

# **Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich**

Struktur- und Raumanalyse

## **Dissertation**

zur Erlangung des Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
der Fakultät Raumplanung der Technischen Universität Dortmund

vorgelegt von  
Mag. Tobias Panwinkler

Köln  
März 2025

## **Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing.**

an der Fakultät Raumplanung der Technischen Universität Dortmund

vorgelegt von

Mag. **Tobias Panwinkler** (Matrikelnummer 164087)

### **Gutachter und Prüfer**

apl. Prof. Dr. Joachim Scheiner

Fachgebiet Stadtentwicklung, Fakultät Raumplanung,  
Technische Universität Dortmund

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gerlach

Lehr- und Forschungsgebiet Straßenverkehrsplanung und Straßenverkehrstechnik,  
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, Bergische Universität Wuppertal

### **Vorsitzender der Prüfungskommission**

Vertretungsprof. Dr.-Ing. Jürgen Brunsing

Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsplanung, Fakultät Raumplanung,  
Technische Universität Dortmund

### **Eidesstattliche Versicherung**

Ich versichere, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst habe und alle in Anspruch genommenen Quellen und Hilfen als solche gekennzeichnet habe.

Des Weiteren versichere ich, dass diese Dissertation weder in der gleichen noch in einer anderen Fassung noch in Teilen weder an der Technischen Universität Dortmund noch an einer anderen Hochschule im Zusammenhang mit einer staatlichen oder akademischen Prüfung vorgelegt worden ist.

Köln, 10. März 2025

Tobias Panwinkler

## **Danksagung**

Zuerst gilt mein Dank Prof. Dr. Joachim Scheiner sowie Prof. Dr.-Ing. Christian Holz-Rau für ihre konstruktive Kritik mit der sie mich bei der Erstellung dieser Arbeit begleitet haben. Ihre Anmerkungen und kritischen Fragen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Zudem bin ich sehr dankbar dafür, Teil des Doktorandenkolloquiums des Fachbereichs Verkehrswesen und Verkehrsplanung sowie des Lehrstuhls Stadtentwicklung gewesen zu sein. Der Austausch mit den Kommilitoninnen und Kommilitonen war für mich äußerst hilfreich und ich bin allen Mitgliedern des Kolloquiums dankbar für das ehrliche Feedback und die vielen Gespräche.

Darüber hinaus gilt mein Dank der Bundesanstalt für Straßenwesen die mir die Möglichkeit gab, mein Promotionsvorhaben hier umzusetzen. Dabei gilt mein Dank zu allererst Dr. Andreas Schepers für dessen konstruktive Kritik sowie den Leitenden an der BAST für ihr Vertrauen und den Kolleginnen und Kollegen für deren inhaltlichen Austausch.

Schließlich gilt mein Dank meiner Familie und hier insbesondere meiner Frau sowie meinen Freundinnen und Freunden, die mich nicht nur mit dem Korrekturlesen dieser Arbeit unterstützt, sondern die mich auch durch ihr Interesse an meiner Forschung und ihren Zuspruch gestärkt haben.

*Euch allen vielen Dank!*

## **Allgemeine Hinweise**

In dieser Dissertation wird, soweit möglich, eine geschlechtsneutrale Personenbezeichnung (z. B. Radfahrende) verwendet. Sollte dies nicht möglich sein, wird eine Form für alle Geschlechter verwendet (z. B. der Gegner). Da diese Arbeit bereits veröffentlichte Passagen (teilweise in englischer Sprache) enthält, kann die Genderschreibweise hier in Einzelfällen abweichen.

Die Zitierweise orientiert sich an dem Zitationsleitfaden der Fakultät Raumplanung der TU Dortmund (Naumann und Brezina 2020). Handelt es sich bei den Quellen um Institutionen (z. B. Bundesanstalt für Straßenwesen) so wurden diese im Fließtext zur besseren Lesbarkeit möglichst mit Abkürzungen zitiert (z.B. BASt 2024). Die Abkürzung, der vollständige Name sowie das vollständige Zitat befinden sich im Literaturverzeichnis.



# Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung: Ausgangspunkt und Relevanz .....	1
1.1	Ausgangspunkt: Neue technische Entwicklungen .....	1
1.2	Technische Spezifizierungen: Pedelec (25) .....	2
1.3	Neues Unfallgeschehen .....	2
2	Stand der Forschung .....	3
2.1	Unfallgeschehen auf deutschen Straßen – Allgemein .....	3
2.2	Analyse der Unfälle unter Beteiligung eines Fahrrades .....	4
2.3	Analyse anhand Fallstudien / Teilregionen .....	5
3	Zielsetzung, Fragestellung und Hypothesen .....	10
3.1	Ziel .....	10
3.2	Forschungsfragen .....	11
3.3	Hypothesen .....	12
4	Methodischer Ansatz und Arbeitsplan .....	13
4.1	Ablauf der Dissertation .....	13
4.2	Ablauf der empirischen Untersuchung .....	13
4.2.1	Paper 1: Quantitative Analysen .....	13
4.2.2	Paper 2: Qualitative und quantitative Analysen .....	14
4.2.3	Paper 3: Räumliche Analysen .....	14
4.3	Materialzugang .....	15
4.3.1	Amtliche Straßenverkehrsunfalldaten für Deutschland .....	15
4.3.2	Daten generiert aus Freitextbeschreibung der Beamtinnen und Beamten ...	16
4.3.3	GIDAS Daten .....	17
4.3.4	Geo-Daten und raumbezogene Daten .....	17
5	Ergebnisse: Veröffentlichungen .....	19
5.1	Paper 1: Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich .....	19
5.2	Paper 2: Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity .....	32
5.3	Paper 3: Spatial Dimension of Accidents involving Pedelecs 25 and Conventional Bicycles .....	47
6	Diskussion .....	64
6.1	Aktuelle Entwicklung .....	64
6.2	Erkenntnisse .....	70
6.2.1	Paper 1: Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich .....	70

6.2.2	Paper 2: Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity .....	73
6.2.3	Paper 3: Spatial Dimension of Accidents involving Pedelecs 25 and Conventional Bicycles.....	74
6.2.4	Synopsis aus 1-3: Erkenntnisse zum Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich .....	76
7	Fazit.....	79
7.1	Zielerreichung .....	79
7.2	Schlussfolgerungen.....	80
7.3	Conclusio.....	86
8	Literatur .....	87

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unfälle mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden.....	66
Tabelle 2: Anteil Unfälle mit Personenschaden (PS) außerorts an allen Unfällen mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden .....	67
Tabelle 3: Anteil Alleinunfälle mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden .....	68
Tabelle 4: Unfälle mit Personenschaden (PS) unter Beteiligung älterer Nutzender .....	69

*Anmerkung: Tabellen der eingebetteten Artikel nicht angeführt*



# 1 Problemstellung: Ausgangspunkt und Relevanz

Unsere Gesellschaft steht aktuell vor großen Herausforderungen. Um sich Themen wie dem Klimawandel und dem Demographischen Wandel zu stellen, werden in den nächsten Jahren und Jahrzehnten grundsätzliche Veränderungen notwendig sein. Ein zentraler Bereich ist hierbei die Mobilität. Einerseits wird es notwendig sein, Mobilität nachhaltiger zu gestalten um dem Klimawandel entgegenzuwirken. Andererseits bedarf es der Anpassung des Mobilitätsangebots auf die veränderte gesellschaftliche Struktur. Hier setzt diese Dissertation an und untersucht, wie es um die Verkehrssicherheit eines neuen Verkehrsmittels – dem Pedelec – steht, das das Potential hat, einen Beitrag zu einem zukunftsfähigen Mobilitätsangebot zu leisten.

## 1.1 Ausgangspunkt: Neue technische Entwicklungen

Die ersten Prototypen von Elektrofahrrädern wurden bereits in den 1890 Jahren entwickelt. In den folgenden 100 Jahren wurden diese weiterentwickelt bis hin zu ersten kommerziellen Versionen. Doch erst neuen technischen Entwicklungen, insbesondere von Elektromotor und Batterie seit etwa dem Jahr 2000 machten es möglich, dass mit dem Pedelec 25 ein konkurrenzfähiges Produkt entwickelt wurde. Das Pedelec 25 ist ein Fahrrad mit einem elektrischen Hilfsmotor. Dieser unterstützt die Nutzenden während des Tretens, erleichtert so das Radfahren und kann es dadurch für Menschen attraktiv machen, denen dies zuvor nicht möglich oder nicht komfortabel war. (Hung und Lim 2020, BBSR 2014, BMDV 2022, StVZO 2024).

Entsprechend sind Pedelecs bereits seit einigen Jahren sehr beliebt: Der Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) berichtet jährlich über die Anzahl an in Deutschland verkauften Fahrrädern und vermeldete bereits für das Jahr 2015 in Deutschland 535.000 verkaufte Elektrofahrräder (der ZIV verwendet den Begriff „*E-Bikes*“, davon können 2016 fast 99 % aller verkauften „*E-Bikes*“ als Pedelecs 25 eingeordnet werden), das entsprach einer Steigerung gegenüber 2014 um 11,5% und verdeutlicht die steigende Beliebtheit von Pedelecs. Bereits im Jahr 2015 schätzte der ZIV den Bestand an Elektrofahrrädern auf 2,5 Millionen, bis zum Jahr 2023 ist der Bestand geschätzt auf 11 Millionen angestiegen. Zudem wurden im Jahr 2023 erstmals mehr „*E-Bikes*“ (nach ZIV Definition) als konventionelle Fahrräder verkauft. (ZIV 2016, 2017, 2024).

## 1.2 Technische Spezifizierungen: Pedelec (25)

Das Pedelec 25 (im Folgenden „P25“) ist ein Fahrrad mit elektrischem Hilfsmotor (BMDV 2022). In der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) ist es in §63a (2) definiert als Fahrrad, das *„mit einer elektrischen Trethilfe ausgerüstet ist, die mit einem elektromotorischen Hilfsantrieb mit einer größten Nenndauerleistung von 0,25 kW ausgestattet ist, dessen Unterstützung sich mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit progressiv verringert und beim Erreichen einer Geschwindigkeit von 25 km/h oder wenn der Fahrer mit dem Treten oder Kurbeln einhält, unterbrochen wird“* (StVZO 2024: §63a (2)).

Das P25 ist rechtlich dem konventionellen Fahrrad (im Folgenden „kFR“) gleichgestellt. Es gelten die gleichen Verkehrsregeln, beispielsweise müssen P25 Radwege benutzen, wenn diese benutzungspflichtig sind. Zum Fahren eines P25 ist keine Fahrerlaubnis notwendig. Eine Versicherung ist nicht verpflichtend, ein Versicherungskennzeichen nicht vorgesehen. Das Tragen eines Schutzhelmes wird empfohlen, ist aber nicht verpflichtend. (BMDV 2022, StVZO 2024).

Dem gegenüber stehen das Pedelec 45 (auch S(peed)-Pedelec genannt, Unterstützung bis 45 km/h) sowie das E-Bike. Hierbei handelt es sich um Zweiräder, die auch ohne Treten elektrisch angetrieben werden können (BMDV 2022, Klein 2016). Sie stellen daher keine Fahrräder im Sinne der Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (WrÜbk 1977) dar und werden deshalb in dieser Arbeit nicht betrachtet.

## 1.3 Neues Unfallgeschehen

Die Unfallforschung der Versicherer (UDV) zeigte bereits, dass sich 2017 die Nutzenden von P25 und kFR unterschieden. Es wird daher vermutet, dass sich auch die Unfallgeschehen von P25 und kFR sowie deren Verunglückten unterscheiden (Schepers et al. 2014, UDV 2017). Zum Unfallgeschehen von P25 in Deutschland gibt es bis dato jedoch wenige Forschungsergebnisse, da erst seit 2014 werden in der amtlichen Unfallstatistik Unfälle von kFR und P25 separat geführt, zuvor wurden beide in der Kategorie „Fahrrad“ ausgewiesen (StBA 2014, 2015). Eine grundlegende Analyse des Unfallgeschehens von P25 sowie der Unterschiede zum Unfallgeschehen konventioneller Fahrräder erscheint als notwendig, um Gefährdungspotentiale zu beschreiben und entsprechende verhaltensbezogene, fahrzeugtechnische, verkehrsplanerische und verwaltungstechnische Handlungsempfehlungen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zu erarbeiten.

## 2 Stand der Forschung

Das P25 ist nach wie vor ein neues Verkehrsmittel und sein Unfallgeschehen noch wenig erforscht. Im folgenden Kapitel wird auf bereits bestehende Arbeiten eingegangen und daraus der notwendige Forschungsbedarf beschrieben, der die Basis für die im Folgenden (Kapitel 3) formulierten Ziele, Forschungsfragen und Hypothesen dieser Arbeit bildet. Die Literaturübersicht wird schrittweise vertieft. Ausgehend von einer Übersicht des Unfallgeschehens im Allgemeinen wird anschließend das Unfallgeschehen von Fahrrädern vertieft betrachtet und dieses soweit möglich weiter nach P25 und kFR differenziert, um schließlich im dritten Schritt Details zu beschreiben.

### 2.1 Unfallgeschehen auf deutschen Straßen – Allgemein

Das Statistische Bundesamt (StBA) liefert mit dem Jahresbericht Verkehr – Verkehrsunfälle (StBA 2022a) eine umfangreiche Auswertung des Straßenverkehrsunfallgeschehens in Deutschland anhand unfallrelevanter Merkmalskombinationen. Die Analyse berücksichtigt sämtliche polizeilich registrierte Unfälle des jeweiligen Jahres. Die Jahresveröffentlichung enthält insbesondere Angaben über Unfälle und Verunglückte nach Unfallart und -typ, nach Straßenart, Ortslage, Art der Verkehrsbeteiligung und Unfallursachen. Zum Unfallgeschehen von P25 werden nur grundlegende Aussagen getroffen.

Auf internationaler Ebene gibt das International Transport Forum (ITF), integriert in die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), mit dem jährlich erscheinenden „*Road Safety Annual Report*“ (ITF 2023) eine Datengrundlage für den Vergleich des Straßenverkehrsunfallgeschehens in den OECD Mitgliedstaaten. Der Jahresbericht wird von der International Traffic Safety Data and Analysis (IRTAD) Group erstellt (ITF 2023). Die Europäische Kommission veröffentlicht zudem den „*Annual statistical report on road safety in the EU*“ (EC 2024) mit Daten zu dem Unfallgeschehen in den EU Mitgliedstaaten, basierend auf der CARE Datenbank (Community database on Accidents on the Roads in Europe). Auch hier werden jeweils nur grundlegende Aussagen zum Unfallgeschehen von P25 gegeben. (EC 2024)

Die beschriebene Literatur gibt bereits einen Hinweis darauf, dass allgemeine Beschreibungen des Unfallgeschehens beziehungsweise statistische Jahresberichte zum Unfallgeschehen meist auf Kraftfahrzeuge konzentriert sind. Unfälle unter Beteiligung von Fahrrädern werden nur sehr grundsätzlich beschrieben. Hier zeigt sich der **erste Schwerpunkt des Forschungsbedarfs** zur genaueren Beschreibung des Unfallgeschehens von Fahrrädern. Im Folgenden werden daher jene Arbeiten beschrieben, die sich speziell mit dem Unfallgeschehen von Fahrrädern beschäftigen.

## 2.2 Analyse der Unfälle unter Beteiligung eines Fahrrades

Neben dem Jahresbericht Verkehr (siehe Kapitel 2.1) lieferte das Statistische Bundesamt jährlich den Fachbericht „Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr“ (StBA 2022b). Dieser Bericht ist eine weiterführende Analyse der Unfälle von Kraft- und Zweirädern, basierend auf den Ergebnissen des Jahresberichtes Verkehr. Dabei wird auch auf das Unfallgeschehen von P25 eingegangen. Eine vertiefte Analyse des Unfallgeschehens dieser Fahrzeuge fehlt jedoch.

Das Unfallgeschehen (konventioneller) Fahrräder in Deutschland wird von Schreck (2016) vertieft analysiert. Er gibt einen umfangreichen Überblick des Forschungsstandes zu diesem Thema, bespricht grundlegende Fakten, etwa zum Bestand an Fahrrädern und listet Fahrradpotentiale sowie Fördermöglichkeiten auf. Anschließend wird das Unfallgeschehen von Fahrradbenutzern detailliert analysiert: es wird ein Überblick der zeitlichen Entwicklung sowohl der Unfälle als auch der dabei Verunglückten gegeben; die Unfälle werden nach weiteren Merkmalen wie Ortslage, Unfallbeteiligten, Unfalltyp und Unfallart sowie Unfallschwere untersucht. Auffällig sind hierbei insbesondere die hohe Anzahl an Einbiegen-/Kreuzen-Unfällen. Dazu werden anschließend einige charakteristische Unfalltypen (mit Hilfe der Dreistelligen Unfalltypen) genauer betrachtet. Abschließend gibt Schreck einen Ausblick über zukünftige Szenarien und Risiken.

Die UDV gibt einen Überblick zur Verkehrssicherheit von Elektrofahrrädern in Deutschland, basierend auf den amtlichen Daten des Statistischen Bundesamtes. Darin wird festgestellt: „*Pedelec*fahrer verunglücken schwerer als *Fahrrad*fahrer ihrer jeweiligen Altersgruppe“ (UDV 2017: 21). Bereits zuvor veröffentlichte die UDV eine „*Pedelec – Naturalistic Cycling Studie*“ (Schleinitz et al. 2014). Dem Titel entsprechend wurden „*Zweiräder* (Fahrräder, P25 und P45, anm.) von *Versuchsteilnehmern* (insgesamt 90 in drei Altersgruppen, anm.) mit *Kameras und zusätzlicher Sensorik* ausgestattet, um das ‚normale‘ Fahr-

*und Nutzungsverhalten der jeweiligen Fahrer über einen längeren Zeitraum hinweg dokumentieren zu können“* (Schleinitz et al. 2014: 10). Ein erhöhtes Risiko für P25 wird hier nicht festgestellt, es wird jedoch auf die im Jahr 2014 noch geringe Anzahl an P25 im Straßenverkehr sowie auf die geringe Anzahl an Konfliktsituationen in der Studie hingewiesen, die eine allgemeine Hochrechnung erschweren. (Schleinitz et al. 2014)

Schepers et al. (2014) vergleichen das Unfallgeschehen von kFR und Pedelecs (gemeint ist hier P25) in den Niederlanden anhand zweier Datensätze die mittels Fragebögen vom niederländischen Ministerium für Infrastruktur und Umwelt erhoben wurden. Mittels binärer logistischer Regression verglichen sie Gruppen von P25- und kFR-Nutzenden und dabei zusätzlich Untergruppen von Verletzten und „Nicht-Verletzten“. Sie konnten dabei Unterschiede zwischen P25- und kFR-Nutzenden feststellen, diese waren jedoch gering. Insbesondere konnten sie feststellen, dass P25-Nutzende öfter Unfälle beim Auf- und Absteigen, in Kurven und beim Überholen haben als kFR-Nutzende und, dass P25-Nutzende ein höheres Risiko haben, bei einem Unfall schwer verletzt zu werden (Aufnahme in einem Krankenhaus).

Die beschriebene Literatur gibt bereits einen Hinweis darauf, dass Fahrradunfällen spezielle Ursachen zugrunde liegen. Entsprechend zeigt sich **der zweite Schwerpunkt des Forschungsbedarfs** nach den fahrradspezifischen, insbesondere P25-spezifischen, Unfallursachen. Im Folgenden wird bereits vorhandene Literatur beschrieben, die sich mit Details und Spezifika von Fahrradunfällen beschäftigt.

### **2.3 Analyse anhand Fallstudien / Teilregionen**

Schreck und Pöppel-Decker (2014) untersuchen das Unfallgeschehen von Fahrradnutzenden für eine spezifische und in den Medien sehr oft diskutierte Unfallsituation: Unfälle zwischen rechtsabbiegenden Güterkraftfahrzeugen und geradeausfahrenden Radfahrern. Diese Unfallsituation kann anhand der amtlichen Straßenverkehrsunfalldaten nicht für das gesamte Bundesgebiet ausgewertet werden, da die benötigten Informationen (sogenannte Unfalltyp Dreisteller) nur für vier Bundesländer vorliegen. Daher mussten die Daten anhand statistischer Verfahren hochgerechnet werden, um Aussagen für Deutschland treffen zu können. Anhand der Hochrechnung wird eine Übersicht des Anteils an „Toter-Winkel-Unfällen“ an allen (Fahrrad)Unfällen gegeben und deren hohe Unfallschwere hervorgehoben.

Otte, Facius und Müller (2014) führten eine erste Auswertung der GIDAS (German In-Depth Accident Study: umfangreiche Studie zur Erhebung von Unfalldaten. Eine detaillierte Darstellung der GIDAS Daten folgt in Abschnitt 4.3.3) Daten zu P25 durch und verglichen das Unfallgeschehen von P25 und kFR in Hannover und Dresden. Es wurden die Daten der Jahre 2005 bis 2013 ausgewertet. Da die ersten P25-Unfälle erst 2010 dokumentiert wurden, konnte die Studie insgesamt nur 30 P25-Unfälle untersuchen. Somit handelt es sich um keine statistische Analyse, sondern um eine nicht repräsentative Analyse von Einzelfällen. Untersucht wurden die Kriterien: Unfalltyp, Alter der Fahrer, Kollisionsgeschwindigkeiten, Helmnutzung, Zweiradbeschädigung sowie die Verletzungsschwere der Fahrer. Wichtige Erkenntnis der Untersuchung war, dass bei den untersuchten P25-Unfällen der Anteil der Alleinunfälle höher war. Zudem wurde bei P25-Unfällen eine höhere Kollisionsgeschwindigkeit festgestellt, was zu einer deutlich höheren Kollisionsenergie führt, die durch das höhere Gewicht des P25 zusätzlich gesteigert wird. Die Analyse zeigte also Unterschiede im Unfallgeschehen von P25 und kFR, notwendig wäre aber eine repräsentative Analyse mit einer weitaus größeren Fallzahl an P25-Unfällen.

Boele-Vos et al. (2016) führten eine sogenannte „*In-Depth*“ Studie zu Fahrrad-Alleinunfällen und Unfällen zwischen Fahrrädern in den Niederlanden durch. Die Gruppe der Fahrer schloss hier P25 explizit mit ein, kFR und P25 wurden verglichen. Ziel war es, Faktoren und Umstände zu eruieren, die diese Unfälle beeinflussen. Der Schwerpunkt lag dabei auf Fahrradbenutzenden, die mindestens 50 Jahre alt waren, da diese Gruppe an den meisten Fahrrad-Alleinunfällen beteiligt ist. Zu den untersuchten Unfällen wurden detaillierte Daten zum (Fahr)verhalten der Verkehrsteilnehmenden, Art und Zustand der beteiligten Fahrräder sowie Straßenzustand und Umwelteinflüssen an der Unfallstelle erhoben. Jeder Unfall wurde analysiert und standardisiert beschrieben. Gesammelt wurden Informationen zur Verkehrssituation vor dem Zusammenstoß, zu Faktoren, die eine Rolle im Zusammenhang mit dem Zusammenstoß spielten, zu der kritische Situation zu der die Faktoren, führten, zu dem eigentlichen Zusammenstoß, zu den Verletzten sowie zu den Faktoren, die zu den Verletzungen führten. Im Ergebnis kategorisierten sie diese Unfälle in drei Gruppen: 1) Stürze: hier zeigte sich, dass Nutzende die mindestens 75 Jahre alt waren öfter stürzten als Jüngere; 2) Fahrradnutzende, die mit einem Gegenstand zusammenstoßen; 3) Zusammenstöße zwischen Fahrrad und anderen langsamen Verkehrsteilnehmenden: hier zeigte sich, dass P25-Nutzende öfter an einem Unfall beim Überholen beteiligt sind. Als Faktoren für Fahrrad-Alleinunfälle sowie zwischen Fahrrädern und langsamen Verkehrsteilnehmenden

wurden beschrieben: Grundlegende Faktoren (insbesondere das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmender), „menschliche“ Faktoren, fahrzeugtechnische Faktoren, Straßenfaktoren.

Kovácsová et al. (2016) untersuchen in ihrer Studie das Fahrverhalten von P25- und kFR-Nutzenden in den Niederlanden. Sie vergleichen die beiden Nutzendengruppen und differenzieren dabei die Nutzenden jeweils noch nach Altersgruppen (30-45 Jährige versus 65+ Jährige). Dabei weisen sie auf die Wichtigkeit der Unterscheidung zwischen Fahrkönnen („*riding skill*“ bzw. „*performance*“) und Fahrverhalten („*riding style*“ bzw. „*behavior*“) hin. Für die Studie nahmen insgesamt 61 Probanden der beiden Testgruppen an einer Untersuchung teil, bei der drei Übungen bei geringer Fahrgeschwindigkeit jeweils mit einem P25 und einem kFR durchgeführt wurden. Eine wichtige Erkenntnis der Studie ist, dass P25-Nutzende zwar nur mit geringfügig höherer Durchschnittsgeschwindigkeit fahren, diese jedoch wesentlich schneller erreichen, also schneller beschleunigen. Diese Erkenntnis könnte hilfreich für die Untersuchung von Unfällen, bei denen ein P25 ein kFR oder P25 überholt, sein.

Basierend auf der Erkenntnis, dass sich eine Vielzahl der P25-Unfälle beim Auf-/Absteigen ereignen, untersuchten Twisk, Platteel und Lovegrove (2017) die Stabilität von Fahrrad- und P25-Fahrenden beim Aufsteigen und unterschieden dabei zwischen jüngeren (30-45 Jahre) und älteren (65+ Jahre) Nutzenden in Den Haag (Niederlande). Sie kamen zu der Erkenntnis, dass sich der Prozess des Aufsteigens in zwei Phasen unterteilt: in der ersten Phase, in der die Füße der Nutzenden den Bodenkontakt aufgeben, um auf die Pedale zu steigen sind P25 weniger stabil, da das Gewicht des Fahrzeugs deutlich höher ist. Gerade ältere Nutzende sind hier einem höheren Unfallrisiko ausgesetzt. In der zweiten Phase, in der das Fahrzeug durch die Beschleunigung stabilisiert wird, ist das P25 aufgrund der schnelleren Beschleunigung jedoch einem geringeren Unfallrisiko ausgesetzt.

Jones, Harms und Heinen (2016) befragten in ihrer Studie Personen, die ein P25 besitzen in Oxford (UK) und Randstad (Niederlande), um Motive für den Kauf eines P25 zu untersuchen. Zudem analysierten sie anhand der Interviews auch die Fahrerfahrungen mit dem P25 sowie den Einfluss auf die Mobilität, die Gesundheit und das Wohlbefinden der Befragten. Die Probanden wurden auch nach gefährlichen Situationen befragt, um Rückschlüsse auf mögliche Unfallursachen ziehen zu können.

Das schweizerische Bundesamt für Strassen (ASTRA) befasste sich mit den Auswirkungen von „Elketrovelos“ (gemeint sind hier „schnelle und langsame Pedelecs“, jedoch gelten abweichende Definitionen). Dabei wird auch das Unfallgeschehen dieser Fahrzeuge anhand einer Felderhebung in Genf und Bern betrachtet und mit kFR verglichen. Es wird deutlich, dass schnelle und langsame E-Velos unterschiedlich genutzt werden und daher unterschiedliche Anforderungen an Nutzende, Straßenraum aber auch die weiteren Verkehrsteilnehmenden entstehen. Wichtige Erkenntnis ist daher, dass die meisten Unfälle mit „E-Velo“-Beteiligung Selbstunfälle sind oder die gefahrene Geschwindigkeit unterschätzt wurde. Deswegen sollen Ausbildungs-, Sensibilisierungs- und Kommunikationsmaßnahmen intensiviert werden, und dies sowohl für „E-Velo“-Fahrende als auch bei den anderen Verkehrsteilnehmenden. (ASTRA 2017)

Holz-Rau und Scheiner (2009) vergleichen in ihrer Studie die Verkehrssicherheit in Stadt und (Um-)Land. Dabei wurden die Daten der Straßenverkehrsunfallstatistik auf der Ebene der Landkreise sowie der Länder analysiert. Für die Länder Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen sowie für die beiden Fallstudienregionen Schwerin und Wilhelmshaven wurden räumlich und nach Altersgruppen differenzierte Risikokennziffern errechnet. Diese zeigen, dass das Klischee vom risikobehafteten Stadtleben, falsch ist. Differenziert nach der Unfallschwere und bezogen auf die Bevölkerung ist das *„Risiko [...] getötet oder schwer verletzt zu werden in Kernstädten [...] wesentlich niedriger als in der Suburbia oder dem Land“* (Holz-Rau und Scheiner 2009: 176). Zudem konnten deutlich höhere Unfallkosten im suburbanen und ländlichen Raum nachgewiesen werden.

Holz-Rau und Hölderich (2016) analysieren in ihrer Arbeit die Straßenverkehrsunfälle in den Gemeinden Nordrhein-Westfalens anhand der Verunglückten (Unfallschwere und Art der Verkehrsteilnahme), der Einwohnerzahl der Gemeinden sowie der Höhenunterschiede auf dem Gemeindegebiet. Dabei konnten sie nachweisen, dass die Höhenunterschiede im Gemeindegebiet eine geringere aber durchaus relevante Rolle spielen. Es zeigte sich ein grundsätzlich u-förmiger Verlauf der Getötetenraten (hohe Raten bei geringen und sehr starken Höhenunterschieden und niedrigeren Raten bei mäßigen und starken Höhenunterschieden). Getrennt nach Unfallbeteiligten ergaben sich jedoch sehr unterschiedliche Verteilungen der Raten nach Höhenunterschieden. Zudem zeigte sich, dass die Getötetenrate in kleinen Gemeinden 3-mal so hoch ist wie in Großstädten, jene der Schwerverletzten 1,5-mal so hoch.

Vandenbulcke et al. (2009) analysieren in ihrer Studie ausführlich den Fahrradverkehr, insbesondere Pendelnde, in Belgien. Auf der Basis der 589 Gemeinden Belgiens wird eine räumliche Analyse durchgeführt. Dabei wird das Verletzungsrisiko für die Gemeinden modelliert. Zusammen mit der Variable des Fahrradanteils (keine explizite Differenzierung von P25 und kFR) am Modal Split wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, die das Unfallrisiko der Gemeinden klassifiziert. Dabei konnte festgestellt werden, dass ein hoher Anteil an Fahrradpendelnden in der Gemeinde mit einem geringen Verletzungsrisiko korreliert. Zudem konnte festgestellt werden, dass der Anteil an Fahrradpendelnden in dicht bebautem Gebiet höher ist als in dünn besiedelten Gebieten. Auch sind die Verletztenraten in urbanisierten Gemeinden signifikant niedriger als in weniger urbanisierten Gemeinden.

Die Literaturlauswahl zeigt, dass bereits einige Spezifika des Unfallgeschehens dargestellt wurden und es hier Forschungsbedarf gibt, diese zu vertiefen, zu ergänzen und systematisiert auszuwerten. Da im Sinne der Verkehrsarbeit (insbesondere unter dem Ziel Vision Zero) zuallererst schwere Unfälle mit getöteten oder schwerverletzten Verkehrsteilnehmenden verhindert werden sollen, zeigt sich hier die Notwendigkeit der **Vertiefung des zweiten Schwerpunkts des Forschungsbedarfs**, um abzuschätzen, welche Ursache eine schwere oder gar tödliche Verletzung besonders wahrscheinlich machen.

Die zuletzt dargestellten Arbeiten lassen zudem vermuten, dass sich Fahrradunfälle nicht gleichmäßig über das Staatsgebiet verteilen und dass geographische Faktoren wie etwa das Relief einen Einfluss auf Unfallrisiko und Unfallschwere haben könnten. Hieraus ergibt sich der **dritte Schwerpunkt des Forschungsbedarfs**.

Zusammengefasst können aus der Literaturübersicht drei Schwerpunkte des Forschungsbedarfes beschrieben werden: eine generelle Beschreibung des Unfallgeschehens von Fahrrädern, eine detaillierte Beschreibung von fahrradspezifischen Unfallursachen sowie eine räumliche Differenzierung des Unfallgeschehens von Fahrradunfällen – jeweils mit dem Bedarf der Differenzierten Betrachtung der P25.

### 3 Zielsetzung, Fragestellung und Hypothesen

Die Literaturanalyse zeigte bereits, dass sich mit dem Aufkommen der neuen Mobilitätsform P25 auch das Unfallgeschehen verändert. Allerdings fehlt bisher eine Analyse der Gesamtheit aller polizeilich registrierten P25-Unfälle sowie deren spezifischen Ursachen und deren räumlich Muster. Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Aus der Literaturanalyse ergeben sich daher folgende Zielstellungen, Forschungsfragen und Hypothesen.

#### 3.1 Ziel

Ziel der Dissertation ist es, einen detaillierten Statusbericht des Unfallgeschehens von P25 in Deutschland zu geben und die Unterschiede zum Unfallgeschehen von kFR darzustellen.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden im Rahmen dieser Promotion drei Untersuchungen durchgeführt. Für die drei Untersuchungen werden folgende Teilziele formuliert:

Die Dissertation soll die Gesamtheit aller Unfälle unter Beteiligung eines Fahrrades (P25 und/oder kFR) in Deutschland analysieren und einen Statusbericht grundlegender Merkmale von Unfällen dieser Verkehrsbeteiligungsarten geben.

Zudem sollen die spezifischen Eigenheiten im Unfallgeschehen von P25 anhand von Fallstudien mehrerer Unfälle dieses Fahrzeugtyps **vertieft beschrieben** und **qualitativen** Aussagen zu der Charakteristik von P25-Unfällen getroffen werden. Ziel ist es, multidimensional-komplexe, noch nicht oder wenig erfasste, oft subjektive Sachverhalte innerhalb des Unfallgeschehens der P25 zu erforschen und Zusammenhänge zwischen Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit schwerer Verletzungen aufzuzeigen.

Außerdem ist es Ziel, alle Fahrradunfälle (P25 und kFR) räumlich exakt zu verorten um damit räumliche Analysen durchzuführen. Darauf aufbauend ist es Ziel, räumlichen Muster der Unfälle von P25 und kFR darzustellen, deren Unterschiede zu beschreiben und den Einfluss wichtiger geographische Faktoren zu schätzen.

Ziel aller drei Teilfragestellungen ist es, die übergeordnete Fragestellung der Dissertation zu beantworten und mit den Erkenntnissen dieser Analysen die Wissensgrundlage für die Ableitung verhaltensbezogener, fahrzeugtechnischer, verkehrsplanerischer und verwaltungstechnischer Handlungsempfehlungen bereitzustellen, um die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmenden zu erhöhen.

## 3.2 Forschungsfragen

### Zentrale Forschungsfrage

Um das in 3.1 beschriebene Forschungsziel zu erreichen gilt es, die zentrale Forschungsfrage zu beantworten:

Welche Strukturen und Besonderheiten weist das Unfallgeschehen von P25 auf und inwiefern unterscheidet es sich von jenem der kFR?

Die Forschungsfrage wird in die folgenden drei Teilfragen zerlegt. Die Teilfragen werden getrennt – jeweils in einem wissenschaftlichen Aufsatz (peer reviewed Paper) – beantwortet, um gemeinsam die übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten.

### Teilfragen

1. Die erste Arbeit soll die Teilfrage beantworten, ob sich die Verbreitung von P25 maßgeblich auf das Unfallgeschehen von Fahrrädern (P25 und kFR gesamt) auswirkt, ob sich P25-Unfälle von kFR-Unfällen unterscheiden (etwa schwerer sind) und ob sich dadurch neue Anforderungen an die Verkehrssicherheitsarbeit ergeben. Damit soll das Unfallgeschehen beider Fahrradtypen beschrieben und detaillierte, quantitative Aussagen zur Gesamtheit aller polizeilich registrierten Fahrradunfällen getroffen werden. Dazu sollen folgende Fragen beantwortet werden:
  - Lassen sich Unterschiede in der Unfallbelastung und Unfallschwere von P25 und kFR erkennen?
  - Weist das Unfallgeschehen von P25 und kFR unterschiedliche Schwerpunkte auf?
  - Können mittels demographischer Analyse der verunglückten Nutzenden von P25 und kFR Unterschiede festgestellt werden?
  - Können mittels Detailanalyse vertiefte Erkenntnisse gewonnen werden?
2. Im zweiten Paper soll das Unfallgeschehen von P25 in Deutschland anhand der Teilgruppe der Alleinunfälle **vertieft beschrieben** und **qualitativen** Aussagen zu der Charakteristik von P25-Unfällen getroffen werden. Dazu sollen folgende Fragen beantwortet werden:
  - Was sind die Ursachen von P25-Alleinunfällen?
  - Welchen Einfluss haben diese Ursachen auf die Schwere des Unfalls?

3. Im dritten Paper soll die Analyse von Fahrradunfällen um eine geografische Perspektive erweitert werden, indem regionale Muster von Fahrradunfällen und deren Schwere untersucht sowie der Einfluss geografischer Faktoren auf die Unfallschwere aufgezeigt werden. Dazu sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- In welchen Regionen ist das Risiko und die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls am höchsten beziehungsweise welche Muster lassen sich diesbezüglich beschreiben?
- Welche Zusammenhänge zwischen diesen räumlichen Mustern und weiteren geographischen Einflussfaktoren lassen sich darstellen?
- Welchen Einfluss haben diese geographischen Faktoren auf das Risiko beziehungsweise die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls?
- Unterscheiden sich P25 und kFR in räumlichen Unfallanalysen und wenn ja welche Unterschiede lassen sich beschreiben?

### 3.3 Hypothesen

Zur Beantwortung der Forschungsfrage soll in der Dissertation folgende Hypothese geprüft werden:

H<sub>A</sub>: Das Unfallgeschehen von P25 weist einmalige, charakteristische Strukturen auf und unterscheidet sich grundsätzlich vom Unfallgeschehen der kFR.

In Analogie zur Unterteilung der Forschungsziele und Forschungsfragen wurde auch die zentralen Hypothesen unterteilt, deren Ergebnisse jeweils zur Prüfung der zentralen Hypothesen beitragen sollen:

H<sub>A1</sub>: Das Unfallgeschehen von P25 weist in seiner Gesamtheit aller polizeilich erfassten Unfälle Deutschlands eigene Charakteristika auf. Im Vergleich zum Unfallgeschehen der kFR ergibt sich eine geringere Unfallbelastung aber eine höhere durchschnittliche Unfallschwere sowie unterschiedliche Schwerpunkte der Unfallmerkmale.

H<sub>A2</sub>: P25-Unfälle weisen pedelec-spezifische Ursachen auf, deren Einfluss auf die Unfallschwere nicht von der Häufigkeit der jeweiligen Unfälle abhängig ist.

H<sub>A3</sub>: Das Unfallgeschehen von P25 weist eigene **räumliche** Muster auf, die nach (Raum)typen differenziert werden können und sich von jenem der kFR unterscheiden. Zudem haben unterschiedliche Geographische Faktoren Einfluss auf die Unfallschwere von Fahrradunfällen.

## **4 Methodischer Ansatz und Arbeitsplan**

### **4.1 Ablauf der Dissertation**

In der Vorliegenden Dissertation wurden Zielstellungen in drei Dimensionen erörtert. Darauf aufbauend wurden drei Detailhypothesen definiert, die zusammen die grundlegende Hypothese beantworten sollen. Deshalb wird die Promotion als kumulative Promotion in Form von drei Wissenschaftlichen Aufsätzen (peer reviewed Paper) zu je mind. 30.000 Zeichen durchgeführt. Die drei Paper sollen die folgenden Themen analysieren:

- Paper 1 Unfallgeschehen von P25: Strukturanalyse der Gesamtheit aller P25- und kFR-Unfälle in Deutschland
- Paper 2: Unfallgeschehen von P25: Vertiefte Einzelfallanalyse der P25-Alleinunfälle in Deutschland
- Paper 3 Unfallgeschehen von P25: räumliche Analyse der Gesamtheit aller P25- und kFR-Unfälle in Deutschland

Diese drei Paper wurden als drei eigenständige Arbeiten jeweils in einem wissenschaftlichen Journal publiziert werden. Dabei sollten die drei Paper jeweils alleine für sich stehen und eine abgeschlossene Analyse einer Untersuchung darstellen. Die späteren Paper sollten jedoch auf den Ergebnissen der zuvor erarbeiteten Paper aufbauen.

Das erste Paper wird in deutscher Sprache, das zweite und dritte Paper in englischer Sprache erstellt und veröffentlicht.

### **4.2 Ablauf der empirischen Untersuchung**

Im folgenden Abschnitt wird der Ablauf der empirischen Analysen und die darin verwendeten Methoden – getrennt nach Paper – beschrieben.

#### **4.2.1 Paper 1: Quantitative Analysen**

Im ersten Paper wird das Unfallgeschehen von P25 sowie von kFR der Jahre 2014 bis 2017 anhand der in der BAST verfügbaren Unfalldaten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik flächendeckend für das gesamte Bundesgebiet Deutschlands analysiert. Die empirische Untersuchung dieser Arbeit ist als quantitative Analyse konzipiert. Im ersten Schritt wird mittels Methoden der deskriptiven Statistik ein detaillierter Überblick des Unfallgeschehens von 25 und kFR geben, ausgewertet werden grundlegende Unfallinformationen

wie etwa Ortslage, Lichtverhältnissen, Unfallzeitpunkt, Unfalltyp, Unfallart, Anzahl der Beteiligten, Unfallgegner. Darauf aufbauend werden die verunglückten P25- und kFR-Nutzenden mittels demographischer Analysen beschrieben (Schwere der Verletzung, Alter und Geschlecht). Die Ergebnisse für P25 und kFR werden dann miteinander verglichen. Abgeschlossen wird das Paper mit einer Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse.

Den empirischen Teil des ersten Papers bildet eine Strukturanalyse der Gesamtheit aller Fahrrad-Unfälle in Deutschland, getrennt nach P25 und kFR.

#### **4.2.2 Paper 2: Qualitative und quantitative Analysen**

Ziel des zweiten Papers ist es, P25-spezifische Unfallursachen darzustellen und deren Einfluss auf die Unfallschwere darzustellen. Dazu wird ein mixed-Methods Ansatz verfolgt. Im ersten Schritt werden mögliche Unfallursachen anhand von Literaturrechen gesammelt. Im zweiten Schritt erfolgt die qualitative Auswertung des Datensatzes. Dazu werden die Freitextbeschreibungen einer Teilgruppe der P25-Unfälle (der Alleinunfälle) gelesen, daraus neue P25-spezifische Unfallursachen definiert und alle Unfälle des Datensatzes diesen Ursachen zugeordnet. Dabei werden die Ursachen hierarchisch gegliedert und die Unfälle bei Bedarf auch mehreren Ursachen zugeordnet. Im dritten Schritt erfolgt die quantitative Auswertung des Datensatzes. Dazu werden die neu definierten Ursachen zuerst mittels deskriptiver Statistik ausgewertet um Häufigkeiten und Schwerpunkte darzustellen. Anschließend werden mittels ordinal probit Regressionen die zu erwartende Unfallschwere der jeweiligen Unfallursache ermittelt. Zum Abschluss werden die Analysen mit einem separaten Datensatz wiederholt und die Ergebnisse gegenübergestellt. Abgeschlossen wird das Paper mit einer Diskussion der neu definierten P25-spezifischen Unfallursachen anhand der Kombination von Häufigkeit und zu erwartender Unfallschwere.

Den empirischen Teil des zweiten Papers bilden Textanalysen zur Kategorisierung und Regressionsanalysen zur Abschätzung der Unfallschweren von P25-Alleinunfällen.

#### **4.2.3 Paper 3: Räumliche Analysen**

Im dritten Paper wird untersucht, welche räumlichen Muster das Unfallgeschehen von P25 aufweist und inwiefern sich dieses von jenem der kFR unterscheidet. Dazu werden zuerst die Möglichkeiten und die Qualität der Lokalisierung der Unfalldaten der amtlichen Statistik sowie deren Darstellungsmöglichkeiten analysiert und dargestellt. Anschließend werden diese Daten der Unfallstatistik mit raumbezogenen Daten verknüpft. Dabei wird im

ersten Schritt eine Übersicht der räumlichen Verteilung der P25- und der kFR-Unfälle gegeben, indem die grundlegenden Informationen dieser Unfälle mit grundlegenden räumlichen Informationen verschnitten werden. Dazu werden zwei räumliche Maßzahlen (Indizes) erstellt: die Anzahl schwerer Fahrradunfälle pro 100.000 Einwohner einer Raumeinheit (Landkreise und kreisfreie Städte) sowie der Anteil der schweren Unfälle an allen Fahrradunfällen je Raumeinheit. Darauf aufbauend wird eine räumliche Analyse der P25- und kFR-Unfälle nach Regionstypen durchgeführt. Anschließend werden weitere Möglichkeiten der räumlichen Verschneidung der amtlichen Straßenverkehrsunfalldaten dargestellt. Dazu werden mögliche Geographische Einflussfaktoren gesammelt und deren Einfluss auf das Unfallrisiko (dargestellt durch die beschriebenen räumlichen Indices) mittels Regressionsanalysen ermittelt.

Den empirischen Teil des dritten Papers bilden räumliche Analysen der Fahrradunfälle in Deutschland getrennt nach P25 und kFR sowie Regressionsanalysen zur Ermittlung des Einflusses geographischer Faktoren auf die Unfallschwere.

### **4.3 Materialzugang**

#### **4.3.1 Amtliche Straßenverkehrsunfalldaten für Deutschland**

Grundlage der empirischen Untersuchung sind die Einzeldaten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik. Diese werden der BAST für Zwecke der Unfallforschung zur Verfügung gestellt. (StVUnfStatG 2015, Färber und Pöppel-Decker 2023, StBA 2022a). Diese Daten können auch für die geplanten Paper unter Einhaltung des Datenschutzes analysiert werden.

Für die Erhebung der statistischen Landesämter sind - laut Gesetz - die Polizeidienststellen auskunftspflichtig, deren Beamte den Unfall aufnehmen. *„Daraus folgt, dass die Statistik nur Unfälle erfasst, zu denen die Polizei herangezogen wurde. [...] Nach § 1 Straßenverkehrsunfallstatistikgesetz (StVUnfStatG, anm.) werden nur Unfälle erfasst, die infolge des Fahrverkehrs entstanden sind. Erhebungspapiere für die Statistik der Straßenverkehrsunfälle sind die Durchdrucke der im Grundaufbau bundeseinheitlichen Verkehrsunfallanzeigen, die von den aufnehmenden Polizeibeamten ausgefüllt werden“* (StBA 2014: 10). Die Angaben in den Verkehrsunfallanzeigen werden an die Statistischen Landesämtern gesendet, die sie nach einem bundeseinheitlichen Schema monatlich und jährlich in Tabellen-

form zusammenstellen. Abschließend werden die Landesergebnisse zu einem Bundesergebnis summiert. (Färber und Pöppel-Decker 2023, StBA 2022a)

Die Einzeldaten der Straßenverkehrsunfallstatistik werden der Bundesanstalt für Straßenwesen seit dem Jahr 1968 jährlich gem. § 5 Abs. 3 StVUnfStatG (2015) für Zwecke der Unfallforschung von den Statistischen Landesämtern übermittelt. *„Die übermittelten Unfalldaten unterliegen u. a. den Regelungen des Bundesdatenschutzgesetzes und dürfen nicht mit anderen personenbezogenen Daten zusammengeführt werden. Aus dem Rohdatensatz werden drei Dateien (UBM-Tabellen) erzeugt, die die hierarchische Datenstruktur abbilden. Diese enthalten alle Angaben zum Unfall, zu den Beteiligten und zu den Mitfahrern. Die erzeugten Dateien werden um zusätzliche Angaben wie z. B. Ortslage, Tageszeit, Zahl der Unfallbeteiligten oder Verkehrsteilnehmendengruppe ergänzt. Die UBM-Tabellen werden jahrgangsweise in das Programmsystem „SPSS“ eingelesen und als Systemdatei abgespeichert. Zusätzlich erhalten die Dateien Schlüsselvariablen über die sie miteinander verknüpft werden können“.* (Färber und Pöppel-Decker 2023: 7)

Datenbasis des ersten Papers ist die Vollerhebung aller polizeilich registrierten Unfälle unter Beteiligung eines Fahrrades.

#### **4.3.2 Daten generiert aus Freitextbeschreibung der Beamtinnen und Beamten**

Für die empirischen Analysen der zweiten Untersuchung wird ein separater Datensatz erstellt der einen Großteil der P25-Alleinunfälle der Jahre 2016 und 2017 enthält. Die Beamtinnen und Beamten fertigen am Unfallort eine Freitext-Beschreibung des Unfalles in eigenen Worten an und fügen dieser bei Bedarf Skizzen bei. Um aus den Rohdaten der Unfallerhebung P25-spezifische Informationen zu generieren, ist es daher notwendig, die Freitextbeschreibungen der Unfälle zu analysieren. Die Freitexte und Skizzen sind jedoch Grundsätzlich kein Bestandteil der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Amtlichen Straßenverkehrsunfalldaten für Deutschland. Über die BAST und die Arbeitsgemeinschaft Verkehrspolizeiliche Angelegenheiten (AG VPA) wird daher von den sechzehn Polizeien der Länder ein Datensatz der betreffenden Jahre zusammengestellt, der für diese Arbeit genutzt werden kann. Neben grundlegenden Informationen zu dem jeweiligen Unfall enthält dieser Datensatz auch eine verbale Beschreibung jedes Unfalls. Der Datensatz beinhaltet insgesamt 1.738 P25-Alleinunfälle inklusive Freitextbeschreibung. (Panwinkler, Färber und Pöppel-Decker 2022)

Datenbasis des zweiten Papers sind Freitext-Daten zu P25-Alleinunfällen in Deutschland.

### 4.3.3 GIDAS Daten

Für das zweite Paper werden zudem die Daten der P25-Alleinunfälle der GIDAS (German In-Depth Accident Study) Datenbank unter Einhaltung des Datenschutzes ausgewertet. *„GIDAS ist die größte vertiefte Unfallstudie in Deutschland und die dazugehörige Datenbank gehört zu den weltweit größten Verkehrsunfalldatenbanken. Seit 1999 werden im Rahmen des GIDAS-Projekts Vor-Ort-Unfälle in den Regionen Hannover und Dresden gesammelt. Aufgrund eines ausgefeilten statistischen Stichprobenplans sind repräsentative Aussagen über die nationale Unfallstatistik in Deutschland möglich. GIDAS erhebt Daten zu allen Arten von Verkehrsunfällen mit Personenschaden. Für jeden Unfallfall oder auch nur Fall sammelt GIDAS durchschnittlich etwa 3.500 Informationen, die in der Datenbank verschlüsselt werden, darunter Daten zu den beteiligten Fahrzeugen und Personen, den entstandenen Verletzungen, der umgebenden Infrastruktur und den Umweltbedingungen. Darüber hinaus wird jeder Unfall von erfahrenen Rekonstruktoren rekonstruiert, um Erkenntnisse über Geschwindigkeiten, Lenk- oder Bremsmanöver und Kollisionsparameter zu gewinnen. Das Projekt wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) gefördert“* (Babsich et al. 2023: 5, eigene Übersetzung). Für die Analyse im Rahmen des zweiten Papers stehen insgesamt 72 P25-Alleinunfälle zur Verfügung. (GIDAS 2024, VUFO 2024)

Datenbasis des zweiten Papers sind ergänzend die Daten der GIDAS Erhebung für die Regionen Hannover und Dresden.

### 4.3.4 Geo-Daten und raumbezogene Daten

Die Basis der Analysen bilden die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Amtlichen Straßenverkehrsunfalldaten für Deutschland inklusive deren räumliche Information zum Unfallort, je nach Bundesland in unterschiedlichen Koordinatenformaten.

Die weiteren notwendigen Geo-Daten (Vektordaten im Shape Format, insbesondere Verwaltungsgrenzen, Landschaftsmodelle, Geländemodelle, topographische Informationen, Toponyme) können vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) genutzt werden.

Für die geplanten raumbezogenen Analysen werden primär die Datenbestände des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumplanung (BBSR), insbesondere der laufenden Raumbeobachtung Europas, der laufenden Raumbeobachtung Deutschland sowie der innerstädtischen Raumbeobachtung genutzt. Dabei handelt es sich um raumbezogene Daten zu den

Standort- und Lebensbedingungen in Deutschland und Europa (jeweils auf unterschiedlichen Verwaltungsebenen beziehungsweise Raumeinheiten). Die Raumb Beobachtung bietet Daten zu den Themenbereichen: Arbeitsmarkt, Bevölkerung und Sozialstruktur, Bildung, Finanzen, Medizinische Versorgung, Umwelt, Siedlungsstruktur und Flächennutzung, Verkehr/Erreichbarkeiten, Wirtschaft, Wohnen. Zudem bieten die Daten Information zu Raumabgrenzungen beziehungsweise Raumgliederungen und Raumtypisierungen auf verschiedenen Ebenen, die mit den Unfalldaten verknüpft werden können. Die Daten beinhalten etwa die Siedlungsstrukturen, wachsende und schrumpfende Regionen, städtischen und ländlichen Raum, Arbeitsmärkte oder Verdichtungsräume. Die Daten der Raumb Beobachtung werden durch die Bestände raumbezogener Daten des Statistischen Bundesamtes (StBA), sowie weiterer zuverlässiger Datenquellen (etwa der statistischen Landesämter, Umweltbundesamt, EUROSTAT, OECD, etc.) ergänzt. (BBSR 2024)

Datenbasis des dritten Papers sind die mit Koordinaten versehenen Daten der amtlichen Unfallstatistik sowie Grundlagendaten des BKG sowie geographischen Einflussfaktoren verschiedener Quellen.

## **5 Ergebnisse: Veröffentlichungen**

### **5.1 Paper 1: Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich**

Panwinkler, T., Holz-Rau, C., 2019. Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 65, 336–347.  
<https://www.kirschbaum.de/fachzeitschriften/zeitschrift-fuer-verkehrssicherheit/zvs/heftarchiv/zvs-05-2019.html#c9573>

# Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich

Tobias Panwinkler und Christian Holz-Rau

Pedelecs stellen eine neue Form der Mobilität dar und erfreuen sich aktuell großer Beliebtheit. Mit der wachsenden Anzahl an Pedelecs steigt jedoch auch das Konfliktpotenzial. In diesem Beitrag werden Unfälle unter Beteiligung eines Pedelecs mithilfe der Daten der Unfallstatistik (2014–2017) analysiert und mit dem Unfallgeschehen konventioneller Fahrräder verglichen. Es zeigt sich, dass Pedeleccunfälle schwerer sind als Unfälle konventioneller Fahrräder. Bei einer relativ konstanten Anzahl an Fahrradunfällen insgesamt (Summe beider Fahrzeuge) führt eine zunehmende Pedelec-Beteiligung zu einem geringeren Rückgang schwerer Fahrradunfälle. Pedeleccnutzende haben öfter Alleinunfälle, verunfallen öfter außerhalb und dort öfter tödlich. Zudem sind verunglückte und insbesondere getötete Pedeleccnutzende im Durchschnitt älter als verunglückte Fahrradfahrende. Damit belegen die Analysen, dass sich neue Anforderungen an die Verkehrssicherheitsarbeit ergeben, für die diese Auswertungen als Basis dienen sollen.

## Accidents involving pedelecs and conventional bicycles in comparison

Pedelecs represent a new form of mobility and are currently enjoying great popularity. With the growing number of pedelecs, however, the potential for conflicts also increases. In this article, accidents involving pedelecs are analyzed and compared with accidents involving conventional bicycles using accident statistics (2014–2017). It shows that pedelec accidents are more severe than accidents involving conventional bicycles. With a relatively constant total number of bicycle accidents (sum of both vehicles), increasing pedelec participation leads to a smaller decrease in severe accidents. Pedelec users are more likely to have single accidents and more likely to have accidents in rural areas (where they are even more likely to be fatal). In addition, the mean age of injured and in particular of killed pedelec users is higher than that of injured or killed users of conventional bicycles. The analyses thus prove that there are new challenges for road safety work for which these data could serve as a basis.

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangslage

Neue technische Entwicklungen, insbesondere im Bereich neuer Antriebsformen, haben in den letzten Jahren neue Formen der Mobilität ermöglicht, mit deren Hilfe viele Personen für den Umstieg auf umweltfreundliche Verkehrsmittel gewonnen werden konnten (BBSR 2014). Ein Beispiel dafür ist das Pedelec, ein Zweirad, das mittels Elektromotor beim Treten unterstützt. Dadurch wird das Zweirad für zusätzliche Personengruppen attraktiv, beziehungsweise kann der Aktivitätsradius gegenüber dem konventionellen Fahrrad er-

höht werden (Klein 2016).

Nach Einschätzung des Zweirad-Industrie-Verbandes beträgt der Bestand an Fahrrädern 2018 in Deutschland 75,5 Millionen Fahrzeuge. Der Anteil der Pedelecs stieg in den letzten Jahren deutlich, aktuell (2018) wird deren Bestand auf 4,5 Millionen Fahrzeuge<sup>1</sup> geschätzt (ZIV 2019).

Die wissenschaftliche Betrachtung von Pedelecs konzentriert sich auf den stark ansteigenden Bestand, die körperliche Anstrengung, die zum Fahren eines Pedelecs erforderlich ist sowie die gesundheitlichen Auswirkungen auf die Nutzenden. Die Sicherheitsforschung beschäftigt sich bisher vor allem mit dem (abweichenden) Fahrverhalten und Verletzungsmustern der Nutzenden. Vergleiche der Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern, die untersuchen, ob sich unterschiedliche Anforderungen für die Verkehrssicherheit ergeben, gibt es kaum (Schepers et al. 2014). Die wenigen vorhandenen Arbeiten basieren auf Fallstudien, meist mit geringer Fallzahl. Diese Studien analysieren einzelne, vermutet typische und häufige Konstellationen des Unfallgeschehens. Eine umfassende Analyse über die Gesamtheit aller Unfälle von Pedelecs und konventio-

nellen Fahrrädern in Deutschland sowie typischer Unfallkonstellationen existiert bisher nicht.

### 1.2 Fragestellung

Die vorliegende Arbeit<sup>2</sup> soll die Frage beantworten, ob sich die Verbreitung von Pedelecs maßgeblich auf das Unfallgeschehen von Fahrrädern (Pedelecs und konventionelle Fahrräder gesamt) auswirkt, ob sich Pedeleccunfälle von Unfällen konventioneller Fahrräder unterscheiden (etwa schwerer sind) und ob sich dadurch neue Anforderungen an die Verkehrssicherheitsarbeit ergeben.

Zur Beantwortung dieser übergeordneten Forschungsfrage sollen Teilfragen beantwortet werden:

– Lassen sich Unterschiede in der Unfall-

#### ■ Dokumentation

Panwinkler, T.; Holz-Rau, C.: Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich, Z. f. Verkehrssicherheit 65, (2019) Nr. 5, S. 336

#### ■ Schlagwörter

Unfallanalyse, Unfallstatistik, Verkehrssicherheit, Verkehrsverhalten, Verkehrsplanung, Elektromobilität, Pedelec, Fahrrad, E-Bike

<sup>1</sup> Beschreibt hier Gruppe aus Pedelecs und E-Bikes.

<sup>2</sup> Einordnung: Die Arbeit stellt den ersten Teil der kumulativen Dissertation des korrespondierenden Erstautors dar und wurde in ihrer Gesamtheit von ihm erstellt. Der Co-Autor ist sein Doktorvater und hat die Erstellung betreut. Teil 2 wird eine vertiefte Analyse des Themas mit statistischen Tests und zusätzlichen Datensätzen enthalten. Teil 3 ist noch in Konzeption. Die Promotion wird von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gefördert.

belastung und Unfallschwere von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern erkennen?

- Weist das Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern unterschiedliche Schwerpunkte auf?
- Können mittels demografischer Analyse der verunglückten Nutzenden von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern Unterschiede festgestellt werden?
- Können mittels Detailanalyse vertiefte Erkenntnisse gewonnen werden?

Um diese Fragen zu beantworten, konnten die Daten der Unfalldatenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) analysiert werden. Diese beinhalten die polizeilichen Angaben aller von der Polizei aufgenommenen Straßenverkehrsunfälle in Deutschland, inklusive Angaben zu deren Unfallursachen, der Art der Verkehrsteilnahme der Beteiligten und Verunglückten. Zusätzlich enthält die Datenbank Angaben des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) zu den beteiligten Kraftfahrzeugen (Kfz). Die Daten können nach verschiedenen (kombinierten) Kriterien analysiert werden. Die Datenbank

beinhaltet jedoch keine Verknüpfung zu Expositionen wie etwa Bestandszahlen, Fahrleistungen oder Anzahl zurückgelegter Wege einzelner Fahrzeugarten.

### 1.3 Definition

Ein Pedelec 25 (Pedal Electric Cycle 25, im Folgenden „P25“) ist ein Zweirad, bei dem das Treten von einem Elektromotor bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h unterstützt wird. Der Elektromotor darf mit einer Nenndauerleistung von maximal 250 Watt unterstützen (BMVI 2017; Klein 2016). Da es sich lediglich um einen unterstützenden Hilfsmotor handelt, kann von einem Fahrrad laut Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr (UNO 1968) gesprochen werden. Basierend auf § 1 Abs. 3 StVG ist das P25 daher in Deutschland rechtlich dem konventionellen Fahrrad (im Folgenden „kFR“<sup>3</sup>) gleichgestellt. Folglich ist weder eine Fahrerlaubnis noch ein Versicherungskennzeichen nötig. Das Tragen eines Schutzhelmes wird empfohlen, ist aber nicht verpflichtend. Es gelten die gleichen Verkehrsregeln wie für das kFR. Beispielsweise müssen P25 Radwege benut-

zen, wenn diese benutzungspflichtig sind. Das Pedelec 45 (Unterstützung bis 45 km/h) sowie das E-Bike sind Zweiräder, die auch ohne Treten elektrisch angetrieben werden können (BMVI 2017; Klein 2016). Sie stellen daher keine Fahrräder dar und werden deshalb in der folgenden Analyse nicht betrachtet.

### 1.4 Stand der Forschung

Radverkehrsunfälle sind anhand unterschiedlicher Datengrundlagen und Fragestellungen in Deutschland und international Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Dabei differenzieren die meisten Untersuchungen nicht zwischen P25 und kFR. Der bei der BASt vorliegende, hier genutzte Datenbestand macht eine solche Differenzierung seit 2014 bundesweit möglich. Einzelne Auswertungen liegen hierzu bereits vor (siehe auch Abschnitt Datenbestand), eine Auswertung des bundesweiten Datensatzes wird hier erstmalig vorgestellt.

<sup>3</sup> P25 und kFR bilden zusammen die Obergruppe Fahrrad.

Die Vielzahl der Untersuchungen zu Radverkehrsunfällen, meist ohne Differenzierung von P25 und kFR, bildet den Rahmen für die späteren Analysen der Unterschiede im Unfallgeschehen von kFR und P25. Die folgende Zusammenfassung der vorliegenden Forschungsergebnisse konzentriert sich auf die Aspekte, die anhand des verwendeten Datenbestandes betrachtet werden können.

#### Ortslage:

Die Mehrzahl der Radverkehrsunfälle ereignet sich innerorts. Der Anteil Schwerverletzter und Getöteter ist aber bei Außerortsunfällen höher als innerorts (für Deutschland: Schreck und Pöppel-Decker 2014; für NRW: Holz-Rau und Hölderich 2016; international: Useche et al. 2018, Schepers et al. 2011). Dabei sind der Anteil der Außerortsunfälle sowie die Schwere der Unfälle bei P25 höher als bei kFR (UDV 2017). Ergänzend weist Schreck (2016) auf einen hohen Anteil von Alleinunfällen außerorts hin.

#### Unfallzeitpunkt:

In den Monaten April bis September geschehen die meisten Fahrradunfälle (DE: StBA 2018b; int.: Staub 2018). Eine Differenzierung nach Tageszeiten und Unfallschweren für Radverkehrsunfälle liegt nicht vor. Die einzige Studie zur Differenzierung der P25-Unfälle nach Tageszeit ist eine Naturalistic Cycling Study: Ihr zufolge ereignen sich die meisten P25-Unfälle zwischen 14:00 und 17:00 Uhr sowie zwischen 8:00 und 11:00 Uhr, wobei hier die ungünstige (nicht den Hauptverkehrszeiten entsprechende) Uhrzeitabgrenzung die Interpretation erschwert (Schleinitz et al. 2014). Teufel et al. (2014) weisen in einer exemplarischen Analyse der Fahrradunfälle in Heidelberg darauf hin, dass die Anzahl der Radverkehrsunfälle nachts am geringsten ist, das Unfallrisiko (hier Fahrradunfälle pro 1 Million Fahrradfahrten) jedoch nachts sehr hoch und begründen dies mit einer hohen Anzahl an Alkoholunfällen, insbesondere in den Nächten des Wochenendes.

#### Unfallhergang:

Radverkehrsunfälle werden in der Mehrzahl durch Konflikte an Knotenpunkten (Abbiege-Unfälle oder Einbiegen/Kreuzen-Unfälle) verursacht (DE: DVR 2017, Richter und Sachs 2017, Schreck 2016, Alrutz 2009; int.: Schepers et al. 2011, Warner et al. 2017, Summala et al. 1996, Madsen und

Lahrman 2017, Zangenehpour et al. 2016). Dabei weist der Unfalltyp Fahrnfall die höchste Unfallschwere auf (Schreck und Pöppel-Decker 2014). P25-Unfälle sind häufiger Fahrnfälle (DE: UDV 2017, int.: Weber et al. 2014). Schreck und Pöppel-Decker (2014) weisen zudem auf das Konfliktpotenzial zwischen rechts abbiegenden Güterkraftfahrzeugen und geradeaus fahrenden Fahrrädern hin, hierbei ist die Unfallschwere sehr hoch. Zu diesem Ergebnis kommen auch Pokorny et al. (2017, 2018), Richter und Sachs (2017) und Schreck (2016).

#### Unfallumstände:

Der Großteil der Radverkehrsunfälle ereignet sich auf trockener Fahrbahn und bei Tageslicht. Radverkehrsunfälle bei Regen, Schnee oder Schlüpfrigkeit wie auch bei Dunkelheit sind selten (DE: StBA 2018b; int.: Staub 2018). Das Statistische Bundesamt (StBA 2018b) weist jedoch darauf hin, dass Radverkehr zumeist im Sommerhalbjahr und bei schönem Wetter stattfindet, eben weil die gefährlicheren, schlechteren Straßen- und Witterungsverhältnisse Radfahrende vom Fahren abhalten. Wenn Radverkehrsunfälle bei diesen Verhältnissen entstehen, haben sie oftmals schwere Folgen (Kim et al. 2007). Eine Differenzierung der P25-Unfälle nach Unfallumständen liegt für Deutschland noch nicht vor. Holz-Rau und Hölderich (2016) beschreiben ein höheres Risiko schwerer Verletzungen bei Radverkehrsunfällen an Gefällestrecken, jedoch führt die geringere Fahrradnutzung in Gemeinden mit stärkeren Höhenunterschieden dort zu einer insgesamt geringeren Anzahl an Radverkehrsunfällen. Die Unfallforschung der Versicherer (UDV 2017) weist auf den hohen Anteil an P25-Unfällen bei Gefälle hin und vermutet, dass sich hier insbesondere Unfälle durch Kontrollverlust bei höheren Geschwindigkeiten ereignen. Das Schweizer Bundesamt für Strassen (ASTRA 2017) hebt das höhere Konfliktpotenzial der P25 an Steigungen/Gefälle sowie im Mischverkehr mit Zufußgehenden hervor, das International Transport Forum (ITF 2018) weist ebenfalls auf diese Gefahr hin.

#### Anzahl Beteiligter:

Mehr als drei Viertel aller Radverkehrsunfälle sind Unfälle mit genau zwei Beteiligten. Alleinunfälle machen nur etwa ein Fünftel aus, haben aber eine deutlich höhere Unfallschwere (Schreck 2016). Radver-

kehrsunfälle mit mehr als zwei Beteiligten sind selten (StBA 2018b). Der Anteil der Alleinunfälle ist bei den P25- deutlich höher als bei den kFR-Unfällen (DE: UDV 2017, Otte et al. 2014; int.: Weiss et al. 2018, Schepers et al. 2014, Boele-Vos et al. 2017, ITF 2018, Vlakveld et al. 2015, Twisk et al. 2017b und Kováčsová et al. 2016). Weber et al. (2014) wie auch Hertach et al. (2018) zeigen für die Schweiz, dass P25-Alleinunfälle schwerere Folgen haben als kFR-Alleinunfälle und vermuten, dass die Anzahl polizeilich nicht registrierter Alleinunfälle überdurchschnittlich hoch ist.

#### Gegner<sup>4</sup>:

Kommt es zu einem Zusammenstoß des Fahrrades mit anderen Verkehrsteilnehmenden, so handelt es sich dabei zumeist um einen Pkw (DE: StBA 2018b, UDV 2017; int.: Weiss et al. 2018). Die Unfallfolgen für die Radfahrenden sind besonders schwer, wenn der Gegner ein Güterkraftfahrzeug (GkFz) ist (DE: Schreck 2016; int.: Pokorny et al. 2017). Bei P25-Unfällen ist der Gegner ebenfalls am häufigsten ein Pkw. Dabei kollidieren P25 anteilig häufiger mit kFR als kFR untereinander (UDV 2017).

#### Hauptverursachende:

Die Radfahrenden sind in weniger als der Hälfte aller Radverkehrsunfälle hauptverursachend (StBA 2018b), noch seltener, wenn der Gegner ein Pkw oder GkFz ist (Schreck 2016), deutlich öfter bei Zusammenstößen mit Zufußgehenden oder Motorrädern (von Below 2016). Eine Differenzierung der Unfallschwere nach Hauptverursachenden ohne Alleinunfälle liegt nicht vor, auch keine Auswertungen zu hauptverursachenden P25 (ohne Alleinunfälle). Häufige Unfallursachen hauptverursachen-

<sup>4</sup> Der Begriff „Gegner“ wird für alle Personen verwendet, da kein Begriff existiert, der alle Geschlechter gleichermaßen anspricht.

<sup>5</sup> Falschfahrt auf Straßen mit nach Fahrtrichtung getrennten Fahrbahnen, Benutzung der Fahrbahn entgegen der vorgeschriebenen Fahrtrichtung (Einbahnstraße), verbotswidrige Benutzung der Fahrbahn oder anderer Straßenteile (z. B. Gehweg, Radweg) oder Verstoß gegen das Rechtsfahrgebot (StBA 2018a).

<sup>6</sup> Das sind alle an einem Straßenverkehrsunfall beteiligten Fahrzeugführenden oder Zufußgehenden (StBA 2018a).

<sup>7</sup> Alle Analysen wurden mittels deskriptiver Statistik durchgeführt. Da es sich bei den Unfalldaten um eine Vollerhebung handelt, wurden keine statistischen Tests durchgeführt. Diese sind für das zweite Paper zur vertieften Analyse des Unfallgeschehens geplant.

Tabelle 1:  
Wege von P25 und kFR;  
Daten: MiD 2017;  
Gesamt 257 Wege;  
Verkehrsleistung  
3.214 Mio. km;  
eigene Bearbeitung

Jahr 2017	Wege gesamt		Wege monomodal		Wege intermodal		unbekannt	
	Mio. Wege	Wegelänge [Ø in km]	Mio. Wege	Wegelänge [Ø in km]	Mio. Wege	Wegelänge [Ø in km]	Mio. Wege	Wegelänge [Ø in km]
Gesamt	257,5	12,5	210,5	11,6	30,6	18,9	16,3	13,0
unter Beteiligung eines ...	P25	1%	6,6	1%	6,0	0%	13,5	0%
	kFR	10%	5,1	11%	3,7	10%	16,0	0%

Wege monomodal 2017	Anteil Wege der Längengruppe an allen Wegen einer Fahrzeuggruppe (Zeilenprozent)							
	unter 0,5 km	0,5 bis unter 1 km	1 bis unter 2 km	2 bis unter 5 km	5 bis unter 10	10 bis unter 20	20 bis unter 50	50 km und mehr
Gesamt	12%	13%	14%	23%	15%	12%	8%	2%
davon ...	P25	6%	14%	23%	28%	13%	10%	6%
	kFR	9%	19%	25%	30%	10%	4%	1%

Wege gesamt 2017	Anteil Wege der Altersgruppe an allen Wegen einer Fahrzeuggruppe (Zeilenprozent)							
	0-9 Jahre	10-19 Jahre	20-29 Jahre	30-39 Jahre	40-49 Jahre	50-59 Jahre	60-69 Jahre	70 Jahre und älter
Gesamt	8%	9%	12%	14%	16%	18%	12%	12%
unter Beteiligung eines ...	P25	3%	1%	2%	5%	14%	23%	22%
	kFR	8%	15%	12%	13%	15%	16%	10%

der Fahrradfahrender sind falsche Straßenbenutzung<sup>5</sup>, mangelnde Verkehrstüchtigkeit (etwa durch Alkoholeinfluss), Fehler beim Abbiegen, Wenden, Ein- und Anfahren sowie das Nichtbeachten von Vorfahrt oder Vorrang (StBA 2018b). Eine Differenzierung der Unfallschwere nach Unfallursachen liegt nicht vor. Die häufigste Unfallursache der hauptverursachenden Fahrradfahrenden sind „andere Fehler bei Fahrzeugführenden“, der Anteil dieser Ursache ist bei den P25- noch deutlich höher als bei den kFR-Unfällen. Die UDV (2017) interpretiert diese insbesondere als Stürze und vermutet, zusammen mit dem höheren Anteil an P25-Unfällen wegen „unangepasster Geschwindigkeit“, dass P25-Fahrende häufiger als kFR-Fahrende die Kontrolle über ihr Zweirad verlieren. Hertach et al. (2018) und Schepers et al. (2014) zeigen, dass der Anteil der P25-Unfälle, die durch unangepasste Geschwindigkeit verursacht werden, deutlich höher ist als bei den kFR und die P25-Nutzenden dabei auch schwerer verletzt werden als kFR-Nutzende. Otte et al. (2014) stellten bei P25-Unfällen eine durchschnittlich höhere Kollisionsgeschwindigkeit fest, was zu einer deutlich höheren Kollisionsenergie führt, die durch das höhere Gewicht des P25 zusätzlich erhöht wird.

Verunglückte Radfahrende

Alter:

Verglichen mit anderen Verunglückten ist der Anteil der 10- bis 18-Jährigen und der Älteren (75+) unter den verunglückten Fahrradnutzenden deutlich erhöht. Die

Unfallfolgen sind bei Älteren besonders schwer (StBA 2018b). Bei den verunglückten P25 ist der Anteil Älterer noch deutlich höher und deren Folgen schwerer als bei den kFR (DE: UDV 2017, Otte et al. 2014, Lawinger und Bastian 2013; int.: Schepers et al. 2014, Weber et al. 2014). Twisk et al. (2017a) erklären dies mit Problemen Älterer beim Auf- und Absteigen, Weiss et al. (2018) deuten dies als Indiz für kognitive Leistungseinbußen, etwa bezüglich des Gleichgewichtes und der Geschwindigkeits-Brems-Reaktion. Vlakveld et al. (2015) weisen auf die höhere Fragilität Älterer hin.

Geschlecht:

Beinahe zwei Drittel der verunglückten Fahrradfahrenden sind Männer. Ihre Verletzungsschwere, insbesondere der Anteil Getöteter, liegt deutlich höher als bei den Frauen (StBA 2018b). Laut UDV (2017) gibt es „bei der Geschlechterverteilung keinen Unterschied zwischen P25- und kFR-Verunglückten“, weitere Differenzierungen liegen nicht vor.

2 Methode und Daten

Um Unfälle von P25 und kFR zu vergleichen, sind drei Ebenen zu unterscheiden:

- der Unfall mit Angaben zu Unfallort, Unfallzeitpunkt, Unfallhergang und Unfallumständen
- die Unfallbeteiligten<sup>6</sup> sowie deren Fehler
- die Verunglückten, die bei dem Unfall verletzt oder getötet wurden (StBA 2018a).

Für die nachfolgende Arbeit werden im ersten Teil die Ebenen der Unfälle sowie der Beteiligten mittels Strukturanalyse untersucht. Mittels demografischer Analyse werden im zweiten Teil Erkenntnisse über die Verunglückten gewonnen. Den dritten Teil bildet die Detailanalyse der zuvor erarbeiteten Schwerpunkte.<sup>7</sup>

Grundlage der empirischen Untersuchung sind die Einzeldaten der amtlichen Straßenverkehrs-unfallstatistik, die aufgrund der polizeilichen Unfallaufnahme von den statistischen Landesämtern erhoben, mit Daten zu den beteiligten Fahrzeugen vom KBA ergänzt und der BAST für Zwecke der Unfallforschung als Unfalldatenbank zur Verfügung gestellt werden. Demzufolge können nur Unfälle im öffentlichen Straßenraum analysiert werden, die von der Polizei aufgenommen werden. Gerade für kFR/P25 wird eine hohe Quote an nicht gemeldeten Unfällen vermutet. Shinar et al. (2018) haben dieses Phänomen in 17 Ländern untersucht und eine durchschnittliche Quote von 90 % nicht gemeldeter Fahrrad-Unfälle errechnet, für Deutschland ergab sich mit 65 % in der Studie die niedrigste aller Quoten. Von Below (2016) gibt in ihrer Arbeit die Dunkelziffer für Deutschland mit 58 bis 88 % an und weist auf das hohe Underreporting bei Unfällen mit ge-

<sup>8</sup> German In-Depth Accident Study: Projekt der BAST und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) in den Großräumen Hannover und Dresden. Ca. 2.000 Verkehrsunfälle pro Jahr werden von der TU Dresden und der Medizinischen Hochschule Hannover erhoben, rekonstruiert und der Unfallverlauf separat simuliert.

Straßenverkehrsunfälle		Anzahl Anteil		Anzahl nach Jahren				2014-	2015-	2016-	2014-
		2014-2017		2014	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2017
Unfälle mit Personenschaden	Gesamt	1.218.895	100 %	302.435	305.659	308.145	302.656	+1 %	+1 %	-2 %	+0 %
	unter Beteiligung eines ...										
	Fahrrades	318.124	26 %	78.685	78.341	81.272	79.826	-0 %	+4 %	-2 %	+1 %
	kFR	305.106	25 %	76.643	75.602	77.682	75.179	-1 %	+3 %	-3 %	-2 %
	P25	14.429	1 %	2.245	2.992	3.986	5.206	+33 %	+33 %	+31 %	+132 %
Verunglückte bei Unfällen	Gesamt	1.583.167	100 %	392.912	396.891	399.872	393.492	+1 %	+1 %	-2 %	+0 %
	davon ...										
	LV	1.300.568	82 %	321.803	325.726	329.240	323.799	+1 %	+1 %	-2 %	+1 %
	SV	269.377	17 %	67.732	67.706	67.426	66.513	-0 %	-0 %	-1 %	-2 %
	GT	13.222	1 %	3.377	3.459	3.206	3.180	+2 %	-7 %	-1 %	-6 %
	... davon Nutzende eines Fahrrades	317.474	100 %	78.296	78.176	81.274	79.728	-0 %	+4 %	-2 %	+2 %
	davon ...										
	LV	258.559	81 %	63.378	63.563	66.396	65.222	+0 %	+4 %	-2 %	+3 %
	SV	57.361	18 %	14.522	14.230	14.485	14.124	-2 %	+2 %	-2 %	-3 %
	GT	1.554	0 %	396	383	393	382	-3 %	+3 %	-3 %	-4 %
	... davon Nutzende eines kFR	303.293	100 %	76.073	75.234	77.373	74.613	-1 %	+3 %	-4 %	-2 %
	davon ...										
LV	248.539	82 %	61.818	61.528	63.644	61.549	-0 %	+3 %	-3 %	-0 %	
SV	53.405	18 %	13.898	13.359	13.398	12.750	-4 %	+0 %	-5 %	-8 %	
GT	1.349	0 %	357	347	331	314	-3 %	-5 %	-5 %	-12 %	
... davon Nutzende eines P25	14.181	100 %	2.223	2.942	3.901	5.115	+32 %	+33 %	+31 %	+130 %	
davon ...											
LV	10.020	71 %	1.560	2.035	2.752	3.673	+30 %	+35 %	+33 %	+135 %	
SV	3.956	28 %	624	871	1.087	1.374	+40 %	+25 %	+26 %	+120 %	
GT	205	1 %	39	36	62	68	-8 %	+72 %	+10 %	+74 %	
Unfallschwere: (SV +GT) / 1.000 Unfälle (P)											
	kFR	179		186	181	177	174	-4,70	-4,56	-2,96	-12,22
	P25	288		295	303	288	277	+7,82	-14,88	-11,27	-18,33
Personenschadenkosten Verunglückter (LV+SV+GT) kFR- bzw. P25-Nutzender je Unfall*											
	kFR	30.569 €		31.521 €	31.478 €	30.515 €	28.741 €	-0 %	-3 %	-6 %	-9 %
	P25	53.266 €		57.791 €	53.792 €	55.433 €	49.353 €	-7 %	+3 %	-11 %	-15 %

LV: Leichtverletzte SV: Schwerverletzte kFR: konventionelles Fahrrad P25: Pedelec 25 \* Kostensätze: BASt 2019

Tabelle 2: Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden und dabei Verunglückte 2014–2017 unter Beteiligung eines P25/kFR; Kostensätze: BASt (2019)

ringer Verletzungsschwere sowie bei Alleinunfällen hin.

Die Analyse wird sich auf die Auswertung von Unfalldaten beschränken und keine Expositionsdaten integrieren. Um dennoch einen Überblick über die Nachfrage der beiden Gruppen zu geben, zeigt Tabelle 1 die aktuell verfügbaren Daten der Haushaltsbefragung „Mobilität in Deutschland“ (MiD 2017). Demnach wurden in Deutschland 2017 insgesamt 257 Millionen Wege zurückgelegt, 1 % davon mit dem P25 und 10 % mit dem kFR. Von den intermodalen Wegen (ein Weg, auf dem mehrere Verkehrsmittel genutzt wurden) wurde bei 10 % zumindest für ein Teilstück ein kFR verwendet jedoch so gut wie nie ein P25. Von den monomodalen Wegen wurden 11 % mit dem Fahrrad absolviert und immerhin 1 % mit einem P25, wobei hier die durchschnittliche Wegelänge der P25 (6,0 km) fast doppelt so lang war wie jene der kFR (3,7 km). Für längere Wege (über 5 km) werden häufiger P25 genutzt, für kürzere (unter 5 km) häufiger kFR. Zudem werden kFR häufiger von Jüngeren (unter 50 Jahren) genutzt, P25 häufiger von Älteren (ab 50 Jahren). Auffallend ist der hohe Anteil P25-Nutzender, die 70 Jahre und älter sind.

- 24 -

Bis 2013 wurden Unfälle von kFR und P25 in der amtlichen Unfallstatistik nicht differenziert. Daher gibt es derzeit nur wenige Analysen zum Unfallgeschehen von P25. So erfolgt im Fachbericht „Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr“ des Statistischen Bundesamtes (aktuell: StBA 2018b) der Großteil der Auswertungen für die übergeordnete Kategorie „Fahrrad“ (Summe kFR und P25). Separat ausgewiesen werden für das Jahr 2017 lediglich die Anzahl von 5.343 beteiligten P25 an Unfällen mit Personenschäden sowie 5.115 verunglückten Nutzenden (inklusive Mitfahrenden) von P25, davon 68 Getötete und 1.374 Schwerverletzte.

Bereits vor der bundesweiten Erhebung von P25-Unfällen wurden diese in fünf Bundesländern ausgewiesen. Huppertz und Kern (2014) führten damit die erste Auswertung amtlicher Unfalldaten zu P25-Unfällen durch. Eine erste Berechnung der Entwicklung zeigte für Baden-Württemberg eine Vervierfachung der Elektrofahradunfälle (darunter der Großteil P25) vom Jahr 2010 auf 2012. Daher prognostizierten sie ein neues „Verkehrsunfallphänomen Elektrofahrrad“, auf das die Verkehrssicherheitsarbeit angemessen reagieren soll. Neben der Analyse der polizeilich erfassten Unfälle wurden für Deutschland weitere Studien

zum Thema P25-Unfälle durchgeführt. Diese basierten entweder auf In-Depth-Auswertungen von Unfalldatenbanken wie GIDAS<sup>8</sup> (Otte et al. 2014) oder eigenen Datenerhebungen wie etwa sogenannten naturalistic cycling studies (UDV 2017), Befragungen von Pedelecnutzenden (PGV und IWU 2015) oder Fallstudien.

Die Unfalldatenbank der BASt enthält in der aktuellen Version (für das Jahr 2017) die Datei zum Unfall mit 48 Variablen, die Datei der Beteiligten mit 52 Variablen sowie die Datei mit den Verunglückten mit vier Variablen. Die Dateien können über den Unfallschlüssel sowie den Beteiligtenschlüssel verknüpft und über die Jahresangabe mit den entsprechenden (gleich aufgebauten) Dateien der Vorjahre zusammengefügt werden.

Aus der Unfalldatenbank der BASt werden für diese Untersuchung alle Unfälle mit Personenschaden (im Folgenden „Unfall“) ausgewählt, die sich in den Jahren 2014 (erstes Jahr, in dem die Kategorie „Pedelec“ (entspricht P25) zuverlässig separat erhoben wurde) bis 2017 (aktuellste Daten) in Deutschland ereigneten und an denen mindestens ein P25 oder ein kFR beteiligt war. Dies ergab eine Gesamtheit von 14.429 Unfällen unter Beteiligung mindestens ei-

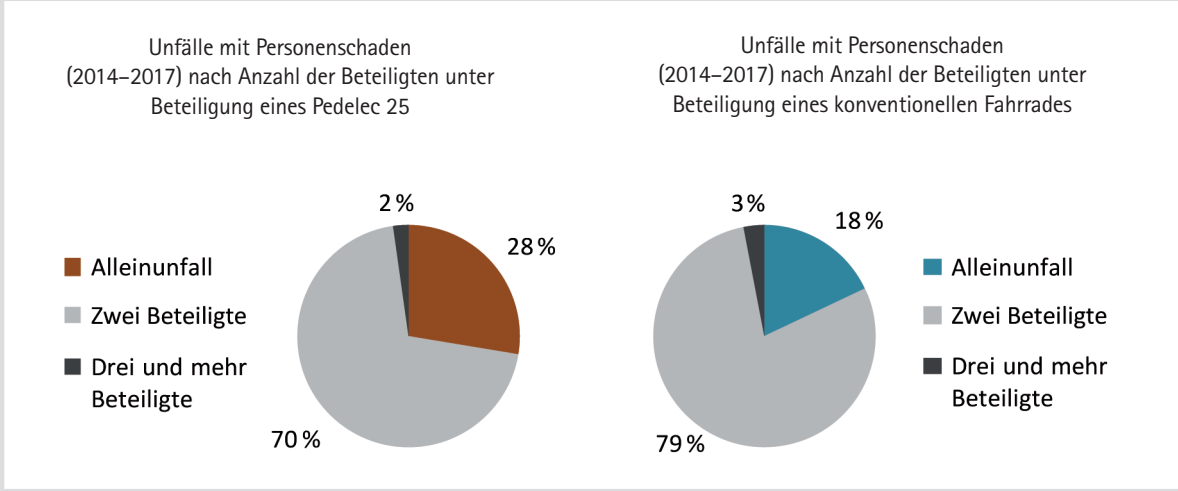


Bild 1: Unfälle mit Personenschaden (Summe 2014–2017) unter Beteiligung eines P25 (links) bzw. kFR (rechts) nach Anzahl der Beteiligten

nes P25 (im Folgenden „P25-Unfall“) und 305.106 Unfällen unter Beteiligung mindestens eines kFR (im Folgenden „kFR-Unfall“) (Tabelle 2). An 1.411 Unfällen waren sogar mindestens ein P25 und mindestens ein kFR beteiligt. In den Jahren 2014–2017 ereigneten sich insgesamt 1.218.895 Unfälle. Im Durchschnitt war demnach nur an 1 % der Unfälle ein P25 beteiligt, jedoch an 25 % ein kFR.

In Tabelle 2 ist die Entwicklung dieser Unfälle innerhalb des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Darin wird deutlich, dass die Zahl der P25-Unfälle stark steigt (jeweils ein Drittel mehr als im Vorjahr), während jene der kFR-Unfälle nur in geringem Ausmaß schwankt. Dies kann insbesondere durch die unterschiedlichen Ausgangswerte sowie -bestände und die bereits beschriebene starke Wachstumsrate des Bestandes an P25 erklärt werden. In Summe bleibt die Anzahl der Unfälle unter Beteiligung eines Fahrrades (kFR und P25)

relativ konstant, bzw. steigt nur geringfügig. Aufgrund der geringen Fallzahlen der P25-Unfälle, insbesondere zu Beginn des Untersuchungszeitraumes, werden in der folgenden Untersuchung keine zeitlichen Analysen durchgeführt, sondern die Struktur des Aggregates aller vier Jahre untersucht. Im Untersuchungszeitraum verunglückten 14.181 P25-Nutzende, 205 von ihnen starben bei dem Unfall<sup>9</sup> (1 %) und 3.956 (28 %) wurden schwer verletzt. Im Vergleich dazu sind die Anteile der Getöteten (unter 1 %) und der Schwerverletzten (18 %) an den verunglückten kFR-Nutzenden deutlich geringer.

### 3 Ergebnisse

Im Sinne der Verkehrssicherheitsarbeit liegt die Konzentration zuallererst auf der Vermeidung schwerer Unfälle, um menschliches Leid zu verhindern oder zumindest zu lindern. Zudem hat aus volkswirtschaftli-

cher Bewertung die Vermeidung schwerer (somit teurer) Unfälle Priorität. Daher wird in der folgenden Analyse die Anzahl der schweren Personenschäden (Getötete und Schwerverletzte) in Relation zur Gesamtzahl der jeweiligen Unfälle als Unfallschwere definiert und als Grundlage zur Einschätzung des Unfallgeschehens der beiden Fahrzeuggruppen verwendet. Demnach wurden 288 getötete oder schwerverletzte P25-Nutzende pro 1.000 P25-Unfälle registriert. Damit ist die Unfallschwere von P25-Unfällen sehr viel höher als der Vergleichswert der kFR-Unfälle (hier 179). Aufgrund der größeren Fallzahl Schwerverletzter dominieren diese in der Kenngröße. Dies wird deutlich, wenn ausschließlich die Getöteten in Relation zu den Unfällen gesetzt werden, mit 14,2 getöteten P25-Nutzenden je 1.000 P25-Unfällen ist die Rate mehr als dreimal so hoch wie bei den

<sup>9</sup> Oder innerhalb von 30 Tagen an den Folgen des Unfalls.

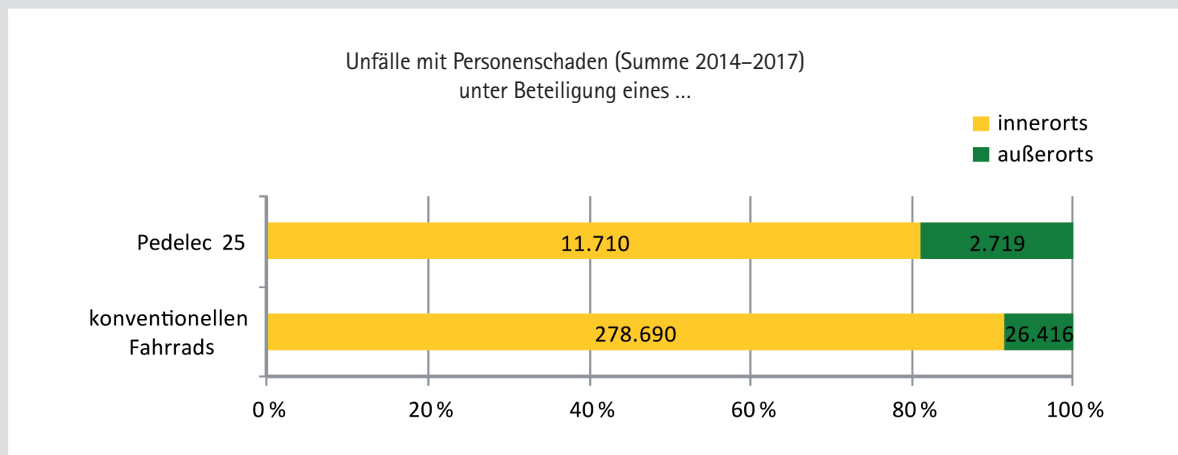


Bild 2: Unfälle mit Personenschaden (Summe 2014–2017) unter Beteiligung eines P25 bzw. kFR nach Ortslage

kFR (hier 4,42). Um dies zu berücksichtigen, können die Verunglückten auch gewichtet in eine Kenngröße einfließen. Holz-Rau und Scheiner (2009, 2010) gewichteten in zwei Arbeiten die Verunglückten anhand der volkswirtschaftlichen Kosten. In Tabelle 2 wurden die Verunglückten mit den aktuellen Personenschadenkosten je verunglückter Person der BAST (2019) gewichtet. Dabei zeigt sich, dass die durchschnittlichen Personenschadenkosten verunglückter P25-Nutzender je P25-Unfall mit 53.266 € um das 1,7-Fache höher sind als jene verunglückter kFR (hier 30.569 €).

Diese erste Auswertung zeigt, dass P25-Unfälle durchschnittlich schwerer sind als kFR-Unfälle. Dabei sind die absoluten Fallzahlen der P25-Unfälle (bisher) deutlich geringer als die der kFR-Unfälle. Bei einer relativ konstanten Anzahl an Fahrradunfällen insgesamt führt eine zunehmende Pedelec-Beteiligung zu einem geringeren Rückgang der Unfallschwere der Fahrradunfälle. Eine differenziertere Analyse der beiden Unfallgeschehen ist daher notwendig, um abzuschätzen, ob sich daraus neue Anforderungen für die Verkehrssicherheitsarbeit ergeben.

### 3.1 Analyse der Unfälle und Beteiligten

Aus der Unfalldatenbank der BAST wurden differenziert zwischen kFR- und P25-Unfällen folgende Daten verwendet: *Unfallverortung* (Block I in Tabelle 3: Ortslage), *Unfallzeitpunkt* (Block II: Tageszeit, Jahreszeit sowie Wochentag (Mo–Fr)/Wochenende (Sa–So und Feiertage)), *Unfallhergang* (Block III: Unfalltyp als Konfliktsituation, die zu einer Kollision führte – vor dem Unfall, und Unfallart als Ablauf der Kollision – während des Unfalls), *Unfallumstände* (Block IV: Charakteristik der Unfallstelle, Straßenzustand und Lichtverhältnisse).

Die Daten zu den *Unfallbeteiligten* (Block V) beinhalten die Anzahl der Beteiligten sowie bei Unfällen mit genau zwei Beteiligten zusätzlich die Art der Verkehrsbeteiligung des Gegners. Für Unfälle mit drei und mehr Beteiligten wurde dies nicht ausgewiesen, da oftmals nicht klar hervorgeht, welchen Einfluss dritte oder weitere Beteiligte auf den ersten Zusammenstoß hatten. Die Daten beinhalten auch die Einschätzung der Polizei bezüglich der Hauptschuld an dem Unfall sowie die am häufigsten auftretenden *Unfallursachen hauptverursachender P25 und kFR* (Block VI).

Nicht in dem Datensatz enthalten sind

Daten, die nicht vor Ort von der Polizei erhoben, sondern nur durch Rekonstruktion ermittelt werden können. Zu nennen wären hier etwa die Kollisionsgeschwindigkeit und -energie. Zudem werden einige fahrradspezifische Informationen, etwa, ob ein Helm getragen wurde, nicht erhoben.

Die vorgestellten Variablen sind im Fact Sheet (Tabelle 3) in den Zeilen eingetragen und zu den beschriebenen Gruppen zusammengefasst. In den Spalten ist die Anzahl an Unfällen unter Beteiligung des jeweiligen Fahrzeuges und deren verunglückte Nutzende sowie die Unfallschwere dargestellt. Die Prozentangaben sind Spaltenprozent und beziehen sich jeweils auf die darüber angeführte Anzahl an Unfällen oder Verunglückten. In den rechten beiden Spalten ist der Anteil der Unfälle mit hauptverursachenden P25 und kFR dargestellt, als Zeilenprozent an allen P25-/kFR-Unfällen.

Nach Tabelle 3 weisen P25- und kFR-Unfälle überwiegend eine ähnliche Unfallstruktur auf. Teilweise zeigen sich aber auch relevante Unterschiede. So ereignen sich P25- gegenüber kFR-Unfällen jeweils häufiger außerorts (Block I), im Sommer, am Wochenende und zur Mittagszeit (II). Der Großteil der P25-Unfälle ereignet sich demnach in typischen Zeiten des Wirtschafts- (etwa Briefzustellung), Einkaufs- oder Freizeitverkehrs, der Großteil der kFR-Unfälle zu Zeiten, an denen typischerweise der Weg zur Arbeit oder Schule zurückgelegt wird. Block III zeigt für die P25 einen höheren Anteil von Fahrnfällen sowie Unfällen anderer Art. Fahrnfälle (Unfall ausgelöst, weil Person Kontrolle über ihr Fahrzeug verloren hatte, ohne Beitragen anderer<sup>10</sup>) sind meist Alleinunfälle<sup>11</sup> und auch unter der Sammelkategorie „anderer Art“ finden sich wahrscheinlich viele Fahrrad-Alleinunfälle. kFR sind dagegen häufiger an Abbiege- und Einbiegen/Kreuzen-Unfällen beteiligt. Block IV weist auf eine höhere Bedeutung von Gefällestrecken bei P25 hin. Insgesamt ist der Anteil von Alleinunfällen (V) bei P25 deutlich erhöht. Bei Unfällen mit genau zwei Beteiligten ist der Pkw jeweils am häufigsten Gegner, der Anteil ist bei den kFR noch höher als bei den P25.

Die Unfallschwere ist bei P25 grundsätzlich höher als bei kFR. Bei beiden ist die Unfallschwere außerorts (I), bei Fahrnfällen und bei Abkommen-Unfällen (III), im Gefälle und in Kurven (IV), bei Alleinunfällen und

bei Unfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen (V) deutlich höher als im Durchschnitt. Außerorts (I), im Gefälle (IV) sowie mit sGkfz (V) ist der Anteil Getöteter besonders hoch. Auch der hohe Anteil getöteter kFR-Nutzender bei sGkfz-Unfällen (V) ist hervorzuheben. Umgekehrt ist bei Unfällen mit einem Pkw (V) der Anteil getöteter P25-Nutzender höher als jener der kFR. Die Unfallschwere bei Einbiegen/Kreuzen-Unfällen (III) ist unter dem jeweiligen Durchschnitt, der Anteil getöteter Fahrradnutzender (insbesondere bei den P25) jedoch überdurchschnittlich. P25 wie kFR sind in weniger als der Hälfte der Fahrradunfälle hauptverursachend. Ohne Berücksichtigung der Alleinunfälle sind kFR in jedem dritten, P25 nur in jedem vierten Unfall hauptverursachend (V). Ist ein P25 hauptverursachend, so ist die häufigste Ursache nicht angepasste Geschwindigkeit, bei hauptverursachenden kFR ist es falsche Straßenbenutzung (VI).

Die erste Erkenntnis, dass P25-Unfälle schwerer sind, wird hier bestätigt. Zudem können folgende Schwerpunkte festgestellt werden: P25-Unfälle sind häufiger Alleinunfälle (Bild 1), kFR-Unfälle häufiger Knotenpunkturnfälle. Wichtige Einflussfaktoren sind zudem der Unfallzeitpunkt (als Indiz für unterschiedliche Nutzungszwecke) sowie die Ortslage (Bild 2).

### 3.2 Verunglückte

Tabelle 4 zeigt die bei Straßenverkehrsunfällen schwerverletzten und getöteten Nutzenden von P25 und kFR unterschieden nach Geschlecht und Altersgruppe. Demnach verunglücken in der Gesamtheit aller Straßenverkehrsunfälle deutlich mehr Männer als Frauen schwer (62:38) sowie tödlich (74:26). Dies zeigt sich auch bei den kFR-Unfällen sowie etwas abgeschwächt bei den P25-Unfällen.

Altersdifferenziert ähnelt die Verteilung der verunglückten P25-Nutzenden einer „umgekehrten Pyramide“, die Anteile werden also größer, je höher das Alter der Nutzenden ist (Bild 3). Die Anzahl der Verunglück-

<sup>10</sup> Dazu gehören nicht solche Unfälle, bei denen die Person die Gewalt über das Fahrzeug infolge eines Konfliktes mit einem anderen Verkehrsteilnehmer [...] verloren hat (StBA 2018a).

<sup>11</sup> Fahrnfälle sind aber nicht ausschließlich Alleinunfälle, sie können in der Folge auch zu einer Kollision mit anderen führen.

Straßenverkehrsunfälle mit Personenschaden 2014-2017 unter Beteiligung eines Pedelects25 (P25)/konventionellen Fahrrades (kFR)	Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung eines ...		... dabei Verunglückte						Unfallschwere		Unfälle: Hauptverursachende Nutzende(r) eines ...	
	P25	kFR	dabei getötete Nutzende eines ...		dabei schwer verletzte Nutzende eines ...		dabei leicht verletzte Nutzende eines ...		SP/1.000 Unfälle mit Pers.schaden		P25	kFR
			P25	kFR	P25	kFR	P25	kFR	P25	kFR		
<b>Ortslage</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
innerorts	81%	91%	55%	64%	74%	84%	84%	93%	259	164	43%	45%
außerorts	19%	9%	45%	36%	26%	16%	16%	7%	417	347	62%	60%
<b>Jahreszeit</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
Frühling	28%	30%	26%	27%	30%	30%	28%	29%	298	184	48%	48%
Sommer	40%	35%	37%	35%	40%	36%	39%	35%	293	185	50%	50%
Herbst	22%	22%	26%	24%	20%	20%	22%	22%	267	165	42%	41%
Winter	10%	13%	10%	15%	10%	13%	10%	13%	291	177	49%	39%
<b>Tageszeit</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
Nacht (00.00-04.59 Uhr)	1%	2%	1%	4%	1%	3%	1%	2%	355	273	80%	80%
Vormittag (05.00-09.29 Uhr)	12%	18%	9%	15%	11%	15%	13%	19%	252	151	35%	37%
Mittag (09.30-14.29 Uhr)	39%	31%	44%	33%	39%	31%	39%	30%	287	182	45%	44%
Nachmittag (14.30-18.59 Uhr)	39%	38%	40%	36%	39%	37%	39%	38%	292	177	47%	46%
Abend (19.00-23.59 Uhr)	9%	11%	6%	13%	10%	13%	8%	11%	324	207	62%	57%
<b>Wochentag</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
Montag-Freitag	86%	90%	85%	88%	83%	87%	88%	91%	277	173	44%	46%
Samstag, Sonntag, Feiertag	14%	10%	15%	12%	17%	13%	12%	9%	359	244	65%	63%
<b>Unfalltyp</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
Fahrunfall	20%	13%	21%	18%	29%	22%	16%	11%	421	310	96%	96%
Abbiege-Unfall	14%	17%	8%	16%	11%	14%	15%	18%	233	143	14%	15%
Einbiegen/Kreuzen-Unfall	33%	36%	45%	37%	28%	32%	36%	37%	250	161	25%	33%
Überschreiten-Unfall	1%	2%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	198	75	30%	41%
Unfall durch ruhenden Verkehr	4%	6%	0%	1%	3%	4%	5%	6%	199	116	19%	28%
Unfall im Längsverkehr	12%	12%	14%	16%	11%	12%	12%	13%	269	176	44%	58%
sonstiger Unfall	15%	14%	10%	12%	16%	16%	15%	13%	299	198	70%	69%
<b>Unfallart</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
Zusammenstoß mit ...												
Fzg., das anfährt/anhält/ruhenden V.	4%	6%	1%	2%	3%	4%	5%	7%	192	119	29%	41%
Fzg., das vorausfährt oder wartet	3%	3%	4%	8%	3%	3%	3%	3%	341	191	50%	51%
Fzg., das seitlich in gleicher Richtung	7%	7%	8%	11%	6%	6%	7%	8%	267	161	28%	32%
Fzg., das entgegenkommt	6%	6%	4%	6%	5%	7%	6%	7%	232	193	34%	51%
Fzg., das einbiegt/kreuzt	40%	45%	51%	46%	33%	39%	43%	48%	245	156	22%	27%
Fußgänger	3%	4%	1%	0%	2%	2%	2%	2%	169	64	50%	65%
Aufprall Hindernis auf Fahrbahn	1%	1%	2%	0%	2%	1%	1%	1%	347	264	68%	69%
Abkommen rechts	4%	2%	2%	4%	5%	3%	3%	1%	420	353	92%	89%
Abkommen links	1%	1%	1%	3%	2%	1%	1%	1%	442	385	92%	92%
Unfall anderer Art	30%	24%	24%	20%	38%	32%	28%	22%	357	242	80%	76%
<b>Charakteristik der Unfallstelle*</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
Kreuzung	15%	20%	26%	23%	15%	18%	15%	20%	295	168	36%	36%
Einmündung	27%	26%	24%	23%	25%	24%	28%	27%	264	165	31%	31%
Grundstücksein- oder -ausfahrt	12%	11%	4%	6%	8%	8%	13%	12%	191	127	20%	23%
Steigung	3%	1%	3%	3%	3%	2%	2%	1%	286	272	61%	51%
Gefälle	9%	6%	16%	13%	16%	13%	7%	5%	480	362	77%	77%
Kurve	5%	3%	11%	9%	7%	6%	4%	3%	413	310	68%	67%
<b>Straßenzustand*</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
trocken	84%	82%	82%	84%	84%	82%	83%	82%	290	180	46%	46%
nass/feucht	15%	17%	18%	15%	14%	16%	15%	17%	276	172	46%	41%
winterglatt	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	1%	314	248	81%	73%
Schlüpfrigkeit (Öl, Dung, Laub, usw)	1%	1%	1%	0%	1%	1%	1%	1%	371	242	74%	67%
<b>Lichtverhältnisse</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
Tag	88%	82%	90%	79%	88%	81%	88%	82%	289	177	46%	45%
Dämmerung	3%	5%	3%	4%	3%	4%	3%	5%	264	159	40%	41%
Dunkelheit	9%	13%	7%	17%	9%	15%	9%	13%	295	202	54%	50%
<b>Alleinunfall</b>	<b>28%</b>	<b>18%</b>	<b>27%</b>	<b>23%</b>	<b>40%</b>	<b>31%</b>	<b>23%</b>	<b>15%</b>	<b>413</b>	<b>306</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>
<b>Zwei Beteiligte</b>	<b>70%</b>	<b>79%</b>	<b>69%</b>	<b>70%</b>	<b>58%</b>	<b>67%</b>	<b>74%</b>	<b>81%</b>	<b>241</b>	<b>151</b>	<b>26%</b>	<b>34%</b>
<b>Gegner war ein:</b>	<b>10.125</b>	<b>241.103</b>	<b>141</b>	<b>950</b>	<b>2.295</b>	<b>35.530</b>	<b>7.414</b>	<b>201.542</b>				
Motorisiertes Zweirad	2%	2%	4%	4%	3%	2%	1%	1%	407	174	59%	53%
Pkw	69%	74%	67%	52%	68%	71%	72%	76%	236	144	20%	25%
Bus	1%	1%	1%	2%	1%	1%	1%	1%	247	174	32%	49%
leichtes Güterkraftfahrzeug	4%	4%	6%	8%	4%	4%	4%	4%	237	170	16%	19%
schweres Güterkraftfahrzeug	1%	1%	11%	21%	2%	2%	1%	1%	397	372	20%	22%
konv Fahrrad	13%	8%	4%	3%	11%	12%	11%	11%	200	217	40%	100%
Pedelect 25	2%	1%	0%	0%	4%	0%	3%	0%	400	92	100%	60%
Fußgänger	5%	6%	1%	1%	4%	3%	4%	3%	182	77	47%	61%
Sonstige	3%	3%	5%	9%	4%	4%	3%	2%	303	204	18%	23%
<b>Drei und mehr Beteiligte</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>4%</b>	<b>6%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>3%</b>	<b>4%</b>	<b>252</b>	<b>164</b>	<b>23%</b>	<b>37%</b>
<b>Hauptverursachende</b>	<b>14.429</b>	<b>305.106</b>	<b>205</b>	<b>1.349</b>	<b>3.956</b>	<b>53.405</b>	<b>10.020</b>	<b>248.539</b>	<b>288</b>	<b>179</b>	<b>47%</b>	<b>46%</b>
P25/kFR ist hauptverursachend	47%	46%	72%	61%	61%	60%	39%	43%	384	234		
<b>Unfallursachen der Hauptverursachenden (Auswahl)*</b>	<b>6.717</b>	<b>140.007</b>	<b>148</b>	<b>829</b>	<b>2.428</b>	<b>31.880</b>	<b>3.951</b>	<b>105.922</b>	<b>384</b>	<b>234</b>		
Alkoholeinfluss	7%	9%	1%	8%	7%	11%	8%	8%	373	285		
falsche Straßenbenutzung	10%	14%	5%	6%	9%	11%	10%	16%	330	174		
nicht angepasste Geschwindigkeit	14%	10%	11%	10%	16%	14%	13%	9%	438	323		
ungenügender Abstand	3%	4%	0%	2%	3%	3%	4%	5%	362	162		
Fehler beim Überholen	2%	3%	3%	2%	1%	2%	2%	3%	252	200		
Fehler beim Nebeneinanderfahren	0%	1%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	286	201		
Nichtbeachten Vorfahrt, Vorrang	12%	13%	39%	33%	13%	13%	10%	13%	462	249		
Fehler beim Abbiegen	3%	4%	5%	4%	3%	4%	3%	4%	382	229		
Fehler beim Ein-/Anfahren	4%	9%	4%	12%	4%	8%	4%	9%	395	221		
falsches Verhalten gegenüber Fuß.	2%	4%	0%	0%	1%	1%	2%	1%	158	43		
anderer Fehler beim Fahrzeugführ.	52%	41%	34%	33%	52%	45%	55%	41%	378	254		
Technische Mängel, Wartungsmän.	1%	3%	1%	1%	1%	3%	1%	2%	424	261		

\* Mehrfachnennung möglich (Anteil der Unfälle, nicht der Nennungen) SP = schwere Personenschäden der P25-/kFR-Nutzenden = Getötete = Schwerverletzte

Tabelle 3: Fact Sheet P25-/kFR-Unfälle 2014-2017

Tabelle 4: Getötete und schwerverletzte kFR- und P25-Nutzende nach Alter und Geschlecht

Summe 2014-2017	Im Straßenverkehr Verunglückte				Verunglückte P25-Nutzende				Verunglückte kFR-Nutzende			
	Gesamt	♀	♂		Gesamt	♀	♂		Gesamt	♀	♂	
<b>Schwerverletzte</b>	<b>269.377</b>	<b>100%</b>	<b>38%</b>	<b>62%</b>	<b>3.956</b>	<b>100%</b>	<b>43%</b>	<b>57%</b>	<b>53.405</b>	<b>100%</b>	<b>37%</b>	<b>63%</b>
<b>Alter*</b>												
00-09	8.725	3%	40%	60%	3	0%	67%	33%	1.242	2%	28%	72%
10-19	35.927	13%	37%	63%	32	1%	47%	53%	7.052	13%	32%	68%
20-29	47.995	18%	36%	64%	85	2%	32%	68%	5.603	10%	35%	65%
30-39	31.305	12%	34%	66%	133	3%	32%	68%	5.382	10%	31%	69%
40-49	35.131	13%	35%	65%	304	8%	43%	57%	7.291	14%	32%	68%
50-59	43.903	16%	37%	63%	756	19%	54%	46%	9.768	18%	39%	61%
60-69	27.117	10%	41%	59%	959	24%	48%	52%	7.131	13%	43%	57%
70 +	38.860	14%	49%	51%	1.684	43%	36%	64%	9.823	18%	45%	55%
<b>Getötete</b>	<b>13.222</b>	<b>100%</b>	<b>26%</b>	<b>74%</b>	<b>205</b>	<b>100%</b>	<b>27%</b>	<b>73%</b>	<b>1.349</b>	<b>100%</b>	<b>28%</b>	<b>72%</b>
<b>Alter*</b>												
00-09	165	1%	41%	59%	0	0%	.	.	15	1%	33%	67%
10-19	964	7%	27%	73%	0	0%	.	.	85	6%	34%	66%
20-29	2.218	17%	18%	82%	0	0%	.	.	69	5%	26%	74%
30-39	1.378	10%	17%	83%	0	0%	.	.	71	5%	27%	73%
40-49	1.598	12%	21%	79%	3	1%	0%	100%	111	8%	23%	77%
50-59	2.059	16%	22%	78%	15	7%	33%	67%	187	14%	29%	71%
60-69	1.408	11%	28%	72%	27	13%	30%	70%	224	17%	29%	71%
70 +	3.424	26%	39%	61%	160	78%	26%	74%	586	43%	27%	73%
<b>Summe</b>	<b>282.599</b>	<b>100%</b>	<b>38%</b>	<b>62%</b>	<b>4.161</b>	<b>100%</b>	<b>42%</b>	<b>58%</b>	<b>54.754</b>	<b>100%</b>	<b>37%</b>	<b>63%</b>
<b>Alter*</b>												
00-09	8.890	3%	40%	60%	3	0%	67%	33%	1.257	2%	28%	72%
10-19	36.891	13%	37%	63%	32	1%	47%	53%	7.137	13%	32%	68%
20-29	50.213	18%	35%	65%	85	2%	32%	68%	5.672	10%	35%	65%
30-39	32.683	12%	33%	67%	133	3%	32%	68%	5.453	10%	31%	69%
40-49	36.729	13%	34%	66%	307	7%	43%	57%	7.402	14%	32%	68%
50-59	45.962	16%	36%	64%	771	19%	54%	46%	9.955	18%	39%	61%
60-69	28.525	10%	40%	60%	986	24%	48%	52%	7.355	13%	43%	57%
70 +	42.284	15%	48%	52%	1.844	44%	35%	65%	10.409	19%	44%	56%

\* ohne die Kategorie „ohne Altersangabe“

ten über 70 Jahre ist deutlich am höchsten, wohingegen in den jüngsten drei Altersgruppen insgesamt nur wenige schwer verletzt wurden. Bei den verunglückten kFR-Nutzenden sind die Unterschiede zwischen den Altersgruppen deutlich geringer. Auffällig ist der hohe Anteil Verunglückter zwischen 10 und 19. Der Unterschied zwischen Jungen und Mädchen unter 10 Jahren ist bei den kFR-Nutzenden besonders groß und nimmt mit dem Alter ab.

Die Altersverteilung der Schwerverletzten und Getöteten korrespondiert mit der Altersstruktur der Nutzenden und deren höherer Fragilität bei gleichzeitig höherer Geschwindigkeit der Pedelecs.

#### 4 Detailuntersuchungen

Sowohl Literaturanalyse als auch Strukturanalyse brachten drei deutliche Unterschiede im Unfallgeschehen von P25 und kFR: P25-Unfälle sind außerorts häufiger und schwerer als kFR-Unfälle, Alleinunfälle von P25 sind deutlich häufiger als Alleinunfälle von kFR, und Knotenpunktunfälle unter Beteiligung eines kFR sind deutlich häufiger als jene unter Beteiligung eines P25. Die demografische Analyse verunglückter Fahrradnutzender zeigte, dass verunglück-

te P25-Nutzende im Durchschnitt älter sind als verunglückte kFR-Nutzende. Dazu wurden Detailuntersuchungen durchgeführt und Tabellen analog zu Tabelle 3 erstellt. Knotenpunktunfälle sind Unfälle des Typs „Abbiege-Unfall“ sowie „Einbiegen/Kreuzen-Unfall“ mit genau zwei Beteiligten<sup>12</sup>, wobei nach Hauptverursachenden (HV) unterschieden wird. Die Variable Lichtzeichenanlage (LZA) wurde zusätzlich aufgenommen (Block IV). Alleinunfälle sind Unfälle mit genau einer/einem Beteiligten. Unfälle Älterer sind Unfälle unter Beteiligung mindestens 70 Jahre alter Fahrradnutzender. Dargestellt werden in Tabelle 5 nur relevante Blöcke, bei denen sich deutliche Unterschiede zeigten.<sup>13</sup>

##### 4.1 Außerortsunfälle

Fahrrad-Alleinunfälle wie auch Unfälle älterer Fahrradfahrender ereignen sich noch häufiger außerorts und sind dort schwerer (Block I). Sehr hoch ist die Unfallschwere älterer kFR-Nutzender außerorts. Knotenpunktunfälle mit hauptverursachendem Fahrrad sind ebenfalls häufiger außerorts und schwerer als im Durchschnitt. Knotenpunktunfälle, bei denen der Gegner des Fahrrads HV ist, sind seltener außerorts.

##### 4.2 Knotenpunkte

Bei Knotenpunktunfällen sind P25 und kFR jeweils seltener HV. Sind sie es doch, ist die Unfallschwere deutlich höher. P25-Unfälle ereignen sich häufiger an Knotenpunkten ohne LZA als kFR-Unfälle, beide Gruppen sind an Knotenpunkten mit LZA (in Betrieb) seltener hauptverursachend (Block IV). Der Pkw ist jeweils der häufigste Gegner (V), die Unfallschwere ist dabei jeweils höher, wenn der Pkw nicht hauptverursachend ist. Am höchsten ist die Unfallschwere jedoch, wenn der Gegner ein schweres Güterkraftfahrzeug ist. Häufige Gegner der P25 wie auch der kFR sind andere kFR, die Unfallschwere ist dabei niedrig. Ist ein P25 HV, so ist die Ursache (VI) meist das Nichtbeachten von Vorfahrt/Vorrang, bei den kFR zusätzlich auch Fehler beim Ein-/Anfahren. Ist das Fahrrad nicht HV, beachtete der Gegner meist Vorfahrt/Vorrang nicht. Ein HV-Gegner eines kFR verursacht zudem Knotenpunktunfälle oft durch Fehler beim Abbiegen.

<sup>12</sup> Aufgrund der bereits beschriebenen Problematik bezüglich der Zuordenbarkeit bei mehr als zwei Beteiligten.

<sup>13</sup> Die vollständigen Tabellen können auf Anfrage beim Autor bezogen werden.

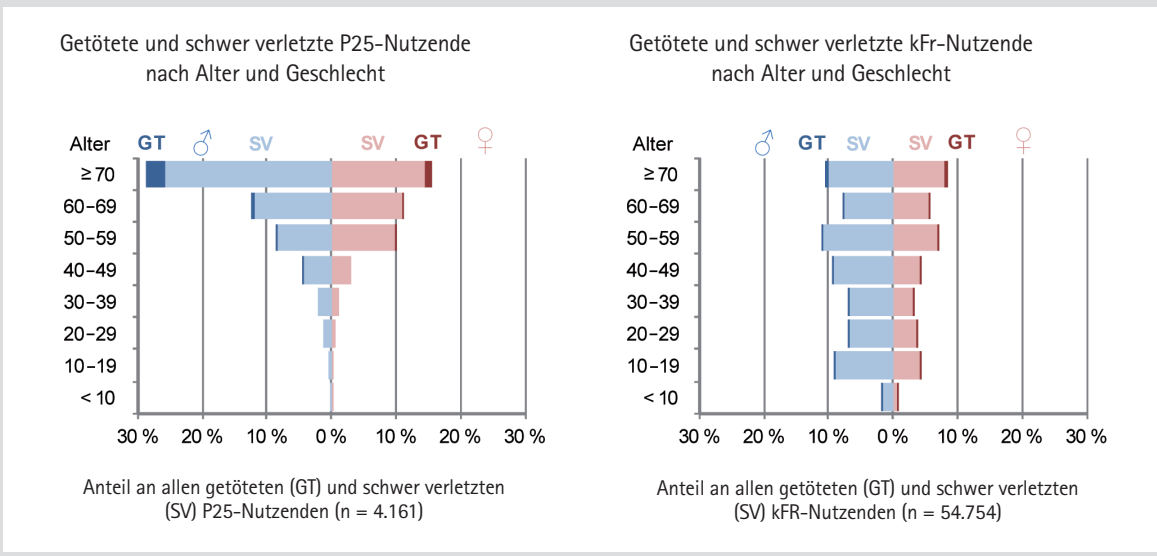


Bild 3: Anteil der getöteten (GT) und schwer verletzten (SV) Nutzenden eines P25 bzw. kFR (2014–2017) nach Alter und Geschlecht

### 4.3 Alleinunfälle

Alleinunfälle von kFR wie P25 sind nachts und an Wochenenden (II) häufiger als P25-/kFR-Unfälle mit zwei und mehr Beteiligten. Auffallend sind der sehr hohe Anteil und die sehr hohe Unfallschwere von Alleinunfällen bei Gefälle und in Kurven (IV). Die häufigsten Ursachen (VI) sind nicht angepasste Geschwindigkeit (vor allem P25) und Alkoholeinfluss (vor allem kFR).

Eine separate Analyse der Alleinunfälle bei Kurven und Gefälle brachte keine weiteren Erkenntnisse. Sowohl bei Alleinunfällen bei Gefälle als auch in Kurven ist eine nicht angepasste Geschwindigkeit die häufigste Unfallursache. Straßen- und Lichtverhältnisse scheinen bei Gefälle oder in Kurven denselben Einfluss zu haben wie in der jeweiligen Gesamtheit aller Alleinunfälle.

### 4.4 Ältere

Die Unfallschwere der Unfälle unter Beteiligung älterer kFR-Nutzender ist beinahe so hoch wie bei den älteren P25, beide sind jeweils deutlich höher als bei allen Altersgruppen zusammen. Der Anteil der Alleinunfälle ist bei den älteren P25-Nutzenden nach wie vor höher als bei den älteren kFR-Nutzenden (V), allerdings ist der Anteil der Unfälle an Kreuzungen (IV) bei den Älteren in etwa gleich. Die Unfälle älterer Fahrradnutzender ereignen sich öfter mittags und nachmittags (II). Die Anteile der Unfälle älterer Fahrradnutzender bei Gefälle und in Kurven (IV) sind jeweils geringfügig niedriger (jeweils 1–2 Prozentpunkte). Der Anteil hauptverursachender Fahrrad-fahrender steigt, insbesondere bei den kFR.

Ältere kFR-Nutzende verursachen öfter einen Unfall durch falsche Straßenbenutzung, ältere P25-Nutzende durch das Nichtbeachten von Vorfahrt/Vorrang. Nicht angepasste Geschwindigkeit und Alkohol sind bei Älteren seltener Ursache (VI).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag analysiert die Struktur der Unfälle von Pedelec 25 (P25) und ihre Unterschiede zu den Unfällen konventioneller Fahrräder (kFR). Durch die Beantwortung der vier Teilfragen wird dargestellt, dass es durch die Verbreitung von P25 zu mehr P25-Unfällen kommt, sich diese von Unfällen konventioneller Fahrräder unterscheiden und sich dadurch neue Anforderungen an die Verkehrssicherheitsarbeit ergeben.

Teilfrage 1:

P25-Unfälle sind durchschnittlich schwerer als kFR-Unfälle. Dabei sind die absoluten Fallzahlen der P25-Unfälle (bisher) deutlich geringer als jene der kFR-Unfälle. Bei einer relativ konstanten Anzahl an Fahrradunfällen insgesamt führt eine zunehmende P25-Beteiligung zu einem geringeren Rückgang schwerer Fahrradunfälle.

Teilfrage 2:

Sowohl die Literaturanalyse als auch die Datenanalyse brachten deutliche Unterschiede im Unfallgeschehen von P25 und kFR: P25-Unfälle sind häufiger Alleinunfälle, kFR-Unfälle häufiger Knotenpunktunfälle. Bei beiden Fahrzeugen dominieren

Unfälle innerorts deutlich, jedoch ist der Anteil der Unfälle außerorts bei den P25 wesentlich höher. Außerorts sind Fahrradunfälle schwerer, besonders der Anteil Getöteter (45 % der getöteten P25- und 36 % der getöteten kFR-Nutzenden) ist hoch. Außerdem ereignen sich kFR-Unfälle häufiger zu Zeiten, an denen typischerweise der Weg zur Arbeit oder Schule zurückgelegt wird, der Großteil der P25-Unfälle in typischen Zeiten des Wirtschafts-, Einkaufs- oder Freizeitverkehrs.

Teilfrage 3:

Verunglückte P25-Nutzende sind im Durchschnitt älter als verunglückte kFR-Nutzende. Der Großteil der verunglückten P25-Nutzenden ist mindestens 70 Jahre alt, wohingegen es in den jüngsten drei Altersgruppen nur wenige Verunglückte gab. Bei den verunglückten kFR-Nutzenden sind die Unterschiede zwischen den Altersgruppen deutlich geringer. Bei den Getöteten ist der Unterschied noch deutlicher: 78 % der getöteten P25-Nutzenden waren 70 Jahre und älter, von den kFR-Getöteten waren 43 %, von der Gesamtheit aller im Straßenverkehr Getöteten 26 % dieses Alters.

Teilfrage 4:

Die vertiefte Analyse zeigte, dass Alleinunfälle von kFR wie P25 außerorts sowie nachts und an Wochenenden häufiger auftreten. Die häufigsten Ursachen sind dabei nicht angepasste Geschwindigkeit (vor allem P25) und Alkoholeinfluss (vor allem kFR). Zudem wurde deutlich, dass sich P25-Unfälle häufiger an Knotenpunkten ohne LZA ereignen als kFR-Unfälle. Beide Gruppen sind an Knotenpunkten mit

Alleinunfälle mit Personenschaden 2014-2017 unter Beteiligung eines Pedelecs25 (P25)/konventionelles Fahrrad (kFR)	Alleinunfälle				Knotenpunkunfälle (mit Personenschaden mit 2 Beteiligten)								P25-/kFR-Fahrende 70 oder älter			
	Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung eines ...		Unfallsschwere		... unter Beteiligung eines P25				... unter Beteiligung eines kFR				Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung eines ...		Unfallsschwere SP (70+) / 1.000 Unfälle mit Pers.schaden	
	P25	kFR	P25	kFR	Anzahl Unfälle	Unfallsschwere	Anzahl Unfälle	Unfallsschwere	Anzahl Unfälle	Unfallsschwere	Anzahl Unfälle	Unfallsschwere	P25	kFR	P25	kFR
<b>Ortslage</b>	<b>3.982</b>	<b>54.728</b>	<b>413</b>	<b>306</b>	<b>1.431</b>	<b>403</b>	<b>5.223</b>	<b>200</b>	<b>42.547</b>	<b>214</b>	<b>115.707</b>	<b>132</b>	<b>5.464</b>	<b>43.805</b>	<b>659</b>	<b>635</b>
innerorts	75%	85%	389	284	72%	318	87%	191	93%	195	95%	127	79%	90%	602	576
außerorts	25%	15%	484	428	28%	624	13%	266	7%	460	5%	223	21%	10%	877	1.185
<b>Tageszeit</b>	<b>3.982</b>	<b>54.728</b>	<b>413</b>	<b>306</b>	<b>1.431</b>	<b>403</b>	<b>5.223</b>	<b>200</b>	<b>42.547</b>	<b>214</b>	<b>115.707</b>	<b>132</b>	<b>5.464</b>	<b>43.805</b>	<b>659</b>	<b>635</b>
Nacht (00.00-04.59 Uhr)	2%	6%	414	324	0%	0	0%	0	1%	311	1%	170	0%	1%	2.308	1.536
Vormittag (05.00-09.29 Uhr)	8%	13%	401	265	12%	328	16%	209	17%	185	23%	123	7%	12%	837	718
Mittag (09.30-14.29 Uhr)	37%	29%	392	306	40%	416	40%	211	31%	220	31%	139	47%	45%	580	543
Nachmittag (14.30-18.59 Uhr)	39%	34%	429	313	41%	422	38%	185	41%	215	37%	129	40%	36%	656	647
Abend (19.00-23.59 Uhr)	14%	18%	428	317	6%	329	5%	209	10%	230	8%	136	5%	7%	1.097	971
<b>Wochentag</b>	<b>3.982</b>	<b>54.728</b>	<b>413</b>	<b>306</b>	<b>1.431</b>	<b>403</b>	<b>5.223</b>	<b>200</b>	<b>42.547</b>	<b>214</b>	<b>115.707</b>	<b>132</b>	<b>5.464</b>	<b>43.805</b>	<b>659</b>	<b>635</b>
Montag - Freitag	78%	82%	399	298	75%	397	83%	200	83%	206	87%	129	87%	91%	627	608
Samstag, Sonntag, Feiertag	22%	18%	459	345	25%	419	17%	203	17%	251	13%	150	13%	9%	873	909
<b>Charakteristik der Unfallstelle*</b>	<b>3.982</b>	<b>54.728</b>	<b>413</b>	<b>306</b>	<b>1.431</b>	<b>403</b>	<b>5.223</b>	<b>200</b>	<b>42.547</b>	<b>214</b>	<b>115.707</b>	<b>132</b>	<b>5.464</b>	<b>43.805</b>	<b>659</b>	<b>635</b>
Kreuzung	5%	7%	347	269	35%	441	24%	242	33%	222	30%	143	16%	17%	370	263
Einmündung	12%	11%	398	293	40%	409	43%	207	33%	215	41%	139	29%	25%	323	256
Grundstücksein- oder -ausfahrt	4%	3%	387	279	10%	279	26%	162	12%	182	22%	106	10%	9%	245	212
Steigung	4%	2%	396	337	1%	333	1%	138	1%	302	1%	232	2%	1%	318	313
Gefälle	21%	18%	561	453	4%	455	3%	329	3%	318	2%	235	8%	5%	541	405
Kurve	9%	6%	532	431	3%	447	1%	200	2%	297	1%	228	4%	3%	444	341
<b>Lichtzeichenanlage</b>	<i>keine Auswertung</i>				<b>1.431</b>	<b>403</b>	<b>5.223</b>	<b>200</b>	<b>42.547</b>	<b>214</b>	<b>115.707</b>	<b>132</b>	<i>keine Auswertung</i>			
nicht vorhanden					90%	406	88%	199	83%	211	81%	131				
vorhanden - in Betrieb					9%	363	12%	210	16%	226	18%	135				
vorhanden - außer Betrieb					0%	0	0%	0	1%	276	1%	164				
<b>Alleinunfall</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>413</b>	<b>306</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>28%</b>	<b>20%</b>	<b>925</b>	<b>1.024</b>
<b>Zwei Beteiligte</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100%</b>	<b>403</b>	<b>100%</b>	<b>200</b>	<b>100%</b>	<b>214</b>	<b>100%</b>	<b>132</b>	<b>70%</b>	<b>77%</b>	<b>556</b>	<b>544</b>
<b>Gegner war ein:</b>					<b>1.431</b>	<b>403</b>	<b>5.223</b>	<b>200</b>	<b>42.547</b>	<b>214</b>	<b>115.707</b>	<b>132</b>	<b>3.838</b>	<b>33.771</b>	<b>556</b>	<b>544</b>
Motorisiertes Zweirad					6%	482	1%	308	4%	193	1%	142	2%	2%	530	366
Pkw					72%	425	85%	197	72%	214	91%	127	69%	59%	307	431
Bus					1%	429	1%	259	2%	207	1%	180	1%	1%	306	492
leichtes Güterkraftfahrzeug					3%	447	5%	181	2%	291	5%	140	4%	4%	257	533
schweres Güterkraftfahrzeug					1%	438	2%	400	1%	492	1%	387	2%	2%	500	539
konv. Fahrrad					13%	217	6%	184	16%	201	-	-	11%	19%	263	248
Pedelec 25					3%	351	-	-	1%	39	0%	-	3%	1%	379	4.250
Fußgänger					0%	0	0%	0	1%	46	0%	-	4%	11%	215	465
Sonstige					1%	750	1%	230	1%	226	1%	143	4%	2%	396	481
<b>Drei und mehr Beteiligte</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>0</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>624</b>	<b>454</b>
<b>Unfallursachen</b>	<b>3.982</b>	<b>54.728</b>	<b>413</b>	<b>306</b>	<b>1.431</b>	<b>403</b>	<b>5.223</b>	<b>200</b>	<b>42.547</b>	<b>214</b>	<b>115.707</b>	<b>132</b>	<b>2.738</b>	<b>23.679</b>	<b>659</b>	<b>635</b>
Alkoholeinfluss	9%	14%	417	310	2%	273	0%	0	3%	281	0%	0	2%	2%	349	285
falsche Straßenbenutzung	5%	5%	503	319	12%	229	2%	184	15%	148	1%	159	8%	16%	371	157
nicht angepasste Geschwindigkeit	20%	18%	470	369	2%	265	1%	379	2%	218	1%	243	10%	6%	458	342
ungenügender Abstand	1%	1%	405	232	1%	286	0%	0	1%	129	1%	120	3%	3%	398	173
Fehler beim Abbiegen	1%	1%	440	301	12%	382	20%	203	10%	221	27%	140	4%	4%	500	326
anderer Fehler beim Fahrzeugführ.	73%	70%	396	297	10%	368	5%	169	11%	182	7%	127	52%	42%	396	291
Technische Mängel, Wartungsman	1%	4%	474	325	0%	0	0%	0	2%	176	0%	0	1%	1%	529	251

\* Mehrfachnennung möglich (Anteil der Unfälle, nicht der Nennungen) SP = schwere Personenschäden der P25-/kFR-Nutzenden = Getötete = Schwerverletzte

Tabelle 5: Detaillauswertung

LZA (in Betrieb) seltener hauptverursachend. Der Pkw ist an Knotenpunkten jeweils der häufigste Gegner, die Unfallsschwere ist jeweils am höchsten, wenn der Gegner ein schweres Güterkraftfahrzeug ist. Die Unfallsschwere ist bei Unfällen mit älteren (mindestens 70 Jahre alten) Verunglückten höher als im Durchschnitt, besonders außerorts. Zudem ist die Unfallsschwere älterer kFR-Nutzender beinahe so hoch wie jene älterer P25-Nutzender. Der Anteil der Alleinunfälle ist bei älteren P25-Nutzenden nach wie vor höher als bei älteren kFR-Nutzenden. Ältere kFR-Nutzende verursachen öfter einen Unfall durch falsche Straßenbenutzung, ältere P25-Nutzende durch das Nichtbeachten von Vorfahrt oder Vorrang. Der Anteil hauptverursachender Fahrradführender ist unter den älteren höher, insbesondere bei kFR.

Die Antworten dieser Fragen werfen direkt neue Fragen auf. Die Daten der amtlichen Statistik werden nach einer Systematik erhoben, die im Wesentlichen für zweispur-

rige Fahrzeuge entworfen wurde und dadurch einige fahrradspezifische Aspekte (etwa Stürze) nur teilweise abbildet. Hier wäre es notwendig, P25-Unfälle mit detaillierteren Daten (etwa auch Rekonstruktionen) vertieft zu analysieren. Zudem wurde klar, dass sich P25-Unfälle (tendenziell) zu anderen Zeiten ereignen als kFR-Unfälle, was auf andere Nutzungszwecke deutet. Eine Analyse der Unfälle in Verbindung mit einer vertieften Analyse der Fahrleistungen und Wege wäre dazu sinnvoll. Der höhere Anteil der P25-Unfälle außerorts wirft schließlich die Frage nach weiteren räumlichen Unterschieden im Unfallgeschehen auf.

Literaturverzeichnis

Alrutz, D. et al. (2009): Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern. Schriftenreihe der BASt Heft V 184, Bergisch Gladbach

ASTRA – Bundesamt für Strassen (2017): Elektroversel – Auswirkungen auf das Verkehrssystem, Bern

BASt – Bundesanstalt für Straßenwesen (2019): Volkswirtschaftliche Kosten von Straßenverkehrsunfällen in

Deutschland. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. Online verfügbar unter [www.bast.de](http://www.bast.de), zuletzt geprüft am 26.4.2019

von Below, A. (2016): Verkehrssicherheit von Radfahrern. Analyse sicherheitsrelevanter Motive, Einstellungen und Verhaltensweisen. Schriftenreihe der BASt Heft M 264, Bergisch Gladbach

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hg.) (2014): Neue Mobilitätsformen, Mobilitätsstationen und Stadtgestalt. ExWoSt-Informationen, 45/1. Bonn

BMI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017): Pedelec? Aber sicher! (Folder). Online verfügbar unter [www.bmvi.de](http://www.bmvi.de), zuletzt geprüft am 18.7.2019

BMI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2018): Mobilität in Deutschland. Tabellarische Grundauswertung. Deutschland. Unter Mitarbeit von infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH. Bonn

Boele-Vos, M. J.; van Duijvenvoorde, K.; Doumen, M. J. A.; Duivenvoorden, C. W. A. E.; Louwerse, W. J. R.; Davids, R. J. (2017): Crashes involving cyclists aged 50 and over in the Netherlands: An in-depth study. In: Accident analysis and prevention 105, S. 4-10

DVR – Deutscher Verkehrssicherheitsrat (Hg.) (2017): Vermeidung von Radfahrernfällen durch abbiegende Fahrzeuge. Themenserie Verkehrssicherheit für Entscheider in Stadt und Land. Bonn

- Fyhri, A.; Sundfjor, H. B.; Bjornskau, T.; Laureshyn, A. (2017): Safety in numbers for cyclists – conclusions from a multidisciplinary study of seasonal change in interplay and conflicts. In: *Accident analysis and prevention* 105, S. 124–133
- Hertach, P.; Uhr, A.; Niemann, S.; Cavegn, M. (2018): Characteristics of single-vehicle crashes with e-bikes in Switzerland. In: *Accident analysis and prevention* 117, S. 232–238
- Holz-Rau, C.; Hölderich, P. (2016): Verkehrssicherheit und Höhenunterschiede – Unfälle in Nordrhein-Westfalen. In: *Z. f. Verkehrssicherheit* 62 (5), S. 239–249, Kirschbaum Verlag, Bonn
- Holz-Rau, C.; Scheiner, J. (2009): Verkehrssicherheit in Stadt und (Um-)Land – Unfallrisiko im Stadt-Land-Vergleich. In: *Z. f. Verkehrssicherheit* (4), S. 171–177, Kirschbaum Verlag, Bonn
- Holz-Rau, C.; Scheiner, J. (2010): Verkehrssicherheit in den Kreisen Nordrhein-Westfalens. Wo lebt es sich am sichersten? In: *Raumforschung Raumordnung* 68 (5), S. 357–371
- Huppertz, B.; Kern, J. (2014): Elektrofahrräder. In: *Z. f. Verkehrssicherheit* 60 (1), S. 44–51, Kirschbaum Verlag, Bonn
- ITF – International Transport Forum (Hg.) (2018): *Cycling Safety. Summary and Conclusions ITF Roundtable on Cycling Safety 01/18*, Paris
- Kim, J.-K.; Kim, S.; Ulfarsson, G. F.; Porrello, L. A. (2007): Bicyclist injury severities in bicycle-motor vehicle accidents. In: *Accident analysis and prevention* 39 (2), S. 283–251
- Klein, R. (2016): Elektromobilität – Entwicklungen bei Pedelecs. In: *Jacoby, C. und Wappelhorst, S. (Hg.): Potenziale neuer Mobilitätsformen und -technologien für eine nachhaltige Raumentwicklung, Arbeitsberichte der ARL Bd. 18*, S. 126–156
- Kováčsová, N.; Winter, J. C. F. de; Schwab, A. L.; Christoph, M.; Twisk, D. A. M.; Hagenzieker, M. P. (2016): Riding performance on a conventional bicycle and a pedelec in low speed exercises. Objective and subjective evaluation of middle-aged and older persons. In: *Transportation Research F* 42, S. 28–43
- Lawinger, T.; Bastian, T. (2013): Neue Formen der Zweiradmobilität. Eine empirische Tiefenanalyse von Pedelec-Unfällen in Baden-Württemberg. In: *Z. f. Verkehrssicherheit* 59 (2), Kirschbaum Verlag, Bonn
- Madsen, T. K. O.; Lahrmann, H. (2017): Comparison of five bicycle facility designs in signalized intersections using traffic conflict studies. In: *Transportation Research F* 46, S. 438–450
- Otte, D.; Facius, T.; Müller, C. (2014): Pedelecs im Unfallgeschehen und Vergleich zu konventionellen nicht motorisierten Zweirädern. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* (02), S. 48–60
- PGV – Planungsgemeinschaft Verkehr; IWU – Institut Wohnen und Umwelt (2015): *Potenzielle Einflüsse von Pedelecs auf die Verkehrssicherheit*. Hannover/Darmstadt. Online unter [www.iwu.de](http://www.iwu.de), zuletzt geprüft am 7.11.2018
- Pokorny, P.; Drescher, J.; Pitera, K.; Jonsson, T. (2017): Accidents between freight vehicles and bicycles, with a focus on urban areas. In: *Transportation Research Procedia* 25, S. 999–1007
- Pokorny, P.; Pritchard, R.; Pitera, K. (2018): Conflicts between bikes and trucks in urban areas – A survey of Norwegian cyclists. In: *Case Studies on Transport Policy* 6 (1), S. 147–155
- Richter, T.; Sachs, J. (2017): Turning accidents between cars and trucks and cyclists driving straight ahead. In: *Transportation Research Procedia* 25, S. 1946–1954
- Schepers, J. P.; Fishman, E.; den Hertog, P.; Wolt, K. Klein; Schwab, A. L. (2014): The safety of electrically assisted bicycles compared to classic bicycles. In: *Accident analysis and prevention* 73, S. 174–180
- Schepers, J. P.; Kroeze, P. A.; Sweers, W.; Wüst, J. C. (2011): Road factors and bicycle-motor vehicle crashes at unsignalized priority intersections. In: *Accident analysis and prevention* 43 (3), S. 853–861
- Schleinitz, K.; Franke-Bartholdt, L.; Petzoldt, T.; Schwanitz, S.; Gehlert, T.; Kühn, M. (2014): *Pedelec-Naturalistic Cycling Study*. Forschungsberichte der UDV 27, Berlin
- Schreck, B. (2016): Radverkehr – Unfallgeschehen und Stand der Forschung. In: *Z. f. Verkehrssicherheit* 62 (2), S. 63–77
- Schreck, B.; Pöppel-Decker, M. (2014): Unfallgeschehen zwischen rechtsabbiegenden Güterkraftfahrzeugen und geradeausfahrenden Radfahrern. In: *Z. f. Verkehrssicherheit* 60 (4), S. 239–242, Kirschbaum Verlag, Bonn
- Shinar, D.; Valero-Mora, P.; van Strijp-Houtenbos, M.; Haworth, N.; Schramm, A.; Bruyne, Guido de et al. (2018): Under-reporting bicycle accidents to police in the COST TU1101 international survey: Cross-country comparisons and associated factors. In: *Accident analysis and prevention* 110, S. 177–186
- Staub, T. (2018): *Auswertung der Verkehrsunfallstatistik für Wien, Schwerpunkt Radverkehr*. Bachelorarbeit, online unter [www.fvw.tuwien.ac.at](http://www.fvw.tuwien.ac.at), zuletzt geprüft am 26.3.2019
- StBA – Statistisches Bundesamt (2018a): *Verkehrsunfälle – Fachserie 8 Reihe 7 – 2017*. Wiesbaden
- StBA – Statistisches Bundesamt (2018b): *Verkehrsunfälle – Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr – 2017*. Wiesbaden
- StVG – Straßenverkehrsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2003 (BGBl. I S. 310, 919)
- Summala, H.; Pasanen, E.; Räsänen, M.; Sievänen, J. (1996): Bicycle accidents and drivers' visual search at left and right turns. In: *Accident analysis and prevention* 28 (2), S. 147–153
- Teufel, D.; Arnold, S.; Bauer, P. (2014): *Analyse der Fahrradunfälle in Heidelberg 2008–2012*. Heidelberg (UPL-Bericht, 77), zuletzt geprüft am 16.5.2018
- Twisk, D. A. M.; Platteel, S.; Lovegrove, G. R. (2017a): An experiment on rider stability while mounting: Comparing middle-aged and elderly cyclists on pedelecs and conventional bicycles. In: *Accident analysis and prevention* 105, S. 109–116
- Twisk, D. A. M.; de Hair-Buijssen, S. H. H. M.; Otte, D. (2017b): Editorial for special issue – 'Improving cyclist safety through scientific research'. In: *Accident analysis and prevention* 105, S. 1–3
- UDV – Unfallforschung der Versicherer (Hg.) (2017): *Verkehrssicherheit von Elektrofahrrädern*. GDV Unfallforschung kompakt, 69, Berlin
- UNO – United Nations Organization (1968): *Convention on Road Traffic*. Wien
- Useche, S.; Montoro, L.; Alonso, F.; Oviedo-Trespalacios, O. (2018): Infrastructural and Human Factors Affecting Safety Outcomes of Cyclists. In: *Sustainability* 10 (2), S. 299
- Vlakveld, W. P.; Twisk, D.; Christoph, M.; Boele, M.; Sikkema, R.; Remy, R.; Schwab, A. L. (2015): Speed choice and mental workload of elderly cyclists on e-bikes in simple and complex traffic situations: a field experiment. In: *Accident analysis and prevention* 74, S. 97–106
- Warner, J.; Hurwitz, D. S.; Monsere, C. M.; Fleskes, K. (2017): A simulator-based analysis of engineering treatments for right-hook bicycle crashes at signalized intersections. In: *Accident analysis and prevention* 104, S. 46–57
- Weber, T.; Scaramuzza, G.; Schmitt, K.-U. (2014): Evaluation of e-bike accidents in Switzerland. In: *Accident analysis and prevention* 73, S. 47–52
- Weiss, R.; Juhra, C.; Wieskötter, B.; Weiss, U.; Jung, S.; Raschke, M. (2018): Zur Unfallwahrscheinlichkeit von Senioren bei der Nutzung von E-Bikes. In: *Z. f. Orthopädie und Unfallchirurgie* 156 (1), S. 78–84
- Zangenehpour, S.; Strauss, J.; Miranda-Moreno, L. F.; Saunier, N. (2016): Are signalized intersections with cycle tracks safer? A case-control study based on automated surrogate safety analysis using video data. In: *Accident analysis and prevention* 86, S. 161–172
- ZIV Zweirad-Industrie-Verband: *Fahrrad- und E-Bike-Markt 2018*. Online verfügbar [www.ziv-zweirad.de](http://www.ziv-zweirad.de), zuletzt geprüft am 26.6.2019

#### ■ Verfasser

##### Mag. Tobias Panwinkler

panwinkler@bast.de  
tobias.panwinkler@tu-dortmund.de



Mag. Tobias Panwinkler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Referates Unfallstatistik, Unfallanalyse der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Er studierte Raumforschung und Raumordnung an den Geografischen Instituten der Universitäten Wien (AT) und Turku (FI). Derzeit promoviert er am Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsplanung der TU Dortmund, dieser Aufsatz ist Teil der kumulativen Dissertation.

##### Anschrift

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)  
Referat U2 – Unfallstatistik, Unfallanalyse  
Brüderstraße 53  
51427 Bergisch Gladbach

##### Prof. Dr.-Ing. Christian Holz-Rau

christian.holz-rau@tu-dortmund.de



Prof. Dr.-Ing. Christian Holz-Rau hat an der TU Berlin Planung und Betrieb im Verkehrswesen studiert, dort promoviert und habilitiert. Er ist seit 1998 Professor für Verkehrswesen und Verkehrsplanung an der Fakultät Raumplanung der TU Dortmund. Neben

Fragen der Verkehrssicherheit befasst er sich vor allem mit Ansätzen einer integrierten Verkehrsplanung und sozial und räumlich differenzierten Analysen des Verkehrsverhaltens.

##### Anschrift

TU Dortmund  
Fachgebiet Verkehrswesen und Verkehrsplanung  
Fakultät Raumplanung  
August-Schmidt-Straße 10  
44227 Dortmund

## **5.2 Paper 2: Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity**

Panwinkler, T., Holz-Rau, C., 2021. Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity. *Accident; analysis and prevention* 154, 106082. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106082>



Contents lists available at ScienceDirect

# Accident Analysis and Prevention

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/aap](http://www.elsevier.com/locate/aap)

## Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity

Tobias Panwinkler<sup>a,\*</sup>, Christian Holz-Rau<sup>b</sup><sup>a</sup> Federal Highway Research Institute (BASt), Bruederstr. 53, 51427, Bergisch Gladbach, Germany<sup>b</sup> TU Dortmund University, Faculty of Spatial Planning, Department of Transport Planning, August-Schmidt-Str. 10, 44227, Dortmund, Germany

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Pedelec  
Electric bicycle  
e-bike  
Single-vehicle accident  
Injury severity  
Ordered probit analysis

## ABSTRACT

Pedelecs (pedal electric cycles) have become increasingly popular in recent years. This increase may trigger many positive effects, but unfortunately it also results in an increase in accidents, especially single accidents, involving these vehicles. This investigation analyses 1738 free text descriptions of pedelec single accidents written by police officers on site. The accidents occurred in 2016 and 2017 in 14 federal German states. The aim is to evaluate whether pedelec single accidents have specific causes that have not yet been recorded in the official accident statistics. Results show that most cases can be assigned to categories addressing the user (60 %) or the road design (54 %, accidents can be assigned to several categories). With this dataset it is also possible to analyse the severity of injuries using ordered probit analysis. Of the nine categories where severe injuries are expected, most address the user. In addition, serious injuries are expected when problems are encountered on downhill slopes or involve technical faults. An additional ordered probit analysis with a second dataset, based on different sources but using the same categorisation, supports these results.

### 1. Introduction

#### 1.1. Initial situation

With annual growth rates of more than 39 % in the number of pedelecs (pedal electric cycle - bicycle with electric motor support) according to the ZIV (German Bicycle Industry Association), these bicycles are currently very popular in Germany (ZIV, 2020). However, Federal German Statistics (StBA, 2020) have already shown that the number of accidents involving a pedelec have also increased significantly, although they provide no details on the severity of pedelec accidents and influencing factors.

Pedelecs were previously considered as part of the group of bicycles when evaluating accident statistics. In German accident statistics, pedelecs have only been recorded as a separate group since 2013 (StBA, 2020). Therefore, most results are derived from analyses of the aggregated group “bicycle”. Hence, little detailed information about accidents with pedelecs has been available (Panwinkler and Holz-Rau, 2019). However, Haustein and Möller (2016) estimate that almost one third of pedelec users have “experienced at least one safety critical event that they believed would not have happened on a conventional bike”.

The first German study on pedelec accidents in Baden-Württemberg concluded that more than half of pedelec accidents were single accidents (Lawinger and Bastian, 2013; similarly for other regions: Hertach et al., 2018; ITF, 2018; Johansson and Fyhri, 2018; Papoutsi et al., 2014; Weber et al., 2014). Panwinkler and Holz-Rau (2019) showed that one major difference between accidents involving pedelecs and those involving conventional bicycles is that pedelecs are more often involved in single accidents and that users suffer more severe injuries. Uhr and Hertach (2017) confirm this finding and the need for more detailed research on pedelec single accidents. In addition, Schleinitz et al. (2014) showed that although the majority of critical situations arise in conflict with other road users, the majority of actual accidents are single accidents—despite the presumed high number of unreported cases.

Clearly there is a need to address this research gap and provide a comprehensive analysis of pedelec single accidents to promote safety work.

Most accident studies focusing on pedelecs are based on data that are designed for accidents with double-track motor vehicles, in particular passenger cars. Accidents with bicycles (including pedelecs), especially when no other road users are involved, are difficult to categorise with this systematic. For example, pedelec users who lose their balance and

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [panwinkler@bast.de](mailto:panwinkler@bast.de) (T. Panwinkler), [christian.holz-rau@tu-dortmund.de](mailto:christian.holz-rau@tu-dortmund.de) (C. Holz-Rau).<https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106082>

Received 11 November 2020; Received in revised form 27 January 2021; Accepted 7 March 2021

Available online 25 March 2021

0001-4575/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

fall off are only described as “driving accidents”. A more detailed description of why the driver lost control of the vehicle is only possible to a limited extent. Consequently, it is only possible to a limited extent to analyse factors that are decisive for severe accidents (Panwinkler and Holz-Rau, 2019). To describe the severity of the accident in more detail, new specific attributes are needed.

Hertach et al. (2018) tried to categorise new pedelec-specific indicators for the first time. However, this categorisation was based on a survey (partly online, partly on paper). It cannot be guaranteed that the test persons remember the details of the accident and even if this is the case, it cannot be guaranteed that they describe the process in sufficient detail or truthfully. The sample was representative, but several factors could not be integrated. First, the investigation did not include all seasons, although Panwinkler and Holz-Rau (2019) showed that pedelec accidents are not distributed equally over seasons. Also, it was not possible to take account of spatial differences within Switzerland. Finally, the age distribution of the test persons could not be considered when drawing the sample; however, Panwinkler and Holz-Rau (2019) showed that the average severity of pedelec accidents varies significantly with the age of the users.

It is therefore necessary to carry out a categorisation with a dataset that, if possible, represents the entire territory of a country over at least one whole year. In addition, the data analysed should be collected on site by trained personnel where participants are obliged to give truthful information when questioned.

UDV (German Insurers Accident Research) recently performed such a categorisation based on free text descriptions taken by the officers on site, although the focus was different, analysing accidents of the category “other cause” independently of the vehicle type (UDV, 2020). However, some specific bicycle categories were created and bicycle (including pedelec) accidents were analysed in one paragraph; no analyses of accident severity were carried out on the basis of these categories.

As authors (such as Fyhri et al., 2019) have argued, there is a lack of detailed information on the severity of pedelec accidents. If at all, the severity of accidents has only been divided into categories. Hertach et al. (2018) analysed the injury severity of pedelec single accidents estimating the probability of either having a serious injury or not. Holz-Rau and Scheiner (2010, 2009) multiplied injury severity by accident cost rates to obtain a more expressive, but still ordinal scaled result. It therefore seems desirable to carry out an analysis describing the severity of injury on a more differentiated scale. If possible, this should improve the inclusion of information available in the accident data compared to other (binary) statistical models.

These considerations led to the development of the research questions of this paper: What causes pedelec single accidents and which factors have an influence on the severity of the accident?

Therefore, the aim of this study is first to create new pedelec-specific categories that serve as a basis for further analysis. The second aim is to determine which of these categories significantly influences the severity of pedelec single accidents. The results should enable the development of measures that reduce the number and severity of pedelec single accidents.

To examine this problem, we use a mixed method approach. First, we perform a qualitative analysis with the raw data of pedelec accidents in Germany, i.e. the free text written by the police officer on site which describes the accident in his/her own words. This data is used to create new, pedelec-specific accident cause categories that have not been used in pedelec accident analysis so far. The second step is an analysis of the accident severity of pedelec single accidents and the influence of the new pedelec-specific accident cause categories on the severity. To this end, we build an ordered probit model. Finally, we perform both analyses with a second dataset to test the results.

## 1.2. Legal classification

According to the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI), a pedelec 25 (hereinafter referred to as P25) is a bicycle that supports pedalling with an electric motor up to a speed of 25 km / h. The electric motor may provide support with a rated continuous power of 250 W maximum. A traction aid, i.e. propulsion of the bicycle at the push of a button or by turning a handle and without pedalling, is only permitted up to a maximum speed of 6 km / h. From a legal standpoint, the P25 is classified as a bicycle in Germany so the same road safety regulations apply to its user (based on §1 (3) of the road traffic act (StVG, 2020), BMVI, 2017). Fig. 1 shows that for both P25 and conventional bicycles (hereinafter referred to as c-bikes) wearing a helmet is recommended but not obligatory, no driving or operating license is needed, insurance is also only recommended and these vehicles do not need license plates. This distinguishes the P25 from the pedelec 45 (P45 or “speed pedelec”) as well as from e-bikes. The latter two are not considered as bicycles but as motor vehicles (BMVI, 2017). Fig. 1 also shows the categorisation and regulations for P45 s and e-bikes in the right two columns. The electric motor of a P45 supports the user when pedalling to a speed of 45 km / h. Without pedalling, the motor drives the vehicle up to a speed of 20 km / h. An e-bike does not necessarily have any pedals as the motor may also drive the vehicle without pedalling but instead turning a handle. Users of both these vehicles have to wear appropriate helmets, need the corresponding driving and operating licenses, must be insured and must attach an insurance plate to the vehicle (BMVI, 2017). Another consequence is that these vehicles are not allowed to use cycle lanes (with some exceptions for e-bikes). In summary, P45 s and e-bikes are considered to be motor vehicles rather than bicycles and are thus subject to different legal obligations. (BMVI, 2017). As this study deals with a new type of bicycle and its consequences for cycle traffic, the following analysis is based on P25 s only.

## 2. Literature review of accidents involving pedelecs

The following summary of available research results on accidents involving P25 s concentrates firstly on aspects analysed using categories of official German statistics (Subsection 2.1) and then presents research results that identify further causes of accidents that cannot be found in official German statistics but could function as factors for our analysis (Subsection 2.2). Key findings are summarised in Table 1.

### 2.1. Analyses using official German statistics

For Germany, Panwinkler and Holz-Rau (2019) conducted the first comprehensive study on accidents involving P25 s and differences compared to accidents involving c-bikes. They used all data available from the official statistics, including accident location, time of accident, course of the accident, accident circumstances, road users involved and the police’s assessment of who was primarily responsible and the accident causes. The descriptive analysis showed that P25 accidents are more severe than accidents involving a c-bike. The absolute number of P25 accidents (so far) is significantly lower than that of c-bike accidents. With a relatively constant number of bicycle accidents overall, an increase in P25 participation leads to a smaller decrease in serious bicycle accidents. Furthermore, they defined three focal areas:

#### 2.1.1. Rural accidents

For both vehicles, accidents in urban areas clearly dominate, but the proportion of accidents in rural areas is much higher for P25 s (similar conclusions reached by Useche et al., 2018; Schreck and Pöppel-Decker, 2014; Schepers et al., 2011). In rural areas, bicycle accidents are more serious and the proportion of fatalities is also particularly highlighted by UDV (2017).

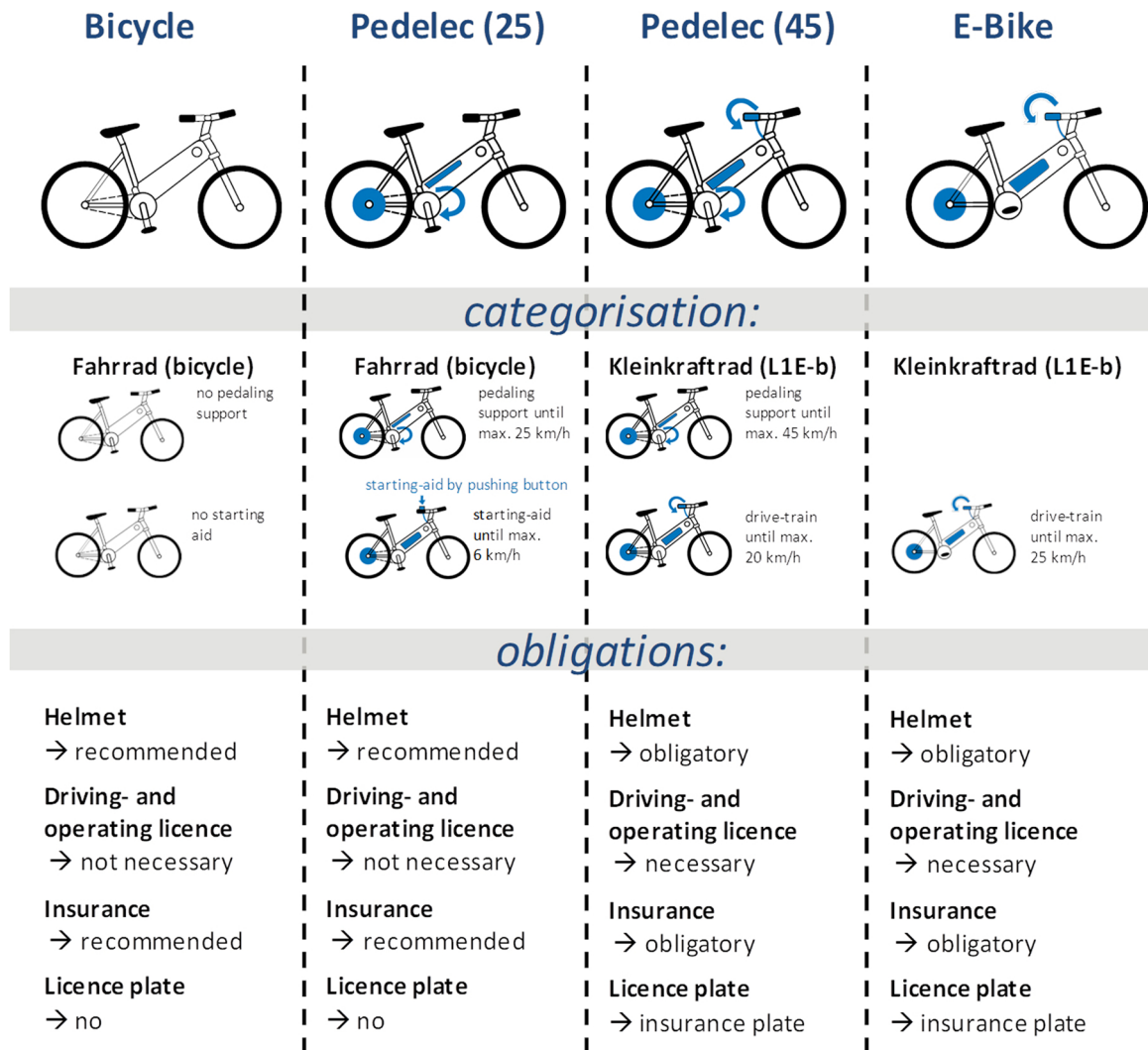


Fig. 1. Differentiation between conventional bicycles, pedelec 25 s, pedelec 45 s and e-bikes; (source: BMVI, 2017; graphics (partly adapted): Aktion Gib Acht im Verkehr, 2015).

2.1.2. Single accidents

P25 accidents are more often single accidents (see also Weiss et al., 2018; ITF, 2018; Boele-Vos et al., 2017; UDV, 2017; Twisk et al., 2017a; Kováčsová et al., 2016; Vlakveld et al., 2015; Otte et al., 2014; Schepers et al., 2014) and more severe than c-bike single accidents (see also: Hertach et al., 2018; Weber et al., 2014). The in-depth analysis showed that single accidents with c-bikes and P25 s occur more frequently in rural areas, at night and on weekends, the most frequent causes being overly fast speeds (especially P25 s) and the influence of alcohol (especially c-bikes).

2.1.3. Accidents at intersections

Overall, c-bike accidents occur more often at intersections (see also UDV, 2017; Weber et al., 2014; Schepers et al., 2011). P25 accidents happen more often at intersections without traffic lights than c-bike accidents. Both groups less frequently bear primary responsibility for accidents at intersections with (operational) traffic lights. In accidents at intersections, passenger cars are the most frequent counterpart for both, the severity of accident is highest when the counterpart is a heavy goods vehicle (see also Pokorný et al., 2018; Richter and Sachs, 2017; Schreck, 2016).

2.1.4. Elderly users

Demographic analysis of the injured road users introduced a fourth

focus: on average, injured P25 users are much older than injured c-bike users. The majority of injured P25 users are at least 70 years old, whereas only a few are 30 or younger (see also: UDV, 2017; Schepers et al., 2014; Otte et al., 2014; Weber et al., 2014; Lawinger and Bastian, 2013). The differences between the age groups of injured c-bike users are much smaller. For fatalities, the difference is even more remarkable: 78 % of P25 users killed are aged 70 and older, of those killed on a c-bike only 43 % are 70 or older, and of all victims killed in road traffic only 26 % are 70 or older. Elderly P25 users have more single accidents than elderly c-bike users.

2.2. Analysis using further categories

The work of Panwinkler and Holz-Rau (2019) showed that official statistics only partially reflect certain bicycle-specific aspects (e.g. falls). Hence it is necessary to analyse P25 accidents in greater depth with more detailed and pedelec-specific categories. The following summary of available research results therefore focuses on aspects that are not included in standard German traffic accident notifications but could be considered for our analysis.

2.2.1. Categories addressing the pedelec user

**Difficulties in choosing the speed.** Official German statistics categorise speed as an accident cause when “exceeding the speed limit”

**Table 1**  
Literature review: key findings.

Key findings with existing categories in: Panwinkler and Holz-Rau, 2019	Similar findings – Example sources
Bicycle accidents in urban areas clearly dominate, but proportion of accidents in rural areas is much higher for P25 s (19 %) than for c-bikes (9 %)	Useche et al., 2018; Schreck and Pöppel-Decker, 2014; Schepers et al., 2011
P25 accidents more often single accidents (28 %) than c-bike accidents (18 %) and P25 single accidents more severe (413 killed/severely injured P25 users per 1000 accidents with injured) than c-bike single accidents (306)	Weiss et al., 2018; ITF, 2018; Boele-Vos et al., 2017; UDV, 2017; Twisk et al., 2017a; Kováčsová et al., 2016; Vlakveld et al., 2015; Otte et al., 2014; Schepers et al., 2014; Hertach et al., 2018; Weber et al., 2014
C-bike accidents more often at intersections (53 %) than P25 (47 %)	UDV, 2017; Weber et al., 2014; Schepers et al., 2011
On average, injured P25 users are much older than injured c-bike users (78 % of killed P25 users were 70 and older compared to 43 % of killed c-bike users that were 70 and older)	UDV, 2017; Schepers et al., 2014; Otte et al., 2014; Weber et al., 2014; Lawinger and Bastian, 2013
<b>Additional aspects in literature</b>	<b>Example sources</b>
<i>Speed</i>	
P25 fall down because they lose their balance (U-turn, (dis-)mounting)	Vlakveld et al., 2015; Fyhri et al., 2019; Hertach et al., 2018; UDV, 2017; Kováčsová et al., 2016; ITF, 2018; Twisk et al., 2017b; Hausteina and Möller, 2016; Schepers et al., 2018; Kruijjer et al., 2012; Uhr and Hertach, 2017; Hausteina and Möller, 2016; Johnson and Rose, 2014
Difficulties in choosing the speed	
<i>Driving fitness</i>	
Physical effort	UDV, 2017; Twisk et al., 2017b
Mental workload/distraction	UDV, 2017; Vlakveld et al., 2015; Weiss et al., 2018; Uhr and Hertach, 2017; Huertas-Leyva et al., 2018
Lack of experience	Fyhri et al., 2019; Johansson and Fyhri, 2018
<i>Vehicle</i>	
Difficulties with brakes or braking	Huertas-Leyva et al., 2018; Hausteina and Möller, 2016; Lawinger and Bastian, 2013
Technical problems with motor	Hertach et al., 2018; Hausteina and Möller, 2016; Lawinger and Bastian, 2013; Johnson and Rose, 2014
<i>Road design</i>	
Cycle lane design	KfV, 2019; UDV, 2017; ASTRA, 2017; Johnson and Rose, 2015; Lawinger and Bastian, 2013
Problems with obstacles	Hertach et al., 2018; Papoutsis et al., 2014; Hertach et al., 2018; Lawinger and Bastian, 2013; Huertas-Leyva et al., 2018; ASTRA, 2017; UDV, 2017
Problems with terrain	
<i>Road conditions</i>	
Slippery road (P25 specific)	Hertach et al., 2018; Hausteina and Möller, 2016
Poor road conditions (P25 specific)	Johnson and Rose, 2015; Hertach et al., 2018

or “in other cases” (StBA, 2020).

*Too slow:* Vlakveld et al. (2015) mentioned that P25 accidents also happen when users are too slow on their P25 s (for example when trying to make a U-turn) and fall because they lose their balance (also Fyhri et al., 2019; Hertach et al., 2018; UDV, 2017; Kováčsová et al., 2016). A similar problem arises when (dis-)mounting the P25, a moment when many users also fall because they lose their balance (due to the low speed) (ITF, 2018). Twisk et al. (2017b) showed that especially the phase from standing still until the moment where the motor provides support is problematic for balance, also because of the greater weight of the P25 (Hausteina and Möller, 2016). Schepers et al. (2018) reported that 15 % of P25 users fall while (dis-)mounting (similarly Kruijjer et al., 2012).

*Too fast:* Uhr and Hertach (2017) reported that 15 % of P25 single accidents happen because users are too fast (similarly Hausteina and

Møller, 2016; Johnson and Rose, 2014). In this context it must also be noted that even though speed limits are not obligatory for non-motorised traffic (including P25 s) in Germany, P25 s may be too fast as they also have to adapt their speed to the situation (according to § 1 and § 3 StVO, 2013). Finally, Johnson and Rose (2015) showed that speed is often a trigger for other causes such as falls due to slippery surface conditions.

**Driving fitness.** Official statistics categorise driving fitness as “influence of alcohol/drugs/narcotics”, “overfatigue” or “other physical or mental disabilities”. Lawinger and Bastian (2013) drew attention to the fact that accidents involving older users are often categorised as due to “physical or mental disabilities” when those involved are actually cognitively overwhelmed but not disabled. Jelijs et al. (2020) showed that physical impairment of P25 riders is not per se a cause of accidents as they demonstrate that riding a P25 is possible for visually impaired people without marked adaptations.

*Physical effort:* Operating a P25 is often viewed as not involving much physical effort. The actual physical effort required to move and balance the vehicle is therefore frequently underestimated, especially by older and disabled users (UDV, 2017). Twisk et al. (2017b) showed that the electric motor does not compensate for physical limitations in the starting phase (from feet on the earth to balancing) but only in the second phase of accelerating to achieve harmonised cycling.

*Mental workload/distraction:* Even if the speed seems to be adapted to the situation, P25 riders often achieve higher speeds than they would have with a c-bike and have problems with control (UDV, 2017) due to the higher mental workload (Vlakveld et al., 2015). Especially elderly or disabled users are often cognitively overstrained, causing problems for instance with speed-braking relations (Weiss et al., 2018). Uhr and Hertach (2017) showed that 21 % of all P25 single accidents in Switzerland are caused by distraction or inattention. Huertas-Leyva et al. (2018) mentioned: “*Distracting activities, such as talking on cell phone may also be particularly challenging for e-cyclists because of increased cognitive load, competing coordination tasks, and interference with visual scanning of the surroundings*” (similar at Du et al., 2013).

*Experience:* Lack of experience is cited as a risk, as many users are currently new to this new type of vehicle and underestimate the difference in riding style compared to c-bikes (Fyhri et al., 2019; Johansson and Fyhri, 2018). *Alcohol:* The influence of alcohol is listed as an accident cause in the official statistics. Still, Huppertz and Kern (2014) pointed out that the limit that applies to bicycles (and thus also to P25 s) is different (namely 1.6 ‰) to that for motor vehicles. Many studies, such as Uhr and Hertach (2017), and Papoutsis et al. (2014) showed that the influence of alcohol is an important factor for P25 accidents.

### 2.2.2. Categories addressing the pedelec (the vehicle) Brakes

Because of the higher speeds, P25 s have a higher probability of unplanned braking manoeuvres than c-bikes and they have to brake harder, which could lead to a loss of balance/control. In addition, P25 s are more often equipped with high-quality (disc) brakes whose stronger braking power is often underestimated (Huertas-Leyva et al., 2018; Hausteina and Möller, 2016). Lawinger and Bastian (2013) showed that incorrect or excessive braking in connection with the unfamiliar braking behaviour of pedelecs particularly often leads to accidents.

**Motor.** The majority of the currently available P25 s are technically mature. Nevertheless, technical faults are reported, such as unexpected reactions during vehicle operation (Hertach et al., 2018). Also, Hausteina and Möller (2016) highlighted that crash situations commonly involve technical problems, such as the unexpected start of the motor or the motor continuing to run even after pedalling ceased (see also Lawinger and Bastian, 2013). Johnson and Rose (2014) reported on unintentional throttling due to problems and on balancing problems due to power surges.

### 2.2.3. Categories addressing road design

**Road design.** P25 s are on average slightly faster than conventional

bikes, but KfV (Austrian Road Safety Board), UDV and ASTRA (Swiss Federal Roads Office) highlight that cycle paths are actually designed for c-bikes (KfV, 2019; UDV, 2017; ASTRA, 2017). Johnson and Rose (2015) reported that the horizontal and vertical curve radii of bicycle lanes may therefore be too narrow and lead to crashes. Lawinger and Bastian (2013) confirmed this, showing that overly high speeds lead to more single accidents when the P25 s take the curve too sharply. ASTRA (2017) mentioned that big vehicles for transporting children or goods are more common with P25 s than with c-bikes because the motor support makes it easier to transport the additional weight. But many cycle paths do not offer the space for such vehicles.

**Obstacles.** Many objects in road space prove to be specific obstacles for bicycles. For pedelecs this can cause particular problems. Several studies showed that a significant percentage of severe P25 single accidents are caused by being caught in or skidding on a tram rail or a sink/gully (Hertach et al., 2018; Papoutsis et al., 2014). Hertach et al. (2018) and Lawinger and Bastian (2013) showed that crossing thresholds, in particular conflict with kerbs, causes a significant share of P25 single accidents. Finally, Huertas-Leyva et al. (2018) highlighted that evasive manoeuvres are an especial problem with P25 s as a lot of P25 users fall when they try to avoid an obstacle.

**Terrain.** Thanks to the motor support, P25 can also keep their speed constant uphill and accelerate to high speeds even faster downhill. This can lead to accidents in combination with other factors such as riding too fast or braking too hard (ASTRA, 2017; UDV, 2017).

2.2.4. Categories addressing the road conditions

Johnson and Rose (2014) showed that “for one in five [P25] crashes, road/path surface was a contributing crash factor”. Further distinctions can be made:

**Slippery road conditions** (such as icy, wet, dirty, oily etc.) causing sliding or skidding (Hertach et al., 2018; Haustein and Møller, 2016);

**Poor road conditions** such as unevenness, potholes, cracks, tree roots rising/cracking the surface, different surface materials or poor gravel (Johnson and Rose, 2015; Hertach et al., 2018). Some of these are already considered in the official German statistics but others seem to be specific to P25 s or at least to bicycles and not considered (in detail).

3. Methodology and data

We use two datasets to carry out the analysis. Dataset one is a self-produced dataset generated by categorising the free text accident description written by the police officer on site. Dataset two is generated by categorising data from the GIDAS (German In-Depth Accident Study) database (collected by the GIDAS research team on site, independently of the data recording by the police) with the categories found in dataset one. Accident severity is analysed by computing ordered probit models.

3.1. Dataset one – TXT dataset

3.1.1. Sampling

We had the opportunity to analyse the raw data of P25 accidents in Germany, including the free text written by the police officer on site, describing the accident in his/her own words. The texts were provided anonymously by the federal states, so that it is not possible to draw conclusions about an individual person. Furthermore, it is not permitted to match this dataset with other data. However, the dataset also contains a large part of the official accident data, allowing basic analysis and pre-selections. Data were requested from the police of the 16 federal states. In total, data from 14 federal states were provided (North Rhine-Westphalia and Bremen could not provide data for technical reasons) for the years 2016 and 2017. The dataset contains 6253 accidents involving one or two road users where at least one of them was a P25 (accidents with three or more road users involved are only included if the P25 was primarily/secondary responsible).

Table 2 shows the distribution of accidents described with free text according to three parameters: location, type of accident and number of road users involved (block B). These three parameters can also be found in official German accident statistics. For comparison, all accidents involving a pedelec in 2016 and 2017 were filtered from the official statistics and were also displayed by those three parameters (block A). A comparison (block C) of the two distributions shows that the proportional distributions differ by only up to a maximum of two percentage points. Thus, the TXT dataset can be considered as representative. By definition, single accidents can only be “driving accidents” or “other accidents”. But, since not all driving accidents or other accidents necessarily have to be a single accident, all P25 single accidents

**Table 2**  
Accidents with P25 by location, type of accident and number of road users involved. Comparison of official statistics (data: BASt) and TXT dataset.

		Block A: Official Statistics				Block B: special request (TXT dataset)		Block C: official statistics vs. TXT dataset
		Accidents with personal injury involving a ...				Accidents involving a ...		
		convent. bicycle	pedelec 25	pedelec 25	pedelec 25	pedelec 25	pedelec 25	
		total	share	total	share	total	share	difference [percentage points]
year	2016-2017	152,861	100 %	9,192	100 %	6,253	100 %	
accident location	urban roads	139,779	91 %	7,438	81 %	5,051	81 %	0
	rural roads	13,082	9 %	1,754	19 %	1,202	19 %	0
	0: No information	0	0%	0	0%	150	2%	-2
	1: Driving accident	20,303	13 %	1,862	20 %	1,174	19 %	1
	2: Ac. caused by turning off the road	26,632	17%	1,211	13 %	776	12%	1
	3: Ac. caused by turning into/crossing the road	53,938	35 %	2,988	33%	1,992	32%	1
type of accident (ac)	4: Ac. caused by conflict w/ pedestrian crossing rd.	3,232	2%	155	2%	94	2%	0
	5: Ac. involving stationary vehicles	8,624	6 %	347	4%	214	3%	0
	6: Ac. betw. vehicles moving along carriageway	18,362	12%	1,144	12%	811	13 %	-1
	7: other type of accident	21,770	14 %	1,485	16 %	1,042	17%	-1
number of road users involved	1: single accident	28,221	18 %	2,634	29 %	1,738	28 %	1
	2 road users involved	119,980	78 %	6,351	69 %	4,515	72 %	
	3 or more road users involved	4,660	3%	207	2%	*	72 %	-1*

\* police classify the road users involved according to their degree of responsibility for the accident. TXT dataset includes only accidents where police classify a P25 as bearing primary or secondary responsibility.

**Table 3**  
Systematic of the new categories.

category (hierarchy)	explanation
<b>U: Categories addressing the user</b>	
U1: difficulties in choosing the speed	
U1a: inappropriate (too fast) speed	including crashes when too fast in curve
U1b: losing balance because speed too slow	
U1b1: problems while (dis-)mounting, starting, stopping or coming to a standstill	users falling when trying to get on/off the bike or accelerating/stopping (not if due to braking)
U1b2: falling when trying to U-Turn	(not if going too fast)
U1c: bicycle yawing	movement around yaw axis (horizontal- or z-axis going perpendicular from top to bottom) - here used as a wrong choice of speed, for other aspects it could also be categorised as a technical problem
U2: user overstrain (mental or physical)	
U2a: Attention not directed to road traffic	
U2a1: inattention and mental overload	user not focusing on road traffic or not able to observe all aspects of road traffic (including hand off when signalling turn)
U2a2: distraction by other road users	also non-motorised road users, especially when riding in c-bike/P25 groups and during overtaking using P25 for the first time, test ride, rented P25, explicitly noted that user was inexperienced
U2b: inexperienced users	
U2c: operating mistakes	
U2c1: veering off lane and thereby falling/crashing	not when trying to go onto lane again and thereby crashing at kerb (-> conflict with kerbs)
U2c2: problems steering the pedelec	when choosing wrong curve radius, snatching handlebar or having hand(s) off handlebar (not if hand off to signal turn)
U2c3: user slips off pedal	
U2c4: losing stability due to object in spokes	only objects that were detached from bike (plastic bag on handlebar, bicycle bag, bicycle lock) or from body (shoes)
U2c5: other user mistakes	losing balance without mentioned reason, "other" operating mistake
U2d: sudden illness	user suddenly becomes ill (e.g. heart attack, dizziness) or weak during use, resulting in inability to control P25 - regardless of whether there were previous illnesses
U3: indication of alcohol	indication of alcohol consumption by the user
<b>P: Categories addressing the pedelec</b>	
P1: problems with brakes or braking	braking too early/too late and/or too hard/too soft; also includes accidents due to brakes not working properly
P2: technical fault	including all other technical faults, such as engine problems
<b>D: Categories addressing the road design</b>	
D1: conflict with obstacle in road	
D1a: conflict with kerbs	when going up/down, touching kerbs; regular, dropped with/without channel
D1b: conflict with rails / gully	user riding into rail/gully with tyre(s)
D2: conflict with obstacle on road	hit/touched obstacle (including construction site) or fell when avoiding obstacle
D3: terrain	
D3a: problems with downhill slope	
D3b: problems with uphill slope	
<b>R: Categories addressing the road conditions</b>	
R1: problems due to condition of road construction	road was uneven, with potholes, cracks, root heave, etc.
R2: problems due to condition of road surface	surface was slippery (wet, icy, gravel, dirty, oily, etc.)

(hereinafter referred to as PSA) were selected from the dataset (total 1738 or 28 % of all cases in the dataset). These PSA were also evaluated by accident type, showing that the majority were driving accidents. However, 24 PSA were assigned to categories 2–6, which by definition is not actually possible as they involve conflicts with other vehicles. They, as well as the 39 accidents of type 0 were therefore excluded from the dataset, leaving 1675 PSA in the dataset (1063 driving accidents and 612 other - not to be confused with the accident types from Table 2 block B, which shows all accidents, not only single-vehicle accidents).

### 3.1.2. Category identification and categorisation

The new categories were defined on the basis of the breakdown of the literature analysis (Subsection 2.2) and are thus intended to cover all pedelec-specific aspects of accidents. After the screening, these categories were evaluated and further subdivided or summarised as required. Based on the literature analysis, the new variables can be grouped into four major themes: categories addressing the user (U) (the term "user" is used to describe the actual driver in the two data sets), the vehicle/P25 (P), the road design (D) and the road conditions (R). As in the literature analysis, these themes can be divided into groups and subgroups and sometimes even sub-subgroups (see overview in Table 3). The resulting categories were again checked for plausibility and completeness. Subsequently, all PSA of the dataset were assigned to one or more categories. Therefore, two researchers carried out a complete

categorisation of all cases independently of each other (see acknowledgements). The two categorisations were then matched and deviations (10.4 % of all cases) were discussed together so that one categorisation of the data resulted.

In contrast to the official definition, the new definitions are interpreted more broadly. Although even in the official statistics, presumptions of the police officers would suffice as reasons for some variables (e.g. causes of the accident), in practice, only officially verifiable evidence is usually categorised here. Obvious connections are often not considered. In contrast, the classification in the new categories was rather based on the long-term expertise of the two researchers regarding relevant accident factors.

An example of this is the category "indication of alcohol". In the official statistics, "influence of alcohol" is a category of the variable "cause of accident". Causes of accidents in the official accident statistics can be entered by the respective police officer on the basis of assumptions and are validated by the state statistical offices. In fact, a presumption by the police officer would be sufficient to tick this category. However, an evaluation of the texts and the variable "cause of accident: alcohol" showed that in practice, this is usually only ticked if a breath/blood alcohol test is carried out and is positive. However, tests are not carried out for every suspicion (for example, if the suspect is bleeding heavily or is unconscious). Therefore, we created a new category: U3: indication of alcohol. In this category, we also included accidents in

which the influence of alcohol was explicitly noted but the official cause of the accident was not ticked. In total, we categorised 182 PSA in the category U3: influence of alcohol, whereas only 154 of them were categorised as cause of accident – influence of alcohol. We found that most of the additional accidents were serious or fatal. As an example, the following excerpts from two accidents which were not categorised in the official statistics in the category "cause of accident - influence of alcohol", but were categorised in the new category "U3: indication of alcohol", are given:

„[...] The smell of alcohol was noticeable in the ambulance, but since the cyclist was not responsive, a breath alcohol test was not possible" (Accident number 12151, own translation)

"[...] Witnesses W. and H. found the P25 user lying on the road, in a left turn behind the railway underpass. He was trapped under his P25 and was freed and turned over by the witnesses. [...] The witnesses carried out first aid measures. During reanimation, the P25 user smelt of alcohol. The user died at the scene of the accident [...]" (Accident number 16194, own translation)

The themes, categories, subcategories and sub-subcategories are structured hierarchically. This means that once an accident is assigned to a sub-subcategory, it is also assigned to the subcategory above it, and so on. It is therefore sufficient for an accident to be assigned to one sub-subcategory for it to also be assigned to the subcategory above it. The accident does not have to be assigned to all sub-subcategories to be assigned to the subcategory above it. The new categories are exclusively yes/no (1/0) categories. Accidents can be categorised to multiple categories on different levels. If an accident could not be assigned to any category at all, it was categorised as "X: unknown". Since the assignment of an accident to a sub-subcategory applies to all levels above it, it is permissible to integrate categories of different levels in the regression analysis. However, multiple entries are not allowed, that is, if category U2 is already used in the regression model, subcategories U2a and U2b may not be used, but subcategories U3a and U3b may be used (provided, of course, that U3 is not used). Not all categories and subcategories are further subdivided if not necessary.

### 3.2. Dataset two – GIDAS data

#### 3.2.1. Sampling

GIDAS is a project of the German Federal Highway Research Institute (BAST) and the Research Association for Automotive Technology (FAT). Approximately 2000 real traffic accidents per year are recorded, reconstructed and simulated separately by a sampling procedure to represent all traffic accidents within Germany. GIDAS collects traffic accidents involving personal injury within two regions: the greater Hanover region and the Dresden region. A random sample is drawn from all accidents reported to the police in these regions. The GIDAS survey team is sent to the selected accidents. In parallel and independently of the police, it collects a wide range of accident variables on site and also later on in laboratories. Each accident gets a file with up to 3500 parameters and approximately 150 systematically produced images, which are compiled anonymously. For this purpose, information is obtained at various levels: a description of the accident sequence including sketches; characteristics of the persons involved comprising medical data and the technical data of their vehicles (GIDAS, 2016). As of 27 August 2020, GIDAS included 72 PSA that form our dataset two.

#### 3.2.2. Data categorisation

The 72 PSA from GIDAS were categorised according to the same criteria used for the TXT dataset. This resulted in the GIDAS dataset having the same new categories as the TXT dataset. Existing GIDAS categories, a free text description by the GIDAS accident recording team, reconstructions and image documentation of the accidents were used to allocate the accidents to the newly created categories. The GIDAS data

also include a large proportion of the data from official accident statistics. These were not used to assign the GIDAS accidents to the new categories in order to ensure that the two datasets (TXT and GIDAS datasets) were produced from different information. In addition to the new categories, the TXT dataset was also enriched with some variables from official statistics (e.g. location, time of accident, type of accident, characteristics of the accident site, etc.). These were also added to the GIDAS dataset from official statistics.

### 3.3. Data analysis / ordered probit modelling

The aim of this study is to estimate the relationship between accident severity and several independent explanatory variables. The classical method for this is statistical regression (Auer and Rottmann, 2012). This requires a dependent variable that is scaled metrically. For our analysis, the data on injury severity are available as an ordinal scaled variable with the three possible categories slightly injured, seriously injured or fatally injured (Schepers, 1999). Therefore, ordered regression models are necessary to treat the categorial variation of the variables. Two types of these models exist: ordered probit (OP) models and ordered logit (OL) models (if the dependent variable is ordered), according to the statistical errors distribution (Dabbour et al., 2019; Garrido et al., 2014). Both formulations give very similar results. "The OP model is especially appropriate to model injury severity because, besides identifying statistically significant relationships between explanatory variables and a dependent variable, it also discerns unequal differences between ordinal classes in the dependent variable" (Duncan et al., 1998 in Garrido et al., 2014). The OP model assumes normality. It does not suffer from the estimation difficulties of the OL models (Jalayer et al., 2018; Yu et al., 2020). Therefore, the OP model is used in our analysis. The concept of OP to analyse accident or injury severity has already been demonstrated by Aitchison and Silvey (1957) and McKelvey and Zavoina (1975) and is currently applied by many authors (e.g. Ghasemzadeh and Ahmed, 2019; Tjahjono et al., 2019; Garrido et al., 2014; Zhang et al., 2011; Kockelman and Kweon, 2002; Quddus et al., 2002). They all used a regular OP to analyse accident severity focusing on different vehicle types.

The ordered probit model is based on the idea that a continuous variable  $Y^*$  (here: severity of injury) exists and can be traced back to exogenous variables similar to the classical regression model. The difficulty arises from the fact that this (latent) variable  $Y^*$  is not observable or directly measurable. Observable, however, is an ordinal scaled variable  $Y$  (here: type of injury with the three characteristics "slightly injured", "seriously injured", "fatally injured"). It is therefore assumed that the observed variable is connected via threshold values with the constant, latent variable  $Y^*$  which is of particular interest (threshold value measurement relation). It is assumed that the actually observed variable  $Y$  always takes on a certain form (here: slightly injured, seriously injured, fatally injured) if the unobserved variable  $Y^*$  exceeds a certain threshold value  $\tau_i$  and falls below the following threshold value  $\tau_{i+1}$  (here: a P25 user involved in an accident is classified as seriously injured if the severity of the injury was so great that she/he had to stay in hospital but was not so great that it led to death) (Schepers, 1999).

According to Zhang et al. (2011), we assume that:

$Y$  represents the injury severity level. We then introduce the latent variable  $Y^*$  and define it:

$$Y^* = X \times \beta + \varepsilon$$

$X$  represents the vector containing the full set values of explanatory variables

$\beta$  represents the vector of coefficients associated with the explanatory variables

$\varepsilon$  represents a random error term following standard normal distribution

The value of  $Y$  can be determined as:

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{if } -\infty < Y^* \leq \tau_1 \\ j & \text{if } \tau_{j-1} < Y^* \leq \tau_j \\ J & \text{if } \tau_{J-1} < Y^* \end{cases}$$

or for our model:

$$Y = \begin{cases} \text{slightly inj.} & \text{if } -\infty < Y^* \leq \tau_1 \\ \text{seriously inj.} & \text{if } \tau_1 < Y^* \leq \tau_2 \\ \text{fatally inj.} & \text{if } \tau_2 < Y^* \end{cases}$$

J represents the number of injury severity levels (in our case 3)

$\tau_j$  represents the threshold parameter to be estimated for each level (Sources of formulas and descriptions: Zhang et al., 2011)

The parameters of the regression equation and the threshold values can be estimated using the maximum likelihood method, assuming normally distributed errors. However, two restrictions are necessary for the estimation: the position parameter restriction  $\tau_1 = 0$  and the scale restriction  $\sigma^2 = 1$ . The estimated parameters are then to be interpreted similarly to the parameters of a classical regression model (Schepers, 1999), meaning that the estimator of each variable can range from -1 to 1, with variables with a positive estimator suggesting higher severity of injury and variables with negative estimators suggesting lower severity of injury.

**Txt model.** For our TXT model, we used the injury severity of the P25 user as the dependent variable and our newly categorised variables from the text files as well as official variables (that were included in the text file) as the independent variables. We performed several analyses in order to find the best fitting model by adding the official variables one by one to the model. In the end, the following variables from the official data were chosen: accident location, season and characteristic of accident location. Most of the pedelec users were aged 50 or older. At first, the user's age was implemented as a dummy variable (i.e. separate variables for children, adults, young seniors (aged 65–74) and elderly (75 and older)) but tests showed that implementing the user's age as a metric variable gave better explanations than as an ordinal variable (i.e. age groups). Therefore, the variable age of user was implemented as a metric variable.

Similar coefficients would produce multicollinearity. In order to warrant meaningful model estimations, not only in terms of the statistical significance of the estimated coefficients but also to ensure reasonable magnitudes and signs for those coefficients, it is advisable to remove one of two similar variables (Garrido et al., 2014). Therefore, variables of the official statistics that are close to the new categories were excluded. This is especially the case for the new category "indication of alcohol" which is similar but not the same as the variable "influence of alcohol" in the official statistics (see Subsection 3.2.2). Hence, the latter was removed from the model as tests with both variables showed biased results.

## 4. Results

### 4.1. TXT dataset

The detailed analysis of the TXT data model included 1376 accidents because cases without injured persons and cases with no categorisations were excluded.

Table 4 shows the complete categorisation of the TXT dataset in block A, multiple answers were possible. The table is divided into two groups. The first group of lines shows the categories of official statistics, the second group of lines shows the newly created categories.

From the categories of the official statistics (group 1), it can be seen that almost three quarters of accidents included in the TXT dataset occurred on urban roads. Two thirds of all injured users were male and most accidents happened in Q3 (July-September). The characteristics of the accidents were rarely described, sideroads are most frequently mentioned (5 % of all P25 accidents). Fatally injured P25 users were mostly male (16 of 19). Ten accidents with fatal injuries happened in Q3. Although just a quarter of these PSA were on fatal rural roads, almost half of

the fatal accidents occurred there.

Of the newly created categories (group 2), the following were most frequently assigned: inappropriate (too fast) speed (18 %), inattention or mental overload (13 %), distraction by other users (9 %), veering off lane and thereby falling or crashing (9 %), indication of alcohol (13 %), problems with brakes or braking (14 %), conflict with kerbs (23 %), conflict with obstacles on road (14 %), problems due to downhill slope (15 %) and problems due to bad surface conditions (9 %). Of those accidents where the P25 user was fatally injured, seven users were classified as riding at inappropriate (too fast) speeds, five lost their balance because of overly slow speeds, six had problems with brakes or braking and eight users fell on a downhill slope. In addition, accident severity was also high with yawing, objects in the P25's spokes or when the user was inexperienced.

**Severity.** Table 5 shows the results of the ordered probit analysis. The estimator does not describe the probability that an accident will occur but estimates the probable severity of the injury caused by the accident.

On the basis of our model (Table 5), the reference accident (group 0) has an estimate of -1.43 which is below the  $\tau_1$  threshold of 0.00. Hence, the reference accident is expected to involve a P25 user being slightly injured. The model is significant (0.00), final 2 log-likelihood is at 1839 which could be stronger. Of the official categories, accidents on rural roads, at the beginning and end of the year (Q1 and Q4), in curves and driving accidents all give significant results with positive estimations meaning that high injury severity is expected. Age of user also has a significant result with a positive estimate, meaning the older the user the higher the severity expected if a PSA happens.

All new categories (block 4) are included as dummy variables (yes/no) in our model. The table only lists the estimates if the category was "yes" and sets it relative to "no" (answer "no" is not displayed and represents the reference case). Accidents assigned to a new category ("yes") with estimates that have positive values suggest a higher severity than the reference case ("no"), while those with estimates that have negative values suggest a lower severity than the reference case ("no"). For example, for an accident included in the new category "conflicts with kerbs" with "yes", the estimate value for "yes" is -0.18 in Table 5 (with a significance of 0.08, meaning it fulfils the 90 % significance level). Therefore, an accident due to a conflict with kerbs suggests a lower severity than the reference "no conflict with kerbs".

**Significant.** Nine of the new categories (group 4) produced significant results on a 90 % level (accepting that this has a greater degree of uncertainty than the usual confidence level of 95 %). Four of them were above the  $\tau_1$  threshold meaning that, compared to the other categories, the highest injury severity is expected for accidents due to objects in spokes (0.94), accidents on downhill slopes (0.65), bicycle yawing (0.26) and indication of alcohol (0.21). The other five were below the threshold, meaning that compared to the other categories, lower injury severity is expected in cases of problems steering the P25 (-0.34), problematic condition of road surface (-0.26), problems with brakes or braking (-0.20), conflicts with kerbs (-0.18) or inattention and mental overload (-0.18).

**Non-significant.** The other categories did not produce significant results on a 90 % level, but the following trends can be seen: high injury severity is expected for accidents when users are inexperienced (0.28), riding at inappropriate (too fast) speeds (0.24) and when the P25 has technical defects (0.17). Accidents caused by sudden illness (0.04) or veering off the lane (0.02) are still expected to be more severe than the reference accident but with estimates just slightly above the threshold. Low injury severity is expected when users slip off the pedal (-0.47), experience problematic road construction conditions (-0.26), are distracted by other users (-0.21), have problems on uphill slopes (-0.21), come into conflict with an obstacle on the road (-0.16) or rails/gullies (-0.11), make other user mistakes (-0.05) or lose their balance because their speed is overly slow (-0.03).

An interim conclusion can be drawn that high injury severity is

**Table 4**  
Descriptive analysis of TXT dataset and GIDAS dataset.

	block A: TXT dataset						block B: GIDAS dataset							
	P25 single accidents			injury severity of pedelec user			P25 single accidents			injury severity of pedelec user				
	number	share	severity	slight	serious	fatal	severity	slight	serious	fatal	severity	slight	serious	fatal
group 1: characteristics from official statistics	accident location	381	28%	203	169	9	467	4	6%	2	1	1	500	
	sex	822	60%	496	310	16	397	48	67%	29	18	1	396	
	acc type	884	64%	510	359	15	423	43	60%	26	17	0	395	
	season	quartal 1	95	7%	47	1	505	9	13%	7	2	0	222	
		quartal 2	468	34%	277	187	4	408	24	33%	17	6	1	292
		quartal 3	591	43%	384	197	10	350	23	32%	13	10	0	435
		quartal 4	222	16%	121	97	4	455	16	22%	11	5	0	313
	characteristic of accident location	intersection	32	2%	25	7	0	219	6	8%	5	1	0	167
		sideroad	74	5%	42	31	1	432	13	18%	10	3	0	231
		slip road	33	2%	22	11	0	333	4	6%	4	0	0	0
curve		55	4%	24	28	3	564	9	13%	5	4	0	444	
group 2: new categories	roundabout	8	1%	6	2	0	250	1	1%	0	0	0	0	
	inappropriate (too fast) speed	1376	100%	829	528	19	398	72	100%	48	23	1	333	
	losing balance because speed too slow	241	18%	128	106	7	469	22	31%	12	10	0	455	
	bicycle yawing	78	6%	39	34	5	500	12	17%	8	4	0	333	
	inattention and mental overload	79	6%	38	38	3	519	5	7%	1	4	0	800	
	distraction by other users	175	13%	114	60	1	349	33	46%	25	8	0	242	
	inexperienced users	127	9%	85	39	3	331	17	24%	13	3	1	235	
	veering off lane and thereby crashing	44	3%	20	22	2	545	5	7%	3	2	0	400	
	problems steering the pedelec	123	9%	68	52	3	447	5	7%	4	0	1	200	
	user slips off pedal	64	5%	43	19	2	328	9	13%	6	3	0	333	
categories addressing the road conditions	losing stability due to object in spokes	11	1%	8	3	0	273	1	1%	1	0	0	0	
	other user mistakes	11	1%	3	7	1	727	2	3%	1	1	0	500	
	sudden illness	37	3%	21	16	0	432	4	6%	4	0	0	0	
	indication of alcohol	42	3%	24	17	1	429	5	7%	4	0	1	200	
	sum including multiple categorisations	182	13%	102	79	1	440	15	21%	6	9	0	600	
	sum of cases	1214	.	693	492	29	.	135	.	88	44	3	.	
	problems with brakes or braking	827	60%	499	315	13	397	64	89%	40	23	1	375	
	technical fault	186	14%	114	66	6	387	8	11%	5	3	0	375	
	sum including multiple categorisations	26	2%	14	12	0	462	2	3%	1	1	0	500	
	sum of cases	212	.	128	78	6	.	10	.	6	4	0	.	
categories addressing the road design	sum of cases	210	15%	127	77	6	395	10	14%	6	4	0	400	
	conflict with kerbs	317	23%	205	111	1	353	15	21%	10	5	0	333	
	conflict with rails or gully	69	5%	46	22	1	333	12	17%	7	5	0	417	
	conflict with obstacle on road	189	14%	128	57	4	323	22	31%	18	4	0	182	
	problems with downhill slope	204	15%	78	118	8	618	13	18%	8	5	0	385	
	problems with uphill slope	31	2%	21	10	0	323	7	10%	4	3	0	429	
	sum including multiple categorisations	810	.	478	318	14	.	69	.	47	22	0	.	
	sum of cases	748	54%	446	290	12	404	53	74%	35	18	0	340	
	problems due to road conditions	44	3%	29	14	1	341	4	6%	2	2	0	500	
	problems due to surface conditions	130	9%	83	47	0	362	21	29%	15	6	0	286	
sum including multiple categorisations	sum of cases	174	.	112	61	1	.	25	.	17	8	0	.	
	sum of cases	166	12%	105	60	1	367	22	31%	15	7	0	318	
	sum of cases	2410	175%	1411	949	50	.	239	332%	158	78	3	.	
	sum of cases	1376	100%	829	528	19	398	72	100%	48	23	1	333	

**Table 5**  
Ordered probit analysis of TXT dataset.

blocks	category groups	categories	references	estimate	sig.
0: reference	reference accident	.	.	-1.43	
1: threshold	injury severity (1=slight, 2=serious; 3=fatal)	$\tau_1$ $\tau_2$	.	0.00 2.15	<b>0.00</b> <b>0.00</b>
2: metric variables	age of pedelec user	age in years	.	0.01	<b>0.00</b>
	accident location	rural	relative to urban	0.18	<b>0.03</b>
	sex of pedelec user	female	relative to male	0.08	0.28
	type of accident	driving accident	relative to other type	0.16	<b>0.04</b>
	season	quartal 1	relative to Q3	0.42	<b>0.00</b>
		quartal 2	relative to Q3	0.13	0.11
		quartal 4	relative to Q3	0.35	<b>0.00</b>
3: characteristics from official statistics	characteristic of accident location	intersection	yes, relative to no	-0.45	0.08
		sideroad	yes, relative to no	0.06	0.71
		slip road	yes, relative to no	0.02	0.93
		curve	yes, relative to no	0.45	<b>0.01</b>
	categories addressing the user	inappropriate (too fast) speed	yes, relative to no	0.24	0.12
		losing balance because speed too slow	yes, relative to no	-0.03	0.85
		bicycle yawing	yes, relative to no	0.26	<b>0.08</b>
		inattention and mental overload	yes, relative to no	-0.18	<b>0.09</b>
		distraction by other users	yes, relative to no	-0.21	0.11
		inexperienced user	yes, relative to no	0.28	0.15
		veering off lane and thereby falling/crashing	yes, relative to no	0.02	0.91
		problems steering the pedelec	yes, relative to no	-0.34	<b>0.06</b>
		user slips off pedal	yes, relative to no	-0.47	0.27
		losing stability due to object in spokes	yes, relative to no	0.94	<b>0.01</b>
		other user mistakes	yes, relative to no	-0.05	0.81
		sudden illness	yes, relative to no	0.04	0.84
		indication of alcohol	yes, relative to no	0.21	<b>0.08</b>
4: new categories	categories addressing the pedelec	problems with brakes or braking	yes, relative to no	-0.20	<b>0.08</b>
		technical fault	yes, relative to no	0.17	0.52
	categories addressing the road design	conflict with kerbs	yes, relative to no	-0.18	<b>0.08</b>
		conflict with rails or gully	yes, relative to no	-0.11	0.53
		conflict with obstacle on road	yes, relative to no	-0.16	0.14
		problems with downhill slope	yes, relative to no	0.65	<b>0.00</b>
		problems with uphill slope	yes, relative to no	-0.21	0.39
	categories addressing the road conditions	problematic condition of road construction	yes, relative to no	-0.26	0.21
		problematic condition of road surface	yes, relative to no	-0.26	<b>0.04</b>
	parameters	Pseudo R <sup>2</sup> : Cox and Snell	0.10		
		Pseudo R <sup>2</sup> : Nagelkerke	0.14		
		Pseudo R <sup>2</sup> : McFadden	0.07		
5: parameters & model	model	-2 Log-Likelihood: intercept only	1990.02		
		-2 Log-Likelihood: final	1839.14		
		Chi-Square	150.87		
		df	33		
		sig.	<b>0.00</b>		
		cases: n =	1376		

expected for accidents due to objects in spokes or problems on downhill slopes, inexperienced users, bicycle yawing, riding at inappropriate (too fast) speeds, indication of alcohol or when the P25 has technical defects (although not all of them significantly).

4.2. GIDAS dataset

Table 4 also shows the complete categorisation of the GIDAS dataset (block B), again with variables from the official statistics in group 1 and the newly created categories in group 2. Multiple answers were possible.

Only four of the 72 accidents (6 %) occurred on rural roads, which could be explained by the structure of the two study regions where urban roads predominate although there are also rural roads. This fact, as well as the generally smaller number of cases, must be kept in mind for the further analysis. The proportion of men among the injured (67 %) and the distribution between the two types of accident (60 % driving accidents) are similar to the TXT dataset. But the cases are somewhat more evenly spread over the seasons. This could be due to the fact that GIDAS accidents are recorded in two urban regions where the conditions are

more frequently appropriate for cycling even in winter (less snowfall than in southern Germany, snow removal). In addition, more people in cities use the pedelec to commute, which they also do in winter. Characteristics of the accident site were categorised more often; sideroads are also the most common site.

Due to the larger amount of information, individual accidents could be assigned to considerably more categories in the GIDAS-model. Therefore, an accident was assigned on average to 1.75 categories in the TXT-model and to 3.32 categories in the GIDAS-model. As in the TXT-model, the categories with most mentions were inappropriate (too fast) speed (31 %), inattention / mental workload (46 %), indication of alcohol (21 %), conflict with kerbs (21 %), conflict with obstacles on road (31 %), problems with downhill slope (18 %) and problems due to surface conditions (29 %). Differences are problems with brakes or braking which was mentioned less frequently (11 %), while distraction by other users (24 %) and having problems with uphill slopes (10 %) were mentioned more often.

On average, accident severity is slightly lower for the GIDAS dataset than for the TXT dataset. This could be explained by the significantly

lower amount of PSA in rural areas, which (on average) have a higher accident severity (see Panwinkler and Holz-Rau, 2019). The proportion of accidents with fatalities is 1.4 % in each dataset. However, due to the small number of accidents, accident severity calculated as seriously or fatally injured per 1000 accidents is not very meaningful in the GIDAS dataset.

The GIDAS-model should be performed with the same variables as the TXT-model to compare the two models. As Table 4 shows, several of the newly created categories have expressions with less than ten cases. However, we considered the minimum number of ten cases per expression as a limit for the inclusion of a variable in the model.

Therefore, the model had to be adapted. Categories of official statistics that showed fewer than ten cases in one answer option have been removed. Since the newly created categories are structured hierarchically (see Table 3), the lowest category level, which contains at least ten cases, was used for each category. We called it the aggregated model and performed an ordered probit with both the TXT and the GIDAS datasets. The categories used can be seen in Table 6. It turned out that two of the variables in the two models were directed differently: user overstrain (mental/physical) and problems with the vehicle. As can be seen in Table 4, their subcategories are directed differently (some categories are dominated by minor accidents, others by serious accidents). Therefore, we split the variable overstrain into its subcategories (although one variable (sudden illness) in the GIDAS-model has less than ten cases). Also, we split the variable problems with terrain into problems with downhill slope and problems with uphill slope (though the latter had just seven cases) because they were oppositely directed and distorted each other. We performed ordered probit analysis for both models again, including the split variables. The results are more meaningful. The model quality remained unchanged. Therefore, we decided to use these models.

### 4.3. Comparison

As expected, the results of the aggregated TXT-model are similar to the original TXT-model. The estimates for each new category have the same direction, and for aggregated categories the subgroups with the most cases tend to dominate. The model is significant, log-likelihood is similar.

The GIDAS-model is not significant. The reference accident is also expected to cause only slight injury. However, the negative estimate value is much closer to zero. In principle, all new categories have the same direction, with the exception of the category “problems with vehicle” (the low number of cases of the GIDAS-model probably plays a role here, with no fatalities among the ten accidents of this category. The TXT-model includes 210 accidents of this category, six of them with fatal injuries). The highest injury severity in the TXT-model is expected for the categories: problems with downhill slope (0.63, the only significant positive estimate), inexperienced user (0.30), indication of alcohol (0.22), difficulties in choosing the speed (0.14) and sudden illness (0.04). Estimates in the GIDAS-model do not differ greatly. The GIDAS-model thus supports the findings from the TXT-model.

### 5. Discussion

The aim of this study was to find out whether pedelec (P25) single accidents (PSA) have specific causes that have not been recorded in the official accident statistics so far. In addition, attention was also directed towards which of these categories occur frequently and in which the users are likely to suffer particularly serious injuries. For this purpose, 1738 PSA from the years 2016 and 2017 in 14 federal German states were analysed. This corresponds to a representative sample and, to our knowledge, is to date the most extensive dataset analysed qualitatively

**Table 6**  
Ordered probit analysis of TXT and GIDAS datasets (aggregated categories).

blocks	category-groups	categories	references	TXT-Model		GIDAS-Model		
				est.	sig.	est.	sig.	
0: reference	reference accident			-1.41		-0.05		
1: threshold	injury severity (1=slight, 2=serious; 3=fatal)	$\tau_1$		0.00	<b>0.00</b>	0.00	1.25	
		$\tau_2$		2.12	<b>0.00</b>	2.32	3.35	
2: metric var.	age of pedelec user	age in years		0.01	<b>0.00</b>	0.01	0.28	
3: characteristics from official statistics	sex of pedelec user	female	relative to male	0.06	0.41	-1.12	<b>0.03</b>	
		type of accident	driving accident	relative to other ac.	0.16	<b>0.03</b>	0.38	0.41
	categories addressing the user	difficulties in choosing the speed	yes, relative to no	0.14	0.13	0.02	0.96	
		attention not directed to road traffic	yes, relative to no	-0.20	<b>0.02</b>	-0.26	0.50	
		inexperienced user	yes, relative to no	0.30	0.12	0.31	0.69	
		difficulties handling the P25	yes, relative to no	-0.03	0.80	-0.53	0.30	
		sudden illness	yes, relative to no	0.04	0.85	0.09	0.90	
		indication of alcohol	yes, relative to no	0.22	0.07	0.18	0.72	
		categories addressing the pedelec						
	4: new categories	categories addressing the pedelec	problems with vehicle (P25)	yes, relative to no	-0.14	0.19	0.60	0.28
			categories addressing the road design					
		conflict with kerbs	yes, relative to no	-0.15	0.14	-0.29	0.59	
		conflict with rails or gully	yes, relative to no	-0.09	0.58	-0.46	0.45	
conflict with obstacle on road		yes, relative to no	-0.14	0.19	-1.19	<b>0.04</b>		
problems with downhill slope		yes, relative to no	0.63	<b>0.00</b>	0.21	0.66		
problems with uphill slope		yes, relative to no	-0.28	0.24	-0.15	0.83		
categories addressing the road conditions								
problematic condition of road		yes, relative to no	-0.23	<b>0.05</b>	-0.31	0.51		
parameters								
5: parameters & model	model	Pseudo R <sup>2</sup> : Cox and Snell		0.09		0.27		
		Pseudo R <sup>2</sup> : Nagelkerke		0.12		0.36		
		Pseudo R <sup>2</sup> : McFadden		0.06		0.22		
		-2 Log-Likelihood: intercept only		1985.00		99.97		
		-2 Log-Likelihood: final		1855.26		77.52		
Chi-Square		129.74		22.45				
df		22.00		22				
sig.		<b>0.00</b>		0.43				
cases: n =		1376		72				

and quantitatively on this topic. The dataset consists of the free text descriptions of experienced police officers and forms a high-quality database. With this, numerous new categories could be defined. Most of the new categories address the user or the road design. These two factors were also assigned most cases (60 % of the accidents were assigned to categories addressing the user, 54 % of the accidents were assigned to categories addressing the road design; accidents can be assigned to several categories). With the dataset it was also possible to analyse the severity of injuries using ordered probit analysis. Of the nine categories where serious injuries are expected, most (seven) categories address the user. In addition, serious injuries are expected in the case of problems with downhill slopes and technical faults (although not all significant). An additional ordered probit analysis with a second dataset, based on different sources but using the same categorisation, supports these results.

### 5.1. Interpretations

Of the newly created categories, inappropriate (too fast) speed, indication of alcohol and problems with downhill slope were mentioned most and estimated to cause most severe injuries. One explanation for this could be that high speeds are reached more quickly and easily both by means of motor assistance and by downhill gradients, and that speeds are thus underestimated (see [Haustein and Møller, 2016](#)). The higher speeds result in higher impact forces, which in turn cause more severe injuries (see [Otte et al., 2014](#)). Users with indications of alcohol may also underestimate speeds or react more slowly and thus have less time to reduce speed (see [Airaksinen et al., 2018](#); [Hertach et al., 2018](#)). It can also be assumed that users fall more clumsily under the influence of alcohol, i.e. they can no longer protect themselves adequately if they fall off their bicycle and may hurt themselves more seriously because they are less able to prevent injuries.

In contrast, the newly created categories, inattention and mental overload, problems with brakes or braking, conflicts with kerbs, conflicts with obstacles on road and problematic road surface conditions were mentioned frequently but estimated to cause only slight injuries. Many accidents of the category inattention and mental overload are estimated to result only in minor injuries, which might be because serious accidents of this category are probably collisions with other road users (such as lorries, see [Panwinkler and Holz-Rau, 2019](#)) which are not part of this analysis. On the other hand, obstacles are usually not in motion (no opposite impact energy), not firmly anchored (e.g. wheelie bin) or are cushioning (e.g. hedge) and hence impact energy is lower which may mitigate severity. [Hertach et al. \(2018\)](#) found that accidents involving kerbs often result in serious injuries. However, their category only includes conflicts when the P25 comes too close to the kerb. Our category also (mainly) includes accidents where the user was trying to go up or down the kerb. This is usually done at low speed, which in turn leads to a fall with less impact energy, which is likely to cause fewer injuries. The fact that incorrect braking often occurs but causes comparatively few serious injuries, could be due to the fact that incorrect braking will still reduce speed. Although the accident cannot be avoided, the impact energy is significantly reduced (see [Johnson and Rose, 2015](#)). Problems with road surface conditions are common and this was to be expected. For example, cycle paths are often more poorly maintained than the main roadway or (if there is no cycle path) the road surface is usable for cars but not for pedelecs (e.g. broken cobblestones). The fact that this usually results in only minor accidents could be explained by the P25 cyclists already using increased caution (and consequently low speeds) on these routes (see [Johnson and Rose, 2015](#)).

In addition, the new categories bicycle yawing, inexperienced users, losing stability due to object in spokes and technical faults were mentioned rarely but estimated to be serious. The fact that PSA caused by yawing often result in serious injuries could be explained by the fact that yawing causes a loss of control in which the P25 is usually unbraked and therefore crashes with high impact energy. Accidents involving

inexperienced users are likely to be rare, as inexperienced users are also rare (they are inexperienced on their first trips and then make far more trips as experienced users; in addition, more and more beginners are now being offered training courses when buying or hiring pedelecs). The fact that these few accidents are likely to result in serious injuries shows how important training is. Accidents due to technical defects (except brakes) are rare. One reason for this is probably that most of the vehicles are still very new (most of them were purchased in the last few years; [ZIV, 2020](#)) and speaks for the high quality of the vehicles. The fact that injuries, if they occur, are usually severe could be due to the fact that the vehicles then get out of control and crash without braking (hence high impact energy). Accidents caused by objects in spokes are rare. This could be due to the fact that the users have been sensitised to correct handling of vehicles or that vehicles are equipped with safety precautions (spoke protection). If it happens, however, it results in an unbraked fall (see [Hertach et al., 2018](#)).

### 5.2. Limitations

Although the datasets representatively reflect the occurrence of PSA, the following limitations could not be avoided.

The accident figures represent the actual number of accidents. They are not proportional to the number of vehicles or users or to the distances or routes travelled with them. This is due to the fact that little information on these exposures is available at present. Moreover, the dataset only includes accidents from the years 2016 and 2017, which means that it is not possible to analyse trends. Numerous studies (e.g. [Shinar et al., 2018](#)) show that the number of unrecorded bicycle accidents, and in particular those of single accidents, is very high. It is to be expected that the dark figure of PSA is also very high, but to our knowledge there are no studies on this yet. Our study covers most regions of Germany and thus diverse areas with different conditions in terms of relief and tourism, urban as well as rural regions, and different user groups. As for other studies (e.g. [Schepers et al., 2014](#); [Weber et al., 2014](#)), results are not always directly transferable to other countries. The categories “inexperienced riders” and “sudden illness” tried to consider as much as possible the requirements of the users. Nevertheless, factors such as whether the riders were familiar with the area, were physically fit enough to use the P25, or accidents in the past had caused uncertainty could only be considered in part. The GIDAS dataset contained much more information on these factors, but completeness cannot be guaranteed here either. For example, [Weiss et al. \(2018\)](#) showed that the vulnerability of users varies greatly. There is also some uncertainty regarding the technical information, as it is often not possible to tell whether a defect was caused by the accident or existed before the accident (and even caused the accident). The same applies to intentional modifications (tuning) of the vehicles, these are often not directly visible. Moreover, the analyses only cover single accidents. However, an accident involving a P25 and other road users may actually be a single accident that only becomes serious after a second collision, for example if a P25 user falls and is then run over by a car. Finally, it must be mentioned that hardly any information is available on helmets or other protectors. For example, only 20 % of all accidents in the TXT dataset mentioned whether the user was wearing a helmet or not. Of these 20 %, half wore a helmet, the other half did not, which does not allow any conclusion to be drawn about the remaining 80 % or allow analyses of the severity of injuries. The protective effect of a helmet can be assumed. To what extent a helmet mitigates injury cannot be said in this case, however.

### 5.3. Recommendations

The study shows that pedelec 25 single accidents have specific causes, some of which are not recorded in a standardised way by the police. It would therefore be worth considering whether and how additional categories could be included in the accident questionnaire, especially

those addressing the user (such as inattention or mental overload) or the road design (such as kerbs, rails/gullies). The results of the analysis show that single accidents with serious injuries are mainly classified in categories that address the P25 user (and her/his behaviour), as well as accidents on downhill slopes. In order to prevent serious PSA, sensitisation and further training of users, for example in introductory courses or safety training, could be particularly helpful.

## 6. Conclusions

With the help of a mixed method approach, numerous new pedelec-specific accident categories could be defined from the free text descriptions of the police accident reports. Most of the new categories address the user or the road design. These two factors were also assigned most cases (60 % of the accidents were assigned to categories addressing the user, 54 % of the accidents were assigned to categories addressing the road design; accidents can be assigned to several categories). The dataset also made it possible to analyse the severity of injuries. Of the nine categories where most serious injuries are expected in case of an accident, most categories (seven) address the user (inappropriate (too fast) speed, indication of alcohol, bicycle yawing, inexperienced users, when objects catch in spokes and, with weaker expectations, veering off lane and sudden illness). In addition, serious injuries are expected in accidents due to problems on downhill slopes or technical faults. An analysis with a different dataset supports these statements. Further research could explore how these findings could be applied to pedelec accidents involving other road users and how the results relate to exposure data such as mileage or stock.

## Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial or not-for-profit sectors.

## CRediT authorship contribution statement

**Tobias Panwinkler:** Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing - original draft, Visualization, Revision, Project administration. **Christian Holz-Rau:** Writing - review & editing, Supervision.

## Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing (financial) interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Acknowledgements

We would like to take this opportunity to express our thanks to Nadja Faerber from BAST who requested/collected the data and, like the corresponding author, read and categorised all 1738 + 72 Pedelec25 single accidents, to the German polices who provided the text data files, to BAST who provided the GIDAS data and to Sandra Breunig from BAST for compiling the GIDAS data set.

## References

Airaksinen, N.K., Nurmi-Lüthje, I.S., Kataja, J.M., Kröger, H.P.J., Lüthje, P.M.J., 2018. Cycling injuries and alcohol. *Injury* 49 (5), 945–952. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.03.002>.

Aitchison, J., Silvey, S.D., 1957. The generalization of probit analysis to the case of multiple responses. *Biometrika* 44 (1/2), 131–140. <https://doi.org/10.2307/2333245>.

Aktion Gib Acht im Verkehr, 2015. E-Bikes, Pedelecs & Co.: Informationen, Vorschriften & Tipps. Information brochure, Tübingen.

ASTRA Bundesamt für Strassen, 2017. Elektrovelos - Auswirkungen Auf Das Verkehrssystem. Bern, p. 225.

Auer, B., Rottmann, H. (Eds.), 2012. *Statistik Und Ökonometrie Für Wirtschaftswissenschaftler*. Gabler Verlag, Wiesbaden.

BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017. *Pedelec? Aber sicher!* (Folder). Bonn.

Boele-Vos, M.J., van Duijvenvoorde, K., Doumen, M.J.A., Duivenvoorden, C.W.A.E., Louwerse, W.J.R., Davidse, R.J., 2017. Crashes involving cyclists aged 50 and over in the Netherlands: an in-depth study. *Accid. Anal. Prev.* 105, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.016>.

Dabbour, E., Haider, M., Diaa, E., 2019. Using random-parameter and fixed-parameter ordered models to explore temporal stability in factors affecting drivers' injury severity in single-vehicle collisions. *J. Traffic Transp. Eng.* 6 (2), 132–146. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.04.002>.

Du, W., Yang, J., Powis, B., Zheng, X., Ozanne-Smith, J., Bilston, L., Wu, M., 2013. Understanding on-road practices of electric bike riders: an observational study in a developed city of China. *Accid. Anal. Prev.* 59, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.06.011>.

Duncan, C.S., Khattak, A.J., Council, F.M., 1998. Applying the ordered probit model to injury severity in truck-passenger Car rear-End collisions. *Transp. Res. Rec.* 1635 (1), 63–71. <https://doi.org/10.3141/1635-09>.

Fyhri, A., Johansson, O., Bjørnskau, T., 2019. Gender differences in accident risk with e-bikes-Survey data from Norway. *Accid. Anal. Prev.* 132, 105248. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.07.024>.

Garrido, R., Bastos, A., Almeida, Ade, Elvas, J.P., 2014. Prediction of road accident severity using the ordered probit model. *Transp. Res. Procedia* 3, 214–223. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.107>.

Ghasemzadeh, A., Ahmed, M.M., 2019. Exploring factors contributing to injury severity at work zones considering adverse weather conditions. *Iatss Res.* 43 (3), 131–138. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2018.11.002>.

GIDAS - German In-Depth Accident Study, 2016. About GIDAS – Methodology. <https://www.gidas.org/en/willkommen/>.

Haustein, S., Möller, M., 2016. E-bike safety: individual-level factors and incident characteristics. *J. Transp. Health* 3 (3), 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2016.07.001>.

Hertach, P., Uhr, A., Niemann, S., Cavegn, M., 2018. Characteristics of single-vehicle crashes with e-bikes in Switzerland. *Accid. Anal. Prev.* 117, 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.04.021>.

Holz-Rau, C., Scheiner, J., 2009. Verkehrssicherheit in Stadt und (um)Land - Unfallrisiko im Stadt-Land-Vergleich. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 4, 171–177.

Holz-Rau, C., Scheiner, J., 2010. Verkehrssicherheit in den Kreisen Nordrhein-Westfalens: Wo lebt es sich am sichersten? *Raumforsch. Raumordn.* 68 (5), 357–371. <https://doi.org/10.1007/s13147-010-0047-1>.

Huertas-Leyva, P., Dozza, M., Baldanzini, N., 2018. Investigating cycling kinematics and braking maneuvers in the real world: e-bikes make cyclists move faster, brake harder, and experience new conflicts. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 54, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.02.008>.

Huppertz, B., Kern, J., 2014. Elektrofahrräder. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 60 (1), 44–51.

ITF International Transport Forum (Ed.), 2018. *Cycling Safety: Summary and Conclusions ITF Roundtable on Cycling Safety 29-30 January 2018, Paris*. Paris, 41 pp.

Jalayer, M., Shabanpour, R., Pour-Rouholamin, M., Golshani, N., Zhou, H., 2018. Wrong-way driving crashes: a random-parameters ordered probit analysis of injury severity. *Accid. Anal. Prev.* 117, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.04.019>.

Jelijs, B., Heutink, J., Waard, Dde, Brookhuis, K.A., Melis-Dankers, B.J.M., 2020. How visually impaired cyclists ride regular and pedal electric bicycles. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 69, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.01.020>.

Johansson, O.J., Fyhri, A., 2018. *Miniscenario: Økt Omfang Av Elyskler / Ole Jørgen Johansson, Aslak Fyhri*. Transportøkonomisk institutt, Oslo, p. 40.

Johnson, M., Rose, G., 2014. Electric bikes in Australia: safety gains and some new concerns. In: Göteborg, Sweden Proceedings, International Cycling Safety Conference, 2014, 18-19 November 2014.

Johnson, M., Rose, G., 2015. Safety Implications of e-bikes. *Royal Automobile Club of Victoria (RACV). Noble Park North, Victoria*, p. 40.

KfV Kuratorium für Verkehrssicherheit, 2019. *Geschwindigkeitsunterschiede Ausgewählter Fahrradtypen. KfV - Sicher Leben #19* (accessed 3 November 2020). <https://www.kfv.at/download>.

Kockelman, K.M., Kweon, Y.-J., 2002. Driver injury severity: an application of ordered probit models. *Accid. Anal. Prev.* 34 (3), 313–321. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00028-8).

Kováčová, N., Winter, J.C.Fde, Schwab, A.L., Christoph, M., Twisk, D.A.M., Hagenzieker, M.P., 2016. Riding performance on a conventional bicycle and a pedelec in low speed exercises: objective and subjective evaluation of middle-aged and older persons. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 42, 28–43. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.06.018>.

Kruijer, H., den Hertog, P., Klein Wolt, K., Panneman, M., Sprik, E., 2012. *Fietsongevallen in Nederland: Een LIS Vervolgonderzoek Naar Ongevallen Met Gewone En Elektrische Fietsen*. Amsterdam, p. 70.

Lawinger, T., Bastian, T., 2013. Neue Formen Der Zweiradmobilität: eine empirische tiefenanalyse von pedelec-unfällen in Baden-Württemberg. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 59 (2).

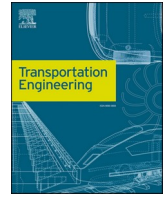
McKelvey, R.D., Zavoina, W., 1975. A statistical model for the analysis of ordinal level dependent variables. *J. Math. Sociol.* 4 (1), 103–120. <https://doi.org/10.1080/0022250X.1975.9989847>.

Otte, D., Facius, T., Müller, C., 2014. Pedelecs im Unfallgeschehen und Vergleich zu konventionellen nicht motorisierten Zweirädern. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 02, 48–60.

- Panwinkler, T., Holz-Rau, C., 2019. Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich: Pedelecs vs. Fahrräder. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 65 (05), 336–347.
- Papoutsis, S., Martinolli, L., Braun, C.T., Exadaktylos, A.K., 2014. E-bike injuries: experience from an urban emergency department—a retrospective study from Switzerland. *Emerg. Med. Int.* 2014, 850236. <https://doi.org/10.1155/2014/850236>.
- Pokorny, P., Pritchard, R., Pitera, K., 2018. Conflicts between bikes and trucks in urban areas—a survey of Norwegian cyclists. *Case Stud. Transp. Policy* 6 (1), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2017.11.010>.
- Quddus, M.A., Noland, R.B., Chin, H.C., 2002. An analysis of motorcycle injury and vehicle damage severity using ordered probit models. *J. Safety Res.* 33 (4), 445–462. [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(02\)00051-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00051-8).
- Richter, T., Sachs, J., 2017. Turning accidents between cars and trucks and cyclists driving straight ahead. *Transp. Res. Procedia* 25, 1946–1954. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.219>.
- Schepers, A., 1999. Anwendung ordinaler Probit-Modelle auf Verkehrsdaten - Analyse der Verletzungsschwere von Unfallbeteiligten. In: Hautzinger, H., Barton, H. (Eds.), *Innovative Konzepte und Methoden: dringlicher denn je*; Kurs IX/98, 24. Bis 25. September 1998 in Heilbronn. DVWG, Bergisch Gladbach.
- Schepers, J.P., Kroeze, P.A., Sweers, W., Wüst, J.C., 2011. Road factors and bicycle-motor vehicle crashes at unsignalized priority intersections. *Accid. Anal. Prev.* 43 (3), 853–861. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.11.005>.
- Schepers, J.P., Fishman, E., den Hertog, P., Wolt, K.K., Schwab, A.L., 2014. The safety of electrically assisted bicycles compared to classic bicycles. *Accid. Anal. Prev.* 73, 174–180. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.09.010>.
- Schepers, J.P., Klein Wolt, K., Fishman, E., 2018. *The Safety of E-Bikes in the Netherlands*. Paris, p. 20.
- Schleinitz, K., Franke-Bartholdt, L., Petzoldt, T., Schwanitz, S., Gehlert, T., Kühn, M., 2014. *Pedelec-Naturalistic Cycling Study*. Forschungsberichte Der UDV. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V., Berlin, p. 140.
- Schreck, B., 2016. Radverkehr - unfallgeschehen und stand der Forschung. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 62 (2), 63–77.
- Schreck, B., Pöppel-Decker, M., 2014. Unfallgeschehen zwischen rechtsabbiegenden Güterkraftfahrzeugen und geradeausfahrenden Radfahrern. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 60 (4), 239–242.
- Shinar, D., Valero-Mora, P., van Strijp-Houtenbos, M., Haworth, N., Schramm, A., Bruyne, Gde, Cavallo, V., Chliaoutakis, J., Dias, J., Ferraro, O.E., Fyhri, A., Sajatovic, A.H., Kuklane, K., Ledesma, R., Mascarell, O., Morandi, A., Muser, M., Otte, D., Papadakaki, M., Sanmartin, J., Dulf, D., Saplioglu, M., Tzamalouka, G., 2018. Under-reporting bicycle accidents to police in the COST TU1101 international survey: cross-country comparisons and associated factors. *Accid. Anal. Prev.* 110, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.09.018>.
- StBA Statistisches Bundesamt, 2020. *Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe, 7-2019*, Wiesbaden.
- StVG. Straßenverkehrsgesetz (Road Traffic Act) in the version promulgated on 5 March 2003 (BGBl. I p. 310, 919), last amended by Article 1 of the Act of 10 July 2020 (BGBl. I p. 1653). 2020.
- StVO. Straßenverkehrs-Ordnung (Road Traffic Act) of 6 March 2013 (BGBl. I p. 367), last amended by Article 1 of the regulation of 20 April 2020 (BGBl. I p. 814). 2013.
- Tjahjono, T., Kusuma, A., Pratiwi, Y.Y., Purnomo, R.Y., 2019. Identification determinant variables of the injury severity crashes at Road-Railway Level Crossing in Indonesia. *Transp. Res. Procedia* 37, 211–218. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.185>.
- Twisk, D.A.M., de Hair-Buijssen, Stefanie H.H.M., Otte, D., 2017a. Editorial for special issue - 'Improving cyclist safety through scientific research'. *Accid. Anal. Prev.* 105, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.05.021>.
- Twisk, D.A.M., Platteel, S., Lovegrove, G.R., 2017b. An experiment on rider stability while mounting: comparing middle-aged and elderly cyclists on pedelecs and conventional bicycles. *Accid. Anal. Prev.* 105, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.01.004>.
- UDV Unfallforschung der Versicherer (Ed.), 2017. *Verkehrssicherheit von Elektrofahrrädern*. Berlin, 26 pp.
- UDV Unfallforschung der Versicherer, 2020. *Untersuchung Der Unfallursache Nr. 49: „Andere Fehler Beim Fahrzeugführer“*. Unfallforschung kompakt 96, Berlin.
- Uhr, A., Hertach, P., 2017. *Verkehrssicherheit Von E-Bikes Mit Schwerpunkt Alleinunfälle*. bfu-Report, Bern, p. 152.
- Useche, S., Montoro, L., Alonso, F., Oviedo-Trespalacios, O., 2018. Infrastructural and human factors affecting safety outcomes of cyclists. *Sustainability* 10 (2), 299. <https://doi.org/10.3390/su10020299>.
- Vlakveld, W.P., Twisk, D., Christoph, M., Boele, M., Sikkema, R., Remy, R., Schwab, A.L., 2015. Speed choice and mental workload of elderly cyclists on e-bikes in simple and complex traffic situations: a field experiment. *Accid. Anal. Prev.* 74, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.10.018>.
- Weber, T., Scaramuzza, G., Schmitt, K.-U., 2014. Evaluation of e-bike accidents in Switzerland. *Accid. Anal. Prev.* 73, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.07.020>.
- Weiss, R., Juhra, C., Wieskötter, B., Weiss, U., Jung, S., Raschke, M., 2018. Zur Unfallwahrscheinlichkeit Von Senioren Bei Der Nutzung von E-Bikes [How probable is it that seniors using an E-Bike will have an accident? - a new health care topic, also for consulting doctors]. *Z. Orthop. Unfall.* 156 (1), 78–84. <https://doi.org/10.1055/s-0043-120200>.
- Yu, M., Zheng, C., Ma, C., Shen, J., 2020. The temporal stability of factors affecting driver injury severity in run-off-road crashes: a random parameters ordered probit model with heterogeneity in the means approach. *Accid. Anal. Prev.* 144, 105677. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105677>.
- Zhang, Y., Li, Z., Liu, P., Zha, L., 2011. Exploring contributing factors to crash injury severity at freeway diverge areas using ordered probit model. *Procedia Eng.* 21, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2002>.
- ZIV Zweirad-Industrie-Verband, 2020. *Zahlen - Daten - Fakten Zum Deutschen Fahrrad-Und E-Bike-Markt 2019*. press release, Berlin.

### **5.3 Paper 3: Spatial Dimension of Accidents involving Pedelecs 25 and Conventional Bicycles**

Panwinkler, T., Holz-Rau, C., Scheiner, J, 2024. Spatial Dimension of Accidents involving Pedelecs 25 and Conventional Bicycles. Transportation Engineering, Volume 16, June 2024, 100232. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100232>



## Spatial dimension of accidents involving pedelecs 25 and conventional bicycles

Tobias Panwinkler<sup>a,\*</sup>, Christian Holz-Rau<sup>b</sup>, Joachim Scheiner<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Federal Highway Research Institute (BASt), Bruederstr. 53, 51427 Bergisch Gladbach, Germany

<sup>b</sup> TU Dortmund University, Department of Spatial Planning, August-Schmidt-Str. 6, 44227 Dortmund, Germany

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Electric bicycle  
E-bike  
Spatial analysis  
Injury severity  
Transportation engineering

### ABSTRACT

The pedelec 25 (pedal electric cycle) has established itself as a popular mode of transport, with sales rising. Unfortunately, this has also led to an increase in the number of accidents. Analyses of pedelec accidents have been carried out, but most studies are based on technical variables. Neither spatial, geographical factors, for example the terrain, nor socio-geographical aspects, such as whether an accident occurred in a tourist region, have been much addressed. However, geographical exposure can vary significantly. Therefore, we assume that spatial differences contribute to regional variations in numbers of accidents and resulting injuries associated with both bicycle types (pedelecs 25 and conventional). Thus, the aim of this paper is to determine geographical factors that influence severe accidents and to evaluate this influence. We have identified relevant geographical factors and proven their influence on two types of severity: risk of severe bicycle accidents per region (RS) and probability of severe injuries in case of accident (AS). Spatial analyses indicate that for both bicycle types, severity of accident increases in rural, mountainous or tourist regions. Regression analyses of RS provided further evidence: compactness of settlement structure (thus urbanity/rurality), share of tourists, altitude differences (only pedelecs), rate of registered motor vehicles and share of elderly population (only pedelecs) influence the risk of severe bicycle accidents per region. The influence of geographical variables tended to be greater for pedelecs. Regression analyses of AS reveal that geographical factors also have an influence on the probability of severe injuries in case of an accident.

### 1. Introduction

A pedelec 25 (pedal electric cycle, a bicycle with an electric motor that supports its user up to a speed of 25 kmph when pedalling, hereinafter P25) is still a novel type of bicycle. It can help people to become more mobile [1], to travel longer distances [2,3] or to overcome differences in altitude that would not have been managed with a conventional bicycle (hereinafter CB) [4,5]. P25s can help people to maintain or improve their health and fitness through physical activity [6,7]. Finally, they provide an opportunity to switch to an environmentally friendly means of transport [8], reducing motor vehicle traffic and thus congestion and pollution [9,10].

Sales of pedelecs have increased rapidly in recent years, in Germany [11] as well as in other countries ([12]; Switzerland: [13]; Austria: [14]; Netherlands: [15]). This has led to an increase in the number of pedelecs in circulation and in the share of pedelecs in the total number of all bicycles. Unfortunately, an increased presence of P25s on German roads

has resulted in more P25 accidents [16].

Panwinkler and Holz-Rau [17] have already compiled a comparison of several (motorised) two-wheeler types highlighting that a “pedelec 25 ([...] P25) is a bicycle that supports pedalling with an electric motor up to a speed of 25 km / h. The electric motor may provide support with a rated continuous power of 250 W maximum. A traction aid, i.e. propulsion of the bicycle at the push of a button or by turning a handle and without pedalling, is only permitted up to a maximum speed of 6 km / h. From a legal standpoint, the P25 is classified as a bicycle in Germany so the same road safety regulations apply to its user (based on §1 (3) of the road traffic act (StVG), [18]).” They (ibid.) give an overview of these regulations, explaining that wearing a helmet and holding insurance are recommended but that neither is compulsory, and that no driving or operating license is required. The overview also includes the pedelec 45 (P45 or “s(speed) pedelec”) and the e-bike, highlighting that P45s and e-bikes are not considered to be bicycles but are treated as motor vehicles by German law and are therefore subject to different legal obligations. Panwinkler

\* Corresponding author.

E-mail address: [panwinkler@bast.de](mailto:panwinkler@bast.de) (T. Panwinkler).

<https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100232>

Received 21 September 2023; Received in revised form 11 February 2024; Accepted 19 February 2024

Available online 20 February 2024

2666-691X/© 2024 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

and Holz-Rau [19] describe that, “The electric motor of a P45 supports the user when pedalling to a speed of 45 km / h. Without pedalling, the motor drives the vehicle up to a speed of 20 km / h. An e-bike does not necessarily have any pedals as the motor may also drive the vehicle without pedalling but instead turning a handle. Users of both these vehicles have to wear appropriate helmets, need the corresponding driving and operating licenses, must be insured and must attach an insurance plate to the vehicle [18]. Another consequence is that these vehicles are not allowed to use cycle lanes (with some exceptions for e-bikes).” According to Regulation (EU) No 168/2013, P45s (and the German version of e-bikes, as described above) are categorised as L1e-B, but according to Article 2(h) of Regulation (EU) No 168/2013, P25s (like CBs) are not L (and hence not L1e) as they are not motor vehicles but bicycles, because their motors serve only for support [20]. As this study deals with a new type of bicycle and its consequences for cycle traffic, the following analysis is based on P25s and conventional bicycles only.

In order to make cycling more attractive and consequently encourage even more people to switch to cycling, it is important to increase safety. Macioszek and Jurdana [21] show that suitable cycling infrastructure can be a decisive factor in increasing safety. Panwinkler [22] also shows that cycle paths increase safety and that the severity of accidents is lower on cycle paths. The question therefore arises as to the influence of geographical factors (such as gradients). In regions that have not been attractive for cycling (e.g. due to steep gradients), there is usually little cycling infrastructure. However, with the new possibilities offered by pedelecs (greater range, overcoming steeper gradients, etc.), it seems likely that a new demand for cycling infrastructure will be created in these regions. A geographical analysis seems helpful here. In order to make cycling, especially with pedelecs, even more attractive, it is also necessary to further increase safety for these road users.

Researchers such as Comi et al. [23] have already shown how datamining techniques can be used to identify the main causes and most common constellations of road accidents. Many researchers, such as Macioszek and Granà [24] for Poland, have already analysed bicycle accidents in detail and pointed out the common causes of accidents (such as socio-geographical characteristics of users, speeding, alcohol or incident site). There are also already some scientific findings concerning P25 accidents and differences to CB accidents available. For Germany, Panwinkler and Holz-Rau [19] have shown that P25 accidents are more severe (with absolute numbers of P25 accidents between 2014 and 2017 being much lower than those of CB accidents). For both vehicle types, accidents in urban areas clearly dominate, but the proportion of P25 accidents in rural areas is much higher. P25 accidents are more often single accidents, and injured (especially fatally injured) P25 users are on average older than injured CB users. UDV [25], Schepers et al. [26], Weber et al. [27] or Johnson and Rose [28] come to similar conclusions for their study regions.

Panwinkler and Holz-Rau [17] and Hertach et al. [29] have identified some pedelec-specific causes of accidents (most of them concern user skills, behaviour and road design). They analysed the influence of such factors on the severity of accidents, revealing that most severe injuries are expected in accidents caused by problems on downhill slopes, technical faults, inappropriate (overly fast) speed, indication of alcohol, bicycle yawing, inexperienced users, objects catching in spokes and, rather seldom, veering off lane and sudden illness.

The literature cited above has in common that mostly technical variables are used for accident analysis. Neither spatial, geographical factors, for example the terrain, nor socio-geographical aspects, such as whether the accident occurred in a tourist region, are much addressed. The studies that are available deal with all bicycles rather than sub-categories of types. To date, no spatial perspective on P25 accidents has been adopted. However, we assume that spatial differences and geographical factors – such as mountainousness – vary sufficiently within Germany to influence P25 and CB accidents and the severity of resulting injuries.

In road safety work, the focus is first and foremost on avoiding severe

accidents in order to prevent or at least alleviate human suffering. From an economic point of view, avoiding severe and thus expensive accidents has priority as well [19]. Therefore, it is important to identify whether geographical variables influence the number of severe accidents per capita in a given area (the “Risk of Severe bicycle accidents” hereinafter “RS”, e.g. severe accidents per (present) population of a district), and also the probability of severe injury in case of an accident (the “Accident Severity” hereinafter “AS”, e.g. severe bicycle accidents per total bicycle accidents).

The aim of this study is to add a spatial perspective to P25 accident analysis. First, we would like to identify the risk (RS) and the probability (AS) of accidents involving severely injured cyclists on a regional level, with the aim of determining whether there are spatial differences between P25 and CB accidents in Germany. Second, we intend to identify geographical factors that may influence accident severity and, third, to analyse the extent to which the level of influence differs between P25 and CB, thus answering the question: does geography matter in bicycle accident analysis?

To examine this problem, we used the following approach. We first conducted a literature analysis to identify relevant geographical factors. In the second step we analysed German accident data, beginning with a visual analysis. For this purpose, we displayed the accident data in maps. We performed descriptive analyses of the identified geographical factors to gain an overview of their spatial distribution. Finally, we implemented regression analyses to estimate the influence of each geographical factor on accident severity. We analysed the influence of the geographical factors on RS at the level of the German regional administrative unit “Kreis” (district) and calculated the RS as the total number of severe bicycle accidents that occurred in the district (polygon data) divided by the present population (inhabitants and tourists) of the district. The influence of the variables on AS was analysed using the data concerning individual accidents and the road users involved (point data), with AS calculated as a ratio between the number of bicycle accidents with severely injured bicycle users and the total number of bicycle accidents with injuries.

This paper aims to add a geographical perspective to bicycle accident analysis, addressing regional patterns of bicycle accidents and their severity. Furthermore, the influence of geographical factors on severity is demonstrated. The following Section 2 categorises relevant literature and derives hypotheses. Section 3 defines the study area, the data used and the methodology. In Section 4, results are first presented as a spatial overview with severities displayed in maps, followed by regression analysis to examine the influence of geographical indicators. Section 5 discusses the results in four steps, beginning with a summary of results, then interpreting them and finally discussing limitations and recommendations. The paper ends with conclusions for research and policy.

## 2. Literature analysis

Geographical components are becoming increasingly important in accident research. Ziakopoulos and Yannis [30] conducted a comprehensive meta-study of scientific papers with the focus on explanatory variables used in accident research. On the macro level (regional / conditional approach) they divided these variables into five categories: traffic, road environment, demographic, socio-economic and land use. Other authors have used similar divisions, for example, Holz-Rau and Scheiner [31] named three groups of impact factors for accident risk: risk exposure, environment, and social and psychological factors. Thus, accident researchers have in some cases taken geographical factors into account.

The following literature review identifies spatial, geographical factors that possibly influence bicycle accidents and severity of injuries. It is based on Ziakopoulos and Yannis’ [30] classification into five categories. Table 1 categorises the sources analysed according to the severity concept they used for bicycle accidents (RS or AS). Based on this, hypotheses are formulated that not only consider the different types of

**Table 1**  
Reviewed studies categorised by type of severity indicator: RS - risk of a severe cycling accident, AS - probability of severe cycling accident (conditional on an accident).

Factors	Source	RS	AS
<b>Traffic</b>			
Vehicle traffic			
	Ziakopoulos and Yannis [30] <i>Metastudy</i>	X	X
	Elvik and Bjørnskau [32] <i>Metastudy</i>	X	-
	Fyhri et al. [33]	X	-
	Jacobsen [34]	X	-
	Bhatia and Wier [35]	X	-
	Holz-Rau and Scheiner [31]	X	-
	Noland and Quddus [36]	X	-
Road Environment			
Gradient			
	Holz-Rau and Hölderich [37]	X	-
	Konrad et al. [38]	-	X
	Jaber et al. [39]	-	X
	Cripton et al. [40]	-	X
	Teschke et al. [41]	-	X
	Kim et al. [42]	-	X
	Haustein and Møller [43]	-	X
	Panwinkler and Holz-Rau [17]	-	X
	UDV [25]	-	-
Demographic			
Elderly			
	Weiss et al. [44]	-	X
	Panwinkler and Holz-Rau [19]	-	X
	Gaster, [45]	-	X
	Wang et al. [46]	-	X
	Schepers et al. [47]	-	X
	Schepers et al. [26]	-	X
	Hertach et al. [29]	-	X
	Weber et al. [27]	-	X
	Vlakveld et al. [48]	-	X
Gender			
	Panwinkler and Holz-Rau [17]	-	X
	Schepers et al. [47]	-	X
	Fyhri et al. [49]	-	X
	Hertach et al. [29]	-	X
Socio-Economic			
Deprivation			
	Lee et al. [50]	X	-
	Edwards et al. [51]	X	-
	Vidal Tortosa et al. [52]	X	-
	Saha et al. [53]	X	-
	Ding et al. [54]	X	-
	Chong et al. [55]	-	X
	Wu et al. [56]	X	-
	Siddiqui et al. [57]	X	-
Tourism			
	Martin et al. [58]	X	-
	Kim et al. [59]	-	-
	Lee et al. [60]	X	-
	Prati et al. [61]	X	X
	Panwinkler and Holz-Rau [17]	-	X
	Johansson and Fyhri [62]	X	-
	Wang et al. [46]	-	X
Land Use			
Compactness			
	Scheiner et al. [63]	X	-
	Faller and Scheiner [64]	X	-
	Holz-Rau and Scheiner [31]	X	-
	Panwinkler and Holz-Rau [19]	-	X
	Kamel and Sayed [65]	X	X

\*Sources not directly analysing severity are not included.

severity (RS or AS), but also differences between P25 and CB accidents. The assessed variables are written in bold in the text below, while the hypotheses and their variables are summarised in Table 2 as a conclusion of Section 2.

2.1. Traffic

Ziakopoulos and Yannis [30] consider a number of factors related to

traffic (speed, traffic volume, vehicle distance travelled) and find that the risk of severe bicycle accidents increases (greater exposure to potential hazard) the more cars there are on the street, the faster they move and the more kilometres they travel. Elvik and Bjørnskau [32] assume that road safety increases (in this case fewer cycling accidents per km travelled or per cycle ride), the more cyclists there are on the roads. In their review of 26 studies, they confirm an occurrence of the so-called safety-in-numbers effect, but admit that causes of the effect are not completely clear. Fyhri et al. [33] explain this effect (by citing Jacobsen [34]) by suggesting that motor vehicle drivers pay greater attention to cyclists when there are more cyclists on the road. Bhatia and Wier [35] add that in the long run, greater numbers of cyclists can lead to greater support (such as construction of cycle lanes) from policymakers and planners who gain a greater awareness of and understanding for cyclists and their needs. Even though this theory sounds plausible, one could argue the opposite: if there are fewer bicycles on the road, there are consequently fewer cyclists potentially at risk. Finally, the existence of bicycle lanes can also enhance safety [22]. Unfortunately, the data required to consider the safety-in-numbers effect is hardly available on a detailed level (such as districts) for the whole of Germany. Detailed data on cycle lanes and the share of roads equipped with cycle lanes are similarly unavailable for Germany. Holz-Rau and Scheiner [31] therefore use car ownership rate as a proxy for car use and even for distance travelled by car. Noland and Quddus [36] show that the higher the car ownership rate, the higher the risk of severe bicycle accidents. Therefore, we also choose the motor vehicle density (car ownership rate) as a proxy for vehicle traffic.

Table 1 shows that the reviewed sources (except for one meta-study) deal only with the RS. From those sources, we could assume that a higher **car ownership rate** implies higher RS. On the other hand, we could assume that high car ownership rates indicate less bicycle use and therefore less severe bicycle accidents. Therefore, we assume only that the motor vehicle ownership rate influences RS in some way (two tailed). Based on the argument that collisions with motor vehicles cause more severe injuries to bicycle users due to higher impact forces [40,42] than those with bicycles/pedestrians or accidents without other parties (single accidents), it could be hypothesised that if the **other road user is a motor vehicle**, the AS is higher than with a different party or with no opponent. However, the opponent in our analysis is not a geographical variable but is drawn from official accident data. Due to the higher speeds of P25s [66] and hence higher impact forces, the effect of motor vehicle traffic is assumed to be even stronger for P25s than for CBs.

2.2. Road environment

Holz-Rau and Hölderich [37] reveal that risk (RS) varies depending on standard deviations of altitudes. Without differentiating between P25s and CBs, Konrad et al. [38] show that the severity (AS) of bicycle accidents increases significantly on gradients. Jaber et al. [39], Cripton et al. [40], Teschke et al. [41] and Kim et al. [42] come to similar findings. Panwinkler and Holz-Rau [17] show that P25 (single) accidents in Germany often occur on gradients. Of their analysed categories, problems with downhill slopes is one of the three most mentioned and one of two categories assumed to cause most severe injuries. They suggest that P25 accidents on downhill slopes are even more severe than those with CBs, because high speed can be kept constant uphill, and downhill acceleration is thus faster. Referring to Haustein and Møller [43], Panwinkler and Holz-Rau [17] assume that high speeds on downhill slopes are underestimated by cyclists. UDV (German Insurers Accident Research) also reveals that the proportion of P25 accidents on gradients is high, even significantly higher than accidents with CBs. However, they do not assess accident severity [25].

Holz-Rau and Hölderich [37] categorise regions according to standard deviation of altitudes, dividing them into four groups (low/moderate/strong/very strong altitude differences) and calculating their RS. Accordingly, we assume that the higher the **standard deviation of**

**Table 2**  
Geographical variables.

Group	Factor		Hypothesis			Variable				
	Category	Geographical Variable	If Variable is...	Severity is...		Difference P25s and CBs	Unit	Year	Spatial Unit	Source
				RS	AS					
Traffic	Motor-vehicle traffic	Motor vehicle density	high	?		P25 > CB	registered motor vehicles / 1000 inhab. [vehicles/pop]	2019	District	KBA/ StBA
		Opponent is a motor vehicle	yes		high	P25 > CB	Opponent is motor vehicle [yes/no]	2019	Coordinates of Accident	BAST
Road environment	Gradient	Standard deviation of altitudes	high	high		P25 > CB	Standard deviation of gradient [m]	2019	District	BKG
		Slope at accident site	high		high	P25 > CB	Slope at accident site [%]	2019	DLM 10 × 10 m	BKG
Demographic	Elderly	Share of elderly population	high	?		P25 > CB	Share of inhabitants aged 65+ / total population [%]	2019	District	StBA
		Injured cyclist aged 65+	yes		high	P25 > CB	Injured cyclist aged 65+ [yes/no]	2019	Coordinates of Accident	BAST
	Female	Share of female population	high	?		P25 > CB	Share of inhabitants aged 65+ / total population [%]	2019	District	StBA
		Injured cyclist was female	yes		high	P25 > CB	Injured cyclist aged 65+ [yes/no]	2019	Coordinates of Accident	BAST
Socio-Economic	Depri-vation	Social deprivation	high	high		?	German Index of Social Deprivation [-]	2012	District	RKI
		Social deprivation	high		high	?	German Index of Social Deprivation [-]	2012	District	RKI
	Tourism	Number of tourists	high	high		P25 > CB	Hotel overnight stays / population [nights/pop]	2019	District	StBA
		Number of tourists	high		high	P25 > CB	Hotel overnight stays / population [nights/pop]	2019	District	StBA
Land use	Compactness	Compactness	low	?		P25 > CB	Inhabitants / area used for settlement purpose [pop/km <sup>2</sup> ]	2019	District	StBA
		Accident on rural road	yes		high	P25 > CB	Rural road [yes/no]	2019	Coordinates of Accident	BAST

StBA = Federal Statistical Office.

RKI = Robert Koch Institute (federal public health institute).

BKG = Federal Agency for Cartography and Geodesy.

BAST = Federal Highway Research Institute.

KBA = Federal Motor Transport Authority.

**altitudes** in a region, the higher the RS. All other sources presented in Table 1 deal with the slope at the accident site and with AS. On the basis of these studies, we hypothesise that the steeper the **slope at the accident site**, the higher the AS. Since ASTRA [67] showed that P25s travel even faster on slopes, we assume that the influence of the slope is even stronger for P25 accidents than for CBs.

### 2.3. Demography

Weiss et al. [44] show that the probability of a severe injury from a bicycle accident (AS) increases with the age of a bicycle user. However, the authors found no difference between P25s and CBs. Panwinkler and Holz-Rau [19] show that injured (especially fatally injured) P25 users in Germany are on average older than injured CB users. UDV [68], Gaster [45], Wang et al. [46], Schepers et al. [26,47], Hertach et al. [29] and Weber et al. [27] come to similar conclusions for their study regions. Kováčsová et al. [69] explain the higher risk of severe injuries (AS) for elderly P25 riders with age-related changes in psychomotor and sensory functions; Vlakveld et al. [48] explain the increased risk with higher mental workload.

It could be assumed that the higher the **share of elderly persons** in a region, the greater the number of elderly (more vulnerable) people who take part in road traffic, and hence the higher RS. On the other hand, a high number of older people could also mean less motor vehicle traffic, for example because pensioners no longer drive to work, which could reduce the risk of severe cycle accidents. Therefore, we only assume that the share of elderly persons has an influence on RS (two tailed). Based on the reviewed literature, we assume that if the **injured cyclist is an elderly person**, the AS is higher. Since Panwinkler and Holz-Rau [19]

have already shown that accidents with older pedelec users are more severe than with older CB users, we assume that the effect is stronger for P25s than for CBs.

Gender has also been shown to play a role in such accidents. The majority of road users involved in accidents in Germany are male and the proportion of injured (cyclists) is also higher among men [70]. This may be linked to higher mileages (exposure) [71] or a riskier riding style on average [72]. Nevertheless, Panwinkler and Holz-Rau [17], Schepers et al. [47], Fyhri et al. [49] and Hertach et al. [29] found that women, especially older female P25 riders, were more likely to be involved in severe crashes and sustain more severe injuries from those crashes.

On the basis of the arguments presented, it could be assumed that RS increases along with the proportion of women in the total population of a region, as female cyclists suffer more severe injuries, but it could also be assumed that RS in regions with a higher share of women is lower, as women on average ride less and less riskily. Therefore, we only assume that the **share of women in the total population** has some influence on RS (two tailed). Based on the sources discussed above, we assume that if the **injured cyclist is female**, AS is higher than if the cyclist is male. Moreover, based on the analysed literature, we can assume that AS is especially high when the **injured cyclist is an older woman**. We assume that accident severity for P25 female riders is higher than for females riding CBs.

### 2.4. Socio-Economic

Lee et al. [50] show that the higher the number of households in poverty, the higher the amount of severe (fatal) bicycle accidents (RS). Edwards et al. [51] and Vidal Tortosa et al. [52] come to similar

conclusions. The German RKI (Robert Koch Institute for safeguarding of public health) identifies three key dimensions of socio-economic deprivation: education, employment and income [73]. Lee et al. [50] show that the higher the average level of education in a region, the fewer severe (fatal) bicycle accidents occur. Saha et al. [53] come to similar findings, explaining this with the assumption that more highly educated people may have a higher level of safety awareness. Ding et al. [54] cite Mandic et al. [74] and Chong et al. [55] and explain this with more knowledge of relevant skills (road safety education as part of school education) and a greater willingness to comply with the relevant guidelines among children in these regions. Hertach et al. [29] show that P25 users with lower levels of education have a higher risk of a (single) accident but do not investigate the influence on accident severity. Wu et al. [56] show that high unemployment rates correlate with high accident risk and a high risk of severe accidents for bicycles. Ding et al. [54] and Siddiqui et al. [57] show that regions with high median income demonstrate a low bicycle accident frequency as well as a lower number of severe bicycle accidents. Since P25s are normally more expensive than CBs [75,5], Gitelman et al. [76] and Ling et al. [77] note that P25 users might have higher average incomes than CB users. But, to the best of our knowledge, the extent to which the income or employment status of P25 users involved in accidents is related to their injury severity has not yet been investigated.

Most of reviewed studies address the deprivation of a region (its inhabitants) and whether this results in a higher RS. We assume that if **social deprivation** in a region is high, the RS is also high. Two studies deal with the degree of deprivation of the injured and derive an AS from this. Since data on socio-economic status are not included in the official accident statistics, we assume that the higher the **social deprivation** in a region, the more likely it is that the injured cyclist is deprived and hence the higher the AS (it should be noted that analysed sources only concern post-industrial countries where maintaining a car is possible for the majority of society). We cannot yet draw a conclusion from the literature as to whether the effect is stronger for P25s or CBs.

Bicycles in general are often used and/or rented by tourists. Martin et al. [58] highlight that rental bicycle users are often inexperienced both with cycling in general and with the rented vehicle in particular. Also, tourists are usually in unfamiliar surroundings, which leads to higher risk (RS). Kim et al. [59] show that at the popular holiday destination of Hawaii, cyclists with rented vehicles break traffic rules more often, leading to more accidents and injuries. Lee et al. [60] note that collisions are more likely in zones with many tourist attractions, which Prati et al. [61] explain with the lack of local knowledge of the drivers and the high traffic volumes at the sights. Panwinkler and Holz-Rau [17] observe that (single) P25 accidents due to user inexperience account for only a small proportion of all P25 accidents, but when they occur, a high injury severity (AS) is expected. They also conclude that inexperienced users are often tourists who rent a pedelec on holiday and have had little or no practice with it. Johansson and Fyhri [62] and Wang et al. [46] came to similar conclusions regarding AS.

More than half of the cited sources examine whether the region is a tourist region and draw conclusions regarding RS. We conclude that if the **number of tourists** is high, RS is also high (keeping in mind that RS calculates accidents for the present population which includes any tourists present). Other studies attempt to discover whether the users are tourists and to draw conclusions regarding AS. Since the official accident statistics do not state whether the cyclist was a tourist, we use a proxy and assume that the higher the **number of tourists** in a region, the more likely it is that the cyclist involved in the accident was a tourist and the higher the AS. We assume that the touristic effect is even stronger for P25s than for CBs.

## 2.5. Land use

Scheiner et al. [63] explain that a compact built-up structure (i.e. the share of land used for settlement and transport) could indicate urbanity.

In such areas a large proportion of traffic occurs in city streets, where speeds are lower and there are thus fewer severe accidents (RS). Also, compact land use can help to reduce commuting distances. Fallner and Scheiner [64] show that higher commuter volumes and dispersed settlement structures pose a higher risk of accidents (for inhabitants, which in the context of bicycles can be assumed to be the cyclists involved in the accident). Holz-Rau and Scheiner [31] observe the highest risk of severe (RS) bicycle accidents (expressed in accident costs) to be concentrated particularly in (less compact) suburban areas. Panwinkler and Holz-Rau [19] highlight that the severity (AS) of P25 and CB accidents is greater on rural than on urban roads. Kamel and Sayed [65] show that city streets are more likely to include bicycle infrastructure, which may reduce the risk of severe bicycle accidents (AS). Blaizot et al. [78] argue that bicycles travel faster in sparsely populated areas, Blass et al. [66] show that P25s have faster average speeds than CBs, and Panwinkler and Holz-Rau [19] show that P25 accidents are even more severe (AS) than CB accidents on rural roads. Based on these conclusions, we define compactness as the number of inhabitants per area used for settlement purposes for each district and make the following assumptions.

It can be argued that high compactness results in fewer or shorter motor vehicle trips (lower exposure) and therefore lower RS. On the other hand, higher compactness could lead to higher cycling frequency, higher exposure and hence to higher RS. Accordingly, we assume only that compactness, expressed as **population per built up area**, has an influence on RS (two tailed). One source indirectly deals with compactness, assuming that accident severity is lower on urban roads, which, by definition, run through continuously built-up (and hence more compact) areas. Therefore, we assume that the AS of **accidents on rural roads** is higher than on urban roads. This is an indicator using official statistics, but it has a spatial reference. Finally, we assume that the effect of compactness is stronger for P25s than for CBs.

## 3. Methodology and data

### 3.1. Study area

Fig. 1 shows a map of the study area, the Federal Republic of Germany, divided in 401 districts ("Kreise"; the administrative level between a municipality and a federal state). The map also displays the topography of Germany as a digital elevation model. The southern part of Germany, especially along the southern borders, has higher altitudes, whereas the northern part, especially towards the coastal regions, is very flat.

### 3.2. Dataset

We used a dataset that is composed of two parts: accident data and geographical data. Based on the literature analysis, we used the variables presented in Table 2 to test our hypotheses (Table 2 shows the variables, their units, reference years, spatial units and sources).

#### 3.2.1. Accident data

The empirical study is based on the individual data of the official road traffic accident statistics, which are collected by statistical offices of the 16 federal states on the basis of police accident records and made available to the Federal Highway Research Institute (BAST) for the purposes of accident research. For this study, we selected all accidents with personal injuries (hereafter referred to as "accidents") that occurred in Germany in the year 2019 and in which at least one P25 or one CB was involved.

The police recently started to record the geographical coordinates of accidents, however, the federal states unfortunately deploy different reference systems. The individual accident data were therefore first compiled in a uniform reference system (EPSG: 31467) and then imported as XY coordinates with a unique ID into a Geographic



Fig. 1. Topographic map of Germany.

Information System (QGIS) so that each accident can be visualised as a point. In 2019, a total of 87,253 accidents involving a bicycle occurred in Germany. Of these, 86,066 could be included in the GIS (for 1187 accidents, the coordinates were implausible or not available), with 75,614 involving at least one CB, 10,643 involving at least one P25 and 191 involving at least one P25 and at least one CB. The 86,066 accidents of the year 2019 imported into the GIS form the database for the following RS analysis. Using the accident ID, information from the accident database could be assigned to each map point.

In addition to the location of the accident and information on the involvement of a P25 or a CB, information on whether a P25 or CB user was severely injured was also coded for each accident. This variable was coded 1 (yes) if a P25 or CB user was seriously (hospitalised for at least 24 h) or fatally (died within 30 days after an accident due to its consequences) injured, otherwise 0 (no). Finally, the age and the gender of the injured cyclist, location of the accident and the other party's vehicle type were linked to every accident and used as proxies for geographical variables.

### 3.2.2. Geographical data

Motor vehicle density was calculated as the ratio of registered motor vehicles per 1000 inhabitants per district (variable MOTODENS). Information on the other road user involved was drawn from the accident data (variable OPPONENT).

Data on the gradient at the accident location were calculated using

the digital elevation model, available as raster data with a cell size of 10 × 10 metres (without information about the direction of travel) (variable SLOPE). The standard deviation of altitudes was calculated with every grid cell within a district (variable SDHEIGHT).

Turning next to demographic variables, the share of elderly persons was calculated as the share of inhabitants aged 65 or older of all inhabitants (variable SELDERLY), while the share of the female population was calculated as the share of female inhabitants of all inhabitants (variable SFEMALE). Information about the age and gender of injured cyclists (65 years and older or not (variable IELDERLY) and whether they were female or not (variable IFEMALE)) was drawn from the accident data.

To assess deprivation, we used the RKI's German Index of Social Deprivation (GISD), which estimates socio-economic inequalities at the regional level and includes three key dimensions of socio-economic status (education, occupation and income) [73]. The number of tourists was calculated as the total number of overnight stays in tourist accommodations in the district in the year 2019 per inhabitants (variable TOURISM).

Compactness was calculated at the district level as the ratio of population per area used for settlement purposes. According to the BBSR's (Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development) definition, this includes the land use types: residential, industrial and commercial, public facilities, recreational areas, cemeteries and transport areas (sub-types: road and street, rail, air and

shipping traffic) [79] (variable COMPACT). Information on whether the road ran through a sparsely populated area (rural road) or a densely populated area (urban road) came from the accident data (variable RURROAD).

### 3.3. Data analysis / regression models

The aim of this study is to investigate the relationship between accident severity (RS and AS) and several independent (explanatory) geographical variables. Since these phenomena have a spatial context, a spatial analysis is first carried out in which P25 and CB accidents and their severity are displayed on maps and interpreted visually. Afterwards, the AS and RS values for P25s and CBs are analysed using descriptive statistics. In order to obtain a spatial assessment of the distribution, not only is the output for the whole of Germany examined, but also for the districts divided into four types of district with different settlement structures (urban to rural), as defined by the BBSR [80].

Finally, the influence of geographical variables on accident severity is analysed. The classical method for this is to use statistical regression [81], which requires a dependent variable that is scaled metrically. We calculate RS as the number of severe accidents (an accident with at least one P25 / CB user who suffered severe (serious or fatal) injuries) per 1 million present population (the population as of 31.12.2019 and in addition the number of tourist overnight stays divided through 365 (to get an annual average)) per district. This is thus a metrically scaled variable and we use multiple linear regression to determine the

influence of geographical variance on RS.

For AS analysis, the data on injury severity are available on a binary (nominal) level, whereas the independent variables are either on a binary or on a metric scale. Therefore, binary logistic regressions were modelled to determine the probability with which an observation case can be assigned to the group of severe (1) or non-severe (0) accidents [82].

## 4. Results

### 4.1. Spatial overview and regional differences of severity

In order to obtain a first overview of the frequency and distribution of accidents, P25 and CB accidents were aggregated at the district level. The sum of severe accidents per district was set in relation to the corresponding present population to display the RS. The sum of severe accidents in the district was set in relation to the corresponding number of all accidents with personal injury involving a P25 to display AS for P25s, or alternatively involving a CB to display AS for CBs. The 401 districts are divided into seven quantiles, from dark green (quantile with the lowest values) to dark red (quantile with the highest values).

The left map in Fig. 2 shows the RS for P25s, and the right map shows the RS for CBs. 75,614 CB accidents took place in 2019 (see Section 3.2.1), seven times more than the 10,643 P25 accidents. 2707 accidents involved severely injured P25 users and 12,869 severely injured CB users (see Table 3 for statistics). Since the number of severely injured CB

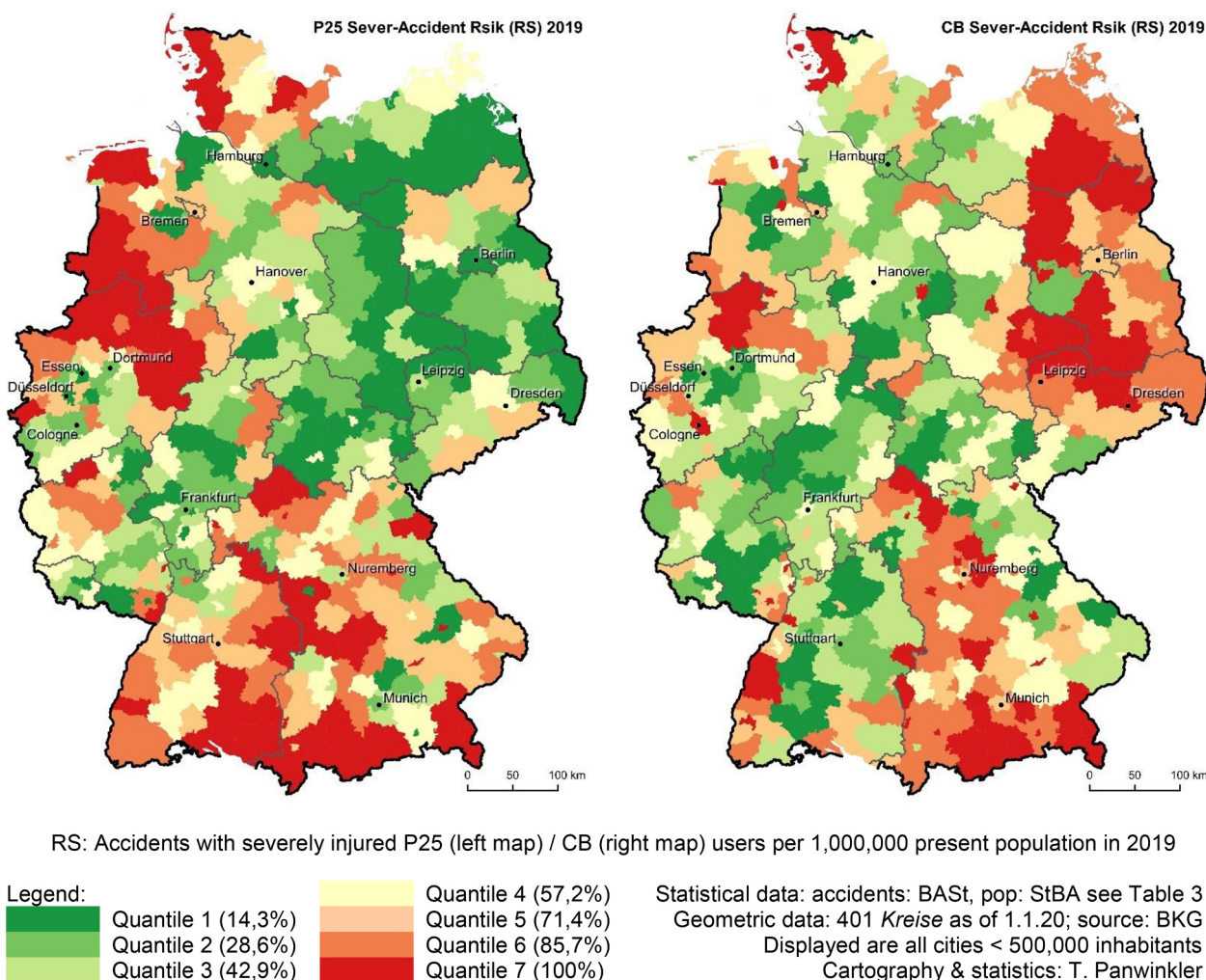


Fig. 2. Severe accident risk (RS) for P25s and CBs in Germany, 2019.

**Table 3**  
Regional differentiation of bicycle accidents.

Regional differentiation		Study area Present Pop 2019	Accident with at least one P25 user involved						Accident with at least one CB user involved					
code	district type		Accidents (with any injured)		Accidents with at least one P25 user severely injured		acc. severity		Accidents (with any injured)		Accidents with at least one CB user severely injured		acc. severity	
			count	share acc.	count	share injury	RS	AS	count	share acc.	count	share injury	RS	AS
1	Independent metropolis*	24,898,885	2515	23%	465	17%	18.7	184.9	32,296	42%	4025	31%	161.7	124.6
2	Urban district	32,550,176	4871	45%	1230	45%	37.8	252.5	24,361	31%	4430	34%	136.1	181.8
3	Rural district with densification tendencies	14,495,351	1952	18%	555	21%	38.3	284.3	11,201	14%	2272	18%	156.7	202.8
4	Sparsely populated rural district	12,554,179	1468	14%	457	17%	36.4	311.3	9622	12%	2142	17%	170.6	222.6
Total		84,498,591	10,806	100%	2707	100%	32.0	250.5	77,480	100%	12,869	100%	152.3	166.1

AS = severely injured per 1000 accidents. RS = Accidents with severely injured per 1 M resident population.

Share acc. = share of accidents with any injury of the respective district type on total number of accidents with any injury.

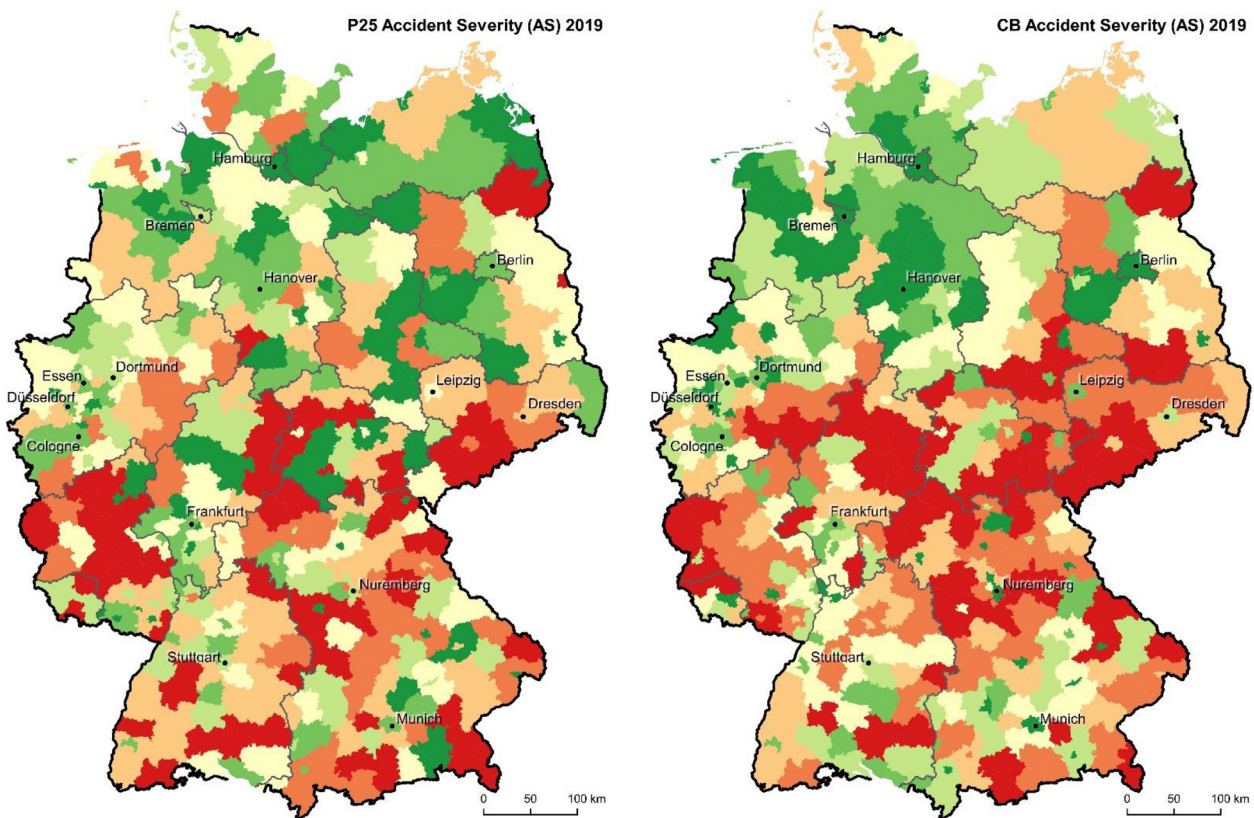
Share injury = share of accidents with severe injury of the respective district type on total number of accidents with severe injury.

\* district type 1: "kreisfreie Städte" meaning administratively independent cities not belonging to a district ("Kreis").

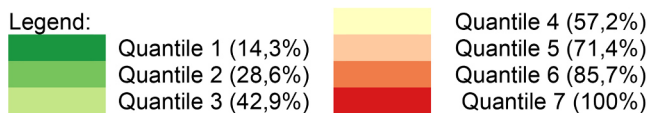
users is five times higher than the number of severely injured P25 users, the average RS for CBs is also five times higher. Apart from these differences in dimensions, further interesting patterns of spatial distribution emerge.

For P25s, the highest RS can be found in the southern and southernmost (mountainous) regions, as well as in the northwest (including most of the North Sea coast areas) – both mountainous and coastal areas

are holiday destinations where pedelecs are attractive. The lowest RS can be found in central and eastern regions of the country as well as in the small-area districts (mostly urban areas). High RS for CBs can be found in the southernmost, mountainous areas and to a lesser extent in the southwest (such as the holiday destinations around Lake Constance). Higher RS can also be found in eastern regions and small-area (urban) districts, which could indicate differences between the former East and



AS: Accidents with severely injured P25- (left map) / CB- (right map) users per 1,000 accidents with injured in 2019



Statistical data: accident data: BAST, see Table 3  
Geometric data: 401 Kreise as of 1.1.20; source: BKG  
Cartography & statistics: T. Panwinkler

**Fig. 3.** Accident Severity (AS) of P25 and CB Accidents in Germany, 2019.

West German regions.

Fig. 3 shows the AS, i.e. the number of accidents where P25 users were severely injured (killed or seriously injured) in relation to the number of all accidents involving a P25 on the left map, and correspondingly for CBs on the right map. The average AS of P25 accidents

(249) is much higher than the average AS of CB accidents (166) (see Table 3 for statistics). Both maps show a concentration of the highest AS rates in the centre of Germany (a band from Saarland to Saxony) and (slightly less) in the south of the country, with high rates also in the southern border (mountainous) regions but not in the coastal regions.

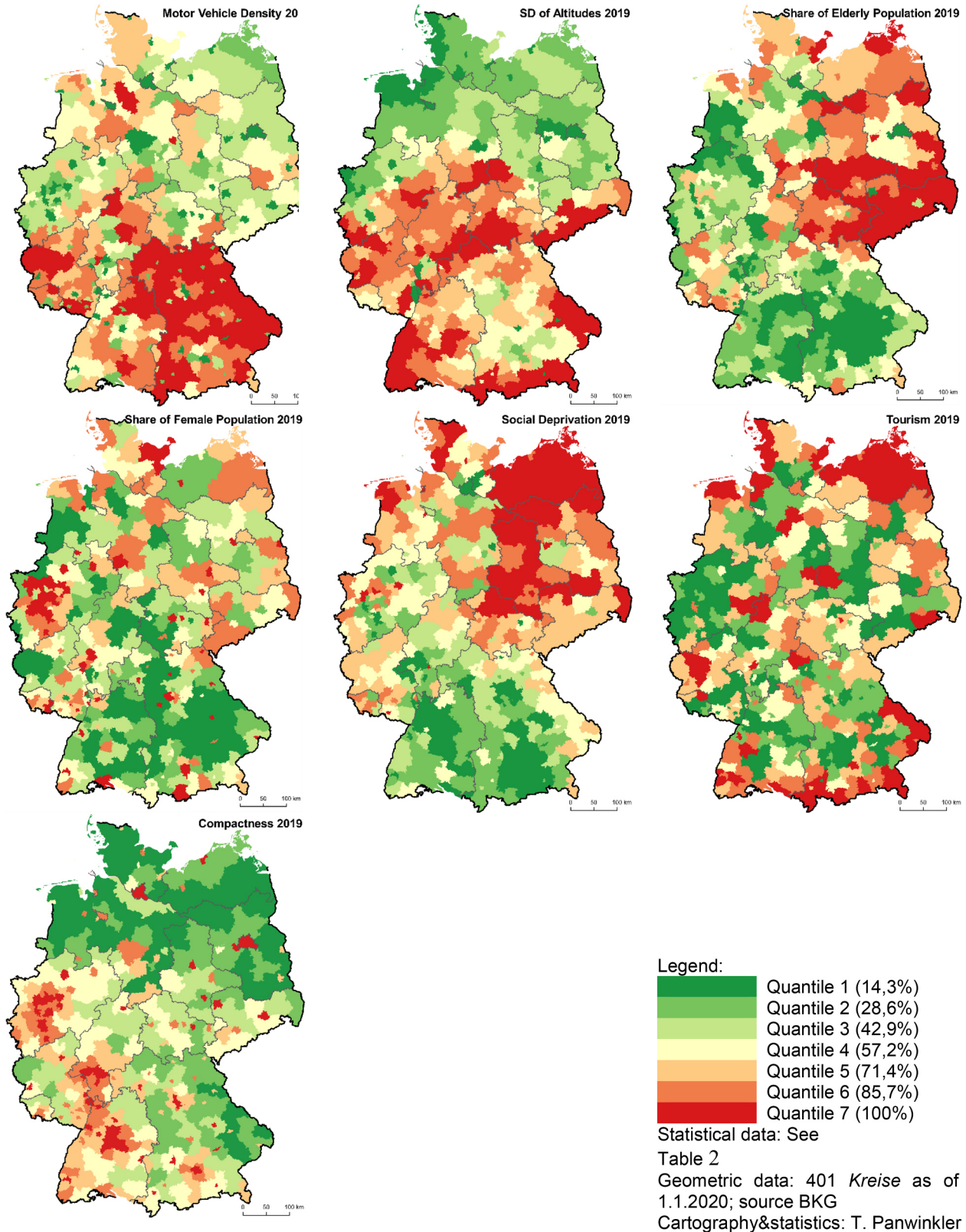


Fig. 4. Maps of geographical variables and regional categorisation.

The northwest, in which the RS is high (especially for P25) has very low AS for both types of vehicles. Small-area districts, often urban, have very low AS, whereas large-area regions (surrounding areas or rural areas) have higher AS. In addition, high AS rates for CBs were revealed in the eastern regions, whereas high AS rates for P25s could be found in a band of regions stretching from Cologne southwards along the Rhine – a typical tourist cycling route.

In order to verify the visual impression, the districts (and the accidents that occurred in them) were assigned to the four settlement-structure district types of the BBSR [80], with 1 being most urban and 4 being most rural. They were analysed using descriptive analysis (see Table 3).

Table 3 gives an overview of all accidents, severe accidents and their distribution over district types for P25s and CBs. The RS (number of severely injured bicyclists per 1000,000 present population) for P25s is clearly lowest in the most urban Type 1 districts, with all other district types having twice as high RS. The RS of CBs is highest in the most rural Type 4 regions, but it is lower in the intermediate Types 2 and 3 than in the most urban Type 1 districts. An important finding here is that Types 1 and 2 are the most populated and have the highest absolute number of bicycle accidents (P25 as well as CB), but the risk of severe bicycle accidents is highest in rural regions (for P25s in Type 3 and CBs in Type 4). The AS is the number of severe accidents per 1000 accidents of the respective bicycle type. The values for P25s and CBs are directly comparable. The AS for P25s is 250.5, clearly higher than the AS for CBs (166.1). Hence, P25 accidents are more often severe than CB accidents. Differentiated by district type, the AS for both vehicles is lowest in metropolitan areas (Type 1) and highest in sparsely populated rural districts (Type 4). The more rural the district, the higher the probability that a bicycle accident is severe (with the ratio of P25-AS to CB-AS of about 1.5 for all district types).

#### 4.2. Influence of geographical variables

After showing in the previous section that severity differs regionally, this section examines whether the geographical variables found in the literature analysis (Section 2) influence the severity of accidents (RS and AS). For this purpose, the defined geographical variables are analysed descriptively, the model is adjusted on this basis and then the hypotheses defined in Section 2 are tested using regression analyses.

##### 4.2.1. Distribution of geographical variables

Fig. 4 visualises the spatial distribution of the geographical variables. Each map represents one geographical variable. The 401 districts are divided into seven quantiles, from dark green (quantile with the lowest values) to dark red (quantile with the highest values).

Regions in the south of the country have the highest motor vehicle density (MOTODENS), especially Bavaria, whereas northern regions have much lower values. Urban districts have the lowest density, with the exception of those with the headquarters of car manufacturers, such as Wolfsburg.

Districts along the southern border (Alpine regions), in the southwest border region (Black Forest) and along a band from central west (Eifel) to east (Erzgebirge) have the highest standard deviation of altitudes (SDHEIGHT). Districts in the north, especially on the North Sea coast and most urban districts have the lowest SD.

Turning next to demographics, it can be seen that districts in the east of the country (except for Berlin and its neighbouring districts) have the highest shares of elderly population (SELDERLY), while districts in the south and northwest have the lowest. This may indicate differences between East and West German regions. The highest shares of female population (SFEMALE) are found in the urban centres, followed by some of the surrounding districts. However, these differences are so small across the entire country that no reliable statements can be made.

Districts in the east of the country, especially along the coast and in Saxony-Anhalt have the highest indices of social deprivation (GISD), as

do some other coastal regions and some urban districts in the Ruhr area. Districts in the south, especially around the economic centres of Munich and Stuttgart, have lowest deprivation indices.

Districts with the highest rates of tourist overnight stays (TOURISM) are found along the northern (coast) and southern borders (mountains) and in well-known metropolises such as Munich, but also in the (business) tourism hotspots like Frankfurt/Main.

Compactness (COMPACT) was assessed using population density in the areas used for settlement purposes. As expected, it is highest in the urban districts over the entire country, in the western part (to a lesser extent), and in the regions adjacent to the urban centres. In the east and southeast of the country, urban centres with high densities are neighbored by rural, low-density districts.

Table 4 shows the results of the descriptive analysis with the minimum, maximum and mean values; standard deviations and, in order to make the standard deviations of the individual variables comparable, the relative standard deviations (RSD, calculated as SD relative to the mean value) of the presented geographical variables for Germany (401 districts) and mean values for the four district types. Most variables have the lowest means in the urban, mostly Type 1 districts, and the highest values in the rural, mostly Type 4 districts. SFEMALE and COMPACT have an inverse distribution with lowest values in Type 4 districts. SDHEIGHT has highest means in Type 2 districts, while tourism and deprivation have lowest means in Type 2 districts. The SFEMALE differences between the four types of region are very small. The RSD is correspondingly high, whereas it is relatively low for other variables.

Table 5 shows the correlation matrix of geographical variables. The directions of the coefficients consistently correspond to our expectations. For example, the MOTODENS is high in the districts where the SDHEIGHT is high and low in the districts where GISD is high. The highest correlation is found between SELDERLY and GISD (0.54), the lowest between COMPACT and (low) MOTODENS (-0.69). For further interpretations see Section 5.2.

##### 4.2.2. Model adjustments based on the findings from the descriptive analysis

Some of the maps (Fig. 4) show different spatial distributions in the new (former East Germany/GDR) and the old federal states (former West Germany/FRG). Therefore, a variable "new federal state" (NEWFEDLND, yes/no, with Berlin as an old federal state) is also included in the regression analyses.

Table 4 and Fig. 4 show that the proportion of women in the population of the individual districts differs only very slightly (between 48.7 % and 52.5 %, SD 0.6 / RSD 79.9). We consider this difference to be too small to draw conclusions from and have therefore excluded the variable "share of female population" from the RS model.

##### 4.2.3. Impact of geographical variables

To evaluate the impact of the geographical variables, multiple linear regression was performed for the RS model and binary logistic regressions for the AS model, both for P25 and CB accidents. Results for the RS model are displayed in Table 6, including regression coefficients, standardised coefficients (Beta) and significance levels for each geographical variable. Coefficients indicate the influence of the respective geographical variable on the dependent variable RS (severe accidents per 1000,000 present population) where a higher coefficient represents a higher probability for a high RS. The results for the AS model are displayed in Table 7. The regression coefficients (Beta) represent the probability of an accident being severe (a positive Beta value indicates a higher probability that the dependent variable will take the value 1 = severe injury; a negative Beta value indicates a higher probability that the value of the dependent variable will be 0 = no severe injury), while the significance level and the odds ratio show the level of influence of the variables on the probability of an accident being severe or not [82].

The RS model includes 401 cases (which are the districts) for both

**Table 4**  
Descriptive statistics of geographical variables.

(n = 401 districts)				Average of all German districts					Settlement-structure district types			
Group	Category	Unit	Severity	Min	Max	Mean	SD	RSD	Type 1 Mean	Type 2 Mean	Type 3 Mean	Type 4 Mean
Traffic	Motor vehicle density	[vehicles/pop.]	RS	390.8	1195.8	732.9	112.2	6.5	572.4	749.5	762.0	788.1
Road environment	Stand. Dev. Altitudes	[m]	RS	1.1	487.5	64.9	61.1	1.1	35.3	76.6	62.1	72.0
Demographic	Elderly Population	[%]	RS	15.6	32.7	22.6	3.0	7.6	20.2	22.1	23.2	24.1
	Female Population	[%]	RS	48.7	52.5	50.6	0.6	79.9	50.9	50.7	50.4	50.4
Socio-Economic	Deprivation	Index	RS&AS	0.0	100.0	44.5	17.0	2.6	42.7	36.7	47.0	53.3
	Tourism overnight stays	[nights/pres. pop.]	RS&AS	0.0	60.8	6.0	7.3	0.8	4.4	4.1	6.3	9.4
Land use	Compactness	[pop./settlement km <sup>2</sup> ]	RS	852.8	10,788.9	3274.6	1746.3	1.9	6091.6	3438.9	2422.9	2046.3

**Table 5**  
Correlation matrix of geographical variables on district level.

(n = 401 districts)	MOTODENS	SDHEIGHT	SELDERLY	SFEMALE	GISD	TOURISM	COMPACT	NEWFEDLND
MOTODENS	1.00	<b>0.28</b>	<b>0.10</b>	-0.43	-0.19	<b>0.14</b>	-0.69	-0.23
SDHEIGHT	<b>0.28</b>	1.00	<b>0.09</b>	-0.03	-0.22	<b>0.30</b>	-0.07	-0.08
SELDERLY	<b>0.10</b>	<b>0.09</b>	1.00	<b>0.25</b>	<b>0.54</b>	<b>0.15</b>	-0.43	<b>0.63</b>
SFEMALE	-0.43	-0.03	<b>0.25</b>	1.00	0.05	0.07	<b>0.34</b>	<b>0.07</b>
GISD	-0.19	-0.22	<b>0.54</b>	0.05	1.00	0.06	-0.29	<b>0.46</b>
TOURISM	<b>0.14</b>	<b>0.30</b>	<b>0.15</b>	0.07	0.06	1.00	-0.17	0.02
COMPACT	-0.69	-0.07	-0.43	<b>0.34</b>	-0.29	-0.17	1.00	-0.14
NEWFEDLND	-0.23	-0.08	<b>0.63</b>	0.07	<b>0.46</b>	0.02	-0.14	1.00

Bold coefficients indicate significance on 95% level (two-tailed).

**Table 6**  
RS regression model.

Multiple linear regression analysis			Accident with at least one P25 user involved						Accident with at least one CB user involved					
Group	Category	Var. level	Model 1a			Model 1b			Model 2a			Model 2b		
			Coef	Beta	sig.	Coef	Beta	sig.	Coef	Beta	sig.	Coef	Beta	sig.
Traffic	Motor vehicle density	metric	-0.002	-0.070	0.34	-0.005	-0.177	<b>0.02</b>	-0.027	-0.413	<b>0.00</b>	-0.022	-0.333	<b>0.00</b>
Road environment	SD of altitudes	metric	0.008	0.162	<b>0.00</b>	0.008	0.157	<b>0.00</b>	-0.001	-0.005	0.92	-0.0002	-0.002	0.97
Demographic	Share of elderly population	metric	-0.302	-0.306	<b>0.00</b>	-0.132	-0.134	<b>0.04</b>	0.106	0.042	0.49	-0.220	-0.088	0.22
Socio-Economic	Index of social deprivation	metric	-0.027	-0.154	<b>0.01</b>	-0.026	-0.150	<b>0.01</b>	-0.149	-0.341	<b>0.00</b>	-0.150	-0.344	<b>0.00</b>
	Tourism overnight stays	metric	0.128	0.321	<b>0.00</b>	0.123	0.308	<b>0.00</b>	0.242	0.239	<b>0.00</b>	0.252	0.249	<b>0.00</b>
Land use	Compactness	metric	-0.001	-0.291	<b>0.00</b>	-0.001	-0.338	<b>0.00</b>	-0.001	-0.284	<b>0.00</b>	-0.001	-0.248	<b>0.00</b>
Model extension	New federal state	0/1 dummy	-	-	-	-2.114	-0.284	<b>0.00</b>	-	-	-	4.067	0.216	<b>0.00</b>
Constant	Constant		13.196	0.000	<b>0.00</b>	12.071	0.000	<b>0.00</b>	42.170	0.000	<b>0.00</b>	44.333	0.000	<b>0.00</b>
Model			cases (n)	r <sup>2</sup>	sig.	cases (n)	r <sup>2</sup>	sig.	cases (n)	r <sup>2</sup>	sig.	cases (n)	r <sup>2</sup>	sig.
			401	0.27	<b>0.00</b>	401	0.31	<b>0.00</b>	401	0.12	<b>0.00</b>	401	0.14	<b>0.00</b>

P25s and CBs. The AS model includes 10,883 cases for P25s and 80,655 cases for CBs. Within the regression, one case includes one P25/CB involved in an accident. As one accident could involve more than one P25/CB, the number is higher than the actual number of accidents (for example, an accident with two P25s would be included as two cases). Both models turn out to be significant (< 0.05), with P25 models having higher r<sup>2</sup> than CB accidents.

Within the RS model for P25s, the hypotheses for variables

SDHEIGHT and TOURISM (one tailed, with directions of the coefficients as expected) and SELDERLY and COMPACT can be accepted, since their significance level is reached, meaning the higher the standard deviation of altitudes or the more tourist overnight stays in a region, the higher the RS for P25s. On the other hand, the lower the share of elderly population and the less compact a region, the higher the RS for P25s. MOTODENS does not produce a significant result, GISD does not produce the expected positive coefficients. Therefore, the RS hypotheses we have

**Table 7**  
AS regression model.

Binary logistic regression analysis			Accident with at least one P25 user involved						Accident with at least one CB user involved					
			Model 1a			Model 1b			Model 2a			Model 2b		
Group	Category	ref. Categ.: 0=no	Dependent variable: severe injury of p25 user:			Dependent variable: severe injury of p25 user:			Dependent variable: severe injury of cb user:			Dependent variable: severe injury of cb user:		
			Beta	odds	sig.	Beta	odds	sig.	Beta	odds	sig.	Beta	odds	sig.
Traffic	Opponent was motor vehicle	ref. Categ.: 0=no	0.340	1.405	0.00	0.340	1.405	0.00	0.239	1.270	0.00	0.239	1.270	0.00
Road environment	Gradient at accident site	metric	0.029	1.029	0.00	0.029	1.030	0.00	0.029	1.029	0.00	0.029	1.029	0.00
Demographic	Injured cyclist aged 65+	ref. Categ.: 0=no	0.532	1.702	0.00	0.493	1.637	0.00	0.658	1.930	0.00	0.531	1.700	0.00
	Injured cyclist female	ref. Categ.: 0=no	-0.062	0.940	0.19	-0.104	0.901	0.09	0.004	1.004	0.85	-0.074	0.929	0.00
Socio-Economic	Index of Social Deprivation	metric	0.001	1.001	0.43	0.001	1.001	0.43	0.004	1.004	0.00	0.004	1.004	0.00
	Tourism overnight stays	metric	-0.001	0.999	0.55	-0.001	0.999	0.55	-0.002	0.998	0.17	-0.002	0.998	0.19
Land use	Accident on rural road	ref. Categ.: 0=no	0.560	1.750	0.00	0.561	1.752	0.00	0.768	2.156	0.00	0.772	2.164	0.00
Model extension	Injured cyclist female and aged 65+	ref. Categ.: 0=no	-	-	-	0.101	1.107	0.28	-	-	-	0.330	1.391	0.00
Constant	Constant		-1.776	0.169	0.00	-1.760	0.172	0.00	-2.272	0.103	0.00	-2.246	0.106	0.00
Model	cases: n =		10,883			10,883			80,655			80,655		
	yes/severe (1) =		2659			2659			12,606			12,606		
	no/not severe (0) =		8224			8224			68,049			68,049		
	Summary													
	Pseudo R <sup>2</sup> : Nagelkerke		0.06			0.06			0.05			0.05		
	Sig.		0.00			0.00			0.00			0.00		

proposed regarding these two last variables and P25s must be rejected. The coefficients of both variables are negative. This probably means that a higher motor vehicle density or higher social deprivation could lead to a lower RS for P25s.

For CBs, the RS hypotheses for variables TOURISM (one tailed, with direction of the coefficients as expected), MOTODENS and COMPACT can be accepted, since their significance level is reached. This means the higher the number of tourist overnight stays, the higher the RS for CBs, but also the higher the motor vehicle density or compactness, the lower the RS for CBs. SELDERLY and SDHEIGHT do not produce significant results, SDHEIGHT and GISD are not directed as expected. Therefore, the corresponding RS hypotheses for CBs must be rejected. The coefficients of SDHEIGHT and GISD are negative. This probably means that a higher SD of altitudes or higher degree of social deprivation could lead to a lower RS for CBs. The SELDERLY coefficient is positive, which means that a higher proportion of elderly people could mean a higher RS for CBs.

For the coefficients of variables SDHEIGHT, SELDERLY, TOURISM and COMPACTNESS (negative), numerical values for P25s are larger than for CBs, meaning that the influence on P25s tends to be larger (regardless of significance and direction).

Within the AS model, the hypotheses for variables OPPONENT, GRADIENT, IELDERLY, GISD (only CB) and RURROAD can be accepted, since the directions of the coefficients are as expected and their significance level is reached, except for the significance levels of GISD for P25s. (The GISD for CBs is displayed as significant, though its odds ratio is almost 1, which means it would not be significant by definition. This has to do with the large sample of the CB model with over 80,000: since the number of cases is also included in the significance, the odds ratio of 1.004 could also deliver a significant result with this number of cases. Therefore, the reliability of the significance value should be viewed with caution for all variables of the CB model.) The coefficients for IFEMALE are neither as expected nor significant for P25s, and are as expected but not significant for CBs. The coefficients for TOURISM are not directed as

expected.

RURROAD has the highest odds ratio, with the odds of OPPONENT and IELDERLY also being high and GRADIENT and GISD being only slightly positive. For the variable OPPONENT the odds ratio for P25s has a greater numeric value than for CBs, meaning the influence on P25s tends to be larger.

**4.2.3.1. Model extension.** In the second step, both models were extended by the additional variable NEWFEDLND (new federal state = "Bundesland"), the AS model was also extended by the additional variable ELDFEMU (user is a woman and 65 years or older). They can be found as Model 1b (for P25s) and 2b (for CBs) in Tables 6 and 7.

Adding the variable NEWFEDLND to the RS model increases the r<sup>2</sup> in each case. In the extended RS model for P25s, MOTODENS shows significant results and, together with COMPACTNESS, reaches a slightly higher (negative) value of Beta. The Beta of the variable SELDERLY is clearly weakened. In the extended RS model for CBs, the variable MOTODENS achieves a slightly lower (negative) value of the Beta, but there is a clear difference in the variable SELDERLY, which originally had a positive Beta and now has a negative Beta in the model extended with the variable "new federal state". The proportion of older people thus has a different influence on RS when NEWFEDLND is included.

The extension of the AS models with the variable NEWFEDLND brought negligible changes for the r<sup>2</sup> as well as for the coefficients. Therefore, we removed NEWFEDLND from AS models. Hence, whether the accident or the district in which the accident occurred is in a new federal state has an influence on the variables in RS but not in AS.

The addition of the variable ELDFEMU to the AS models brought, as expected, changes in the ELDUSER and FEMUSER variables. ELDUSER still showed significant results and positive coefficients for both P25s and CBs. FEMUSER became significant with negative coefficients for both types of bicycles (originally positive for CBs). Coefficients for the new variable ELDFEMU are positive in each case, the odds ratio is higher for CBs than for P25s, and the variable is significant in the CB model.

## 5. Discussion

### 5.1. Summary

Our analyses show that for German regions (and their population) the risk of severe accidents (the Risk of Severe bicycle accidents RS, which is a ratio of the number of severe accidents to the present population of a district, involving severely injured users of bicycles with electric motor support (Pedelects 25, P25)) is lower than the risk of severe accidents involving severely injured users of conventional bicycles (CB). However, the probability of a severe injury in case of an accident (the “Accident Severity” AS, a ratio of the number of severe bicycle accidents to the total number of bicycle accidents) is higher for P25s than for CBs. The spatial analysis (Section 4.1) shows that for both types of vehicles, the severity (RS and AS) increases with the rurality of the region. There are indications that accident severity (RS and AS) is higher in mountainous and tourist regions. As shown in the regression analyses in Section 4.2, geographical variables have an influence on both severity indicators (RS and AS) but they could influence them in different directions and with different intensity. This is also true regarding differences in the influence of geographical variables on the severity of accidents involving different vehicle types (P25s and CBs).

### 5.2. Interpretation

In the following, we derive conclusions from the accepted hypotheses and explain some reasons for hypotheses being rejected. We first address the variables of the RS models and then the variables of the AS models (for P25s and CBs respectively):

In the extended **RS models**, the variable “motor vehicle density” (MOTODENS) produced significant results with negative coefficients for both vehicle types (P25s and CBs), suggesting that the RS decreases with higher motor vehicle density. This is contrary to many sources presented in the literature review, which assume that higher motor vehicle density leads to an increase in RS. However, there are also sources that assume that RS decreases, which is why we formulated the two-tailed hypothesis. An explanation for a lower RS at higher motor vehicle density could be that there may be fewer bicycles on the road, which reduces the exposure.

The influence of standard deviation of heights (SDHEIGHT) on RS for P25s is as expected (positive coefficient): the higher the standard deviations of heights in a region, the higher the risk of severe P25 accidents. As results are significant, the hypothesis for P25s can be accepted. But the RS for CBs shows a negative coefficient. This is the only variable within the extended RS models that produces coefficients with different directions for P25s and CBs. One explanation for this could be that CBs are used less in the mountainous regions. Therefore, fewer CB accidents take place there, and consequently the RS for CBs is lower.

The variable “elderly population” (SELDERLY) is significant only for P25s, so only the hypothesis for this vehicle type can be accepted. Extended RS models show negative coefficients of the variable. This means that the higher the proportion of older people, the lower the RS. Based on our hypotheses, we assume that a high proportion of older people could mean less road traffic (especially commuter traffic) and thus a lower exposure. Other possible explanations include the idea that a high proportion of elderly population could mean a low proportion of younger population and young (especially novice) drivers cause more serious accidents than average. It may also be the case that in the areas with a high share of elderly people, other road users pay more attention to them.

The influence of the variable “share of female population” (SFE-MALE) could not be analysed for RS, as differences between regions were too small.

The coefficients of the variable “social deprivation” (GISD) of the RS models are negative and not significant for both vehicle types, and therefore hypotheses must be rejected. Nevertheless, it is possible to

identify a tendency that the risk of severe bicycle accidents decreases as the deprivation of a region increases. One reason for this could be that deprived people may travel less by car (Table 5 shows a negative correlation with motor vehicle density) or by bicycle, which leads to lesser exposure. The impact on CBs is even higher than on P25s. Perhaps this can be explained by the fact that P25s are more expensive than CBs and are therefore less frequently used in deprived areas, leading to lower exposure. The RS models provide significant results with positive coefficients for the tourism variable (TOURISM) for both vehicle types. The hypothesis can therefore be accepted that the more tourists there are in a region, the higher the risk of severe bicycle accidents.

The RS models show that the more compact (COMPACT) a district is or the higher the proportion of population living in urban areas, the lower the risk of severe bicycle accidents (for P25s even lower than for CBs). The coefficients reach the significance level, so the hypothesis can therefore be accepted.

In the extended **AS models**, the coefficients for the variable OPPOSITION (accident opponent was a motor vehicle) in the AS models are positive and significant for both vehicle types. Hence the hypothesis can be accepted that bicycle accidents involving motor vehicles as the other party release a higher impact energy and therefore result in more severe injuries and a higher AS.

As hypothesised, a higher gradient (GRADIENT) results in a higher AS. In both AS models (P25s and CBs), the coefficients are significantly positive, meaning that the higher the gradient at the accident location, the higher the probability that an accident is severe.

AS models also show significant results with positive coefficients for the variable “elderly bicycle user” (IELDERLY): if the cyclist involved in the accident is 65 years or older, the risk of severe injuries is higher. Hence the hypothesis can be accepted. The only difference is that the effect is stronger for CBs than for P25s, which was not expected. Elderly P25 riders are probably more aware of dangers (for instance due to driving safety training) than elderly CB riders so that they can better avoid severe accidents. P25s may also be equipped with better components, for example, with better brakes that can better reduce the impact forces.

The original AS models did not produce significant results for the variable IFEMALE (cyclist involved was female). The addition of the variable ELDFEMU (cyclist involved was elderly and female) then showed that women have a lower risk of a severe injury in an accident (negative coefficients) than men, but older women have a higher risk of a severe injury in an accident than older men. This may be because older women are, first, probably more fragile than older men; second, they live longer and therefore may use bicycles at an older age (and in an even more fragile condition) than men; and, third, fewer older women have a driving licence than men and may use bicycles more often. Conversely, this also means that young men have a higher risk (AS) of a severe bicycle accident than young women, which could be explained by a generally greater willingness to take risks [49].

In the AS models, the coefficients for deprivation (GDIS) are positive. This means that the more deprived the cyclist (described by the proxy deprived neighbourhood in which the bicycle accident occurs), the higher the probability that the cyclist will be severely injured in an accident – for CBs even higher than for P25s. The trend of the results is as expected but the results are only significant for CBs, hence only this hypothesis can be accepted.

The AS models do not provide significant results for the tourism variable (TOURISM) for either vehicle type. We used the variable as a proxy to test the assumption that the higher the number of tourist overnight stays in a region, the more likely it is that the injured cyclist was a tourist. The coefficients are, however, negative and hence the hypothesis must be rejected. This could mean that it may not be the tourists themselves who are more vulnerable in tourist regions. However, it seems much more likely that the chosen proxy variable is not precise enough. Additional information on the purpose of the journey seems all the more important here. The AS models showed that the

probability of a severe accident on roads in rural surroundings is significantly higher than on urban roads (for CBs even higher than for P25s).

### 5.3. Limitations

Shinar et al. (2018), Bjørnskau [83] and Barajas [84] show that the number of unrecorded bicycle accidents may be very high, which we also believe to be the case for Germany. The dataset of our study only includes accidents from the year 2019, hence it is impossible to analyse trends [17]. All analysed accidents occurred before the Covid 19 pandemic, which makes it more complex to predict future scenarios [85]. This study was carried out from the perspective of infrastructure planning, therefore the place of the accident (POA) is used as a reference point. For other issues, the place of residence (POR) of bicycle users or accident victims could be a more relevant reference point (examples here include: [86,64,31]). However, these three sources show that the difference between POA and POR for cycling is not as great as it is for motor vehicles, since most cyclists travel close to their place of residence. Whether and to what extent the travel patterns of P25 users differ from those of CB users cannot be clarified, since no residence data were available. The tourism variable, which addresses one main motivation for cyclists to travel outside their region, was integrated into this study to account for this uncertainty. Barajas [84] shows that information on the number and distances of routes travelled can be one of the determining factors of accident severity, however, due to the lack of data we could use only the proxy of vehicle share. In this context, the type, length and quality of existing cycling facilities or the proportion of roads with such facilities would also be an important factor, as these facilities can contribute to cyclists' safety. Unfortunately, no complete data are available on this. Furthermore, Panwinkler and Holz-Rau [17] already established that experience with the vehicle and frequency of use have an important influence on accident severity. New services such as bike sharing make this even more important, as such services may attract users who lack experience. Unfortunately, however, no information on this is available in the accident reports, so we were unable to take this into account. In addition to the P25, there are also faster pedelecs (S-Pedelec or P45) available. As outlined in the introduction, these are not categorised as bicycles in Germany but as motor vehicles. This means that S-Pedelecs are subject to completely different requirements than bicycles, for example in terms of registration and insurance, but also in terms of road use and user obligations, such as the need to wear a helmet. As the focus of this paper is on different types of bicycles, P45s are excluded. Also, P45s account for only a very small number of accidents in Germany (P45s were involved in 381 accidents in Germany in 2019, compared to P25s involved in more than 10,000 accidents and CBs involved in more than 80,000 accidents), an insufficient volume for our analysis. Nevertheless, P25s and P45s often look very similar, which can lead to further confusion.

Finally, the MAUP (modifiable areal unit problem) always has to be kept in mind when analysing data on a regional level, as the drawing of boundaries leads to a certain inaccuracy in the categorisation of data and there are issues of mutual influence [87].

### 5.4. Recommendations

As geographical variables have various influences on accident severity, it seems necessary to integrate them more systematically and intensively into road safety work in the future. The study shows that, in addition to the basic distinction between urban and rural areas, geographical variables can provide other important information. However, it also appears that the available data (e.g. mileage or trip purposes, bicycle-tourism data) should be of higher quality (smaller scale, more complete, more frequent) and that additional data (e.g. on sharing, existence and type of cycle facility) are also needed. The bicycle market shows an increasing number of different new types of bicycles, such as

cargo bikes or various trailers, which should be integrated in accident registration forms. Geographical variables also open up new possibilities. Many cities, regions and countries have committed themselves to sustainable mobility plans (such as SUMP) and focus on active forms of mobility such as cycling. They can play an important role in evaluating the achievement of their objectives, particularly in terms of safety [88].

## 6. Conclusions

Geographical factors have an important influence on the severity of bicycle accidents. Severe bicycle accidents are not evenly distributed in space. Traffic, road characteristics and demographic, socio-economic and land-use phenomena have different impacts on accident severity in different regions. The diversity of effects has also increased since Pedelec 25 bicyclists use routes that are unattractive for conventional bicycles (too steep, too long, etc.). In this paper, we have identified relevant geographical factors and shown their influence on two types of injury severity: risk of severe bicycle accidents per region (RS) and probability of severe injuries in case of accident (AS). Spatial analyses indicate that for both bicycle types, severity increases in rural, mountainous or tourist regions. The regression analyses of RS for both vehicle types (P25s and CBs) showed significant effects of a range of variables. Thus, the risk of severe bicycle accidents per region increased as the rate of registered motor vehicles decreased and as social deprivation in the region increased (which was not expected). Similarly, higher shares of tourism and less compact settlement structures (suggesting urbanity/rurality effects) were linked to a higher risk of severe bicycle accidents per region. The risk of severe accidents also increased with altitude differences and with lower shares of elderly population, but both of these factors only for pedelecs. The effects of geographical variables also tended to be larger for pedelecs. Binary logistic regression analyses of AS reveal that geographical factors also influence the probability of severe injuries in case of an accident. Consequently, the severity of accidents varies not only between the regions but also between pedelec 25s and conventional bicycles. Therefore, we recommend including additional geographical factors in accident analysis in the future. Data on some of these variables are already available and sufficient, while for other variables, the data are not available at an appropriate scale or need to be collected.

### CRediT authorship contribution statement

**Tobias Panwinkler:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Christian Holz-Rau:** Supervision, Writing – review & editing. **Joachim Scheiner:** Supervision, Writing – review & editing.

### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### Data availability

Data will be made available on request.

### Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial or not-for-profit sectors.

## Acknowledgements

We want to thank Dr. Rashid Urmeew from BASt and Dr. Katharine Thomas for proof reading the manuscript.

## References

- [1] S.J. Leger, J.L. Dean, S. Edge, J.M. Casello, "If I had a regular bicycle, I wouldn't be out riding anymore": perspectives on the potential of e-bikes to support active living and independent mobility among older adults in Waterloo, Canada, *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 123 (2019) 240–254, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.009>.
- [2] A. Fyhri, H.B. Sundfør, Do people who buy e-bikes cycle more? *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.* 86 (2020) 102422, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102422>.
- [3] T. Jones, L. Harms, E. Heinen, Motives, perceptions and experiences of electric bicycle owners and implications for health, wellbeing and mobility, *J. Transp. Geogr.* 53 (2016) 41–49, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.04.006>.
- [4] A. Fyhri, E. Heinen, N. Fearnley, H.B. Sundfør, A push to cycling—exploring the e-bike's role in overcoming barriers to bicycle use with a survey and an intervention study, *Int. J. Sustain. Transp.* 11 (2017) 681–695, <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1302526>.
- [5] F. Rudolph, Promotion of pedelecs as a means to foster low-carbon mobility: scenarios for the german city of wuppertal, *Transp. Res. Proc.* 4 (2014) 461–471, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.11.035>.
- [6] H.T. Stenner, J. Boyen, M. Hein, G. Protte, M. Kück, A.A. Hanke, U. Tegtbauer, Everyday pedelec use and its effect on meeting physical activity guidelines, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17 (2020), <https://doi.org/10.3390/ijerph17134807>.
- [7] H.B. Sundfør, A. Fyhri, A push for public health: the effect of e-bikes on physical activity levels, *BMC Public Health* 17 (2017) 809, <https://doi.org/10.1186/s12889-017-4817-3>.
- [8] S. Cairns, F. Behrendt, D. Raffo, C. Beaumont, C. Kiefer, Electrically-assisted bikes: potential impacts on travel behaviour, *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 103 (2017) 327–342, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.03.007>.
- [9] I. Phillips, J. Anable, T. Chatterton, E-bikes and their capability to reduce car CO2 emissions, *Transp. Policy* 116 (2022) 11–23, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.11.019>.
- [10] M. Weiss, P. Dekker, A. Moro, H. Scholz, M.K. Patel, On the electrification of road transportation—a review of the environmental, economic, and social performance of electric two-wheelers, *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.* 41 (2015) 348–366, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.007>.
- [11] ZIV Zweirad-Industrie-Verband, 2022. Zahlen - Daten - Fakten zum Deutschen Fahrrad- und E-Bike-Markt 2021.
- [12] CONEBI - Confederation of the European Bicycle Industry, *European Bicycle Market 2017 edition: Industry and Market Profile*. Brussels, 2017.
- [13] velosuisse, 2021. Neuer Höchstwert bei den E-Bike-Verkäufen. Uerzlikon, Switzerland.
- [14] VSSÖ - Verband der Sportartikelherzeuger und Sportausrüster Österreichs, 2021. Presseausendung 4.5.21: fahrradverkaufszahlen 2020. Wien.
- [15] BOVAG - BOnd Van Automobielhandelaren en Garagehouders, 2020. Fietsen in de Statistiek 2007 - 2021 ~ Nederland ~.
- [16] STBA Statistisches Bundesamt, 2021a. Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe 7 - 2020. Wiesbaden, 370 pp.
- [17] T. Panwinkler, C. Holz-Rau, Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity, *Accid. Anal. Prev.* 154 (2021) 106082, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106082>.
- [18] BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2017. Pedelec? Aber sicher! (Folder). Bonn.
- [19] T. Panwinkler, C. Holz-Rau, *Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich*, *Z. Verkehrssicherheit* 65 (2019) 336–347.
- [20] European Parliament and Council, 2020. Regulation (EU) No 168/2013 of the European Parliament and of the Council of 15 January 2013 on the approval and market surveillance of two- or three-wheel vehicles and quadricycles (Text with EEA relevance)Text with EEA relevance. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2013/168/2020-11-14>.
- [21] E. Macioszek, I. Jurdana, Bicycle traffic in the cities, *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.* 117 (2022) 115–127, <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.8>. ISSN: 0209-3324.
- [22] T. Panwinkler, Data for evidence: defining, collecting and analysing specific data from pedelec accidents as an example of individual, targeted road safety work for new forms of mobility, in: Conference Paper. In: Contributions to the 10th International Cycling Safety Conference 2022 (ICSC2022), 2022. <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A82453/attachment/ATT-0/>.
- [23] A. Comi, A. Polimeni, C. Balsamo, Road accident analysis with data mining approach: evidence from Rome, *Transp. Res. Proc.* 62 (2022) 798–805, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.099.3>.
- [24] E. Macioszek, A. Granà, The analysis of the factors influencing the severity of bicyclist injury in bicyclist-vehicle crashes, *Sustainability*. 14 (2022) 215, <https://doi.org/10.3390/su14010215>, 2022.
- [25] UDV Unfallforschung der Versicherten (Ed.), 2017. *Verkehrssicherheit von Elektrofahrrädern*. Berlin, 26 pp.
- [26] J.P. Schepers, E. Fishman, P. den Hertog, K.K. Wolt, A.L. Schwab, The safety of electrically assisted bicycles compared to classic bicycles, *Accid. Anal. Prev.* 73 (2014) 174–180, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.09.010>.
- [27] T. Weber, G. Scaramuzza, K.U. Schmitt, Evaluation of e-bike accidents in Switzerland, *Accid. Anal. Prev.* 73 (2014) 47–52, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.07.020>.
- [28] Johnson, M., Rose, G. (Eds.), 2014. *Electric bikes in Australia: safety gains and some new concerns*.
- [29] P. Hertach, A. Uhr, S. Niemann, M. Cavegn, Characteristics of single-vehicle crashes with e-bikes in Switzerland, *Accid. Anal. Prev.* 117 (2018) 232–238, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.04.021>.
- [30] A. Ziakopoulos, G. Yannis, A review of spatial approaches in road safety, *Accid. Anal. Prev.* 135 (2020) 105323, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105323>.
- [31] C. Holz-Rau, J. Scheiner, *Geographical patterns in road safety: literature review and a case study from Germany*, *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.* 13 (2013) 99–122.
- [32] R. Elvik, T. Bjørnskau, Safety-in-numbers: a systematic review and meta-analysis of evidence, *Saf. Sci.* 92 (2017) 274–282, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.017>.
- [33] A. Fyhri, H.B. Sundfør, T. Bjørnskau, A. Laureshyn, Safety in numbers for cyclists—conclusions from a multidisciplinary study of seasonal change in interplay and conflicts, *Accid. Anal. Prev.* 105 (2017) 124–133, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.039>.
- [34] P.L. Jacobsen, Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling, *Injury Prev.: j. Int.Soc. Child Adolesc. Injury Prev.* 21 (2015) 271–275, <https://doi.org/10.1136/ip.9.3.205rep>.
- [35] R. Bhatia, M. Wier, "Safety in Numbers" re-examined: can we make valid or practical inferences from available evidence? *Accid. Anal. Prev.* 43 (2011) 235–240, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.08.015>.
- [36] R.B. Noland, M.A. Quddus, Analysis of pedestrian and bicycle casualties with regional panel Data, *Transp. Res. Rec.* 1897 (2004) 28–33, <https://doi.org/10.3141/1897-04>.
- [37] C. Holz-Rau, P. Hölderich, *Verkehrssicherheit und Höhenunterschiede - Unfälle in Nordrhein-Westfalen*, *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 62 (2016) 239–249.
- [38] Konrad, K., Steinberg, G., Holz-Rau, C., 2015. Leitfaden zur Radverkehrsförderung in Städten mit Höhenunterschieden. gefördert durch das BMVI: VB 1109, Dortmund, 69 pp. <https://www.aktivmobil-bw.de> (accessed 16 March 2022).
- [39] A. Jaber, J. Juhász, B. Csonka, An analysis of factors affecting the severity of cycling crashes using binary regression model, *Sustainability* 13 (2021) 6945, <https://doi.org/10.3390/su13126945>.
- [40] P.A. Crompton, H. Shen, J.R. Brubacher, M. Chipman, S.M. Friedman, M.A. Harris, M. Winters, C.C.O. Reynolds, M.D. Cusimano, S. Babul, K. Teschke, Severity of urban cycling injuries and the relationship with personal, trip, route and crash characteristics: analyses using four severity metrics, *BMJ Open* 5 (2015) e006654, <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-006654>.
- [41] K. Teschke, M.A. Harris, C.C.O. Reynolds, M. Winters, S. Babul, M. Chipman, M. D. Cusimano, J.R. Brubacher, G. Hunte, S.M. Friedman, M. Monro, H. Shen, L. Vernich, P.A. Crompton, Route infrastructure and the risk of injuries to bicyclists: a case-crossover study, *Am. J. Public Health* 102 (2012) 2336–2343, <https://doi.org/10.2105/AJPH.2012.300762>.
- [42] J.K. Kim, S. Kim, G.F. Ulfarsson, L.A. Porrello, Bicyclist injury severities in bicycle-motor vehicle accidents, *Accid. Anal. Prev.* 39 (2007) 238–251, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.07.002>.
- [43] S. Haustein, M. Möller, E-bike safety: individual-level factors and incident characteristics, *J. Transp. Health* 3 (2016) 386–394, <https://doi.org/10.1016/j.jth.2016.07.001>.
- [44] R. Weiss, C. Juhra, B. Wieskötter, U. Weiss, S. Jung, M. Raschke, Zur Unfallwahrscheinlichkeit von Senioren bei der Nutzung von E-Bikes [How probable is it that seniors using an e-bike will have an accident? - A new health care topic, also for consulting doctors], *Z. Orthop. Unfall.* 156 (2018) 78–84, <https://doi.org/10.1055/s-0043-120200>.
- [45] K. Gaster (Ed.), *Analysis of Pedelec Accidents in Germany, 2021*.
- [46] Z. Wang, S. Huang, J. Wang, D. Sulaj, W. Hao, A. Kuang, Risk factors affecting crash injury severity for different groups of e-bike riders: a classification tree-based logistic regression model, *J. Safety. Res.* 76 (2021) 176–183, <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.12.009>.
- [47] P. Schepers, K. Klein Wolt, M. Helbich, E. Fishman, Safety of e-bikes compared to conventional bicycles: what role does cyclists' health condition play? *J. Transp. Health* 19 (2020) 100961 <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100961>.
- [48] W.P. Vlakveld, D. Twisk, M. Christoph, M. Boele, R. Sikkema, R. Remy, A. L. Schwab, Speed choice and mental workload of elderly cyclists on e-bikes in simple and complex traffic situations: a field experiment, *Accident Anal. Prev.* 74 (2015) 97–106, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.10.018>.
- [49] A. Fyhri, O. Johansson, T. Bjørnskau, Gender differences in accident risk with e-bikes—Survey data from Norway, *Accid. Anal. Prev.* 132 (2019) 105248, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.07.024>.
- [50] J. Lee, M. Abdel-Aty, Q. Cai, Investigation of safety-in-numbers for pedestrians and bicyclists at a macroscopic level with various exposure variables, *Transp. Res. Rec.* 2674 (2020) 568–580, <https://doi.org/10.1177/0361198120953795>.
- [51] P. Edwards, J. Green, I. Roberts, C. Grundy, K. Lachowycz, *Deprivation and Road Safety in London: a Report to the London Road Safety Unit*, London, 2006, p. 127 (accessed 25 January 2022).
- [52] E. Vidal Tortosa, R. Lovelace, E. Heinen, R.P. Mann, Socioeconomic inequalities in cycling safety: an analysis of cycling injury risk by residential deprivation level in England, *J. Transp. Health* 23 (2021) 101291, <https://doi.org/10.1016/j.jth.2021.101291>.
- [53] D. Saha, P. Alluri, A. Gan, W. Wu, Spatial analysis of macro-level bicycle crashes using the class of conditional autoregressive models, *Accid. Anal. Prev.* 118 (2018) 166–177, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.02.014>.

- [54] H. Ding, N.N. Sze, H. Li, Y. Guo, Roles of infrastructure and land use in bicycle crash exposure and frequency: a case study using Greater London bike sharing data, *Accid. Anal. Prev.* 144 (2020) 105652, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105652>.
- [55] S.L. Chong, A. Tyebally, S.Y. Chew, Y.C. Lim, X.Y. Feng, S.T. Chin, L.K. Lee, Road traffic injuries among children and adolescents in Singapore - Who is at greatest risk? *Accid. Anal. Prev.* 100 (2017) 59–64, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.01.005>.
- [56] P. Wu, X. Meng, L. Song, Bayesian space-time modeling of bicycle and pedestrian crash risk by injury severity levels to explore the long-term spatiotemporal effects, *Phys. A: Stat. Mech. Applic.* 581 (2021) 126171, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126171>.
- [57] C. Siddiqui, M. Abdel-Aty, K. Choi, Macroscopic spatial analysis of pedestrian and bicycle crashes, *Accid. Anal. Prev.* 45 (2012) 382–391, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.08.003>.
- [58] E. Martin, A. Cohen, J.L. Botha, S. Shaheen, *Bikesharing and Bicycle Safety*, Mineta Transportation Institute Publications MTI Report, 2016, pp. 12–54.
- [59] K. Kim, J. Ghimire, P. Pant, E. Yamashita, Bikeshare and safety: risk assessment and management, *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* 9 (2021) 100276, <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100276>.
- [60] J. Lee, M. Abdel-Aty, X. Jiang, Multivariate crash modeling for motor vehicle and non-motorized modes at the macroscopic level, *Accid. Anal. Prev.* 78 (2015) 146–154, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.03.003>.
- [61] G. Prati, V. Marín Puchades, M.de Angelis, F. Fraboni, L. Pietrantonì, Factors contributing to bicycle-motorised vehicle collisions: a systematic literature review, *Transp. Rev.* 38 (2018) 184–208, <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1314391>.
- [62] O.J. Johansson, A. Fyhri, *Miniscenario: Økt omfang Av Elyskler /Ole Jørgen Johansson, Aslak Fyhri*, Transportøkonomisk institutt, Oslo, 2018, p. 40.
- [63] J. Scheiner, C. Borch, C. Holz-Rau, Raumstruktur und Verkehrssicherheit: verkehrsunfallbelastung in den Gemeinden Nordrhein-Westfalens, *disP - Plann. Rev.* 48 (2012) 46–58, <https://doi.org/10.1080/02513625.2012.702984>.
- [64] I. Faller, J. Scheiner, *Wo lebt es sich am sichersten? Strukturgleichungsmodell des Verkehrsunfallrisikos in Niedersachsen*, SSOAR, GESIS – Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften e.V., Mannheim, 2020. Online-Ressource.
- [65] M.B. Kamel, T. Sayed, The impact of bike network indicators on bike kilometers traveled and bike safety: a network theory approach, *Environ. Plann. B: Urban Anal. City Sci.* 48 (2021) 2055–2072, <https://doi.org/10.1177/2399808320964469>.
- [66] P. Blass, F. Schneider, N. Senitschnig, M. Skoric, M. Gretzl, P. Schober, *Geschwindigkeitsunterschiede ausgewählter Fahrradtypen*, KFV - Sicher Leben 19 (2019) 94. Viennaaccessioned 11 May 2022.
- [67] ASTRA Bundesamt für Strassen, 2017. *Elektrovelos - Auswirkungen auf Das Verkehrssystem*. Bern, 225 pp.
- [68] *UDV Unfallforschung der Versicherten, Unfallrisiko mit dem Pedelec, Unfallforschung kompakt 115 (2022) 12*. Berlinaccessioned 11 August 2022.
- [69] N. Kováčová, J.de Winter, A.L. Schwab, M. Christoph, D. Twisk, M. P. Hagenzieker, Riding performance on a conventional bicycle and a pedelec in low speed exercises: objective and subjective evaluation of middle-aged and older persons, *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.* 42 (2016) 28–43, <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.06.018>.
- [70] STBA Statistisches Bundesamt, 2021b. *Verkehrsunfälle - Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2020*. Wiesbaden, 49 pp.
- [71] Nobis, C., Kuhnimhof, T., 2018. *Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Bonn, Berlin. <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de>.
- [72] M. Bfl, M. Bflava, I. Müller, Critical factors in fatal collisions of adult cyclists with automobiles, *Accident Anal. Prev.* 42 (2010) 1632–1636, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.04.001>.
- [73] Robert Koch-Institut, 2018. *Regionale Unterschiede in der Gesundheit – Entwicklung eines sozioökonomischen Deprivationsindex für Deutschland*, 18 pp. (accessed 8 December 2021).
- [74] S. Mandic, C. Flaherty, C. Ergler, C.C. Kek, T. Pocock, D. Lawrie, P. Chillón, E. García Bengochea, Effects of cycle skills training on cycling-related knowledge, confidence and behaviour in adolescent girls, *J. Transp. Health* 9 (2018) 253–263, <https://doi.org/10.1016/j.jth.2018.01.015>.
- [75] A.B. Jahre, E. Bere, S. Nordengen, A. Solbraa, L.B. Andersen, A. Riiser, H. B. Bjørnå, Public employees in South-Western Norway using an e-bike or a regular bike for commuting—a cross-sectional comparison on sociodemographic factors, commuting frequency and commuting distance, *Prev. Med. Rep.* 14 (2019) 100881, <https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2019.100881>.
- [76] V. Gitelman, A. Korchatov, R. Carmel, W. Elias, Young e-cyclists in Israeli cities: a characterization of typical behaviours and risk factors based on field observations, *ToTS* 9 (2018) 18–32, <https://doi.org/10.5507/tots.2018.007>.
- [77] Z. Ling, C. Cherry, J. MacArthur, J. Weinert, Differences of cycling experiences and perceptions between E-Bike and bicycle users in the United States, *Sustainability* 9 (2017) 1662, <https://doi.org/10.3390/su9091662>.
- [78] S. Blaizot, F. Papon, M.M. Haddak, E. Amoros, Injury incidence rates of cyclists compared to pedestrians, car occupants and powered two-wheeler riders, using a medical registry and mobility data, Rhône County, France, *Accid. Anal. Prev.* 58 (2013) 35–45, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.04.018>.
- [79] BBSR - Bundesamt für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2021. *INKAR - Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung*. <https://www.inkar.de/> (accessed 15 March 2022).
- [80] BBSR - Bundesamt für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2022. *Laufende Raumbeobachtung - Raumabgrenzungen: Siedlungsstrukturelle Kreistypen*. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/kreise/siedlungsstrukturelle-kreistypen/kreistypen.html>.
- [81] B. Auer, H. Rottmann (Eds.), *Statistik Und Ökonometrie für Wirtschaftswissenschaftler*, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [82] K. Backhaus, B. Erichson, S. Gensler, R. Weiber, T. Weiber, *Multivariate Analysemethoden*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021, p. 677.
- [83] T. Bjørnskau, TØI rapport 793/2005. TØI, Oslo, 2005. [www.toi.net/getfile.php?mmfileid=3798](http://www.toi.net/getfile.php?mmfileid=3798) (accessed 7 December 2021).
- [84] J.M. Barajas, Not all crashes are created equal: associations between the built environment and disparities in bicycle collisions, *JTLU* 11 (2018), <https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.1145>.
- [85] J. Stiles, A. Kar, J. Lee, H.J. Miller, Lower volumes, higher speeds: changes to crash type, timing, and severity on urban roads from COVID-19 stay-at-home policies, *Transp. Res. Rec.* (2021), <https://doi.org/10.1177/03611981211044454>.
- [86] I. Faller, C. Holz-Rau, J. Scheiner, *Verkehrsunfallrisiken der Bevölkerung von Niedersachsen*, Zeitschrift für Verkehrssicherheit (2020) 7–17.
- [87] Á. Briz-Redón, F. Martínez-Ruiz, F. Montes, Investigation of the consequences of the modifiable areal unit problem in macroscopic traffic safety analysis: a case study accounting for scale and zoning, *Accid. Anal. Prev.* 132 (2019) 105276, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105276>.
- [88] F. Cirianni, C. Monterosso, P. Panuccio, C. Rindone, A review methodology of sustainable urban mobility plans: objectives and actions to promote cycling and pedestrian mobility. *Smart and Sustainable Planning For Cities and Regions*. SSPCR 2017. Green Energy and Technology, Springer, Cham, 2018, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_46).

## 6 Diskussion

In der vorliegenden Dissertation soll die Frage geklärt werden, welche Strukturen und Besonderheiten das Unfallgeschehen von Pedelecs 25 (P25) aufweist und inwiefern es sich von jenem konventioneller Fahrräder (kFR) unterscheidet. Diese Frage ist in drei Teilfragen unterteilt, die in drei wissenschaftlichen Papern beantwortet werden. Die drei Paper wurden zu aufeinanderfolgenden Phasen erstellt, beginnend mit dem ersten Paper (2018-2019), das das Unfallgeschehen von P25 und kFR anhand der amtlichen Unfallstatistik bis einschließlich der Daten des Jahres 2017 analysierte. Da sich im Unfallgeschehen der Fahrräder während der Bearbeitung der Paper zwei und drei neue Trends ergeben haben erfolgt in Kapitel 6.1 eine Darstellung der aktuellen Entwicklung des Unfallgeschehens der Fahrräder anhand der amtlichen Unfallstatistik bis einschließlich der Daten des Jahres 2023 (diese wurden im Juli 2024 vom Statistischen Bundesamt veröffentlicht). Anschließend werden in Kapitel 6.2 die Erkenntnisse der drei Paper zusammengefasst und in einer Synopsis übergeordnete Erkenntnisse dargestellt.

### 6.1 Aktuelle Entwicklung

Das erste Paper analysiert die zum Zeitpunkt der Bearbeitung aktuellsten Daten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik von 2014 bis 2017. Gegenwärtig (Stand September 2024) sind Daten der Jahre bis einschließlich 2023 verfügbar. Die wichtigsten Entwicklungen werden im Folgenden kurz dargestellt. Paper B analysierte Daten der Jahre 2016 bis 2017, allerdings anhand zweier Sonderauswertungen. Dazu sind gegenwärtig keine aktuelleren Daten verfügbar. Paper C analysierte Daten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik des Jahres 2019, allerdings in Kombination mit weiteren Datensätzen, großteils ebenfalls für das Jahr 2019. Die Aufbereitung dieser Daten war bereits Teil des Papers und wird hier nicht wiederholt.

#### Unfälle und dabei verunglückte Radfahrende

Tabelle 1 zeigt die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung eines P25 und/oder eines kFR für den Zeitraum 2014 (erstes Jahr in dem die Kategorie „Pedelec“ (entspricht P25) zuverlässig separat erhoben wurde) bis 2023 (aktuellste Daten). Es zeigt sich, dass die bereits für das Jahr 2019 beschriebenen Trends auch seither bestehen blieben: die Anzahl der Unfälle unter Beteiligung eines kFR blieben weitestgehend konstant, mit

einer leichten Abweichung nach oben im Jahr 2018 und nach unten im Jahr 2021. Die Anzahl der Unfälle unter Beteiligung eines P25 stieg im selben Zeitraum deutlich an (die deutlichsten Anstiege gab es 2020 und 2022), die Anzahl beträgt im Jahr 2023 mehr als das zehnfache verglichen mit dem Jahr 2014. Für die Obergruppe aller Fahrräder (P25 und kFR) bedeutet das einen Anstieg der Anzahl an Unfällen beginnend ab dem Jahr 2018 und insgesamt im Jahr 2023 um ein Fünftel mehr Unfälle als 2014. Es zeigt sich zudem, dass die Unfallzahlen insbesondere im Jahr 2021 deutlich zurückgehen (beziehungsweise für P25 in deutlich geringerem Maße stiegen) und der sprunghafte Anstieg im darauffolgenden Jahr eher als Angleichung an den langfristigen Trend gesehen werden kann. Als Grund für den starken Rückgang 2021 könnte die verschärfte Pandemie-Situation, etwa die in diesem Jahr verhängten Ausgangssperren verantwortlich sein. Es könnte aber auch der gegenteilige Effekt eingetreten sein: nach dem ersten Jahr Pandemie, in dem die Zahl der Fahrradunfälle stieg (weniger Kfz-Verkehr durch Lockdowns und Homeoffice, mehr Freizeitverkehr mit dem Fahrrad mangels Freizeitalternativen) hatten sich die Verkehre im Jahr darauf wieder angeglichen. Warum die Anzahl der Unfälle 2018 sprunghaft stieg kann nicht eindeutig geklärt werden, ein Indikator könnten die Wetterbedingungen gewesen sein, 2018 hatte überdurchschnittlich viele Sonnenstunden (DWD 2019).

Die Unfallschwere der Unfälle unter Beteiligung eines Fahrrades (kFR wie auch eines P25) sank konstant, von 190 Unfällen mit getöteten oder schwerverletzten Fahrradfahrenden je 1.000 Fahrrad-Unfällen (Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung eines Fahrrades) zu 158 im Jahr 2023. Lediglich im Jahr 2020, dem Jahr der ersten pandemiebedingten Lockdowns, wurde ein leichter Anstieg verzeichnet.

Die Anzahl der getöteten kFR-Nutzenden sank kontinuierlich und beträgt 2023 weniger als dreiviertel des Ausgangswertes 2014. Die Zahl der Getöteten P25-Nutzenden stieg zwar von 2014 bis 2023 um das Fünffache, die Anzahl der Unfälle unter Beteiligung eines P25 stieg in diesem Zeitraum allerdings um mehr als das Zehnfache. Insgesamt erhöhte sich die Anzahl der getöteten Fahrradnutzenden von 2014 bis 2023 um 13 % mit zwei deutlichen Anstiegen 2018 und 2022, bei denen jeweils die Ansteige der getöteten P25 Nutzenden maßgeblichen Anteil hatten. Zudem ist zu erkennen: Während der Anteil der getöteten P25 Nutzenden an allen getöteten Fahrradnutzenden 2014 noch bei 10 % lag betrug er 2023 bereits 43 %

Tabelle 1: Unfälle mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden

Unfälle mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden	kFR			P25			Fahrräder (kFR oder P25)		
	Unfälle mit PS	Getötete	Schwerverletzte	Unfälle mit PS	Getötete	Schwerverletzte	Unfälle mit PS	Getötete	Schwerverletzte
2014	76.643	357	13.898	2.245	39	624	78.685	396	14.522
2015	75.602	347	13.359	2.992	36	871	78.341	383	14.230
2016	77.682	331	13.398	3.986	62	1.087	81.272	393	14.485
2017	75.179	314	12.750	5.206	68	1.374	79.826	382	14.124
2018	81.320	356	13.453	7.928	89	2.077	88.472	445	15.530
2019	77.480	327	12.580	10.806	118	2.596	87.253	445	15.176
2020	77.537	284	13.175	15.415	142	3.909	91.533	426	17.084
2021	67.931	241	10.925	17.285	131	4.041	83.723	372	14.966
2022	76.601	266	11.233	23.094	208	4.808	97.712	474	16.041
2023	72.497	256	9.899	24.027	190	4.565	94.468	446	14.464

T. Panwinkler-31/2024

### Außerorts-Unfälle

Der Anteil der Unfälle außerorts ist sowohl bei den kFR also auch bei den P25 (siehe Tabelle 2) deutlich geringer als jener innerorts. In den Jahren 2014 bis 2019 war der Anteil außerorts sowohl bei den kFR (ca. 8-9%) als auch bei den P25 (ca. 18-19%) konstant. Im ersten Pandemie-Jahr 2020 erhöhte sich der Wert um 2-3 Prozentpunkte, bis zum Jahr 2023 sank der außerorts-Anteil wieder ungefähr auf den Wert 2019. Dies könnte auf eine häufigere Nutzung der Fahrräder außerorts, etwa als Freizeitaktivität oder als Alternative zum ÖPNV, während der Lockdowns deuten. Die Unfallschwere sank bei beiden Fahrradtypen bei Außerortsunfällen von 2014 bis 2023. Entsprechend blieben auch die jeweiligen Anteile der Schwerverletzten annähernd konstant, mit Anstiegen in den beiden Jahren 2020 und 2021. Der Anteil der Getöteten außerorts sank im Untersuchungszeitraum grundsätzlich, es ergaben sich aber zwei Anstiege 2018 und 2021.

Tabelle 2: Anteil Unfälle mit Personenschaden (PS) außerorts an allen Unfällen mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden

Anteil Unfälle mit Personenschaden (PS) außerorts an allen Unfällen mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden	konventionelle Fahrräder				Pedelects 25				Fahrräder (kFR und/oder P25)			
	Anteil Unfälle (PS) außerorts	Anteil Getötete außerorts	Anteil Schwerverletzte außerorts	Unfallsschwere außerorts	Anteil Unfälle (PS) außerorts	Anteil Getötete außerorts	Anteil Schwerverletzte außerorts	Unfallsschwere außerorts	Anteil Unfälle (PS) außerorts	Anteil Getötete außerorts	Anteil Schwerverletzte außerorts	Unfallsschwere außerorts
2014	9%	40%	16%	355	19%	59%	24%	414	9%	42%	17%	360
2015	9%	37%	16%	351	18%	53%	27%	472	9%	38%	17%	362
2016	9%	36%	16%	340	19%	37%	26%	418	9%	36%	17%	351
2017	8%	32%	16%	341	19%	40%	27%	388	9%	34%	17%	353
2018	9%	38%	17%	332	19%	62%	26%	400	10%	43%	18%	350
2019	9%	33%	17%	326	18%	54%	26%	384	10%	39%	18%	347
2020	11%	33%	20%	327	21%	54%	30%	378	12%	40%	22%	350
2021	10%	37%	18%	300	20%	63%	29%	364	12%	46%	21%	330
2022	10%	34%	18%	285	18%	52%	28%	350	11%	42%	21%	319
2023	9%	35%	18%	274	17%	53%	26%	317	11%	42%	21%	300

Unfallsschwere: Unfälle mit mindestens einem/einer Getöteten oder Schwerverletzten je 1.000 Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung des jeweiligen Fahrradtyps

T. Panwinkler-31/2024

## Alleinunfälle

Der Anteil der Alleinunfälle (siehe Tabelle 3) stieg bei beiden Fahrradtypen deutlich, von 17% auf 26% bei den kFR und von 26% auf 34% bei den P25. Gleichzeitig sank die Unfallsschwere bei diesen Unfällen aber deutlich. Dies lässt auf eine höhere Anzahl an Meldungen der Unfälle (mit leichten oder ohne Verletzungen) bei der Polizei und somit auf eine Verringerung der Dunkelziffer schließen. Der deutliche Anstieg ab 2020 lässt auf höhere Fahrleistungen ab Beginn der Covid Pandemie schließen. Dies würde auch zu dem gestiegenen Anteil an Außerortsunfällen passen, da Alleinunfälle vermehrt außerorts auftreten (etwa durch Gefälle, siehe zweites Paper). Während sich der Anstieg des Anteils der Alleinunfälle bei den P25 insbesondere durch den Anstieg der Anzahl an Alleinunfällen erklären lässt, ist bei den kFR-Unfällen eher der Rückgang der Gesamtheit aller Unfälle bei einer konstanten Anzahl an Alleinunfällen ausschlaggebend. Der Rückgang der Gesamtheit aller kFR-Unfälle ist insbesondere durch einen Rückgang der Anzahl an kFR-Unfällen mit zwei und mehr Beteiligten zu beschreiben. Möglich ist also, dass bei den kFR, deren Unfällen sich vermehrt an Kreuzungen ereignen, Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit Wirkung zeigten (Infrastrukturausbau, Sensibilisierung der Kfz-Nutzenden), während der Anhaltende Trend zur Anschaffung eines P25 vielleicht eher zu Freizeitfahrten außerorts und dort zu Alleinunfällen führte.

Tabelle 3: Anteil Alleinunfälle mit Personenschaden (PS) nach Fahrradtypen und deren verunglückten Nutzenden

Jahr	konventionelle Fahrräder (kFR)				Pedelecs 25 (P25)				Fahrräder (FR) (kFR und/oder P25)			
	Anteil kFR-Alleinunfälle (PS) an allen kFR Unfällen (PS)	Anteil kFR-Getötete bei Alleinunfällen an allen kFR-Getöteten	Anteil kFR-Schwerverletzte bei Alleinunfällen an allen kFR-Schwerverletzten	Unfallschwere bei kFR-Alleinunfällen	Anteil P25-Alleinunfälle (PS) an allen P25 Unfällen (PS)	Anteil P25-Getötete bei Alleinunfällen an allen P25-Getöteten	Anteil P25-Schwerverletzte bei Alleinunfällen an allen P25-Schwerverletzten	Unfallschwere bei P25-Alleinunfällen	Anteil FR-Alleinunfälle (PS) an allen FR Unfällen (PS)	Anteil FR-Getötete bei Alleinunfällen an allen FR-Getöteten	Anteil FR-Schwerverletzte bei Alleinunfällen an allen FR-Schwerverletzten	Unfallschwere bei FR-Alleinunfällen
2014	17%	26%	31%	186	26%	18%	41%	295	17%	25%	31%	190
2015	18%	22%	30%	181	26%	22%	37%	303	18%	22%	31%	187
2016	18%	20%	31%	177	28%	32%	38%	288	19%	22%	31%	183
2017	19%	25%	32%	174	30%	31%	44%	277	20%	26%	33%	182
2018	20%	26%	33%	170	30%	29%	43%	273	21%	27%	34%	181
2019	21%	32%	35%	167	30%	25%	46%	251	22%	30%	37%	179
2020	26%	27%	42%	174	36%	30%	49%	263	28%	28%	43%	191
2021	26%	32%	41%	164	36%	26%	49%	241	29%	30%	43%	183
2022	26%	33%	41%	150	35%	39%	50%	217	29%	36%	44%	169
2023	26%	32%	42%	140	34%	35%	49%	198	29%	33%	44%	158

Unfallschwere: Unfälle mit mindestens einem/einer Getöteten oder Schwerverletzten je 1.000 Unfälle mit Personenschaden unter Beteiligung des jeweiligen Fahrradtyps

T. Panwinkler-31/2024

## Ältere

Aktuell sind beinahe zwei Drittel (61 %) der getöteten Fahrradnutzenden (P25 oder kFR) und beinahe ein Drittel (30 %) der schwerverletzten Fahrradnutzenden ältere Personen (65 Jahre und älter), 41 % der getöteten und 14% der schwerverletzten Fahrradnutzenden sind sogar 75 Jahre und älter (siehe Tabelle 4). Unter den P25-Nutzenden sind die Anteile sogar noch höher. Im Verlauf der letzten zehn Jahre ist der Anteil älterer (65+) Personen unter den schwerverletzten Fahrradnutzenden um 4 Prozentpunkte gestiegen wobei der Anteil älterer (65+) unter den schwerverletzten P25-Nutzenden deutlich sank (von 58% auf 38%) jener der kFR-Nutzenden geringfügig um 1 % anstieg. Es ist also ein Trend der Angleichung beider Verteilungen zu erkennen, wofür vor allem die mittlerweile höheren Anteile jüngerer schwerverletzter P25-Nutzender verantwortlich zu sein scheinen (sowie der generell wachsende Anteil der P25-Unfälle an allen Fahrrad-Unfällen). Eine entsprechende Interpretation der Verteilung der Getöteten erscheint hier aufgrund der geringen Fallzahlen und der entsprechenden jährlichen Schwankungen nicht sinnvoll.

Tabelle 4: Unfälle mit Personenschaden (PS) unter Beteiligung älterer Nutzender

Jahr	konventionelle Fahrräder (kFR)				Pedelecs 25 (P25)				Fahrräder (FR) (kFR und/oder P25)			
	Anteil 65+ an allen Getöteten kFR-Nutzenden	Anteil 65+ an allen Schwerverletzten kFR-Nutzenden	Anteil 75+ an allen Getöteten kFR-Nutzenden	Anteil 75+ an allen Schwerverletzten kFR-Nutzenden	Anteil 65+ an allen Getöteten P25-Nutzenden	Anteil 65+ an allen Schwerverletzten P25-Nutzenden	Anteil 75+ an allen Getöteten P25-Nutzenden	Anteil 75+ an allen Schwerverletzten P25-Nutzenden	Anteil 65+ an allen Getöteten FR-Nutzenden	Anteil 65+ an allen Schwerverletzten FR-Nutzenden	Anteil 75+ an allen Getöteten FR-Nutzenden	Anteil 75+ an allen Schwerverletzten FR-Nutzenden
2014	54%	24%	32%	11%	82%	58%	56%	29%	57%	26%	35%	12%
2015	37%	22%	23%	11%	50%	45%	38%	24%	39%	24%	25%	12%
2016	41%	19%	29%	10%	73%	37%	55%	19%	46%	21%	33%	11%
2017	53%	24%	35%	13%	85%	51%	65%	27%	59%	27%	41%	14%
2018	46%	24%	28%	12%	76%	49%	57%	25%	52%	27%	34%	14%
2019	54%	24%	39%	13%	72%	45%	51%	23%	59%	28%	42%	14%
2020	55%	23%	40%	12%	68%	44%	43%	21%	59%	28%	41%	14%
2021	55%	24%	34%	11%	68%	40%	45%	19%	60%	28%	38%	14%
2022	56%	25%	40%	12%	63%	41%	40%	18%	59%	30%	40%	14%
2023	54%	25%	35%	12%	69%	38%	51%	16%	61%	30%	41%	14%

T. Panwinkler-31/2024

### Neue Erkenntnisse aus der aktuellen Entwicklung

In den Jahren 2020 bis 2022 hat sich das Unfallgeschehen mit einer höheren Dynamik verändert als zuvor. Es liegt nahe, dass sich während der Corona-Pandemie die Strukturen veränderten: die Menschen fuhren möglicherweise häufiger mit dem Fahrrad, sei es als Freizeitbeschäftigung mangels Alternativen (Schließung sehr vieler Freizeiteinrichtungen), sei es als Alternative zu anderen Verkehrsmitteln (etwa zur Vermeidung von Kontakten im ÖPNV) oder etwa als Lieferdienst (geschlossene Restaurants). Die Vermutung liegt nahe, dass sich dadurch auch das Unfallgeschehen im Radverkehr veränderte. Die Analyse dieses Themenkomplexes geht über den Forschungsrahmen dieser Arbeit hinaus und skizziert direkt zukünftigen Forschungsbedarf.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass die Popularität des P25 anhält. Der Anteil der P25 an allen Fahrrädern im Bestand steigt weiterhin und mit diesem auch der Anteil und die Anzahl an P25 Unfällen. Die Anzahl kFR Unfälle blieb weitestgehend konstant wohingegen sich die Anzahl der P25-Unfälle mehr als verzehnfachte. Dadurch ergibt sich in Summe ein Anstieg der Fahrradunfälle um 20 %.

## **6.2 Erkenntnisse**

Die Forschungsfrage wurde in die drei Teilfragen getrennt, die in drei separaten Aufsätzen beantwortet wurden. Die Erkenntnisse der einzelnen Analysen wurden bereits in den jeweiligen Aufsätzen diskutiert, diese Diskussionen werden hier im Folgenden nur kurz zusammengefasst. Vielmehr werden die einzelnen Erkenntnisse und deren Zusammenhang für die übergeordnete Frage diskutiert und analysiert um abschließend in der Synopsis die übergeordnete Frage zu beantworten.

### **6.2.1 Paper 1: Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich**

Das erste Paper untersuchte die Teilfrage, ob sich die Verbreitung von P25 maßgeblich auf das Unfallgeschehen von Fahrrädern (P25 und kFR gesamt) auswirkt, ob sich P25-Unfälle von kFR-Unfällen unterscheiden (etwa schwerer sind) und ob sich dadurch neue Anforderungen an die Verkehrssicherheitsarbeit ergeben.

Anhand deskriptiver Analysen, eines Fact Sheets und weiterer Detailuntersuchungen wurde ein detailliertes Bild der Unfallstruktur von P25 und kFR beschrieben. Es wurde dargestellt, dass Unfälle unter Beteiligung eines P25 grundsätzlich schwerer sind als Unfälle unter Beteiligung eines kFR, jedoch bei deutlich geringer Fallzahl (zum Zeitpunkt der Veröffentlichung 2019, es wurden die Unfälle der Jahre 2014 - 2017 analysiert). Die Analysen zeigen eine konstante Zunahme an P25-Unfällen in den Untersuchungsjahren, wodurch die Gesamtanzahl aller Fahrradunfälle beeinflusst wird. Neben dieser grundsätzlichen Aussage zum Unfallgeschehen der beiden Fahrzeugarten konnten mithilfe der Datenanalyse deutliche Unterschiede dargestellt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Unterschiede im Unfallgeschehen der beiden Fahrzeugarten bestehen, insbesondere hinsichtlich der Anzahl Beteiligter, des Unfalltyps, der Ortslage, des Unfallzeitpunktes und der Nutzenden.

So verunfallen P25 häufiger alleine (keine weiteren Beteiligten bei dem Unfall) wohingegen kFR häufiger an Knotenpunkten verunfallen. Die deskriptive Analyse zeigte zudem, dass bei kFR wie auch bei P25 Unfälle innerorts deutlich dominieren, der Anteil der Außerortsunfälle bei den P25 aber deutlich höher ist. Zudem sind bei beiden Fahrzeugarten die Unfälle außerorts schwerer und auch öfter tödlich, wiederum ist dies bei P25 noch deutlicher ausgeprägt. Für beide Fahrradtypen lassen sich aus den Unfallzeitpunkten unterschiedliche Nutzungen erahnen. So verunfallen kFR häufig zu Zeiten, an denen typischer-

weise der Weg zur Arbeit oder Schule zurückgelegt wird, P25 wiederum häufig zu typischen Zeiten des Wirtschafts-, Einkaufs- oder Freizeitverkehrs.

Die demographischen Analysen zeigten, dass sich die verunglückten Nutzenden der beiden Fahrradtypen strukturell unterscheiden: Verunglückte P25-Nutzende sind im Durchschnitt älter als verunglückte kFR-Nutzende. Der Großteil der verunglückten P25-Nutzenden ist mindestens 70 Jahre alt, wohingegen es in den jüngsten drei Altersgruppen (0 - 9, 10 - 19 und 20 – 29 Jahre) nur wenige Verunglückte gibt. Bei den verunglückten kFR-Nutzenden sind die Unterschiede zwischen den Altersgruppen deutlich geringer. Die Unterschiede sind bei den Getöteten sogar noch deutlicher (78 % der getöteten P25-Nutzenden sind 70 Jahre und älter, von den kFR-Getöteten nur 43 %, von der Gesamtheit aller im Straßenverkehr Getöteten lediglich 26 %).

Die Datenbasis für die Analysen des ersten Papers bildet die Vollerhebung der Straßenverkehrsunfälle unter Beteiligung eines Fahrrades (P25 oder kFR) der Jahre 2014 bis 2019 in Deutschland. Obwohl sich diese Datenbasis hervorragend zur Analyse des Unfallgeschehens eignet, wurden in dem Paper bereits einige Einschränkungen der Datenbasis, insbesondere für die Analyse von Fahrradunfällen, dargestellt. Zum einen beinhaltet die Datenbank ausschließlich Unfälle die nach amtlicher Definition (siehe Kapitel 4.3.1) als Straßenverkehrsunfälle gewertet werden. Das bedingt etwa die Einschränkung, dass sich der Unfall auf öffentlichen Straßen oder Plätzen ereignete. Unfälle auf privatem Grund sind somit (meist) nicht inkludiert. Diese Einschränkung ist für Fahrräder relevanter als für Kfz. Es ist davon auszugehen, dass viele Unfälle von Mountainbikern (etwa im Gebirge) nicht registriert sind. Aufgrund der erweiterten Möglichkeiten der P25, bei denen der Motor die Schwierigkeiten des Bergauffahrens kompensieren kann, ist zu erwarten, dass insbesondere in den Bergen Konflikte entstehen könnten. Zum anderen beinhaltet die Datenbasis ausschließlich Unfälle die von der Polizei erhoben und registriert wurden. In dem Aufsatz wird auch beschrieben, dass die Dunkelziffer nicht registrierter Unfälle unter Beteiligung eines Fahrrades noch deutlich über jener der Kfz geschätzt wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass insbesondere Alleinunfälle und / oder Unfälle ohne Personenschäden oder mit Leichtverletzten überdurchschnittlich oft nicht registriert werden. Eine spezielle Auswertung der Dunkelziffer für P25-Unfälle wurde nach Kenntnis des Autors noch nicht veröffentlicht. Eine weitere Einschränkung der Unfallstatistik ist, dass entsprechend ihrer Kategorisierung ausschließlich Unfälle registriert sind. Konflikte ohne Unfälle, etwa sogenannte „Beinaheunfälle“ werden in der Datenbank nicht registriert (mit wenigen Ausnahmen).

Folglich kann nur analysiert werden, welche Konflikte zu Unfällen führen aber nicht welche Konflikte vermieden werden konnten. Aus diesen Konflikten könnten weitere wichtige Informationen gewonnen werden, oftmals handelt es sich bei Unfällen und „*Beinaheunfällen*“ um einen ähnlichen Konflikt, den manche Nutzende kompensieren und verhindern können, andere nicht.

Eine weitere Einschränkung des Datensatzes bildet die Tatsache fehlender Relationen innerhalb der Unfallstatistik. So kann die Anzahl schwerer Unfälle in Relation zur Anzahl aller Unfälle gesetzt werden. Da sich etwa Fahrräder und Kfz in Bestand, Fahrleistung oder Anzahl an Wegen deutlich unterscheiden (Nobis und Kuhnimhof 2018), sind auch Unterschiede im Unfallrisiko einzelner Verkehrsbeteiligungsarten anzunehmen. Dieser Einschränkung wurde im ersten Paper bereits zum Teil Rechnung getragen, indem die Daten der „Mobilität in Deutschland“ (MiD) 2017 grundsätzlich für eine Überblicksdarstellung analysiert wurden. Allerdings ließ der mangelnde Detaillierungsgrad insbesondere der Daten zu P25 keine vertieften verknüpften Analysen mit den Unfalldaten zu. Hier wird die kommende MiD 2023 eine detailliertere Datenbasis bieten. Die Ergebnisse des ersten Papers deuten auf unterschiedliche Nutzungszwecke der P25 und kFR hin. Auch dafür wäre eine detaillierter Datenbasis notwendig. Zudem lassen sich daraus räumliche Unterschiede vermuten, weswegen präzisere Daten zur Lokalisierung (etwa Koordinaten) sowie räumliche Analysen mit zusätzlichen raumbezogenen Daten notwendig wären. Die Auswertungen in des ersten Papers zeigen auch, dass die Verletzungsschwere mit lediglich drei Kategorien im Datensatz (leicht, schwer und tödlich) schwierig zu analysieren ist, da die Kategorien ein breites Spektrum an Verletzungen und Verletzungsschweren vereinen. Auch zeigten die Analysen, dass die Unfalldatenbank für die Analyse zweispuriger Kfz konzipiert wurde. Für Fahrräder wichtige Kategorien, etwa Stürze, fehlen in der Datenbasis. All diese beschriebenen Einschränkungen ergeben sich aus dem zur Verfügung stehenden Datensatz. Sie werden in den folgenden beiden Papern aufgegriffen und Lösungsansätze vorgestellt.

Zusammengefasst konnte im ersten Paper dargestellt werden, dass P25-Unfälle grundsätzlich schwerer sind als kFR-Unfälle und das sich die Unfallgeschehen der beiden Fahrzeuge unterschiedliche Schwerpunkte aufweisen (Alleinunfälle, Außerortsunfälle, Ältere Verunglückte). Die Analysen zeigten aber auch, dass die amtliche Unfallstatistik nur begrenzt aussagekräftig ist, da sie für zweispurige Kfz konzipiert wurde. Daher war es auch Ziel der Paper 2 und 3, diese Schwerpunkte zu vertiefen und den Einschränkungen entgegenzuwirken.

### **6.2.2 Paper 2: Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity**

Das zweite Paper untersuchte die Detailfrage, wie das Unfallgeschehen von P25 in Deutschland vertieft beschrieben werden kann und welche qualitativen Aussagen dadurch zu der Charakteristik von P25-Unfällen getroffen werden können. Anhand der Freitextbeschreibungen der P25-Alleinunfällen in den polizeilichen Unfallberichten der Jahre 2016 und 2017 sollte beispielhaft analysiert werden, welche speziellen P25-Unfallursachen sich beschreiben lassen und wie deren Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit schwerer Unfälle geschätzt werden kann. Die, im ersten Paper beschrieben, Einschränkungen der Daten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik wurden aufgegriffen und Lösungsansätze zur Überwindung dieser Einschränkungen dargestellt.

Die Freitextbeschreibungen wurden gesichtet, gelesen, analysiert und kategorisiert. Es konnten vier neue pedelec-spezifische Kategorien (beziehen sich auf: die Nutzenden, das Fahrzeug, das Straßengestaltung oder den Straßenzustand) und zugehörige Sub-Kategorien definiert und alle Alleinunfälle entsprechend zugeordnet werden. Die meisten der neuen Kategorien beziehen sich auf die Nutzenden oder die Straßengestaltung. Diesen beiden Kategorien wurden auch die meisten Unfälle zugeordnet. Der Datensatz ermöglicht auch eine Analyse der Schwere der Verletzungen. Von den neun Kategorien, bei denen im Falle eines Unfalls die Wahrscheinlichkeit schwerer Verletzungen am höchsten ist, beziehen sich die meisten Sub-Kategorien (sieben) auf die Nutzenden (unangemessene (zu hohe) Geschwindigkeit, Hinweise auf Alkoholeinfluss, Schlingern des Fahrrads, unerfahrene Nutzende, Einklemmen von Gegenständen in den Speichen und, mit geringerer Wahrscheinlichkeit, Abkommen von der Fahrbahn und plötzliche Erkrankungen). Darüber hinaus ist die Wahrscheinlichkeit schwere Verletzungen bei Unfällen aufgrund von Problemen auf Gefällstrecken oder technischen Defekten am höchsten. Eine vergleichende Analyse mit Unfällen der GIDAS Datenbank (siehe Kapitel 4.3.3) stützt diese Aussagen. Von den neu geschaffenen Sub-Kategorien wurden unangemessene (zu hohe) Geschwindigkeit, Hinweise auf Alkoholeinfluss und Probleme mit dem Gefälle am häufigsten genannt und als Ursache für die schwersten Verletzungen prognostiziert. Im Gegensatz dazu wurden die neu geschaffenen Kategorien Unaufmerksamkeit und kognitive Überforderung, Probleme mit den oder beim Bremsen, Konflikte mit Bordsteinen, Konflikte mit Hindernissen auf der Straße und problematische Fahrbahnbeschaffenheit zwar häufig genannt, aber nur als Ursache für

leichte Verletzungen prognostiziert. Darüber hinaus wurden die neuen Kategorien Schlingern des Fahrrads, unerfahrene Nutzende, Konflikte durch Gegenstände in den Speichen und technische Defekte selten genannt, aber mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für schwere Unfälle eingestuft.

In Paper B wurden die Einschränkungen des ersten Papers, die fehlenden fahrradspezifischen Merkmale der Unfallstatistik, aufgelöst. Die Unfallbeschreibungen der P25-Aleinunfälle wurden analysiert und so neue, pedelec-spezifische Unfallursachen definiert. Mithilfe der ordinalen Probit-Analyse konnte zudem die Einschränkung der Analyse der Verletzungsschwere von lediglich drei Klassen überwunden werden. Trotzdem blieben einige Einschränkungen des Datensatzes der amtlichen Unfallstatistik bestehen, insbesondere jener der Dunkelziffer nicht registrierter Unfälle, der fehlenden Expositionsdaten (Fahrleistungen, Wegeanzahl und -zwecke, Bestände) sowie der fehlenden räumlichen Analysen zu geographischen Einflussgrößen wie Relief oder auch touristischer Nutzung einer Region. Die Studie zeigte zudem, dass weitere Zustandsinformationen notwendig wären, etwa zur Fitness der Fahrradfahrenden, zum technischen Zustand des Fahrzeugs (war das P25 fahrbereit beziehungsweise war es eventuell getunt?) und zur Schutzausrüstung. Diese sind aber im Rahmen der polizeilichen Unfallerhebung (ohne Rekonstruktion) nur schwer festzustellen.

Zusammengefasst konnte die größten Einschränkung des ersten Papers aufgelöst werden, indem neue, P25-spezifische Kategorien der Unfallursachen beschrieben und analysiert wurden. Die meisten der neuen Kategorien beziehen sich auf die Nutzenden oder die Straßengestaltung. Bei diesen Kategorien, wie auch auf Gefällstrecken oder bei technischen Defekten, sind im Falle eines Unfalls auch die schwersten Verletzungen zu erwarten. Nicht alle Einschränkungen des ersten Papers konnten kompensiert werden. Vor allem die fehlenden Expositionsdaten, etwa geographische Einflussgrößen wie das Relief, blieben ein Hemmnis. Dies sollte im dritten Paper aufgegriffen werden.

### **6.2.3 Paper 3: Spatial Dimension of Accidents involving Pedelecs 25 and Conventional Bicycles**

Das dritte Paper untersuchte die Detailfrage, wie die Analyse von Fahrradunfällen um eine geografische Perspektive erweitert werden kann. Die, in den ersten beiden Papern beschrieben, Einschränkungen der Daten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik wurden aufgegriffen und Lösungsansätze zur Überwindung dieser Einschränkungen dargestellt.

Es zeigte sich, dass geografische Faktoren einen wichtigen Einfluss auf die Schwere von Fahrradunfällen haben. Schwere Fahrradunfälle sind nicht gleichmäßig im Raum verteilt. Verkehr, Straßenmerkmale sowie demografische oder sozioökonomische Merkmale und unterschiedliche Siedlungsstrukturen wirken sich in den verschiedenen Regionen (Untersuchungseinheit: Kreise und kreisfreie Städte) unterschiedlich auf die Unfallschwere aus. In dem dritten Paper wurden relevante geografische Faktoren ermittelt und ihr Einfluss auf zwei Arten von Verletzungen aufgezeigt: das Risiko schwerer Fahrradunfälle pro Region (RS) und die Wahrscheinlichkeit schwerer Verletzungen bei einem Unfall (AS). Die räumlichen Analysen zeigen, dass für beide Fahrradtypen die Unfallschwere zunimmt, je ländlicher, bergiger oder touristischer eine Region ist. Die Regressionsanalysen für beide Fahrzeugtypen (P25 und kFR) zeigten signifikante Auswirkungen der geographischen Faktoren auf RS. So steigt das Risiko schwerer Fahrradunfälle pro Region mit der Abnahme des Anteils der zugelassenen Kraftfahrzeuge und mit der Zunahme der sozioökonomischen Deprivation (Index aus Informationen der Bildungs-, Beschäftigungs- und Einkommenssituation) in der Region (letzteres wurde nicht erwartet). Ebenso ist ein höherer Anteil des Tourismus und eine weniger kompakte Siedlungsstruktur in einer Region mit einem höheren Risiko für schwere Fahrradunfälle dieser Region verbunden. Das Risiko schwerer Unfälle in einer Region steigt auch mit den Höhenunterschieden und mit einem geringeren Anteil älterer Menschen an der Bevölkerung in der jeweiligen Region. Beide Faktoren betreffen jedoch nur P25. Die Auswirkungen der geografischen Variablen sind bei P25 tendenziell größer. Die binär logistischen Regressionsanalysen von AS zeigten, dass geografische Faktoren auch die Wahrscheinlichkeit schwerer Verletzungen bei einem Unfall beeinflussen. Folglich variiert die Schwere der Unfälle nicht nur zwischen den Regionen, sondern auch zwischen P25 und kFR.

Im dritten Paper konnten die größten Einschränkungen der ersten beiden Paper aufgelöst werden. Dazu wurden die Unfalldaten nach räumlichen Gesichtspunkten analysiert um räumliche Unterschiede im Unfallgeschehen darzustellen. Zudem wurden die räumlichen Erkenntnisse mit weiteren geographischen, raumbezogenen Daten in Relation gesetzt und zusätzliche Erkenntnisse geschaffen. Trotzdem blieben einige Einschränkungen aufgrund der Daten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik bestehen, insbesondere jene der Dunkelziffer. Auch das Fehlen der Informationen zum technischen Zustand der Fahrräder (Funktionsfähigkeit aber auch Tuning) in den Unfalldaten konnten nicht weiter geklärt werden. Außerdem ergaben sich neue Einschränkungen, so wurde etwa dargestellt, dass für die

räumliche Analyse nicht nur der Unfallort, sondern auch der Wohnort der Unfallbeteiligten von Interesse sein kann (wenn auch für Fahrräder weniger Einflussreich), dieser in den Unfalldaten aber nur sehr eingeschränkt (Kreis in dem ein Kfz zugelassen ist) zur Verfügung steht. Zudem zeigte sich, dass geographische Faktoren zwar wichtige Zusatzinformationen für die Unfallanalyse liefern können, diese Daten aber oftmals nicht so vorliegen wie sie benötigt werden. Diese Daten werden oftmals nicht beziehungsweise nicht regelmäßig erhoben, liegen nicht in dem notwendigen Detaillierungsgrad vor oder beziehen sich nicht auf dieselbe räumlichen Ebene.

Zusammengefasst konnten die größten Einschränkungen der ersten beiden Paper aufgelöst werden, indem die Unfalldaten verortet und räumlich analysiert wurden und zusätzlich Einflussgrößen (etwa das Relief) ermittelt und berücksichtigt wurden. Es zeigte sich, dass insbesondere die Höhenunterschiede, die Siedlungsstruktur und der Anteil des Tourismus in der Region einen Einfluss auf die Unfallschwere haben, bei den P25 noch deutlicher als bei den kFR.

#### **6.2.4 Synopsis aus 1-3: Erkenntnisse zum Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich**

Die übergeordnete Forschungsfrage der Dissertation lautete, welche Strukturen und Besonderheiten das Unfallgeschehen von P25 aufweist und inwiefern es sich von jenem der kFR unterscheidet. Dazu können aus den einzelnen Erkenntnissen der drei Paper folgende Schlüsse gezogen werden:

Als wichtigster Unterschied im Unfallgeschehen beider Fahrradtypen ergibt sich die höhere Unfallschwere der P25: alle drei Paper zeigten, dass Unfälle unter Beteiligung eines P25 grundsätzlich schwerer sind als jene unter Beteiligung eines kFR. Im ersten Paper konnten anhand der Gesamterhebung aller Straßenverkehrsunfälle unterschiedliche Unfallschweren belegt werden. Dabei wurde vermutet, dass die Ursachen für die höhere Unfallschwere insbesondere in dem höheren Anteil der Alleinunfälle, dem höheren Anteil der außerorts-Unfälle und dem höheren Anteil älterer Verunglückter (50 Jahre und älter) die bei ähnlichen Unfällen aufgrund der höheren Vulnerabilität, insbesondere der höheren Fragilität durchschnittlich schwerere Verletzungen erlitten, liegen. Das zweite Paper untersuchte die Alleinunfälle im Detail und zeigte pedelec-spezifische Unfallursachen, die die höhere Verletzungsschwere bei diesen Unfällen erklären können. Darunter fallen Probleme aufgrund von Gefälle oder Unerfahrenheit. Damit im Einklang zeigte das dritte Paper, dass Regionen mit

großen Höhenunterschieden sowie Tourismusregionen (mit der Annahme, dass Touristen überdurchschnittlich oft unerfahrene Fahrradfahrende sind) ein höheres Risiko für schwere Fahrrad- und insbesondere schwere P25-Unfälle aufweisen.

Als zweite Besonderheit im Unfallgeschehen der P25 ergibt sich die hohe Anzahl der Alleinunfälle: Alleinunfälle wurde im ersten Paper bereits mit einer erhöhten Meldung der P25 Alleinunfälle bzw. geringer Dunkelziffer als bei kFR vermutet. Zudem zeigte das erste Paper, dass Alleinunfälle insbesondere an Steigungen und im Gefälle sowie unter Alkoholeinfluss zu hoher Unfallschwere führen. Diese Erkenntnisse wurden im zweiten Paper aufgegriffen und es konnten pedelec-spezifische Merkmale für Alleinunfälle beschrieben und analysiert werden. Paper C griff den Aspekt auf, dass Alleinunfälle insbesondere außerorts auftreten und zeigte die höhere Unfallschwere in ländlichen Regionen wie auch bei Gefälle.

Die dritte Besonderheit des P25-Unfallgeschehens ist der hohe Anteil an Unfällen außerorts: das erste Paper zeigte, dass Unfälle innerorts sowohl bei P25 als auch bei kFR dominieren, aber Unfälle außerorts bei P25 häufiger und schwerer sind. Eine erste Erklärung dazu lieferte die Analyse der Wegezwecke mit der Erkenntnis unterschiedlicher Nutzungszwecke im ersten Paper. Das zweite Paper bestätigte die höhere Unfallschwere von Alleinunfällen bei P25 insbesondere außerorts und lieferte spezifische Unfallursachen hierfür. Paper C analysierte die räumlichen Muster der Fahrradunfälle und den Einfluss geographischer Faktoren dann detailliert und zeigte insbesondere einen Unterschied zwischen städtischen Räumen (mit meist innerorts Straßen) und ländlichen Räumen (mit meist außerorts Straßen).

Zudem wurde ein demographischer Unterschied hinsichtlich der Nutzenden der beiden Fahrradtypen dargestellt: ältere (verunglückte) Fahrradnutzende wurden dazu in allen drei Aufsätzen analysiert. Das erste Paper zeigte, dass insbesondere ältere P25-Nutzende schwerere Unfälle haben, auch häufiger und schwerer als ältere kFR-Nutzende. Das zweite Paper zeigte, dass hier insbesondere kognitive Überforderung, Ablenkung, aber auch physische Probleme, etwa beim Anfahren, ursächlich sind. Das dritte Paper zeigte jedoch, dass ein höherer Anteil älterer Personen an der Wohnbevölkerung einer Region keinen Hinweis für ein höheres Risiko schwerer Fahrradunfälle in der entsprechenden Region darstellt. Ein Erklärungsversuch hierfür wäre, dass ein hoher Anteil älterer Menschen an der Wohnbevölkerung einer Region weniger Straßenverkehr (insbesondere Pendlerverkehr) und damit eine geringere Exposition bedeuten könnte. Andere mögliche Erklärungen sind, dass ein hoher Anteil älterer Menschen einen geringen Anteil jüngerer Menschen bedeuten könnte

und junge (insbesondere unerfahrene) Fahrende überdurchschnittlich viele schwere Unfälle verursachen. Denkbar wäre auch, dass in Gebieten mit einem hohen Anteil älterer Menschen die anderen Verkehrsteilnehmer mehr auf sie achten, oder dass ältere Menschen nicht dort verunfallen wo sie wohnen, sondern dort wo sie nicht wohnen und die Umgebung sprichwörtlich nicht *gewohnt* sind (Urlaubsregion oder Ausflüge in Nachbarregionen)

Die Dissertation zeigt, dass die Daten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik zwar sehr gut geeignet sind, um Unfallanalysen durchzuführen, jedoch insbesondere bei der Analyse nicht motorisierter Verkehrsteilnehmender – wie etwa Fahrradnutzender - an Grenzen stoßen. Mit dieser Dissertation konnten Wege dargestellt werden, wie die Einschränkungen des amtlichen Datensatzes aufgelöst werden können. Trotzdem blieben einige Einschränkungen bestehen. Es kann als Mehrwert dieser Dissertation gesehen werden, diese ebenfalls aufzulisten, sodass daraus zukünftiger Forschungsbedarf beschrieben werden kann. Dazu zählen insbesondere:

- Eine vertiefte Untersuchung des Problems der Dunkelziffer nicht polizeilich registrierter Fahrradunfälle.
- Eine detaillierte Datenbasis der Expositionsdaten, insbesondere zur Fahrleistung, Wegezähl- und Nutzen, Etappenanzahl und intermodale Kombinationen sowie Bestand an P25 – jeweils auf regionaler Ebene
- Wichtige ergänzende Zustandsinformationen der Nutzenden (physisch und psychisch), der Fahrzeuge (Zustand vorgeschriebener Komponenten, Tuning), sowie der Schutzausrüstung (Helm, Protektoren, Reflektoren, etc.)

Zusammengefasst kann dargestellt werden, dass P25 Unfälle schwerer sind als jene der kFR. Zudem ließen sich Schwerpunkte im Unfallgeschehen von P25 darstellen (Alleinunfälle, Außerortsunfälle, Unfälle älterer Nutzender), P25-spezifische Unfallursachen beschreiben (insbesondere betreffend die Nutzenden und die Infrastruktur) und räumliche Unterschiede im Unfallgeschehen der beiden Fahrradtypen darstellen (Einfluss von Relief, Siedlungsstruktur und Tourismus). Die größten Einschränkungen der Unfallanalyse der amtlichen Daten der Straßenverkehrsunfallstatistik konnten so überwunden werden, es blieben aber auch Einschränkungen aufgrund fehlender Informationen in der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik bestehen (Dunkelziffer, Expositionen, Zustand).

## 7 Fazit

### 7.1 Zielerreichung

Ziel der Dissertation ist es, einen detaillierten Statusbericht des Unfallgeschehens von Pedelecs 25 (P25) in Deutschland zu geben und die Unterschiede zum Unfallgeschehen konventioneller Fahrräder (kFR) darzustellen. Die zentrale Fragestellung dazu lautet: „*Welche Strukturen und Besonderheiten weist das Unfallgeschehen von P25 auf und inwiefern unterscheidet es sich von jenem der kFR?*“. Zur Beantwortung dieser Fragestellung soll die zentrale Hypothese geprüft werden: „*H<sub>A</sub>: Das Unfallgeschehen von P25 weist charakteristische Strukturen auf und unterscheidet sich grundsätzlich vom Unfallgeschehen der kFR*“. Zur Prüfung der Hypothese und somit zur Beantwortung der Fragestellung und zur Zielerreichung ist die Arbeit in drei Teile mit je drei Teilzielen, dazugehörigen Forschungsfragen und entsprechenden Hypothesen unterteilt. Diese werden in drei wissenschaftlichen Aufsätzen betrachtet.

Mit den drei Aufsätzen wird ein detaillierter Statusbericht des Unfallgeschehens von P25 in Deutschland gegeben und die Unterschiede zum kFR-Unfallgeschehen dargestellt, womit die Hypothese H<sub>A</sub> angenommen, die Forschungsfrage beantwortet und somit das Ziel dieser Dissertation erreicht wird. Insgesamt hat sich gezeigt, dass Unfälle unter Beteiligung eines P25 im Durchschnitt schwerer sind als jene der kFR. Zudem konnten eigene Schwerpunkte (Alleinunfälle, Außerorts-Unfälle, Unfälle älterer Nutzender) im Unfallgeschehen dargestellt werden. Pedelec-spezifische Ursachen konnten beschrieben (schwere Verletzungen insbesondere zu erwarten bei Ursachen die sich auf Nutzende oder Straßengestaltung beziehen sowie auf Gefällstrecken oder bei technischen Defekten) und spezifische räumliche Muster mit entsprechenden Schwerpunkten dargestellt werden (Regionen mit erheblichen Höhenunterschieden, touristischer Nutzung sowie ländliche Regionen).

Die Dissertation hat damit einen wichtigen **Beitrag zur Unfallforschung** von P25 geleistet: erstmals wird ein ganzheitliches Bild des Unfallgeschehens von P25 anhand einer Strukturanalyse der Vollerhebung aller Unfälle dieses Fahrzeugs in Deutschland dargestellt und daraus faktenbasiert Schwerpunkte des Unfallgeschehens von P25 beschrieben. Es werden auch erstmals systematisch P25-spezifische Unfallursachen erarbeitet und analysiert. Außerdem wird das P25-Unfallgeschehen eines Jahres in Deutschlands erstmals lokalisiert und räumliche Schwerpunkte dargestellt. Es werden erstmals wichtige ergänzende geographische Faktoren systematisch erarbeitet und deren Einfluss ermittelt.

## 7.2 Schlussfolgerungen

Aber ist denn nun Pedelecfahren sicher? Dazu muss zuerst die Frage geklärt werden, was denn „sicher“ bedeutet. Die Radverkehrssicherheit muss im breiteren Kontext der Gesundheit betrachtet werden, da mangelnde Sicherheit zu Unfällen und diese zu gesundheitlichen Schäden führen kann. In Anlehnung an die Definition der Patientensicherheit der Weltgesundheitsorganisation (WHO) beschreibt das ITF (Verkehrs)Sicherheit als *"das Fehlen vermeidbarer Schäden [...] und die Verringerung des Risikos unnötiger Schäden [...] auf ein akzeptables Minimum."* (ITF 2024: 7, eigene Übersetzung). Schäden sind in diesem Zusammenhang sowohl gesundheitliche (physische) Schäden wie auch materielle (finanzielle) Schäden. Das Unfallrisiko befasst sich mit der Wahrscheinlichkeit von Schäden denen die Radfahrenden ausgesetzt sind (ITF 2024). Im ersten Paper wurde bereits beschrieben, dass im Sinne der Verkehrssicherheitsarbeit die Konzentration zuallererst auf der Vermeidung schwerer Unfälle liegt, um menschliches Leid zu verhindern oder zumindest zu lindern. Zudem hat aus volkswirtschaftlicher Bewertung die Vermeidung schwerer (somit teurer) Unfälle Priorität. Das Auftreten von Unfällen wird dazu im Verhältnis zu einem gewissen Maß an Gefährdung der Menschen durch diese Schäden bewertet. Dieser Ansatz geht über das bloße Zählen von Unfällen hinaus und liefert ein genaueres Maß für die Sicherheit der Radfahrenden. Basierend auf der **Vision Zero** sind weder Todesfälle noch schwere Verletzungen akzeptabel. Für Handlungsempfehlungen ist daher sowohl die absolute Anzahl Verletzter oder Getöteter als auch entsprechende Risikoeinstufungen relevant. Aus der Sicht des **Safe System Approaches** müssen die Komponenten des Straßenverkehrssystem proaktiv gestaltet werden, beispielsweise soll die Infrastruktur so fehlerverzeihend sein, dass Menschen, selbst wenn sie Fehler machen, nicht zu Schaden kommen. Dies setzt voraus, dass man sich auf die Verhinderung von Unfällen konzentriert und nicht in erster Linie auf die Abmilderung ihrer negativen Folgen. (ITF 2024).

Handlungsempfehlungen müssen daher darauf abzielen, die besten Ergebnisse für die Gesundheit zu erzielen. Fahrradfahren kann durch die körperliche Aktivität, Emissionsreduktion und weitere Aspekte in vielerlei Hinsicht erhebliche gesundheitliche Vorteile bringen. Unfälle und daraus resultierende Verletzungen beeinträchtigen die physische wie auch die psychische Gesundheit und verursachen persönliche wie gesellschaftliche Kosten. Daher muss die Politik bei der Bewertung der Sicherheit die positiven gesundheitlichen Auswirkungen der aktiven Mobilität gegen die negativen gesundheitlichen Folgen abwägen. (ITF 2024)

Im ersten Schritt ist es also notwendig, die Häufigkeiten von Unfällen und Verletzen zu analysieren und ein Bild der Unfallstruktur zu erlangen. Dazu untersucht **Paper 1** auf der Basis der Vollerhebung aller polizeilich registrierten Unfälle in Deutschland (amtliche Straßenverkehrsunfallstatistik) mittels deskriptiver statistischer Analysen das Unfallgeschehen von P25 detailliert sowie bundesweit und vergleicht es mit jenem der kFR. Dabei zeigt sich, dass P25-Unfälle durchschnittlich schwerer sind als kFR-Unfälle. Es werden quantitative Aussagen zur Struktur dieser Unfälle getroffen, insbesondere, dass bei einer relativ konstanten Anzahl an Fahrradunfällen insgesamt (Summe beider Fahrzeuge) die zunehmende P25-Beteiligung zu einem geringeren Rückgang schwerer Fahrradunfälle führt. In dem Aufsatz werden zudem spezielle Charakteristika des Unfallgeschehens dargestellt, unter anderem haben P25-Nutzende öfter Alleinunfälle, verunfallen öfter außerorts und dort öfter tödlich wohingegen, bei kFR Knotenpunktunfälle dominieren. Zudem sind verunglückte und insbesondere getötete P25-Nutzende im Durchschnitt älter als verunglückte Fahrradfahrende. Diese Charakteristika werden als Schwerpunkte im Detail beschrieben, wobei die höhere Unfallschwere P25-Nutzender differenziert sichtbar wird. Mithilfe des ersten Aufsatzes kann somit die Teilhypothese  $H_{A1}$  (siehe Abschnitt 3.3) angenommen, die Teilfrage 1 (siehe Abschnitt 3.2) beantwortet und letztlich auch das erste Teilziel (siehe Abschnitt 3.1) erreicht werden.

Darauf aufbauend kann eine Bewertung des Unfallrisikos erfolgen. Für die Analyse der Fahrradfahrenden wird dies jedoch durch zwei Faktoren erschwert (ITF 2024):

Zum einen wird in den offiziellen Unfallstatistiken zu wenig P25-spezifische Informationen aufgenommen, so dass nur ein Teil des Unfallrisikos erfasst wird (ITF 2024). Daher untersucht **Paper 2** auf der Basis von 1.738 Freitextbeschreibungen der den Unfall aufnehmenden Beamten mittels eines mixed-methods-Ansatzes welche pedelec-spezifischen Unfallursachen es gibt und welchen Einfluss diese auf die Unfallschwere haben. Anhand der Fallstudien der P25-Alleinunfälle wird das Unfallgeschehen der P25 vertieft beschrieben. Mögliche Ursachen werden systematisch kategorisiert und dazu quantitative Aussagen getätigt. So beziehen sich von den neuen (Sub-)Kategorien (inklusive Mehrfachnennung) 60 % auf die Nutzenden, 54 % auf die Straßengestaltung, 15 % auf das Fahrzeug und 12 % auf den Straßenzustand. Mithilfe ordinaler Probit-Modelle wird zudem für jede Subkategorie die zu erwartete Verletzungsschwere im Falle eines Unfalls ermittelt. Bei neun Subkategorien sind dabei schwere Verletzungen zu erwarten, sieben beziehen sich auf die Nut-

zenden, eine auf Gefällstrecken und eine auf technische Defekte. Eine vergleichende Analyse mit Unfällen einer separaten Datenbank (GIDAS, siehe Abschnitt 4.3.3) stützt diese Aussagen. Mithilfe des zweiten Aufsatzes kann somit die Teilhypothese  $H_{A2}$  (siehe Abschnitt 3.3) angenommen, die Teilfrage 2 (siehe Abschnitt 3.2) beantwortet und letztlich auch das zweite Teilziel (siehe Abschnitt 3.1) erreicht werden.

Zum anderen sind verlässliche Expositionsdaten nur selten verfügbar (ITF 2024). Bereits in Paper 1 wurde eine Auswertung der „Mobilität in Deutschland“ (MiD) 2017 durchgeführt, um die Anzahl der Wege und die Fahrleistung der beiden Fahrradtypen zu vergleichen. Eine wirkliche Analyse des Unfallgeschehens in Bezug auf diese Expositionsdaten war jedoch mit den Daten der Erhebung 2017 noch nicht möglich. Es war die erste MiD, in der das Pedelec als eigenes Verkehrsmittel erhoben wurde, allerdings nur für grundlegende Aussagen (Nobis und Kuhnimhof 2018). Detailliertere Aussagen sind für die demnächst erscheinende MiD 2023 zu erwarten.

Grundsätzlich wird das **Unfallrisiko von der Verkehrsbelastung** beeinflusst. Wenn kein Verkehr stattfindet, kann sich kein Verkehrsunfall ereignen. (LBD-BY 2022). Eine Möglichkeit zur Darstellung ist die **Unfalldichte**. Sie beschreibt die Anzahl der Unfälle unter Beteiligung einer Verkehrsbeteiligungsart (etwa P25) je Kilometer Straße. Für Fahrräder müsste diese aber Radverkehrsanlagen beinhalten, wofür es in Deutschland keine Daten zu Längen oder ähnlichem gibt. Die Berechnung dieses Indikators ist daher wie auch die Unfallrate (Unfalldichte durch die Anzahl an Fahrzeugen auf der Strecke) für Fahrräder aktuell nicht möglich. (BASt 2022). Die gängigsten Indikatoren zur Darstellung des Risikos im Straßenverkehr sind die **Unfallbelastung** (Anzahl der Unfälle einer Region je Einwohner dieser Region) bzw. die **Verunglücktenbelastung** (Verunglückte je Einwohner) (BASt 2022). Dieser Indikator (Schwerverletzte oder getötete Fahrradnutzende je Einwohner) wurde im dritten Paper berechnet. Die Unfallbelastung gibt das Risiko der Bevölkerung an, an einem entsprechenden Unfall beteiligt zu sein. Es sagt jedoch nichts zu dem Risiko der Nutzenden an sich aus. Dazu wird die Unfallrate oder die Verunglücktenrate berechnet (Anzahl der Unfälle / Verunglückten einer Verkehrsbeteiligungsart in einer Region in einem spezifischen Zeitraum je Verkehrsleistung der Verkehrsbeteiligungsart in einer Region in einem spezifischen Zeitraum). Die Verkehrsleistung ist wiederum die gefahrenen Distanzen (etwa in Kilometer) je Verkehrsteilnehmenden in einem spezifischem Zeitraum. Diese konnten mit der aktuellen MiD 2017 für P25 aber nur auf Bundesebene dargestellt werden. (BASt 2022)

Das **dritte Paper** sucht daher Möglichkeiten das Unfallrisiko regionalisiert zu bewerten. Dazu werden die Fahrradunfälle mit Daten der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik anhand einheitlicher Koordinaten lokalisiert und räumlich abgebildet. Mittels kartographischer Analysen werden entsprechende Charakteristika und räumlich Muster des Unfallgeschehens der beiden Fahrradtypen beschrieben. Das Unfallrisiko wird sowohl anhand der Wahrscheinlichkeit an einem schweren Fahrradunfall beteiligt zu sein (Unfallbelastung (RS): schwere Fahrradunfälle pro Region) als auch der Wahrscheinlichkeit bei einem Fahrradunfall schwer/tödlich verletzt zu werden (Unfallschwere (AS): schwere Fahrradunfälle pro 1000 Fahrradunfälle) dargestellt. So nehmen Unfallschwere und auch Unfallbelastung für beide Fahrradtypen zu, je ländlicher, bergiger oder touristischer eine Region ist. Zudem werden die Daten unterschiedlichen Raumtypen zugeordnet, wobei sich die höchste Unfallbelastung in den dünn besiedelten ländlichen Kreisen zeigt. Die Arbeit beschreibt zudem geographische Faktoren des Unfallgeschehens und analysiert deren Einfluss auf das Unfallgeschehen. So steigt das Risiko schwerer Fahrradunfälle pro Region mit der Abnahme des Anteils der zugelassenen Kraftfahrzeuge, mit der Zunahme der sozialen Benachteiligung in der Region, mit einem höherer Anteil des Tourismus, einer weniger kompakte Siedlungsstruktur sowie mit den Höhenunterschieden und einem geringeren Anteil älterer Menschen an der Bevölkerung in der jeweiligen Region (die beiden letzten jedoch nur für P25). Die Auswirkungen der geografischen Variablen auf das Unfallrisiko sind bei P25 tendenziell größer. Mithilfe des dritten Aufsatzes kann somit die Teilhypothese  $H_{A3}$  (siehe Abschnitt 3.3) angenommen, die Teilfrage 3 (siehe Abschnitt 3.2) beantwortet und letztlich auch das dritte Teilziel (siehe Abschnitt 3.1) erreicht werden.

Basierend auf den Erkenntnissen aus diesen drei Papern können nun **Handlungsempfehlungen** zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und damit zur Minderung des Unfallrisikos skizziert werden. Paper 2 zeigt dabei, dass dazu eine holistische Sichtweise notwendig ist, in der sowohl die Nutzenden, deren Fahrzeuge als auch die notwendige Infrastruktur betrachtet werden und interdisziplinäre Lösungen gefunden werden die ineinandergreifen.

Aus Sicht der **Nutzenden** zeigte sich, dass insbesondere eine riskante Fahrweise (insbesondere durch unangepasste Geschwindigkeit), Ablenkung und Fahren unter Einfluss von Alkohol Fehlverhalten sind, die zu Unfällen führen. Hier empfiehlt es sich, die Nutzenden entsprechend zu sensibilisieren. Die Tatsache, dass aktuell großteiles ältere Nutzende verunglücken zeigt zudem, dass hier zielgruppenspezifische Maßnahmen notwendig sind, ak-

tuell insbesondere für ältere Menschen, perspektivisch aber etwa auch für jüngere Menschen (etwa durch Ausweitung der Mobilitätsbildung in Schulen auf das Thema P25) oder Beschäftigte in Lieferdiensten (etwa über Gewerkschaften). Ein weiteres wichtiges Thema ist das hohe Unfallrisiko unerfahrener Nutzender. Hier empfehlen sich zusätzliche Angebote zur Aneignung der notwendigen Kompetenzen, etwa Fahrsicherheitstrainings für Personen, die ein P25 kaufen oder im Urlaub ausleihen. In diesem Zusammenhang empfiehlt sich auch weitere Forschung zur „mental overload“ der Nutzenden um daraus Maßnahmen zu entwickeln wie Nutzenden komplexe Situationen im Radverkehr erleichtert werden. Obwohl die Maßnahmen vorrangig die Verkehrssicherheit erhöhen soll, indem Unfälle vermieden werden, ist es gleichzeitig empfehlenswert sich selbst zu schützen. Daraus ergibt sich die Handlungsempfehlung, Maßnahmen zu setzen um die Helmtragequote zu erhöhen, etwa durch zielgruppenspezifische Ansprache in Social Media (Kaup 2023).

Aus Sicht der **Fahrzeugtechnik** zeigt sich, dass insbesondere Probleme mit den Bremsen ein Risiko darstellen, teilweise auch Elektromotoren deren Unterstützung zu früh einsetzt oder zu spät aussetzt. Hier besteht Forschungsbedarf, ob es tatsächlich an der Technik (sind etwa bessere Verzögerungswerte der Bremsen notwendig?) oder an der Handhabung liegt. Zudem empfehlen sich Maßnahmen zur Sensibilisierung der Nutzenden bezüglich der ordnungsgemäßen Instandhaltung ihre Fahrzeuge, etwa die Ausstattung mit zwei unabhängigen Bremsen sowie entsprechender Beleuchtung. Auch zu dem Thema unzulässiger Umbauten (Tuning) sollte in diesem Zusammenhang informiert werden.

Aus Sicht der **Straßenverkehrstechnik** und des Straßenbaus zeigt sich, dass es notwendig ist die Radverkehrsinfrastruktur (den aktuellen und zukünftigen Ansprüchen entsprechend) weiter auszubauen. Forschungsbedarf besteht hier insbesondere zu geeigneten Radverkehrsanlagen auf Steigungen respektive Gefälle. Zudem empfiehlt es sich, das Fahren an Steigungen und Gefälle noch intensiver in Fahrtrainings einzubauen. Auch empfehlen sich Maßnahmen, um die Radverkehrsinfrastruktur jederzeit sicher nutzen zu können. Das betrifft sowohl Maßnahmen zur Instandhaltung um etwa Oberflächenaufbrüche oder Schlaglöcher rascher melden und beseitigen zu können also auch Maßnahmen um Hindernisse wie parkende Kfz (insbesondere Pkw, Lkw bei Be und Entladung und Elektrokleinstfahrzeuge) oder Sichtverdeckende Elemente wie Werbetafeln zu eliminieren. Beispielhaft sind Bordsteine anzuführen, die zwar häufig zu Unfällen führen, jedoch selten zu schweren Verletzungen. Hier stehen Interessen der Barrierefreiheit anderen Interessen wie etwa der subjektiven Sicherheit gegenüber. Das zweite Paper zeigte, dass die meisten Konflikte mit

Randsteinen entstehen, weil Nutzende diese übersehen oder abgelenkt sind und seltener, weil sie diese falsch einschätzen (zu geringer Abstand oder falscher Anfahrtswinkel bei Überfahrversuchen). Daher empfehlen sich in hier insbesondere Maßnahmen zur Sensibilisierung der Nutzenden beziehungsweise Trainings zum Erfahrungserwerb.

Aus Sicht der **Verwaltung** zeigt sich, dass zukünftig regelmäßige Schwerpunktanalysen der Fahrradunfälle, insbesondere der Alleinunfälle, der Außerortsunfälle und der Verunglückten hilfreich sein können. Zudem empfiehlt sich die Aufnahme weiterer nutzenderspezifischer Ursachen in die Unfallerbhebung, insbesondere Informationen, die sich auf die Nutzenden (Unaufmerksamkeit, kognitive Überforderung) oder die Straße beziehen (Randsteine, Kanaldeckel). Zudem empfiehlt sich eine regelmäßige kartographische Analyse des Unfallgeschehens der Fahrräder sowie die Aufnahme ergänzender geographischer Faktoren, insbesondere Informationen zu Höhenunterschieden, touristischer Nutzung und Siedlungsstruktur in die Unfallanalyse.

Die vorliegenden Erkenntnisse können wie folgt in einen **übergeordneten Kontext** eingliedert werden: durch verstärkte Bemühungen von Bund und Ländern aber auch von weiteren Akteuren ist ein Anstieg des Radverkehrs zu erkennen. Durch die Corona Pandemie hat sich der Radverkehr zusätzlich verändert. Zudem hält der Trend zu P25 weiter an, die Verkaufszahlen steigen nach wie vor. Es kann vermutet werden, dass die Zahl der getöteten P25 Nutzenden in naher Zukunft jene der getöteten kFR Nutzenden übersteigt. Zu Beginn dieser Arbeit wurde darauf hingewiesen, dass aufgrund verschiedener Herausforderungen eine Wende hin zu nachhaltiger Mobilität notwendig ist. **Perspektive für die Zukunft** ist es daher, den Radverkehr weiter zu fördern und gleichzeitig Verkehrssicherheit zu garantieren. Daher müssen Maßnahmen gesetzt werden, durch die der Anteil des Radverkehrs weiter steigt und gleichzeitig von einem Anstieg verletzter Radfahrender entkoppelt wird. Um dafür notwendige Maßnahmen zu beschreiben sind umfangreiche Datengrundlagen und Analysen erforderlich. Durch diese Arbeit stehen solche nun zur Verfügung. Die Analyse zeigt, dass neue technische Möglichkeiten neue Mobilitätsformen ermöglichen und diese auch neue Analyseformen benötigen. Um präzisere Unfallanalysen zu erstellen sind weitere Daten, etwa P25-spezifische Unfallursachen oder auch geographische Variablen notwendig. Dies wird auch für zukünftige neue Technologien gelten, etwa für die Verknüpfung des Radverkehrs mit dem autonomen und vernetzten Fahren. Zudem werden sich durch neue Technologien neue Möglichkeiten ergeben, wie zusätzliche Daten gewonnen beziehungsweise wie große Datenmengen analysiert werden. In der Einleitung wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Diversifizierung des Fahrrades mit der Einführung des

neuen Fahrradtyps P25 zu einem Anstieg der Nutzung der Fahrräder beigetragen hat. Es ist damit zu rechnen, dass diese in Zukunft noch weiter differenziert werden, etwa in Hinblick auf die zunehmende Popularität von Lastenfahrrädern (in der Ausführung als P25 wie auch als kFR). Zudem gewinnen weitere Formen der Mobilität, beispielsweise Elektrokleinstfahrzeuge (etwa sogenannte e-Scooter) oder Pedelecs 45 an Popularität, die sich ebenfalls diversifizieren, und es werden weitere, gänzlich neue Mobilitätsformen hinzukommen. Es ist zu erwarten, dass sich auch die jeweiligen Unfallgeschehen entsprechend entwickeln. Zu deren zielgenauen Analyse kann diese Dissertation als Grund-/Vorlage dienen.

Trotzdem bleiben Unschärfen in der Analyse des P25-Unfallgeschehen bestehen, weswegen in den Aufsätzen **weiterer Forschungsbedarf** formuliert wird. Dieser wird in den darauffolgenden Aufsätzen aufgegriffen und kann zu großen Teilen geklärt, jedoch nicht komplett aufgelöst werden. Zu nennen sind hier insbesondere die „Dunkelziffer“-Problematik der nicht bekannten Anzahl an nicht polizeilich registrierten Unfällen und deren schwierige Abschätzung. Es wird deutlich, dass die formulierten Unschärfen und Einschränkungen sich aus den Unfalldaten ergeben. Diese bieten als Vollerhebung aller polizeilich registrierten Unfälle zwar eine hervorragende Datenbasis, stoßen jedoch bei der Analyse insbesondere nicht motorisierter Fahrzeuge an ihre Grenzen. Die Einschränkungen der Analysen beziehen sich daher vorwiegend auf die Daten dieser Dissertation und weniger auf die Dissertation selbst, vielmehr zeigt die Dissertation wie diese Einschränkungen überwunden werden können, erarbeitet Vorschläge wie die Unfalldaten entsprechend erweitert werden könnten beziehungsweise welche alternativen Daten herangezogen werden könnten sofern eine Erweiterung der Unfalldaten nicht möglich ist.

### 7.3 Conclusio

Pedelecs 25 bieten eine wichtige Alternative zu Kraftfahrzeugen sowie eine Ergänzung zu konventionellen Fahrrädern. Sie können einen positiven Beitrag zur Verringerung von Emissionen, Lärm und Staus leisten sowie die physische Gesundheit der Nutzenden fördern. Wie für alle Verkehrsformen birgt auch die Nutzung eines Pedelecs 25 gewisse Unfallrisiken. Diese erwiesen sich höher als jene konventioneller Fahrräder. Durch geeignete Maßnahmen, insbesondere Sensibilisierung und Training der Nutzenden, Ausbau entsprechender Radverkehrsinfrastruktur sowie Anpassung der Unfallerkennung und -analyse besteht die Möglichkeit diese Risiken soweit zu reduzieren, dass der positive Nutzen und – last but not least – der Spaß am Radfahren überwiegen.

## 8 Literatur

- ASTRA – Bundesamt für Strassen (2017): Elektrowelos – Auswirkungen auf das Verkehrssystem. – Bern
- Babisch, S., C. Neurohr, L. Westhofen, S. Schoenawa and H. Liers (2023): Leveraging the GIDAS Database for the Criticality Analysis of Automated Driving Systems. In: Journal of Advanced Transportation, Volume 2023, Issue 1, Article ID 1349269, <https://doi.org/10.1155/2023/1349269>
- BAST – Bundesanstalt für Straßenwesen (2022): Kinderunfallatlas 2015-2019. Schriftenreihe: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe „Mensch und Sicherheit“ Heft M 326. – Bergisch Gladbach
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hg.) (2014): Neue Mobilitätsformen, Mobilitätsstationen und Stadtgestalt. ExWoSt-Informationen, 45/1. – Bonn.  
[https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/exwost/45/exwost45\\_1.pdf;jsessionid=0F6391FB9281901BB5D3B9826A794585.live!1312?\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/exwost/45/exwost45_1.pdf;jsessionid=0F6391FB9281901BB5D3B9826A794585.live!1312?_blob=publicationFile&v=1), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2024): Laufende Raumbenutzung. – Bonn.  
<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbenutzung/Komponenten/LaufendeRaumbenutzung/laufenderaumbenutzung.html>, zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- BMDV – Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2022): Pedelec? Aber sicher! (Folder). Bonn. [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StV/pedelec-flyer.pdf?\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/StV/pedelec-flyer.pdf?_blob=publicationFile), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Boele-Vos, M.J., K. Van Duijvenvoorde, M.J.A. Doumen, C.W.A.E. Duivenvoorden, W.J.R. Louwse, R.J. Davidse (2016): Crashes involving cyclists aged 50 and over in the Netherlands: An in-depth study. In: Accident Analysis and Prevention 105 (2017) 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.016>
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2019): Jahrbuch 2018 des Deutschen Wetterdienstes. – Offenbach.  
[https://www.dwd.de/DE/leistungen/jahresberichte\\_dwd/jahresberichte\\_pdf/jahresbericht\\_2018.pdf?\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.dwd.de/DE/leistungen/jahresberichte_dwd/jahresberichte_pdf/jahresbericht_2018.pdf?_blob=publicationFile&v=7), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- EC – European Commission (2024): Annual statistical report on road safety in the EU, 2024. European Road Safety Observatory European Commission, Directorate General for Transport. – Brüssel. [https://road-safety.transport.ec.europa.eu/document/download/b30e9840-4c22-4056-9dab-0231a98e7356\\_en?filename=ERSOnext\\_AnnualReport\\_20240229.pdf](https://road-safety.transport.ec.europa.eu/document/download/b30e9840-4c22-4056-9dab-0231a98e7356_en?filename=ERSOnext_AnnualReport_20240229.pdf), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Färber, N., M. Pöppel-Decker (2023): Forschungsorientierter Zugriff zum Datenbestand der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik ab dem Jahre 1968. – Bergisch Gladbach (unveröffentlichtes Manuskript)

- GIDAS – German In-Depth Accident Study (2024): Methodik der GIDAS Erhebung. <https://www.gidas.org/start.html>, zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Holz-Rau, C., J. Scheiner (2009): Verkehrssicherheit in Stadt und Um-(Land) - Unfallrisiko im Stadt-Land-Vergleich. In Zeitschrift für Verkehrssicherheit 4/2009, 171-177. – Bonn
- Holz-Rau, C., P. Hölderich (2016): Verkehrssicherheit und Höhenunterschiede – Unfälle in Nordrhein-Westfalen. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 5.2016, S239-249. – Bonn
- Hung, N.B., O. Lim (2020): A review of history, development, design and research of electric bicycles. In: Applied Energy 260, (2020) 114323. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114323>
- ITF – International Transport Forum (2023): Road Safety Annual Report 2023, OECD Publishing. – Paris. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/irtad-road-safety-annual-report-2023.pdf> zuletzt aufgerufen am 17.09. 2024
- ITF – International Transport Forum (2024), “Safer Micromobility”, International Transport Forum Policy Papers, No. 129, OECD Publishing, Paris. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/safer-micromobility.pdf>, zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Jones, T., L. Harms, E. Heinen (2016): Motives, perceptions and experiences of electric bicycle owners and implications for health, wellbeing and mobility. In: Journal of Transport Geography 53 (2016): 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.04.006>
- Kaup, Stefanie (2023). Die Auswirkung des Persuasionswissens auf die Glaubwürdigkeit von Präventionsbotschaften in Instagram-Video-Storys: Eine experimentelle Online-Befragung zur Wirkung von Influencer:innen und Expert:innen bei emotions- oder faktenbasierten Fahrradhelm-Kampagnen. In: MedienPädagogik (Occasional Papers), 303–31. <https://doi.org/10.21240/mpaed/00/2023.08.25.X>
- Klein, R. (2016): Elektromobilität -- Entwicklungen bei Pedelecs. In: Jacoby, C. und Wappelhorst, S. (Hg.): Potenziale neuer Mobilitätsformen und -technologien für eine nachhaltige Raumentwicklung, Arbeitsberichte der ARL Bd. 18, S. 126–156. – Hannover. [https://www.arl-net.de/system/files/media-shop/pdf/ab/ab\\_018/AB\\_18\\_06.pdf](https://www.arl-net.de/system/files/media-shop/pdf/ab/ab_018/AB_18_06.pdf), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Kováčsová, N., J.C.F. de Winter, A.L. Schwab, M. Christoph, D.A.M. Twisk, M.P. Hagenzieker (2016): Riding performance on a conventional bicycle and a pedelec in low speed exercises: Objective and subjective evaluation of middle-aged and older persons. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour Volume 42, Part 1 (2016) 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.06.018>
- LBD-BY – Landesbaudirektion Bayern (2022): Verkehrsunfallgeschehen auf Straßen des überörtlichen Verkehrs in Bayern – Ausgabe 2022. – Ebern. [https://www.sichermobil.bayern.de/assets/stmi/verkehrssicherheit2030/stmb\\_verkehrsunfallgeschehen\\_2022.pdf](https://www.sichermobil.bayern.de/assets/stmi/verkehrssicherheit2030/stmb_verkehrsunfallgeschehen_2022.pdf), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024

- Naumann, L. L. und V. Brezina (2020): Zitationsleitfaden der Fakultät Raumplanung. – Dortmund. [https://raumplanung.tu-dortmund.de/storages/raumplanung/r/Downloads/Zitationsleitfaden/200921\\_Zitationsleitfaden\\_final.pdf](https://raumplanung.tu-dortmund.de/storages/raumplanung/r/Downloads/Zitationsleitfaden/200921_Zitationsleitfaden_final.pdf), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Nobis, Claudia und Kuhnimhof, Tobias (2018): Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15). – Bonn, Berlin. [www.mobilitaet-in-deutschland.de](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de), zuletzt aufgerufen am 05.09.2017
- Otte, Facius und Müller (2014): Pedelecs im Unfallgeschehen und Vergleich zu konventionellen nicht motorisierten Zweirädern. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 02/2014, S48-60. – München. <https://www.vkuonline.de/pedelecs-im-unfallgeschehen-und-vergleich-zu-konventionellen-nicht-motorisierten-zweiraedern-1323531.html>, zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Panwinkler, T., N. Färber, M. Pöppel-Decker (2022): Unfallgeschehen von Pedelecs. – Bergisch Gladbach (unveröffentlichtes Manuskript)
- Panwinkler, T., Holz-Rau, C., 2019. Unfallgeschehen von Pedelecs und konventionellen Fahrrädern im Vergleich. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 65, 336–347. – Bonn. <https://www.kirschbaum.de/fachzeitschriften/zeitschrift-fuer-verkehrssicherheit/zvs/heftarchiv/zvs-05-2019.html#c9573>
- Panwinkler, T., Holz-Rau, C., 2021. Causes of pedelec (pedal electric cycle) single accidents and their influence on injury severity. Accident; analysis and prevention 154, 106082. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106082>
- Panwinkler, T., Holz-Rau, C., Scheiner, J, 2024. Spatial Dimension of Accidents involving Pedelecs 25 and Conventional Bicycles. Transportation Engineering, Volume 16, June 2024, 100232. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100232>
- Schepers, J.P., E. Fishman, P. den Hertog, K. Klein Wolt, A.L. Schwab (2014): the safety of electrically assisted bicycles compared to classic bicycles. In: Accident Analysis and Prevention 73 (2014) 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.09.010>
- Schleinitz, K., L. Franke-Bartholdt, T. Petzoldt, S. Schwanitz, T. Gehlert, M. Kühn (2014): Pedelec-Naturalistic Cycling Study. Hrsg: Unfallforschung der Versicherer – UDV im Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. GDV: Forschungsbericht Nr. 27. – Berlin
- Schreck, B. und M. Pöppel-Decker (2014): Radverkehr Unfallgeschehen zwischen rechtsabbiegenden Güterkraftfahrzeugen und geradeausfahrenden Radfahrern. In Zeitschrift für Verkehrssicherheit 04/2014, S239-242. – Bonn
- Schreck, B. (2016): Radverkehr - Unfallgeschehen und Stand der Forschung. In Zeitschrift für Verkehrssicherheit 02/2016, S63-77. – Bonn
- StBA – Statistisches Bundesamt (2014). Verkehr – Verkehrsunfälle 2013 – Fachserie 8 Reihe 7. – Wiesbaden
- StBA – Statistisches Bundesamt (2015). Verkehr – Verkehrsunfälle 2014 – Fachserie 8 Reihe 7. – Wiesbaden

- StBA – Statistisches Bundesamt (2022a). Verkehr – Verkehrsunfälle 2021 – Fachserie 8 Reihe 7. – Wiesbaden
- StBA – Statistisches Bundesamt (2022b): Verkehrsunfälle - Kraftrad- und Fahrradunfälle im Straßenverkehr 2021. – Wiesbaden
- StVUnfStatG – Gesetz über die Statistik der Straßenverkehrsunfälle (Straßenverkehrsunfallstatistikgesetz) (2015) vom 15. Juni 1990 (BGBl. I S. 1078), letzte Änderung durch Artikel 497 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474). – Berlin. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvunfstg\\_1990/BJNR010780990.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvunfstg_1990/BJNR010780990.html), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- StVZO – Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (2024) vom Mai 2012 (BGBl. I S. 679), letzte Änderung durch Art. 1 VO vom 10. Juni 2024 (BGBl. I Nr. 191 vom 19. Juni 2024). – Berlin. [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/index.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/index.html), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- Twisk, D.A.M., S. Platteel, G.R. Lovegrove (2017) An experiment on rider stability while mounting: Comparing middle-aged and elderly cyclists on pedelecs and conventional bicycles. In: Accident Analysis and Prevention 105 (2017) 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.01.004>
- UDV – Unfallforschung der Versicherer (2017): Verkehrssicherheit von Elektrofahrrädern. Unfallforschung kompakt Nr. 69. Unfallforschung der Versicherer. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. – Berlin
- Vandenbulcke, G., I. Thomas, B. de Geus, B. Degraeuwe, R. Torfs, R. Meeusen, L. I. Panis (2009): Mapping bicycle use and the risk of accidents for commuters who cycle to work in Belgium. In: Transport Policy Volume 16, Issue 2, March 2009; 77 – 87. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2009.03.004>
- VUFO – Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH (2024). GIDAS. <https://www.vufo.de>, zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- WrÜbk – Gesetz zu den Übereinkommen vom 8. November 1968 über den Straßenverkehr und über Straßenverkehrszeichen, zu den Europäischen Zusatzübereinkommen vom 1. Mai 1971 zu diesen Übereinkommen sowie zum Protokoll vom 1. März 1973 über Straßenmarkierungen (1977) vom 21. September 1977 (BGBl. II S. 809).- Bonn. [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBI&jumpTo=bgbl277s0809.pdf#\\_bgbl\\_%2F%2F%5B%40attr\\_id%3D%27bgbl277s0809.pdf%27%5D\\_1726748579462](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&jumpTo=bgbl277s0809.pdf#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl277s0809.pdf%27%5D_1726748579462), zuletzt aufgerufen am 17.09.2024
- ZIV – Zweirad-Industrie-Verband e.V. (2016): ZIV-Jahresbericht 2015 - Mitglieder & Kennzahlen 2015. – Bad Solden
- ZIV – Zweirad-Industrie-Verband e.V. (2017): ZIV-Jahresbericht 2016 - Mitglieder & Kennzahlen 2016. – Bad Solden
- ZIV – Zweirad-Industrie-Verband e.V. (2024): ZIV-Jahresbericht 2023 - Mitglieder & Kennzahlen 2023. – Bad Solden