzgl. dem Wartungszustand und dem Oberflächenbelag darstellen lassen. Außerdem wird die Vollständigkeit und die Menge der Daten analysiert. Es ist zu klären, ob die verfügbaren Tags aktiv von den Beitragenden genutzt werden und wie groß eventuelle Datenlücken sind. Unklar ist auch, über wie viele der Wege im Untersuchungsgebiet Aussagen zu deren Oberflächenbeschaffenheit getroffen werden können. Dahinter stehen Fragen nach dem praktischen Nutzen der Daten. Eine Auswertung der Daten im Untersuchungsgebiet und eine Ergebnisübersicht sollen helfen zu beurteilen, ob dieser Teil des OSM-Datenbestands

für zukünftige Aufgaben und Projekte relevant sein kann.

1.2. Abgrenzung zu anderen Arbeiten

Laserscanning, im Speziellen flugzeuggestütztes Laserscanning, ist ein weit erforschtes Thema. Es existieren grundlegende Werke (vgl. Wehr u. Lohr, 1999, Mather u. Koch, 2011, S. 315 ff. und Baltsavias, 1999). Laserscanning wird, wie auch in dieser Arbeit, häufig zur Bestimmung von Höhen und zur Berechnung von Oberflächen eingesetzt (vgl. Jabolodoff et al., 2012, S. 6 und Pourali et al., 2014). Amtliche Behörden erzeugen Raster, um Höhen, wie im DGM, darzustellen (vgl. Bezirksregierung Köln, 2016). Auch die Bildung von TIN-Oberflächen ist nicht neu (vgl. Jabolodoff et al., 2012, S. 6 und J. Zhang u. Lin, 2013).

Diese Arbeit unterscheidet sich von anderen Arbeiten und im Speziellen auch von amtlichen Daten darin, dass die Bestimmung von Oberflächen und Steigungen kleinräumig, nur auf der Länge und Breite des Wegenetzes im Untersuchungsgebiet, erfolgt. Kleinräumige Steigungen, wie sie hier benötigt werden, sind von amtlicher Seite, in Form des Landesamts für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), nicht zu bekommen. Höhendaten liegen dort flächendeckend in digitalen Geländemodellen vor, die die Geländeoberfläche approximieren. Die Gitterweiten betragen in diesen Modellen mindestens 10 Meter (vgl. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen, 2016a). Eine solche Auflösung ist für den Zweck dieser Arbeit nicht ausreichend. Rasterzellen mit dieser Gitterweite können zwar einen Weg abdecken, erfassen gleichzeitig aber auch die Höhe und damit gleichermaßen auch die Steigung von anderen Bodenpunkten im Gebiet. Eine exakte Steigung der Wege können diese Daten nicht liefern, da nicht ausschließlich die Wege beschrieben werden. Eine Innovation dieser Arbeit ist auch die Erschaffung einer kleinräumigen Datenstruktur zur Speicherung dieser Steigungen. Die Datenstruktur passt sich den unterschiedlichen Wegbreiten an und ist detailliert genug, um vorhandene Hindernisse, wie Treppen und Rampen, abzubilden.

Im Folgenden wird die Abgrenzung zu Arbeiten beschrieben, die OSM-Daten, hinsichtlich der darin enthaltenen Oberflächeninformationen, thematisieren. Müller et al. (2010) schlagen einen Routenplaner für Rollstuhlfahrer, auch auf Basis von Oberflächeninformationen aus OpenStreetMap, vor. Weiterhin existieren Routing- und Assistenzprojekte wie z.B. „Nahtlos Mobil“ für ältere Menschen (vgl. Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH, 2016). Krieg-Brückner et al. (2012) stellen ein Assistenzsystem für sichere Mobilität vor, das Assistenz in physischen, kognitiven und sicherheitsrelevanten Bereichen für verschiedene Plattformen (z.B. Rollator, Rollstuhl, Dreirad) bieten soll. Die Navigation erfolgt über Geometrie- und Oberflächeninformationen aus OSM. Die vorliegende Arbeit unterscheidet sich von den existierenden Forschungsarbeiten in den folgenden Punkten.

Ein genereller Unterschied zu den Arbeiten von Müller et al. (2010), Krieg-Brückner

et al. (2012) und „Nahtlos Mobil“ (vgl. Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH, 2016) liegt darin, dass keine Integration von Höhendaten in die Untersuchung erfolgt. Die kombinierte Analyse der Steigung, abgeleitet aus amtlichen Daten, und der Oberfläche, abgeleitet aus freien Geodaten, ist daher in der Betrachtung genannter Forschungsarbeiten einzigartig. Zwar beinhaltet die Realisierung von Müller et al. (2010) und die Arbeit von Franke et al. (2011) theoretisch die Steigung eines Weges durch Auswertung des OSM-Tags „incline“. Dennoch ist die Verwendung von amtlichen Daten für die Steigungsberechnung sinnvoller, da Mobasher et al. (2015) in Testgebieten in Berlin und Heidelberg zeigten, dass dort Steigungsinformationen von Bürgersteigen in OSM nur zu lediglich max. 2% vorhanden waren. Amtliche Daten garantieren die Möglichkeit einer vollständigen Steigungsberechnung für den Datensatz. Da dieser Parameter für Wanderer und Menschen mit Handicap wichtig ist, kann somit die Zuverlässigkeit des Ergebnisses voraussichtlich stark verbessert werden. Müller et al. (2010) und die Projektteilnehmer von „Nahtlos Mobil“ (vgl. Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH, 2016) demonstrieren ihre Fortschritte in den Testgebieten Bonn und Freiburg im Breisgau bzw. Bornheim und Bad Nauheim. Bei den zwei Projekten handelt es sich um Prototypen, die keine Aussage zum Untersuchungsgebiet dieser Arbeit zulassen. Um Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet Bad Rothenfelde zu erzeugen, ist hiermit weitere Forschung nötig. Weiterhin ist es nicht Ziel dieser Arbeit, eine Routinganwendung zu schaffen. Daher wird keine Anforderungsanalyse für Rollstuhlfahrer durchgeführt. Mitglieder der Zielgruppe sind generell Menschen mit Handicap, es erfolgt keine Beschränkung der Zielgruppe auf Rollstuhlfahrer.

Neis u. Zielstra (2014) generieren ein Netzwerk aus Bürgersteigen, die für Wanderungen genutzt werden können. Sie nennen Oberflächen-Tags aus OpenStreetMap und werten diese aus, um die Oberfläche von Bürgersteigen zu bestimmen. Damit arbeiten in Richtung einer Forschungsfrage dieser Arbeit, nämlich wie OSM-Daten hinsichtlich der Oberflächeninformationen analysiert werden können. Dennoch unterscheidet sich die vorliegende Arbeit in vielen Punkten von der genannten Arbeit. Neis u. Zielstra (2014) beschränken sich in ihrer Untersuchung auf Bürgersteige, wohingegen die vorliegende Arbeit alle im Datensatz vorkommenden Wege untersucht. Weiterhin werden keine Mehrzweckwege (OSM Tag „highway=path“), Brücken und Tunnel untersucht (vgl. Neis u. Zielstra, 2014, S. 72), die Teil des Datensatzes dieser Arbeit sind und damit später Teil der Analyse. Selbige Quelle listet Parameter auf, die für das Routing-Netzwerk verwendet wurden. Die vorliegende Arbeit hingegen, untersucht darüber hinaus den Oberflächenparameter „tracktype“, der v.a. für landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Wege interessant ist. Doch nicht nur reine Oberflächenparameter, die, wie Neis u. Zielstra (2014, S. 75) zeigen, nicht immer zuverlässig verfügbar sind, sind hier Teil der Untersuchung. Stattdessen analysiert die vorliegende Arbeit auch, welche Aussagen zur Oberfläche ableitbar sind, wenn ausschließlich der Typ des Wegs zugrunde gelegt wird. Auch andere Attribute, wie gesetzliche Vorgaben nach StVO, spielen hier eine Rolle. Einzigartig für diese Arbeit ist im Vergleich zudem die Kombination von OSM-Daten mit Höhendaten. Für die Gemeinsamkeiten, die die vorliegende Arbeit teilweise mit den genannten Arbeiten besitzt, können die späteren Ergebnisse auch eine Bestätigung darstellen, bspw.

im Hinblick auf relevante OSM-Tags.

1.3. Aufbau

Zunächst beschreibt das Grundlagenkapitel, Kap. 2, Hintergründe zum flugzeuggestützten Laserscanning und zu OpenStreetMap. Außerdem erfolgt hier ein Blick auf den Datenbestand und das Untersuchungsgebiet. Mit dem tieferen Wissen über das flugzeuggestützte Laserscanning und OpenStreetMap erfolgt dann ein Blick auf den Stand der Forschung. Das Kapitel 3 basiert auf dem Hintergrundkapitel und nennt Anwendungen von Laserscanning in der Forschung, sowie Klassifikationsverfahren für Laserscanning-Daten. Weiterhin wird OpenStreetMap mit Blick auf den Stand der Forschung thematisiert. Das Methodik-Kapitel 4 erläutert dann zuerst welche der Wegtypen, die im Datensatz vorhanden sind, näher, hinsichtlich der Ziele der Arbeit, untersucht werden. Anschließend erfolgen Vorüberlegungen zur Verarbeitung der Laserscanning-Daten. Die Steigungsberechnung basiert auf einer zu generierenden Oberfläche, deren Art und Weise in Kap. 4.2.1 diskutiert wird. Die kleinräumigen Steigungen werden, wie erwähnt, in einer speziellen Datenstruktur gespeichert, deren Eigenschaften und räumlichen Ausmaße Kap. 4.2.2 erläutert. Anschließend wird in Kap. 4.2.3 diskutiert, wie die in der Datenstruktur erfassten Steigungen sinnvoll gruppiert werden können. Ein besonderes Augenmerk verdiensten Treppen (Kap. 4.2.4) und Brücken (Kap. 4.2.5), die Hindernisse für Wanderer mit Handicap darstellen können. Es wird beschrieben, in welcher Form sie in der Verarbeitung der Laserscanning-Daten Berücksichtigung finden. Während bisher Vorarbeiten erläutert wurden, beschreibt Kap. 4.3 die durchgeführten Arbeitsschritte konkreter. Anfangs wird auf die Klassifikation der Laserscanning-Daten eingegangen, die durchgeführt werden muss, bevor eine weitere Verarbeitung des Datensatzes stattfinden kann. Anschließend erfolgt in Kap. 4.3.2 die konkrete Erzeugung der Steigungszellen, bevor ihnen in Kap. 4.3.3 Steigungen zugewiesen werden. OSM-Daten dienen dazu, den Ort und die räumliche Ausdehnung der Wanderwege zu bestimmen. In Kap. 4.3.4 findet eine Auswertung dieser Daten hinsichtlich der Oberflächeninformationen statt. Zunächst werden Informationen zum Typ der Oberfläche allein aus der Typisierung der Wege in OSM abgeleitet (s. Kap. 4.3.4.1). Anschließend erfolgt eine ergänzende Untersuchung der OSM-Tags. In Kap. 4.3.5 erfolgt eine Einordnung der Oberflächeninformationen. Kap. 5 stellt die Ergebnisse der Arbeit dar.

2. Datengrundlage

Dieses Kapitel gibt Hintergrundinformationen zu den Thematiken flugzeuggestütztes Laserscanning, OpenStreetMap (OSM) und zum Untersuchungsgebiet. Unter anderem thematisieren die Unterkapitel die Funktionsweise von flugzeuggestütztem Laserscanning, dessen Aufnahmeverfahren, das OSM-Datenmodell und OSM im Kontext der „volunteered geographic information“ (VGI). Mit dem Wissen dieser Grundlagen, thematisiert Kap. 3 bzgl. dieser Thematiken den aktuellen Stand der Forschung.

2.1. Flugzeuggestütztes Laserscanning

Das flugzeuggestützte Laserscanning ist eine Methode, um Höhendaten großflächig zu erfassen. Die, auch in der Forschung oft angetroffenen Synonyme, sind „Airborne Laser Scanning“ (ALS) oder auch „LiDAR“ (Light Detection And Ranging) (vgl. Wehr u. Lohr, 1999, S. 68 f.). LiDAR bezeichnet das Laserscanning im Allgemeinen, womit auch terrestrische Messungen gemeint sind. Beim ALS hingegen, übernimmt ein am Flugzeug angebrachtes Messgerät die Höhenmessung, indem es Laserimpulse zur Erdoberfläche sendet (vgl. Wagner et al., 2004, S. 201). Nachdem die Strahlen ausgesendet wurden, werden sie von der Erdoberfläche reflektiert und vom System wieder aufgefangen (vgl. Wagner et al., 2004, S. 201). Um die Höhe des angestrahlten Punktes auf der Erdoberfläche zu bestimmen, wird eine Phasen- oder eine Pulsmessung durchgeführt (vgl. Wehr u. Lohr, 1999, S. 70). Als Ergebnis liefert das ALS für die Schwadbreite, also die Breite des Aufnahmestreifens, eine dreidimensionale Punktfolke (vgl. White et al., 2013b, S. 522). Die Punktfolke enthält für jeden Punkt, dessen reflektierter Impuls aufgefangen wurde, eine Höhenmessung. Weiterhin wird jedem Punkt auch dessen genaue Lage auf der Erdoberfläche, sowie weitere Informationen, wie z.B. die Pulsin-tensität, zugeordnet. Die Intensität kann zur Bestimmung von Gesteinseigenschaften eingesetzt werden (vgl. Jaboyedoff et al., 2012, S. 21). Die Schwadbreite und damit auch die Eigenschaften der Punktfolke, hängen vom Sensortyp, dessen Spezifikationen und der Flugzeughöhe ab (vgl. White et al., 2013b, S. 522). Die aufgenommene Schwadbreite überlappt sich oft mit einer Fläche von 20% oder mehr (vgl. Reutebuch et al., 2005, S. 287). Wird ein Gebiet mehrfach aufgenommen, steigt logischerweise die Punktdichte.

Um die Lage eines gemessenen Punktes zu bestimmen, muss die Trägerplattform, in diesem Fall das Flugzeug, seine eigene Position kennen (vgl. Favey et al., 1999, S. 556). Ein Flugzeug, das für eine ALS-Datenerfassung ausgerüstet wurde, muss demnach über ein differentielles GPS verfügen. Außerdem benötigt das Flugzeug ein inertiales Navigationssystem (INS) (s. Abb. 2.1). Hiermit kann das Flugzeug die eigene Geschwindigkeit

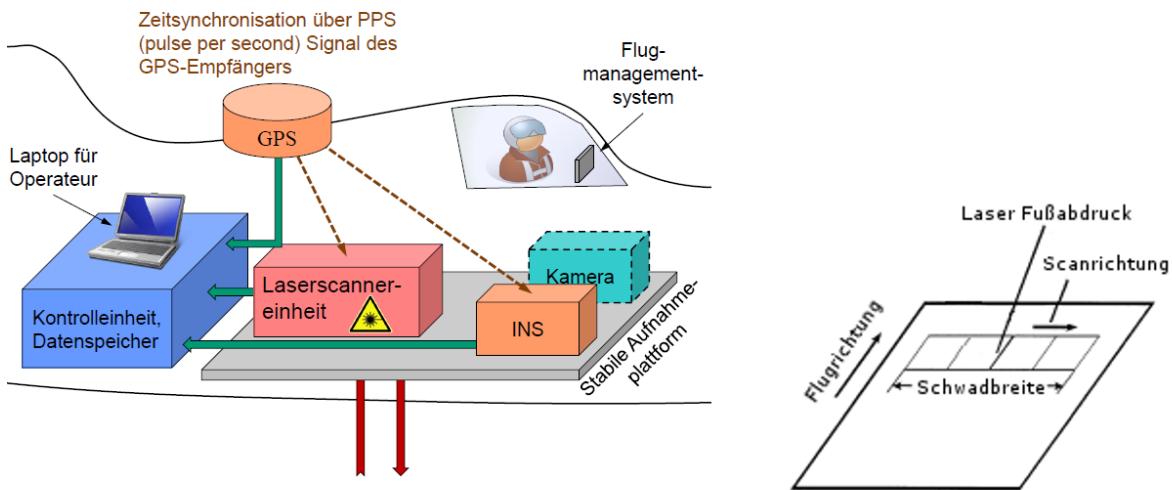


Abbildung 2.1.: links: Komponenten eines flugzeuggestützten Laserscanning-Systems. rechts: Aufnahmebereich am Boden. Quelle: Wehr u. Lohr, 1999, S. 69 (verändert) und Kada, 2014.

und Orientierung überwachen (vgl. Woodman, 2007, S. 5). Da die Laserscannereinheit starr in Richtung der Erdoberfläche ausgerichtet ist, ist eine stabil ausgerichtete Trägerplattform wichtig, um Verzerrungen im Ergebnis zu vermeiden.

Die Aussendung der Impulse kann dabei in verschiedenen Mustern, z.B. zick-zack-förmig oder in parallelen Formen erfolgen. Abb. 2.2 zeigt vier verschiedene Scanmuster: Einen oszillierenden Spiegel, einen nutierenden Spiegel, einen Fiberscanner und ein rotierendes Polygon. Der oszillierende Spiegel bewegt sich um eine Achse, indem der Winkel Φ verändert wird. Durch die gleichzeitige Bewegung der Trägerplattform entsteht ein zick-zack-förmiges Scanmuster. Das rotierende Polygon und der Fiberscanner produzieren parallele Linien von Aufnahmepunkten. Dadurch, dass der Spiegel beim nutierenden Scanner um einen Winkel α geneigt werden kann und die Scanachse gleichzeitig rotiert, entsteht ein ellipsenartiges Aufnahmemuster der Punkte.

Um die Höhe eines Punktes der Erdoberfläche zu messen, existieren zwei Verfahren: die Pulsmessung und die Phasenmessung. Während bei der Anwendung der Pulsmessung ein direktes Lichtsignal ausgesendet wird, geschieht dies bei der Phasenmessung in Form von Lichtwellen, die z.B. sinusförmig sind. Die Geschwindigkeit des direkten Lichtsignals und die Höhe der Trägerplattform sind bekannt. Die Höhe des angestrahlten Punktes auf der Erdoberfläche kann unter Verwendung der Pulsmessung aus diesen Parametern berechnet werden (vgl. Wagner et al., 2004, S. 201). Allerdings muss die Zeit zwischen Aussenden und Empfangen des Signals für diese Rechnung halbiert werden, um die Zeit, die für die Bewegung in eine Richtung benötigt wird, zu erhalten (vgl. Wehr u. Lohr, 1999, S. 70). Die Zeit, die zwischen gesendetem und empfangenem Signal vergeht, ist bei der Phasenmessung proportional zur Phasendifferenz (vgl. Wehr u. Lohr, 1999,

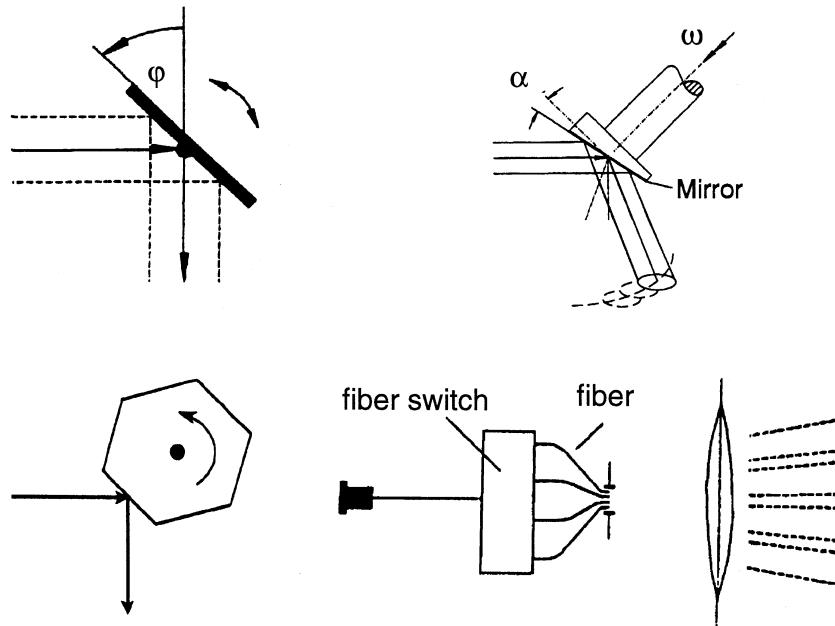


Abbildung 2.2.: Scanmuster (von o.l. i. UZS): oszillierender Spiegel, nutzender Spiegel, Fiberscanner, rotierendes Polygon. Quelle: Wehr u. Lohr, 1999, S. 76.

S. 71). Zur Höhenberechnung ist somit der Vergleich der Amplitude von ausgesendeter und empfangener Welle notwendig. Es kann nur die Amplitude der aktuellen Wellenlänge untersucht werden, die Anzahl zurückliegender Wellenlängen ist jedoch unbekannt (vgl. Pfeifer u. Briese, 2007, S. 6). Phasenmessungen sind wegen der Beschränkung in ihrer Reichweite hauptsächlich für terrestrische Messungen interessant, besitzen aber im Gegensatz zur Pulsmessung eine höhere Datenrate und können ihre Reichweite durch eine Vergrößerung der Wellenlänge erhöhen (vgl. Pfeifer u. Briese, 2007, S. 6 f.). Während sich die Genauigkeit im Pulsmessverfahren im Bereich von Zentimetern bewegt, wenn der Abstand zwischen Plattform und Boden mehr als einen Kilometer beträgt, so ist die Genauigkeit der Phasenmessung deutlich besser und beträgt wenige Millimeter (vgl. Pfeifer u. Briese, 2007, S. 4 ff.). Die Punktdichte reicht bei flugzeuggestütztem Laserscanning für gewöhnlich von 0,5 bis zu 100 Pkt/m², wohingegen sie bei terrestrischem Laserscanning im Bereich von 50 von 10.000 Pkt/m² liegt (vgl. Jaboyedoff et al., 2012, S. 9).

Da das Laserscanning eine aktive Methode zur Höhenmessung ist, ist es unabhängig vom Tageslicht, was auch Messungen bei Nacht ermöglicht. Flugzeuggestütztes Laserscanning eignet sich dazu, sowohl die Höhe des Erdbodens, als auch die der Vegetation, präzise zu erfassen (vgl. White et al., 2013b, S. 522). Aus den hieraus generierten Daten können dreidimensionale digitale Gelände- und Oberflächenmodelle abgeleitet werden (vgl. White et al., 2013b, S. 522). Wird ein Puls ausgesendet, können mehrere Reflexionen im Sensor gemessen werden, sog. Mehrfachechos oder „multiple returns“ (vgl. Hyppä et al., 2012, S. 1193). Der erste zurückkehrende return (auch: „first return“) repräsentiert

tiert üblicherweise das höchste Objekt aller zurückkehrenden returns eines ausgesendeten Pulses. Der letzte return (auch: „last return“) hingegen repräsentiert das tiefstgelegene gemessene Objekt, z.B. den Erdboden (vgl. Gaveau u. Hill, 2003, S. 651). Die Unterscheidung von Erdboden und tiefgelegener Vegetation kann schwierig sein (vgl. Gaveau u. Hill, 2003, S. 651). Diese Feststellung ist wichtig für die vorliegende Arbeit, da lokale Steigungen am Boden berechnet werden müssen. Hierfür müssen zunächst Höhenpunkte aus einem Datensatz klassifiziert werden, der sowohl Höhenpunkte auf dem Erdboden, als auch auf tiefgelegener Vegetation beinhaltet.

2.2. OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM, zu dt. etwa: „freie Straßenkarte“) ist ein Projekt, das sich zum Ziel gesetzt hat, geographische Informationen jedermann verfügbar zu machen. Es steht im Kontrast zu traditionellen Kartenanbietern, wie Regierungsorganisationen oder Unternehmen, die dazu neigen, hohe Preise zu verlangen und die Nutzungsrechte der Daten zu beschränken (vgl. Coast, 2010, S. 4). Auf der Hauptseite des Projekts ist der Datenbestand, aufbereitet in Form einer Karte, zu sehen (vgl. OpenStreetMap, 2016m). Das Beitreten zum Projekt ist nach vorheriger Registrierung auf der Homepage möglich. Datenquellen für OSM sind neben dem Editieren am Bildschirm u.a. auch das zur Verfügung stellen von (GPS-)Tracklogs, der Import aus anderen Quellen, wie z.B. freie Datenportale für bestimmte deutsche Regionen, oder amtliche Luftbilder (vgl. OpenStreetMap, 2016d). Im Gegensatz zum Namen beinhaltet OpenStreetMap nicht nur Straßen. OSM umfasst sowohl menschengemachte, als auch natürliche, physische Objekte der Landschaft, die real existieren (vgl. OpenStreetMap, 2016f). Ausgeschlossen sind demzufolge historische Objekte. Das Standardformat für den Download von Geodaten aus OSM ist XML.

OpenStreetMap wurde 2004, zunächst mit dem Fokus auf das Vereinigte Königreich, gegründet (vgl. OpenStreetMap, 2016g). Auftrieb erhielt das Projekt durch die 2006 gegründete OpenStreetMap Foundation, die u.a. Infrastrukturen verwaltet und Öffentlichkeitsarbeit leistet, sowie durch den Fakt, dass ab demselben Jahr Luftbilder des Unternehmens Yahoo verwendet werden durften (vgl. OpenStreetMap, 2016g). Durch die Verfügbarkeit flächendeckender Luftbilder war es für Kartierer nicht mehr erforderlich, ein GPS-Gerät zu besitzen. Statt dem Erfassen von Tracklogs in der realen Welt ist es somit auch möglich, auf Basis der Luftbilder zu digitalisieren. In den Jahren 2007 und 2008 konnte der Datenbestand bezüglich der USA vergrößert werden, indem die Straßenfeatures des **T**opologically **I**ntegrated **G**eographic **E**ncoding and **RTIGER**), einer Datenbank der amerikanischen Zensusbehörde, in OSM übernommen wurden (vgl. OpenStreetMap, 2016p). Seit 2012 gilt für OSM die sog. Open Database License, die u.a. die Nutzung, Kopie, Veröffentlichung und Manipulation der Datenbank unter bestimmten Bedingungen erlaubt (vgl. OpenStreetMap, 2016g, Open Data Commons, 2016).

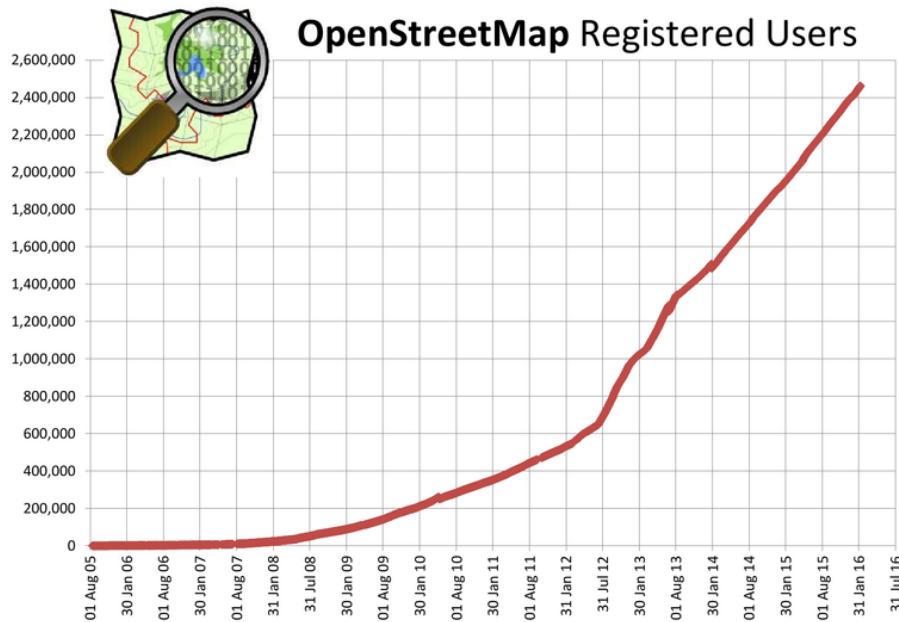


Abbildung 2.3.: Anzahl registrierter OSM-Nutzer seit August 2005. Quelle: OpenStreetMap, 2016n.

Abb. 2.3 zeigt den Verlauf der Anzahl der registrierten Nutzer seit August 2005. Während die Nutzerzahl in den ersten drei Jahren 100.000 nicht überstieg, vergrößerte sich das Wachstum vor allem nach 2012 stark und führte zu einem Nutzeranstieg von über 400.000 Nutzern pro Jahr. Da OSM im Bezug auf den Datenbestand, dessen Vergrößerung und Aktualisierung, auf die Community angewiesen ist, ist die Nutzerzahl und vor allem die Anzahl der aktiven Nutzer, für den Erfolg entscheidend. Im Jahr 2015 betrug die Zahl der aktiven, zum Datenbestand beitragenden Nutzer zwischen 24.000 und 31.000 Nutzer pro Monat (vgl. OpenStreetMap, 2016n). Deutlich geringer war diese Zahl noch 2010, als 11.000 bis 15.000 Nutzer pro Monat gezählt wurden (vgl. OpenStreetMap, 2016n). Entsprechend dem Anstieg der beitragenden und gesamten Nutzerzahl, vergrößerte sich auch der Datenbestand, wie Abb. 2.4 dokumentiert.

Die in OSM verwendete Datenstruktur beinhaltet drei Primitive: nodes, ways und relations. Nodes (dt. „Knoten“) sind punktartige Features und von den Primitiven die einzigen, die Positionsinformationen besitzen (vgl. Bennett, 2010, S. 55). Wie in einem Graphen besteht ein way aus geordneten Knoten, die durch Kanten miteinander verbunden sind. Sie repräsentieren entweder Linienfeatures oder Flächenfeatures, wenn der erste Knoten eines ways gleichzeitig der letzte ist. Aus der festgelegten Anordnung der Knoten kann eine Richtung für den way abgeleitet werden. Das ist bspw. für Einbahnstraßen und Autobahnen sinnvoll, die nur in eine Richtung befahren werden dürfen. Ein way muss mindestens 2 Knoten und darf maximal 2000 Knoten besitzen. Ein Knoten kann dabei mehreren ways angehören. ways dürfen sich kreuzen, Flächen dürfen sich

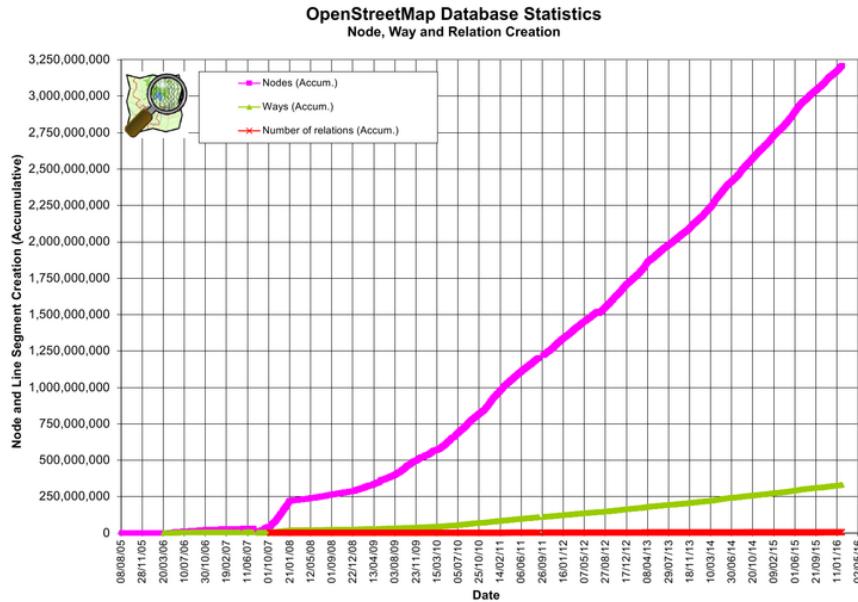


Abbildung 2.4.: Anzahl von nodes, ways und relations in der Datenbank von OSM seit August 2005. Quelle: OpenStreetMap, 2016n.

jedoch nicht selbst schneiden (vgl. Bennett, 2010, S. 57 f.). Ein way besitzt keine Informationen darüber, welche anderen ways geschnitten werden oder benachbart sind. Sollen zwei ways miteinander in Beziehung stehen, z.B. im Falle eines Gebäudes mit Innenhof, dessen äußerer und innerer Ring jeweils ein way ist, müssen beide ways Teil einer relation sein. Allgemeiner gesprochen, sind relations Listen von Primitiven, inklusive anderer relations (vgl. Bennett, 2010, S. 59). Jedes Primitiv in der relation kann eine Rolle besitzen, die den Zusammenhang in der relation und zu anderen Primitiven näher spezifiziert. Listing 2.1 zeigt den Auszug einer relation in Osnabrück, die fünf Member besitzt, wovon zwei eine Rolle besitzen. Die relation in Listing 2.1 stellt eine Buslinie dar. Die Rolle „stop“ beim Knoten-Mitglied der relation zeigt an, dass sich an dieser Stelle der relation eine Bushaltestelle befindet. Die Rolle „forward“ des way-Primitives gibt an, dass die durch den way beschriebene Straße eine Einbahnstraße ist und nur in die Richtung der digitalisierten nodes befahren werden darf. Neben den drei Primitiven sind auch sog. „changesets“ Teil der OSM-Struktur. Jede Änderung, die ein Kartierer vornimmt, wird in einem „changeset“ protokolliert. Hierdurch ist jede Änderung im Datenbestand nachvollziehbar. Genauer gesprochen beinhaltet das „changeset“, z.B. im Datenformat XML, die eindeutige ID, unter der die vorgenommenen Änderungen in der OSM-Datenbank gefunden werden können.

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <osm version="0.6" generator="CGImap 0.4.0 (30044 thorn-01.
   openstreetmap.org)" copyright="OpenStreetMap and contributors"
   attribution="http://www.openstreetmap.org/copyright" license="http:
   //opendatacommons.org/licenses/odbl/1-0/">
3 <relation id="284375" visible="true" version="54" changeset="30721221"
   timestamp="2015-05-02T13:35:53Z" user="Joost van Os" uid="1258303">
4   <member type="way" ref="292097694" role="" />
5   <member type="node" ref="560593063" role="stop" />
6   <member type="way" ref="217468764" role="" />
7   <member type="way" ref="40372201" role="forward" />
8   <member type="way" ref="325790117" role="" />
9   <tag k="from" v="Berningshöhe" />
10  <tag k="name" v="Linie 51 Berningshöhe – Dodesheide" />
11  <tag k="operator" v="Stadtwerke Osnabrück" />
12  <tag k="ref" v="51" />
13  <tag k="route" v="bus" />
14  <tag k="to" v="Dodesheide Waldfriedhof" />
15  <tag k="type" v="route" />
16 </relation>
17 </osm>
```

Listing 2.1: Beschreibung einer Relation in OSM, die Teil einer Buslinie ist. Quelle: eigene Darstellung, OpenStreetMap, 2016m.

Wichtig in der OSM-Datenstruktur ist, dass alle Primitive und jedes „changeset“ Tags (dt.: Attribute) besitzen können, wie auch in Listing 2.1 zu sehen. Erst die Tags beschreiben das Feature in Form von Paaren aus Schlüsseln (keys) und Werten (values) und geben dem Datensatz damit eine Bedeutung. Beschränkungen in Tags liegen lediglich darin, dass Schlüssel und Werte nur einfache, in UTF-8 kodierte, maximal 255 lange Zeichenketten sein dürfen (vgl. Bennett, 2010, S. 61). Besitzt ein way beispielsweise den Schlüssel „highway“, so macht dieser Schlüssel die Linie zu einer Straße. Wird der Schlüssel um den Wert „motorway“ ergänzt, so spezifiziert dies die Straße näher und klassifiziert sie als Autobahn. Aktuell befinden sich 58.493 Schlüssel unterschiedlich häufig in OSM in Verwendung (Stand: 23.04.2016) (vgl. OpenStreetMap, 2016o). Unter den häufigsten Schlüsseln befindet sich neben „highway“ auch „natural“, um natürliche Objekte wie Flüsse anzugeben, oder auch „landuse“, um nähere Angaben zur Landnutzung einer Fläche zu tätigen.

Da diese Arbeit Angaben zur Beschaffenheit der Oberfläche von Wegen in OSM-Daten näher untersucht, wird folgend näher auf dieses Thema eingegangen. Informationen dieser Art können in OSM, ebenso wie andere Metainformationen, über Tags angegeben werden. Es gibt verschiedene Tags, die oberflächenrelevant sind. Hierzu zählt, dem Namen entsprechend, das „surface“-Tag (vgl. OpenStreetMap, 2016i). Mit dem „surface“-Tag kann zunächst grob angegeben werden, ob die Oberfläche des Elements befestigt oder nicht befestigt ist. Diese Angabe kann spezifiziert werden, indem ein konkreter

Oberflächentyp, wie z.B. Asphalt, Kopfsteinpflaster, Schotter oder Gras angegeben wird. Listing 2.2 zeigt, dass die Oberfläche des Wegs mit der ID „23467711“ mit „Asphalt“ angegeben wurde.

```

1 <way id="23467711" visible="true" version="9" changeset="17270452"
      timestamp="2013-08-08T18:50:50Z" user="Heinrich Schulke" uid="768201"
      ">
2   <nd ref="308395688"/>
3   <nd ref="254142257"/>
4   <tag k="highway" v="secondary"/>
5   <tag k="name" v="Niedersachsenring"/>
6   <tag k="oneway" v="yes"/>
7   <tag k="ref" v="L 94"/>
8   <tag k="smoothness" v="excellent"/>
9   <tag k="surface" v="asphalt"/>
10 </way>
```

Listing 2.2: Ein way in OSM. Dieser beschreibt eine Straße vom Typ „highway=secondary“. Quelle: eigene Darstellung, OpenStreetMap, 2016m.

Neben dem Attribut „surface“ kommt auch „smoothness“ häufiger vor. Es gibt an, welche Verkehrsmittel für diesen Weg geeignet sind. Wird eine asphaltierte Straße bspw. für eine längere Zeit nicht gewartet und existieren Schlaglöcher, Spurrillen oder starke Risse, liegt es im Ermessen des Kartierers, zu entscheiden, für welches Verkehrsmittel der Weg gerade noch geeignet ist. Hier gibt es verschiedene Abstufungen. Beginnend bei Inline-Skatern und Skateboards, die, mit dünnen Rollen ausgestattet, die höchsten Anforderungen an den Zustand der Straße stellen, über Fahrrad, Kinderwagen bis hin zu Geländewagen kann hier die „smoothness“ beurteilt werden. Oberflächenrelevante Informationen können explizit in den Daten eingetragen sein, oder aber implizit aus den Daten abgeleitet werden. Eine Straße, die als „highway=secondary“ (Tag: highway, Value: secondary) eingetragen ist, ist der OSM-Dokumentation zufolge in Deutschland entweder eine Kreis-, Landes- oder Bundesstraße. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein solcher Straßentyp in Deutschland immer befestigt ist. Daraus folgt, dass nicht immer spezifische Oberflächen-Tags verwendet werden müssen, um Informationen über die Oberfläche zu erhalten.

Die große Anzahl an Schlüsseln und Werten machen OSM zu einer für viele Zwecke einsetzbaren Quelle geographischer Informationen. Soll eine Karte für eine bestimmte Anwendung generiert werden, können bestimmte OSM-Informationen als Overlay über der Standard-OSM-Karte dargestellt werden (vgl. Hoffmann, 2011, S. 126). Außerdem kann die kartographische Darstellungsform z.B. mit der Wahl von Farben verändert werden, um den Fokus der Anwendung hervorzuheben. Es gibt zahlreiche nutzergenerierte Online-Karten für spezielle Anwendungszwecke, bspw. eine spezielle Verkehrskarte, die alle Linien und Haltestellen des öffentlichen Nahverkehrs (Busse, Straßen- und U-Bahnen, Züge) ebenso hervorhebt, wie Parkhäuser, Taxistände und Flughäfen (vgl. Memomaps, 2016). Auch für Wanderer existiert eine Online-Karte, die, basierend auf OSM,



Abbildung 2.5.: Bearbeitungsmöglichkeiten von OSM-Daten. Quelle: OpenStreetMap, 2016m.

alle offiziellen und internationalen Wanderwege darstellt (vgl. Waymarkedtrails, 2016). Auch abseits von anwendungsspezifischen Karten können die geographischen Informationen in OSM, entsprechend der Lizenz, auch für Zwecke wie Routing und Navigation, Wegbeschreibungen oder planerische Aktivitäten, verwendet werden.

Um OSM-Features zu erfassen und um sie näher durch Attribute zu beschreiben, ist lediglich ein Nutzer-Account erforderlich. Im Rahmen eines Editierprozesses können verschiedene Editoren verwendet werden. Die Standardeditoren, die im Editerbereich auf der offiziellen Homepage zu finden sind, sind „iD“, „Potlatch 2“ und „JOSM“, bzw. „Merkaartor“. Die zwei erstgenannten sind Webanwendungen, wohingegen die beiden letztgenannten als eigenständiges Programm auf dem Computer laufen (Abb. 2.5).

OpenStreetMap ist darüber hinaus ein wichtiger Vertreter des Begriffs der sog. „volunteered geographic information“ (VGI). Im Prozess der VGI erschaffen, sammeln und verbreiten Freiwillige geographische Informationen, die global veröffentlicht werden und die Basis von Applikationen sind (vgl. M. F. Goodchild, 2007, S. 211). M. F. Goodchild (2007, S. 214 ff.) zufolge ist dieses Phänomen erst möglich, seitdem entscheidende Technologien verfügbar sind. Er zählt hierzu das Web 2.0, in dem Nutzer nun, im Gegensatz zu vorher, in der Lage sind, Inhalte zu generieren, anstatt nur Informationen vom Server anzufordern. Wichtig, um mehr freiwillige Nutzer, auch mit geringem Vorwissen und technischem Verständnis zu erreichen, ist es, den Digitalisierungsprozess einfach zu gestalten. Mit der Verfügbarkeit von GPS, anwenderfreundlichen GPS-Geräten und flächendeckenden, georeferenzierten Luftbildern, die das Erstellen von Features durch Nachverfolgung der Objektform ermöglichen, sind technische Voraussetzungen geschaffen, die das nutzergestützte Erfassen von geographischen Daten ermöglichen. Um detaillierte, hochauflösende Karten und Grafiken jedoch überhaupt aus dem Internet beziehen und darstellen zu können, sind eine Breitbandverbindung, sowie ein leistungsstarker Computer nötig.

Der Mehrwert der VGI liegt Goodchild zufolge darin, dass die generierten Daten fast allen zur Verfügung gestellt werden können - und das auch noch deutlich billiger als andere Alternativen (vgl. M. F. Goodchild, 2007, S. 220). Im Bezug auf OpenStreetMap kommt noch hinzu, dass außerdem das lokale, räumliche Wissen von Beitragenden genutzt werden kann, indem es anderen zur Verfügung gestellt wird (vgl. Barron et al.,

2014, S. 880). Eine ergiebige alternative Quelle für geographische Daten in Deutschland sind amtliche Daten. Daten aus amtlichen Quellen sind, für den Fall Niedersachsens, in den meisten Fällen nicht kostenlos verfügbar (vgl. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen, 2016c). Im Zuge der Infrastructure for Spatial Information in Europe (INSPIRE)-Richtlinie des europäischen Parlaments und -Rats ist es nun zumindest möglich, diese Daten, in Form von z.B. Karten, in Internetdiensten kostenfrei einzusehen (vgl. Illert, 2012, S. 43). Demgegenüber stehen Initiativen für freie Geobasisdaten, wie es sie z.B. im Bundesland Baden-Württemberg gibt (vgl. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg, 2016). Bestimmte Geodatendienste, Metadaten, Vektor- und Rasterdaten können unter Angabe der Quelle unentgeltlich genutzt werden. Ein weiterer Vorteil der VGI gegenüber kommerziellen oder amtlichen Datensätzen ist die mögliche, hohe Aktualität der Daten. Schlechte Straßen, wie z.B. Straßen mit Schlaglöchern, können gefährlich für Autofahrer, Fußgänger und Radfahrer sein (vgl. Eriksson et al., 2008, S. 29). Bevor diese Schäden durch Behörden behoben, oder in kommerziellen Navigationssystemen berücksichtigt sind, könnten sie bereits durch Freiwillige in OpenStreetMap erfasst worden sein, was Zeit und Geld spart (vgl. Lauer et al., 2013, S. 47).

VGI bedeutet, wie beschrieben, dass jeder freiwillig zu einem VGI-Projekt, wie z.B. OpenStreetMap, beitragen kann. Wie Stephens (2013, S. 994) herausfand, sind es bestimmte Bevölkerungsgruppen, darunter mehrheitlich Männer, die sich an OSM und an VGI im Allgemeinen beteiligen. Die spärlichere Beteiligung von Frauen, aber auch von anderen gesellschaftlichen Gruppen, die ihr Wissen nicht teilen, bspw. aufgrund von Desinteresse oder fehlenden technischen Voraussetzungen, kann dazu führen, dass bestimmte Teile der Welt unkartiert bleiben (vgl. Stephens, 2013, S. 985). Allgemeiner gesprochen, repräsentieren nur die Personen ihre eigenen Normen, Traditionen und Ansichten im Web 2.0, die sich beteiligen (vgl. Stephens, 2013, S. 994).

Im Falle von OSM werden an die Beitragenden keine Anforderungen bzgl. Ausbildung, dem Grad der Mitarbeit oder an das Beizutragende gestellt. Hierdurch werden Anforderungen an die Datenerfassung, wie sie z.B. in klassischen Vermessungsämtern gestellt werden, aufgeweicht. Für das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) ist es im Bezug auf die Datenqualität wichtig, „korrekt gebildete Geometrien bei hochgradig weiterverarbeiteten Geodaten“ im Datenbestand zu haben (vgl. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen, 2016b). Neben der geometrischen Genauigkeit bestehen hier Qualitätsansprüche im Bezug auf die Aktualität, Vollständigkeit, Konsistenz der Daten und Umfang der Attributierungen (vgl. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen, 2016b). Grundsätzlich kann, aufgrund der Anforderungen an die Beitragenden, nicht erwartet werden, dass ein Community-Projekt wie OpenStreetMap diese Qualitätsansprüche erreicht. Im Bezug auf die Aktualität der Daten, geht der Beitragende keinerlei Verpflichtungen ein. Das heißt, wenn ein Nutzer den Datenbestand verändert, bedeutet es nicht, dass er diesen auch in Zukunft fortführen wird. Aus diesem Grund gewährleistet er keine Aktualität, bzw. kontinuierliche Aktualisierung der Daten. Es kann nicht garantiert

werden, dass jeder Weg, der in der Realität existiert, in OSM vorhanden ist, die richtige Attributierung besitzt und dass dessen Lage korrekt abgebildet wird. Diese Feststellung ist wichtig für die Bearbeitung des Themas dieser Arbeit, da womöglich Wege oder Eigenschaften der Wege, die Menschen mit Handicap in z.B. Bad Rothenfelde gehen möchten, so nicht in OSM enthalten sind. Außerdem kann die Auswertung nicht korrekter oder nicht vollständiger Attribute u.a. dazu führen, dass Wege fälschlicherweise als nicht geeignet angesehen werden oder andersherum.

2.3. Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Gemeinde Bad Rothenfelde. Sie liegt zwischen den Großstädten Bielefeld, Münster und Osnabrück in der Region „Osnabrücker Land“ im Südwesten Niedersachsens, unweit des Teutoburger Waldes. Bad Rothenfelde besitzt den Status eines Heilbades, nachdem im 18. Jahrhundert eine Solequelle in der Gemeinde entdeckt wurde (vgl. Gemeinde Bad Rothenfelde, 2016). Neben dem Hauptort sind weiterhin die Ortsteile Aschendorf und Strang Teil der Gemeinde. In Bad Rothenfelde sind acht Kliniken beheimatet, die sich auf verschiedenen medizinischen Gebieten spezialisiert haben. Menschen mit bewegungseinschränkendem Handicap können z.B. in Rehabilitations-, Herz- oder orthopädischen Kliniken behandelt werden. Die Gemeinde hat auf einer Fläche von $18,21 \text{ km}^2$ 7554 Einwohner (vgl. Gemeinde Bad Rothenfelde, 2016). $1,12 \text{ km}^2$ hiervon werden als Verkehrsfläche genutzt, darunter 1 km^2 als Straßen, Wege und Plätze (vgl. Gemeinde Bad Rothenfelde, 2016). Den größten Anteil an der genutzten Fläche machen mit $8,7 \text{ km}^2$ landwirtschaftliche Flächen und Waldflächen ($5,21 \text{ km}^2$) aus.

In dieser Arbeit wurde eine aus flugzeuggestütztem Laserscanning abgeleitete Punkt-wolke untersucht. Außerdem ein Datensatz des freien Kartendienstes OpenStreetMap. Die räumliche Ausdehnung beider Datensätze entspricht der Fläche der Gemeinde Bad Rothenfelde. Die Punktwolke liegt in 35 Abschnitten (tiles) vor. Jeder Abschnitt deckt maximal $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ der Gemeinde ab. Maximal wurden 4.605.328 Punkte, minimal 1.252.859 Punkte pro tile gemessen. Die maximale Punktdichte pro tile entspricht also $4,6 \text{ Pkt/m}^2$. Die unterschiedliche Anzahl an gemessenen Punkten folgt aus der unterschiedlich großen Abdeckung der Gemeinde durch die gleichförmigen tiles. Jedes tile enthält nur diejenigen Punkte, die tatsächlich in das Untersuchungsgebiet fallen. Das tile mit 1.252.859 Punkten überlagert das Untersuchungsgebiet räumlich nur in einer kleinen Fläche, was in weniger Punkte pro tile resultiert. Die tiles liegen in Textdateien vor und beinhalten ausschließlich die drei Koordinaten x, y und z, also den Rechts-, Hoch- und Höhenwert. Zusätzliche Informationen, z.B. zu den geflogenen Flugstreifen, dem Trägersystem oder dem Erfassungszeitpunkt, liegen nicht vor. Auswertbar wären auch Intensitätsinformationen, Angaben zu returns oder eine Vorabklassifizierung der Punkte. Aus dem Fehlen dieser Zusatzinformationen folgt, dass für keinen Punkt ohne weitere Analyse bekannt ist, welches Objekt dieser repräsentiert. Ein aus der Punktwolke abgeleitetes digitales Oberflächenmodell liegt ebenso vor. Es kann zu Visualisierungszwe-

cken, während oder am Ende der Arbeit, eingesetzt werden.

Der OpenStreetMap-Datensatz der Gemeinde Bad Rothenfelde stellt den Stand vom 11.12.2015 dar und liegt zuallererst im Format „.osm“ vor, das eine XML-artige Datenstruktur beinhaltet. Die Daten werden durch nodes, ways und relations beschrieben. Hierin enthalten sind Punkt-, Linien- und Flächenfeatures. Während nodes punktartige Features beschreiben, werden ways für linien- und flächenhafte Features verwendet. Da sich diese Arbeit auf Wege und Straßen konzentriert, sind in erster Linie diejenigen ways interessant, die das Tag „highway“ besitzen. „highway“ ist das Haupt-Attribut für Straßen, Wege und Pfade (vgl. OpenStreetMap, 2016c). Abb. 2.6 zeigt alle linienhaften Features im OSM-Datensatz, die das Tag „highway“ besitzen. Diese Features wurden untersucht.

Manche ways besitzen das Tag „highway“. Alle ways besitzen eine ID, um sie eindeutig identifizierbar zu machen. Daneben gibt es mit „version“, „changeset“, „timestamp“, „user“, „userid“ und „visible“ weitere Attribute, die alle ways besitzen. „user“ und „userid“ geben den Erfasser, bzw. denjenigen, der das Feature zuletzt verändert hat und seine eindeutige ID an. Während „timestamp“ die letzte Veränderung des Features datiert, beinhaltet „changeset“ die eindeutige ID der letzten Änderung. „version“ zählt, wie oft das Feature verändert wurde und „visible“ definiert, ob das Feature für die Betrachtung sichtbar ist. Für diese Arbeit relevant sind hingegen darüber hinaus gehende Attribute, bzw. Tags und Values. Dabei gibt es Unterschiede, welches dieser Attribute mit der bestehenden Ausprägung des Tags „highway“ kombinierbar ist. Eine Autobahn impliziert bereits, dass diese nicht für Fußgänger zugänglich ist. Nähere Angaben diesbezüglich sind aber bei einem Mehrzweckweg oder einem Radweg erwünscht. Wird ein Weg mit Radweg („cycleway“) getaggt, so ist ohne weitere Angabe von „foot“ nicht ersichtlich, ob dieser Weg auch von Fußgängern mitbenutzt werden darf oder ob es sich gar um einen nach StVO ausgewiesenen Fuß- und Radweg handelt. An dieser Stelle können nicht alle weiteren, vorkommenden Attribute genannt und einzeln erläutert werden. Spätere Kapitel beschäftigten sich dann damit, die relevanten Attribute zu bestimmen.

Mit „highway“ werden auch punkt- und flächenhafte Features getaggt. Die punkthaften Features beinhalten Bushaltestellen, Straßenübergänge für Fußgänger und Radfahrer, Anfahrpunkte für Rettungsfahrzeuge, kleine Kreisverkehre, Wendekreise, Treppen, Straßenlaternen, Ampeln und fest installierte Schnelligkeitsmessgeräte. Insgesamt sind dies 85 Features. Ein flächenhaftes Feature dieses Typs ist im Datensatz enthalten, es stellt eine Fläche für Rettungsfahrzeuge dar.

Neben den linienhaften Features mit dem Tag „highway“, dem Haupt-Tag für Straßen, Wege und Pfade existieren weitere Punkt-, Linien- und Flächenfeatures, die andere Objekte in der Gemeinde repräsentieren. Die größte Kategorie stellen 16802 nodes dar, die Teil eines ways sein können und kaum weitere, verwertbare Informationen beinhalten. Weiterhin sind mit dem Tag „building“ 1857 Gebäude im Datensatz erfasst worden. Eine andere große Kategorie sind Punkte, die mit dem Tag „amenity“ Objekte und Geschäfte

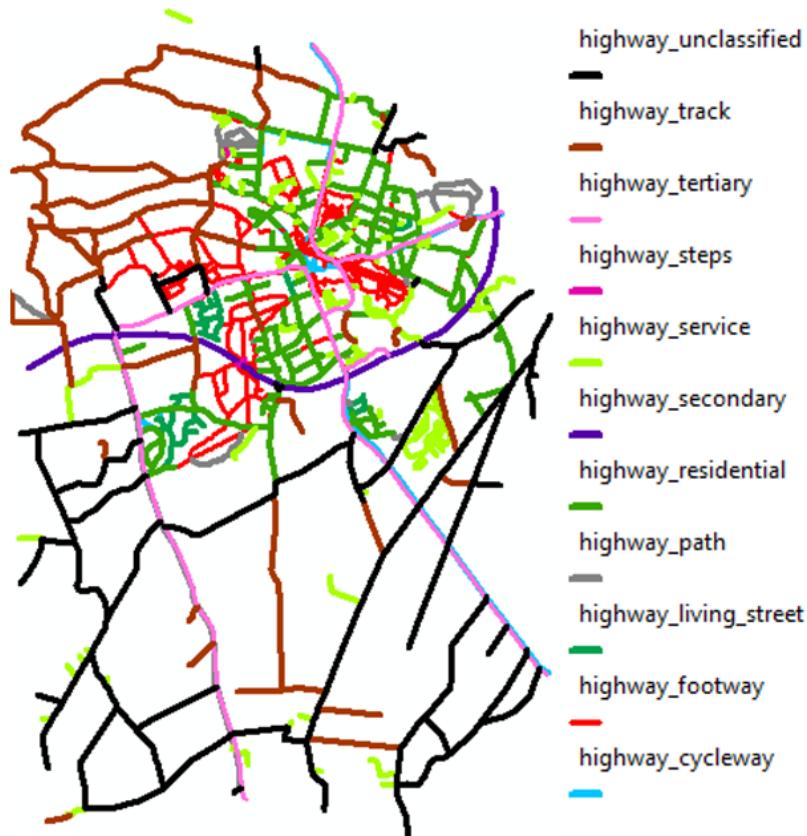


Abbildung 2.6.: Alle 889 linienhaften Features im OSM-Datensatz, die das Tag „highway“ besitzen. Die Gesamtlänge beträgt 151,946 km. Die unterschiedlichen Farben stellen verschiedene Straßentypen dar. Nachfolgend eine kurze Beschreibung der Straßentypen: Unclassified: Befestigte Straßen mit Verbindungscharakter unterhalb von tertiary. Track: Wirtschaftsweg, der hauptsächlich für die Land- oder Forstwirtschaft genutzt wird. Tertiary: Untergeordnete Verbindungsstraßen, die Dörfer oder Gemeinden verbinden. Steps: Treppen. Service: Zufahrtswege zu Gebäuden aller Art. Secondary: Kreis- oder Landesstraße, welche kleinere Städte oder grössere Ortschaften verbindet. Residential: Anliegerstraßen. Path: Mehrzweck-Pfade für nicht motorisierten Verkehr. Living street: Spielstraße. Footway: Fußweg. Cycleway: Radweg. Quelle: eigene Darstellung.

der Stadt darstellen. Hierunter fallen bspw. Geldautomaten, Sitzbänke, Apotheken oder Mülleimer.

Darüber hinaus existieren viele weitere Kategorien. Diese beschreiben jedoch nicht die Wege und werden infolgedessen nicht weiter erwähnt. In der Methodik ist zu bestimmen, welche der hier aufgeführten Features und Tags relevant sind und daher näher analysiert werden müssen.

3. Stand der Forschung

Zwei Thematiken spielen in dieser Arbeit eine Rolle: Laserscanning und OpenStreetMap. Das vorangegangene Kapitel gab hierzu Hintergrundinformationen und beschrieb die Datengrundlage im Allgemeinen. An dieser Stelle wird nun näher auf den Stand der Forschung, hinsichtlich der beiden genannten Thematiken, eingegangen. Zunächst beschreibt Kap. 3.1.1 die Relevanz von Laserscanning in der Forschung, bevor Kap. 3.1.2 näher auf die Klassifikation von Laserscanning-Daten eingeht. Kap. 3.2.1 nennt Forschungsarbeiten, um die Qualität von OSM-Daten näher zu beleuchten. Kap. 3.2.2 widmet sich dann den Oberflächendaten in OSM, die, für die vorliegende Arbeit, besonders relevant sind. Analog zum Laserscanning-Kapitel werden hier auch Forschungsarbeiten genannt, die sich mit Oberflächendaten aus OSM beschäftigen.

3.1. Flugzeuggestütztes Laserscanning

In dieser Arbeit wird ein Datensatz ausgewertet, der mit Hilfe von flugzeuggestütztem Laserscanning erfasst wurde und Höhenpunkte beinhaltet. Höhenpunkte sind digitale Punktfeatures, die durch ein Koordinatentripel näher spezifiziert sind. Die x- und y-Koordinaten verorten den Punkt als Rechts- und Hochwert im Raum. Zusätzlich gibt die z-Koordinate die Höhe des Punktes an. Aus diesen Angaben geht noch nicht hervor, welchen Oberflächentyp dieser Punkt repräsentiert. Je nachdem, wo der Laserimpuls auf die Erdoberfläche trifft, können die für die Arbeit wichtigen Wege und Straßen erfasst werden. Aber auch andere Objekte, wie z.B. Vegetation oder Gebäude, werden durch Höhenpunkte im Datensatz repräsentiert. Kleinräumige, starke Steigungen ergeben sich dort, wo benachbarte Punkte starke Höhendifferenzen, also starke Differenzen in ihrer z-Koordinate, besitzen. Ein Beispiel hierfür sind Bäume, deren Äste über die Straße ragen. Aus der Sicht des Sensors ist die Straße in diesem Fall teilweise von Bäumen bedeckt und die Straßenoberfläche kann nicht vollständig erfasst werden. Ein Höhenpunkt, der die Straße repräsentiert, kann dann direkt neben einem solchen liegen, der einen Baum repräsentiert. Um kleinräumige Steigungen für Wege und Straßen, entsprechend der Ziele der Arbeit, berechnen zu können, muss sichergestellt sein, dass nur Höhenpunkte, die Straßen und Wege repräsentieren, Teil der Berechnung sind. Für diese Unterscheidung existieren Klassifikationsalgorithmen, die auf LiDAR-Daten angewendet werden können. Kap. 3.1.2 nennt Klassifikationsalgorithmen, die auf nicht vorverarbeiteten LiDAR-Daten ohne Zusatzinformationen, angewendet werden können und geht auf den Stand der Forschung ein. Kap. 3.1.1 widmet sich dem Thema des flugzeuggestützten Laserscannings in einer allgemeineren Form und nennt Anwendungen dieser Messmethode in der Forschung.

3.1.1. Anwendungen von Laserscanning in der Forschung

Aufgrund der in Kap. 2.1 genannten Eigenschaften ist Laserscanning eine beliebte Methode, um Höhendaten zu erfassen und ebenso ein relevantes Thema in der Forschung. Dieses Kapitel nennt Hintergrundwerke und geht auf Anwendungsbereiche ein, die im Kontext der vorliegenden Arbeit stehen. Hierzu zählen die Forschung und Anwendung von Laserscanning in bewaldeten und urbanen Gebieten. In der vorliegenden Arbeit spielt die Berechnung von kleinräumigen Steigungen eine Rolle. Dieses Thema ist auch im Bezug auf das autonome Fahren von Fahrzeugen und das Navigieren von Robotern von Bedeutung, wo die Umgebung mit Laserscannern erfasst wird. Daher wird auch auf jene Forschungsgebiete eingegangen. Einen Anspruch auf Vollständigkeit stellt dieses Kapitel, angesichts der weitläufigen Forschungsfelder und der intensiven Forschung der letzten Jahre, nicht. Vielmehr wird eine Auswahl von Arbeiten vorgestellt, die in den letzten Jahren erschienen sind.

Wehr u. Lohr (1999), Mather u. Koch (2011, S. 315 ff.), Baltsavias (1999) und Pfeiffer u. Briese (2007) thematisieren grundlegende Laserscanning-Prinzipien. Unter anderem gehen sie auf Puls- und Phasenmessung und Reflexionsgrade von Oberflächen ein (vgl. Wehr u. Lohr, 1999, S. 3 ff.). Außerdem nennen sie Scanmuster (vgl. Pfeiffer u. Briese, 2007, S. 8) und stellen wichtige Formeln und Gleichungen auf (vgl. Baltsavias, 1999, S. 200 ff.).

Flugzeuggestütztes Laserscanning ist Teil des Airborne Laserscannings, das auch hubschrauber gestützt stattfinden kann. Airborne Laserscanning kann nützliche Daten über Forstbestände und für das Forstmanagement liefern (vgl. White et al., 2013a, S. 1). Diese Daten werden von forstwirtschaftlichen Unternehmen und Regierungsorganisationen verwendet (vgl. Holopainen et al., 2014, S. 1683). Im Gegensatz zu Feldbegehungen kann die Verarbeitung von Laserscanning-Daten präzisere Aussagen über die Eigenschaften der Forstbestände, sowie Kosteneinsparungen bringen (vgl. Holopainen et al., 2014, S. 1683). Aussagen, die mit Hilfe der Daten getroffen werden können, betreffen beispielsweise die Höhe einzelner Bäume oder die Baumdichte in einem bestimmten Gebiet (vgl. Holopainen et al., 2014, S. 1683). Das Vorgehen erfolgt entweder über einen flächenbasierten Ansatz (in der Forschung oft: area-based approaches (ABAs)) oder über die Detektion einzelner Bäume (individual/single-tree detection approaches (ITDs)) (vgl. Kaartinen et al., 2012, S. 951). Flächenbasierte Ansätze haben den Vorteil, dass sie wichtige Parameter, wie das Stammvolumen, die Baumfläche und -höhe, schätzen können, womit dann eine großflächigere Schätzung eines Waldstücks oder einer ganzen Region erstellt werden kann (vgl. Wulder et al., 2013, S. 3). White et al. (2013a, S. 25 ff.) widmen sich dem flächenbasierten Ansatz und listen Parameter und Faktoren auf, die für eine erfolgreiche Untersuchung des Walds gegeben sein müssen.

Vauhkonen et al. (2014) charakterisieren den Baumbestand eines Waldes hinsichtlich der Baumarten und der gewünschten forstwirtschaftlichen Nutzung. Sie führen eine flächenbasierte Analyse (ABA) durch, um die Dicke der Bäume zu messen. Dieser Pa-

rameter wurde verwendet, um zu bestimmen, welcher Baum gefällt werden kann. Sie erreichen mit diesem Ansatz eine Genauigkeit von 95% (vgl. Vauhkonen et al., 2014, S. 141). Hyypä et al. (2012) untersuchen Waldstrukturen und präsentieren Verbesserungen zur Erkennung und Unterscheidung von einzelnen Bäumen im Wald, basierend auf last returns. Næsset et al. (2016) analysieren Daten aus Airborne Laserscanning, anderen Fernerkundungssensoren und Karten, um die Fläche von Waldstücken, sowie deren Biomasse über dem Boden zu bestimmen. Mund et al. (2015) hingegen untersuchen, inwieweit sich Daten aus Airborne Laserscanning mit einer hohen Punktdichte für die Bestimmung von Vegetationsschichten im Wald eignen. Sie identifizieren bspw. verschiedene Ebenen von Baumkronen und Unterholz. Mund et al. (2015) zufolge können die hieraus abgeleiteten Ergebnisse wichtige Aussagen über das Wachstum des Waldes liefern, was z.B. für das Erkennen von abgestorbenen Bäumen und das generelle Monitoring des Waldes nützlich ist. Vastaranta et al. (2012) stellen sich der Frage, inwiefern ITD- und ABA-basierte Ansätze kombiniert werden können und verwenden dabei ITD-Ergebnisse als Trainingsdaten für ABA-Berechnungen. Sie stellen fest, dass sich diese Vorgehensweise für Regionen mit spärlicher Straßenbindung eignet, wenn die Kosten für Feldmessungen minimiert werden sollen.

Die bisher genannten Arbeiten zeigen, welche Parameter und Aussagen sich aus Airborne LiDAR-Daten in Waldgebieten ableiten lassen. Hierbei spielte die Extraktion von Features eine Rolle, bspw. in der Erkennung und Auswertung der Daten einzelner Bäume. Features aus Laserscanning-Daten lassen sich jedoch nicht nur in Waldgebieten extrahieren. In der vorliegenden Arbeit spielt auch der urbane Raum eine Rolle, da Steigungen auf Wanderwegen in der Gemeinde Bad Rothenfelde berechnet werden. Hu et al. (2004) gehen einen Schritt zurück und stellen eine Methode vor, wie sich solche Features zunächst einmal aus Laserscanning-Daten extrahieren lassen. Sie verwenden dafür sowohl Höhen- als auch Intensitätsdaten aus Laserscanning, sowie hochaufgelöste Luftbilder. Um Straßen zu detektieren, führen sie u.a. eine Hough-Transformation und eine Topologie-Analyse durch. Airbone Laserscanning nutzen auch Ferraz et al. (2014), um Straßen, speziell in bewaldeten, bergigen Regionen, zu detektieren. Sie wenden die Verfahren der Random Forest classification und des Marked Point Process an und erzielen nach eigener Aussage zufriedenstellende Ergebnisse. Ein weiterer Bereich ist die Gebäudeextraktion. Yang et al. (2013) wenden das sog. Gibbs energy model, sowie das Verfahren der Markov Ketten an, um Gebäude aus einem Airborne Laserscanning-Datensatz zu detektieren. Nachdem die Features verfeinert wurden, extrahieren sie mit morphologischen Operatoren die gewünschten Umrisse der Gebäude. Sie erreichen auf Pixel-Ebene eine Genauigkeit von 91,57%, sowie eine Vollständigkeit von 87,3% (vgl. Yang et al., 2013, S. 1399). Auch terrestrisches Laserscanning ist Teil der Forschung bzgl. der Feature-Extraktion. Qin u. Gruen (2014) gleichen Punktwolken, die mit mobilem, terrestrischem Laserscanning aufgenommen wurden, mit terrestrischen Bildern im urbanen Raum ab, um Objekte zu identifizieren und change detection zu betreiben.

Daten aus Laserscanning sind außerdem essentiell für den Betrieb von Robotern und autonomen Fahrzeugen. Flämig (2015, S. 380 f.) beschreibt, dass führerlose LKW und

Gabelstapler, auf Werksgeländen Waren transportieren und mit Laserscannern ausgerüstet sind, um die Umgebung zu überwachen und um Navigation zu ermöglichen. Wichtig für eine sichere Navigation und die Pfadberechnung von Fahrzeugen ist die Erkennung von Bordsteinen (vgl. Hata et al., 2014, S. 1257). Hierfür existieren einige Methoden, die auf Basis von 2D-LiDAR und Stereobildern arbeiten (vgl. Hata et al., 2014, S. 1257). Hata et al. (2014) verwenden jedoch 3D-LiDAR-Daten, um einen größeren Ausschnitt des Bordsteins zu erfassen. Filter- und Regressionsmethoden arbeiten dann gleichhohe und verdeckende Objekte heraus. Sie erweitern damit die Hindernisdetektion von Montemerlo et al. (2008) um die Extraktion von Bordsteinstrukturen. Eine Herausforderung ist die Erkennung von beweglichen Objekten im Straßenverkehr, da die anzutreffenden Formen sehr unterschiedlich sind (vgl. Hassannejad et al., 2015, S. 4167). Die Sichtbarkeit spielt dabei auch eine Rolle, da sie teilweise durch verdeckende Objekte, Verkehrsteilnehmer und Straßeninfrastruktur, nicht gegeben ist (vgl. Hassannejad et al., 2015, S. 4167). In der Literatur wird es häufig durch eine Kombination von simultaner Lokalisierung und Kartierung (SLAM) und der Erkennung und Verfolgung von beweglichen Objekten (DATMO) gelöst (vgl. Azim u. Aycard, 2012) (vgl. Márquez-Gámez u. Devy, 2012). Die Erkennung von Objekten und Hindernissen ist auch für Roboter wichtig (vgl. Suger et al., 2015, S. 3943). Hiremath et al. (2014) nutzen LiDAR, um die Entfernung zu Hindernissen zu messen. Sie stellen heraus, dass LiDAR unabhängig von der Belichtung der Umgebung betrieben werden kann und daher einen Vorteil gegenüber bildgebenden Verfahren hat. Um einen reibungslosen Betrieb von Robotern zu ermöglichen, spielt die Berechnung der Steigung, die bewältigt werden muss, eine Rolle (vgl. Suger et al., 2015, S. 3943). Hierfür erstellen die Autoren ein 2D-Raster und ordnen die Punkte aus der LiDAR-Punktwolke den Zellen zu. Die Steigung jeder Zelle wird dann aus den Eigenvektoren und der Kovarianzmatrix aller Punkte der Zelle berechnet (vgl. Suger et al., 2015, S. 3943).

Zu anderen Anwendungsfeldern zählt u.a. die Archäologie, die Glaziologie und das Landschaftsmonitoring. In der Archäologie kann flugzeuggestütztes Laserscanning eingesetzt werden, um anthropogene Strukturen zu erkennen (vgl. Bofinger u. Hesse, 2011, S. 38). Dieses Wissen kann hilfreich sein, um neue Erkenntnisse über geschichtliche Ereignisse zu gewinnen und um Bauvorhaben und weitere Forschungsprojekte vorzubereiten (vgl. Bofinger u. Hesse, 2011, S. 38). Für die Veränderungsanalyse (change detection) der Umwelt wird häufig auf multi-temporale LiDAR-Daten zurückgegriffen (vgl. Rieg et al., 2014, S. 137). Joerg et al. (2012) berechnen aus Airborne Laserscanning-Daten verschiedener Zeitpunkte jeweils präzise digitale Geländemodelle, um Gletscherveränderungen aufzuspüren. Auch für das Landschaftsmonitoring, etwa im Bezug auf die Erosion, liefert Laserscanning relevante Informationen (vgl. Kinsey u. Challis, 2010).

3.1.2. Klassifikation von Laserscanning-Daten

Daten aus flugzeuggestütztem Laserscanning können in verschiedenen Datenformaten vorliegen. Ein gängiges Datenformat ist das „LAS“-Format (vgl. Evans et al., 2009, S. 784). Das Format wird durch die amerikanische Gesellschaft für Photogrammetrie

und Fernerkundung spezifiziert (vgl. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016b). Es handelt sich hierbei um ein Binärformat, das Daten aus LiDAR-Punktwolken und 3D-Tupeln, bestehend aus x, y und z-Koordinaten, abspeichert und deren Austausch ermöglicht (vgl. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016b). Es ist eine Alternative zu proprietären Formaten, und reinen Textdateien im ASCII-Format, deren Auswertung, selbst für geringe Datenmengen, auch aufgrund der Größe der Dateien, sehr lange dauern kann (vgl. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016b). Da es sich bei LAS um ein LiDAR-spezifisches Format handelt, kann es auch Klassifikationen von Punkten abspeichern. Seit dem Datenstandard 1.1 müssen die Punkte vorgegebenen Klassen zugeordnet werden (vgl. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016a, S. 7). Eine eigene Definition, von für das Untersuchungsgebiet passenden Klassen, ist daher nicht mehr möglich. Eine solche Klassifikation der Daten, z.B. in Vegetations- und Bodenkategorien wird für gewöhnlich von den Datenanbietern erledigt (vgl. Evans et al., 2009, S. 784). LAS schreibt 10 verschiedene Punktklassen vor, darunter drei für Vegetation (niedrig, mittel, hochgewachsen), eine für Boden, eine für Gebäude, eine für Wasser (vgl. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016a, S. 8). Außerdem existiert eine Klasse für unklassifizierte Punkte. Weitere 21 sind für andere Definitionen reserviert.

Wie Evans et al. (2009, S. 783) berichten, gibt es verschiedene Level der Vorverarbeitung von LiDAR-Daten. Während „Level 0“-Produkte Rohdaten bezeichnen, die ohne Vorverarbeitung vom Sensor stammen, werden in „Level 1“-Produkten bereits Verzerrungen der Trägerplattform korrigiert. Außerdem findet hier eine Einordnung der Daten in Blöcken („tiles“) statt. Die in dieser Arbeit zugrundeliegenden Daten können „Level 1“-Produkten zugeordnet werden, da weitere Vorverarbeitungsschritte nicht durchgeführt wurden. Diese würden „Level 2“-Produkte auszeichnen. Hierzu zählt eine Klassifizierung aller Punkte, ein daraus abgeleitetes digitales Geländemodell, sowie das Vorhandensein von Intensitätswerten Evans et al. (2009, S. 783).

Da entsprechende Informationen nicht vorliegen, muss eine nachträgliche Klassifikation der Daten erfolgen, die in dieser Arbeit auch umgesetzt wurde. Wichtig ist hier vor allem die Unterscheidung zwischen Erdboden und Vegetation. In der wissenschaftlichen Literatur existieren verschiedene Vorgehen zur Klassifikation von Punktwolken. Die meisten Algorithmen, die Bodenpunkte herausfiltern, nehmen an, dass Höhenvariationen zwischen zwei benachbarten Punkten, die den Erdboden repräsentieren, eher leicht und Verläufe zwischen einem Boden- und einem Nichtbodenpunkt abrupt sind (vgl. Meng et al., 2009, S. 118).

Algorithmen, die nachbarschaftsbasiert arbeiten, vergleichen die Höhe eines Punktes mit denen der Nachbarpunkte und klassifizieren diese als „Nicht-Boden“, wenn der Höhenabstand über einem definierten Schwellwert liegt (vgl. Meng et al., 2009, S. 118). Die Größe der jeweils untersuchten Nachbarschaft ist für den Erfolg entscheidend, da die angetroffenen Objekte im Datensatz, bspw. Gebäude und Bäume, unterschiedlich groß sein können (vgl. Kilian et al., 1996, S. 5). Die untersuchte Nachbarschaft, oder auch das

untersuchte Fenster an Punkten, muss klein genug sein, um kleine Bäume zu erfassen und sie vom Boden unterscheiden zu können. Auf der anderen Seite muss es groß genug für Gebäude sein, um nicht fälschlicherweise flache Punkte auf Dächern als Boden zu detektieren. Neben den nachbarschaftsbasierten Algorithmen gibt es eine weitere Kategorie: richtungsbasierte Ansätze. Algorithmen, die richtungsbasiert, z.B. entlang einer Scanlinie, arbeiten, berechnen Höhen- oder Neigungsprofile für die Scanlinie und identifizieren Bodenpunkte basierend auf diesem Profil (vgl. Meng et al., 2009, S. 118). Dadurch, dass sich diese Algorithmen auf eine Richtung festlegen, in denen sie Punkte untersuchen, kann das Resultat künstliche Linien enthalten, die auf dieses Vorgehen hinweisen (vgl. Meng et al., 2009, S. 118).

Während die meisten Algorithmen, die die Oberfläche des Erdbodens aus LiDAR-Daten bestimmen, proprietär und teuer sind, gibt es dennoch frei zugängliche Algorithmen, deren Vorgehen und Resultate veröffentlicht wurden (vgl. Tinkham et al., 2011, S. 638). Hierzu zählt das Verfahren nach Evans u. Hudak (2007), die „Multiscale Curvature Classification“ (MCC). Eine Implementation des Verfahrens ist verfügbar (vgl. Sourceforge, 2016). Das Verfahren der beiden Autoren zielt auf die Unterscheidung von Boden- und Nicht-Boden-Punkten von LiDAR returns in bewaldeten und komplexen Gebieten ab und weist am Ende alle Punkte in einer der beiden Klassen zu (vgl. Evans u. Hudak, 2007, S. 1029). Bei der Durchführung des Verfahrens wird mit dem „thin-plate spline“ (TPS)-Verfahren zunächst eine Rasteroberfläche generiert. Die Zellweite des Rasters gibt der Anwender über den Parameter λ , auch „scale“ genannt, an. Die Interpolation der Oberfläche geschieht, basierend auf einer Nachbarschaft aus jeweils 12 Höhenpunkten. Aus diesem Grund ist dieses Verfahren den oben erwähnten nachbarschaftsbasierten Ansätzen zuzuordnen. Punkte, die mehr als einen bestimmten Abstand („tolerance“) von der Oberfläche entfernt liegen, werden entfernt. Ein wichtiger Aspekt des Algorithmus ist auch, dass drei Durchgänge absolviert werden. Währenddessen wird die Oberfläche in drei verschiedenen Auflösungen berechnet. Im ersten Durchgang basiert die Auflösung der Oberfläche auf dem initialen „scale“-Parameter. Die Auflösung wird im zweiten und dritten Durchlauf jeweils weiter erhöht. Der Algorithmus absolviert drei Durchgänge. In jedem dieser Durchgänge finden Iterationen statt, in denen die Klassifikation immer weiter verfeinert wird (s. Abb. 3.1). Erst wenn eine Iteration eine Konvergenzbedingung erfüllt, startet der nächste Durchgang. In der von den Autoren durchgeführten Evaluation zeigt sich, dass die meisten Punkte bereits im ersten Durchlauf klassifiziert werden. Dennoch werden in den Iterationen des zweiten und dritten Durchlaufs immer noch Teile der Punktmenge klassifiziert, deren Gesamtanteil in einstelligen Prozentbereichen liegen. Der Algorithmus versucht, „Commission“- und „Omission“-Fehler zu minimieren. „Commission“-Fehler bezeichnen die irrtümliche Klassifizierung eines Nicht-Bodenpunktes als Bodenpunkt. Ein „Omission“-Fehler liegt vor, wenn ein Punkt, der die Erdoberfläche repräsentiert, nicht in das Endergebnis der Bodenpunkte übernommen und somit gelöscht wird. Sollen nur die Bodenpunkte aus der ungefilterten Punktewolke extrahiert werden, wiegen „Commission“-Fehler schwerer. Es ist besser, wenige gültige Bodenpunkte zu löschen und somit Datenlücken zu riskieren, als Vegetationspixel im klassifizierten Datensatz zu haben, die z.T. deutliche Ausreißer,

im Vergleich zur restlichen Oberfläche, darstellen. Werden Steigungen, basierend auf der klassifizierten Punktwolke berechnet, fallen diese bei Pixeln, die eigentlich Bäume repräsentieren, natürlich außergewöhnlich, und fälschlicherweise, stark aus. Nach Aussage der Autoren werden „Commission“-Fehler im Ergebnis des MCC-Algorithmus, bei gleichzeitiger Beibehaltung einer großen Zahl von Bodenpunkten, minimiert (vgl. Evans u. Hudak, 2007, S. 1029). Die Autoren bemerken weiterhin, dass das Konzept der verschiedenen Auflösungen der Oberfläche in drei Durchläufen, gegenüber einem anderen Verfahren eine Verbesserung darstellt (vgl. Evans u. Hudak, 2007, S. 1030) und als Innovation des Verfahrens bezeichnet werden kann (vgl. Evans u. Hudak, 2007, S. 1036).

Einen anderen Ansatz, unregelmäßige LiDAR-Punktwolken ohne Vorwissen zu klassifizieren, beschreibt Axelsson (2000). In diesem Verfahren wird eine TIN-Oberfläche, basierend auf speziellen Punkten, sog. „seed points“, berechnet. Die seed points sind Teil von Datenblöcken („tiles“), deren Größe der Anwender angibt. Anfänglich besteht die TIN-Oberfläche nur aus wenigen Punkten. Im weiteren Verlauf wird die Oberfläche in einem iterativen Prozess verdichtet und verfeinert. Um dies zu erreichen, werden neue Punkte, bzw. neue TIN, der Oberfläche hinzugefügt. Die neuen Punkte werden nur dann hinzugefügt, wenn sie bestimmte Schwellwert („threshold“)-Bedingungen erfüllen. Die Bedingungen beinhalten die Distanz des Punktes zur Oberfläche und die Winkel zu den Punkten der Oberfläche. Die Verdichtung der TIN-Oberfläche, und somit das ganze Verfahren, endet dann, wenn alle Punkte entweder als Boden oder als Nicht-Boden klassifiziert wurden. Dieses Verfahren wird auch vom Tool „lasground“ der Software-Bibliothek „LASTools“ verwendet (vgl. Montealegre et al., 2015, S. 4075, rapidlasso GmbH, 2016a). Außerdem wird es in dem kommerziellen Produkt TerraSolid eingesetzt (vgl. Axelsson, 2000, S. 110). In den LASTools kann der Parameter Schrittweite („step size“) gesetzt werden. Für bewaldete und bergige Gebiete beträgt der Wert 5 Meter. Je nachdem, wie das Untersuchungsgebiet beschaffen ist, muss die Schrittweite, auf z.B. 25 Meter für Städte, erhöht werden. Hiermit wird der unterschiedlichen, zu erwartenden, Objektgröße Rechnung getragen. Die Suche nach den besten initialen seed points kann intensiviert werden, indem die Parameter „fine“ statt bspw. „coarse“ gesetzt werden.

Ein letzter, nicht-kommerzieller Klassifikationsalgorithmus für LiDAR-Daten, wird nun kurz vorgestellt. Er basiert auf der Arbeit von Brodu u. Lague (2012) und wird in deren Arbeit „CANUPO“ genannt. Ursprünglich für terrestrische Laserscanning-Daten entwickelt, kann der Algorithmus jedoch auch auf Airborne Laserscanning-Daten angewendet werden. Das Konzept basiert darauf, die Nachbarschaft für jeden Punkt zu analysieren. Die Nachbarschaft jedes Punktes wird dabei in verschiedenen Dimensionen, 1D, 2D und 3D, untersucht. Außerdem ist die Größe der Nachbarschaft an die lokalen Gegebenheiten anpassbar. Dies geschieht durch den Parameter „scale“, den der Anwender vor der Ausführung des Algorithmus angeben muss. Es wird untersucht, in welcher Dimension sich die Punkte am besten zu Klassen gruppieren lassen. Das geschieht unter der Annahme, dass Punkte, die zu gleichen Klassen gehören, Cluster bilden. Der Anwender muss für jede Klasse eine Menge von Punkten (Trainingsdaten) bereitstellen. Diese sollten nur Punkte der gewünschten Klasse beinhalten. Die letztendliche Trennung der Klassen

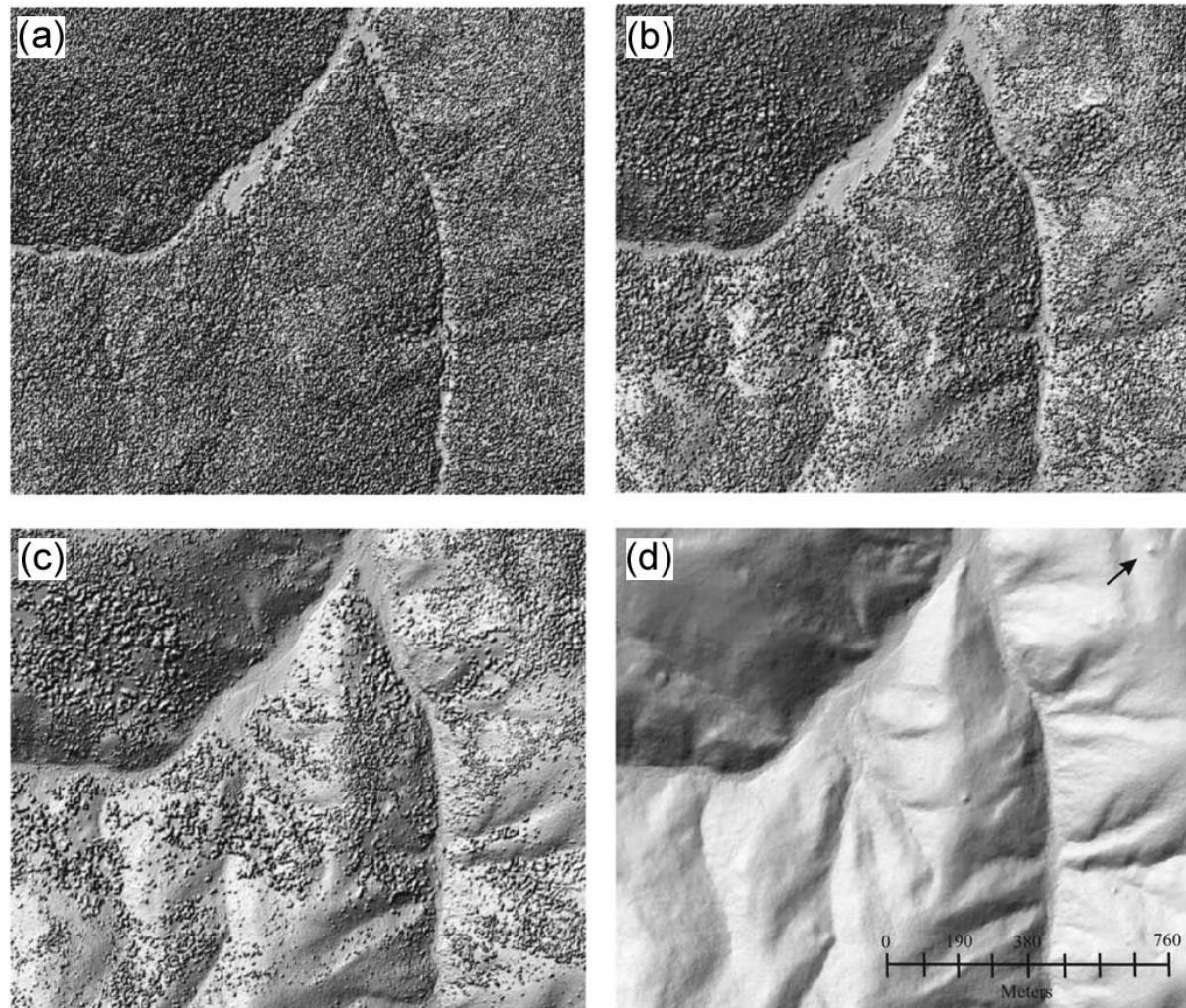


Abbildung 3.1.: Schummerung der interpolierten Klassifikationsergebnisse der vier Etappen des „MCC“-Algorithmus. (a): Vorklassifizierte Daten. (b): Konvergenz in Durchlauf 1. (c): Konvergenz in Durchlauf 2. (d): Konvergenz in Durchlauf 3, welches das endgültige Resultat darstellt. Der größte „Commission“-Fehler wird durch den Pfeil dargestellt. Quelle: Evans u. Hudak, 2007, S. 1033.

erfolgt entweder mit dem Verfahren der Diskriminanzanalyse (vgl. Fisher, 1936, Theodoridis u. Koutroumbas, 2009, S. 288) oder mit einer Support Vector Machine (vgl. Boser et al., 1992). Anhand der Trainingsdaten kann das Verfahren trainiert werden. Es werden somit Einstellungen und Parameter für eine optimale Trennung aller gewünschten Klassen ermittelt.

Weitere Verfahren werden nun kurz genannt. Höfle et al. (2012) stellen ein Verfahren vor, das auf Basis sog. „full-waveform“-LiDAR-Daten arbeitet. Manche Sensoren nehmen nur einzelne returns des gemessenen Laserimpulses auf. Systeme, die full-waveform-Daten aufnehmen, messen die zurückgestrahlte Energie als eine zeitabhängige Funktion (vgl. Mallet u. Bretar, 2009, S. 4). Die Untersuchungen führen sie auf einer Punktwolke mit einer Dichte von 50 Pkt/m² durch. Für die Klassifizierung verwenden sie einen Entscheidungsbaum und künstliche neuronale Netze.

Boyko u. Funkhouser (2011) klassifizieren einen LiDAR Datensatz in einer Großstadt. Die Zielklassen sind „Straße“ und „Nicht-Straße“. Der LiDAR-Datensatz besitzt eine sehr hohe Punktdichte, da er aus mehreren Aufnahmen desselben Gebietes zusammengetragen wurde. Es wurden 1 Milliarde Punkte auf 6 Quadratkilometer gemessen, was eine Punktdichte von 166 Pkt/m² ergibt. Außerdem dient ein OSM-Datensatz für Straßen als Grundlage. Sie fokussieren sich daher nicht ausschließlich auf die Erkennung von großflächigen Straßen. Zielsetzung ist eher die Erkennung von detaillierten Hindernissen, wie Kantsteine, Autos, Bäume und Ungenauigkeiten der OSM-Karte. Sie erreichen eine Korrektheit ihres Ergebnisses von 86%, sowie eine Vollständigkeit von 94%.

Montealegre et al. (2015) vergleichen mehrere Klassifikationsverfahren miteinander. Hierunter befinden sich auch die erwähnten Verfahren MCC und „lasground“ der Bibliothek „LASTools“. Sie führen eine Untersuchung hinsichtlich sog. „Typ I“- und „Typ II“-Fehler durch. Der „Typ II“-Fehler entspricht dabei dem „Commission“-Fehler, der bereits erwähnt wurde. Der „Typ I“-Fehler bezeichnet die fälschliche Zuordnung von Bodenpunkten in die Klasse der Nicht-Bodenpunkte (vgl. Montealegre et al., 2015, S. 4077). Werden nur die Bodenpunkte aus der Punktwolke herausgefiltert, entspricht der „Typ I“-Fehler dem „Omission“ Fehler, da Nicht-Bodenpunkte in diesem Fall nicht relevant sind. Montealegre et al. (2015, S. 4079) testen verschiedene Parameter der Algorithmen und stellen fest, dass das MCC-Verfahren für das Testgebiet den geringsten „Omission“ Fehler aller getesteten Verfahren aufweist. Bei MCC und LASTools sind die „Commission“- und „Omission“-Fehler eher ausgeglichen, wohingegen bspw. die untersuchten Verfahren „ALDPAT-MLS“ und „FUSION“ ein deutliches Übergewicht an „Omission“-Fehlern aufweisen. Maximal beträgt er hier 75%, wohingegen bei MCC lediglich 12,7% gemessen wurden. Das Verfahren „FUSION“ basiert auf Kraus u. Pfeifer (1998), das Verfahren „ALDPAT-MLS“ auf Vosselman (2000). Weiterhin liegt die Erfolgsrate der Klassifikation bei MCC mit 83,3% am höchsten. Sie ist vergleichbar mit der Erfolgsrate der LASTools (82,8%). Die Fehlerrate der Verfahren hängt stark von bestimmten Faktoren ab. Zu nennen sind die Punktdichte, wobei einige Verfahren (MCC, FUSION) mit einer geringeren Punktdichte besser umgehen können, als andere, darunter ALDPAT-PM (vgl. K. Zhang

et al., 2003) und LASTools. Auch der Scanwinkel des Sensors hat einen Einfluss auf das Klassifikationsergebnis. Insgesamt bilanzieren Montealegre et al. (2015, S. 4083), dass alle Verfahren Stärken und Schwächen haben, sowie unterschiedlich viele „Typ I“ und „Typ II“-Fehler aufweisen. Als problematisch für die Klassifizierung stellten sich aufkeimende Büsche, Baumstümpfe und abgestorbene Bäume, sowie Steigungen über 15° heraus.

3.2. OpenStreetMap

Eine Steigung von Wegen kann nur dort berechnet werden, wo Wege aus dem OSM-Datensatz extrahiert werden. Die Vollständigkeit der OSM-Daten ist daher ein entscheidender Faktor für die Steigungsberechnung. Die folgenden zwei Unterkapitel widmen sich dem Thema OpenStreetMap in der Forschung. Es wurden einige Forschungsarbeiten veröffentlicht, die sich dem Thema Datenqualität, v.a. des Straßen- u. Wegenetzwerks, in OSM widmen, wie in Kap. 3.2.1 beschrieben. Neben der Steigungsberechnung wird in dieser Arbeit auch eine Oberflächenanalyse durchgeführt. Sie basiert auf den Oberflächeninformationen aus OSM. Daher wird die Analyse auch von der Vollständigkeit der OSM-Daten, aber auch von der Qualität des OSM-Datenmodells beeinflusst. Kap. 3.2.2 widmet sich den Oberflächendaten in OpenStreetMap. Es zählt u.a. Arbeiten auf, in denen sie genutzt werden und zitiert Quellen, die die Vollständigkeit von Oberflächeninformationen untersucht haben.

3.2.1. Datenqualität von OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM) ist ein auf die Mitarbeit vieler freiwilliger Personen angewiesenes Projekt. Wie in Kap. 2.2 bereits beschrieben, stellt OSM an die Beitragenden keine Anforderungen bzgl. ihres Hintergrundwissens oder dem Grad der Mitarbeit. Spätere Untersuchungen über oberflächenrelevante Features machen nur dann Sinn, wenn die Qualität der Daten ausreichend ist. Der Begriff Qualität bezieht sich in diesem Zusammenhang auf Faktoren wie die Lagegenauigkeit, die Topologie und auf Attributierungen der Features. Diese Faktoren sind nicht nur für die Bewertung von Oberflächeninformationen wichtig. Die Beurteilung der Steigung einer Strecke erfolgt sowohl auf Basis der Laserscanning-Informationen, als auch auf Basis des OSM-Streckennetzes. Nur für die Straßen und Wege, die in OSM enthalten sind, kann auch eine Steigung berechnet werden. Informationen zur Qualität der Daten sind also für beide Teile der Arbeit entscheidend. OSM erfreut sich immer größerer Beliebtheit, was im Kapitel 2.2 thematisiert wurde. Aus der absoluten Zahl der bei OSM registrierten Nutzer und der Zahl der aktiven Nutzer ist ein direkter Schluss auf die Datenvollständigkeit jedoch nicht möglich. Dieses Kapitel geht auf die genannten Faktoren der Datenqualität ein, indem es relevante Arbeiten nennt und Untersuchungsergebnisse zitiert.

Arsanjani et al. (2013) beurteilten die Quantität und Qualität von 346 Personen, die zu OSM beitrugen, in einer Fallstudie für das Untersuchungsgebiet Heidelberg. Die Per-

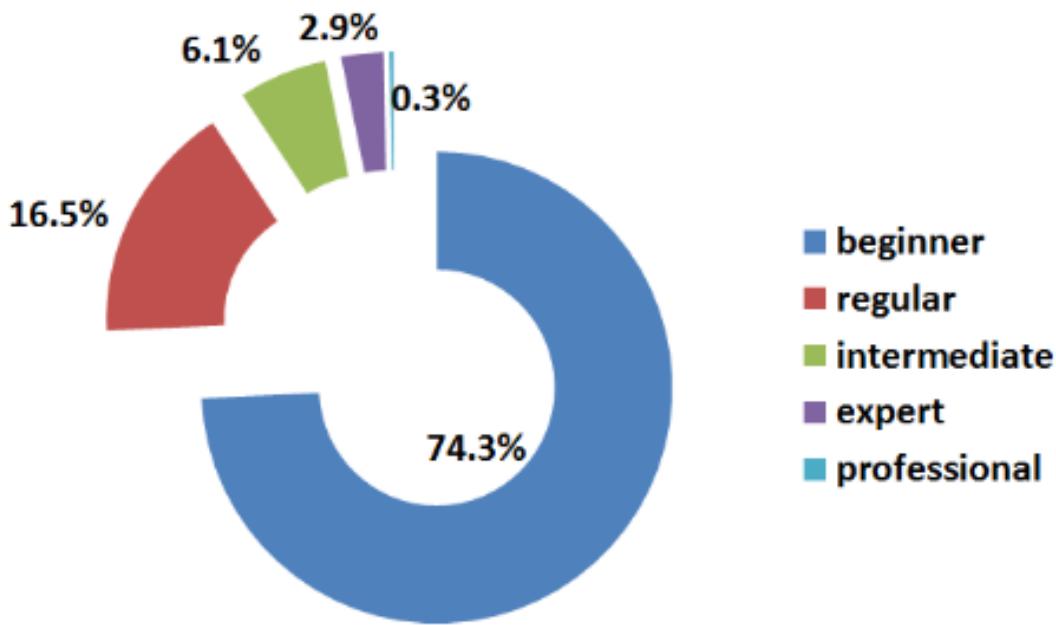


Abbildung 3.2.: Die Teilnehmer der Fallstudie, eingestuft entsprechend der Qualität ihrer Beiträge zu OSM. Quelle: Arsanjani et al., 2013, S. 3.

sonen erfassten 15.350 Straßensegmente. Beurteilt wurden die temporale, logische und semantische Genauigkeit ebenso wie die Positionsgenauigkeit der Daten, indem sie mit amtlichen Daten des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie verglichen wurden. Unter den 346 Personen wurden anschließend 257 oder annähernd drei Viertel als Einsteiger eingestuft (s. Abb. 3.2). Diese Gruppe hat minimales Vorwissen über das Kartieren. Demzufolge mangelte es an positioneller und semantischer Genauigkeit - aber auch an aktiver Teilnahme. Die höchsten Ansprüche erfüllte in ihrer Untersuchung lediglich eine Testperson. Die „professionellen“ Kartierer stellen die vertrauenswürdigste Gruppe dar. Sie teilen eine große Menge an Daten und handeln dabei nach bestem Wissen. Außerdem sammeln sie relevante Zusatzinformationen für die Daten.

Durch den unterschiedlichen Grad der Teilnahme der Beitragenden und den Forschungsergebnissen von Arsanjani et al. (2013) ergeben sich, wie zu erwarten, regionale Unterschiede in der Vollständigkeit des OSM-Datensatzes. Neis et al. (2011) untersuchen diesbezüglich die Frage, wie viele Beitragende es benötigt, um den Unterschied zwischen OSM und einem kommerziellen Referenzdatensatz bezüglich der Vollständigkeit zu minimieren. Neis et al. (2011) verglichen den deutschen OSM-Datensatz mit dem eines kommerziellen Navigationsgeräteherstellers und fanden heraus, dass sich der relative Unterschied zwischen beiden Datensätzen verringert, umso mehr OSM-Beitragende pro km^2 vorhanden sind (vgl. Neis et al., 2011, S. 13). Diese Feststellung stützt sich auf die Arbeit von Neis et al. (2010), die den OSM-Datensatz der fünf größten deutschen Städte untersuchten. Sie berichten, dass dieser in einem Radius von 15 km um den Stadtmittelpunkt ca. 5-35% vollständiger ist als ein vergleichbarer, kommerzieller Datensatz.

Kleinere Städte, wie Zwickau, Landshut oder Marburg schnitten hier schlechter ab, hier wurde eine Verschlechterung zum Vergleichsdatensatz von ca. 10-50% festgestellt. Diese Ergebnisse korrespondieren wiederum mit der Einwohnerdichte, bspw. von Hamburg (2312 Einw./km²) im Vergleich zu Marburg (590 Einw./km²) (vgl. Statistisches Bundesamt, 2016b, Hessisches Gemeindelexikon, 2013). Es ist daher zu erwarten, dass für das Untersuchungsgebiet, der Gemeinde Bad Rothenfelde, mit einer Bevölkerungsdichte von 413,6 Einw./km² (vgl. Gemeinde Bad Rothenfelde, 2016), die Vollständigkeit eines kommerziellen Datensatzes nicht erreicht wird.

In der Literatur wird die Qualität von OSM-Daten oft mit Referenzdatensätzen verglichen. Während Haklay (2010) sich auf die Situation in Großbritannien, speziell London, konzentriert, führen Girres u. Touya (2010) ihre Untersuchung in 4 Testgebieten in Frankreich durch und beurteilen die OSM-Datenqualität in Frankreich. Herfort et al. (2015) fokussieren sich auf die kritische Infrastruktur in Deutschland. Sie benennen verschiedene Elemente kritischer Infrastruktur, wie z.B. Energie-, Transport-, administrative und Gesundheitsinfrastruktur, und vergleichen anschließend das Datenmodell von OSM mit ALKIS und dem „HAZUS“ Referenzkatalog des amerikanischen Department of Homeland Security. Während das Datenmodell von ALKIS 267 der 342 untersuchten Infrastrukturelemente, wie z.B. Kraftwerke, Banken, Straßen und Tunnel beinhaltet, ist dies bei OSM für 239 Elemente der Fall. HAZUS beinhaltet 160 Elemente. Sie kommen zu dem Schluss, dass die kritische Infrastruktur im Vergleich sehr gut in OSM abgebildet ist, was von Nutzen für die Planung von Notfalleinsätzen sein kann. Für Wanderer, die sich im Untersuchungsgebiet Bad Rothenfelde bewegen, ist diese Forschung ebenfalls relevant, denn eine differenzierte Abbildung verschiedener Infrastrukturtypen und ein geeignetes Datenmodell, im Vergleich zu amtlichen Datensätzen, ist wichtig.

Neis et al. (2011) vergleichen die Entwicklung des OSM-Straßennetzwerks in Deutschland mit proprietären Datensätzen. Sie stellen fest, dass OSM im Bezug auf das gesamte Straßennetzwerk und Routinginformationen für Fußgänger 27% mehr Daten besitzt, als ein vergleichbarer, kommerzieller Datensatz (vgl. Neis et al., 2011, S. 17). In Bezug auf die Autonavigation fehlen noch 9% der Daten, sie prognostizieren aber das Verschwinden dieser Diskrepanz bis Ende 2012 (vgl. Neis et al., 2011, S. 17). Sie berichten weiterhin, dass die OSM-Community in Deutschland besonders aktiv ist und schlussfolgern aus ihren Untersuchungen, dass der deutsche OSM-Datensatz im Vergleich zu einem proprietären Datensatz bzgl. der Vollständigkeit als „komplett“ bezeichnet werden kann. Auch bzgl. der zeitlichen und geometrischen Genauigkeit ist OSM ihnen zufolge in Ländern, in denen OSM gut entwickelt ist, mit kommerziellen Datensätzen vergleichbar.

Es stellt sich die Frage, wie die hohe Genauigkeit und Vollständigkeit, die Neis et al. (2011) konstatierten, mit den Ergebnissen von Arsanjani et al. (2013) zusammenpassen, wonach drei Viertel der Nutzer mit geringem Vorwissen und geringer Aktivität kartieren. Für OSM ist das lokale Wissen der Beitragenden wertvoll (vgl. M. Goodchild, 2009, S. 95). Derjenige, der die Gebiete digitalisiert, in denen er sich täglich bewegt, kann diese detailliert wiedergeben. M. Goodchild (2009, S. 90) zufolge, könnte lokales Wissen die

Basis für eine gute Qualitätskontrolle sein. Je länger OSM existiert, desto größer und vollständiger kann der Datensatz werden. Die hohe Genauigkeit des OSM-Datensatzes resultiert auch aus der Tatsache, dass, durch die hohe Anzahl von Beitragenden, Fehler und Konflikte gewöhnlich schnell gelöst werden können (vgl. Mooney u. Corcoran, 2012, S. 300). Konflikte können aber auch entstehen, wenn unterschiedliche Interpretationen davon, wie die Umgebung zu digitalisieren ist, existieren. Mooney u. Corcoran (2012, S. 295) zeigen ein Beispiel einer Straße, deren Typ von verschiedenen Beitragenden innerhalb von 5 Wochen 81 mal geändert wurde. Schwächen offenbart der deutsche OSM-Datensatz bzgl. konkreter Attributierungen, etwa Vorgaben zur Richtungsänderung im Straßenverkehr, deren Gesamtzahl in OSM nur ca. 16% der Gesamtzahl eines kommerziellen Vergleichsdatensatzes betrug (vgl. Neis et al., 2011, S. 16). Es ist daher interessant zu erfahren, wie gut der OSM-Datensatz bezüglich Oberflächenattributierungen ist.

3.2.2. Oberflächeninformationen aus OpenStreetMap

Straßen- und Wegfeatures, die in OpenStreetMap enthalten sind, können zusammen mit oberflächenrelevanten Attributen erfasst sein (s. Kap. 2.2). OpenStreetMap, und im Speziellen die Oberflächeninformationen aus OpenStreetMap, spielen eine Rolle in der Forschung. Dieses Kapitel gibt einen Einblick darüber, welche Forschungsarbeiten Oberflächeninformationen aus OpenStreetMap thematisieren und für welche Zwecke sie dort eingesetzt werden. Das Thema der vorliegenden Arbeit ist im Kontext von Menschen mit Handicap angesiedelt. Daher fokussiert sich der nachfolgende Überblick auch darauf, wie Oberflächeninformationen aus OSM in der Forschung für diese Menschen genutzt werden. Aber auch die Erfassung der Daten wird thematisiert.

Bieber et al. (2011, S. 169) stellen grundsätzliche Überlegungen an, welche Ansprüche Fußgänger im Straßenverkehr haben und nennen darunter u.a. gefahrlos nutzbare Wege, sichere Überquerungsmöglichkeiten der Straßen und das Beziehen von objektbezogenen Informationen, wie z.B. Straßennamen oder Orientierungspunkte. Weiterhin gelten für die Nutzergruppe der mobilitätseingeschränkten Menschen erweiterte Ansprüche. Sie benötigen Informationen über Barrierefreiheit, Wegbeschaffenheit (Belag) und Steigung. Bieber et al. (2011) werten Knoten (nodes), Wege (ways) und Beziehungen (relations) aus dem OSM-Datenbestand aus und untersuchen, welche Relevanz bestimmte Eigenschaften für Fußgänger im Bezug auf Routing, Orientierung und Information haben. Sie stellen heraus, dass die Auswertung der Attribute und Relationen im Datenmodell für das Routing wichtig sind. Allerdings ließ der Stand der OSM-Daten zum Zeitpunkt der Forschungsarbeit noch kein fußgängerbezogenes Routing zu (vgl. Bieber et al., 2011, S. 173). Dornhofer et al. (2014, S. 1 ff.) stellen jedoch im Hinblick auf das Routing von blinden Personen fest, dass sich die Navigationsmöglichkeiten und die Positionierung deutlich verbessert haben, es aber auf Basis von OSM noch nicht möglich ist, blinde Personen sicher zu navigieren.

Oberflächeninformationen spielen eine große Rolle in der Navigation von Menschen mit Handicap. Neis u. Zielstra (2014) definieren Parameter, die für die Generierung eines

Routing-Netzwerks für Menschen mit Handicap nötig sind. Diese beinhalten z.B. den Typ der Straße, das Vorhandensein des „sidewalk“ (Bürgersteig)-Tags, sowie die Breite, Oberflächenbeschaffenheit, Nutzbarkeit und Neigung des Bürgersteigs. Weiterhin beinhalten die Parameter Rampen, Handläufe, Straßenüberquerungsangaben, Beleuchtung, mit Blindenstock ertastbare Oberflächen und Zugangsbeschränkungen. Sie generierten im Untersuchungsgebiet Berlin eine Netzwerklänge von 89 km. Dieses Netzwerk besteht aus Features, die Bürgersteige repräsentieren und zuvor aus dem originalen Datensatz abgeleitet wurden. 36 von 50 Untersuchungsgebieten, die in europäischen Hauptstädten liegen, beinhalteten weniger als 1% der erforderlichen Informationen über Bürgersteige, um einen repräsentativen Graph zu erzeugen. In Berlin betrug dieser Wert 61%. In ihren Untersuchungen stellen sie weiterhin fest, dass Bürgersteige, oft als eigene Wege kartiert werden, obwohl nach den OSM-Richtlinien eine Kartierung als zusätzliches Attribut einer Straße vorgesehen ist. Dies geschieht wohl, um den Bürgersteig auf der Karte besser sichtbar zu machen. Probleme gab es auch mit verschiedenen Namenskonventionen bezüglich geneigter Bordsteine, die für Rollstuhlfahrer interessant sind. Wird das Attribut an einer Stelle als „sloped_kerb“ bezeichnet, so kommt es auch als „kerb“ oder „curb“ vor. Außerdem ist die Kartierung nicht eindeutig. Eine Auflösung dieser Probleme würde ihrer Aussage nach die OSM-Qualität deutlich steigern (vgl. Neis u. Zielstra, 2014, S. 76).

Bauer et al. (2014) optimieren die Navigation von Fußgängern, indem sie auch die Oberfläche von Parks und anderer Zonen berücksichtigen, die von Fußgängern begehbar sind. Wie Neis u. Zielstra (2014) zeigen, existieren je nach Untersuchungsgebiet Unvollständigkeiten in den Daten. Diese können zu Unsicherheiten führen, wenn der Verkehrsteilnehmer mit Handicap spezielle Informationen für die Navigation benötigt. Neis (2014) schlägt analog zu diesem Gedanken einen Verlässlichkeitsfaktor vor, der aus den OSM-Oberflächendaten berechnet wird. Gil (2015, S. 10), lässt zusätzlich zum OSM-Straßennetzwerk auch Zugangsbeschränkungen einfließen, die angeben, ob ein Weg zugänglich ist.

Mobasher et al. (2015) untersuchten den OSM-Datensatz von Heidelberg und Berlin bzgl. der Vollständigkeit von Bürgersteigsinformationen. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Oberflächenangaben mit dem Tag „surface“ mit 23, bzw. 44,5% am häufigsten enthalten waren. Angaben zur Nutzbarkeit mit dem Tag „smoothness“ waren zu 8,4, bzw. 16% enthalten. Die Attribute „curb“ und „handrail“ kamen in ihrem Datensatz nicht vor. Sie bemerken, dass diese Untersuchungen auch in anderen Gebieten durchgeführt werden müssen, bevor weitere Aussagen zur Attributierung von Bürgersteigen getroffen werden können.

Digitale Datenbestände von Bürgersteigen können auch abseits von OSM erhoben werden. Bspw. durch Ableitung aus Gebäudeblöcken (vgl. Ballester et al., 2011) oder durch automatisierte Auswertung von GPS-Tracklogs (vgl. Kasemsuppakorn u. Karimi, 2013). Lauer et al. (2013) stellen einen Ansatz vor, wonach die Oberfläche einer Straße in die Kategorien Asphalt, Pflaster und Kopfsteinpflaster mit Hilfe von Smartphone-Sensoren

klassifiziert wird.

Während Neis u. Zielstra (2014) verschiedene OSM-Attribute auswerten, konzentrieren sich Džafić et al. (2014) auf den „surface“-Parameter. Džafić et al. (2014) stellen fest, dass Fahrbahnen, deren Oberfläche aus Kopfsteinpflaster besteht, nicht nur für Fahrer eines Elektrorollstuhls einen unbequemen Verkehrsträger darstellen. Sie verbessern daher das Rollstuhlnavigationssystem „eNav“, indem sie Informationen über den Straßenbelag, abgeleitet u.a. aus OSM-Daten, integrieren. Verschiedenen Straßenbelägen, die in OSM getaggt wurden, darunter Asphalt, Beton, Kopfsteinpflaster und unbefestigte Beläge, werden Reibungsfaktoren zugeordnet, um den Rollwiderstand eines Elektrorollstuhls zu bemessen. Um eine effiziente Route zu berechnen, wird außerdem die Steigung einbezogen. Im Testgebiet wurden 100.000 Routen generiert, für die jeweils die kürzeste und die effizienteste Route auf Basis der genannten Informationen berechnet wurden. Auch durch die Hinzunahme von OSM-Oberflächendaten kann in 41% der untersuchten Fälle eine effiziente Route berechnet werden, die im Vergleich zur kürzesten Route Energie spart.

Für mobilitätseingeschränkte Menschen gibt es zwei Barrieren, die die volle Teilnahme an der Gesellschaft verhindern: Informations- und Fortbewegungsbarrieren (vgl. Rice et al., 2013, S. 48). Stein u. Schlieder (2013) richten den Fokus auf temporäre Informations- und Fortbewegungsbarrieren. Darunter fallen bspw. Straßenblockaden und vereiste Fußwege. Mit OSM ist es zwar möglich, temporäre Objekte zu kartieren, aktuell existieren jedoch sehr wenige nodes und ways mit diesem Tag (vgl. OpenStreetMap, 2016j). Stein u. Schlieder (2013) präsentieren ein kollaboratives Mapping-System, das diese temporären Mobilitätsbarrieren überwacht. Das System soll zustandsbasiert sein und mit Verfallsdaten für Daten arbeiten. Außerdem beinhaltet es Mechanismen, die den Nutzer über solche Mobilitätsbarrieren informiert, die Validierung benötigen. Das System wird von Schlieder et al. (2013) um ein Vermittlungssystem erweitert und basiert nun auf OSM. Die Vermittlung soll Personen, die Mobilitätshilfe benötigen, z.B. Senioren, mit freiwilligen Betreuern zusammenbringen. Die Betreuer helfen Senioren bei der Bewältigung des Alltags. Aufgaben die erledigt werden können, beinhalten z.B., dass ein Freiwilliger einen Senior zum Theater oder Supermarkt zu Fuß begleitet oder ihn mit dem Auto transportiert. Freiwillige können aber auch bei der Bewältigung von Treppen helfen.

4. Methodik

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Hintergründe thematisiert. Außerdem ging Kap. 3 auf den Stand der Forschung ein. Dieses Kapitel beinhaltet zunächst Vorüberlegungen hinsichtlich der Verarbeitung der Laserscanning-Daten. Anschließend werden konkrete Bearbeitungsschritte hinsichtlich Laserscanning- und OSM-Daten erläutert.

4.1. Untersuchte Wegtypen

Der Titel dieser Arbeit weist Wanderwege als Untersuchungsobjekte aus. Bevor weitere Untersuchungen stattfinden, muss zunächst definiert werden, welche Wege und Straßen im OSM-Datensatz von Fußgängern genutzt werden. Daraus folgt die Definition der OSM-Features, die hinsichtlich ihrer Steigung und ihrer Oberflächenbeschaffenheit untersucht werden.

Fußgänger bewegen sich auf verschiedenen Arten von Wegen. Darunter fallen angelegte Fußwege (Ausweisung in OSM durch „highway=footway“), Mehrzweckwege für nicht-motorisierten Verkehr („highway=path“), Treppen („highway=steps“) und teilweise Radwege („highway=cycleway“). Durch weitere Beschilderung wird diese Restriktion mancherorts aufgeweicht, wodurch auch Radfahrer oder Mofafahrer den Weg benutzen dürfen. Zu den Wegen, auf denen Fußgänger sich bewegen, zählen Bürgersteige, aber auch Straßen. Ist kein Bürgersteig angelegt und herrscht wenig motorisierter Verkehr, benutzen Fußgänger Straßen. Als Beispiel für Straßen, die auch von Fußgängern genutzt werden, sind Spielstraßen („highway=living_street“) zu nennen. Hierzu zählen auch Straßen mit geringem Durchgangsverkehr und ohne Bürgersteig, wie etwa Anliegerstraßen („highway=residential“) oder Nebenstraßen in ländlichen Bereichen, die kleinere Siedlungen und Bauernhöfe verbinden („highway=unclassified“). Nebenstraßen in ländlichen Bereichen sind oft die einzigen Verbindungen für Menschen, speziell auch für Fußgänger. Für Wanderungen können landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Wege („highway=track“) genutzt werden, die öffentlich zugänglich sind. Fußgänger sind i.d.R. auch auf kleineren Zufahrtswegen zu Tankstellen, Campingplätzen oder Parkplätzen („highway=service“) erlaubt. Grundsätzlich kein Fußgängerverkehr ist etwa auf Schnellstraßen oder Autobahnen erlaubt, die aber im Untersuchungsgebiet nicht vorkommen. Hiermit sind bis auf Kreis- („highway=tertiary“) und Landes-/Bundesstraßen („highway=secondary“) alle vorkommenden Straßen- und Wegtypen im Datensatz abgedeckt.

In erster Linie sind Fußwege und Bürgersteige für Fußgänger im Straßenverkehr vor-

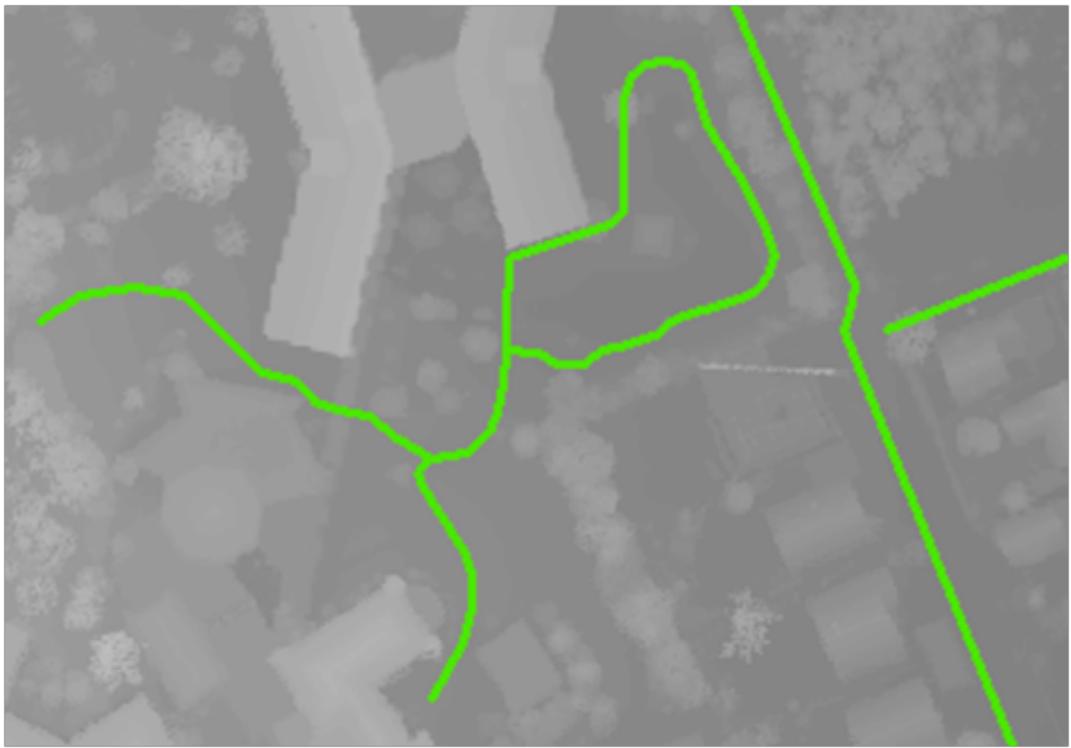


Abbildung 4.1.: Unzusammenhängende Fußwege (OSM-Tag: „highway=footway“) im Datensatz. Quelle: eigene Darstellung.

gesehen. Es macht aber Sinn, nicht nur Bürgersteige und bestimmte Wege für nicht-motorisierten Verkehr, sondern auch Straßen in die gesamte Untersuchung einzubeziehen. Hierfür gibt es mehrere Gründe. Obige Überlegungen zeigen zuallererst, dass Fußgänger sich auf fast allen Straßentypen potentiell aufhalten können. Eine ausschließliche Berücksichtigung von reinen Fußwegen macht darüber hinaus keinen Sinn, da sich an manchen Stellen ein unzusammenhängender Datensatz ergeben würde. Selbst wenn die Steigung und die Oberfläche für die in Abb. 4.1 gezeigten Wege eine Wanderung ermöglicht, beinhalten die Wege doch keine Verbindung zueinander.

Fußgänger bewegen sich neben einer Straße auf einem Bürgersteig fort, sofern dieser vorhanden ist. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass ein Bürgersteig dieselbe Steigung wie die danebenliegende Straße hat. Für die Steigungsberechnung spielt es daher keine Rolle, ob nur der Bürgersteig oder auch die Straße berücksichtigt wird. Eine genauere Steigung wird aller Voraussicht nach zu erzielen sein, wenn so viele Höhenpunkte, wie möglich in die Berechnung einbezogen werden. Straßen sind breiter als Bürgersteige, decken daher mehr Höhenpunkte ab. Sie sollten aus diesem Grund mit einbezogen werden.

Ein weiterer Grund liegt im Datenmodell von OSM. Bürgersteige werden in OSM entweder als Zusatzattribut einer Straße oder als eigenständiges Feature getaggt. Ist der



Abbildung 4.2.: Anliegerstraßen im OSM-Datensatz (blau, Tag: „highway=residential“). Keine der Straßen hat Angaben über vorhandene Bürgersteige. Weder als Tag (Tag: „sidewalk“), noch als separat kartiertem Weg. Eingetragene Fußwege (Tag: „highway=footway“) in grün. Quelle: eigene Darstellung.

Bürgersteig nicht als separate Linie verfügbar, kann auch keine separate Steigung für den Bürgersteig bestimmt werden. In diesen Fällen ist eine Steigungsbestimmung also nur möglich, wenn die Steigung der Straße berechnet wird.

Weiterhin sind nicht überall Bürgersteige verfügbar oder es fehlen Angaben im OSM-Datensatz. Abb. 4.2 zeigt ein Wohngebiet in Bad Rothenfelde, deren Anliegerstraßen keine Informationen zu Bürgersteigen besitzen. Hier ist nicht klar, ob bisher entweder kein User diese Bürgersteige kartiert hat oder ob es tatsächlich keine gibt. Natürlich sind Wanderungen in diesem Wohngebiet möglich, da Fußgänger sich hier bewegen müssen. Würde eine Steigung nur dort berechnet werden, wo ein Bürgersteig kartiert ist, fände dieses Gebiet keine Berücksichtigung.

Es gibt Straßen und Wege, die bei geringer Nutzungsdichte und ohne Bürgersteige sowohl von Fußgängern, als auch von motorisierten Fahrzeugen verwendet werden können. Es

ist sehr wahrscheinlich, dass Kreis- und Landesstraßen als Durchgangsstraße innerorts Bürgersteige besitzen, da sie dort auch der Erschließung dienen und ortsübliche Tempolimits vorherrschen. Außerorts dienen diese Straßen als Verbindungswege zwischen Orten. Entsprechend sind hier höhere Tempolimits, bis zu 100 km/h, anzutreffen. Von einem generellen Vorhandensein von Fußgängerwegen kann nicht ausgegangen werden. Ideal wäre daher eine Trennung von innerörtlichen und außerörtlichen Straßen. Diese Unterscheidung ist mit den vorliegenden Daten jedoch leider nicht möglich. Außerdem sind die OSM-Daten im Untersuchungsgebiet in Bezug auf Bürgersteigsinformationen bei Kreis- und Landesstraßen nicht sehr ergiebig. In den meisten Fällen gibt es keine Angaben darüber, ob Bürgersteige existieren, oder nicht. Das bedeutet, über eine Analyse dieser Daten können keine ungeeigneten Features herausgefiltert werden. Andersherum würde ein Weglassen dieser Features auch dazu führen, dass viele, für Wanderer potentielle Bürgersteige, herausfallen. Um alle Wandermöglichkeiten zu berücksichtigen, werden daher auch alle Features in die Untersuchung einbezogen. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass eine Einbeziehung mehrerer Straßentypen auch aussagekräftigere Ergebnisse bzgl. der OSM-Untersuchung bringt. Den Forschungsfragen, die auf die Auswertung von relevanten Oberflächeninformationen abzielen und die Vollständigkeit des Datensatzes untersuchen, kann zielführender nachgegangen werden, wenn ein größerer und vielfältigerer Datensatz vorliegt. Je mehr Straßentypen und je mehr Features vorliegen, desto größer wird auch die Relevanz für vergleichbare Untersuchungsgebiete.

4.2. Vorüberlegungen zur Verarbeitung der Laserscanning-Daten

Wie in Kap. 2.3 beschrieben, liegt eine dreidimensionale Punktwolke vor. Um aus ihr Steigungen berechnen zu können, muss die Punktwolke zunächst weiterverarbeitet werden. Steigungen können aus Oberflächen abgeleitet werden. Zwei bekannte Verfahren, die zur Oberflächenberechnung dienen, werden in Kap. 4.2.1 kurz vorgestellt. Ein Ziel der Arbeit ist die Berechnung kleinräumiger Steigungen für Wege. Um dieses Ziel zu erreichen, muss geklärt werden, was kleinräumige Steigungen bedeuten und wie groß die Fläche ist, für die eine Steigung berechnet wird. Kap. 4.2.2 widmet sich diesen Fragen. In diesem Kapitel werden auch die Maße der Flächen definiert, für die die kleinräumigen Steigungen berechnet werden. Anschließend werden in Kap. 4.2.3 Überlegungen ange stellt, wie die berechneten Steigungen sinnvoll in Gruppen eingeteilt werden können. Eine solche Gruppierung ist für Wanderer mit Handicap hilfreich, um etwa Wege zu finden, die passende Steigungen besitzen und von ihnen bewältigt werden können. Kap. 4.2.4 widmet sich speziell den Treppen im Datensatz, da Treppen ein Mobilitätshindernis für Wanderer mit Handicap darstellen. Alle vorkommenden Treppen im Datensatz werden aufgelistet. Sie besitzen unterschiedlich starke Steigungen und werden in die aufgestellten Steigungskategorien eingeordnet. Kap. 4.2.5 beschäftigt sich analog zu Kap. 4.2.4 mit der Steigung von Brücken im Datensatz.

4.2.1. Festlegung des Oberflächentyps

Um Steigungen berechnen zu können, ist es wichtig, zunächst eine Oberfläche aus der Punktfolge zu generieren. Es werden nun zwei Verfahren zur Oberflächenerzeugung vorgestellt. Ein bekanntes Verfahren ist die Berechnung eines triangulierten irregulären Netzwerks (TIN). Bei der Anwendung dieses Verfahrens werden die Höhenpunkte des Datensatzes zu Dreiecken verbunden. Es entsteht eine zusammenhängende, bruchkantenfreie Oberfläche, die alle Punkte der Punktfolge einbezieht. Die Generierung der Dreiecke erfolgt gemäß der Delaunay-Triangulation. Ein Dreieck ist ein Dreieck gemäß der Delaunay-Bedingung, wenn ein Kreis, der durch die drei Eckpunkte des Dreiecks verläuft, keine weiteren Punkte beinhaltet (vgl. Shewchuk, 2002, S. 23). Somit wird u.a. sichergestellt, dass keine Überschneidungen der einzelnen Dreiecke der TIN-Oberfläche existieren. Bevor die Triangulation ausgeführt wird, ist es möglich, eine Vorauswahl der Punkte zu treffen, um so die Oberfläche zu generalisieren. Fowler u. Little (1979) identifizieren Spitzen, Senken, Kämme und Kanäle im Datensatz und triangulieren dann die Punkte, die die Oberfläche am besten repräsentieren. Sie erreichen so eine Approximation des Geländes, dargestellt durch eine TIN-Oberfläche. Generalisierungen oder Approximationen der Punktfolge oder des TINs finden in dieser Arbeit jedoch nicht statt, da für eine detaillierte, kleinräumige Steigungsanalyse keine Punkte gelöscht werden sollen, die am Boden gemessen wurden. Ein weiteres Merkmal der TIN-Oberfläche ist, dass sie dynamisch ist. Das bedeutet, die Triangulation generiert dort Dreiecke, wo Punkte vorhanden sind. Das Resultat sind großflächige Dreiecke dort, wo die Punktdichte gering ist. Andererseits werden kleinere Dreiecke bei einer größeren Punktdichte gebildet. Die Neigung der Oberfläche ergibt sich insgesamt aus den kombinierten lokalen Steigungen der Dreiecke.

Ein anderes, weitverbreitetes Verfahren zur Erzeugung von Oberflächen, ist die Rasterbildung. Rasterstrukturen sind regulär oder irregulär. Reguläre Raster zeichnen sich durch eine gitterartige Anordnung von Rasterzellen aus, wobei jede Zelle dieselbe Größe hat. Die Anordnung der Zellen erfolgt in Zeilen und Spalten. Jede dieser Zellen beinhaltet Daten, wie z.B. die Geländehöhe. Reguläre Raster werden u.a. verwendet, um großflächige Höhen, wie sie bei der Erzeugung von digitalen Gelände- oder Oberflächenmodellen entstehen, zu speichern. Auch in der Fernerkundung werden Raster benötigt, um großflächige spektrale Informationen zu verarbeiten. Um eine Rasterstruktur zu nutzen, muss die Punktfolge in sie überführt werden. Wenn mehr als ein Punkt in eine Zelle fällt, muss eine Berechnung stattfinden, da jede Rasterzelle nur einen, in diesem Fall Höhenwert, beinhalten kann. Sinnvolle Vorgehensweisen sind hier bspw. die Durchschnitts-, Maximum- oder Minimumsbildung des Attributwerts aller Punkte oder die Bestimmung des am häufigsten auftretenden Attributwerts aller Punkte. Liegt mehr als ein Punkt in der zu bildenden Rasterzelle, geht hiermit ein Informationsverlust einher. Eine Rasteroberfläche ist nicht bruchkantenfrei, wenn benachbarte Zellen unterschiedliche Werte haben. Die lokale Steigung der Oberfläche kann in einer Zelle abgespeichert werden. Sie ergibt sich aus der Betrachtung der Höhendifferenzen zu den Nachbarzellen.

Wege sind flexible Strukturen, die kleinräumig verlaufen. Dabei können sie auf wenig Raum teilweise viele Richtungsänderungen besitzen, oder aber über lange Strecken geradeaus verlaufen. Steigungen können kleinräumig auftreten. Dazu sind Wege unterschiedlich breit und decken unterschiedlich große Flächen ab. Es ist wichtig, nur die Breite der Wege zu beachten und nur Höhenpunkte zur Steigungsberechnung heranzuziehen, die auf dem Weg liegen. Dabei treten unregelmäßige Punktdichten auf.

Nach Abwägung aller Faktoren erscheint die TIN-Struktur als am besten geeignet, um den Anforderungen der Arbeit zu entsprechen. Ein großer Vorteil der TIN-Struktur ist dessen Flexibilität. Sie kann auf unterschiedliche Punktdichten sehr gut reagieren, indem die Dreiecke eine unterschiedliche Fläche einnehmen. Dies steht im Gegensatz zur Rasterstruktur, die bei einer geringen Punktdichte leere Zellen, also Datenlücken, erzeugen würde. Einerseits existieren kleinräumige Steigungen, bspw. bei Treppen, andererseits existieren aber auch langgezogene Strecken, wie z.B. Durchgangsstraßen, auf denen mitunter wenig Steigungsänderungen zu beobachten sind. Eine festgelegte Rasterzellengröße wäre vor diesem Hintergrund hinderlich, da sie nicht flexibel genug für unterschiedliche Steigungsszenarien ist. Außerdem sind Bruchkanten, die an den Übergängen von Rasterzellen auftreten, nicht erstrebenswert, da eine kontinuierliche Steigungsberechnung erwünscht ist. Liegen zwei Zellen im Übergangsbereich von Weg zu Treppe und beide Zellen weisen eine unterschiedliche Steigung auf, ist nicht klar, welche Zelle Höhenpunkte der Treppe und welche Höhenpunkte des Wegs beinhaltet. Oft tritt dann der Fall auf, dass Zellen gemischte Punkte aus beiden Typen beinhalten. Das kann im Zweifelsfall dazu führen, dass eine Zelle eine Durchschnittssteigung aller Punkte beinhaltet und eine problemlos begehbarer Steigung aufweist, in Wirklichkeit jedoch ab einem bestimmten Ort eine Treppensteigung von über 20° besitzt.

Unterschiedliche Punktdichten führen ggfs. zu leeren Rasterzellen, was Datenredundanz bedeutet. Weiterhin sind die Werte von Zellen, die abseits von Wegen liegen, irrelevant. Die rechteckige oder quadratische Struktur von Rastern bedingt jedoch das Vorhandensein dieser Zellen, auch wenn ihnen keine Werte zugewiesen werden, was ebenso zu Datenredundanz führt. Die TIN-Struktur kann im Gegensatz dazu den Wegverlauf problemlos abdecken und erzeugt Daten nur dort, wo auch relevante Punkte gemessen wurden (s. Abb. 4.3).

Ein großer Vorteil der TIN-Struktur ist, dass keine Veränderung der Daten vorgenommen wird. Falls mehrere Punkte in eine Rasterzelle fallen, müssen die Punktewerte entweder miteinander verrechnet, also verändert werden, oder ein Teil der Daten wird übernommen und der Rest wird gelöscht. Dies geschieht aus dem Grund, dass eine Rasterzelle nur einen Wert beinhalten kann. Sollen exakte, kleinräumige Steigungen berechnet werden, ist es aber unerlässlich, die Daten nicht zu generalisieren. Punkte, die die Erdoberfläche repräsentieren, dürfen nicht gelöscht werden. Auch darf ihre gemessene Höhe nicht verändert werden. Die TIN-Oberfläche verbindet lediglich die Punkte, indem sie Dreiecke kreiert, die die Oberfläche darstellen. Die Punkte werden nicht angetastet und die Dreiecke liegen auf der exakten Position des z-Werts der Punkte.

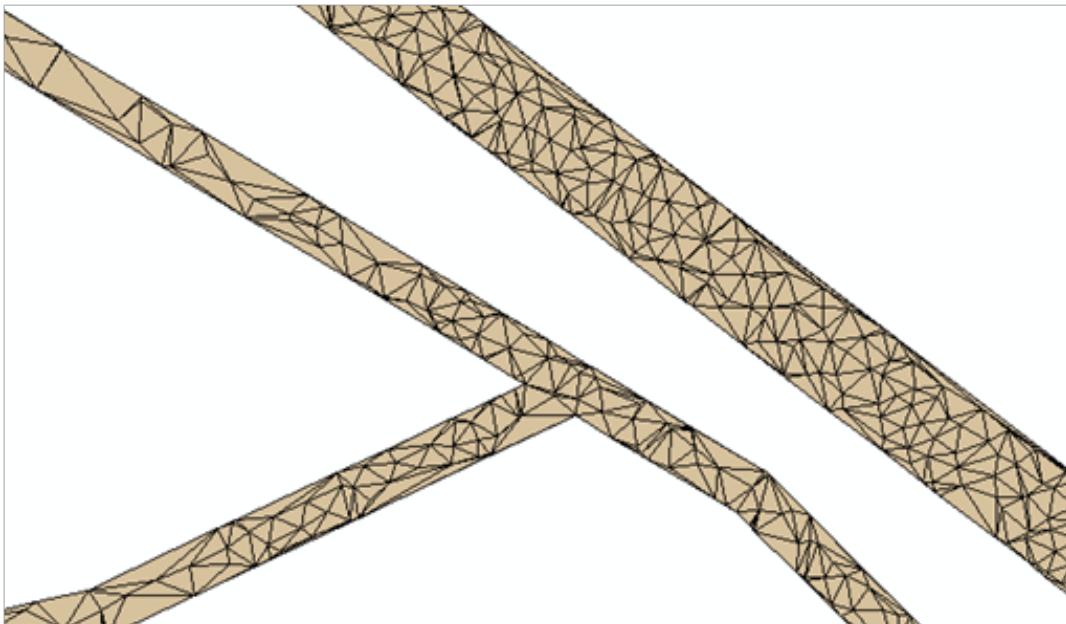


Abbildung 4.3.: Eine TIN-Struktur deckt den Weg ab und verbindet alle Punkte, die auf dem Weg liegen, zu Dreiecken. Für Punkte, die nicht auf dem Weg liegen, werden keine Daten erzeugt. Quelle: eigene Darstellung.

Durch die flexible Struktur des TINs werden darüber hinaus keine künstlichen Grenzen geschaffen, wie sie durch die Rasterzellen entstehen. In der Rasterstruktur kann eine Steigung als kleinste Einheit nur für eine Rasterzelle berechnet werden. Es ist hierbei unerheblich, wie breit ein Weg ist oder wie der Wegverlauf ist. Entscheidend ist lediglich die Zellengröße. Dies stellt ein Hindernis bei der Verfolgung von Richtungsänderungen dar. Außerdem geht sie i.A. zu wenig auf räumliche Gegebenheiten ein. Ein Extremfall, wie er zwar im Untersuchungsgebiet nicht auftritt, aber das Phänomen gut beleuchtet, ist eine Serpentine. Eine Rasterzelle kann dabei die geneigte Straße, die flache Serpentinenkehre und die sehr stark geneigte Natur zwischen den geneigten Straßen erfassen. Das Ergebnis ist eine heterogene lokale Punktwolke, für die, in einem quadratischen Bereich, der lokalen Gegebenheiten nicht folgt, keine sinnvolle Steigung berechnet werden kann. Eine lokale, kleinräumige Bildung von TINs auf den Rohdaten ermöglicht außerdem die flexible Klassenbildung. So könnten alle TINs, die die Serpentinenkehre darstellen, zusammengefasst werden. Das gleiche passiert mit den TINs, die die steigende Straße darstellen.

4.2.2. Steigungszellen

Um dem Ziel, der Berechnung kleinräumiger Steigungen, näher zu kommen, muss geklärt werden, wie klein die Bereiche sind, für die Steigungen gemessen werden und wie die Bereiche i.A. definiert werden. Steigungen werden für Wanderwege berechnet. Die digitalisierten Wanderwege sind Teil der Datenbasis aus OpenStreetMap und sind un-

terschiedlich breit. Es ist anzunehmen und es wird vorausgesetzt, dass die Steigung auf einem Weg quer zur Laufrichtung identisch ist. Daher kann quer zur Laufrichtung, also auf der gesamten Wegbreite, eine einzige, repräsentative Steigung berechnet werden. Die Wahl der Wegbreite entscheidet dabei, welche und wie viele Höhenpunkte zur Steigungs berechnung einbezogen werden. Daraus folgt die Art und die Anzahl der berechneten TINs. Die Wahl der Wegbreite beeinflusst die berechneten Ergebnisse also maßgeblich. Es ist daher wichtig, zu untersuchen, wie breit die im Datensatz vorkommenden Wegtypen mindestens sind. Kap. 4.2.2.2 beschäftigt sich hiermit. Analog zur Breite ist auch zu bestimmen, wie lang die Wegabschnitte sind, für die eine Steigung berechnet wird. Dieser Frage widmet sich Kap. 4.2.2.1.

4.2.2.1. Länge der Steigungszellen

Die kleinräumigste Fläche, für die eine Steigung berechnet wird, ist die sog. Steigungszelle. Sie wird um einen Weg herum generiert und ist dabei so breit, wie die Mindestbreite des Weges, basierend auf z.B. Gesetzen und Richtlinien (s. Kap. 4.2.2.2). Dieses Kapitel widmet sich der Frage, wie lang diese Zellen gewählt werden. Anders ausgedrückt: wie kleinräumig Steigungen für das Untersuchungsgebiet berechnet werden. Die Länge einer Steigungszelle wird maßgeblich von der Punktdichte beeinflusst. Es ist das Ziel, genug Punkte pro Zelle zu erhalten, um die Steigung einer Zelle auf Basis mehrerer TINs berechnen zu können.

Untersuchungen zur Breite von Wegen (s. Kap. 4.2.2.2) ergeben, dass die Wegbreite im Datensatz zwischen 0,5m und 6,00m schwankt und im Mittel aller Features 1,42m beträgt. Eine Zelllänge von 3,00m ergäbe eine Zellfläche von $0,5 * 3,00m = 1,5m^2$ bis $6,00m * 3,00m = 18m^2$. Bei einer Punktdichte von maximal 4,6 Pkt/m² (s. Kap. 2.3) ergäbe das eine Punktmenge pro Zelle von $1,5m^2 * 4,6 \text{ Pkt}/m^2 = 6,9$ Punkten bis $18m^2 * 4,6 \text{ Pkt}/m^2 = 82,8$ Punkten. Im Durchschnitt existieren $1,42m * 3,00m * 4,6 \text{ Pkt}/m^2 = 19,59$ Pkt pro Zelle. Im Durchschnitt könnten mit dieser Zelllänge also 3 TINs pro Zelle berechnet werden.

Das ist eine wichtige Feststellung, denn zum einen sind die LiDAR-Daten ungleichmäßig verteilt, zum anderen können sie trotz der Klassifizierung störende Pixel beinhalten. Der Klassifikationsalgorithmus ist auf die Unterscheidung von Vegetation und Nichtvegetation spezialisiert. Eine kleinräumige Unterscheidung von Straßen und Autos ist für den Algorithmus schwierig. Daher können vereinzelte Pixel im klassifizierten Datensatz enthalten sein, die sich lokal, im Bezug auf die Höhe, von den Nachbarpixeln abheben. Solche Vorkommnisse sind jedoch nicht zwangsläufig dem Algorithmus zuzuschreiben. Sie können auch natürlicher Teil der Umgebung sein. Absätze etwa, wie sie z.B. bei Bürgersteigen und Verkehrsinseln vorkommen, können zu starken, lokalen Steigungen führen. Eine starke Steigung ergibt sich, wenn zwischen zwei Punkten, wovon der eine kurz vor, der andere kurz hinter einem Bordstein aufgenommen wurde, eine Steigung berechnet wird. Bei einem Längenabstand von 10 cm und einem Höhenabstand von 20 cm entsteht eine Steigung von ca. 63° oder 200%. Es ist daher wichtig, möglichst viele

Bodenpunkte pro Zelle zur Verfügung zu haben, aus denen dann mehrere TINs pro Zelle berechnet werden können. Denn wenn die Steigung einer Zelle aus allen TINs in der Zelle berechnet wird, reduzieren mehrere TINs pro Zelle die negative Auswirkung von Ausreißern.

Des Weiteren verteilen sich die gemessenen Bodenpunkte nicht gleichmäßig im Verlauf von Wegen und Straßen. Dies liegt zum einen an überhängender Vegetation, wodurch an diesen Stellen wenig bis keine Bodenpunkte gemessen werden können. Zum anderen an dem Messverfahren selbst - Lichtstrahlen können abgelenkt oder absorbiert werden. Dies hat zur Folge, dass je kleiner die Zelllänge ist, desto längere Nachbarschaftsketten von Zellen existieren, für die keine Punkte gemessen wurden.

Es zeigt sich also, dass eine Abwägungsentscheidung getroffen werden muss. Auf der einen Seite ist ein Ziel der Arbeit, eine möglichst kleinräumige Bestimmung der Steigung zu erreichen. Auf der anderen Seite müssen die Zellen großflächig sein, um eine hohe Punktdichte in den Zellen zu erzielen, um Ausreißer zu minimieren und um die Aussagekraft des Ergebnisses zu verbessern.

Im Verlauf der Bearbeitung ist mit unterschiedlichen Zelllängen experimentiert worden. Eine einzige, richtige Lösung wird es nicht geben. Eine Zelllänge von 3,00m erlaubt es für die kleinste Wegbreite von 0,50m, bei einer durchschnittlichen Punktdichte von 4,6 Pkt/m², zwei TINs zu berechnen. Um den Einfluss von Ausreißern durch mindestens ein weiteres TIN zu begrenzen, ist mindestens diese Zelllänge erforderlich. In Kap. 4.2.4 wird festgestellt, dass Treppen im Datensatz mind. 7,3m lang sind. Es ist wichtig, dass mindestens eine Zelle im Datensatz diese Treppe vollständig abdeckt. Diese Zelle darf nicht andere, kreuzende Wege abdecken. Hierdurch wird die Steigung der Treppe in dieser Zelle ohne andere, verfälschende Höhenpunkte gemessen. Erreicht wird dies, wenn die Zelllänge höchstens die Hälfte der Länge der kleinsten Treppe beträgt, was für die Zelllänge von 3,00m erfüllt ist. Alles in allem erfolgt die Festlegung der Zelllänge auf 3,00m.

4.2.2.2. Breite der Steigungszellen

In Kap. 4.2.2.1 wurden die Längen der Wegabschnitte definiert, für die eine Steigung berechnet wird. Analog dazu muss festgelegt werden, wie breit die Steigungszellen sind. Es könnte angenommen werden, dass bei breiten Wegen und Straßen ein kleiner, bspw. 1 Meter breiter, Streifen in Laufrichtung ausreicht, um die Steigung für den gesamten Weg zu bestimmen. Für eine detailliert erfasste Oberfläche kann dieser, vergleichsweise dünne, Streifen ausreichen. Ist die Punktdichte für einen Abschnitt jedoch sehr gering, kann dann aus den lokalen Punkten keine Steigung ermittelt werden. Dann müsste die Steigung dieses Streckenabschnitts ggfs. aus den benachbarten Punkten interpoliert werden. Auftreten kann dieser Fall z.B. für Autos oder Bäume, die eine Straße verdecken. Werden mehr Bodenpunkte auf dem Weg oder der Straße einbezogen, können Datenlücken zwar nicht bereinigt werden. Dennoch ergibt sich ein exakteres Ergebnis, da mehr

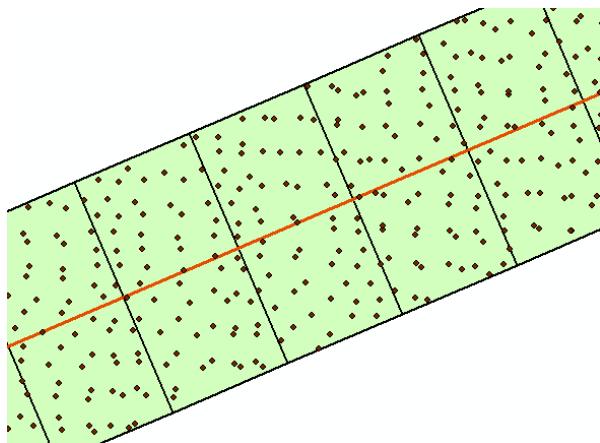


Abbildung 4.4.: Ausschnitt der generierten Steigungszellen. Die Höhenpunkte stammen aus dem LiDAR-Datensatz. Der Weg (in rot) ist Teil des OSM-Datensatzes. Die Steigungszelle wurde um den Weg herum gebildet. Die Länge der Zellen in Laufrichtung, also hier z.B. von links unten nach rechts oben, beträgt 3 Meter. Quelle: eigene Darstellung

TINs gebildet werden können. Insbesondere für schmale Wege wie Fuß- und Radwege resultiert eine zu klein gewählte Breite darin, dass, selbst ohne Verdeckungen und Hindernisse, aufgrund der Punktdichte, nur eine geringe Abdeckung durch TINs erreicht werden kann.

Abb. 4.5 zeigt einen 1 Meter breiten Puffer um ein in schwarz dargestelltes OSM Linienfeature. Der untere Rand des Puffers ist in diesem Ausschnitt ca. 3 Meter lang, oben ca. 2 Meter lang und es befinden sich 17 Punkte innerhalb dieses Ausschnitts des Puffers. Im roten Bereich kann innerhalb des Puffers kein TIN generiert werden. Die andersfarbigen Dreiecke zeigen erfolgreich generierte TINs innerhalb des Puffers. Es ist deutlich zu sehen, wie eine unregelmäßige Punktdichte die Generierung von TINs beeinflussen kann. An den Rändern des Puffers sind große rote Bereiche zu sehen. Mit der Vergrößerung des Puffers um wenige Zentimeter hätten diese Bereiche mit mehreren TINs weitestgehend gefüllt werden können, da in diesem Fall zahlreiche Punkte statt außerhalb nun innerhalb des Puffers positioniert wären. Aufgrund der unregelmäßigen Punktdichte entstehen durch eine Vergrößerung des Puffers wiederum neue Gebiete innerhalb des Puffers, in denen kein TIN errechnet werden kann. Insgesamt vergrößert sich durch diesen Vorgang aber die TIN-Fläche. Bei einer ungünstigen Verteilung, wie im linken Teil des Bildes zu sehen, kann es passieren, dass auf der gesamten Breite des Weges nur ein Punkt innerhalb des Puffers liegt. An dieser Stelle des Weges ergibt sich dessen Steigung folglich nur durch einen Punkt. Ist dieser Punkt bzgl. der Höhe ein Ausreißer und wurde in den vorigen Schritten nicht herausgefiltert, kann die Steigung des Weges an dieser Stelle stark ausfallen, obwohl dies nicht der Realität entspricht. Vorkommnisse dieser Art sollten daher minimiert werden, indem mehrere TINs in Richtung der Breite des Wegs generiert werden. Hierfür muss die Pufferbreite maximiert werden. Dennoch

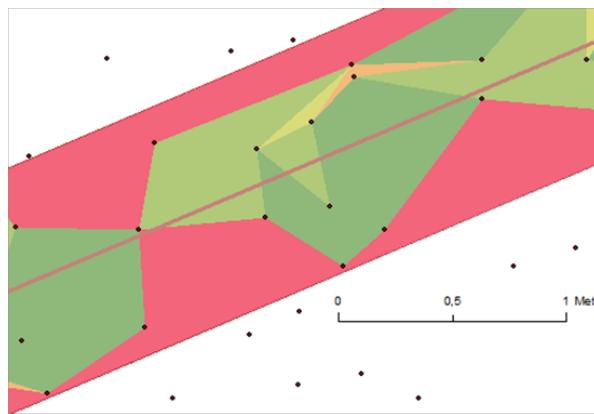


Abbildung 4.5.: Ein linienhaftes OSM-Feature in der Mitte, um das ein ein Meter breiter Puffer erzeugt wurde. Der Pufferbereich beinhaltet 17 Höhenpunkte. Alle Punkte innerhalb des Pufferbereichs wurden zu TIN verbunden. In den rot markierten Bereichen konnte aus Mangel an Höhenpunkten keine Steigung generiert werden. Knapp außerhalb des Pufferbereichs befinden sich weitere Punkte. Quelle: eigene Darstellung.

darf die untersuchte Weg- und Straßenbreite nicht über die in der Realität vorhandenen Breiten hinausgehen, um umliegende Oberflächen, wie z.B. Gräben, Wälle und Zäune nicht in die Untersuchung einfließen zu lassen. Diese Oberflächen würden das Ergebnis verfälschen. Es ist daher sinnvoll, die Weg- und Straßenbreite, soweit es geht, auszunutzen, trotzdem aber einen Toleranzbereich zu behalten, der unterschiedliche bauliche Ausführungen und lokale Begebenheiten berücksichtigt. Die festgelegten Breiten müssen sich diesbezüglich an den gesetzlichen Mindestbreiten und den in OSM zusätzlich vorhandenen Informationen orientieren.

Tab. 4.1 beinhaltet elf verschiedene Wegtypen. Jeder vorkommende Weg im Datensatz wird einem dieser Typen zugewiesen. Bei der Festlegung von Mindestbreiten wird typweise vorgegangen. Hierbei spielen u.a. Regelungen nach StVO und zugelassene Verkehrsteilnehmer eine Rolle.

- **cycleway:** Radverkehr kann auf verschiedenen Flächen stattfinden. Radverkehr ist möglich auf der Fahrbahn, im Seitenraum, auf einer oder beiden Straßenseiten oder auf getrennten oder gemeinsam mit anderen Verkehrsarten nutzbaren Flächen (vgl. Baier, 2007, S. 76). Bei der Festlegung von Mindestbreiten für Radverkehrsflächen müssen daher Regelungen für verschiedene Verkehrsflächen analysiert werden. Vorgaben zur Breite von angelegten Radwegen, nach Zeichen 237 der StVO, beinhaltet die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrs-Ordnung (VwV-StVO). Die Breite wird hier genauer als „lichte Breite“ bezeichnet, die den befestigten Verkehrsraum mit Sicherheitsraum spezifiziert. §2 Zu Absatz 4 Satz 2 II. 2. aa) VwV-StVO besagt, dass die lichte Breite für baulich angelegte Radwege, nach Zeichen 237 der StVO, mindestens 1,50m betragen soll. Möglichst

Tabelle 4.1.: Übersicht über die Wegtypen im Datensatz, zusammen mit ihrer Bedeutung. In OSM werden Wege mit dem Tag „highway“, gefolgt vom Wegtyp, beschrieben. Alle Tags und Beschreibungen sind dem OSM-Wiki entnommen. Quelle: eigene Darstellung, OpenStreetMap, 2016q. Letztgenannte Quelle schließt die Verweise für die einzelnen Wegtypen ein. Quelle: eigene Darstellung, OpenStreetMap, 2016q. Die Beschreibungen der Wegtypen gehen zusammengenommen auf letztgenannte Quelle zurück.

Wegtyp	Bedeutung
cycleway	Fahrradweg
footway	Fußweg
living_street	Verkehrsberuhigter Bereich, „Spielstraße“
path	Mehrzweck-Pfad für nicht motorisierten Verkehr
residential	Anliegerstraße
secondary	Landes- oder Kreisstraße, die kleinere Städte oder größere Ortschaften verbindet
service	Zufahrtsweg zu Gebäuden, Parkplätzen, Campingplätzen, Gewerbegebieten u.a.
steps	Treppe
tertiary	untergeordnete Straße, die Dörfer oder Gemeinden verbindet
track	Wirtschafts-, Feld- oder Waldweg
unclassified	Nebenstraße mit geringerem Verbindungscharakter als highway=tertiary

sind 2,00m zu erreichen. Auch zur Breite von Radfahrstreifen macht die VwV-StVO Vorgaben. Radfahrsteifen sollen, einschließlich Breite des Zeichens 295 der StVO, mindestens 1,50m und möglichst 1,85m breit sein. Andere vorgegebene Wegbreiten gelten für gemeinsame Fuß- und Radwege nach Zeichen 240 StVO. §2 Zu Absatz 4 Satz 2 II. 2. bb) schreibt vor, dass innerorts mindestens 2,50m und außerorts mindestens 2,00m zu erreichen sind. Der vorliegende OSM-Datensatz beinhaltet keine gesonderen Angaben über die Stadtgrenzen der Stadt Bad Rothenfelde. Daher ist es nicht möglich, Wege in die Gruppen „innerorts“ und „außerorts“ einzurichten. Um in jedem Fall nur die Höhenpunkte zu berücksichtigen, die tatsächlich auf dem Radweg liegen, wird eine Mindestbreite von gemeinsam nutzbaren Fuß- und Radwegen von 2,00m angenommen. Für getrennte Fuß- und Radwege nach Zeichen 241 StVO ist für den Radweg, §2 Zu Absatz 4 Satz 2 II. 2. cc) zufolge, mindestens 1,50m vorgesehen. Die VwV-StVO schreibt also zusammenfassend vor, dass Radfahrer in jedem der beschriebenen Fälle mindestens eine lichte Breite von 1,50m benötigen. Die Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen schreiben hinsichtlich der Grundmaße für die Verkehrsräume und lichten Räume des Radverkehrs mindestens eine Breite von 1,00m, zuzüglich 2x 0,25m Sicherheitsraum, also ebenfalls zusammengenommen 1,50m, vor (vgl. Baier, 2007, S. 18). Für Radwege, die nicht nach StVO angelegt wurden, wird daher demzufolge eine Breite von 1,50m festgelegt.

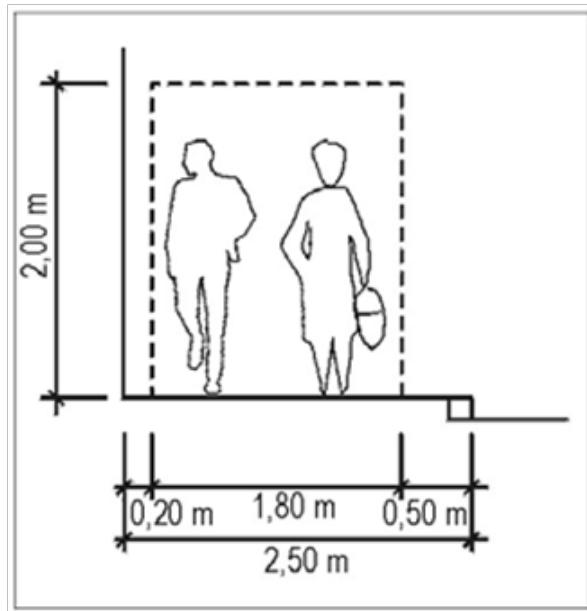


Abbildung 4.6.: Vorgaben zur Dimensionierung von strassenbegleitenden Gehwegen. Darin enthalten sind der Begegnungsraum zweier Fußgänger, sowie der Sicherheitsabstand zur Straße (rechts) und der Abstand zur Hauswand (links). Quelle: Baier, 2007, S. 75.

- **footway:** Die Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen thematisieren die Grundmaße für Verkehrsräume und lichte Maße des Fußgängerverkehrs (vgl. Baier, 2007, S. 19). Ohne Sicherheitsraum ergibt sich für zwei Fußgänger eine Regelbreite von 1,80m. Siehe dazu auch Abb. 4.6. Mit Sicherheitsabständen, darunter 0,50m zur Straße und 0,20m zu Häusern ergibt sich eine Regelbreite von 2,50m. Diese Breite wird für Bürgersteige festgelegt. Die DIN 18040 macht nähere Angaben zum Raumbedarf von Rollstuhlfahrern. Hier ist für den Begegnungsfall von Rollstuhlfahrern eine Breite von 1,80m vorgesehen (vgl. Architektenkammer Niedersachsen, 2016, S. 4). Für Fußwege, die abseits von Straßen verlaufen, also keine Bürgersteige sind, wird daher eine Breite von 1,80m angenommen. Die Vorgabe zur Breite von gemeinsamen Fuß- und Radwegen ist, wie oben beschrieben, 2,00 Meter. §2 Zu Absatz 4 Satz 2 II. 2. cc) VwV-StVO schreibt vor, wie breit der Radweg für getrennte Fuß- und Radwege nach Zeichen 241 StVO sein muss. Zu dem Teil, der für Fußgänger nutzbar ist, finden sich hier keine Angaben. Analog zu obigen Erkenntnissen wird für den Fußgängerteil von getrennten Fuß- und Radwegen nach Zeichen 241 StVO eine Breite von 1,80m festgelegt.
- **living_street:** Nach §32 Abs. 1 Nr. 1 StVZO darf die Breite aller Straßenfahrzeuge, mit Ausnahme von landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Maschinen, höchstens 2,55 Meter betragen. Hinzu kommen Sicherheitsabstände, wie in Abb. 4.7 dargestellt. In der Regel betragen die Bewegungsspielräume (B) „für das Begegnen, Nebeneinanderfahren und Vorbeifahren von Personen- und Last-

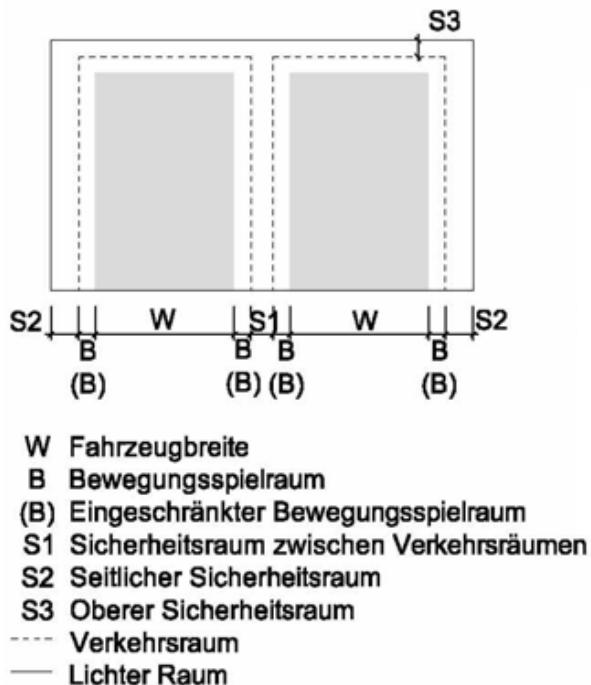


Abbildung 4.7.: Der Raumbedarf für Kraftfahrzeuge und den öffentlichen Verkehr. Quelle: Baier, 2007, S. 14.

kraftwagen 0,25 m“ (Baier, 2007, S. 14). Sie können in Ausnahmefällen geringer ausfallen. Sicherheitsräume (S1) zu anderen Verkehrsteilnehmern betragen mindestens 0,25m. Die seitlichen Sicherheitsräume sind in Abb. 4.7 mit S2 dargestellt. Sie „betragen neben fahrenden und haltenden Kraftfahrzeugen in der Regel 0,50 m“ (Baier, 2007, S. 14). Die zu findenden Mindestbreiten für die Steigungszellen sollten sich auf einspurige Straßen beziehen, um, unabhängig von der Anzahl der Spuren, in jedem Fall nur die Straßenoberfläche zu erfassen. Der einspurige Fall schließt Gegenverkehr aus. Aus diesem Grund benötigt es keinen Sicherheitsabstand S1. In jedem Fall muss die Mindestbreite die Fahrzeubreite $W=2,55\text{m}$ und den Bewegungsspielraum $B=2 \times 0,25\text{m}$ beinhalten. Die Sicherheitsabstände S2 werden, wie geschildert, neben fahrenden und haltenden Fahrzeugen, benötigt. Auf einspurigen Straßen ist kein fahrender Verkehr neben dem Fahrzeug zu erwarten. Haltende Fahrzeuge, z.B. auf einem separaten Fahrstreifen oder in Parkbuchten, werden als Ausnahme angesehen. Auch aus dem Grund, dass in einer Kleinstadt wie Bad Rothenfelde, Wohngebäude mit geringer Geschosszahl vermutet werden, die geringen Anliegerverkehr hervorbringen. Die Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen thematisieren verkehrsberuhigte Bereiche, oder auch „Spielstraßen“, nicht näher. Daher wird eine Mindestbreite von 3,05m für diese Wege festgelegt.

- **path:** Mehrzweckwege werden von verschiedenen Verkehrsteilnehmern genutzt. In den obigen Ausführungen wurden bereits die Anforderungen von Fußgängern, Radfahrern und Rollstuhlfahrern thematisiert. Die Mindestanforderung, die diese drei

Gruppen von Verkehrsteilnehmern stellen, ist die der Radfahrer, mit einer Breite von 1,50m. Wenn nicht klar ist, von wem der Weg hauptsächlich genutzt wird, wird daher eine Mindestbreite von 1,50m festgelegt. Handelt es sich um Wege nach StVO, werden entsprechend der VwV-StVO 2,00m für gemeinsame Fuß- und Radwege berechnet. Für getrennt genutzte Fuß- und Radwege nach StVO 3,30m. Dieser Wert ergibt sich aus 1,50m für Radfahrer und 1,80m für Fußgänger. Handelt es sich um einen Weg, der vorrangig von Fußgängern genutzt wird, wird ein Wert von 1,80m festgelegt. Für Wege, die von Fußgängern und Radfahrern genutzt werden, aber nicht nach StVO angelegt wurden, gilt ebenso wie für gemeinsam genutzte StVO-Wege 2,00m. Die von den Verkehrsteilnehmern benötigten Verkehrsräume wurden eindeutig in den Richtlinien festgelegt und bleiben gleich, egal, wie der Weg beschildert ist.

- **residential:** Für Anliegerstraßen gelten dieselben Ausführungen wie für „living_street“. Entsprechend gilt eine Mindestbreite von 3,05m.
- **secondary:** Die Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) beinhalten Vorgaben für die Breite von Landstraßen (vgl. Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Straßenentwurf, 2012). Der Regelquerschnitt „RQ 9“ ist für die niedrigsten Verkehrsstärken von max. 3.000 KFZ/24h vorgesehen (vgl. Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Straßenentwurf, 2012, S. 28). Er beschreibt eine Fahrbahn ohne Mittelstreifen. Die vorgeschriebene Breite ist im Vergleich zu anderen Regelquerschnitten hier am geringsten. Sie beträgt 5 Meter für die Fahrbahn und 2x 0,50m für die Randbereiche. Begegnungsverkehr ist hier erlaubt. Bei zwei Fahrspuren ergeben sich 2,50m Breite pro Auto. Landstraßen können mehrere Fahrspuren haben. Angaben zur Anzahl der Spur sind in OSM möglich. Die Mindestbreite für den Typ „secondary“ beträgt bei zwei Fahrspuren 6,00 Meter. Für jede weitere Spur kommen 2,50m hinzu.
- **service:** Mit diesem Tag werden Zufahrtswege, zu z.B. Tankstellen und Gewerbegebieten kartiert. Diese Wege sind für KFZ zugelassen. Analog zu „living_street“ und „residential“ gilt hier eine Mindestbreite von 3,05m.
- **steps:** Treppen werden von Fußgängern genutzt. Analog zu den Ausführungen unter „footway“ wird hier eine Breite von 1,80m veranschlagt.
- **tertiary:** Analog zu „secondary“ handelt es sich bei diesem Wegtyp um Landstraßen. Dementsprechend wird die Mindestbreite auf 6,00 Meter für zwei Fahrspuren gesetzt. Zuzüglich werden 2,50m für jede weitere Fahrspur berechnet.
- **track:** Wirtschaftliche und landwirtschaftliche Wege müssen speziell für entsprechende Maschinen- und Sonderfahrzeuge ausgerichtet sein. §32 Abs. 1 Nr. 2 StVZO schreibt vor, dass diese, mit max. 3,00m, breiter als KFZ sein dürfen. Für die Berechnung der Mindestbreite von Steigungszellen muss der Bewegungsspielraum aus Abb. 4.7 berücksichtigt werden. Dieser beträgt, wie erwähnt, 2x 0,25 Meter. Die Mindestbreite für „highway=track“ beträgt also 3,50 Meter.

- **unclassified:** Für diese Straßen gilt, ebenso wie für andere Straßen, eine Mindestbreite von 3,05 Meter. Hier müssen ggf. weitere Fahrspuren berücksichtigt werden, sofern dies in OSM angegeben ist.

In diesem Kapitel wurden Mindestbreiten festgelegt, die für verschiedene Verkehrsflächen gelten. Kap. 4.3.4.2 beschäftigt sich detaillierter mit den OSM-Tags. Hier wird auf die Fragen eingegangen, welche Tags gesetzt sein müssen, damit ein Weg als angelegter Weg zu bezeichnen ist, der StVO-Vorgaben erfüllt. Auch speziellere Fälle, wie die Datenhaltung von Radfahrstreifen und gemeinsam nutzbare Fußwege, werden hier thematisiert. Im Allgemeinen werden in Kap. 4.3.4.2 konkrete OSM-Tags genannt, die eine spezielle Verkehrsfläche ausweisen, für die dann die Mindestbreiten gelten. Sobald detaillierteres Wissen darüber vorliegt, wie die Wege in OSM verschiedenen Mindestbreiten zugeordnet werden können, können die Steigungszellen konkret berechnet werden. Der Geodatensatz aus OSM setzt sich in dieser Arbeit aus hunderten Features zusammen, die in allen Fällen von Attributen näher beschrieben werden. Es bietet sich an, diese in einer Geodatenbank vorzuhalten, um Verarbeitungen und Analysen effizient zu gestalten. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Geodatenbanken von Geoinformationssystemen (GIS) verarbeitet werden können. Die Daten werden innerhalb der Geodatenbank in Tabellen gespeichert. Zeilen beinhalten die Features, Spalten die beschreibenden Tags. Die Berechnung einer Wegbreite eines konkreten Features ergibt sich daher aus einer Kombination verschiedener Datenbankspalten und muss für jede Zeile berechnet werden. Die relevanten Datenbankspalten sind allerdings nicht für jedes Feature identisch. Für eine effiziente und fehlerfreie Berechnung wurde daher ein Programm in der Programmiersprache „Python“ geschrieben. Es berechnet für jedes Feature, basierend auf obigen Ausführungen, aus den OSM-Daten, deren Wegbreite. Da jedes GIS eigene Programmschnittstellen besitzt, ist das Programm nur im eingesetzten Geoinformationssystem „ArcGIS“ funktionsfähig. Der Programmtext befindet sich im Anhang.

4.2.3. Klassifizierung von Steigungen

Die max. Punktdichte im Datensatz liegt bei ca. 4,6 Pkt/m² (s. Kap. 2.3). Aus der Punktwolke werden TIN generiert. Jedes TIN beinhaltet eine Steigung für dessen lokalen Raum. Benachbarte TINs können, trotz ihrer räumlichen Nähe, dennoch starke Unterschiede in ihrer Steigung besitzen. Etwa, wenn Schlaglöcher, Bürgersteige oder andere Objekte abgebildet werden, die vom Klassifikationsalgorithmus nicht herausgefiltert wurden. Repräsentativer, und für den Wanderer interessanter, ist jedoch die durchschnittliche Steigung in einem festgelegten Raum, wie es durch die Steigungszellen repräsentiert wird.

Die Steigungszellen erhalten Steigungswerte, die, basierend auf den überlappenden Dreiecken der TIN-Oberfläche, berechnet werden. Nach der Berechnung der Steigungen aller beteiligten TIN können krumme Steigungswerte resultieren. Diese Steigungswerte müssen interpretiert werden, um den Aussagegehalt zu erhöhen. Denn dem Wanderer ist womöglich nicht immer bekannt, welche Steigung ein barrierefreier Weg maximal haben

darf oder wie steil ein konkreter Weg in der Relation ist. Um den Informationsgehalt zu erhöhen und um Übersichtlichkeit zu erreichen, geht es nun also darum, die Steigungswerte der Zellen zu gruppieren. Es gibt gesetzliche Vorschriften und Richtlinien, die besagen, welche Steigungen für Wege, Rampen und Treppen zulässig sind. Nach Auswertung dieser Quellen, werden Steigungskategorien aufgestellt. Jede Steigungszelle wird, basierend auf ihrer ermittelten Steigung, in eine dieser Kategorien eingeordnet.

Die Richtlinie zur Anlage von Stadtstraßen nennt Elemente, die die Benutzung von straßenbegleitenden Gehflächen für Behinderte erleichtern sollen (vgl. Baier, 2007, S. 75). Gehwegbereiche sollen hindernisfrei, visuell abgegrenzt sein und wenige Richtungsänderungen besitzen. Außerdem sind geringe Neigungen von 0,5% (entspricht 0.29°) bis maximal 3,0% (= $1,73^\circ$) vorgesehen. Diese Werte beziehen sich auf die gesamte Schrägneigung, z.B. an Grundstücksausfahrten mit Gehwegabsenkung. Es wird an dieser Stelle festgehalten, dass die erste Gruppe Steigungen von 0 bis $1,73^\circ$ umfasst.

Die DIN Normen 18040-1 und 18040-2 sind im Bundesland Niedersachsen, in dem das Untersuchungsgebiet liegt, Teil der technischen Baubestimmungen (vgl. Architektenkammer Niedersachsen, 2016, S. 1). Sie sind damit nicht nur Stand der Technik, sondern geltendes Bauordnungsrecht (vgl. Architektenkammer Niedersachsen, 2016, S. 1). In der Norm 18040-2 sind Vorgaben bzgl. Oberfläche und Steigung von Gehwegen enthalten. Sie besagt, dass Gehwege eine feste und ebene Oberfläche aufweisen und breit genug für den Begegnungsfall von Personen mit Rollstuhl und oder mit Gehhilfe sein müssen. In Ausnahmefällen darf die Steigung laut dieser Norm maximal 6% betragen, sofern in Abständen von höchstens 10m Zwischenpodeste mit maximal 3% Gefälle angeordnet werden (vgl. Architektenkammer Niedersachsen, 2016, S. 11, s. Abb. 4.8). Um die höchst zulässige Durchschnittssteigung zu berechnen, muss die Länge des Zwischenpodests bekannt sein. An anderer Stelle, im Kontext von Rampen, wird die Mindestlänge von Zwischenpodesten mit 150cm angegeben. Zusammen ergibt sich die maximal zulässige Steigung aus der Kombination von 6% Steigung auf 10m und 3% Steigung auf 1,50m. Sie beträgt 5,65% oder $3,24^\circ$. Für barrierefreie Rampen gilt eine maximale Steigung von 6% (vgl. Baier, 2007, S. 88). Da dieser Wert nur geringfügig über der berechneten max. Steigung für Gehwege liegt und Rampen weit weniger häufig vorkommen, als Gehwege, ist eine separate Kategorisierung nicht sinnvoll. Die zweite Steigungskategorie beginnt daher bei $1,74^\circ$ und endet bei $3,24^\circ$, der maximalen Steigung für barrierefreie Wege. Wie in Kap. 4.1 geschrieben, werden in dieser Arbeit auch Straßen untersucht. Für Straßen sind höhere Steigungen zulässig, als Gehwege. Dennoch liegen sie unterhalb derer der Treppen. Die „Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen“ legen unter anderem die Grenzwerte für die Längsneigung von Straßen fest. In der Richtlinie finden sich Angaben für Fahrbahnen von angebauten Stadtstraßen (vgl. Baier, 2007, S. 69) und anbaufreien Hauptverkehrsstraßen (vgl. Baier, 2007, S. 70). In beiden Fällen beträgt der Wert 8%. In Ausnahmefällen sind bis zu 12% Steigung zulässig. In Grad entspricht das $4,57^\circ$ bis $6,84^\circ$. Die dritte Kategorie deckt damit Steigungswerte von $3,25^\circ$ bis $6,84^\circ$ ab.

Nicht ganz eindeutig zu klären ist der Steigungsbereich für nicht barrierefreie Wege

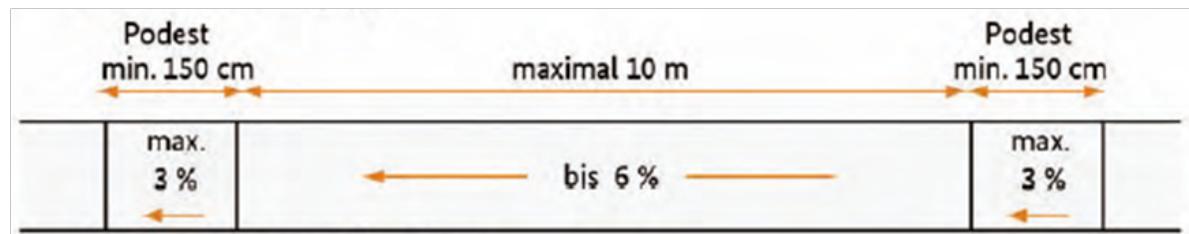


Abbildung 4.8.: Zulässige Längsneigung für Gehwege. Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016b, S. 93, verändert.

und Straßen im Ausnahmefall, also Straßen, deren Steigung nicht von der Gesetzgebung abgedeckt ist. Diese können dort gebaut worden sein, wo es die topographischen Bedingungen nicht anders zulassen. Nicht barrierefreie Wege können außerdem dort angelegt worden sein, wo kein zusätzlicher Aufwand betrieben wurde, um Barrierefreiheit zu erreichen. Es gibt keine einheitliche Regel bzw. Vorschrift, die eine Einordnung der Steigungen zulassen. In Rheinland-Pfalz bspw. gilt zwar die Maßgabe, eine Steigung von 6% bei Gehwegen nicht zu überschreiten. Sollte dies aber der Fall sein, ist vorgeschrieben, dass die Oberfläche für diese Steigung ausgelegt sein muss und daher besonders griffig ist (vgl. Ministerium der Justiz und für Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 2016). An anderer Stelle wird empfohlen, bei bewegter Topographie regelmäßig ebene Erholungsflächen zu schaffen (vgl. Sozialverband VdK Deutschland e. V., 2016, S. 36). Sofern diese Werte nicht einzuhalten sind, sollten Umgehungen beschildert werden (vgl. Sozialverband VdK Deutschland e. V., 2016, S. 36). Der Steigungsbereich von 0 bis 3,24 Grad deckt die barrierefreien Wege ab, der Steigungsbereich ab 20 Grad die der Treppen (s.u.). Es ist nicht klar, ob es im Datensatz auch nicht barrierefreie Wege gibt, die steiler als 20 Grad sind. Der Einfachheit halber werden aber nicht barrierefreie Wege im Bereich zwischen 3,25 und 19,9 Grad eingeordnet. Zwischen 6,85 und 19,9 Grad liegen außerdem Straßen, die, bspw. in Hanglagen, steiler als die zitierten Steigungsvorgaben der Regularien sind.

Die nächste Steigungskategorie deckt Treppen im Datensatz ab. Sie sind erwartungsgemäß steiler als die Werte der bisher aufgestellten Kategorien. Der Spitzenverband deutscher gesetzlicher Unfallversicherungen (DGUV) ordnet Rampen, Treppen, Treppen- und Steigleitern, basierend ihrer Steigung ein. Diese Angaben gelten auch für Innenräume. Treppen decken den Steigungsbereich von 20° bis 45° ab (vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2010, S. 6). Analog zu Gehwegen muss auch die Oberfläche von Treppen rutschhemmend sein und es muss Schutz vor witterungsbedingter Glätte gegeben sein (vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2010, S. 13). Die Steigung von Treppen ergibt sich in Deutschland aus der Schrittmaßformel. Sie beinhaltet u.a. Zentimeterangaben über die Länge des Auftritts einer Stufe und die Höhe einer Stufe. Sie beträgt: Auftritt + 2 x Steigung = 62 cm +/- 3 cm. Sicherheitstechnische Anwendung erfolgt, wenn die Treppe Aufritte zwischen 32 cm und 26 cm, sowie Steigungen zwischen 14 cm

und 19 cm besitzt. Ideal ist ein Auftritt von 29 cm und eine Steigung von 17 cm, da dieses Verhältnis von Auftritt und Steigung den geringsten Kraftaufwand beim Treppensteigen erfordert (vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2010, S. 14). Die Gruppe von Steigungen, die Treppen abdeckt, beinhaltet demnach den Bereich zwischen 20° und 45°. Größere Steigungen können für Fußgänger nur bewältigt werden, wenn es bspw. Leitern gibt. Für den Straßenverkehr gilt dies nicht. Aus diesem Grund sind Steigungen über 45° für diese Anwendung irrelevant. Dem Bereich zwischen Straßen und Treppen, also zwischen 6,85° und 19,9° wird kein spezielles Objekt zugeordnet. Die aufgestellten Steigungskategorien stellt Tab. 4.2 dar.

Tabelle 4.2.: Relevante Steigungsbereiche und deren Eingruppierung in eine Kategorie.

Quelle: eigene Darstellung.

Steigung (in Grad)	Kategorie
0 - 1,73	1: barrierefreie Wege (Regelfall), Straßen (Regelfall)
1,74 - 3,24	2: barrierefreie Wege (Ausnahmefall), Straßen (Regelfall)
3,25 - 6,84	3: nicht barrierefreie Wege, Straßen (Regelfall)
6,85 - 19,9	4: nicht barrierefreie Wege, Straßen (Ausnahmefall)
20 - 45	5: Treppen

4.2.4. Treppen

Treppen stellen ein Hindernis für Menschen mit Handicap dar. Sie besitzen starke Steigungen und sind daher nur schwer zu bewältigen. Wissen über die Treppe, z.B. im Bezug auf die dort vorhandene Steigung, ist für die Mobilität dieser Personen daher essentiell. Interessant sind auch Zusatzinformationen über das Vorhandensein von Rampen oder ähnlichem.

Treppen werden in OSM mit „highway=steps“ getaggt. Der OSM-Dokumentation sollten sie nur durch ways, also nur durch Linien, abgebildet werden. Punkte, Flächen und Relationen sollten nicht als Treppe getaggt werden. Dennoch existiert im Datensatz ein Punktfeature, das das Tag „highway=steps“ besitzt. Dieses Feature wird ignoriert. Ein Ziel ist es, Treppen auf ihre Steigung hin zu untersuchen. Um die Steigung eines Features zu bestimmen, muss bekannt sein, welche gemessenen Höhenpunkte für das Feature relevant sind. Um eine Steigung, basierend auf den relevanten Höhenpunkten zu berechnen, müssen, nach der Vorgehensweise dieser Arbeit, mindestens 3 Punkte vorliegen, um ein TIN aus ihnen zu bilden. Bei einem Feature ohne flächenhafte Ausdehnung, in der die Höhenpunkte liegen können, ist das nicht möglich. Außerdem widerspricht die Punkt-darstellung der Realität, wo Treppenstufen den Aufstieg oder Abstieg in eine Richtung ermöglichen und eine gewisse räumliche Ausdehnung besitzen. Es wäre möglich, einen Bereich um das punktartige Treppenfeature zu definieren, in dem analysierbare Höhenpunkte liegen. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Ausdehnung, die Treppen besitzen, ist aber nicht klar, wie groß dieser Bereich sein müsste. Zudem sind keine wei-

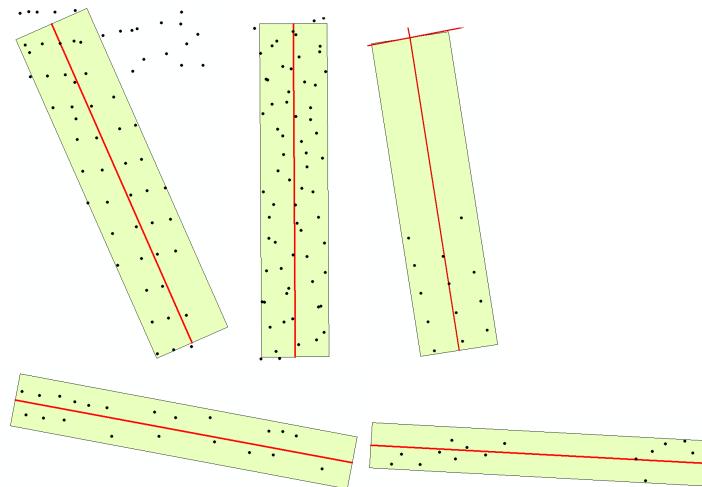


Abbildung 4.9.: Die fünf Treppenfeatures im Datensatz (rot). Dazu ein grüner Pufferbereich um die Treppe mit einem Durchmesser von 1,80m, der die Mindestbreite der Treppe darstellt. Alle Höhenpunkte in diesem Bereich fließen in die Steigungsbeurteilung mit ein. Oben, v.l.n.r: Treppe1, Treppe2, Treppe 5. Unten v.l.n.r: Treppe 3, Treppe 4 (Quelle: eigene Darstellung).

teren Attribute, wie z.B. die Stufenanzahl, in den Daten eingetragen, die einen Hinweis diesbezüglich geben könnten.

Die Treppen, die im Datensatz vorkommen und untersucht wurden, liegen als ways, also als Linien, vor. Insgesamt sind fünf dieser Features im Datensatz vorhanden. Leider werden diese nicht durch weitere Tags beschrieben. Nach OSM mögliche, auch sinnvolle Tags, wären bspw. die Angabe der Steigung durch das Tag „incline“. Das Tag „ramp“, in Kombination mit „wheelchair=yes“, würde den Hinweis geben, dass eine Rampe existiert, die Rollstuhlfahrer nutzen könnten. In Kap. 4.2.3 wurde festgestellt, dass barrierefreie Rampen maximal eine Steigung von 6% haben dürfen. Auch hier wäre dann von diesem Wert auszugehen, was für die Beurteilung der Steigung der Treppe eine Bedeutung hätte. Das Vorhandensein einer Rolltreppe (OSM-Tag „conveying“) könnte im Endergebnis als Zusatzinformation vermerkt werden. Es würde Menschen mit Handicap, die eine bestimmte Steigung nicht bewältigen können, dennoch die Möglichkeit geben, ihr Ziel über diesen Weg zu erreichen.

Wie erwähnt, muss für die Steigungsberechnung der Treppen klar sein, welche Höhenpunkte relevant sind. Relevant sind Höhenpunkte dann, wenn sie die Höhe der Treppe beschreiben. Um das zu bestimmen, muss die Treppenbreite bekannt sein. Für die Treppenbreite wurde ein Mindestwert in jedem Fall von 1,80m angenommen, näheres dazu in Kap. 4.2.2.2. Es wurde also ein Bereich um alle fünf Treppen des Datensatzes erzeugt, der die relevanten Höhenpunkte der Treppe enthält, wie Abb. 4.9 zeigt.

Es ist zu erkennen, dass die Höhenpunkte ungleich verteilt sind. Während das Feature in Abb. 4.9 in der oberen Reihe in der Mitte vergleichsweise viele Höhenpunkte auf sich vereint, sind die Anzahl und die Dichte der Punkte in den unteren Features und in dem Feature rechts oben, deutlich geringer. Das ist insofern relevant, als dass wenige Punkte grundsätzlich anfälliger für Ausreißer sind. Ist das Treppenfeature bspw. nicht exakt digitalisiert, können unter diesen Punkten auch solche sein, die auf einem flachen Abschnitt vor oder hinter der Treppe liegen. Tab. 4.3 listet Statistiken zu den untersuchten Treppen auf. Die Einordnung der Steigung erfolgt basierend auf der in Kap. 4.2.3 definierten Steigungsklassen.

Tabelle 4.3.: Weitere Informationen zu den Treppen im Datensatz, darunter auch deren gemessene Steigung und die darauf basierende Einordnung in eine Steigungsklasse (Quelle: eigene Darstellung).

	Steigung (in Grad)	Anzahl Höhenpunkte	Länge (in m)	Maximaler Höhenabstand (in m)	Steigungs- klasse
Treppe 1	3,83	43	8,06	0,54	3
Treppe 2	2,00	63	8,88	0,31	2
Treppe 3	13,67	21	11,68	2,84	4
Treppe 4	20,93	16	13,41	5,13	5
Treppe 5	3,99	13	7,32	0,51	3

Tab. 4.3 zeigt die bereits beobachtete Unequalität bzgl. der Anzahl der Höhenpunkte. Es wurden 13 bis 63 Punkte auf den Features gemessen. Die Länge der Treppen liegt zwischen 7,32 und 13,41 Meter. Wenige Punkte können z.B. dann gemessen worden sein, wenn Vegetation die Sicht des Sensors auf das Objekt einschränkt. Weiterhin liegt die gemessene Steigung zwischen 2 und 20,93 Grad. Nur eine der fünf Treppen besitzt daher die übliche Steigung zwischen 20 und 45 Grad. Die Berechnung erfolgt aus der Differenz zwischen tiefstgelegenem und höchstgelegenem Punkt im Bezug zur Gesamtlänge der Treppe. Speziell bei Treppe 5 liegt der Grund für die geringe gemessene Steigung sicherlich darin, dass nur im südlichen Bereich der Treppe Höhenpunkte gemessen wurden. Je nachdem in welche Richtung der Auf- und Abstieg der Treppe verläuft, werden so nur entweder tiefer- oder höhergelegene Punkte aufgenommen. Um den maximalen Höhenabstand und damit auch die Steigung bestimmen zu können, ist es erforderlich, dass Punkte in allen Bereichen der Treppe aufgenommen werden. Bezüglich der anderen Features können nur Vermutungen angestellt werden. Denkbar sind Probleme mit der Kartierung, bspw. bzgl. deren Lage und Genauigkeit.

4.2.5. Brücken

Die Steigung von Treppen ist im Vergleich zu den ansonsten anzutreffenden Wanderwegen besonders hoch. Daher wurden sie gesondert betrachtet und die anzutreffenden



Abbildung 4.10.: Eine Brücke ohne geneigte Rampen. Die Konstruktion stellt kein Hindernis für Wanderer dar. Quelle: Vincentz, 2016.

Steigungen ermittelt. Auch Brücken können ein potentiell schwer überwindbares Hindernis für Wanderer mit Handicap sein. Das ist dann der Fall, wenn die Steigung, die Brücken besitzen, um einen Weg über ein Hindernis zu bieten, steil ist. Es ist nun zu analysieren, welche Steigungen Brücken besitzen können. Außerdem muss geklärt werden, ob für Brücken, ähnlich wie für Treppen, Steigungsbereiche definiert werden können.

Brücken können verschiedene Formen haben. Manche Brücken haben zwei rampenartige Aufgänge an jeder Seite und in der Mitte einen flachen Abschnitt. Andere besitzen keinen flachen Abschnitt, sondern nur geneigte Auf- und Abgänge. Eine Brücke kann auch nur aus einem flachen Stück bestehen, das tiefergelegenes Terrain überspannt. Sie besitzt dann keine geneigte Flächen (s. Abb. 4.10).

Für Zugangswege zu einer Brücke können Aufzüge, Rampen und Treppen eingesetzt werden. Die Steigung für Rampen sollte 6% nicht überschreiten (vgl. Baier, 2007, S. 88). Treppen wurden im Kap. 4.2.4 thematisiert. OpenStreetMap ermöglicht es, Brücken zu beschreiben. Neben der Aussage, ob eine Brücke vorhanden ist, kann auch die Brückenform näher spezifiziert werden. Der Datensatz dieser Arbeit beinhaltet fünfzehn Brücken-features. Weitere Angaben jeglicher Art, bspw. hinsichtlich Steigung oder Brückenform, sind jedoch nicht vorhanden. Verschiedene Brückenformen können, wie beschrieben, jeweils andere Abschnitte besitzen, die unterschiedlich geneigt sind. Ohne detaillierteres Wissen über Art und Form der Brücke macht es keinen Sinn, für die gesamte Brücke eine Durchschnittssteigung, basierend auf den vorhandenen Höhenpunkten, zu berechnen. Eine Brücke kann bspw. einen rampenartigen Aufgang und anschließend ein längeres Flachstück besitzen. Wird eine Durchschnittssteigung aller Brückenabschnitte berechnet, so wird auch der Durchschnitt zwischen der Steigung der relativ steilen Rampe und

dem flachen Rest gebildet. Die Steilheit der Rampe, die womöglich ein Mobilitätshindernis darstellt, wäre dann nicht mehr Teil des Ergebnisses. Ist der Aufgang eine Treppe, so kann die Berechnung der Durchschnittssteigung gar dazu führen, dass dieser Weg am Ende als barrierefrei eingestuft wird, da die Durchschnittssteigung aller Brückenabschnitte innerhalb der zulässigen Steigungsbereiche liegt. Brücken werden in OSM nur als einzelnes Feature abgespeichert. Der genaue Ort von geneigten Abschnitten innerhalb einer Brücke ist daher nicht klar. Demzufolge ist es besser, die Steigung jedes Abschnitts einer Brücke einzeln zu berechnen. Die Abschnitte werden in dieser Arbeit durch die Steigungszellen realisiert. Sie werden auch in Brückebereichen generiert. Die Steigung jedes Brückenabschnitts wird dann in den Steigungszellen gespeichert.

4.3. Verarbeitungsschritte von Laserscanning- und OSM-Daten

Im Methodik-Kapitel wurden bisher lediglich Vorüberlegungen beschrieben und diskutiert. Nun werden die konkreten Bearbeitungsschritte durchgeführt und erläutert. Zuerst folgt der Laserscanning-Teil, bevor ab Kap. 4.3.4 die Analyse des OSM-Datensatzes beschrieben wird.

4.3.1. Klassifikation der Laserscanning-Daten

Der in dieser Arbeit untersuchte Datensatz ist nicht klassifiziert. Das bedeutet, keiner der Punkte im Datensatz wurde bisher der Klasse „Vegetation“ oder „Erdoberfläche“ zugewiesen. Ein Ziel der Arbeit ist es, Steigungen auf Wegen zu berechnen. Damit Steigungen berechnet werden können, muss sichergestellt sein, dass nur die Punkte in die Berechnung einfließen, die tatsächlich auf der Oberfläche des Wegs liegen. Problematisch ist insbesondere Vegetation, die sich über den Wegen befindet. Hierzu zählen bspw. Äste und Blätter, die über der Straße hängen (s. Abb. 4.11). Diese schränken die Sicht des Aufnahmesensors auf die Wegoberfläche ein. Würden Höhenpunkte, die diese Vegetation abbilden, bei der Berechnung der Steigung eines Wegs einbezogen werden, würden falsche Steigungen resultieren, da diese Punkte deutlich höher liegen. Punkte, die nicht den Erdboden abbilden, müssen daher über eine Klassifikation identifiziert und vor der Analyse gelöscht werden. Höhenpunkte auf Gebäuden spielen hier keine Rolle, da Geometrien der Wege, basierend auf OSM-Daten, vorliegen. Auf Basis dieser Geometrien können Höhenpunkte, die nicht auf oder über Wegen liegen, wozu auch Gebäudepunkte zählen, von vornherein für die weitere Bearbeitung ausgeschlossen werden.

Leider kann das Ergebnis der noch durchzuführenden Klassifikation nicht verifiziert werden. Das folgt aus der Tatsache, dass zum einen keine Landnutzungskarte vorliegt. Zum anderen liegt kein, bereits klassifizierter, LiDAR-Datensatz vor. Aus diesem Grund ist kein objektiver Vergleich der Klassifikationsergebnisse möglich. Das betrifft sowohl die Ergebnisse eines Verfahrens untereinander, als auch die Ergebnisse verschiedener Verfahren.

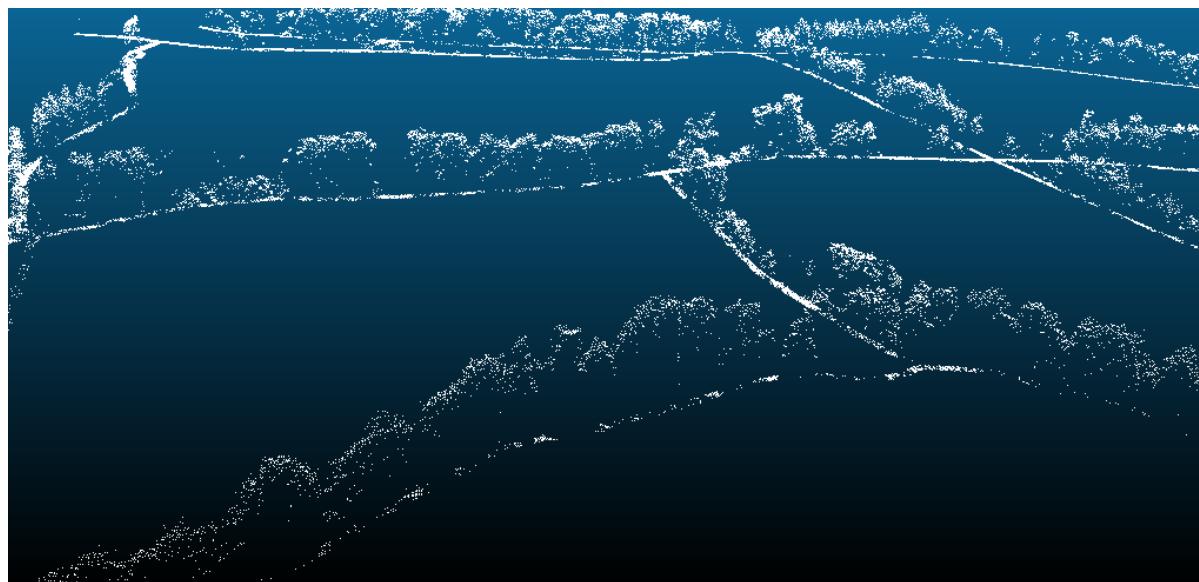


Abbildung 4.11.: Ausschnitt aus dem noch nicht klassifizierten LiDAR-Datensatz. Die Punktfolge wurde auf die Wege im Datensatz, basierend auf OSM-Daten, zugeschnitten. Dargestellt werden also nur Höhenpunkte, die auf oder über Wegen gemessen wurden. An einigen Stellen bilden die gemessenen Punkte die Oberfläche der Wege ab. Deutlich zu erkennen ist außerdem, dass viele Punkte die vorhandene Vegetation abbilden.
Quelle: eigene Darstellung.

In Kap. 3.1.2 wurden mehrere Verfahren genannt, um LiDAR-Punktwolken zu klassifizieren. Die Vorgehensweisen sind, wie gezeigt, sehr unterschiedlich. Evans u. Hudak (2007) generieren für ihren sog. „MCC“-Algorithmus eine Rasteroberfläche mit Hilfe von thin-plate-splines (TPS). Die Basis bei Axelsson (2000) stellt eine Dreiecksvermaschung (TIN) dar. Beide Verfahren realisieren die Klassifikation über eine Abstandsmessung aller Höhenpunkte zur Oberfläche. Brodu u. Lague (2012) gehen anders vor und verwenden mit der Diskriminanzanalyse oder der Support Vector Machine statistische Verfahren, um die Elemente der Punktwolke in Klassen zu gruppieren. Alle Verfahren haben ihre Berechtigung und die genannten Forschungsarbeiten demonstrieren den Erfolg ihres Verfahrens erfolgreich in Testgebieten. In Kap. 3.1.2 wurden darüber hinaus weitere Verfahren, Punktwolken zu klassifizieren, erwähnt. Es geht nun darum, zu entscheiden, welcher Algorithmus für das vorliegende Untersuchungsgebiet und für die Ausrichtung der Arbeit, am besten geeignet ist.

Der vorliegende Datensatz besteht aus diskreten Laserscanning-Messungen. Es liegen keine full-waveform-Daten vor. Höfle et al. (2012) benötigen für ihre Analyse full-waveform-Daten. Aus diesem Grund ist der Algorithmus auf den vorliegenden Daten nicht durchführbar. Die vorliegende Punktdichte überschreitet nicht 5 Pkt/m². Boyko u. Funkhouser (2011) testen ihr Verfahren auf einem Datensatz mit einer Punktdichte von über 100 Pkt/m². Darüber hinaus scheint es für die Separierung von Boden und Vegetation ungeeignet, da der Fokus dort eher auf die Erkennung von Objekten im Straßenverkehr liegt. Montealegre et al. (2015, S. 4083) untersuchen verschiedene open source-Algorithmen und bescheinigen dem „MCC“-Algorithmus die höchste Klassifikationsgenauigkeit. Dicht dahinter folgt der Algorithmus „lasground“, der in dem Softwarepaket LASTools zur Verfügung steht und auf der Arbeit von Axelsson (2000) basiert. Beide Verfahren haben darüber hinaus eine relativ ausgeglichene Fehlerstatistik, was bei anderen getesteten Verfahren nicht festgestellt werden konnte. Grundsätzlich sind beide Algorithmen, „MCC“ und „lasground“ interessant. Sie können potentiell auf die vorliegenden Daten angewendet werden. Hinsichtlich beider Verfahren folgten daher tiefergehende Recherchen.

Ein Teil der in den LASTools verfügbaren Algorithmen ist „open source“, ein anderer Teil „closed source“ (vgl. rapidlasso GmbH, 2016b). Jene, die „open source“ sind, sind ohne Einschränkungen nutzbar. Die andere Gruppe, zu der auch „lasground“ gehört, ist nur zu Testzwecken, mit Einschränkungen, nutzbar. Die volle Nutzbarkeit ist nur nach Erwerb einer Lizenz gegeben. In der Praxis äußert sich dieser Umstand darin, dass nicht alle Punkte eines Datenblocks („tile“) im Untersuchungsgebiet mit einem Programmaufruf klassifizierbar sind. Die Lizenzvereinbarung spricht von einem „bestimmten Punktlimit“, das nicht überschritten werden darf. Bei Überschreitung wird das berechnete Ergebnis künstlich verzerrt, bzw. verfälscht.

Die Implementation des MCC-Algorithmus (vgl. Sourceforge, 2016), ist hingegen ohne jegliche Einschränkungen nutzbar. Der MCC-Algorithmus ist auf bewaldete Gebiete ausgerichtet. Das ist insofern vorteilhaft für diese Arbeit, als dass speziell Vegetations- von Wegoberflächen separiert werden müssen. Andere Objekte, wie Gebäude, spielen hier

keine Rolle. Die Autoren führen ihre Untersuchungen in zwei Untersuchungsgebieten durch, die verschiedenen Einflüssen unterliegen (vgl. Evans u. Hudak, 2007, S. 1030 f.). Ein Untersuchungsgebiet beinhaltet, auf einer Fläche von 88.000 ha, Waldgebiete. Hier sind verschiedene Nadelbaumarten anzutreffen. Die Altersspanne dieser Bäume ist groß und die Charakteristiken der Baumdächer heterogen. Auf der anderen Seite wird eins der zwei Untersuchungsgebiete auch landwirtschaftlich genutzt. Die Steigungen sind insgesamt niedrig bis steil. Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit liegt an den Ausläufern des Teutoburger Waldes. Daher ist auch hier kein komplett flaches Terrain zu erwarten. Die Tauglichkeit des MCC-Algorithmus wurde für den vorliegenden Datensatz ausgiebig geprüft. Wie im Kap. 3.1.2 erwähnt, sind zwei Parameter vom Nutzer einzugeben: „scale“ und „threshold“. In der Arbeit von Evans u. Hudak (2007) betragen die Parameterwerte 1,5, bzw. 0,3. Der Fokus liegt bei den Autoren auf der Unterscheidung von Vegetation und Boden auf Terrain mit zumindest leichten Steigungen. Diese Gegebenheiten sind vergleichbar mit dem vorliegenden Untersuchungsgebiet und den Zielen dieser Arbeit. Aus diesem Grund wurden anfänglich ebenso die Parameterwerte 1,5 und 0,3 erprobt. Eine Veränderung beider Wertew zeigte deutliche Veränderungen des Ergebnisses. Eine Erhöhung des „scale“-Parameters führt dazu, dass größere Objekte, also größere Bäume, besser erkannt und deren Höhenpunkte somit herausgefiltert werden. Nachteilig ist ein erhöhter „scale“-Wert jedoch bei der Erkennung kleinräumiger Unterschiede. Die gröbere Ausrichtung der Klassifikation durch einen hohen „scale“-Wert hat zur Folge, dass Boden, der zwischen oder neben Bäumen gemessen wurde, schlechter von diesen Bäumen unterschieden werden kann. Dadurch tauchen diese Bodenpunkte eventuell im Ergebnis nicht auf. Unter Bäumen werden logischerweise generell weniger Bodenpunkte gemessen (s. Abb. 4.12). Steigungen für diese Wegbereiche können daher nur auf Basis von wenigen, gemessenen Punkten berechnet werden. Daher ist es umso wichtiger, diese Punkte, wenn möglich, beizubehalten und nicht im Laufe der Klassifikation zu löschen.

Eine Verkleinerung des „scale“-Parameters bedeutet eine verbesserte kleinräumige Klassifikation. Treten aber größere Bäume auf, hat diese Parameterwahl auch zur Folge, dass Pixel, die tiefer als die Baumwipfel liegen, eher fälschlicherweise als Boden klassifiziert werden. Die Parameter sollten sich daher, um extreme Ergebnisse zu vermeiden, nicht zu weit von den vorgeschlagenen Werten „1,5“ und „0,3“ entfernen. Das bestätigen auch die visuellen Eindrücke, die während der Bearbeitung gewonnen wurden. Die Wahl passender Parameter hängt, den Erläuterungen entsprechend, auch immer von der Größe der anzutreffenden Bäume ab. Ein „scale“-Wert von 1,8 und ein gleichbleibender Toleranzparameter von 0,3 stellten sich für das Untersuchungsgebiet als gute Wahl heraus. Hier wurden vergleichsweise wenig falsche Punktklassifikationen beobachtet. Abb. 4.12 zeigt, dass, ohne den Einfluss einer Klassifikation, unter Bäumen wenig Punkte existieren. Es ist schon jetzt klar, dass es viele Bereiche gibt, in denen keine Steigungen berechnet werden können, weil der ursprüngliche Datensatz dort keine Punkte beinhaltet. Umso wichtiger ist es, so viele Punkte wie möglich, richtig zu klassifizieren. Mit manchen Parameterwerten können, wie beschrieben, einige Objekte besser detektiert werden, als mit anderen. Es ist daher sinnvoll, zumindest zwei Klassifikationen mit unterschiedli-



Abbildung 4.12.: Unter Bäumen ist die Dichte an Punkten, die die Erdoberfläche abbilden, geringer. Der Abstand zwischen den grünen Markierungen beträgt 87,85 Meter. In diesem Bereich werden die meisten Punkte auf verschiedenen Schichten der Bäume gemessen. Nur wenige Punkte bilden die Erdoberfläche ab. Quelle: eigene Darstellung.

chen Parametersätzen für jeden Datenblock zu berechnen. Nun ist zu klären, wie hoch der „scale“-Wert der zweiten Klassifikation sein muss. Das Verfahren schließt, wie in Kap. 3.1.2 beschrieben, drei Durchläufe ab, in der die Klassifikation immer weiter verfeinert wird. In jedem Durchlauf wird der „scale“-Wert verändert. Im ersten Durchlauf wird der vom Nutzer eingegebene „scale“-Wert halbiert. Er liegt demzufolge im ersten Durchlauf bei 0,9. Der „scale“-Wert im zweiten Durchlauf ist der eingegebene Wert, also 1,8. Im dritten Durchlauf steigt der „scale“-Wert um 50% der Eingabe. Er liegt bei einer Eingabe von 1,8 also bei 2,7. Überschneiden sich diese Werte der zweiten Klassifikation mit der der ersten, wird teilweise dasselbe Ergebnis berechnet. Bei der Wahl des Parameters der zweiten Klassifikation müssen diese Erkenntnisse berücksichtigt werden. Wird der Wert auf 1,4 gesetzt, ergibt sich in den Durchläufen ein „scale“ von 0,7, 1,4 und 2,3. Diese Werte füllen genau die Lücken, die die vorige Klassifikation nicht abdeckte. Daher stellt diese Parameterwahl eine gute Ergänzung zur vorherigen Klassifikation dar. Zudem ist die Klassifikation mit dem Parameter 1,8, von der Basis 1,5 betrachtet, eher größer ausgerichtet, 1,4 hingegen eher feiner und kleinräumiger. Für jeden Datenblock werden also zwei Klassifikationen mit folgenden Parametern berechnet: „scale“=1,8 und 1,4, sowie „tolerance“ in beiden Fällen gleich 0,3. Schließlich erfolgt eine Vereinigung beider Klassifikationen, wobei jeder Höhenpunkt im Ergebnis nur einmal vorkommen darf. Der untere Teil von Abb. 4.13 zeigt die Vereinigung beider Klassifikationsergebnisse für denselben Bildausschnitt von Abb. 4.11.

In Abb. 4.13 ist zu sehen, dass die Zahl von Vegetationspixeln, die fälschlicherweise der sichtbaren Bodenklasse zugeordnet wurden, minimal ist. Der obere Teil der Abbildung stellt einige solcher Pixel dar. Aber auch dort ist der Wegverlauf klar zu erkennen und der Anteil der korrekt klassifizierten Bodenpixel überwiegt. Die Zahl der

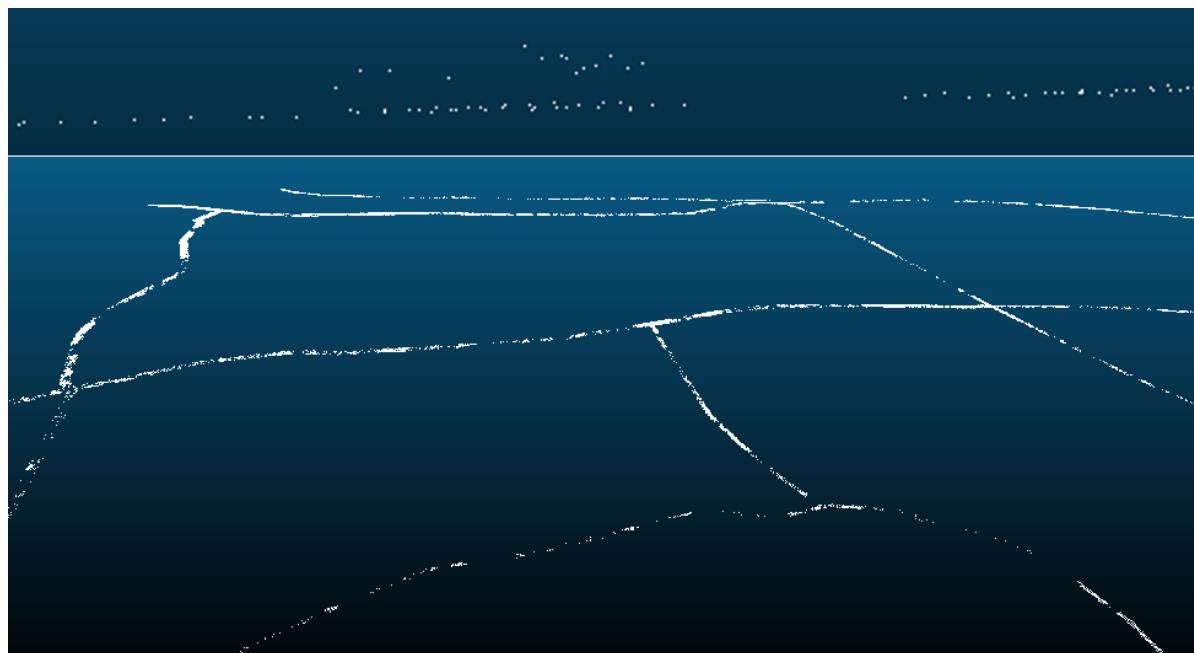


Abbildung 4.13.: Ausschnitte aus dem Klassifikationsergebnis des LiDAR-Datensatzes mit dem Verfahren „MCC“. Es sind nur Punkte zu sehen, die der Klasse „Boden“ zugeordnet wurden. Das Ergebnis setzt sich aus einer Vereinigung der Ergebnisse zusammen, die mit den Parametersätzen $\text{scale} = „1,8“$, $\text{scale} = „1,4“$ und jeweils einer $\text{tolerance} = „0,3“$ berechnet wurden. Das Klassifikationsergebnis wurde auf die Wege und Straßen, die im OSM-Datensatz enthalten sind, zugeschnitten. Der untere Bildausschnitt deckt sich zu großen Teilen mit der Ansicht aus Abb. 4.11. Oben sind einige Vegetationspixel zu sehen, die fälschlicherweise der Bodenklasse zugeordnet wurden. Der Höhenunterschied zwischen ihnen und dem darunterliegenden Boden beträgt max. 1,5 Meter. Quelle: eigene Darstellung.

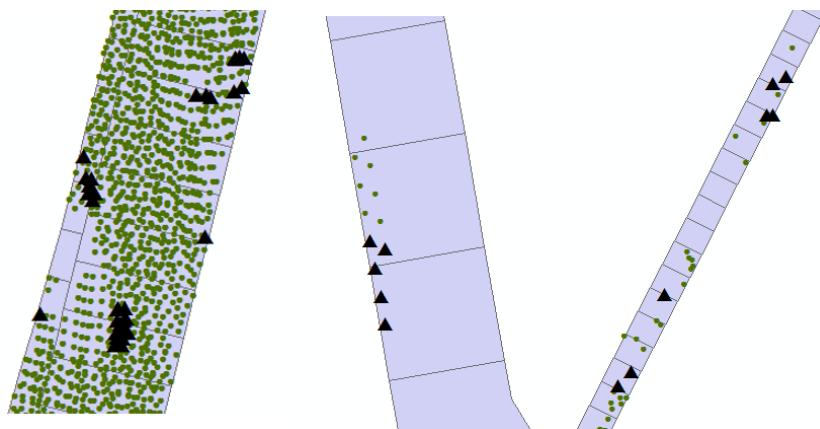


Abbildung 4.14.: Klassifikationsergebnisse mit dem Verfahren MCC und den Parametern „scale“=1,8, „tolerance“=0,3 und „scale“=1,4, „tolerance“=0,3. Beide Ergebnisse beinhalten zu großen Teilen identische Punkte. Die Punkte, die im ersten Ergebnis enthalten sind, wurden im zweiten Ergebnis gelöscht, sodass die einzigartigen Punkte des zweiten Ergebnisses sichtbar werden. Die Punkte die nur vom zweiten Parametersatz klassifiziert wurden, sind in schwarzen Dreiecken dargestellt. Alle übrigen Punkte des ersten Ergebnisses sind grün eingefärbt. Die Zellen basieren auf Kap. 4.2.2 Quelle: eigene Darstellung.

„Commission“-Fehler ist demnach minimal, die Zahl der „Omission“-Fehler unbekannt, da keine Möglichkeit zur Verifizierung der Klassifikation besteht. Insgesamt beinhaltet der Datenblock, den Abb. 4.11, und 4.13 (unten) in Ausschnitten darstellen, auf einer Fläche von 1 km^2 , 4.422.101 Punkte. 81.587 der Punkte, die räumlich auf den Wegen und Straßen des Datenblocks liegen, wurden als Boden klassifiziert. Die Breite der Wege wurde entsprechend der Erläuterungen in Kap. 4.2.2.2 berechnet. Die 81.587 Punkte ergeben sich daher aus der Vereinigung der Ergebnisse beider Parametersätze, bestehend aus „scale“ und „tolerance“. Es wurde festgestellt, dass viele Bodenpunkte von beiden Parametersätzen erkannt wurden und daher in beiden Ergebnissen enthalten waren. Bei der durchgeführten Vereinigung, müssen daher die Duplikate entfernt werden. Werden die Punkte, die die Klassifikation mit dem Parametersatz „scale“=1,4 und „tolerance“=0,3 ergeben, vom Ergebnis des anderen Parametersatzes abgezogen, ergibt sich eine Menge von 2.552 Punkten. Das Ergebnis, basierend auf den Parametern „scale“=1,4 und „tolerance“=0,3, beinhaltet also nur 2.552 einzigartige Punkte im Vergleich zum anderen Parametersatz. Es ist zu diskutieren, ob die separate Berechnung zweier Ergebnisse sinnvoll ist.

Abb. 4.14 zeigt, dass dort, wo generell viele Bodenpunkte gemessen wurden, eine zweite Klassifikation, mit einem anderen Parametersatz, nicht nennenswert mehr Erkenntnisse bringt. Dort aber, wo wenig Punkte gemessen wurden, zahlt sich die Klassifikation mit einem zweiten Parametersatz aus. Später werden aus diesen Punkten TINs gebildet,

die die Steigung zwischen den Punkten beinhalten. Es können nur TINs gebildet werden, wenn drei benachbarte Punkte auf kleinem Raum existieren. Die Einbeziehung des Ergebnisses eines anderen Parametersatzes führt dazu, dass mehr TINs gebildet werden können. Somit können auch Steigungen für Zellen berechnet werden, für die das andernfalls nicht möglich wäre.

Auch das Verfahren CANUPO, nach Brodu u. Lague (2012), wurde evaluiert. Die MCC-Ergebnisse weisen bereits eine minimale Menge an Vegetationspunkten auf, die fälschlicherweise der Bodenklasse zugeordnet wurden („Commission“-Fehler). Mit den getesteten CANUPO-Parametern konnten diese Ergebnisse jedoch nicht verbessert werden. Darüber hinaus lag die Anzahl klassifizierter Bodenpunkte unterhalb derer von MCC. Die Qualität der Klassifikation von MCC ist überzeugend. Es wird daher nicht als erforderlich betrachtet, neben CANUPO und den LASTools noch weitere Algorithmen zu evaluieren. Es erfolgt daher die Festlegung auf das Verfahren MCC mit den genannten Parametern. Für jedes tile werden, den Ausführungen zufolge, zwei Ergebnisse berechnet, die anschließend vereinigt und hinsichtlich vorhandener Duplikate bereinigt werden.

4.3.2. Erzeugung der Steigungszellen

Aus den Laserscanning-Daten wurden alle Punkte herausgefiltert, die nicht auf dem Erdboden gemessen wurden. Mit diesen Daten ist es nun möglich, Steigungen der Wege zu berechnen. In Kap. 4.2.2 wurde festgelegt, dass die Steigungen jedes Weges in sog. Steigungszellen abgespeichert werden. Bevor aus den klassifizierten Höhenpunkten eine Oberfläche und anschließend Steigungen generiert werden, muss erst einmal die Datengrundlage geschaffen werden, um diese Steigungen abzuspeichern. Steigungszellen werden um einen Weg herum gebildet und haben eine rechteckige Form. Die Breite ist zum einen abhängig vom Wegtyp, zum anderen von den zusätzlichen Tags, die in OSM für den spezifischen Weg eingetragen sind. Die Länge jeder Zelle wurde auf 3,00 Meter festgelegt.

Die Features der Wege stammen aus dem OSM-Datensatz. Dieser wurde in Kap. 2.3 erläutert. Abb. 2.6 stellt alle Wege farblich markiert dar. Da es sich um hunderte Features handelt, die digital vorliegen, werden sie in einem Geoinformationssystem verwaltet. Die Vorhaltung der Daten erfolgt in Tabellen einer Geodatenbank. In diesem Kapitel wird Schritt für Schritt erläutert, wie, basierend auf den linienhaften Wegen, Steigungszellen erzeugt werden.

Der originale OSM-Datensatz besteht aus 889 Linienfeatures. Es ist ein Ziel der bevorstehenden Verarbeitung, eine korrekte Topologie zu erhalten. Das bedeutet, dass Features sich nicht schneiden, sich nicht überlappen und dass Polygone keine Lücken haben. Bei der anfänglichen Analyse des OSM-Datensatzes fällt auf, dass sich Linienfeatures überschneiden. Es werden diesbezüglich 91 Topologiefehler festgestellt. Diese werden beseitigt, indem Linien in den Kreuzungsbereichen in separate Features aufgeteilt werden. Hierdurch vergrößert sich die Anzahl der Linienfeatures im Datensatz. Der Datensatz

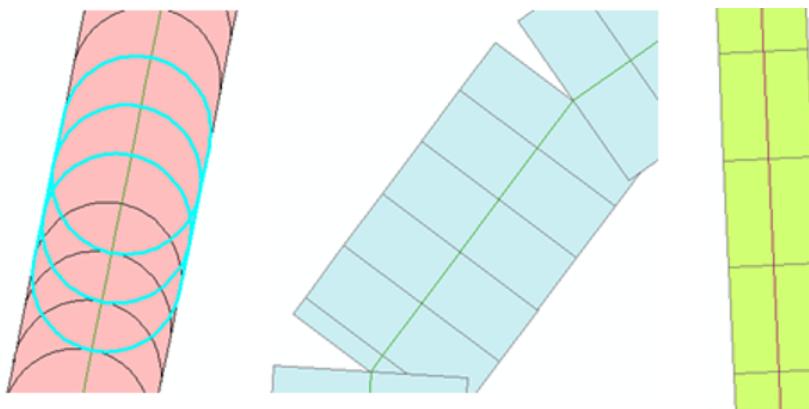


Abbildung 4.15.: Steigungszellen, deren Form rund (links) oder eckig (mitte, rechts) ist. Runde Zellen überlappen sich gegenseitig. Eckige Zellen decken Kurvenbereiche nicht gut ab. Quelle: eigene Darstellung.

besteht nun aus 1079 Features.

Gängige Geoinformationssysteme (GIS) stellen eine Funktion zur Verfügung, um Puffer (engl. „Buffer“) zu erzeugen. Diese erzeugen um ein, in diesem Fall, Linienfeature, eine Fläche. Die Größe des Puffers kann vom Nutzer angegeben werden. Wird ein Puffer um jedes der 1079 Feature gebildet, entstehen Steigungszellen, die so lang sind, wie das Feature, um das sie gebildet wurden. Die Features beschreiben einen Wegabschnitt, der entweder in einer Sackgasse oder in Kreuzungen endet. Die Wegabschnitte sind nicht genormt und daher größtenteils viel länger als die festgelegte Länge der Steigungszellen. Aus diesem Grund sind die ursprünglichen Linienfeatures für eine kleinräumige Steigungsberechnung ungeeignet. Vielmehr muss es gelingen, entsprechend der Überlegungen, die Linienfeatures in drei Meter lange Abschnitte zu unterteilen. In GIS ist diese Operation möglich, indem z.B. in bestimmten Abständen Punkte auf den Linien erzeugt werden. Anhand dieser Punkte wird die Linie dann in regelmäßige Abschnitte zerlegt. Anschließend erfolgt die Bildung der Steigungszellen, indem um alle Liniensegmente herum Puffer berechnet werden. Die Puffer müssen eckige Kanten besitzen.

Auf diese Weise können die Zellen eindeutig voneinander abgegrenzt werden, wie in Abb. 4.15 rechts zu sehen. Allerdings hat diese Zellenform auch Nachteile, wie in der Mitte dargestellt. Kurvenbereiche können nicht gut abgedeckt werden. Der Grund hierin liegt in der eckigen Digitalisierung der Linienfeatures. Allerdings fällt dieser Umstand weniger ins Gewicht, als die in Summe großflächige Überlappung der Zellen, wie sie bei einer runden Struktur auftreten würde. Die Breite der Puffer ergibt sich aus der Breite des Weges. In Kap. 4.2.2.2 wurde erläutert, dass die Breite der Steigungszelle nicht breiter als die Breite des Weges sein darf. Auf diese Weise wird verhindert, dass in die Steigungszellen auch Objekte fallen, die neben der Straße liegen, also z.B. Straßengräben oder Hecken. Die minimalen Wegbreiten wurden theoretisch bestimmt. Ein Programm

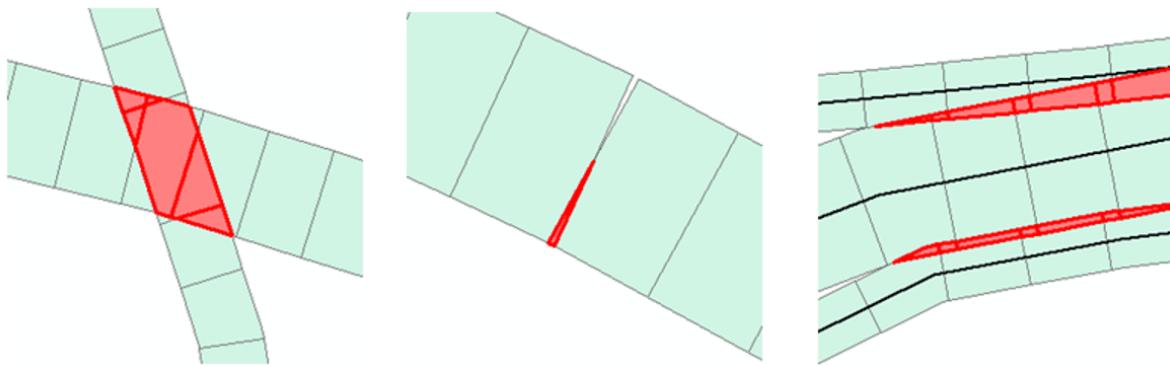


Abbildung 4.16.: Überlappende Steigungszellen in Kreuzungsbereichen (links), Kurven (Mitte) und bei zu nahen OSM-Linien, bzw. zu großen Puffern (rechts). Quelle: eigene Darstellung.

wurde anschließend, in der Programmiersprache Python, erstellt. Es berechnet für jeden Weg die Wegbreite und trägt den Wert für jedes Feature in eine separate Datenbankspalte ein. Da jedes GIS eine eigene Softwarestruktur besitzt, ist dieses Programm nur für das hier verwendete GIS, „ArcGIS“, nutzbar. Die Pufferberechnung erfolgt anschließend auf Basis der berechneten Werte. An dieser Stelle der Bearbeitung existieren also die Flächen, für die eine Steigung berechnet werden. Die Steigungszellen wurden mit einer einheitlichen Länge von 3,00m gebildet und haben eine variable Breite. Abb. 4.15 zeigt allerdings auch, dass die Länge in Ausnahmefällen kleiner als 3,00 Meter ausfallen kann. Das ist z.B. an den Enden der Wege der Fall, wenn die Länge der Abschnitte nicht ohne Rest durch 3,00 Meter teilbar ist.

Die erzeugten Steigungszellen werden nun erneut hinsichtlich ihrer Topologie überprüft. In der Auswertung zeigt sich, dass zahlreiche Topologiefehler, im Bezug auf Überlappungen, existieren. Beispielhaft werden einige in Abb. 4.16 dargestellt. Topologiefehler treten häufig in Kreuzungsbereichen auf. Aber auch in Kurven oder dort, wo OSM-Features zu nah beieinander liegen (rechts in der Abbildung). Zu nah beieinanderliegende Wegverläufe können z.B. durch eine fehlerhafte OSM-Digitalisierung entstehen, wenn das digitalisierte Feature nicht in der Mitte des realen Wegverlaufs liegt. Wird dann ein Puffer um dieses Feature gebildet, kann eine Überlappung mit einem benachbarten Puffer entstehen. Außerdem können Baumaßnahmen, bspw. die Änderung eines Wegverlaufs, nicht in OSM übertragen worden sein. Darüber hinaus können spezielle Gegebenheiten, etwa in Form von Verkehrsinseln, oder einer lokal verringerten Straßenbreite vorliegen, die entweder nicht in OSM eingetragen oder in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Die Topologiefehler wurden anschließend beseitigt. Das gelang u.a. durch eine Isolation aller überlappenden Bereiche und der anschließenden Löschung von sich überlappenden Features, die dieselbe Geometrie besaßen. Hierbei handelt es sich größtenteils um eine automatische Generalisierung der Zellen. Eine automatische Generalisierung ist nötig,

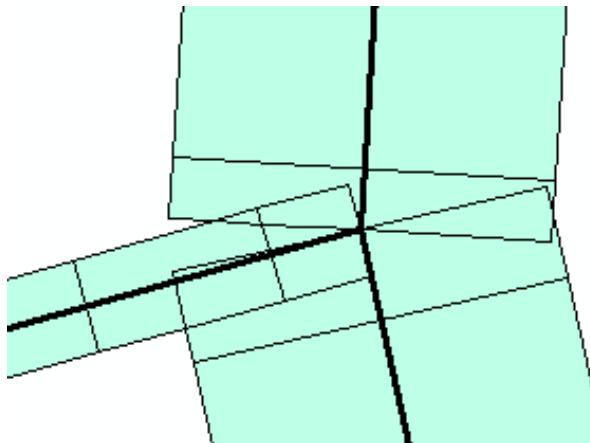


Abbildung 4.17.: Steigungszellen nach der, teilweise automatisiert durchgeführten, Be- reinigung aller Topologiefehler. Die ursprünglichen Zellen vor der Be- reinigung sind noch zu erkennen. Dennoch wurden durch diese Opera- tion viele kleine Zellen geschaffen, die eine minimale Fläche besitzen.
Quelle: eigene Darstellung.

da der Datensatz, wie erläutert, mehrere Hundert Features beinhaltet.

Einen Ausschnitt der Steigungszellen nach der Beseitigung der Topologiefehler stellt Abb. 4.17 dar. Es ist zu sehen, dass jeder kleine, ehemalige Überlappungsbereich, als eigenständiges Feature gespeichert ist. Diese Entwicklung hat sich schon in Abb. 4.16 angedeutet. Auch dort war schon zu sehen, dass die Überlappungsbereiche stark untergliedert sind. Wichtig ist zwar, dass möglichst kleinräumige Steigungen berechnet werden. Dennoch dürfen die Zellen auch nicht zu klein sein. Sind die Zellen zu klein, kann mit der gegebenen Punktdichte für die Zelle keine Steigung berechnet werden. Es ist zu klären, wie klein eine Zelle sein darf. Die schmalste Wegbreite im Datensatz beträgt 0,5 Meter. Sie stammt aus einer Angabe eines OSM-Nutzers über das Tag „width“. Die Länge dieser Zelle beträgt, wie alle anderen auch, 3,00 Meter. Die Fläche dieser Zelle be- rechnet sich dann zu $1,5 \text{ m}^2$. Vor dem Hintergrund der Erkenntnisse aus Kapitel 4.2.2.2, erscheint 0,5 Meter als Ausnahmefall. In diesem Kapitel wurde festgelegt, dass 1,5m die minimale Breite aller Wegtypen ist. Dieser Wert gilt für Radwege. Für Fußgängerwege werden 1,80m angenommen, um den Anforderungen von Fußgängern, auch hinsichtlich möglichen Begegnungsverkehrs, gerecht zu werden. Bei der Angabe von 0,5m handelt es sich um eine gültige Angabe, die hier nicht in Frage gestellt wird. Auf Basis der Er- kenntnisse darf daher insgesamt keine Zelle im Datensatz kleiner als $1,5\text{m}^2$ sein. Mit einer Punktdichte von im Durchschnitt $4,6 \text{ Pkt/m}^2$, können in den kleinsten Zellen im- mer noch zwei TIN im Durchschnitt berechnet werden. Alle Zellen, die kleiner als $1,5\text{m}^2$ sind, müssen aufgelöst werden. Da keine Datenlücken entstehen dürfen, werden diese Zellen mit ihren Nachbarn verschmolzen. Praktisch steht zur Auswahl, sie entweder mit dem Nachbarn zu verschmelzen, mit dem sie die größte gemeinsame Grenze teilen. Eine

andere Option ist, sie mit dem Nachbarn zu verschmelzen, der die größte Fläche besitzt. Letztere Option kann jedoch zu unerwünschten Ergebnissen führen. Wenn an die schmale Grenze eines entfernten Ausläufers einer großen Zelle eine weitere Zelle angeschlossen wird, könnte dieses Vorgehen im Extremfall unförmige Zellen hervorbringen. Um relative räumliche Homogenität zu erhalten, wird daher die Option der größten gemeinsamen Grenze gewählt.

Es wird davon ausgegangen, dass Treppen eine einheitliche Steigung besitzen. Genauer gesagt, dass alle Treppenstufen einer Treppe gleich hoch und gleich lang sind. Aus diesem Grund können Zellen miteinander verschmolzen werden, die Treppen abbilden. Ein weiterer Faktor führt ebenfalls zu dieser Entscheidung. Die ungleiche Verteilung der Höhenpunkte bringt es mit sich, dass der Fall eintreten kann, dass mehrere Punkte auf einer Treppenstufe gemessen werden (s. Abb. 4.18). In diesem Fall würde die Steigung annähernd 0° betragen. Auch der andere Extremfall kann eintreten: Nämlich, dass ein Punkt vor einer Treppenstufe gemessen wird, und zwei direkt dahinter. Bei einer Triangulation ergäbe das Steigungen, die weit über der maximalen Steigung von Treppen (45°) liegen. Würde nun die Steigung aller Zellen einzeln berechnet werden, könnten, für den Wanderer, unverständliche Extremwerte gemessen werden. Außerdem wären die Steigungen aller Zellen einer Treppe womöglich sehr heterogen. Auch dieser Umstand führt zu dem Entschluss, alle Zellen einer Treppe zu einer großen Zelle zu vereinigen.

Brückenzellen hingegen, werden nicht zu einer Zelle vereinigt. Die Gründe hierfür wurden in Kap. 4.2.5 genannt. Eine Brücke kann teilweise oder ganz aus flachen Abschnitten bestehen. Eine Durchschnittsbildung über geneigte und flache Bereiche würde keinen Sinn ergeben. Dem Wanderer wird, aufgrund der Durchschnittsbildung, womöglich ein passierbarer Weg vorgegeben, der aufgrund von geneigten Rampen zur Brücke, so nicht existiert. Die Brückenformen, die im Datensatz vorkommen, sind nicht bekannt. Daher werden die Steigungen der Brückenabschnitte in einzelnen Steigungszellen gemessen. Eine Weiterverarbeitung des Datensatzes muss diesbezüglich also nicht erfolgen.

4.3.3. Verarbeitung der Höhenpunkte

Nachdem die Steigungszellen berechnet worden sind, ist hiermit die geeignete Datenstruktur geschaffen, um Steigungen für die hier relevanten Räume zu speichern. Nun muss aus den klassifizierten Höhenpunkten eine TIN-Oberfläche generiert werden. Aus der Oberfläche werden dann die Steigungen abgeleitet, bevor sie in den Steigungszellen gespeichert werden. Die Oberflächengenerierung geschieht durch Anwendung der Delaunay-Triangulation.

Die Triangulation kann auf verschiedenen Punktmengen ausgeführt werden. Die Wahl der Punktmenge ist dabei entscheidend für das Ergebnis. Zum einen kann sie zunächst auf allen Bodenpunkten ausgeführt werden, um im Anschluss die TIN zu selektieren, die auf den Wegen liegen. Zum anderen kann sie nur auf den Punkten ausgeführt werden, die

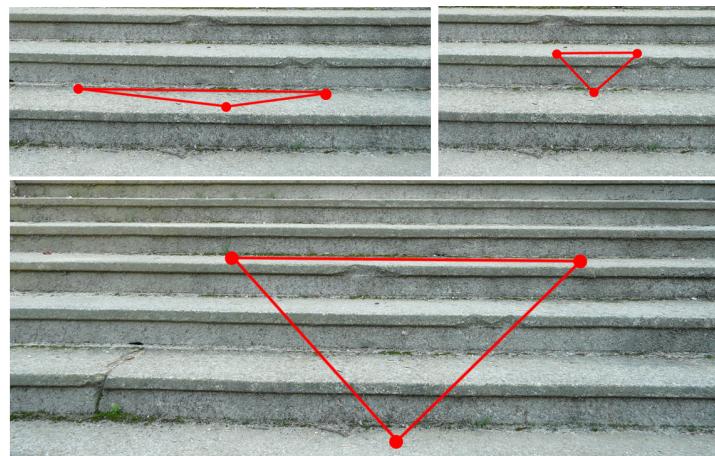


Abbildung 4.18.: Höhenpunkte auf Treppen, die zu drei TINs verbunden werden. Die Steigung der drei TINs ist sehr unterschiedlich. Das TIN links oben wird aus Punkten gebildet, die auf einer Treppenstufe gemessen wurden, daher ist die Steigung nahe oder gleich Null. Die Höhenpunkte rechts oben werden kurz vor und kurz nach einer Treppenstufe gemessen. Das TIN hat demzufolge eine sehr starke Steigung. Das TIN unten bildet die Treppe gut ab und besitzt keine extreme Steigungen, da es mehrere Stufen abdeckt. Quelle: eigene Darstellung, Google Data Storage, 2016.

auf den Wegen liegen. Der Unterschied ist, dass im ersten Fall TIN generiert werden, die zum Teil auf, und zum Teil neben dem Weg, liegen. Der Teil, der neben dem Weg liegt, kann Gräben oder niedrige Vegetation abbilden. Daher ist dieses Vorgehen zu vermeiden. Die Steigungsberechnung sollte nur auf Basis der Punkte stattfinden, die auf dem Weg liegen. Aus diesem Grund wird die Punktwolke vorselektiert. Anschließend erfolgt die Triangulation.

Abb. 4.19 zeigt, dass der eingesetzte Triangulationsalgorithmus nicht nur TIN erzeugt, sondern, vor allem an den Wegrändern, weitere Polygone. Die TIN ergeben, zusammen mit den weiteren Polygonen, einen Datensatz, der die Wege komplett abdeckt und keine Lücken aufweist. Die weiteren Polygone stellen keine gültigen TIN dar, sondern haben teilweise mehr als 100 Kanten und können sehr groß sein. Um diesen Fakt deutlich zu machen, wurde ihnen vom Algorithmus ein auffälliger Steigungswert von 90° zugewiesen. Die Steigungsberechnung würde mit diesen Polygonen natürlich fehlerhafte Ergebnisse hervorbringen. Daher müssen sie gelöscht werden. Unklar ist noch, womit diese fehlerhaften Polygone aus der großen Masse aller Polygone, darunter auch TINs, identifiziert werden können. TINs werden immer auf Basis der Höhenpunkte gebildet. Einige Polygone, die gelöscht werden sollen, beinhalten oder berühren jedoch keine Höhenpunkte, wie in Abb. 4.19 auf der rechten Seite zu sehen. Über dieses Ausschlusskriterium können sie eindeutig von anderen unterschieden und damit gelöscht werden. Andere Flächen,

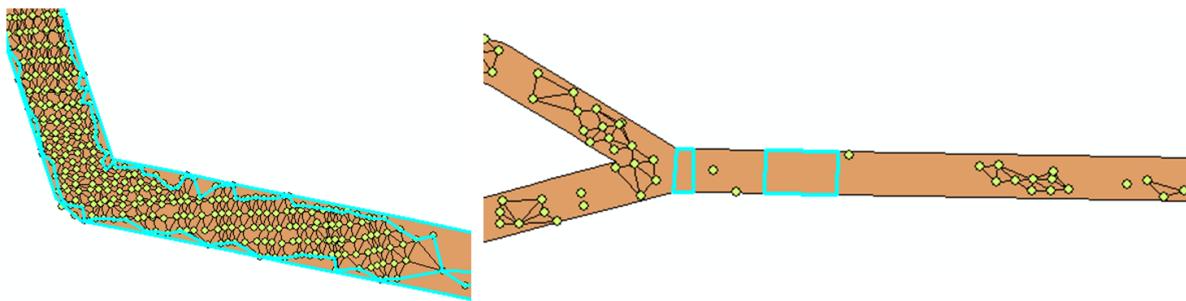


Abbildung 4.19.: Triangulation der Höhenpunkte, die auf einem Wanderweg liegen. Die Kanten der gebildeten TIN sind schwarz, die Wegbreite ist orange eingefärbt. Dort, wo innerhalb der Wegbreite keine TIN erzeugt werden konnten, erschuf der eingesetzte Algorithmus Polygone. Einige dieser Polygone sind hier blau markiert. Diese Polygone besitzen keine gültige Steigung. Sie müssen gelöscht werden, um ein korrektes Ergebnis zu erhalten. Weiterhin sind im rechten Bild einzelne Höhenpunkte zu sehen, die nicht zu TIN verbunden wurden, weil passende Nachbarpunkte fehlten. Auch diese Punkte befinden sich in den, blau markierten, größeren Polygonen. Quelle: eigene Darstellung.

wie z.B. das große Polygon, das auf der linken Seite zu sehen ist, können auf diese Weise nicht identifiziert werden, da sie einzelne Höhenpunkte beinhalten, die nicht trianguliert wurden. Alle diese Flächen können jedoch über den extremen Steigungswert von 90° identifiziert werden. Würden alle Flächen gelöscht werden, die eine Steigung von 90° haben, könnte dies aber auch dazu führen, dass gültige TINs gelöscht werden, die diesen Steigungswert besitzen. Allerdings ist es sehr unwahrscheinlich, dass gültige TINs eine Steigung von 90° haben, da es die höchstmögliche Steigung darstellt und eine solche Steilheit nicht zu erwarten ist. Insgesamt haben 1853 Features diesen Steigungswert. Zwar ist nicht garantiert, dass sich keine gültigen TINs unter den Bereichen mit einer Steigung von 90° aufhalten. Die stichprobenartige Prüfung kleinflächiger, wie auch großflächiger, Features dieser Untergruppe ergab aber nur Features, die einer Löschung bedürfen. Auch wenn es vereinzelte, gültige TINs geben sollte, die eine Steigung von 90° besitzen, wäre der Schaden, den eine Steigungsberechnung für Wanderer mit diesen Extremwerten hätte, größer einzustufen. Daher erfolgt eine Löschung dieser Bereiche. Der Restdatenbestand besteht ausschließlich aus gültigen TIN. Auf diese Weise fallen auch die Höhenpunkte heraus, die, z.B. aufgrund fehlender Nachbarpixel, nicht trianguliert werden konnten.

Die TIN liegen noch in einem speziellen Oberflächenformat vor, das zur Speicherung von TIN-Oberflächen dient. Die Steigungszellen werden jedoch im, für GIS geläufigen, Shape-Format gespeichert. Für eine Berechnung der Steigungen der Zellen muss, mit den eingesetzten Verfahren, eine Umrechnung der TIN-Oberfläche in das Shape-Format erfolgen. Wird andere Software eingesetzt, entfällt dieser Schritt womöglich. Dennoch

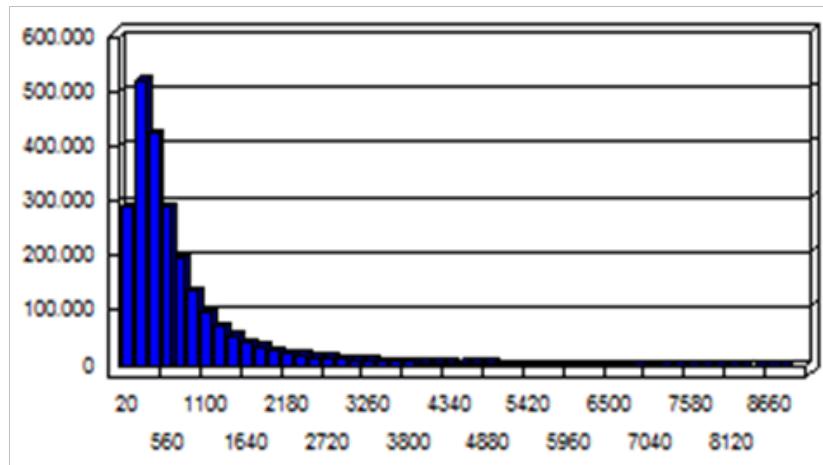


Abbildung 4.20.: Häufigkeitsverteilung der auftretenden Steigungen in den berechneten TINs nach der Steigungsklassifikation. x-Achse: Steigung in Grad multipliziert mit dem Faktor 100. y-Achse: Anzahl der TIN. Die Klassifizierung erfolgte zwischen 0° und 45° in $0,2^\circ$ -Schritten, darüber in $0,5^\circ$ -Schritten. Eingeschlossen sind nur die TINs, die durch die Nachbearbeitungsschritte nicht gelöscht wurden und somit Teil des abschließenden Ergebnisses sind. Quelle: eigene Darstellung.

wird er hier erwähnt - aus folgendem Grund. Das hier eingesetzte GIS-System „ArcGIS“ führt eine solche Format-Konvertierung nur durch, wenn die Steigungswerte der TIN in Klassen eingeordnet werden. Es wurden möglichst kleine Klassen gewählt, um eine starke Generalisierung zu verhindern. Der Steigungsbereich von 0° bis 45° ist besonders relevant für Wanderer. Angefangen von der ersten Klasse, die die TIN-Steigungen von 0° bis $0,2^\circ$ beinhaltet, wird anschließend, bis 45° , alle $0,2^\circ$ eine neue Klasse gebildet. Ab 45° bis $89,5^\circ$ erfolgt die Klassenbildung in $0,5^\circ$ -Schritten.

Tabelle 4.4.: Statistik über die auftretenden Steigungen in den berechneten TINs nach der Steigungsklassifikation. Die Klassifikation erfolgte zwischen 0° und 45° in $0,2^\circ$ -Schritten, darüber in $0,5^\circ$ -Schritten. Eingeschlossen sind nur die TINs, die durch die Nachbearbeitungsschritte nicht gelöscht wurden und somit Teil des abschließenden Ergebnisses sind. Quelle: eigene Darstellung.

Anzahl TINs	2.332.257
Minimale Steigung	0,2 Grad
Maximale Steigung	89,5 Grad
Mittlere Steigung	8,06 Grad
Standardabweichung	9,03 Grad

Auffällig in Tab. 4.4 ist, dass es trotz der Löschung der Bereiche mit einer Extremsteigung von 90° weiterhin gültige TINs mit einer sehr hohen Steigung gibt. Eine weitere statistische Auswertung ergibt, dass die maximale Fläche aller 3.756 TINs, mit einer Steigung

von $\geq 70^\circ$, $0,41 \text{ m}^2$ beträgt. Die durchschnittliche Fläche betrug gar nur $0,008 \text{ m}^2$. Die Fläche der steilsten TINs ist also sehr klein. Die relevanten Steigungsbereiche für Wanderer sind zwischen 0° und 45° . Treppen wurden als das steilste, für Fußgänger relevante Objekt festgelegt. Die Steigung dieser Klasse beträgt maximal 45 Grad. Es existieren 28.152 TINs mit einer Steigung von $45,5$ bis $89,5$ Grad. Im Vergleich zur Gesamtmenge ist das ebenfalls ein kleiner Wert. Die mittlere Steigung dieser TINs beträgt ebenfalls lediglich $0,03 \text{ m}^2$ mit einer Standardabweichung von $0,07 \text{ m}^2$. Häufig handelt es sich bei diesen TIN um TIN, die nur wenig Höhenunterschied von niedrigstem zu höchstem Punkt aufweisen. Da sie aber eine sehr geringe Länge und Breite besitzen, folgt, mit dem Höhenunterschied, die starke Steigung. Werden bspw. zwei Punkte direkt nebeneinander gemessen und ein Punkt liegt auf einem Bürgersteig, während der benachbarte Punkt auf der Straße liegt, kann auf einer Länge von 4 cm ein Höhenunterschied von 12 cm entstehen, was einer Steigung von 71° entspricht. Wie bereits an früherer Stelle angeprochen, ist außerdem der Klassifikationsalgorithmus nicht perfekt. An manchen Stellen wird niedrige Vegetation, Büsche oder junge Bäume, als Boden klassifiziert. Ebenso ist die Unterscheidung von Autos und der Straße schwierig. Wenn sich hier ein Punkt auf der Vegetation und ein eng benachbarter Punkt auf dem Boden befindet, kann es zu starken Steigungen kommen. Die minimale Steigung in Tab. 4.4 ist $0,2$ Grad und nicht, wie vermutet werden kann, 0 Grad. Das liegt an der Klassenbildung, die von 0 bis 45 Grad in $0,2$ Grad Schritten stattfindet. Die erste Klasse fasst demnach die Werte von 0 bis $0,2$ Grad zusammen. Der Anteil der Flächen mit einer Steigung von über 45 Grad ist mit $28.152 / 2.332.257 = 1,2\%$ sehr gering. $98,8\%$ der Daten beinhalten daher für Fußgänger relevante Steigungsbereiche. Die mittlere Steigung beträgt insgesamt $8,06$ Grad, die mittlere Standardabweichung beträgt $9,03$ Grad. Innerhalb der Standardabweichung um den Mittelwert liegen also Steigungen von 0 bis $17,09$ Grad. Diese Zahlen belegen, was auch optisch in Abb. 4.20 sichtbar ist: Nämlich, dass die gemessenen Steigungen, sehr heterogen sind. Uneingeschränkt barrierefreie Wege umfassen lediglich den Bereich von 0 bis $1,73$ Grad (s. Tab. 4.2). Es ist daher nicht damit zu rechnen, dass viele Wege als uneingeschränkt barrierefrei klassifiziert werden.

Zu diesem Zeitpunkt der Bearbeitung liegen zum einen Steigungszellen für das Wege- netz des Untersuchungsgebiets vor. Diese Steigungszellen haben eine Länge von in der Regel 3 Meter und eine Breite, die sich an den Straßentypen orientiert. Die Breite liegt zwischen $0,5$ und $8,5$ Meter. Die Fläche der Zelle beträgt immer minimal $1,49 \text{ m}^2$. Überlappungen von Zellen wurden soweit aufgelöst, dass keine Topologiefehler im Datensatz enthalten sind. Zum anderen wurde ein TIN-Datensatz für das gleiche Untersuchungs- gebiet berechnet, der die Steigungen beinhaltet. Nur die Punkte, für die, zusammen mit benachbarten Punkten, ein TIN berechnet werden konnte, sind in den Datensatz eingeflossen. Alle Flächen, die die Breite der Wege abdecken, aber entweder keine Punkte oder keine Steigungen beinhalteten, wurden entfernt. Der Datensatz besteht demnach aus TINs zwischen Punkten aus dem Datensatz, von denen jedes TIN die Steigung zwischen den beteiligten Punkten beinhaltet.

Mit dieser Basis können die letztendlichen Steigungswerte der Steigungszellen berechnet

werden. Hierfür müssen die Steigungswerte der TINs, die die jeweilige Steigungszelle überlappen, sinnvoll miteinander verrechnet werden. Es gibt zahlreiche statistische Verfahren, die die Steigungen der TINs miteinander verrechnen, um ein Ergebnis zu erhalten. Zu nennen sind hier sicherlich der Mittelwert, der Median, sowie der Maximum- und Minimumwert. Die Anwendung einiger der aufgezählten Methoden ist an dieser Stelle nicht sinnvoll. Minima und Maxima berücksichtigen nur einen der vielen TINs, die für eine Zelle relevant sind. Aus diesem Grund sind diese Verfahren nicht sinnvoll. Der Mittelwert hat Schwächen, wenn er auf wenigen Daten berechnet wird, die zudem Ausreißer enthalten. Es existieren 2.332.257 TIN. Sie liegen auf 51.877 Steigungszellen. Im Durchschnitt wird jede Zelle von 44,97 TIN abgedeckt. Im Durchschnitt sind also genug Daten vorhanden, um den Mittelwert auszuführen. Dennoch kann es im Einzelfall natürlich auch nur deutlich unter 10 TIN oder sogar gar keine TIN pro Zelle geben. Ein Nachteil des Mittelwerts ist, dass der berechnete Ergebniswert nicht in den Daten existieren muss. Dieser Aspekt ist jedoch zu vernachlässigen. Der hier berechnete Mittelwert bezieht nur real existierende Steigungen ein. Auch das Ergebnis ist demzufolge eine Steigung, die, potentiell, real existieren kann. Die Verwendung des Medians ist hingegen nicht sinnvoll, da nur ein Steigungswert aus einer Menge von gebildeten TIN gewählt wird. Dieser muss nicht repräsentativ für die Zelle sein. Wichtige Elemente, die auf der ganzen Wegbreite auftauchen, wie z.B. Schlaglöcher und andere gröbere Unebenheiten, werden mit dem Median somit in vielen Fällen wohl nicht erfasst. Dennoch müssen diese Elemente sich, sofern sie von einem TIN abgebildet werden, im Ergebnis niederschlagen. Aus diesen Gründen wird der Mittelwert gewählt.

4.3.4. Auswertung der Oberflächeninformationen aus dem OSM-Datensatz

Der vorliegende Datensatz umfasst sämtliche Wege aus dem Untersuchungsgebiet Bad Rothenfelde (s. Kap. 2.3). In der unverarbeiteten Fassung stehen 889, bzw. nach Kap. 4.3.2 1079, Features zur Verfügung. Diese sind in elf unterschiedlichen Typen einzuordnen. Tab. 4.1 listet die Wegtypen auf, die im Datensatz vorkommen. In Kap. 4.3.4.1 werden die Wegtypen näher beschrieben. Dabei werden Besonderheiten und Inkonsistenzen in den Kartierungen dieser Typen thematisiert. Ein Fokus liegt auch darauf, ob sich eine Aussage zur Oberflächenbeschaffenheit allein auf Basis des Wegtyps ableiten lässt. In jedem Fall ist es für den Wanderer am besten, wenn der Weg einen befestigten Untergrund hat. Das schließt unterschiedliche Oberflächentypen, wie z.B. Asphalt, Beton und Kopfsteinpflaster mit ein. Unbefestigte Oberflächen sind hingegen i.A. von Menschen nicht veränderte Oberflächen, wie z.B. offener Boden oder Gras. Einen Sonderfall stellt Kies und Schotter dar, den die baufachlichen Richtlinien Vermessung als befestigte Oberfläche einstufen (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016a). In OSM zählt diese Schicht zu den unbefestigten Oberflächen (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Es werden auch spezielle Attribute der Features untersucht. Eine genauere Einordnung der Wege, basierend auf der Auswertung der Attribute, kann dann, in Kap. 4.3.4.2 erfolgen. Grundsätzlich soll die Zuverlässigkeit der Aussagen

so hoch wie möglich sein. So können die wirklich sicheren und geeigneten Wege schneller identifiziert werden. Auf diese Weise steigt das Vertrauen in das Ergebnis und der Wanderer sieht sich weniger mit falschen Wegklassifikationen konfrontiert. Manche Wege lassen sich hinsichtlich der Oberfläche, auf Basis der OSM-Daten, nicht eindeutig klassifizieren. Entsprechend der Datenlage kann dann manchmal keine eindeutige Aussage getroffen werden.

4.3.4.1. Auswertung des Wegtyps

Tab. 4.1 listet die Wegtypen auf, die im Datensatz vorkommen. Ein wichtiger Faktor für Wanderungen auf diesen Wegen ist der Grad der Befestigung. Als befestigte Flächen gelten u.a. Flächen, deren Oberfläche aus Asphalt, Beton oder Pflaster ist (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016a). Unbefestigte Flächen hingegen sind nicht versiegelt. Hierunter fallen z.B. Wege, deren Oberflächen naturbelassen sind. Nachfolgend wird nun näher auf die Wegtypen im Datensatz eingegangen. Es ist zu klären, welche Aussagen sich, auf Basis des OSM-Wegtyps, zur Oberflächenbeschaffenheit des Weges, treffen lassen.

- Das Tag „**highway=cycleway**“ beschreibt Fahrradwege. Die Übersichtsseite für die Kartierung von Fahrradwegen gibt an, dass dieser Tag „ausgewiesene Fahrradwege“ beschreibt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Außerdem impliziert dieser Tag das Zusatz-Tag „**bicycle=designated**“ für ausgeschilderte StVO-Wege (vgl. OpenStreetMap, 2016q). In der Praxis existieren jedoch unterschiedliche Auffassungen darüber, wie diese Wege kartiert werden (vgl. OpenStreetMap, 2016b). Manche Kartierer kartieren einen Weg als Radweg dann, wenn auf ihm nach Auffassung des Kartierers „zügiges/sicheres“ Radfahren möglich ist (vgl. OpenStreetMap, 2016b). Hierbei stellt lediglich das Urteilsvermögen des Kartierers das Kriterium für das Ergebnis dar. Dies widerspricht dem ursprünglichen Gedanken, wonach Wege mit „**highway=cycleway**“ ausschließlich nach StVO ausgeschilderte Wege sind. Diese Feststellung ist wichtig, da StVO-Wege in dieser Arbeit grundsätzlich als befestigte Wege angesehen werden, deren Oberfläche, auch für Wanderer, geeignet ist. Dahingegen ist die Auffassung „zügiges/sicheres“ Radfahren nach Meinung des Kartierers als deutlich unsicherer einzustufen und erlaubt keine sichere Aussage über die Oberflächenbeschaffenheit. Eine Einordnung als StVO-Weg kann daher nur erfolgen, wenn explizit das Tag „**bicycle=designated**“ oder „**bicycle=official**“ eingetragen ist. Das Tag „**bicycle=official**“ ist restriktiver als „**bicycle=designated**“, da hiermit nur Wege mit einem offiziellen Verkehrsschild gemeint sind (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Wohingegen „**bicycle=designated**“ angibt, dass dieser Weg, üblicherweise durch eine Behörde, für den Radverkehr vorgesehen ist (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Aber auch hier können Schilder nach StVO den Weg beschreiben. Zusammengefasst beschreibt das Tag „**highway=cycleway**“ Wege, die der Kartierer als geeignet für den Fahrradverkehr einstuft, sowie mit dem Zusatz-Tags „**bicycle=designated**“ und „**bicycle=official**“ spezielle, von den Behörden angelegte, teilweise nach StVO ausgeschilderte, Wege. Aber auch wenn die zwei Tags

nicht vorhanden sind, ist eine Befestigung des Weges zumindest wahrscheinlich, da „highway=cycleway“ speziell für Radwege vorgesehen ist. Für einen sicheren Radverkehr sind befestigte Wege wichtig. Mit dem zusätzlichen Tag „foot=yes“ kann angegeben werden, dass auch Fußgänger diesen Weg benutzen dürfen.

- Auch beim Tag „**highway=footway**“ gibt es Inkonsistenzen in der Kartierung. Einerseits soll die Beschreibung von Fußwegen mit diesem Tag implizit rechtlich, also nach Vorschriftzeichen 239 der StVO für ausgewiesene Fußwege, erfolgen (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Andererseits sind für einen entsprechenden Weg auch andere Kartierungsvarianten mit „highway=path“, für Mehrzweckwege, erlaubt (vgl. OpenStreetMap, 2016a). Eine Ausnahme besteht in der Kartierung von straßenbegleitenden Bürgersteigen. Außerdem existieren analog zu „highway=cycleway“ Unstimmigkeiten in der Community über die Kartierungsart (vgl. OpenStreetMap, 2016b). Manche Kartierer setzen „highway=footway“ mit „highway=cycleway“ in Beziehung und kartieren einen Weg als „highway=footway“, wenn er für Radfahrer nicht geeignet ist. Auch hier steht dann der subjektive Eindruck im Vordergrund. Um sicherzugehen, dass es sich um einen StVO-Weg handelt, sind, analog zu „highway=cycleway“, die zusätzlichen Tags „foot=designated“ und „foot=official“ entscheidend. Irrelevant ist dann, ob der Weg als Fußweg („highway=footway“) oder als Mehrzweckweg („highway=path“) kartiert ist. Sollte „foot=designated“ oder „foot=official“ für den Weg nicht vorhanden sein, ist diese restriktive Vorgabe zur Erkennung von von Behörden angelegten und damit befestigten Wegen nicht erfüllt. In diesem Fall wird der Weg als nur vom Kartierer für Fußgänger geeignet angesehen. Eine eindeutige Aussage über die Oberflächenbeschaffenheit kann dann nicht getroffen werden. Dennoch ist bei der Einordnung eines Weges als „highway=footway“ von einer gewissen Eignung für Fußgänger auszugehen, da es sich bei diesem Tag um ein Tag speziell für Fußgänger handelt. Daher wird eine Befestigung des Weges als wahrscheinlich angesehen. Zumal bspw. Trampelpfade, die nicht befestigt sind, mit „highway=path“ und „informal=yes“, also auf eine andere Weise kartiert werden sollen (vgl. OpenStreetMap, 2016q).
- Das Tag „**highway=living_street**“ bezeichnet verkehrsberuhigte Straßen in geschlossenen Ortschaften. Hier ist Schrittgeschwindigkeit zulässig und Fußgänger dürfen den gesamten Straßenbereich nutzen (StVO Anlage 3 zu §42 Absatz 2 Nr. 12). Kinderspiele sind überall erlaubt (StVO Anlage 3 zu §42 Absatz 2 Nr. 12). An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass die Oberfläche von verkehrsberuhigten Bereichen in Deutschland immer befestigt ist.
- Mit „**highway=path**“ werden Mehrzweckwege für nicht-motorisierten Verkehr getaggt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Es ist die Nutzung durch verschiedene Verkehrsteilnehmer hervorzuheben. Hierüber erfolgt die Abgrenzung zu „highway=footway“ und „highway=cycleway“. Wobei auch hier, wie bemerkt, Ausnahmen möglich sind. Speziell werden mit diesem Tag auch gemeinsam genutzte Fuß- und Radwege nach StVO getaggt. Analog zu Fuß- und Radwegen müssen hierfür die Zusatz-Tags „foot=designated“ und „bicycle=designated“ oder

„foot=official“ und „bicycle=official“ eingetragen sein. Die StVO kann vorschreiben, dass die Nutzfläche getrennt wird, wodurch sich Fußgänger bspw. nur auf der rechten oder linken Seite des Weges aufhalten dürfen. Dieser Umstand kann mit dem zusätzlichen Attribut „segregated=yes“ oder „segregated=no“ ausgedrückt werden. Trampelpfade werden mit dem Zusatz „informal=yes“ kartiert. Wege mit „highway=path“ beinhalten grundsätzlich erst einmal nicht StVO-Wege und können daher jeden möglichen Weg abbilden. Das Tag wird auch für nicht offiziell angelegte Wege verwendet. Die Oberflächenbeschaffenheit ist daher ohne weitere Information, bspw. durch „foot=designated“ oder „bicycle=designated“, unklar.

- Anliegerstraßen werden mit „**highway=residential**“ beschrieben. Sie erschließen Siedlungsgebiete und haben nur unerheblichen Durchgangsverkehr. Überwiegend dienen sie der Erschließung, Aufenthalt, Spiel und Freizeit (vgl. Land Brandenburg, 2012, S. 8). Sie unterscheiden sich von Wegen mit „highway=living_street“ dadurch, dass sie keine generelle Geschwindigkeitsbegrenzung und Fußgänger keine Priorität gegenüber Fahrzeugen haben. Auch „highway=unclassified“ beschreibt häufig Straßen mit wenig Durchgangsverkehr. Während „highway=residential“ für die Erschließung von und in Siedlungsgebieten verwendet wird, bezeichnet „highway=unclassified“ Vebindungsstraßen außerorts (vgl. OpenStreetMap, 2016q). 78 von 149 (52%) aller Anliegerstraßen im Datensatz haben über das Tag „surface“ eine spezielle Angabe zum vorherrschenden Oberflächentyp. Nach einer genaueren Auswertung ergibt sich, dass alle 78 entweder asphaltiert oder gepflastert und damit im Allgemeinen befestigt sind. Alle anderen Anliegerstraßen sind mit diesem Tag nicht näher spezifiziert. In Anlehnung daran, dass ca. die Hälfte der Anliegerstraßen befestigt sind, wird zumindest in der Stadt Bad Rothenfelde an dieser Stelle von einer generellen Befestigung von Anliegerstraßen ausgegangen. Eine Garantie ist das jedoch, gerade für ländliche Gebiete und die Erschließung von einzelnen Häusern und Bauernhöfen, nicht. In Brandenburg etwa gibt es vielfach noch unbefestigte Wege in ländlichen Gebieten (vgl. Land Brandenburg, 2012, S. 23). Gründe hierfür können in der Finanzierung und Rentabilität dieser Straßen mit sehr geringem Durchgangsverkehr liegen (vgl. Land Brandenburg, 2012, S. 5). Eine Unterscheidung von innerörtlichen und außerörtlichen Straßen ist mit dem vorliegenden Datensatz nicht möglich. Daher kann die oben genannte Unterscheidung und Feststellung sich so nicht im Ergebnis widerspiegeln. Grundsätzlich wird die Maßgabe verfolgt, ein möglichst zuverlässiges Ergebnis zu erreichen. Da in den allermeisten Fällen von einer Befestigung der Straße ausgegangen werden kann und es womöglich in ländlichen Gebieten einige Ausnahmen gibt, ist, wenn keine weiteren Daten vorliegen, die Befestigung von Anliegerstraßen, im Allgemeinen wahrscheinlich.
- Landes- und Kreisstraßen, im Ausnahmefall auch Bundesstraßen, werden mit dem Tag „**highway=secondary**“ getaggt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Sie verbinden kleinere Städte oder größere Ortschaften. Wie das Wort „secondary“ bereits vermuten lässt, gibt es auch „highway=primary“ und „highway=tertiary“. Die Ein-

ordnung einer Straße in eine dieser Kategorien hängt von ihrem Ausbaugrad ab. Weiterhin spielt die Verkehrsbedeutung eine Rolle. Ein Maß hierfür ist die Verkehrsdichte. So können Straßen auch als „primary“ kartiert werden, wenn sie amtlich niedriger klassifiziert sind aber durch über 10.000 Kfz am Tag eine übergeordnete Verkehrsbedeutung besitzen (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Eine Kreis- oder Landesstraße, die Orte verbindet und die eine große Anzahl an Kfz am Tag nutzen, ist in jedem Fall befestigt. Es wird weiterhin angenommen, dass sie asphaltiert ist.

- Zufahrtswege werden mit „highway=service“ getaggt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Hiermit sind Zufahrtswege zu Gebäuden aller Art, Tankstellen, Stränden, Campingplätzen, Industriegebieten, Gewerbegebieten, Parkplätzen u.a. gemeint. Für eine genauere Spezifizierung, um welche Art Zufahrtsweg es sich handelt, ist das Tag „service“ zuständig (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Es kann sein, dass die Zufahrtswege innerhalb einer Fläche liegen. Beispiele hierfür sind Tankstellen und Parkplätze. Hier wird das gesamte Areal als Fläche kartiert. Die einzelnen Fahrspuren eines Parkplatzes können dann mit „highway=service“ getaggt werden. Die obige Auflistung zeigt viele verschiedene Typen von Zufahrtswegen. Nicht alle müssen dabei von öffentlicher Hand angelegt worden sein, sondern können im Privatbesitz sein. Beispiele dafür sind Zufahrten zu Campingplätzen oder zu Häusern. Nur allein aus dem Wissen heraus, dass es sich um einen Zufahrtsweg handelt, kann keine Aussage zur Oberflächenbeschaffenheit getroffen werden. Sehr wohl ist bei einer genaueren Betrachtung eine Bestimmung möglich.
- Treppen haben das Tag „highway=steps“. Es umfasst verschiedene Arten von Treppen. Die Unterscheidung erfolgt über zahlreiche Attribute, wie z.B. Stufenanzahl („step_count“), Neigung („incline“), das Vorhandensein einer Rampe („ramp“) und anderen (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Näheres dazu ist in Kap. 4.2.4 zu lesen. Treppen, wie sie hier kartiert werden, sind immer von Menschen gemacht. Regularien schreiben eine bestimmte Oberfläche vor. Der Richtlinie zur Anlage von Stadtstraßen zufolge, sollen Treppen „im Allgemeinen mit einer griffigen und rutschhemmenden Oberfläche versehen werden“ (Baier, 2007, S. 88). Ohne weitere Angaben wird daher angenommen, dass die Oberfläche von Treppen für Wanderer kein Problem darstellt.
- Verbindungsstraßen mit „highway=tertiary“ sind denen mit „highway=secondary“ untergeordnet. „highway=secondary“ wird Kreis-, Landes- und sogar Bundesstraßen zugeordnet. Das Tag „highway=tertiary“ beschreibt hingegen schwächer ausgebauten Straßen mit geringerem Durchgangsverkehr (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Hierunter können auch Kreisstraßen fallen, die aufgrund dieser Kategorien nicht als „highway=secondary“ kartiert werden. Im Allgemeinen aber auch Gemeindeverbindungsstraßen ohne amtliche Bezeichnung dieser Art. Sie dienen auch der Verbindung von lokalen Zentren und dem interregionalen Verkehr. Nicht immer haben sie einen Mittelstreifen. Es wird angenommen, dass diese Straßen, wenn keine anderen Informationen vorliegen, asphaltiert und damit befestigt sind.

- Wirtschafts-, Feld- oder Waldwege werden mit „highway=track“ getaggt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Der Zweck der Nutzung unterscheidet dieses Tag von ähnlichen, wie z.B. „highway=unclassified“ oder „highway=service“. „highway=track“ sollte verwendet werden, wenn es sich um Wege handelt, die primär oder ausschließlich der Bewirtschaftung von Flächen dienen. Diese Straße dient nicht dem Anwohnerverkehr. „highway=unclassified“ wird ebenfalls hauptsächlich in ländlichen Gebieten verwendet und zwar für Verbindungsstraßen zwischen Bauernhöfen und Dörfern. Hier findet Anwohnerverkehr statt. Handelt es sich hingegen um einen Zufahrtsweg, zu z.B. einem Wohnhaus oder einer landwirtschaftlichen Anlage, ist „highway=service“ als Bezeichnung angebracht (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Das Tag „highway=track“ kann unterschiedliche Wege repräsentieren. Zudem stellen nicht alle landwirtschaftlichen Maschinen Anforderungen an eine gut ausgebaute Straße. Aus diesem Grund ist die Oberfläche zunächst unklar. Nähere Aussagen zur Oberfläche sind nur möglich, wenn weitere, spezielle, Oberflächen-Tags gegeben werden.
- Straßen, die meist schmaler sind als „highway=tertiary“ und weniger Durchgangsverkehr besitzen, werden mit „highway=unclassified“ getaggt. Dennoch sind sie für den motorisierten Verkehr freigegeben. Sie können eine Erschließungsfunktion erfüllen und Teil von Infrastrukturen, wie Buslinien, sein. Straßen mit „highway=unclassified“ sind Nebenstraßen und dienen oft der Verbindung in ländlichen Gebieten. Sie sind nicht zu verwechseln mit Straßen ohne Klassifizierung. Der OSM-Dokumentation zufolge handelt es sich bei diesen Wegen um befestigte Wege (vgl. OpenStreetMap, 2016q).

Jedes Wegfeature im Datensatz hat Informationen darüber, um welchen Typ eines Weges es sich handelt. Darüber hinaus können weitere Tags angegeben worden sein. Doch nicht jedes Feature im Datensatz wird mit zusätzlichen Tags beschrieben. Manchmal sind keine zusätzlichen Tags vorhanden. Wiederum an anderen Stellen stehen Tags, aus denen sich keine sinnvolle Aussage ableiten lässt. Bei den Tags ist zu beobachten, dass manche jeden Wegtyp beschreiben können, wie z.B. das Tag „surface“. Andere sind jedoch nur bei bestimmten Typen sinnvoll, wie bspw. die Anzahl der Treppenstufen. Aus diesen Gründen wurden bisher ausschließlich die Straßentypen hinsichtlich möglicher Aussagen zur Oberflächenbeschaffenheit untersucht. Dies ist vor allem dann relevant, wenn keine weiteren Tags vorhanden sind, die die Oberfläche näher beschreiben. In diesem Fall kann einzig und allein der Wegtyp herangezogen werden. Tab. 4.5 zeigt eine Übersicht der bisherigen Feststellungen.

4.3.4.2. Auswertung der Tags

Nachdem bis jetzt ausschließlich die Wegtypen eine Rolle für die Auswertung spielten, werden nun auch die Attribute einbezogen. Neben dem „highway“-Tag, ID-Tags und nodes kommen 37 weitere Tags im Datensatz vor. Zum einen handelt es sich dabei um, für die Bestimmung der Oberfläche relevante, Tags. Darüber hinaus existieren Tags,

Tabelle 4.5.: Die Oberflächenbeschaffenheit aller vorkommenden Wegtypen im Datensatz, ausschließlich basierend auf der Auswertung der Wegtypen und den Kartierungsvorschriften von OSM. Sind für das konkrete Feature weitere, oberflächenrelevante Tags vorhanden, können sich die Aussagen über den Oberflächentyp ändern. Quelle: eigene Darstellung.

Wegtyp	Oberflächenbeschaffenheit
cycleway	wahrscheinlich befestigt
footway	wahrscheinlich befestigt
living_street	befestigt
path	unklar
residential	wahrscheinlich befestigt
secondary	befestigt, asphaltiert
service	unklar
steps	befestigt
tertiary	befestigt, asphaltiert
track	unklar
unclassified	befestigt

die für OSM wichtig sind. Diese beschreiben das Feature inhaltlich nicht näher. Zuletzt gibt es Tags, die das Feature inhaltlich beschreiben, aber nicht oberflächenrelevant sind. Tab. 4.6 listet die oberflächenrelevanten Tags, mit einer kurzen Beschreibung, auf.

Neben den Tags, die Informationen zu Oberflächentypen und -beschaffenheiten liefern, existieren weitere, für die das nicht gilt. Sie kommen nicht in Tab. 4.6 vor. Da sie nicht relevant sind, werden sie nicht weiter untersucht. Der Vollständigkeit halber werden sie nun aufgelistet.

- OSM-spezifische Tags: created_by, FIXME, source, timestamp, user, visible, note
- andere Tags: access, covered, horse, junction, lanes, lanes_backward, layer, lcn, lit, maxspeed, motor_vehicle, motorcar, motorcycle, name, noexit, oneway, ref, tunnel, width

Jedes der vorkommenden Tags wurde nun also einer Gruppe zugeordnet. Für die Einordnung jedes Tags zu einer Gruppe existieren Gründe. Aufgrund der Anzahl ist eine detaillierte Erläuterung nicht in jedem Fall möglich. Am Wichtigsten sind die Tags, die in Tab. 4.6 genannt werden. Die Einschätzung, welche Oberflächenbeschaffenheit ein Weg besitzt, basiert zu einem großen Teil auf diesen Tags. Aus diesem Grund werden sie nun im Folgenden näher betrachtet. Es wird auf ihre Bedeutung ebenso eingegangen, wie auf ihre Werteausprägungen. Nicht jede Werteausprägung ist dabei relevant. Interessant ist daher, welche Werte welche Aussage zur Oberfläche des Weges zulassen. Ausgewählte Tags aus den anderen Gruppen werden ebenso thematisiert. Im Fokus hierbei steht ihre Relevanz zur Bestimmung der Oberfläche. Die diesbezügliche Einordnung einiger dieser Tags in ihre Gruppen ist diskussionswürdig. Doch zunächst Erläuterungen zu Tab. 4.6.

Tabelle 4.6.: Tags, die im Datensatz vorkommen und die Oberfläche von Features näher beschreiben. Quelle: eigene Darstellung, OpenStreetMap, 2016q.

Tag	Beschreibung	vorkommende Tag-Ausprägungen
bicycle	Nutzungsvorschrift/-erlaubnis für Radfahrer	designated, official, no, yes
bridge	Brücke	yes
cycleway	Radfahrstreifen auf oder an der Fahrbahn einer Straße	no, track
foot	Nutzungsvorschrift/-erlaubnis für Fußgänger	designated, official, permissive, no, yes
footway	Fußweg entlang einer Strasse	sidewalk
segregated	Gemeinsamer (Zeichen 240) oder getrennter Fuß- und Radweg (Zeichen 241) nach StVO	no
service	Zusätzliche Informationen für die Verwendung von Zufahrtsstraßen mit „highway=service“	alley, driveway, parking_aisle
sidewalk	Gibt an, ob ein Bürgersteig neben der Straße vorhanden ist	both, none, separate
smoothness	Beschreibt die Oberfläche von Wegen in Bezug auf die Nutzbarkeit von Fahrzeugen	bad, good, intermediate
surface	Oberfläche eines Weges oder einer Fläche	asphalt, cobblestone, compacted, concrete, dirt, grass, gravel, ground, paved, paving_stones, pebblestone, unpaved
tracktype	Unterhaltungszustand und Oberflächenfestigkeit von Wegen	grade1, grade2, grade3, grade4

- Das Tag „**bicycle**“ beschreibt viele unterschiedliche Straßentypen näher (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Dazu zählen Mehrzweckwege, Fußwege, Wirtschaftswege, Anlieger-, Zufahrts- und Verbindungsstraßen und natürlich Radwege. Es bildet amtliche Vorgaben zu erlaubter und vorgesehener Nutzung von Wegen für Radfahrer ab. Werte zur erlaubten Nutzung sind „yes“ und „no“. Die Angabe von Zugangsbeschränkungen macht Sinn, da sie sich nicht aus dem Wegtyp ergeben. Auf einer Autobahn ist dies bspw. nicht der Fall, da hier grundsätzlich ein Verbot von Radverkehr angenommen wird. Relevante Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit von Wegen, lassen sich jedoch aus diesen Angaben nicht ableiten. Mit „yes“ und „no“ sollen lediglich Zugangsbeschränkungen ausgedrückt werden, nicht jedoch die Eignung von Radfahrer für diesen Weg. Wichtig dagegen sind die Werte „official“ und „designated“. Wie bereits in der Erläuterung des Wegtyps „cycleway“ erwähnt, werden sie für spezielle, von den Behörden angelegte, teilweise nach StVO ausgeschilderte, Wege genutzt. Diese Wege können nur ihre Funktion erfüllen.

len, wenn sie eine variable, teilweise große Anzahl von Verkehrsteilnehmern, bei jedem Wetter aufnehmen können. Daher sind sie immer befestigt.

- Brücken mit Tag „**bridge=yes**“ sind immer anthropogene Objekte. Eine sichere Überquerung von Hindernissen wie Flüssen oder anderen Straßen und Wegen ist nur möglich, wenn feste Materialien verwendet werden. Aus diesem Grund ist die Oberfläche von Brücken immer befestigt. Nähere Aussagen zum Oberflächentyp sind nicht möglich. Schließlich können verschiedene Oberflächentypen verbaut sein, wie z.B. Holz oder Asphalt.
- Mit „**cycleway**“ werden Radfahrstreifen an und neben der Fahrbahn getaggt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Die Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) schreiben vor, dass Radfahrstreifen von der Straßenfahrbahn abgetrennt werden und von Radfahrern benutzt werden müssen, was durch Zeichen 237 der StVO („Radfahrer“) verdeutlicht wird (vgl. Baier, 2007, S. 78). Wege mit diesem Tag sind immer befestigt. Zum einen bringt die Benutzungspflicht auch den Auftrag an Behörden mit sich, entsprechende Oberflächenbedingungen des Weges für die Benutzung zu schaffen. Zum anderen macht es keinen Sinn, einen unbefestigten Radfahrstreifen neben einer befestigten Straßenfahrbahn anzulegen, die nur durch einen Markierungsstreifen voneinander getrennt sind.
- Mit dem Tag „**foot**“ werden analog zu „**bicycle**“ amtliche Vorgaben zu erlaubter und vorgesehener Nutzung von Wegen für Fußgänger ausgedrückt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Die vorkommenden Tag-Ausprägungen haben dieselbe Bedeutung wie für Radfahrer, nur entsprechend für Fußwege. Mit „**permissive**“ kommt eine neue Tag-Ausprägung vor. „Permissive“ bedeutet, dass der Eigentümer des Weges der Öffentlichkeit die Nutzung erlaubt, womöglich auf eigene Gefahr. Ähnlich wie die Zugangsbeschränkungen mit „yes“ und „no“ ist „permissive“ für die Beschreibung der Oberfläche irrelevant. Analog zu „**bicycle**“ kann bei den Werten „**designated**“ und „**official**“ von einer Befestigung des Weges ausgegangen werden.
- Bürgersteige neben der Straße werden mit dem Tag „**footway**“ und dem Wert „**sidewalk**“ gekennzeichnet (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Hierbei handelt es sich um parallel zur Straße verlaufende Fußwege. Sie sind durch einen Grünstreifen oder einen Bordstein von der Straße getrennt. Die Norm DIN 18040-2 schreibt vor, dass Gehwege eine feste Oberfläche aufweisen müssen (vgl. Architektenkammer Niedersachsen, 2016, S. 11). Ohne weitere Angaben werden Bürgersteige auch hier als befestigte Wege angesehen.
- Das Tag „**segregated**“ ist sinnvoll bei der Beschreibung von Wegen, die Fußgänger und Radfahrer gleichermaßen nutzen. Wird der Wert „yes“ dem Tag zugewiesen, dürfen Fußgänger und Radfahrer nur jeweils eine Seite des Weges nutzen. Nur bei einer entsprechenden Beschilderung nach StVO darf dieses Tag verwendet werden (vgl. OpenStreetMap, 2016q). „**segregated**“ kommt also nur bei Fuß- oder Radwegen, die nach StVO angelegt wurden, vor. Aussagen zur Oberfläche sind daher

analog zu bspw. „foot=designated“ und „foot=official“, die beide amtlich angelegte Wege beschreiben, die eine feste Oberfläche haben.

- Die Oberfläche von Zufahrtswegen mit „**highway=service**“ ist ohne weitere Angaben, bspw. durch das Tag „service“, unklar. Schließlich gibt es unterschiedliche Arten von Zufahrtswegen. „service“ definiert die Art des Zufahrtswegs näher (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Die vorkommenden Werte sind „alley“, „driveway“ und „parking_aisle“. Es ist zu klären, ob diese drei Werte Schlüsse auf die vorherrschende Oberfläche zulassen. „alley“ bezeichnet schmale Gassen zwischen Häusern, die sich in der Regel in städtischen Gebieten befinden und meist mit dem Auto befahrbar sind. Aufgrund dieser Eigenschaften ist eine Befestigung wahrscheinlich, nähtere Schlüsse zur Oberfläche sind aber nicht möglich. „driveway“ bezeichnet Auffahrten zu Häusern oder einer Firma. Weiterhin ist hier das Attribut „access“ sinnvoll, das angibt, ob die Straße öffentlich zugänglich ist. Zufahrten dienen der Erschließung von Gebäuden und werden regelmäßig genutzt. Sie ermöglichen den Bewohnern oder dem Personal den Zutritt zum Gebäude. Eine Befestigung ist daher wahrscheinlich. Mit „parking_aisle“ werden die einzelnen Nebenfahrwege eines Parkplatzes getaggt (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Der Hauptfahrweg eines Parkplatzes soll ausschließlich mit „highway=service“ getaggt werden. Ein Parkplatz muss für gewöhnliche Autos bei jeder Jahreszeit nutzbar sein. Das ist bei unbefestigtem Untergrund, wie z.B. Gras oder Mutterboden nicht gegeben. Daher wird ein solcher fest angelegter Parkplatz aller Wahrscheinlichkeit nach eine feste Oberfläche besitzen.
- Das Tag „**sidewalk**“ ist ähnlich zu „footway“. Beide beziehen sich auf Bürgersteige. Während „footway“ jedoch im Datensatz nur als Zusatz-Tag zu „highway=footway“ vorkommt, kommt „sidewalk“ auch für andere Wegtypen vor. Bei „footway“ existieren die Bürgersteige als eigenständiges Feature neben dem Straßenfeature. Mit „sidewalk“ existiert ausschließlich ein Straßenfeature, dem Informationen zu Bürgersteige angehängt werden. In diesem Fall kann der Bürgersteig selbst nicht näher durch andere Tags beschrieben werden, da sich alle Tags auf das Straßenfeature beziehen. Wie allerdings bei „footway“ bemerkt, müssen Fußwege immer befestigt sein. Aus diesem Grund sind auch Bürgersteige, die mit „sidewalk“ getaggt werden, immer befestigt.
- Das Tag „**smoothness**“ ist eines der wichtigsten Tags zur Beschreibung der Oberfläche von Wegen. Es beschreibt jedoch nicht die Oberfläche an sich, sondern gibt nur deren potentielle Nutzbarkeit durch Fahrzeuge an (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Zu Fahrzeugen zählen neben den Kfz auch u.a. Rollstühle, Kinderwagen und Inline-Skater. Die Wege im Datensatz werden mit den Werten bad, good oder intermediate beschrieben. Abb. 4.21 zeigt die vorkommenden Nutzbarkeitsgrade. Zwischen diesen drei Graden sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Allein durch optische Betrachtung ist schon zu bemerken, dass „good“ wohl zufriedenstellend für Menschen mit Handicap wäre, wohingegen „bad“ einen unbefestigten Weg darstellt. Der OSM-Dokumentation zufolge gibt „good“ an, dass der Weg von Fahrern



Abbildung 4.21.: Verschiedene Grade der Nutzbarkeit eines Weges. Beschreibung der Grade erfolgt durch das OSM-Tag „smoothness“. Links oben: „smoothness=good“, rechts oben: „smoothness=intermediate“, unten: „smoothness=bad“. Quelle: OpenStreetMap, 2016q.

mit dünn bereiften Rennrädern, nicht jedoch von Inline-Skatern oder Skateboard-Fahrern genutzt werden kann (vgl. OpenStreetMap, 2016q). „intermediate“ ist gerade noch von Rollstuhlfahrern nutzbar. Für „bad“ gilt dies nicht mehr. Hier sind robuste Trekking-Fahrräder und normale Autos ausreichend. Entsprechend dieser Ausführungen erfolgt die Einordnung der im Datensatz vorkommenden Wege.

- Das Tag „**surface**“ ist sicherlich am aussagekräftigsten, wenn es um die Bestimmung der Oberfläche geht. Schließlich gibt es den Oberflächentyp direkt an (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Im Datensatz kommen verschiedene Oberflächentypen vor (s. Tab. 4.6). Diese lauten: „asphalt“ (dt.: Asphalt), „cobblestone“ (dt.: Pflaster aus unbehauenem Naturstein), „compacted“ (dt.: befestigte und verdichtete Deckschicht aus einem gebrochenen Natursteinmaterial), „concrete“ (dt.: Beton), „dirt“ (dt.: unbedeckter, unebener Mutterboden), „grass“ (dt.: Gras), „gravel“ (dt.: loser Schotter), „ground“ (dt.: gewachsene, naturbelassene Oberfläche), „paved“ (dt.: befestigte Oberfläche), „paving_stones“ (dt.: Pflastersteine, meist aus Beton), „pebblestone“ (dt.: loser Kies), „unpaved“ (dt.: unbefestigt). Diese Auflistung beinhaltet eine Zahl von befestigten und unbefestigten Oberflächen. Am Ende soll es möglich sein, Straßen mit einem persönlich passenden Oberflächentyp für Wanderungen auszuwählen. Um das zu erreichen, ist zunächst zu

klären, welche der genannten Oberflächentypen befestigt und welche unbefestigt sind. Der Objektartenkatalog für Straßenverkehrsanlagen der Baufachlichen Richtlinien Vermessung enthält genaue Angaben darüber, was unter einer befestigten Fläche zu verstehen ist (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016a). Hierunter fallen: Asphaltdecke, Betondecke, Betonsteinpflaster, Betonplatten, Deckschicht ohne Bindemittel (Kies o.ä.), Klinkerpflaster, Natursteinpflaster, Natursteinplatten, Rasensteine, Schotterrasen. Kies- und Schotterflächen kommen im Datensatz vor. Sie werden entsprechend als befestigt eingestuft. Es ist zu klären, ob Kies- und Schotteroberflächen geeignet für Menschen mit Handicap sind. Da die Zielgruppe sehr weit gefasst ist, ist dies nicht eindeutig zu bestimmen. Jede Zielgruppe, sogar jede einzelne Person, besitzt einen anderen Einschränkungsgrad und hat daher auch andere Anforderungen an die Festigkeit der Oberfläche. Zudem kommt es stark auf die Art und den Zustand der Kies- oder Schotterfläche an. Dünner Kies über einer festen und ebenen Oberfläche kommt oft in Parks vor und ist für Fußgänger kein Problem. In Tab. 4.7 werden die vorkommenden und genannten Oberflächentypen in die Gruppen „befestigt“ und „unbefestigt“ eingeordnet.

- Zuletzt stellt „**tracktype**“ ein oberflächenrelevantes Tag dar. Das Tag gibt den Unterhaltungszustand des Weges, v.a. im Bezug auf die Oberflächenfestigkeit, an. Im Datensatz kommen die Werte „grade1“, „grade2“, „grade3“ und „grade4“ vor. Hierbei bezeichnet „grade1“ den besten Zustand, „grade4“ den schlechtesten. „grade1“ steht für einen wasserfesten Belag (z.B. Asphalt), „grade2“ für eine wassergebundene Decke (z.B. Schotter), „grade3“ für einen befestigten oder ausgebserten Weg (z.B. Feinschotter und Sand), „grade4“ für einen unbefestigten Weg mit hauptsächlich weichen Materialien und Pflanzenbewuchs (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Entsprechend der Einordnung des Objektartenkatalogs für Straßenverkehrsanlagen der Baufachlichen Richtlinien Vermessung (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016a) wird festgelegt, dass es sich bei „grade1“ und „grade2“ um befestigte Oberflächen handelt. Entsprechend sind „grade3“ und „grade4“ in die Gruppe der unbefestigten Oberflächen einzurufen.

Tabelle 4.7.: Einordnung der im Datensatz vorkommenden Oberflächentypen mit dem Tag „surface“ in befestigte und unbefestigte Oberflächen. Quelle: eigene Darstellung.

Befestigte Oberfläche	asphalt, cobblestone, compacted, concrete, paved, paving_stones
Unbefestigte Oberfläche	dirt, grass, gravel, ground, pebblestone, unpaved

An dieser Stelle wurden Erläuterungen zu allen relevanten Tags gegeben, die die Oberfläche beschreiben. Dennoch wurde die Nichtberücksichtigung anderer Tags noch nicht

begründet. Sicherlich wäre die Erläuterung aller anderen, über 20, Tags an dieser Stelle zu umfangreich. Dennoch wird im Folgenden auf einige ausgewählte diskussionswürdige Entscheidungen eingegangen.

- Das Tag „**maxspeed**“ ist bspw. in Kombination mit „highway=service“ zu finden und gibt die maximal zulässige Geschwindigkeit in km/h an (vgl. OpenStreetMap, 2016q). Nicht jeder Zufahrtsweg in „highway=service“ ist befestigt. Ein Zufahrtsweg kann bspw. innerorts als befestigter Parkplatz angelegt sein. Andererseits kann er auch außerorts zu einem Campingplatz oder zu einem Parkplatz in einem touristischen Gebiet führen. Auch wenn ein Feature den Wert „maxspeed=20“ besitzt, ist aus diesem Wert jedoch noch keine Aussage abzuleiten, welche Oberfläche der Weg besitzt. Eine Maximalgeschwindigkeit von 20 kann auf asphaltierten Straßen gelten, um die Lärmelastung zu reduzieren. Gleiches kann sie Ausdruck eines schlechten Zustands der Straße sein. Aufgrund des hohen Interpretationsspielraums wird das Tag „maxspeed“ nicht weiter berücksichtigt.
- Das Tag „**lcn**“ gibt ausgewiesene, lokale Fahrradrouten an. Diese Fahrradrouten befinden sich innerhalb eines Landkreises oder einer Gemeinde. Sie können in einer Tagesetappe befahren werden und werden von einer einzelnen Organisation, nicht zwangsläufig einer Behörde, betrieben (vgl. OpenStreetMap, 2016e). Es sollen Routen erfasst werden, die auch in der Realität existieren. Abgesehen davon ist es das Ziel, alle Arten von Wegen so zu kartografieren, dass die Befahrbarkeit für Radfahrer darstellbar ist (vgl. OpenStreetMap, 2016e). Die Routen müssen ausgeschildert sein und einen Anfang und ein Ende haben. Es ist zu diskutieren, ob die alleinige Ausweisung als Fahrradroute die Schlussfolgerung eines befestigten Untergrunds zulässt. OSM gibt hierzu keine Vorgaben. Denkbar wären an manchen Stellen womöglich Formen von Schotterpisten, auf denen Menschen mit Handicap, etwa mit Rollstuhl oder Rollator, nicht zureckkommen. Auch wenn womöglich viele dieser Wege befestigt sind, können bspw. breite Waldwege mit festgetretenem Boden und Schlaglöchern nicht ausgeschlossen werden. Um sicher zu gehen, wird, basierend auf diesem Tag, keine eindeutige Aussage hinsichtlich der Oberfläche, getroffen. Dieses Tag wird daher nicht weiter berücksichtigt.
- Das Tag „**horse**“ weist aus, ob auf einem Weg Pferde erlaubt sind oder nicht. Möglicherweise kann intensiver Pferdeverkehr auf lockerem Untergrund dazu führen, dass dieser Weg unbenutzbar für Menschen mit Handicap wird. Das trifft auf Wege zu, deren Oberfläche unklar oder unbefestigt ist. Hierzu zählen auch forst- und landwirtschaftliche Wege. Im Datensatz wird das Tag „horse=yes“ ausschließlich bei Anliegerstraßen in städtischen Wohngebieten und Radwegen gesetzt. Von Anliegerstraßen in städtischen Wohngebieten wird angenommen, dass sie immer befestigt sind. Die Radwege, bei denen „horse=yes“ eingetragen ist, haben im Untersuchungsgebiet außerdem immer das Tag „surface=asphalt“. Insgesamt können also Einflüsse auf den Untergrund für Menschen mit Handicap durch das Tag „horse“ ausgeschlossen werden.

- Nicht ausreichend sind die Erkenntnisse, die aus „`lit`“ und „`tunnel`“ hinsichtlich der Oberfläche gewonnen werden können. „`lit`“ gibt an, ob ein Weg beleuchtet ist. „`tunnel`“ bezeichnet Tunnel im Datensatz. Es ist anzunehmen, dass beleuchtete Straßen nur dort vorkommen, wo regelmäßiger Verkehr und damit auch gut ausgebaute Straßen existieren. Dennoch ergab die Recherche diesbezüglich keine Richtlinien oder amtliche Vorgaben. Da Brücken anthropogene Objekte sind, ist deren Oberfläche immer befestigt. Dennoch sagt das nichts über den Wegtyp und die Oberfläche des Weges aus, der unter der Brücke verläuft.

4.3.5. Einordnung der OSM-Features in Oberflächenkategorien

Um die Untersuchung von Wanderwegen hinsichtlich ihrer Oberfläche in einem Ergebnis festzuhalten, ist eine Kategorisierung aller erfasster Oberflächen sinnvoll. Eine erste Unterteilung der Oberflächen wurde bereits in Form der Gruppen „befestigte Oberfläche“ und „nicht befestigte Oberfläche“ erreicht. Eine Definition wurde dem Objektartenkatalog für Straßenverkehrsanlagen der Baufachlichen Richtlinien Vermessung entnommen (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016a).

In Kap. 4.3.4.1 und 4.3.4.2 wurden zunächst die vorkommenden Wegtypen hinsichtlich ihrer Oberflächeneigenschaften analysiert. Viele Wege liegen ohne zusätzliche Tags vor, die sie näher beschreiben würden. Aus diesem Grund wurde zunächst weiteres Wissen, das, in Form weiterer Tags, möglicherweise vorliegt, zunächst bewusst vernachlässigt. Wie Tab. 4.5 zeigt, konnten fünf der elf Wegtypen pauschal als Wege eingeordnet werden, deren Oberfläche immer befestigt ist. Dies stellt die erste Oberflächenkategorie dar. Weitere drei Wegtypen sind wahrscheinlich befestigt, was die zweite Oberflächenkategorie ist. Für sie gilt, dass es Argumente, bspw. durch die Klassifizierung des Weges oder durch die Erschließungsfunktion des Weges gibt, die eine Befestigung rechtfertigen. Insgesamt gab es neben den genannten zwei Gruppen auch Wegtypen, für die keine klare Aussage getroffen werden konnte. Auch diese Gruppe stellt eine Kategorie im Sinne dieses Kapitels dar.

Weitere Informationen, in Form von Tags, erweitern die bisherigen Kategorien. Zum einen gibt es zu diesem Zeitpunkt noch keine Kategorie für unbefestigte Flächen. Zum anderen kann der Begriff „befestigter Weg“ noch weiter differenziert werden. Das geschieht durch die Nennung konkreter Oberflächenarten. Möglich ist das durch die Auswertung des Tags „`surface`“. Neben „`surface`“ kommen weitere Tags im Untersuchungsgebiet vor. Alle diese Tags wurden in Gruppen eingeteilt. Hier ist besonders die Gruppe der oberflächenrelevanten Features zu nennen, zu der auch „`surface`“ gehört. Die hierin befindlichen Tags haben unterschiedliche Attributausprägungen in Form von Werten. Alle vorkommenden Werte wurden den fünf genannten Kategorien zugeordnet. Die Zusammenfassung der Ergebnisse stellt Tab. 4.8 dar. Sie fasst teilweise Erkenntnisse der Tabellen 4.5, 4.6 und 4.7 zusammen und beinhaltet die Kriterien für die letztendliche Zuordnung aller Wege in die fünf Kategorien. Undeutlich ist noch, welche Zuordnung ein Weg erhält, dessen Wegtyp und Tags in verschiedenen Kategorien eingeordnet werden.

Werden Wegtypen, die, ohne Betrachtung der Tags, in Kategorie 3 oder 4 eingeordnet wurden, durch ein Tag näher spezifiziert, das in Kategorie 1 oder 2 eingeordnet ist, ist der Weg dementsprechend in jedem Fall befestigt. Auch der entgegengesetzte Fall kann eintreten. Dann würde ein Wegtyp aus Kategorie 2, 3 oder 4 mit einem Tag aus Kategorie 5 spezifiziert. In diesem Fall ist der Weg unbefestigt. Möglich ist auch, dass ein Wegtyp, ohne Betrachtung der ihn näher beschreibenden Tags, in Kategorie 2, 3 oder 4 eingeordnet wird und ihn bspw. Tags aus Kategorie 1 und 5 beschreiben. Praktisch würde es sich bspw. um einen Fußweg (Kategorie 3) handeln, der asphaltiert ist (Kategorie 1), dessen Unterhaltungszustand („tracktype“) aber so schlecht ist, dass bspw. Rollstuhlfahrer ihn nicht mehr benutzen können (Kategorie 5). Sollte also ein Tag aus Kategorie 5 einen Wegtyp beschreiben, ist er immer dieser Kategorie zuzuordnen.

Tabelle 4.8.: Die im Datensatz vorkommenden befestigten und unbefestigten Wege werden entsprechend ihrer Oberfläche differenziert und fünf Kategorien zugeordnet. Wegtypen und zusätzliche Tags wurden isoliert voneinander untersucht. Die Tabelle enthält die Ergebnisse beider Untersuchungen. Quelle: eigene Darstellung.

Oberflächenkategorie	Beschreibende Tags und Wegtypen
1: Befestigte Flächen mit Angabe zum Oberflächentyp	Tags: surface=asphalt, surface=cobblestone, surface=compacted, surface=concrete, surface=paved, surface=paving_stones
2: Befestigte Flächen ohne Angabe zum Oberflächentyp	Wegtypen: living_street, secondary, steps, tertiary, unclassified Tags: bicycle=designated, bicycle=official, bridge=yes, cycleway=track, foot=designated, foot=official, footway=sidewalk, segregated=yes, segregated=no, sidewalk=both, sidewalk=separate, smoothness=good, smoothness=intermediate, tracktype=grade1, tracktype=grade2
3: wahrscheinlich befestigte Flächen	Wegtypen: cycleway, footway, residential Tags: service=alley, service=driveway, service=parking_aisle
4: unklare Oberflächenbeschaffenheit	Wegtypen: path, service, track
5: unbefestigte Flächen	Tags: smoothness=bad, surface=dirt, surface=grass, surface=gravel, surface=ground, surface=pebblestone, surface=unpaved, tracktype=grade3, tracktype=grade4

5. Ergebnisse und Diskussion

Ob die Bewältigung eines Wanderweges für eine Person mit Handicap möglich ist, ergibt sich aus der Beurteilung verschiedener Faktoren. Darunter dem Faktor der persönlichen Leistungsfähigkeit, der Art des Handicaps, dem Wetter, der Steigung, der Oberflächenbeschaffenheit und den zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln. Zwei Faktoren haben für alle Wanderer einen Einfluss und sind objektiv messbar: Die Steigung und die Oberflächenbeschaffenheit.

Der Arbeit steht eine Punktwolke, abgeleitet aus flugzeuggestütztem Laserscanning, für das Untersuchungsgebiet, der Gemeinde Bad Rothenfelde, zur Verfügung. Sie beinhaltet Höheninformationen, ist nicht klassifiziert und besitzt darüber hinaus keinerlei Zusatzinformationen. Zunächst fand eine Klassifikation der Punktwolke statt, um die Bodenpixel zu extrahieren. Bei diesem Vorgehen wurden alle übrigen Pixel, darunter hauptsächlich Vegetationspixel, gelöscht. Um den optimalen Klassifikationsalgorithmus zu finden, wurden Nachforschungen angestellt. Kapitel 3.1.2 stellt den Stand der Forschung dar und thematisiert dabei Algorithmen, die Teil von wissenschaftlichen Veröffentlichungen sind. Die veröffentlichten Algorithmen sind für verschiedene Aufgaben ausgerichtet und können teilweise nur auf speziellen Daten angewendet werden. Eine Frage der vorliegenden Arbeit ist, welcher Klassifikationsalgorithmus auf den vorliegenden Daten - einer ungeordneten, unklassifizierten Punktmenge, ohne jeglichen Zusatzinformationen - angewendet werden kann, um ein sehr gutes Ergebnis zu erzielen. In Kap. 4.3.1 wurde beschrieben, dass der „MCC“-Algorithmus, basierend auf Evans u. Hudak (2007), gewählt wurde. Außerdem erläuterte das Kapitel, warum dieser Algorithmus ausgewählt und mit welchen Parametern er angewendet wurde. Um, gerade unter Bäumen, möglichst wenige Bodenpixel falsch zu klassifizieren, wurden zwei Klassifikationen berechnet. Anschließend fand eine Vereinigung der Ergebnisse statt. Abb. 4.13 zeigt einen Ausschnitt aus dem Klassifikationsergebnis.

Eine zentrale Fragestellung der Arbeit bezieht sich auf kleinräumige Steigungen. Ein Ziel ist es entsprechend eine geeignete Datenstruktur zu finden, die es ermöglicht, kleinere Steigungsunterschiede auf dem Wanderweg sichtbar zu machen und besondere Hindernisse, wie Treppen und Rampen abzubilden. Zunächst fanden Überlegungen statt, wie kleinräumig Steigungen berechnet werden können. Untersuchungen in der Arbeit ergaben, dass folgende Parameter für diese Entscheidung wichtig sind. Die Punktdichte, die Schrittlänge der Wanderer (auf ebener Strecke), die Ausmaße der zu erwartenden Hindernisse und die Wegbreite. Die Punktdichte beträgt pro 1km^2 -Abschnitt maximal 4,6 Pkt/ m^2 . Die durchschnittliche Schrittlänge eines erwachsenen Menschen auf ebener Strecke liegt bei 63 cm (vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2010, S. 14). Ver-

schiedene besondere Objekte, die im Datensatz vorkommen, wurden hinsichtlich ihrer Steigung untersucht. Insbesondere bei Treppen wurde festgestellt, dass diese beträchtliche Steigung aufweisen und daher ein Hindernis für Wanderer mit Handicap darstellen. Der Steigungsbereich dieser Objekte liegt zwischen 20° und 45° und ist auf der ganzen Länge einer Treppe gleich, weswegen pro Treppe ein einziger Steigungswert berechnet werden kann. Rampen und Brücken sind weitere besondere Objekte, die eine gewisse Steigung aufweisen können. Der Untersuchung liegt ein freier Geodatensatz vor, der von der Plattform OpenStreetMap (OSM) stammt. Dieser Datensatz weist Rampen nicht speziell aus. Zudem wurde festgestellt, dass Regulierungen existieren, die die Barrierefreiheit von Rampen beschreiben und diesbezüglich Steigungsvorgaben machen. Rampen können auch in Kombination mit Brücken existieren. Analysen ergaben, dass der Datensatz keine speziellen Brückenformen beinhaltet und einzelne Brückenabschnitte, darunter die geneigten Abschnitte, nicht speziell ausweist. Da die geneigten Brückenabschnitte nicht identifiziert werden können, werden Brücken, anders als Treppen, nicht gesondert behandelt und daher hinsichtlich ihrer Steigung genauso kleinräumig untersucht, wie andere Wegtypen.

Die Datenstruktur, die erzeugt wurde, besteht aus Zellen, die einzelne Steigungswerte für ihre jeweilige räumliche Ausdehnung beinhalten. Die Zelllänge wurde auf 3,00 Meter, oder ca. 5 Schrittängen, festgelegt. Die Breite der Zellen orientiert sich an der Breite der Wege, die sie jeweils abbilden. Die Breite der untersuchten Wege ist sehr unterschiedlich, da Fußgängerverkehr theoretisch auf vielen Wegtypen möglich ist. Beispielsweise sind kleinere Verbindungsstraßen mit wenig Verkehrsaufkommen in ländlichen Bereichen oft der einzige Verkehrsweg für Fußgänger. Kap. 4.1 erläutert diese Thematik. Für die Bestimmung der Wegbreiten, und damit auch der Breiten der Steigungszellen, war es wichtig, Mindestwerte zu finden. Nur die Bodenpunkte die auf den Wegen liegen, dürfen in die Steigungsberechnung, die anschließend durchgeführt wurde, einfließen. Um Mindestbreiten zu bestimmen, wurden zum einen die OSM-Daten und zum anderen Normen und Gesetze ausgewertet. Jeder Weg kann durch OSM-Tags näher bestimmt werden. Die Tags haben wiederum Einfluss auf die anzunehmende Wegbreite und wurden daher ebenso untersucht. Hinsichtlich der Fußwege fand somit bspw. eine Unterscheidung zwischen Bürgersteigen an der Straße, Fußwegen abseits der Straße, gemeinsam genutzten Fuß- und Radwegen und getrennt genutzten Fuß- und Radwegen statt. In Abhängigkeit der Tatsache, um welchen Fußweg es sich genau handelt, wurden entsprechende Mindestbreiten festgelegt. Nachdem die Mindestbreiten aller elf Wegtypen bestimmt wurden, konnte die Datenstruktur erzeugt werden, die die kleinräumigen Steigungen vorhält, s. Abb. 5.1.

Ein, in Kap. 1.1, definiertes Ziel ist es darüber hinaus, eine sinnvolle Gruppierung von Steigungen zu erreichen. Diese dient dem Wanderer als Entscheidungsfindung, ob der Weg individuell bewältigbar ist. Es gelang, fünf Steigungsbereiche zu definieren. Die Auflistung beinhaltet Tab. 4.2 in Kap. 4.2.3. Die Steigungskategorien orientieren sich auch an der für Menschen mit Handicap wichtigen Barrierefreiheit. Die ersten beiden Steigungskategorien lauten „barrierefreie Wege im Regelfall“ und „barrierefreie Wege im Ausnahmefall“. Auch Treppen, deren Steigungsbereich bereits genannt wurde, sind

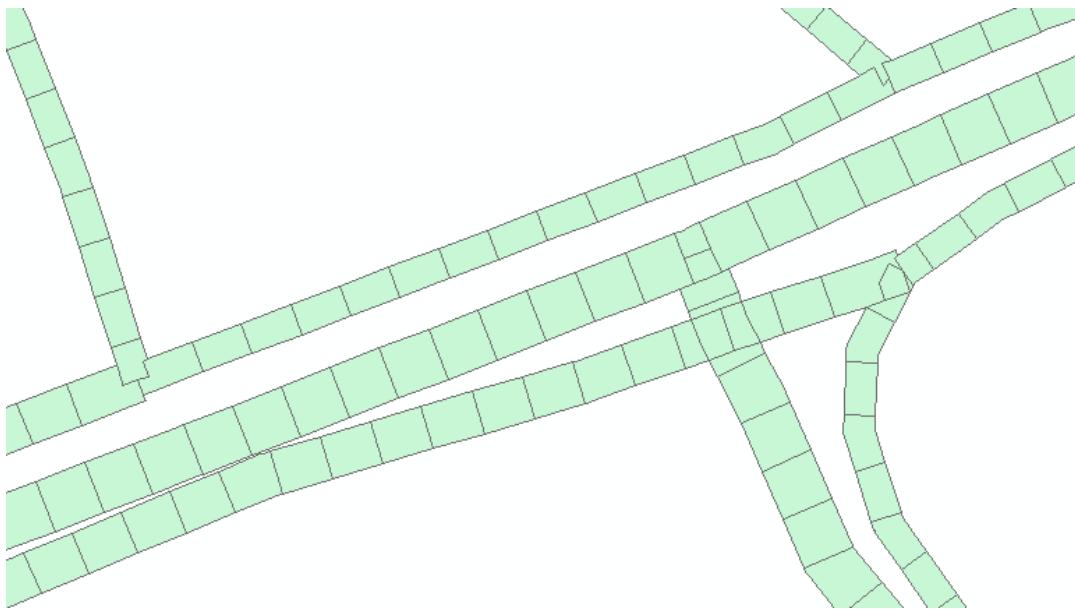


Abbildung 5.1.: Beispiel der konstruierten Steigungszellen. Die Zellen beinhalten die kleinräumigsten, berechneten Steigungen. Für die räumliche Ausdehnung jeder Zelle wurde ein Steigungswert, basierend auf den Höhenpunkten, berechnet. Quelle: eigene Darstellung.

mit einer eigenen Kategorie vertreten. Um die Kategorien aufzustellen, wurden Normen und Richtlinien ausgewertet, darunter die Richtlinien zur Anlage von Stadtstraßen (vgl. Baier, 2007).

Amtliche Daten halten Steigungen in Rasterform vor, wie in Kap. 1 beschrieben. Eine Fragestellung dieser Arbeit beschäftigt sich damit, wie Steigungen berechnet und vorgehalten werden können, um sie, für Wanderwege, möglichst kleinräumig berechnen zu können. Letztendlich wurde eine TIN-Oberfläche auf der klassifizierten Punktwolke generiert. Wichtig ist, dass neben der Klassifikation keine weiteren Vorverarbeitungen oder Generalisierungen auf der Punktwolke oder der TIN-Oberfläche durchgeführt werden. Auf diese Weise wird die Datenmenge nicht reduziert und mögliche Verfälschungen der Daten finden nicht statt. Außerdem wurden für die TIN-Generierung nur Punkte herangezogen, die, basierend auf den vorigen Analysen zur Breite der Steigungszellen, auf dem Weg liegen. Ausgeschlossen werden demnach Punkte, die zwar als Boden klassifiziert wurden, aber neben dem Weg liegen, wo andere Objekte die Höhe dieser Punkte beeinflussen. Die Berechnung der kleinräumigen Steigungen erfolgte durch Mittelwertbildung aller TIN, die die jeweilige Steigungszelle bedecken.

Tab. 5.1 zeigt zunächst, dass für ca. 9% der Steigungszellen keine Steigung berechnet werden konnte. Dieser Fakt folgt aus der Tatsache, dass unter manchen Bäumen wenig bis keine Punkte gemessen werden, da diese die Sicht des Sensors auf den Weg verdecken.

Tabelle 5.1.: Statistik über die Steigungen in den Steigungszellen. Jede Steigungszelle beinhaltet einen Steigungswert. Die Steigungsbereiche zwischen 0° und 45° basieren auf Tab. 4.2 aus Kap. 4.2.3. Die Prozentwerte beziehen sich auf die Steigungszellen, für die eine Steigung berechnet werden konnte. Quelle: eigene Darstellung.

Anzahl Steigungszellen	51.877
Anzahl Steigungszellen, für die eine Steigung berechnet werden konnte	47.349
Minimale Steigung	0,2 Grad
Maximale Steigung	89,25 Grad
Mittlere Steigung	7,28 Grad
Standardabweichung	4,82 Grad
Anzahl Steigungen zwischen 0° und $1,73^\circ$ (u.a. uneingeschränkt barrierefreie Wege)	483 (1,02%)
Anzahl Steigungen zwischen $1,74^\circ$ und $3,24^\circ$ (u.a. barrierefreie Wege im Ausnahmefall)	6754 (14,26%)
Anzahl Steigungen zwischen $3,25^\circ$ und $6,84^\circ$ (u.a. Straßen im Regelfall)	19793 (41,80%)
Anzahl Steigungen zwischen $6,85^\circ$ und $19,9^\circ$ (u.a. Straßen im Ausnahmefall)	19130 (40,40%)
Anzahl Steigungen zwischen 20° und 45° (Treppen)	1160 (2,44%)
Anzahl Steigungen über 45° (ungeeignet für Fußgänger)	29 (0,06%)

cken, siehe auch Abb. 4.12. Zudem können die Lichtimpulse des Laserscanings von der Oberfläche abgelenkt oder absorbiert werden, wodurch keine Reflexion im Sensor messbar ist. Die für Fußgänger relevanten Steigungen decken den Bereich von 0° bis 45° ab, siehe Tab. 4.2 in Kap. 4.2.3. Lediglich für 29 Steigungszellen wurden Werte berechnet, die zwischen $45,5^\circ$ und $89,25^\circ$, dem Maximalwert, lagen. Diese können als Ausreißer angesehen werden, die wenig Bedeutung für das Gesamtergebnis haben.

Der Teil der Steigungswerte, der innerhalb der Standardabweichung um den Mittelwert liegt, liegt im Bereich von $2,46^\circ$ bis $12,1^\circ$. Der Anteil der Steigungen, der im Bereich von barrierefreien Wegen liegt, beträgt ca. 15%. Die meisten Steigungswerte liegen zwischen $3,25^\circ$ und $19,9^\circ$. Der Grund dafür, dass wenige Steigungen im Bereich der uneingeschränkt barrierefreien Wege berechnet wurden, liegt zuallererst daran, dass der Steigungsbereich zwischen 0° und $1,73^\circ$ vergleichsweise klein ist. In den Steigungszellen liegen potentiell viele TIN, von denen manche starke Steigungen aufweisen. Werden diese TIN mit anderen verrechnet, benötigt es nicht viel, um eine Durchschnittssteigung zu berechnen die höher ist als $1,73^\circ$. Im Allgemeinen sind kleinflächige TIN sehr anfällig für starke Steigungen. Höhenunterschiede von wenigen Zentimetern reichen aus, um, auf einer kleinen Fläche, starke Steigungen zu produzieren. Die TIN-Erzeugung wird auf der,

nach der Klassifikation, ungefilterten Punktwolke ausgeführt. Die Verteilung der Punkte in der Punktwolke ist zudem unregelmäßig. Manche Punkte liegen daher nah beieinander und es können TIN mit einer Fläche von bspw. unter $0,50\text{m}^2$ entstehen. Laserscanning unterliegt einer gewissen Ungenauigkeit, die wenige Zentimeter beträgt. Haben die TIN eine große Fläche, sind diese Ungenauigkeiten nicht relevant. Auf diesen kleinen Flächen jedoch, ist der Effekt spürbar. Zudem liegen im Untersuchungsgebiet Objekte, die der Bodenklasse zuzuordnen sind und eine natürliche Steigung besitzen. Hierzu zählen Bürgersteigkanten oder Schlaglöcher. Hohe Steigungswerte können daher entstehen, wenn Bürgersteigkanten von der Punktwolke sehr kleinräumig erfasst werden. Ein TIN, das aus Punkten gebildet wird, die kurz vor und kurz nach einer Bürgersteigkante gemessen wurden, kann einen Steigungswert besitzen, der über 45° liegt. Zudem arbeitet der Klassifikationsalgorithmus nicht fehlerfrei. Eine nachträgliche Klassifikation der Daten ist nur dann notwendig, wenn sie nicht zuvor vom Datenanbieter durchgeführt wurde. Wie im Hintergrundkapitel erläutert, messen alle Sensoren mehrere Echos, neuere Sensoren auch full-waveform-Daten. Mit diesen Informationen sind Klassifikationen deutlich zuverlässiger durchzuführen, als mit den vorliegenden Daten. Die vorliegende Klassifikation kann, als einzige Information, lediglich die Höhe der Daten auswerten. Der Algorithmus weist in einzelnen Fällen Vegetationspunkte der Bodenklasse zu, wie auch in Kap. 4.3.1 beschrieben. Je ähnlicher sich Boden und Vegetation im Bezug auf die Höhe sind, desto schwieriger ist die Zuordnung von Höhenpunkten in eine der beiden Klassen. Insbesondere bei niedrigen Baumschichten oder Büschen ist das der Fall. Diese falsch klassifizierten Punkte haben wiederum einen negativen Einfluss auf die Ergebnisse. Da keine Validierungsmöglichkeit der Klassifikation in Form von Vergleichsdatensätzen existiert, kann die Klassifikation nicht überprüft und ggfs. nachbearbeitet werden. Eine Verbesserung der Ergebnisse würde auch durch eine Erhöhung der Punktdichte oder durch eine Integration von terrestrischen Laserscanning-Daten erreicht. Eine höhere Punktdichte ermöglicht eine Verdichtung der TIN-Oberfläche und somit eine genauere Berechnung, die noch unabhängiger von Ausreißern ist. Zudem würde der Einfluss von kleineren Objekten, wie Bürgersteigkanten und Schlaglöcher auf die Steigungsberechnung sinken. In der Arbeit zeigt sich außerdem, dass für 9% der Steigungszellen keine Steigung berechnet werden konnte. Hauptsächlich aufgrund von Verdeckungen des Sensors, ausgelöst durch Vegetation. Eine Integration von terrestrischem Laserscanning in den Datensatz, könnte diese Verdeckungen auflösen. Eine Möglichkeit, um die Steigungsberechnung zu verbessern, betrifft die Verrechnung der TIN-Steigungen für die Steigungszellen. Diese kann, statt mit einem normalen Mittelwert, auch mit einem gewichteten Mittelwert, stattfinden. Die Gewichtung erfolgt dann über die Zellfläche. Da kleinflächigere TIN, wie beschrieben, anfälliger für extreme Steigungen sind, kann der Einfluss, den diese auf den berechneten Steigungswert einer Zelle haben, verringert werden. Alle extremen Steigungen werden aber auch mit diesem Verfahren nicht eliminiert werden können. Sind die TIN mit einer extremen Steigung nicht oder nicht viel kleinflächiger als die anderen TIN, stellt der gewichtete Mittelwert keine Verbesserung dar. Ebenso tritt keine Verbesserung ein, wenn ein falsch klassifizierter Vegetationspunkt, der bspw. 2 Meter höher als seine Umgebung ist, Teil von mehreren TIN ist. Diese TIN haben dann womöglich alle eine starke Steigung.

Neben der Steigung ist auch die Oberflächenbeschaffenheit ein wichtiger Faktor, um zu beurteilen, ob ein Weg bewältigt werden kann. Der Datensatz, der analysiert wird, um die Oberflächenbeschaffenheit zu bestimmen, stammt von OpenStreetMap. Die Entscheidung für OpenStreetMap, als Vertreter der freien Geodaten, wurde in Kap. 1 erläutert. Initial sind 889 Features vorhanden, die elf unterschiedliche Wegtypen beschreiben. Eine Topologiekorrektur, die auf den Daten ausgeführt wurde, löste Überlappungen der Features auf. Da die Linien an Überlappungsstellen geteilt werden, existieren nach Abschluss der Operation mehr Features, nämlich 1079. Eine Fragestellung dieser Arbeit ist es zu klären, wie die Oberflächenbeschaffenheit der Wege aus den Daten bestimmt werden kann. Hierzu fanden in den Kapiteln 4.3.4 und 4.3.5 Vorarbeiten statt. Bezuglich der Fragestellung wurden zunächst die Wegtypen isoliert betrachtet und anschließend auch die Tags analysiert. Für Wanderer ist es nicht immer wichtig zu wissen, welcher konkreter Oberflächentyp oder Unterhaltungszustand der Weg besitzt. Wichtig ist stattdessen, dass die Oberfläche des Weges befestigt ist und dessen sichere Nutzbarkeit gegeben ist. Allein auf Basis des Wegtyps kann gesagt werden, dass fünf der elf Wegtypen eine befestigte Oberfläche besitzen, s. Tab. 4.5. Weitere drei sind wahrscheinlich befestigt, für die letzten drei Wegtypen ist keine Aussage möglich. Tags können diese Vorabeinstufung bestätigen oder verbessern. Alle Tags im Datensatz wurden ausgewertet und hinsichtlich ihrer Relevanz zur Beschreibung der Oberfläche eingestuft. Elf Tags sind oberflächenrelevant, s. Tab. 4.6. Jedes der Tags besitzt Werte, die wiederum relevant oder irrelevant sein können. Tab. 4.8 fasst die Vorarbeiten hinsichtlich der Wegtypen und Tags zusammen. Alle Wege im Datensatz wurden, basierend auf den Erkenntnissen, in fünf Oberflächenkategorien eingeordnet. Die Kategorien lauten: 1: befestigte Flächen mit Angabe zum Oberflächentyp, 2: befestigte Flächen ohne Angabe zum Oberflächentyp, 3: wahrscheinlich befestigte Flächen, 4: unklare Oberflächenbeschaffenheit, 5: unbefestigte Flächen.

Alle Features der Wege im OSM-Datensatz wurden, basierend auf den Vorarbeiten, in eine der fünf Kategorien eingeordnet. Tab. 5.2 fasst die Ergebnisse zusammen. Features, die in Kategorie 1 und 5 eingeordnet werden, werden durch spezielle Oberflächentags, wie „surface“, „smoothness“ und „tracktype“ näher beschrieben. Sie haben zusammen einen Anteil von ca. 27% an der Gesamtmenge. Alle anderen Features sind in den Kategorien 2 bis 4 zu finden. Sie bilden die Mehrheit und werden nicht durch die genannten, speziellen Oberflächentags beschrieben. Obwohl die einschlägigen Tags fehlen, kann für 19,18% aller Features, auf Basis der Analysen, gesagt werden, dass deren Oberfläche befestigt ist. Den größten Anteil davon machen Fußwege („footway“) und ländliche, untergeordnete Verbindungsstraßen („unclassified“) aus. Im Falle von Fußwegen waren hier Tags vorhanden, von denen indirekt auf die Oberflächenbeschaffenheit geschlossen werden konnte. Dort wo für Fußwege diese Tags fehlten, erfolgte eine Einordnung in Kategorie 3. Den größten Anteil in Kategorie 4 machen Zufahrtswege („service“) aus, die hinsichtlich ihrer Funktion und Art nicht näher spezifiziert sind. Deren Oberfläche wird daher als „unklar“ eingestuft. Es ist sicherlich zu diskutieren, ob bspw. Anliegerstraßen, ohne weitere, beschreibende Tags, in Kategorie 3, und nicht in Kategorie 2, einzuordnen sind. Anliegerstraßen erfüllen eine Erschließungsfunktion. Hier ist mit regelmäßigem

Tabelle 5.2.: Einordnung aller Wegfeatures in Oberflächenkategorien. Die Kategorien lauten, analog zu Tab. 4.8: 1: befestigte Flächen mit Angabe zum Oberflächentyp, 2: befestigte Flächen ohne Angabe zum Oberflächentyp, 3: wahrscheinlich befestigte Flächen, 4: unklare Oberflächenbeschaffenheit, 5: unbefestigte Flächen. Prozentwerte werden nach der zweiten Kommastelle abgeschnitten. Quelle: eigene Darstellung.

Wegtyp	Anzahl Features					
	Gesamt	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 5
cycleway	53	22 (41,50%)	1 (1,88%)	30 (56,60%)	0	0
footway	393	17 (4,32%)	41 (10,43%)	328 (83,46%)	0	7 (1,78%)
living_street	31	27 (87,09%)	4 (12,90%)	0	0	0
path	42	14 (33,33%)	16 (38,09%)	0	12 (28,57%)	0
residential	184	97 (52,71%)	5 (2,71%)	82 (44,56%)	0	0
secondary	20	0	20 (100%)	0	0	0
service	145	25 (17,24%)	1 (0,68%)	57 (39,31%)	61 (42,06%)	1 (0,68%)
steps	5	0	5 (100%)	0	0	0
tertiary	65	24 (36,92%)	41 (63,07%)	0	0	0
track	71	15 (21,12%)	25 (35,21%)	9 (12,67%)	0	22 (30,98%)
unclassified	70	21 (30%)	48 (68,57%)	0	0	1 (1,42%)
Summe	1079	262 (24,28%)	207 (19,18%)	506 (46,89%)	73 (6,76%)	31 (2,87%)

Verkehr von einem oder von mehreren Anliegern zu rechnen. Eine Befestigung der Straße wird dadurch gerechtfertigt. Dennoch hängen Entscheidungen darüber auch immer vom Ermessen und der Finanzkraft der Kommune ab und eine Befestigung ist nicht garantiert. Sicherheitshalber erfolgte die Eingruppierung in Kategorie 3. Auch die Einordnung des Tags „tracktype“ mit der Ausprägung „grade3“ ist diskutabel. Es handelt sich dabei um einen befestigten oder ausgebesserten Weg, oft ohne Unterbau, mit teils relativ fester, teils weicher Oberfläche (vgl. OpenStreetMap, 2016k). Hiermit ist z.B. ein Weg mit einer Fahrspur aus brüchigem Asphalt und einer Mittelpur aus Naturboden gemeint. Obwohl eine teils befestigte Oberfläche besteht, wurden Wege mit diesem Tag in Kategorie 5 eingeordnet. Wahrscheinlich wäre dieser Weg für Rollstuhlfahrer oder ältere Personen mit Rollator nicht sicher passierbar.

Eine Fragestellung dieser Arbeit lautet, wie gut sich OSM-Daten potentiell zur Bestimmung der Oberfläche eines Wegs eignen. Die Frage zielt auch darauf ab, wie das Datenmodell von OSM hinsichtlich der Abbildung von Oberflächeninformationen einzurichten ist. Das Datenmodell von OSM sieht für die Beschreibung der Oberfläche spezielle Oberflächen-Tags, wie „surface“, „smoothness“ und „tracktype“, vor. Werden diese Tags eingesetzt, beschreiben sie die Oberfläche sinnvoll und vollständig. Alle Arten von befestigten Oberflächen, die im Objektartenmodell der baufachlichen Richtlinien Vermessung vorkommen, können mit dem Tag „surface“ ausgedrückt werden (vgl. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016a und Tab. 4.7). Auch „smoothness“ und „tracktype“ besitzen viele Abstufungen. Es gibt acht Möglichkeiten, die Nutzbarkeit des Weges mit dem Tag „smoothness“ zu unterscheiden (vgl. Open-

StreetMap, 2016h). Es wird angegeben, dass die Abstufung „intermediate“ ausreichend für Rollstuhlfahrer und Personen mit Kinderwagen ist. Eine Berücksichtigung von Menschen aus der Zielgruppe dieser Arbeit, findet damit statt. Mit dem Tag „tracktype“ ist eine Unterscheidung zwischen befestigten und unbefestigten Oberflächen in fünf Gruppen möglich. Während das Datenmodell als passend, zumindest für diese Anwendung, angesehen werden kann, ist die Vollständigkeit der Tags nicht ausreichend. Nur ca. 27% der Features werden durch mindestens eines der genannten Tags beschrieben. Dieser Wert ergibt sich aus der Summe von Kategorie 1 und 5. Für eine Anwendung, die eine hohe Vollständigkeit benötigt, wie z.B. die Navigation, ist dieser Anteil wohl zu gering. Dennoch haben die Auswertungen gezeigt, dass auch aus anderen Tags und den Wegtypen viele Erkenntnisse hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit gewonnen werden können. Auf Basis dieser Erkenntnisse lassen sich weitere, ca. 19% der Wege, als befestigt einstufen (Kategorie 2). Eine Fragestellung der Arbeit ist außerdem, für wie viele Features deren Oberfläche bestimmt werden kann. Klare, oder zumindest wahrscheinliche Aussagen hinsichtlich einer befestigten Oberfläche des Wegs sind für ca. 93% der Daten getroffen worden. Eine nähere Spezifizierung der Wahrscheinlichkeit ist nicht möglich. Die Einordnung „wahrscheinlich befestigt“ bezieht sich eher darauf, dass z.B. Rad- und Fußwege mit speziell hierfür geschaffenen Tags („cycleway“, „footway“) kartiert wurden, die eine hauptsächliche Nutzung durch diese Verkehrsteilnehmer angeben. Es kann sich zum einen nicht um Trampelpfade handeln, da diese mit „path“ und dem Tag „informal=yes“ kartiert werden sollen. Es liegen also spezielle, für diese Verkehrsteilnehmer, angelegte Wege vor. Zum anderen fehlen aber Tags, aus denen eindeutig eine Befestigung geschlossen werden kann. Eine Auflistung dieser Tags ist in Tab. 4.8 zu finden. Daher folgt die Einordnung als „wahrscheinlich befestigt“ (Kategorie 3).

Alles in allem zeigt sich, dass das Datenmodell von OSM viele Tags besitzt, die die Oberfläche beschreiben können. Das Potential für die Erweiterung von Wegenetzen durch detaillierte Oberflächeninformationen, ist gegeben. Die Wege im vorliegenden Datensatz wurden jedoch in vielen Fällen nur hinsichtlich ihrer Lage kartiert. Tags, und im Speziellen oberflächenrelevante Tags, wurden nur für die Minderheit aller Wege angegeben. Ein Viertel der Wege wurde mit zumindest einem einschlägigen Oberflächentag kartiert. Die durchgeföhrten Untersuchungen zeigen, dass auch aus anderen Tags und auf Basis der Wegtypen Informationen zur Oberflächenbeschaffenheit gewonnen werden können. Die Steigungsberechnung ergab, dass ein Sechstel der Wege hinsichtlich ihrer Steigung als barrierefrei einzustufen sind. Der Großteil der gemessenen Steigungen ist zwischen 3,25° und 19,9° einzuordnen. Hierfür sind mehrere, genannte Faktoren verantwortlich. Es gelang, eine kleinräumige Datenstruktur zu erstellen, die den Zielsetzungen der Arbeit entspricht. Auf Basis der OSM-Daten wurden auch besondere Hindernisse, in Form von Treppen und Brücken, identifiziert und in der Datenstruktur berücksichtigt.

Literaturverzeichnis

- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2016a): LAS Specification, Version 1.1, URL: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/asprs_las_format_v11.pdf (besucht am 30.04.2016).
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (2016b): LASer (LAS) File Format Exchange Activities, URL: <http://www.asprs.org/committee-general/laser-las-file-format-exchange-activities.html> (besucht am 30.04.2016).
- Architektenkammer Niedersachsen (2016): Hinweise zum barrierefreien Bauen nach DIN 18040, URL: http://www.aknds.de/fileadmin/pdf/servicedb/202-hinweise_zum_barrierefreien_bauen_nach_DIN_18040_06.2014.pdf (besucht am 30.04.2016).
- Arsanjani, J. J., Barron, C., Bakillah, M. u. Helbich, M. (2013): Assessing the Quality of OpenStreetMap Contributors together with their Contributions, in: Proceedings of the AGILE 2013, Leuven, Belgium.
- Axelsson, P. (2000): DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models, in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 33, Nr. B4, S. 110–117.
- Azim, A. u. Aycard, O. (2012): Detection, classification and tracking of moving objects in a 3D environment, in: Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE, S. 802–807.
- Baier, R. (2007): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen : RAST 06, Köln: FGGSV-Verlag.
- Ballester, M. G., Pérez, M. R. u. Stuiver, J. (2011): Automatic Pedestrian Network Generation, in: Proceedings of the 14th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Utrecht, Niederlande.
- Baltsavias, E. (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 54, Ausg. 2-3, S. 199–214.
- Barron, C., Neis, P. u. Zipf, A. (2014): A Comprehensive Framework for Intrinsic OpenStreetMap Quality Analysis, in: Transactions in GIS, Bd. 18, Ausg. 6, S. 877–895.
- Bauer, C., Almer, A., Ladstätter, S. u. Luley, P. M. (2014): Optimierte Wegefindung für Fußgänger basierend auf vorhandenen OpenStreetMap-Daten, in: Angewandte Geoinformatik 2014, Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg, hrsg. von J. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner u. B. Zagel, S. 408–413.
- Bennett, J. (2010): OpenStreetMap, Be your own cartographer, Birmingham: Packt Publishing.
- Bezirksregierung Köln (2016): Digitale Geländemodelle (DGM), URL: http://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/gelaendemodelle/index.html (besucht am 05.05.2016).

- Bieber, R., Gerlach, P., Klinke, R., Scheibner, K., Schulze, M., Ziegler, S. u. Kluge, M. (2011): ußgängerbezogene Datenaufbereitung in OpenStreetMap, in: Tagungsband der Anwenderkonferenz für Freie und Open Source Software für Geoinformationssysteme (FOSSGIS) 2011, S. 168–177.
- Bofinger, J. u. Hesse, R. (2011): Neue Wege der archäologischen Prospektion aus der Luft: Mit Airborne-Laserscanning Bodendenkmalen auf der Spur, in: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, Bd. 40, Nr. 1, S. 35–39.
- Boser, B. E., Guyon, I. M. u. Vapnik, V. N. (1992): A training algorithm for optimal margin classifiers, in: COLT '92 Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory, New York: ACM, S. 144–152.
- Boyko, A. u. Funkhouser, T. (2011): Extracting roads from dense point clouds in large scale urban environment, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 66, Ausg. 6, S. 2–12.
- Brodu, N. u. Lague, D. (2012): 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 68, S. 121–134.
- Bundesministerium der Finanzen (2013): Finanzpolitische Herausforderungen des demografischen Wandels im föderativen System, Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium der Finanzen, URL: http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Downloads/Broschueren_Bestellservice/2013-06-28-finanzpolitische-herausforderungen-demografischer-wandel-anlage.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (besucht am 05.05.2016).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016a): Baufachliche Richtlinien Vermessung: Objektartenkatalog, URL: <http://www.bfrvermessung.de/index.php?id=13014> (besucht am 01.05.2016).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016b): Leitfaden Barrierefreies Bauen, URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/barrierefreies_bauen_leitfaden_bf.pdf (besucht am 30.04.2016).
- Coast, S. (2010): How OpenStreetMap is Changing the World, in: Proceedings of the 10th International Symposium on Web & Wireless GIS, hrsg. von K. Tanaka, P. Fröhlich u. K.-S. Kim, Bd. 6574, Berlin: Springer, S. 4.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2010): Treppen, Informationsbroschüre, URL: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/i-561.pdf> (besucht am 30.04.2016).
- Dornhofer, M., Bischof, W. u. Krajnc, E. (2014): Comparison of Open Source routing services with OpenStreetMap Data for blind pedestrians, in: Proceedings of the FOSS4G-Europe 2014, Bremen.
- Džafić, D., Baumeister, D., Franke, D. u. Kowalewski, S. (2014): Integration von Bodenbelagsinformationen zum energieeffizienten Routen von Elektrorollstühlen, in: Angewandte Geoinformatik 2014, Beiträge zum 26. AGIT-Symposium Salzburg, hrsg. von J. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner u. B. Zagel, S. 451–460.

- Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S. u. Balakrishnan, H. (2008): The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring, in: Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services, hrsg. von D. Grunwald, R. Han, E. de Lara u. C. Ellis, New York: ACM, S. 29–39.
- Europäische Kommission (2015): The 2015 Ageing Report, Economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013-2060), URL: http://europa.eu/epc/pdf/ageing_report_2015_en.pdf (besucht am 05.05.2016).
- Evans, J. S. u. Hudak, A. T. (2007): A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Bd. 45, Ausg. 4, S. 1029–1038.
- Evans, J. S., Hudak, A. T., Faux, R. u. Smith, A. M. (2009): Discrete Return Lidar in Natural Resources: Recommendations for Project Planning, Data Processing, and Deliverables, in: Remote Sensing, Bd. 1, Ausg. 4, S. 776–794.
- Favey, E., Geiger, A., Gudmundsson, G. H. u. Wehr, A. (1999): Evaluating the Potential of an Airborne Laser-scanning System for Measuring Volume Changes of Glaciers, in: Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, Bd. 81, Ausg. 4, S. 555–561.
- Ferraz, A., Mallet, C. u. Chehata, N. (2014): Large scale road network extraction in forested mountainous areas using airborne laser scanning data, in: Proceedings of the 2014 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, S. 4315–4318.
- Fisher, R. A. (1936): The Use of Multiple Measurements in Taxonomic Problems, in: Annals of Eugenics, Bd. 7, S. 179–188.
- Flämig, H. (2015): Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren im Bereich des Gütertransports, in: Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, hrsg. von M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz u. H. Winner, Berlin, Heidelberg: Springer, S. 377–398.
- Fowler, R. J. u. Little, J. J. (1979): Automatic extraction of Irregular Network digital terrain models, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Bd. 13, Ausg. 2, S. 199–207.
- Franke, D., Džafić, D., Weise, C. u. Kowalewski, S. (2011): Konzept eines mobilen OSM-Navigationssystems für Elektrofahrzeuge, in: Angewandte Geoinformatik 2011: Beiträge zum 23. AGIT-Symposium Salzburg, hrsg. von J. Strobl, T. Blaschke u. G. Griesebner, Berlin, Offenbach: Wichmann, S. 148–157.
- Gagliardi, C., Marcellini, F., Papa, R., Giuli, C. u. Mollenkopf, H. (2010): Associations of personal and mobility resources with subjective well-being among older adults in Italy and Germany, in: Archives of Gerontology and Geriatrics, Bd. 50, Ausg. 1, S. 42–47.
- Gaveau, D. L. u. Hill, R. A. (2003): Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data, in: Canadian Journal of Remote Sensing, Bd. 29, Ausg. 5, S. 650–657.
- Gemeinde Bad Rothenfelde (2016): Zahlen, Daten & Fakten, URL: <https://gemeinde.bad-rothenfelde.de/gemeinde/rathaus/zahlen-daten-fakten.html> (besucht am 22.04.2016).

- Gil, J. (2015): Building a Multimodal Urban Network Model Using OpenStreetMap Data for the Analysis of Sustainable Accessibility, in: OpenStreetMap in GIScience, Experiences, Research, and Applications, hrsg. von J. J. Arsanjani, A. Zipf, P. Mooney u. M. Helbich, Springer International Publishing, S. 229–251.
- Girres, J.-F. u. Touya, G. (2010): Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset, in: Transactions in GIS, Bd. 14, Ausg. 4, S. 435–459.
- Goodchild, M. (2009): NeoGeography and the nature of geographic expertise, in: Journal of Location Based Services, Bd. 3, Nr. 2, S. 82–96.
- Goodchild, M. F. (2007): Citizens as sensors: the world of volunteered geography, in: GeoJournal, Bd. 69, S. 211–221.
- Google Data Storage (2016): Rackotzbrücke im Rhododendronpark Kromlau, URL: <http://commondatastorage.googleapis.com/static.panoramio.com/photos/original/26463306.jpg> (besucht am 05.05.2016).
- Haklay, M. (2010): How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets, in: Environment and Planning B Planning and Design, Bd. 37, Nr. 4, S. 682–703.
- Hassannejad, H., Medici, P., Cardarelli, E. u. Cerri, P. (2015): Detection of moving objects in roundabouts based on a monocular system, in: Expert Systems with Applications, Bd. 42, Ausg. 9, S. 4167–4176.
- Hata, A. Y., Osorio, F. S. u. Wolf, D. F. (2014): Robust curb detection and vehicle localization in urban environments, in: 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, S. 1257–1262.
- Herfort, B., Eckle, M., Albuquerque, J. P. de u. Zipf, A. (2015): Towards assessing the quality of volunteered geographic information from OpenStreetMap for identifying critical infrastructures, in: Proceedings of the ISCRAM 2015 Conference, Kristiansand, Norwegen.
- Hessisches Gemeindelexikon (2013): Gemeindedatenblatt: Marburg, Hessen Agentur GmbH, URL: http://www.hessen-gemeindelexikon.de/gemeindelexikon_PDF/534014.pdf (besucht am 26.04.2016).
- Hiremath, S., Heijden, G. W. van der, Evert, F. K. van, Stein, A. u. Braak, C. J. F. ter (2014): Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter, in: Computers and Electronics in Agriculture, Bd. 100, S. 41–50.
- Hoffmann, S. (2011): Wanderwege weltweit – Ein Karten-Overlay aus OpenStreetMap-Daten, in: Tagungsband der Anwenderkonferenz für Freie und Open Source Software für Geoinformationssysteme (FOSSGIS), S. 126–128.
- Höfle, B., Hollaus, M. u. Hagenauer, J. (2012): Urban vegetation detection using radio-metrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 67, S. 134–147.
- Holopainen, M., Vastaranta, M. u. Hyyppä, J. (2014): Outlook for the Next Generation's Precision Forestry in Finland, in: Forests, Bd. 5, Ausg. 7, S. 1682–1694.
- Hu, X., Tao, C. V. u. Hu, Y. (2004): Automatic Road Extraction From Dense Urban Area by Integrated Processing of High Resolution Imagery and LIDAR Data, in:

- International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. 35, Nr. B3, S. 288–292.
- Hyyppä, J., Yu, X., Hyyppä, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Vaaja, M., Koskinen, J. u. Alho, P. (2012): Advances in Forest Inventory Using Airborne Laser Scanning, in: Remote Sensing, Bd. 4, Ausg. 5, S. 1190–1207.
- Illert, A. (2012): Ziel erkannt. Ziel erreicht? Eine Bestandsaufnahme zu INSPIRE, in: Geoinformationssysteme, Beiträge zum 17. Münchener Fortbildungsseminar 2012, hrsg. von A. Koch, T. Kutzner u. T. Eder, Berlin/Offenbach: Herbert Wichmann Verlag, S. 43–50.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loyer, A., Metzger, R. u. Pedrazzini, A. (2012): Use of LIDAR in landslide investigations: a review, in: Natural Hazards, Bd. 61, Ausg. 1, S. 5–28.
- Joerg, P. C., Morsdorf, F. u. Zemp, M. (2012): Uncertainty assessment of multi-temporal airborne laser scanning data: A case study on an Alpine glacier, in: Remote Sensing of Environment, Bd. 127, S. 118–129.
- Kaartinen, H., Hyyppä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyyppä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschmugl, M., Morsdorf, F., Næsset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Wolf, B. M. u. Wu, J.-C. (2012): An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning, in: Remote Sensing, Bd. 4, Ausg. 4, S. 950–974.
- Kada, M. (2014): Vorlesung: 3D-Stadtmodelle, Institut für Geoinformatik und Fernerkundung, Universität Osnabrück.
- Kasemsupakorn, P. u. Karimi, H. A. (2013): A pedestrian network construction algorithm based on multiple GPS traces, in: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Bd. 26, S. 285–300.
- Kilian, J., Haala, N. u. Englich, M. (1996): Capture and evaluation of airborne laser scanner data, in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 31, Nr. B3, S. 383–388.
- Kincey, M. u. Challis, K. (2010): Monitoring fragile upland landscapes: The application of airborne lidar, in: Journal for Nature Conservation, Bd. 18, Ausg. 2, S. 126–134.
- Kraus, K. u. Pfeifer, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 53, Ausg. 4, S. 193–203.
- Krieg-Brückner, B., Bothmer, H., Budelmann, C., Crombie, D., Figueras, A. G., Heindorf, A., Lifante, J., Martínez, A. B., Millet, S. u. Velleman, E. (2012): Assistance for Safe Mobility: the ASSAM Project, in: Tomorrow in sight: from design to delivery, Proceedings of the 4th AAL Forum, Eindhoven, Niederlande, hrsg. von A. van Berlo, H. van den Heuvel, H. H. Nap, I. Bierhoff u. W. Rijnen, S. 331–337.
- Land Brandenburg (2012): Gemeindestraßen-Leitfaden Brandenburg Ausgabe 2012, Arbeitshilfe für Gestaltung und Bau von Gemeindestraßen innerhalb bebauter Gebiete, URL: http://www.mil.brandenburg.de/media_fast/4055/GS-Leitfaden_November2012.pdf (besucht am 05.01.2016).

- Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (2016): Open Data, URL: http://www.lgl-bw.de/lgl-internet/opencms/de/07_Produkte_und_Dienstleistungen/Open_Data_Initiative/ (besucht am 23.04.2016).
- Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (2016a): Digitale Geländemodelle - DGM - ATKIS, URL: http://www.lgn.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=11080&article_id=51746&psmand=35 (besucht am 06.05.2016).
- Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (2016b): GDI und Datenqualität, URL: http://www.geodaten.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=27216&article_id=91941&psmand=28 (besucht am 23.04.2016).
- Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (2016c): Nutzungsbedingungen Geodatenportal Niedersachsen, URL: http://www.geodaten.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=8702&article_id=25424&psmand=28 (besucht am 23.04.2016).
- Lauer, J., Billen, N. u. Zipf, A. (2013): Processing crowd sourced sensor data: from data acquisition to application, in: Proceedings of the Sixth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science, hrsg. von M. Sester, C. Mallet u. J. Krumm, New York: ACM, S. 43–48.
- Mallet, C. u. Bretar, F. (2009): Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and RemoteSensing, Bd. 64, S. 1–16.
- Márquez-Gámez, D. u. Devy, M. (2012): Active Visual-Based Detection and Tracking of Moving Objects from Clustering and Classification Methods, in: Lecture Notes in Computer Science, hrsg. von J. Blanc-Talon, W. Philips, D. Popescu, P. Scheunders u. P. Zemčík, Bd. 7517, Heidelberg: Springer, S. 361–373.
- Mather, P. M. u. Koch, M. (2011): Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction, 4. Aufl., Chichester: John Wiley & Sons.
- Memomaps (2016): ÖPNVKarte, URL: www.%C3%86pnvkarte.de (besucht am 23.04.2016).
- Meng, X., Wang, L., Silván-Cárdenas, J. L. u. Currit, N. (2009): A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 64, Ausg. 1, S. 117–124.
- Ministerium der Justiz und für Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (2016): Landesverordnung über Mindestvoraussetzungen für die Berücksichtigung der Belange der Kinder, der Personen mit Kleinkindern und der behinderten und alten Menschen beim Neu- oder Ausbau von Straßen Vom 9. Januar 1979, URL: <http://landesrecht.rlp.de/jportal/?quelle=jlink&query=StrBauMindVorV+RP+%C2%A7+2&psml=bsrlpprod.psml> (besucht am 30.04.2016).
- Mobasher, A., Bakillah, M., Rousell, A., Hahmann, S. u. Zipf, A. (2015): On the completeness of sidewalk information in OpenStreetMap, a case study of Germany, in: Proceedings of the 18th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Lissabon, Portugal.
- Montealegre, A. L., Lamelas, M. T. u. Riva, J. de la (2015): A Comparison of Open-Source LiDAR Filtering Algorithms in a Mediterranean Forest Environment, in:

- IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Bd. 8, Ausg. 8, S. 4072–4085.
- Montemerlo, M., Becker, J., Bhat, S., Dahlkamp, H., Dolgov, D., Ettinger, S., Haehnel, D., Hilden, T., Hoffmann, G., Huhnke, B., Johnston, D., Klumpp, S., Langer, D., Levandowski, A., Levinson, J., Marcil, J., Orenstein, D., Paefgen, J., Penny, I., Petrovskaya, A., Pflueger, M., Stanek, G., Stavens, D., Vogt, A. u. Thrun, S. (2008): Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge, in: Journal of Field Robotics, Bd. 25, Ausg. 9: Special Issue: Special Issue on the 2007 DARPA Urban Challenge, Part II, S. 569–597.
- Mooney, P. u. Corcoran, P. (2012): Characteristics of Heavily Edited Objects in OpenStreetMap, Version version, in: Future Internet, Bd. 4, Ausg. 1, S. 285–305.
- Müller, A., Neis, P., Auer, M. u. Zipf, A. (2010): Ein Routenplaner für Rollstuhlfahrer auf der Basis von OpenStreetMap-Daten - Konzeption, Realisierung und Perspektiven, in: Angewandte Geoinformatik 2010: Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg, hrsg. von J. Strobl, T. Blaschke u. G. Griesebner, Berlin, Offenbach: Wichmann, S. 258–261.
- Mund, J.-P., Wilke, R., Körner, M. u. Schultz, A. (2015): Detecting Multi-layered Forest Stands Using High Density Airborne LiDAR Data, in: GI_Forum 2015, Bd. 1, S. 178–188.
- Næsset, E., Ørka, H. O., Solberg, S., Bollandsås, O. M., Hansen, E. H., Mauya, E., Zababu, E., Malimbwi, R., Chamuya, N., Olsson, H. u. Gobakken, T. (2016): Mapping and estimating forest area and aboveground biomass in miombo woodlands in Tanzania using data from airborne laser scanning, TanDEM-X, RapidEye, and global forest maps: A comparison of estimated precision, in: Remote Sensing of Environment, Bd. 175, S. 282–300.
- Neis, P. (2014): Measuring the Reliability of Wheelchair User Route Planning based on Volunteered Geographic Information, in: Transactions in GIS, Bd. 19, Ausg. 2, S. 188–201.
- Neis, P. u. Zielstra, D. (2014): Generation of a tailored routing network for disabled people based on collaboratively collected geodata, in: Applied Geography, Bd. 47, S. 70–77.
- Neis, P., Zielstra, D. u. Zipf, A. (2011): The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007–2011, in: Future Internet, Bd. 4, Ausg. 1, S. 1–21.
- Neis, P., Zielstra, D., Zipf, A. u. Strunck, A. (2010): Empirische Untersuchungen zur Datenqualität von OpenStreetMap - Erfahrungen aus zwei Jahren Betrieb mehrerer OSM-Online-Dienste, in: Angewandte Geoinformatik 2010: Beiträge zum 22. AGIT-Symposium Salzburg, hrsg. von J. Strobl, T. Blaschke u. G. Griesebner, Berlin, Offenbach: Wichmann, S. 420–425.
- Open Data Commons (2016): ODC Open Database License (ODbL) Summary, URL: <http://opendatacommons.org/licenses/odbl/summary/> (besucht am 23.04.2016).

- OpenStreetMap (2016a): Attributierung von Straßen in Deutschland, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Attributierung_von_Stra%C3%9Fen_in_Deutschland (besucht am 01.05.2016).
- OpenStreetMap (2016b): DE:Bicycle/Meinungsstreit Radverkehrsanlagen, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Bicycle/Meinungsstreit_Radverkehrsanlagen (besucht am 01.05.2016).
- OpenStreetMap (2016c): DE:Key:highway, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Key:highway> (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016d): DE:Potential Datasources, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Potential_Datasources (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016e): Fahrradroutentagging Deutschland, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Fahrradroutentagging_Deutschland (besucht am 01.05.2016).
- OpenStreetMap (2016f): Features, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Features> (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016g): History of OpenStreetMap, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/History_of_OpenStreetMap (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016h): Key:smoothness, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:smoothness> (besucht am 05.05.2016).
- OpenStreetMap (2016i): Key:surface, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:surface> (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016j): Key:temporary, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:temporary> (besucht am 30.04.2016).
- OpenStreetMap (2016k): Key:tracktype, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:tracktype> (besucht am 09.05.2016).
- OpenStreetMap (2016l): Map Features, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features (besucht am 05.05.2016).
- OpenStreetMap (2016m): OpenStreetMap, URL: www.openstreetmap.org/ (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016n): Stats, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Stats> (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016o): taginfo: Keys, URL: <http://taginfo.openstreetmap.org/keys> (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016p): TIGER, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/TIGER> (besucht am 23.04.2016).
- OpenStreetMap (2016q): Wiki DE:Hauptseite, URL: <http://wiki.openstreetmap.org/wiki/DE:Hauptseite> (besucht am 01.05.2016).
- Pfeifer, N. u. Briese, C. (2007): Laser Scanning - Principles and Applications, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Veröffentlichungsdatenbank der technischen Universität Wien, Österreich, URL: http://publik.tuwien.ac.at/files/pubgeo_1951.pdf (besucht am 06.04.2016).
- Pourali, S., Arrowsmith, C., Chrisman, N. u. Matkan, A. (2014): Vertical accuracy assessment of LiDAR ground points using minimum distance approach, in: Proceedings

- of Research at Locate '14, Canberra, Australien, hrsg. von S. Winter u. C. Rizos, S. 86–96.
- Qin, R. u. Gruen, A. (2014): 3D change detection at street level using mobile laser scanning point clouds and terrestrial images, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 90, S. 23–35.
- rapidlasso GmbH (2016a): lasground, URL: <https://rapidlasso.com/lastools/lasground/> (besucht am 30.04.2016).
- rapidlasso GmbH (2016b): LASTools lincense agreement, URL: <http://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/LICENSE.txt> (besucht am 28.04.2016).
- Reutebuch, S. E., Andersen, H.-E. u. McGaughey, R. J. (2005): Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory, in: Journal of Forestry, S. 286–292.
- Rhein-Main-Verkehrsverbund Servicegesellschaft mbH (2016): namo - Nahtlose, barrierefreie Informations- und Mobilitätsketten für ältere Menschen, URL: <http://www.nahtlosmobil.eu/> (besucht am 06.05.2016).
- Rice, M. T., Curtin, K. M., Paez, F. I., Seitz, C. R. u. Qin, H. (2013): Crowdsourcing to Support Navigation for the Disabled, Annual Report, George Mason University, Fairfax, Virginia, Vereinigte Staaten, URL: <http://www.dtic.mil/cgi/tr/fulltext/u2/a588474.pdf> (besucht am 30.04.2016).
- Rieg, L., Wichmann, V., Rutzinger, M., Sailer, R., Geist, T. u. Stötter, J. (2014): Data infrastructure for multitemporal airborne LiDAR point cloud analysis – Examples from physical geography in high mountain environments, in: Computers, Environment and Urban Systems, Bd. 45, S. 137–146.
- Rosano, C., Rosso, A. L. u. Studenski, S. A. (2014): Aging, Brain, and Mobility: Progress and Opportunities, in: Journals of Gerontology: medical sciences, Bd. 69, Ausg. 11: Special Issue: Brain Aging, S. 1373–1374.
- Schlieder, C., Schmid, U., Munz, M. u. Stein, K. (2013): Assistive Technology to Support the Mobility of Senior Citizens, Overcoming Mobility Barriers and Establishing Mobility Chains by Social Collaboration, in: KI - Künstliche Intelligenz, Bd. 27, S. 247–253.
- Shewchuk, J. R. (2002): Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation, in: Computational Geometry, Bd. 22, Ausg. 1-3, S. 21–74.
- Sourceforge (2016): MCC-LIDAR, URL: <https://sourceforge.net/projects/mcclidar/> (besucht am 28.04.2016).
- Sozialhelden e.V. (2015): 500.000 markierte Orte auf der Wheelmap, URL: <https://community.wheelmap.org/500-000-markierte-orte-auf-der-wheelmap/> (besucht am 05.05.2016).
- Sozialverband VdK Deutschland e. V. (2016): Handbuch Barrierefreie Verkehrsraumgestaltung, URL: <http://www.vdk.de/deutschland/downloadglobalmime/49/Handbuch+Barrierefreie+Verkehrsraumgestaltung.pdf> (besucht am 30.04.2016).
- Statista (2016a): Anteil der Personen mit Behinderungen in der Schweiz nach Art der Beeinträchtigung in den Jahren von 1992 bis 2012, URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/417869/umfrage/schweiz-anteil-der->

- personen-mit-behinderungen-nach-art-der-beeintraechtigung/ (besucht am 05.05.2016).
- Statista (2016b): Anzahl von immobilen Schwerbehinderten in Deutschland nach Art der Behinderung im Jahr 2013, URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/247944/umfrage/anzahl-der-immobilen-schwerbehinderten-in-deutschland-nach-art-der-behinderung/> (besucht am 05.05.2016).
- Statistisches Bundesamt (2016a): 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland, URL: <https://www.destatis.de/bevoelkerungspyramide/> (besucht am 05.05.2016).
- Statistisches Bundesamt (2016b): Bevölkerungsdichte (Einwohner je km²) in Hamburg von 1995 bis 2013, URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/254514/umfrage/bevoelkerungsdichte-in-hamburg/> (besucht am 26.04.2016).
- Statistisches Bundesamt (2016c): Zusammengefasste Geburtenziffer nach Kalenderjahren, URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/Bevoelkerung/Geburten/Tabellen/GeburtenZiffer.html;jsessionid=BB29FB4B7839CE1F6D59A19603683A03.cae1> (besucht am 05.05.2016).
- Stein, K. u. Schlieder, C. (2013): A Geowiki for Participatory Mobility, in: Proceedings of the AGILE 2013, Leuven, Belgium.
- Stephens, M. (2013): Gender and the GeoWeb: divisions in the production of user-generated cartographic information, in: GeoJournal, Bd. 78, Ausg. 6, S. 981–996.
- Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Straßenentwurf, F. für (2012): Richtlinien für die Anlage von Landstraßen, Köln: FGSV-Verlag.
- Suger, B., Steder, B. u. Burgard, W. (2015): Traversability analysis for mobile robots in outdoor environments: A semi-supervised learning approach based on 3D-lidar data, in: 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 3941–3946.
- Theodoridis, S. u. Koutroumbas, K. (2009): Pattern Recognition, 4. Aufl., Elsevier.
- Tinkham, W. T., Huang, H., Smith, A. M. S., Shrestha, R., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Link, T. E., Glenn, N. F. u. Marks, D. G. (2011): A Comparison of Two Open Source LiDAR Surface Classification Algorithms, in: Remote Sensing, Bd. 3, Ausg. 3, S. 638–649.
- Vastaranta, M., Kankare, V., Holopainen, M., Yu, X., Hyppä, J. u. Hyppä, H. (2012): Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 67, S. 73–79.
- Vauhkonen, J., Packalen, P., Malinen, J., Pitkänen, J. u. Maltamo, M. (2014): Airborne laser scanning-based decision support for wood procurement planning, in: Scandinavian Journal of Forest Research, Bd. 29, Suppl. 1.
- Vincentz, F. (2016): Brücke der Riegelstraße über das Löbauer Wasser kurz vor der Riegel-Mühle, Nechern in Weißenberg, URL: http://wiki.openstreetmap.org/wiki/File:Wei%C3%9Fenberg_-_Nechern_-_Riegel-M%C3%BChle_10_ies.jpg.
- Vosselman, G. (2000): Slope based filtering of laser altimetry data, in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 33, Nr. B3/2, S. 935–942.

- Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C. u. Kraus, K. (2004): From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges, in: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. 35, Nr. B3, S. 201–206.
- Waymarkedtrails (2016): Waymarked Trails: Wanderwege, URL: <http://hiking.waymarkedtrails.org> (besucht am 23.04.2016).
- Wehr, A. u. Lohr, U. (1999): Airborne laser scanning - an introduction and overview, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 54, Ausg. 2-3, S. 68–82.
- White, J. C., Wulder, M. A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Cook, B. D., Pitt, D. u. Woods, M. (2013a): A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach, Information Report FI-X-010, Version 2.0, Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Canadian Wood Fibre Centre, URL: <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/34887.pdf> (besucht am 23.04.2016).
- White, J. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Pitt, D. u. Woods, M. (2013b): The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning, in: Forests, Bd. 4, Ausg. 3, S. 518–536.
- Woodman, O. J. (2007): An introduction to inertial navigation, Technical Report 696, Cambridge: University of Cambridge, Computer Laboratory, URL: <https://www.c1.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf> (besucht am 06.04.2016).
- Wulder, M. A., Coops, N. C., Hudak, A. T., Morsdorf, F., Nelson, R., Newnham, G. u. Vastaranta, M. (2013): Status and prospects for LiDAR remote sensing of forested ecosystems, in: Canadian Journal of Remote Sensing, Bd. 39, Nr. 1, S1–S5.
- Yang, B., Xu, W. u. Dong, Z. (2013): Automated Extraction of Building Outlines From Airborne Laser Scanning Point Clouds, in: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Bd. 10, Nr. 6, S. 1399–1403.
- Zhang, J. u. Lin, X. (2013): Filtering airborne LiDAR data by embedding smoothness-constrained segmentation in progressive TIN densification, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 81, S. 44–59.
- Zhang, K., Chen, S.-C., Whitman, D., Shyu, M.-L., Yan, J. u. Zhang, C. (2003): A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data, in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Bd. 41, Ausg. 4, S. 872–882.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bevölkerungsstruktur in Deutschland im Jahre 2013 und Prognose für 2060	2
2.1	Komponenten eines flugzeuggestützten Laserscanning-Systems und Aufnahmebereich am Boden	10
2.2	Scanmuster eines Laserscanning-Systems	11
2.3	Anzahl registrierter OSM-Nutzer seit August 2005	13
2.4	Anzahl von nodes, ways und relations in der Datenbank von OSM seit August 2005	14
2.5	Bearbeitungsmöglichkeiten von OSM-Daten	17
2.6	Die unterschiedlichen Wegtypen im OpenStreetMap-Datensatz im Untersuchungsbereich	21
3.1	Schummerung der interpolierten Klassifikationsergebnisse der vier Etappen des „MCC“-Algorithmus	30
3.2	Die Teilnehmer der Fallstudie, eingestuft entsprechend der Qualität ihrer Beiträge zu OSM	33
4.1	Unzusammenhängende Fußwege im Datensatz	39
4.2	Anliegerstraßen ohne Bürgersteige im Datensatz	40
4.3	Beispiel einer TIN-Struktur für Wege	44
4.4	Ausschnitt der generierten Steigungszellen	47
4.5	Beispielhafte TIN-Bildung auf einer schmalen Wegfläche	48
4.6	Vorgaben zur Dimensionierung von strassenbegleitenden Gehwegen	50
4.7	Der Raumbedarf für Kraftfahrzeuge und den öffentlichen Verkehr	51
4.8	Zulässige Längsneigung für Gehwege	55
4.9	Die fünf Treppenfeatures im Datensatz	57
4.10	Flache Brücke ohne geneigte Rampen	59
4.11	Ausschnitt aus dem noch nicht klassifizierten LiDAR-Datensatz	61
4.12	Ansicht einer Gruppe von Bäumen aus dem noch nicht klassifizierten LiDAR-Datensatz	64
4.13	Ausschnitte aus dem Klassifikationsergebnis des LiDAR-Datensatzes mit dem Verfahren „MCC“	65
4.14	Vergleich zweier Klassifikationsergebnisse mit dem Verfahren „MCC“	66
4.15	Steigungszellen, die eine runde oder eckige Form besitzen	68
4.16	Überlappende Steigungszellen	69
4.17	Steigungszellen nach Bereinigung der Topologiefehler	70

4.18 Drei unterschiedliche TIN auf Treppen	72
4.19 Triangulation der Höhenpunkte, die auf einem Wanderweg liegen	73
4.20 Häufigkeitsverteilung der auftretenden Steigungen in den berechneten TINs	74
4.21 Verschiedene Grade der Nutzbarkeit eines Weges	86
5.1 Beispiel der konstruierten Steigungszellen	93

Tabellenverzeichnis

4.1	Übersicht über die Wegtypen im Datensatz, zusammen mit ihrer Bedeutung	49
4.2	Relevante Steigungsbereiche und deren Eingruppierung in eine Kategorie	56
4.3	Informationen zu den Treppen im Datensatz	58
4.4	Statistik über die auftretenden Steigungen in den berechneten TINs	74
4.5	Oberflächenbeschaffenheit der Wegtypen im Datensatz, exklusive Tag-Auswertung	82
4.6	Tags, die im Datensatz vorkommen und die Oberfläche von Features näher beschreiben	83
4.7	Einordnung der Werte des Tags „surface“ in befestigte und unbefestigte Oberflächen	87
4.8	Einordnung aller Wegtypen und Tags in fünf Oberflächenkategorien	90
5.1	Statistik über die Steigungen in den Steigungszellen	94
5.2	Einordnung aller Wegfeatures in Oberflächenkategorien	97

Listingverzeichnis

2.1	Relation in OSM als Teil einer Buslinie	15
2.2	Ein way in OSM	16

A. Anhang

Auf der CD:

- Die digitale Version dieser Arbeit
- Die Features der Wege, für die die Untersuchung durchgeführt wurde, im Shape-Format
- Die klassifizierten Bodenpunkte, zugeschnitten auf die Wegbreite, im Shape-Format
- Quelltext zur programmatischen Berechnung der Mindestbreiten der Steigungszellen in der Programmierumgebung des GIS „ArcGIS“. Das Skript benötigt als Eingabeparameter einen Feature Layer.
- Die erzeugten Steigungszellen für das Untersuchungsgebiet im Shape-Format

Anlage:

Erklärung zur selbstständigen Abfassung der Master-Arbeit

Name:

Geburtsdatum:

Matrikel-Nummer:

Titel der Master-Arbeit:

.....

Ich versichere, dass ich die eingereichte Master-Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe verfasst habe. Anderer als der von mir angegebenen Hilfsmittel und Schriften habe ich mich nicht bedient. Alle wörtlich oder sinngemäß den Schriften anderer Autoren entnommenen Stellen habe ich kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift