

Prävention von Wildtierunfällen auf Strassenverkehrs- infrastrukturen

**Prévention des accidents de gibier sur les infrastructures
routières**

**Prevention of wildlife-vehicle collisions on road
infrastructure**

Forschungsgruppe Wildtiermanagement, ZHAW Wädenswil
Stefan M. Suter, Martina Reifler-Bächtiger, Tanja Koch, Annette Stephani,
Benjamin Sigrist, Roland F. Graf

Forschungsgruppe Geoinformatik, ZHAW Wädenswil
Patrick Laube, Nils Ratnaweera

Institut für Angewandte Simulation, ZHAW Wädenswil
Ivo Kaelin, Anna Wróbel

**Forschungsprojekt VSS 2015/212 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassenverkehrsfachleute (VSS)**

April 2021

1698

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Prävention von Wildtierunfällen auf Strassenverkehrs- infrastrukturen

**Prévention des accidents de gibier sur les infrastructures
routières**

**Prevention of wildlife-vehicle collisions on road
infrastructure**

Forschungsgruppe Wildtiermanagement, ZHAW Wädenswil
Stefan M. Suter, Martina Reifler-Bächtiger, Tanja Koch, Annette Stephani,
Benjamin Sigrist, Roland F. Graf

Forschungsgruppe Geoinformatik, ZHAW Wädenswil
Patrick Laube, Nils Ratnaweera

Institut für Angewandte Simulation, ZHAW Wädenswil
Ivo Kaelin, Anna Wróbel

**Forschungsprojekt VSS 2015/212 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassenverkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), Wädenswil

Projektleitung

Stefan M. Suter

Mitglieder

Patrick Laube

Ivo Kaelin

Martina Reifler-Bächtiger

Nils Rathaweera

Anna Wröbel

Tanja Koch

Annette Stephani

Benjamin Sigrist

Roland F. Graf

Federführende Fachkommission

Fachkommission: NFK 2.6

Begleitkommission

Präsident

Marguerite Trocmé-Maillard

Mitglieder

Roger Beer

Karin Hilfiker

Roman Kistler

Christa Mosler-Berger

Antonio Righetti

Beat Staedler

Laurence von Fellenberg

Adrian Zeender

KO-Finanzierung des Forschungsprojekts

Bundesamt für Umwelt BAFU

Stiftung (will nicht genannt werden)

Schweizerische Bundesbahnen SBB

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassenverkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	11
	Summary	15
1	Einleitung	19
2	Welche Faktoren beeinflussen das Risiko für Wildtierunfälle?	21
3	Material und Methoden	23
3.1	Potenzielle Einflussfaktoren	23
3.2	Bestimmung der Parameter für die statistische Modellierung	23
3.2.1	Daten	24
3.2.2	Datenvorverarbeitung	26
3.2.3	Segmentierung Strassennetz	30
3.2.4	Auswahl von Kontrollsegmenten	32
3.2.5	Operationalisierung der Umgebungsparameter	32
3.2.6	Statistische Modellierung	37
3.3	Bestimmung der lokalen Parameter	39
3.4	Verwendete Software	40
4	Resultate	41
4.1	Zusammenstellung potenzieller Einflussfaktoren	41
4.2	Parameter der statistischen Modellierung	41
4.3	Kartenansicht der Resultate	45
4.4	Saisonalität und Tageszeit	47
4.5	Lokale Parameter im Feld	48
4.6	Literaturrecherche Präventionsmassnahmen	50
4.6.1	Räumliche Trennung von Wildtierhabitat und Verkehrsinfrastruktur	50
4.6.2	Wildtiere vor dem Verkehr warnen	53
4.6.3	Verkehrsteilnehmer vor Wildtieren warnen	56
4.6.4	Antikollisionssysteme in den Fahrzeugen	58
5	Diskussion	61
6	Schlussfolgerungen und Empfehlung	67
	Anhänge	71
	Literaturverzeichnis	81
	Projektabschluss	89

Zusammenfassung

Jedes Jahr kommen auf Schweizer Verkehrsinfrastrukturen rund 10'000 grössere Wildtiere wie Rehe, Rothirsche, Gämsen und Wildschweine um. Wildtierunfälle verursachen jährlich Sachschäden in Millionenhöhe und können in schweren Fällen auch zu Personenschäden und Verkehrstoten führen. Durch die aktuelle Ausbreitung von Rothirsch und Wildschwein und dem damit verbundenen Populationswachstum sowie durch das stetig steigende Verkehrsaufkommen wird sich das Risiko für Wildtierunfälle in Zukunft weiter erhöhen. Genaue Kenntnisse über die Umstände und Einflussfaktoren, welche zu Wildtierunfällen führen, sind daher zentral für einen gezielten und effizienten Einsatz von Präventionsmassnahmen. Aktuelle Studien zur Analyse von Wildtierunfällen stimmen in der allgemeinen Methodik überein. In einem ersten Schritt wird das Strassennetz segmentiert und in Kollisions-Hotspots und Abschnitte mit wenig oder keinen Unfällen (Non-Hotspots) unterteilt. In einem zweiten Schritt werden den entstandenen Segmenten Variablen (Wildtier, Verkehr und Umwelt) zugewiesen, um dann schließlich mit Hilfe statistischer Modellierungen oder maschinellen Lernen das Kollisionsrisiko zu bestimmen.

Die Ausgangslage dieser Studie bilden drei Datensätze zur räumlichen Verteilung von Wildtierunfällen in den Kantonen Zürich, Freiburg und Graubünden. Dabei handelt es sich um Wildtierunfälle, die von den Fahrzeuglenkern an die Polizei gemeldet wurden. Diese Daten wurden bereinigt, nach den gewünschten Tierarten (Reh, Rothirsch, Wildschwein und Gämse) gefiltert, auf einen bestimmten Zeitraum gekürzt und schlussendlich einer Strasse zugeordnet. Um die zentrale Untersuchungsgrösse, nämlich Strassenabschnitte mit besonders vielen Unfällen (Hotspots), zu erhalten, wurde das Strassennetz segmentiert. Es wurden unterschiedliche Ansätze zur Segmentierung genutzt, einerseits eine regelmässige Segmentierung in 200 m Abschnitte, andererseits zwei datengetriebene Segmentierungen für 100 m und 200 m Abschnitte, die auf der räumlichen Verteilung der Unfallereignisse beruhen (Kernel Density Estimation). Um nachfolgend statistische Verfahren zur Modellierung des Einflusses der räumlichen Umgebungsvariablen auf die Hotspot-Verteilung durchzuführen, brauchte es Kontrollsegmente, auf denen wenig bis keine Unfälle geschehen. Bei der regelmässigen Strassensequenzierung ergaben sich diese Kontrollsegmente von selbst. Bei der datengetriebenen Sequenzierung mussten solche Non-Hotspots definiert und ausgewählt werden. Dabei wurde darauf geachtet, dass Non-Hotspots von ähnlicher Länge, von der gleichen Strassenkategorie und räumlich nahe an ihrem respektiven Hotspot-Segment lagen.

Für die vorliegende Studie wurde eine umfassende Zusammenstellung der potenziellen Einflussfaktoren erstellt, welche Wildtierunfälle begünstigen können. Zusätzlich wurden Feldaufnahmen an den bekannten Hotspots durchgeführt, um den Einfluss der lokal vorliegenden Faktoren zu untersuchen. Basierend auf diesen Einflussfaktoren wurden Parameter, für die schweizweite Geodaten verfügbar waren, bestimmt und operationalisiert. Es wurden Attributparameter, wie die mittlere Verkehrsbelastung der Strasse, Formparameter, wie die Sinuosität oder «Kurvigkeit» eines Segments, Distanzparameter, wie der Abstand zum nächsten Wald, zonale Parameter, wie Waldanteil innerhalb einer bestimmten Fläche um das Segment herum und komplexe modellierte Parameter, wie das Vorhandensein von Leitstrukturen, genutzt, um die Strassensegmente zu beschreiben. Mit verschiedenen Modellierungsansätzen, namentlich Regressionen und Maschinellen Lernen, wurden diese Parameter anschliessend verwendet, um das Auftreten der vorhandenen Fallwilddaten in den Kantonen Zürich, Freiburg und Graubünden zu untersuchen. Diese erklärenden Modelle erlauben zunächst Aussagen darüber, welche Parameter besonders stark zum Auftreten von Wildtierunfällen führen. Mit den optimierten Modellen war es weiter möglich, Orte mit besonders vielen Wildtierunfällen zu 80-90% korrekt vorherzusagen. Diese Modelle erlauben nun auch, in jenen Gebieten eine Vorhersage über die Unfallwahrscheinlichkeit zu machen, wo keine Datengrundlagen zu Wildtierunfällen verfügbar sind.

Ein erstes Ergebnis der vorliegenden Studie ist eine detaillierte Übersicht der Faktoren, welche die Unfallwahrscheinlichkeiten mit Wildtieren beeinflussen. Diese sind zahlreich und können sich im Tages- und Jahresverlauf verändern. Sie wurden in die drei

Hauptkategorien Wildtier, Verkehr und Umwelt aufgeteilt. Es gilt zu beachten, dass die Faktoren nicht isoliert für sich stehen, sondern auch Interaktionen zwischen den verschiedenen Faktoren auftreten können. Die verschiedenen Einflussfaktoren wurden nach ihrer Beeinflussbarkeit eingestuft. Die Zusammenstellung der Einflussfaktoren diente dann als Grundlage für die Auswahl der Parameter für die statistische Modellierung. Insgesamt wurden drei unterschiedliche Strassensegmentierungen vorgenommen und für jede dieser Segmentierungen zwei unterschiedliche Modellierungen (Mittelland und Alpen) durchgeführt. Alle Modelle ermöglichen die Unterscheidung zwischen Hotspot- und Non-Hotspot-Segmenten. In allen Fällen sind die Modelle effektiver bei der Identifizierung von Hotspot-Segmenten als von Non-Hotspot-Segmenten. Während die Modelle Hotspots entlang und in Wäldern zuverlässig aufzeigen, werden Hotspots im offenen Feld weniger gut erkannt. Dies ist einerseits auf die Veränderung der Vegetation auf landwirtschaftlichen Flächen im Laufe des Jahres und der Folgejahre zurückzuführen und andererseits auf das Fehlen flächendeckender Daten auf diesen Flächen. Die unterschiedlichen Modelle enthielten verschiedene Kombinationen von Variablen. In allen vier Regressionsmodellen wurden die folgenden Variablen als signifikant ausgeschieden: Sinuosität der Strasse, der Anteil Äsungsflächen innerhalb von 100 m und der emittierte Strassenlärm innerhalb von 50 m um das Strassensegment. Bei den beiden Modellen, die auf Maschinellem Lernen beruhten, waren insbesondere die beiden Strassenklassen «4 m Strasse» und «6 m Strasse» wichtige Faktoren für die Unterscheidung von Hotspots und Non-Hotspots. Die auf Maschinellem Lernen basierende Modelle weisen im Vergleich zu den Regressionsmodellen eine geringere Leistung auf. Auch ist die Interpretation der Einflussfaktoren bei dieser Methode schwieriger. Deshalb werden die Regressionsmodelle bevorzugt. Eine schweizweite Prognose der Hotspots war ein zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit. Die Visualisierung der Prognosen der unterschiedlichen Modelle sind als interaktive Webkarten unter www.zhaw.ch/iunr/wildtierunfaelle verfügbar. Die Webkarten erlauben es, nun auch für Regionen, in denen bislang keine Auswertungen der Fallwilddaten bzw. keine Identifikation der Hotspots bestand, die gefährdeten Strassenabschnitte relativ genau abzugrenzen. Somit können die Karten zu einer ersten Einschätzung dienen. Sie ersetzen aber nicht eine Begehung der Abschnitte im Feld.

Eine Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass grundsätzlich vier Möglichkeiten zur Prävention von Wildtierunfällen zur Anwendung kommen: 1) Trennung des Lebensraums der Wildtiere von der Verkehrsinfrastruktur, 2) Warnung der Wildtiere vor Fahrzeugen, 3) Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Wildtieren in Strassennähe und 4) Technische Lösungen in Fahrzeugen wie Radar und Echtzeit-Objekterkennung. Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass Zäune sehr effektiv sind, um Kollisionen zu reduzieren. Jedoch sollten Zäune nur in Kombination mit Wildtierpassagen verwendet werden, damit die Vernetzung der Wildtierhabitate weiterhin gewährleistet bleibt. Auch Wildwarnsysteme, welche die Verkehrsteilnehmer warnen, haben sich als wirksam erwiesen, um Kollisionen nachhaltig zu reduzieren. Die aktuell verfügbaren Systeme sind allerdings relativ teuer und eignen sich nur für kurze Strassenabschnitte. Visuelle, akustische und olfaktorische Abschreckungssysteme, welche Wildtiere vor Gefahren auf der Verkehrsinfrastruktur warnen, können zwar kurzfristig die Fallwildzahlen senken, aber bisher hat keine Langzeitstudie ihre Wirksamkeit belegen können. Antikollisionssysteme in Fahrzeugen werden laufend weiterentwickelt und in Zukunft auch dazu beitragen, die Anzahl Wildunfälle zu reduzieren. Die innerhalb dieser Studie untersuchten und beschriebenen Präventionsmassnahmen wurden in einem Katalog zusammengefasst. Der Katalog beinhaltet nebst der Einschätzung der Wirksamkeit auch die relativen Kosten und Verweise auf weiterführende Literatur. Die Auswertung der Felddaten an den Hotspots hat ergeben, dass die Anzahl an Wildtierwechsel, Lager, Losung und weiteren Anzeichen für Aktivität von Wildtieren die Lage und Ausdehnung eines Hotspots relativ genau anzeigen.

Die vorliegende Studie hat mittels Fallwildauswertung und statistischen Modellierungen aufgezeigt, wann und wo Wildtierunfälle sich häufen. Es können nun Strassenabschnitte mit hohem Risiko für Wildtierunfälle auch in Gebieten, in denen keine oder nur unvollständige Informationen zu Wildtierunfällen vorliegen, identifiziert werden. Damit liefert die vorliegende Studie die Grundlagen, um das Risiko für Wildtierunfälle auf Schweizer Verkehrsinfrastrukturen situationsgerecht zu entschärfen. Das zentrale räumliche Resultat bildet die Schweizerkarte mit Strassensegmenten, für die eine geschätzte Unfallwahrscheinlichkeit mittels verschiedener Modelle berechnet wurde.

Mittels Begehung kann der gefährdete Bereich relativ genau abgegrenzt werden. Dies ermöglicht zukünftig die für Präventionsmethoden verfügbaren finanziellen Mittel effizienter einzusetzen. Zugleich sind Wildtiere und Menschen besser vor Kollisionen und deren negativen Folgen geschützt, da die Verkehrssicherheit mit gezielten Massnahmen erhöht werden kann.

Der im Rahmen der Studie erstellte Katalog an mögliche Massnahmen bietet eine gute Übersicht der bekannten Präventionsmethoden, wie auch ihrer Kosten und der erwiesenen Wirksamkeit. Weiterer Forschungsbedarf besteht in der vertieften Analyse der Situationen, in denen sich Unfälle ereignen. Diese Analysen sollten auf den relevanten räumlichen Ebenen geschehen und auch den Faktor Zeit sowie die zum Unfallzeitpunkt vorherrschenden Umwelteinflüsse berücksichtigen. Wichtig ist, dabei artspezifisch vorzugehen, denn je nach Tierart empfehlen sich andere Massnahmen zur Unfallprävention. Eine zielgerichtete und optimale Wahl der Präventionsmassnahme kann also nur erfolgen, wenn bekannt ist, welche Tierart(en) von den Unfällen betroffen sind. Werden Strassenabschnitte neu mit Präventionsmethoden ausgestattet, empfiehlt sich eine wissenschaftliche Begleitung bzw. Auswertung der Fallwildentwicklung. Zukünftige Studien zur Wirksamkeit von Präventionsmethoden sollten einen Vergleich der verunfallten Tiere im Verhältnis zu den erfolgreichen Wildtierquerungen über die Verkehrsinfrastruktur anstreben. Eine reine Reduktion der Fallwildzahlen ist noch kein Beweis für die Wirksamkeit einer Präventionsmethode, weil auch andere Faktoren, wie zum Beispiel die Reduktion der Wildtierbestände oder Änderungen in der Umgebung des Unfallhotspots zu einer Reduktion der Wildtierunfälle führen könnten.

Die vorliegende Studie hat wiederholt aufzeigen können, dass Wildtierunfällen ein komplexes, Interaktionen beinhaltendes und dynamisches System zugrunde liegt. Anhand von Veränderungen unserer Wildtierbestände, den Umgebungsbedingungen und des Strassennetzes können sich aktuelle Hotspots in Zukunft entschärfen, während andernorts neue Hotspots entstehen. Die Datengrundlage und die methodischen Möglichkeiten von Modellierungen werden sich weiterentwickeln und die Autoindustrie bringt laufend Innovationen zur Verbesserung der Fahrsicherheit auf den Markt. Aus diesem Grund wird eine Neubeurteilung bzw. Aufarbeitung der Situation gemäss dem vorliegenden Ansatz als Ausgangspunkt in Zeitintervallen von fünf bis acht Jahren empfohlen.

Résumé

Environ 10'000 animaux sauvages tels que chevreuils, cerfs, chamois et sangliers sont tués chaque année sur les infrastructures de transport suisses. Les collisions entre la faune et les véhicules causent des dommages dont les coûts sont à la hauteur de plusieurs millions et, dans les cas les plus graves, peuvent engendrer blessures, voir décès des utilisateurs de la route. L'expansion et l'augmentation des populations de cerfs et de sangliers, ainsi que l'augmentation simultanée du volume de trafic entraîneront, à l'avenir, un risque accru de collisions entre animaux sauvages et véhicules. Il est donc essentiel de connaître les facteurs qui sont à l'origine de ces accidents pour pouvoir utiliser des mesures de prévention de manière ciblée et efficace. Les études actuelles sur la problématique des collisions entre la faune sauvage et les véhicules suivent toutes la même méthode générale. Dans un premier temps, le réseau routier est segmenté en tronçons dits « hotspots » de collision (nombre élevé d'accidents) et en tronçons où le nombre d'accidents est faible ou nul. Dans un deuxième temps, ces tronçons sont associés à des facteurs qui influencent potentiellement le risque d'accident (faune, trafic ou environnement). Dans la dernière étape, des modèles statistiques ou l'apprentissage automatique sont utilisés pour déterminer et prédire le risque de collision pour chaque tronçon.

Les données de base de cette étude proviennent de trois jeux de données spatiales sur les collisions entre animaux sauvages et véhicules, qui ont eu lieu dans les cantons suisses de Zurich, Fribourg et Grisons. Ces données sont basées sur les collisions entre véhicules et animaux sauvages rapportées par les conducteurs impliqués. Les données ont été nettoyées, filtrées en fonction des espèces ciblées (chevreuil, cerf, sanglier et chamois), réduites à une période définie et enfin attribuées à la route correspondante. Pour obtenir les éléments centraux de cette étude, à savoir les « hotspots », nous avons segmenté le réseau routier en utilisant différentes approches. D'une part, nous avons calculé des segments avec des intervalles réguliers de 200m. D'autre part, nous avons également utilisé deux approches basées sur la distribution spatiale des collisions faune-véhicule pour des tronçons de 100m et 200m (Kernel Density Estimation). Pour l'analyse statistique de l'influence des divers facteurs, nous avons également besoin de segments contrôles, ne constituant pas des accidents. Pour l'approche avec les segments à intervalles réguliers, ces segments contrôles étaient déjà définis. Cependant, pour la segmentation basée sur la distribution spatiale des collisions faune-véhicule, les segments « non-hotspots » ont dû être définis et sélectionnés lors d'une étape supplémentaire. Nous avons veillé à ce que ces zones « non-hotspots » soient de longueur similaire, sur une catégorie de route identique et à proximité des « hotspots » respectifs.

Cette étude contient une compilation intégrale des facteurs d'influence potentiels pouvant favoriser les collisions faune-véhicule. Pour étudier l'influence des facteurs, des évaluations des segments « hotspots » sur le terrain ont été réalisées en complément. Sur la base de ces facteurs, des paramètres pour lesquels des données géographiques nationales étaient disponibles ont été identifiés et opérationnalisés. Nous avons fait la distinction entre les paramètres attribués (p.ex. la densité moyenne du trafic), les paramètres de forme (p.ex. la sinuosité), les paramètres de distance (p.ex. la distance jusqu'à la forêt la plus proche), les paramètres locaux (p.ex. la quantité de forêt sur une zone déterminée autour du segment de route) et les paramètres spatiaux complexes et modélisés (p.ex. les structures menant vers la route). En appliquant différentes approches de modélisation, à savoir régressions et apprentissage automatique, ces paramètres ont été utilisés pour évaluer les données relatives aux animaux tués sur la route dans les cantons de Zurich, Fribourg et Grisons. Dans un premier temps, ces modèles fournissent des informations sur les paramètres conduisant à une augmentation des collisions entre la faune sauvage et les véhicules. Grâce aux modèles améliorés, il a ensuite été possible de prédire les « hotspots » de collision avec une précision de 80 à 90 %. Ces modèles peuvent maintenant être utilisés pour prédire la probabilité d'accident dans les régions où les données sur les animaux sauvages sont rares.

Un premier résultat de cette étude est la compilation exhaustive des facteurs qui influencent la probabilité de collision entre la faune et les véhicules. Ces facteurs sont nombreux et peuvent évoluer au fil des jours et des années. Les facteurs ont été attribués à trois catégories principales, à savoir la faune, le trafic et l'environnement, et classés en fonction de la manière dont ils sont contrôlables. Souvent, ces facteurs interagissent les uns avec les autres et ne peuvent pas être évalués individuellement. Cette compilation des facteurs d'influence a servi de base à la sélection des paramètres pour la modélisation statistique. Au total, nous avons utilisé trois approches différentes pour segmenter les routes et, pour chacune de ces approches, nous avons réalisé deux modèles différents (un pour le Plateau suisse et un pour les régions alpines). Tous les modèles ainsi obtenus ont été capables de différencier les segments « hotspots » et les segments « non-hotspots ». Cependant, les segments « hotspots » ont pu être définis de manière plus précise que les segments « non-hotspots ». En outre, les « hotspots » situés dans des zones ouvertes sont moins bien identifiés car les cultures changent d'aspect au cours de l'année et des années suivantes. De plus, aucune donnée géographique complète n'est disponible pour ces zones ouvertes. Les différents modèles contenaient des combinaisons variables de facteurs d'influence, mais les facteurs suivants se sont avérés significatifs dans les quatre modèles de régression : sinuosité de la route, quantité de zones de pâturage et de broutement dans un rayon de 100m, et bruit de la circulation dans un rayon de 50m autour du segment de route. Pour les deux modèles utilisant l'approche d'apprentissage automatique, les classes de route "route de 4m" et "route de 6m" se sont avérées être des facteurs déterminants pour la différenciation entre les « hotspots » et les segments contrôlés. Par rapport aux modèles de régression, les modèles d'apprentissage automatique étaient moins puissants. En outre, l'interprétation de leurs facteurs d'influence est plus compliquée. Pour cette raison, les modèles de régression ont été privilégiés. L'objectif central de cette étude était d'établir un pronostic des « hotspots » dans toute la Suisse, disponible sous forme de carte interactive en ligne sur www.zhaw.ch/iunr/wildtierunfaelle. La carte en ligne permet d'identifier avec précision les éventuels « hotspots » dans les régions pour lesquelles aucune donnée n'était disponible. Elle ne peut toutefois pas remplacer les évaluations sur le terrain.

La recherche bibliographique a identifié quatre types de mesures pour prévenir les collisions entre la faune et les véhicules : 1) séparation physique des habitats de la faune et des infrastructures de transport, 2) avertissement des animaux sauvages de l'arrivée de véhicules, 3) avertissement aux conducteurs de la présence d'animaux au bord de la route, et 4) solutions techniques sur le véhicule telles que le radar et la reconnaissance d'objets en temps réel. Des études antérieures ont montré une bonne efficacité des clôtures dans la réduction des collisions, mais les clôtures ne devraient être appliquées qu'en combinaison avec des passages pour la faune afin de garantir l'interconnexion des habitats. Les systèmes d'alerte pour les conducteurs ont également montré une bonne efficacité dans la réduction des collisions, mais les technologies actuelles sont coûteuses et ne peuvent être appliquées que sur de courts segments de route. Les répulsifs visuels, acoustiques et olfactifs qui dissuadent les animaux de s'approcher des routes ne peuvent réduire le nombre d'accidents que temporairement. Aucune étude à long terme n'a été menée jusqu'à présent pour en prouver l'efficacité. Des systèmes « anti-collision » installés directement sur les véhicules sont constamment perfectionnés et vont certainement participer à la réduction des accidents, dans le futur. Les mesures de prévention examinées et décrites dans cette étude ont été résumées dans un catalogue. En plus d'une évaluation de l'efficacité des mesures, le catalogue comprend également les coûts relatifs et des références à d'autres ouvrages. Les études sur le terrain aux segments « hotspots » ont montré que les sentiers d'animaux, les places de repos, les excréments d'animaux et d'autres signes d'activité de la faune indiquent l'emplacement et l'étendue d'un « hotspot » de manière relativement précise.

La présente étude a utilisé l'analyse des données de collision entre faune et véhicules et la modélisation statistique pour montrer quand et où les accidents de la faune sauvage sont les plus fréquents. Il est désormais possible d'identifier les tronçons de route présentant un risque élevé d'accidents impliquant des animaux sauvages, même dans les zones où l'on ne dispose d'aucune information ou d'informations incomplètes sur des accidents préalables. Cette étude fournit donc une base pour réduire de manière ciblée les collisions entre la faune et les véhicules. Le principal résultat est une carte routière de la

Suisse, où les probabilités d'accidents impliquant des animaux sauvages ont été calculées, sur des segments de route, à l'aide de différents modèles. Par ailleurs, grâce à une inspection détaillée sur le terrain, le segment précis de la route présentant un haut risque peut être précisément identifié. Par conséquent, les ressources financières allouées à la prévention des accidents impliquant des animaux sauvages seront déployées plus efficacement à l'avenir, la sécurité du trafic sera accrue et les animaux sauvages ainsi que les humains seront mieux protégés des conséquences négatives des collisions entre animaux sauvages et véhicules.

Le catalogue des mesures de prévention donne un aperçu des méthodes disponibles, de leurs coûts et de leur efficacité. Cependant, des analyses approfondies des situations dans lesquelles les collisions se produisent sont nécessaires. Ces analyses doivent être effectuées à des niveaux spatiaux pertinents et prendre en compte les caractéristiques temporelles et de conditions environnementales au moment de l'accident. En outre, il est essentiel de tenir compte des espèces animales concernées, car les mesures de prévention diffèrent selon les espèces ou les groupes d'espèces. Si de nouveaux segments de route sont équipés de dispositifs de prévention, il serait judicieux de suivre scientifiquement l'évolution des accidents sur ces segments. Les études futures concernant l'efficacité des méthodes de prévention ne devraient pas seulement porter sur la réduction du nombre de collisions entre véhicules et animaux sauvages, mais aussi sur le rapport entre les collisions et le nombre d'animaux arrivant tout de même à traverser la route en question. La simple réduction des collisions n'est pas une preuve de l'efficacité d'une méthode de prévention, car de nombreux autres facteurs, tels que la réduction de la taille de la population d'animaux sauvages ou des changements environnementaux à proximité du « hotspot » pourraient également réduire le nombre d'accidents.

Grâce à cette étude, nous avons pu montrer à plusieurs reprises que les collisions entre la faune sauvage et les véhicules sont la conséquence d'un système complexe et dynamique avec des facteurs en interaction. En raison de l'évolution des populations d'animaux sauvages, du réseau routier ou de facteurs environnementaux, les « hotspots » existants pourraient s'atténuer, tandis que de nouveaux « hotspots » pourraient émerger. Les bases de données, mais aussi les possibilités méthodologiques de la modélisation statistique vont augmenter, et l'industrie automobile travaille continuellement à des innovations pour améliorer la sécurité de la conduite. Par conséquent, nous suggérons une réévaluation de la situation des « hotspots » en Suisse, tous les cinq à huit ans, en prenant l'approche présentée comme point de départ.

Summary

About 10'000 wild animals like roe deer, red deer, chamois and wild boars are killed every year on Swiss transport infrastructures. Wildlife–vehicle collisions cause damages running into the millions and can, in severe cases, lead to personal injuries and road deaths. The current expansion of red deer and wild boar and the associated population growth as well as the simultaneous increase in traffic volume will further increase the risk of wildlife-vehicle collisions in the future. Accurate Knowledge about the circumstances and factors, which lead to these accidents are therefore crucial for a targeted and efficient application of prevention measures. Contemporary studies about the analysis of wildlife-vehicle collisions all follow the same, general method. In a first step, the road network is segmented into collision hotspots and segments with a low number or no accidents (so-called non-hotspots). In the second step, these segments are attributed with variables (wildlife, traffic, or environment). In the final step, statistical models or machine learning is used to determine the collision risk of the single segments.

The data basis for this study are three spatial data sets of wildlife-vehicle collisions, that occurred in the Swiss cantons of Zurich, Fribourg, and Grisons. They are based on wildlife-vehicle collisions that were reported to the respective police forces by the involved drivers /reported by the involved drivers to the respective police forces. The data were cleaned, filtered by the targeted species (roe deer, red deer, wild boar and chamois), trimmed to a certain period and finally map matched to the closest street. To get the focal items of this study, namely the hotspots, we segmented the road network, using different approaches. On one hand we calculated segments with consistent intervals of 200m. On the other hand, we also used two data-driven approaches that considered the spatial distribution of the wildlife-vehicle collisions (Kernel Density Estimation). For the subsequent statistical analysis of the modelled influences of various explanatory variables, we also needed comparable non-hotspot segments. For the approach with the consistent length, these control segments were already given. For the data-driven segmentation however, the non-hotspots needed to be defined and selected in an additional step. We made sure that these selected non-hotspots were of a similar length, on an identical type of street and in the proximity of the respective hotspot. This study also contains a comprehensive compilation of potential influencing factors in wildlife-vehicle collisions. To investigate the influence of local factors, additional field assessments of the hotspots were carried out. Based on these influencing factors, parameters were identified and operationalized for which nationwide geographical data was available. We differentiated between attributed parameters (e.g. average traffic density), shape parameters (e.g. sinuosity), distance parameters (e.g. distance to the next forest), zonal parameters (e.g. amount of forest on a determined area around the street segment) and complex, modelled parameters (e.g. leading structures towards the street) that were assigned to the respective segments. By applying different modelling approaches, namely regressions and machine learning, these parameters were used to assess data of recorded roadkill from the canton of Zurich, Fribourg, and Grisons. First, these models provide information on the parameters leading to increased wildlife-vehicle collisions. With the improved models, it was then possible to predict collision hotspots with an accuracy of 80-90%. These models can now be used to predict accident likelihood in areas where roadkill data is sparse.

A first result of our study is the comprehensive compilation of factors that influence the likelihood of collision between wildlife and vehicles. They are numerous and can change over days and years. The factors were attributed to three main categories, namely wildlife, traffic and environment and graded by their controllability. Often, these factors are interacting with each other and cannot be assessed just individually. This compilation of influential factors served as a basis for the selection of parameters for the statistical modelling. In total, we used three different approaches to segment the streets and for each of these approaches we carried out two different models, one for the Swiss Midlands and one for the Alpine regions. All the so obtained models were able to differentiate between hotspots and non-hotspots. However, they were more accurate at identifying hotspot segments compared to non-hotspot segments. Also, hotspots in open areas are less well identified as crop fields change their appearance during the year and the subsequent years.

Moreover, no comprehensive geographical data is available for these open areas. The different models contained varying combinations of predictor variables, but the following variables were found to be significant in all four regression models: sinuosity of the street, amount of grazing and browsing areas within 100m, and traffic noise within 50m of the street segment. For the two models that followed the machine learning approach, the street classes “4 m street” and “6 m street” were found to be determining factors for the differentiation between hotspots and non-hotspots. Compared to the regression models, the machine learning models were less powerful. Furthermore, the interpretation of their influential factors is more complicated. For this reason, the regression models were favored. A prognosis of hotspots all over Switzerland was a central aim of this study and is available as an interactive online map under www.zhaw.ch/iunr/wildtierunfaelle. The online map makes it possible to accurately identify possible hotspots in regions, where no data was available. However, it cannot replace on-site assessments.

A comprehensive literature review has shown that there are basically four ways of preventing wildlife-vehicle collisions: 1) segregation of wildlife habitats from transport infrastructure, 2) warning wildlife of vehicles, 3) warning of drivers if animals are present at the roadside and 4) technical solutions in vehicles like radar and real-time object recognition. Previous studies have shown that fences prove to be effective in reducing collisions. However, fences should only be applied in combination with wildlife passages to guarantee the interconnection of wildlife habitats. Warning systems for drivers also show good efficacy in reducing collisions but the systems currently available are relatively expensive and are only suitable for short road sections. Visual, acoustic, and olfactory repellents which deter animals from roads can only temporarily reduce the number of roadkill, but so far, no long-term study has been able to prove their effectiveness. Anti-collision systems in vehicles are constantly being further developed and will in future also help to reduce the number of wildlife accidents. All the mitigating measures described in the review were listed in a catalog and complemented with their respective efficacy, approximate costs, and sources for further information. Analyses of the hotspot field surveys showed that the amount of animal trails, faeces, sleeping places or further evidence of animal activity indicate the location and extent of a hotspot rather exactly.

This study showed with analyses of wildlife-vehicle collision data and statistical models, when and where wildlife-vehicle collisions occur in Switzerland. Thus, high-risk street segments can now be identified, even for the regions where so far no or only incomplete information was available. Therefore, this study provides a basis on how to appropriately mitigate wildlife-vehicle collisions. The main outcome is a road map of Switzerland where probabilities of wildlife accidents on road segments were calculated with different models. Through detailed inspection in the field, the high-risk street segment can be identified rather exactly. Therefore, financial resources provided for wildlife accident prevention will be deployed more efficiently in the future, traffic security will be increased and wildlife as well as humans will be better protected from negative consequences of wildlife-vehicle collisions.

The catalog with prevention measures provides an overview of the available methods, their costs, and their efficacy. In-depth analyses of the situations when collisions happen are needed. These analyses should be carried out on relevant spatial levels and take the factors time and environmental conditions at the moment of the accident into account. Furthermore, it is crucial to consider the animal species involved, as the optimal mitigating measures differ for varying species or species groups. If new road segments get equipped with prevention methods, it is advisable to scientifically follow up on the development of the accidents in this segment. Future studies concerning the efficacy of prevention methods should not only look at the reduction of numbers in wildlife-vehicle collisions but also at a ratio between collisions and successful animal crossings of the road in question. The mere reduction of collisions is not proof for the efficacy of a prevention method, as lots of other factors, such as reductions of the wildlife population size or environmental changes in the proximity of the hotspot could reduce the number of accidents.

With this study, we could repeatedly show that wildlife-vehicle collisions are the consequence of a complex and dynamic system with interacting factors. Due to changes of our wildlife populations, the road network, or environmental factors, existing hotspots

could become less pronounced, whereas new hotspots could form in different places. The data basis, but also the methodological possibilities of statistical modelling will grow, and the car industry is continuously working on innovations to improve driving safety. Therefore, we suggest a reappraisal of the hotspot situation in Switzerland, with taking the presented approach as a starting point, every five to eight years.

1 Einleitung

In den vergangenen zehn Jahren kamen auf Schweizer Verkehrsinfrastrukturen jede Woche durchschnittlich 174 Rehe, 11 Rothirsche, 10 Wildschweine und eine Gämse bei Kollisionen mit Fahrzeugen um (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018). Dazu kommt eine unbekannte Anzahl von getöteten und verletzten Tieren, die nicht in den offiziellen Statistiken erfasst sind, da sie nicht gemeldet oder nicht aufgefunden wurden. Wildtierunfälle verursachen jährlich Schäden an Fahrzeugen von über 25 Millionen Schweizer Franken (SVV, 2012). Dazu kommt die Gefahr für den Menschen, bei Ausweichmanövern oder Kollisionen mit größeren Wildtieren zu verunfallen. Im Jahr 2018 kam es zu 93 Wildtierunfällen mit Personenschaden (Bundesamt für Statistik BFS, 2019). Die Gefahr von Wildtierunfällen wird durch die zunehmenden Wildtierpopulationen und ein steigendes Verkehrsaufkommen in Zukunft weiter zunehmen. Insbesondere Wildschweine und Rothirsche werden ihr Verbreitungsgebiet in der Schweiz weiter ausdehnen, womit sich die Gefahr für Kollisionen mit grossen Wildtieren und damit die schweren Unfälle erhöhen wird.

In der Schweiz werden Unfälle mit mittleren und grösseren Tieren erfasst und deren Anzahl in der Eidgenössischen Jagdstatistik publiziert (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018). Diese Erfassung ist jedoch unvollständig, da nicht alle Kantone eine systematische Fallwildfassung durchführen, nicht alle Unfälle gemeldet werden und nur ein Teil der verletzten und toten Tiere gefunden wird. Dass die Häufigkeit von Wildtierunfällen auch international ein Thema ist, zeigt der Beitrag von Collinson, et al. (2014), welcher ein systematisches Vorgehen für die Erfassung verunfallter Wildtiere fordert. Eine standardisierte Erfassung möglichst exakter Daten zu Wildtierunfällen (Ort, Zeit und Angaben zur lokalen Situation) ist eine unabdingbare Grundlage für die Analyse des Phänomens Wildtierunfall (Gunson, et al., 2009). Die vorliegende Studie basiert auf den Fallwilddaten der Kantone Zürich, Freiburg und Graubünden. Die Daten dieser Kantone eigneten sich besonders gut für unsere Analysen, weil sie über eine gut dokumentierte systematische Erfassung des Fallwilds und lange Zeitreihen verfügen. Des Weiteren bieten diese Kantone eine repräsentative Abdeckung von Mittelland, Voralpen und Alpen.

Ein Ziel dieser Studie ist das bessere Verständnis der Faktoren, die auf Schweizer Strassen zu Wildtierunfällen mit Huftieren führen. Dazu werden die bestehenden Fallwilddaten aus drei Kantonen analysiert und das räumliche Verteilungsmuster von Wildtierunfällen sowie die möglichen Einflussfaktoren der natürlichen und künstlichen Umwelt im Mittelland und im Alpenraum ermittelt. Sind die unfallverursachenden Einflussfaktoren einmal ermittelt, können sie dafür verwendet werden, für beliebige Strassenabschnitte in der Schweiz, für die keine Fallwilddaten vorliegen, eine Unfallwahrscheinlichkeit zu modellieren. Diese Unfallwahrscheinlichkeiten können dann in einer Karte für die ganze Schweiz abgebildet werden. Aktuell kommen in der Schweiz je nach Kanton unterschiedliche Präventionsmassnahmen zum Einsatz. Dabei wird versucht auf Wildtiere optisch, akustisch oder olfaktorisch einzuwirken, die Verkehrsteilnehmer zu warnen oder zu sensibilisieren und Wildwechsel und Strassen durch Grünbrücken oder Unterführungen räumlich voneinander zu trennen (Holzgang, et al., 2005; Di Giulio, et al., 2008). Anhand einer umfassenden Literaturstudie werden im Rahmen dieses Projekts erfolgreiche oder vielversprechende Präventionsmassnahmen identifiziert und beschrieben.

Dieses Projekt liefert ein Instrument, um das Risiko für Wildtierunfälle auf Strassenverkehrsinfrastrukturen situationsgerecht zu entschärfen. Für die Prävention von Wildtierunfällen auf Bahninfrastrukturen wurde ein separater Bericht erstellt (Hilfiker, et al., 2019). Unser Ziel ist es, die Verkehrssicherheit zu erhöhen und die durch Wildtierunfälle entstehenden ökonomischen Kosten zu reduzieren. Im Fokus stehen daher die Huftiere, Wildschwein (*Sus scrofa*), Rothirsch (*Cervus elaphus*), Reh (*Capreolus capreolus*) und Gämse (*Rupicapra rupicapra*), die aufgrund ihrer Grösse bei Verkehrsunfällen gravierende Auswirkungen haben können (Bissonette, et al., 2008).

2 Welche Faktoren beeinflussen das Risiko für Wildtierunfälle?

Wildunfälle ereignen sich nicht zufällig, eine Reihe unterschiedlicher Faktoren wirken auf das Risiko für Wildtierunfälle (Gunson, et al., 2011; Neumann, et al., 2012). Da meistens mehrere Faktoren zusammenwirken, wurden multivariate Prognosemodelle erstellt (Malo, et al., 2004). Viele solche Studien haben die offensichtlichen Beziehungen zwischen Wildtierunfällen und groben Landschaftscharakteristiken untersucht (Gunson, et al., 2011; Hothorn, et al., 2012). Nachfolgend präsentieren wir eine Übersicht, welche Faktoren sich in früheren Studien zum Thema als relevant erwiesen haben.

Wildtierlebensraum und Verkehrsinfrastruktur

Häufig geschehen Wildtierunfälle in Situationen, in denen Strassen günstige Wildtierlebensräume durchqueren (Malo, et al., 2004; Garrah, et al., 2015). Wald und Gewässer aber auch Äsungsmöglichkeiten und Leitstrukturen scheinen wichtige Einflussfaktoren im Zusammenhang mit Wildtierunfällen zu sein (Seiler, et al., 2016; Bíl, et al., 2019).

Verkehrsaufkommen

Konkret häuften sich Wildtierunfälle auf Strassenabschnitten mit hohem Verkehrsaufkommen (Van Langevelde, et al., 2004; Barrientos, et al., 2009; Seiler, et al., 2016). Möglich wäre auch, dass eine erhöhte Fallwildzahl bei mittlerem Verkehrsaufkommen auftritt, wie es die "deadly trap hypothesis" voraussagt (Iuell, et al., 2003). Entscheidend für das Unfallrisiko ist jedoch nicht die absolute Anzahl Fahrzeuge an einem Strassenabschnitt (Fahrzeuge pro Tag), sondern, wann die Fahrzeuge unterwegs sind, denn die Wildtiere sind hauptsächlich in der Dämmerung und während der Nacht unterwegs (Bíl, et al., 2020).

Fahrzeuggeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist ein Schlüsselfaktor bei Wildtierunfällen (Elvik, 2009; Huijser, et al., 2015; Seiler, et al., 2016). Mit steigender Geschwindigkeit verlängert sich der Bremsweg und erhöht sich die Aufprallenergie proportional im Quadrat zur Geschwindigkeit.

Sichtbedingungen

Ungünstige Sichtbedingungen, die durch Sinuosität (Kurvigkeit), Vegetation oder Wetterbedingungen verursacht werden, können das Unfallrisiko stark beeinflussen (Van Langevelde, et al., 2004; Barrientos, et al., 2009; Laliberté, et al., 2020).

Saisonalität und Tageszeit

Studien zeigen, dass die Wildtierunfälle abhängig von der Jahres- und Tageszeit unterschiedlich häufig auftreten, (Garrah, et al., 2015) und dass diese Saisonalität stark artabhängig ist (Laliberté, et al., 2020). Je nach Tierart beeinflussen auch unterschiedliche Strassenrandvegetation oder andere Eigenschaften wie das Streusalz als Massnahme für den Winterdienst das Auftreten von Wildtierunfällen (Grosman, et al., 2009; Gunson, et al., 2011; Bíl, et al., 2020).

Artengruppen bzw. Tierart

Die Faktoren, welche das Unfallrisiko erklären, unterscheiden sich stark zwischen Arten und Artengruppen, so dass je nach Artengruppe andere Massnahmen zur Unfallverhinderung zu ergreifen sind (Van Langevelde, et al., 2004; Litvaitis, et al., 2008; Laliberté, et al., 2020).

Fahrzeuglenker

Fehlende Sensibilisierung, Unwissenheit, Ignoranz, und mangelnde Aufmerksamkeit auf Seiten der Verkehrsteilnehmer erhöhen das Risiko für Unfälle (Åberg, 1981; Mosler-Berger, 2015; Jägerbrand, et al., 2018).

3 Material und Methoden

Aktuelle Studien zur Analyse von Wildtierunfällen stimmen in der allgemeinen Methodik überein. In einem ersten Schritt wird das Strassennetz segmentiert und in Kollisions-Hotspots und Abschnitte mit wenig oder keinen Unfällen (Non-Hotspots) unterteilt. In einem zweiten Schritt werden den entstandenen Segmenten Variablen zugewiesen, um dann schließlich mit Hilfe statistischer Modellierungen oder maschinellem Lernen das Kollisionsrisiko zu bestimmen. Oft liegen die Daten zu den untersuchten Parametern lediglich kategorial vor, was in der Regel zu einer tieferen Informationsdichte im Vergleich zu numerischen Parametern führt. Um als Basis für die Planung von Verkehrswegen und die Wahl geeigneter Massnahmen zur Reduktion von Wildtierunfällen zu dienen, sollten Prognosemodelle sowohl die Landschaftsebene als auch die detaillierten, lokalen Bedingungen an konkreten Strassenabschnitten berücksichtigen (Malo, et al., 2004).

Für die vorliegende Studie erstellten wir in einem ersten Schritt eine Übersicht der potenziellen Einflussfaktoren. Darauf aufbauend bestimmten wir die Parameter, welche in die statistische Modellierung einfließen sollten. Nebst den schweizweit verfügbaren Geodaten liessen wir auch im Feld erhobene Parameter einfließen, welche die Wildtierunfälle lokal erklären könnten. Für die Segmentierung des Strassennetzes wurden sowohl regelmässige als auch datengetriebene Ansätze angewendet. Die Modellierung wurde mit numerischen Daten durchgeführt, um eine möglichst hohe Informationsdichte zu erhalten. Den unterschiedlichen topographischen Gegebenheiten in der Schweiz trugen wir Rechnung, indem wir für Mittelland und Alpen separate Modellierungen durchführten. Ersichtlich wird dies anschliessend in den regionalen Unterschieden bei der Gewichtung der Einflussfaktoren. Mithilfe dieser gewichteten Faktoren prognostizierten wir die Unfallwahrscheinlichkeiten auf dem gesamten Schweizer Strassennetz. Die Resultate visualisierten wir in einer interaktiven Webkarte.

3.1 Potenzielle Einflussfaktoren

Die Zusammenstellung der Faktoren, welche die Unfallwahrscheinlichkeiten mit Wildtieren beeinflussen, wurde in einem Workshop an der ZHAW erstellt. Sie basiert auf dem Wissen der Mitarbeiter der Forschungsgruppen Wildtiermanagement und Geoinformatik sowie der aktuellen Literatur zum Thema Wildtierunfälle von Swiss Wildlife Information Service (SWIS). Alle potenziellen Einflussfaktoren wurden den Kategorien Wildtier, Verkehr oder Umwelt zugeteilt. Zusätzlich wurde beurteilt, wie stark ein Einflussfaktor beeinflussbar ist. So wurde zum Beispiel die Brunftzeit einer Wildart der Kategorie Wildtier zugeteilt und als «nicht beeinflussbar» eingestuft. Der Strassenbelag hingegen wurde als «bedingt beeinflussbarer» Faktor in der Kategorie Verkehr erfasst. Ein «beeinflussbarer» Umweltfaktor war beispielsweise das Vorhandensein von Hecken. Die komplette Zusammenstellung der potenziellen Einflussfaktoren ist in Anhang 4 ersichtlich.

3.2 Bestimmung der Parameter für die statistische Modellierung

Die Bestimmung der Parameter basiert auf einer räumlichen Analyse der Wildtierunfalldaten aus den drei Kantonen ZH, FR und GR mit einem Geographischen Informationssystem (GIS) und einer auf den Resultaten dieser Vorhersage von Unfallwahrscheinlichkeiten für die ganze Schweiz. Die räumliche Analyse in GIS bestimmt zunächst Strassenabschnitte als Unfall-Hotspots und untersucht danach deren Eigenschaften hinsichtlich ihrer Einbettung in die natürliche und gebaute Umwelt. Die statistische Analyse bestimmt anschliessend diejenigen Umweltparameter, welche am meisten das Vorhandensein von Unfällen auf den Strassenabschnitten erklären und nutzt dieses Wissen dann für eine schweizweite Vorhersage von Unfallwahrscheinlichkeiten. Das methodische Vorgehen zur Bestimmung der Parameter ist in Abb. 1 zusammengefasst.

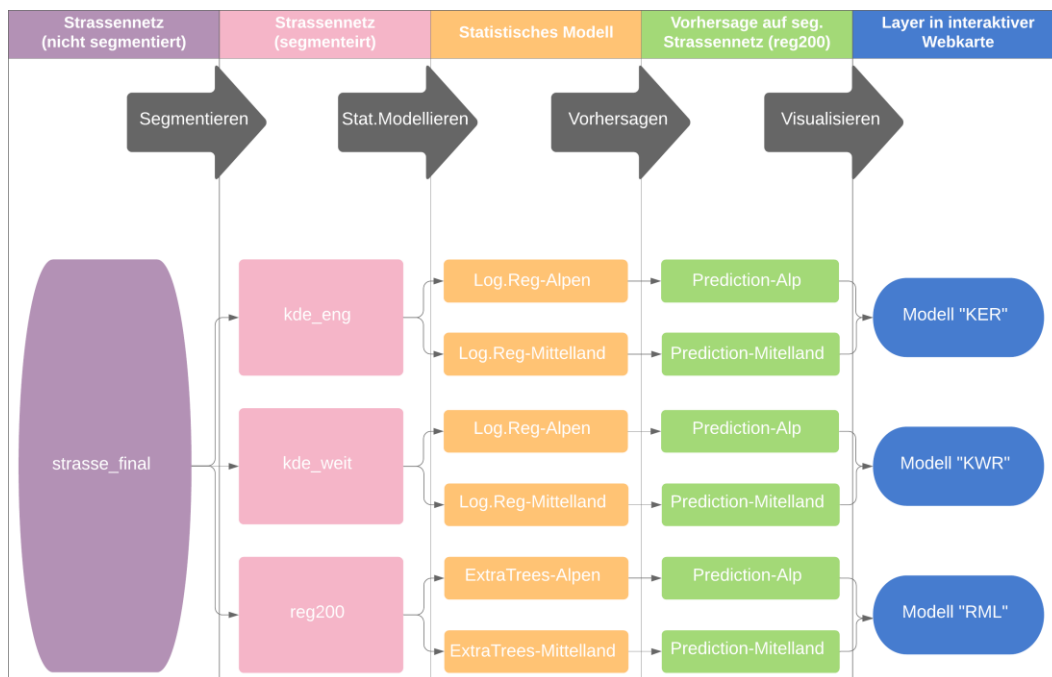


Abb. 1: Schematische Zusammenfassung des methodischen Vorgehens zur Bestimmung der Parameter. Die Kürzel der resultierenden Modelle fassen die Segmentierungs-Methode sowie das gewählte statistische Modell zusammen: KER steht für «kde_eng» und «logistische Regression», KWR für «kde_weit» und «logistische Regression». RML bedeutet «regelmässige Segmentierung und «Machine Learning» für die Modellierung.

Die Abbildung zeigt, dass sowohl für die Einteilung des Strassennetzes in einzelne Abschnitte (Segmente) als auch für die Modellierung der Unfallursachen verschiedene Verfahren zum Einsatz gekommen sind. Ausserdem wurde die Modellierung der Unfallursachen in den drei Kantonen sowie die Vorhersage für die ganze Schweiz weiter aufgeteilt in zwei Regionen, Alpen und Mittelland. Der Kanton Fribourg befindet sich zu einem Grossteil in der Region Mittelland, ein kleiner Teil ist in der Alpenregion.

3.2.1 Daten

Wildtierunfälle

Die zentrale Ausgangslage dieser Studie bilden drei Datensätze zur räumlichen Verteilung von Wildtierunfällen in den Kantonen Zürich, Freiburg und Graubünden. Dabei handelt es sich um Wildtierunfälle, die von den Fahrzeuglenkern der Polizei gemeldet wurden. Die Einsatzzentrale der Polizei bietet den zuständigen Wildhüter oder Jagdaufseher auf, welcher das tote Tier birgt oder das verletzte Tier sucht und erlegt. Je nach Kanton und Meldeweg wurden unterschiedliche Attribute zu den Ereignissen erfasst, im Minimum aber das Datum, die Tierart und ein Standort. Allerdings sind auch die Angaben zu den Ereignisstandorten mit Unsicherheit behaftet, denn der gemeldete Standort kann der effektive Unfallort auf der Strasse sein oder der Fundort des verletzten / toten Tieres. Die Datensätze aus den drei Kantonen unterscheiden sich ausserdem bezüglich des Erfassungszeitraums (FR 2009 – 2017, GR 1994 – 2016 und ZH 2009 – 2016) sowie der Anzahl gemeldeter Unfälle (FR 8'953, GR 16'694 und ZH 17'333, siehe Abb. 2).



Abb. 2: Anzahl Unfallmeldungen über die Zeit, die Breite der einzelnen Balken beträgt 90 Tage. Dunkel gefärbt sind die Unfallmeldungen aus dem Zeitraum, die für die vorliegende Studie verwendet wurden (siehe auch Kapitel 2.2.2 Datenvorverarbeitung). Um die Anzahl Unfälle in Relation zu den Strassenkilometer zu setzen, wird auf der sekundären y-Achse (rechts) die Anzahl Unfälle pro Strassenkilometer dargestellt.

Landschaftsmodell swissTLM3D der Swisstopo

Der zentrale Geodatenatz zur Einbettung und Analyse der Unfallereignisse bildet swissTLM3D, das grossmassstäbliche topografische Landschaftsmodell der Schweiz von Swisstopo. SwissTLM3D umfasst als detaillierter Vektordatenatz die Objekte der natürlichen und künstlichen Umwelt der Schweiz, wie etwa Verkehrsinfrastrukturen (Strassen, Wege, ÖV), Gebäude, Bodenbedeckung oder Gewässer. Das Landschaftsmodell umfasst über 16 Millionen räumliche Objekte mit beschreibenden Zusatzattributen mit einer Genauigkeit für gut definierbare Objekte (wie Strassen oder Gebäude) im Bereich von 0.2 - 1.5 Meter.

Der Datensatz "Strassen und Wege" ist dabei ein zentraler Datensatz der vorliegenden Studie. Er ist vom Geometrietyp "Linie", wobei für jede Strasse (unabhängig von den Anzahl Spuren) die Mittelachse erfasst ist (mit Ausnahme von richtungsgetrennten Strassen). Gesamthaft umfasst der Datensatz 248'364 Kilometer Strassen in der Schweiz.

Ergänzend zu den nationalen TLM Daten existieren weitere, kantonale Geodatenätze. Für den Kanton Zürich wurden diese Datensätze exemplarisch in einer kleinen Vorstudie berücksichtigt (siehe dazu die Zusammenstellung in Anhang 4). Für die vorliegende Hauptstudie wurden jedoch nur Geodatenätze verwendet, welche für die ganze Schweiz verfügbar sind. Damit wird sichergestellt, dass die angestrebte Modellierung der Wildtierunfälle (in Kapitel 2.2.6) auch wirklich über die ganze Schweiz ausgerollt werden kann. Neben swissTLM3D wurden vereinzelte ergänzenden Datensätze verwendet zur Vegetationshöhe, zur Lärmverteilung oder Vektor25 zur Verteilung der Primärflächen (Tab. 1).

Tab. 1: Für die Analyse verwendete Geodaten.

Bezeichnung	Typ	Datensatz	Ebene	Stand	Datenherr
Wildtierunfälle	Tabelle	Wildabgang	Wildtierunfälle auf Verkehrsachsen	2017	Kanton FR
Wildtierunfälle	Tabelle		Wildtierunfälle auf Verkehrsachsen	2016	Kanton GR
Wildtierunfälle	Tabelle		Wildtierunfälle auf Verkehrsachsen	2016	Kanton ZH
Strassennetz	Linie	swissTLM3D	Strassen und Wege	2018	swisstopo
Fliessgewässer	Linie		Fliessgewässer		
Gewässer	Linie		Bodenbedeckung		
Wald	Polygon		Bodenbedeckung		
Gebüschreihe	Linie		Baum- und Gebüschreihe		
Primärflächen	Polygon	Vector25	Siedlungsgebiet	2008	
Siedlungsgebiet	Polygon		Primärflächen		
Kantonsgrenzen	Polygon	Boundries3D	Kantonsgrenzen	2018	
DTM	Raster	Höhenmodelle	swissALTI3D in 2m Auflösung	2018	
DOM	Raster		Digitale Oberflächenmodell, 2m Auflösung	2018	
Biogeografische Regionen	Polygon	Biodiversität	Biogeografische Regionen CH	2004	BAFU
Wildtierkorridore	Polygon		Wildtierkorridore Überregional	2017	
Lärm	Raster	Lärm	Strassenverkehrslärm – Nacht	2015	
Vegetationshöhe	Raster	Landesforstinventar	Vegetationshöhenindex	2016	WSL
Verkehrsaufkommen	Linie	Nationales Personenverkehrsmodell	Durchschnittlicher Tagesverkehr sowie Geschwindigkeit	2010	ARE

3.2.2 Datenvorverarbeitung

Strassennetz SwissTLM3D

Im Schritt Datenvorverarbeitung wurden die verwendeten Geodaten zu den Wildtierunfällen und zur einbettenden Landschaft für die anschliessende Analyse deren räumlicher Eigenschaften und die Modellierung der Unfallursachen aufbereitet. Dies umfasst notwendige Filter- resp. Auswahloperationen (z.B. sind nicht alle Strassentypen aus swissTLM3D relevant für die vorliegende Studie) sowie die Verschiebung der Unfallereignisse auf das Strassennetz (sog. Map Matching, siehe Abb. 7a).

Im Rohdatensatz zu den Strassen in swissTLM3D werden 22 verschiedene sog. Datentypen unterschieden, wobei hier nebst effektiven Strassen (Autobahn, Autostrasse) auch Verkehrsinfrastrukturen wie etwa Fähren und Klettersteige enthalten sind. Strassen-Datentypen auf denen Wildtierunfälle nicht möglich (z.B. Klettersteige, Fährverbindungen) oder selten sind (z.B. umzäunte Autobahnen, Waldwege mit kleinem Verkehrsaufkommen), wurden von der Analyse und Modellierung ausgeschlossen. Bevor derartige Strassen-Datentypen ausgeschlossen wurden, wurde anhand der Unfalldaten geprüft, dass in deren Nähe auch tatsächlich vernachlässigbar wenige Unfälle vorlagen. Konkrete Strassenabschnitte wurden zusätzlich aufgrund ihrer Attribute ausgeschlossen (z.B. Strassen mit Verkehrsbeschränkung «Fahrverbot»).

Folgende Strassen wurden in die Analyse mit einbezogen:

- Keine Verkehrsbeschränkung vorhanden (bzw. keine Angabe dazu)
- Strassentyp ist 4 m, 6 m, 8 m, 10 m Strasse oder Autostrasse (keine Autobahnen sowie deren Ein- / Ausfahrten, Wege und 3 m Strassen).
- Belagsart ist «Hartbelag»
- Keine Kreisel oder Kunstbauten (Brücken, Tunnel usw.)
- Befahrbarkeit ist gegeben bzw. ohne Angabe

Der Strassendatensatz wurde somit auf 42'649 Kilometer, also um 83% reduziert. Der Fokus dieser Studie liegt auf Wildtierunfällen mit grossen Huftieren. Da Unfälle mit diesen Tierarten vernachlässigbar selten innerhalb von Siedlungsgebieten auftreten (wiederum bestätigt durch die Verteilung der Unfallereignisse), wurden abschliessend auch noch alle Strassen innerhalb des Siedlungsgebiets ausgeschlossen. Dies reduzierte den Datensatz weiter auf 18'127 Kilometer (Abb. 3).

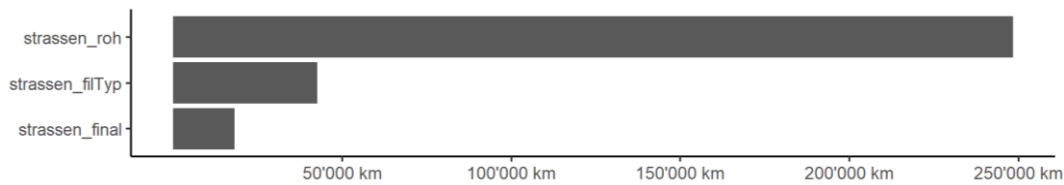


Abb. 3: Länge des Strassennetzes nach der Vorverarbeitung. Für Analyse und Modellierung wurde der dritte Datensatz «strassen_final», verwendet.

Wildtierunfälle

Die vorliegende Studie untersucht, auf welchen Strassenabschnitten mit welchen Eigenschaften besonders viele Wildtierunfälle auftreten. Damit dies räumlich untersucht werden kann, müssen die Unfalldaten, welche als Punktdaten (Koordinatenpaare) per se nicht auf, sondern meist in der Nähe von Strassenabschnitten erfasst wurden, zunächst den entsprechenden Strassenabschnitten zugeordnet werden. Die geschieht mit dem Verfahren «Map Matching». Aufgrund unterschiedlicher Erfassungswege und Dokumentationsprotokolle variieren Datenqualität und Detailtiefe der Beschreibung der verwendeten Unfallereignisse beträchtlich. Zum Beispiel wurden beschreibende Attribute der Ereignisse als Freitext erfasst (z.B. Tierart als «Hirsch», «Rothirsch», «cerf», usw.). Mit dem Ziel einen für alle drei Kantone vergleichbaren Datensatz der Wildtierunfälle zu erstellen, wurden für die Daten der Wildtierunfälle folgende Vorverarbeitungsschritte durchgeführt (Abb. 4):

- **Schritt 1: Einzeldatensätze aus den Kantonen bereinigen.** Zunächst wurden ambivalente und redundante Freitextbeschreibungen der Ereignisse mit Textanalyse-Werkzeugen strukturiert (Einträge wie «Hirsch», «Rothirsch» und «cerf» wurden zu *Cervus elaphus* harmonisiert). Ausserdem wurden gemeldete Ereignisse ausserhalb der Kantons Grenzen der betrachteten Kantone ausgeschlossen.
- **Schritt 2: Datensätze zusammenführen und auf Tierart filtern.** Die Einzeldatensätze aus den drei Kantonen wurden integriert und auf die relevanten Tierarten eingeschränkt: Reh (*Capreolus capreolus*), Rothirsch (*Cervus elaphus*), Wildschwein (*Sus scrofa*) sowie Gämse (*Rupicapra rupicapra*), siehe Abb. 6.
- **Schritt 3: Filter auf gemeinsamen Zeitraum.** Um für alle Kantone die gleiche Datenbasis zu haben, wurde der Datensatz auf die Zeitspanne 2010 bis und mit 2015 eingeschränkt, für die aus allen Kantonen Unfallereignisse vorlagen (Abb. 2).
- **Schritt 4: Map Matching.** Für jeden Unfall wurde die kürzeste (Euklidische) Distanz zur nächstgelegenen Strasse aus «strassen_filTyp» bestimmt. Wenn diese Distanz weniger als 100m betrug, wurde das Ereignis auf ebendiese Strasse verschoben, Unfällen ausserhalb dieser Map Matching Distanz von 100m wurden von der Analyse ausgeschlossen (Abb. 7a sowie Abb. 8).

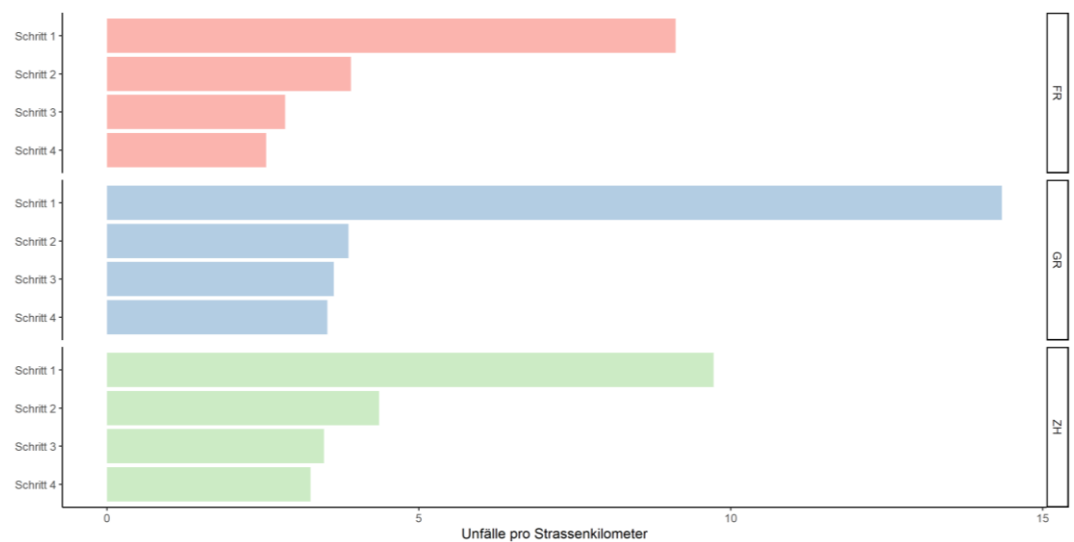


Abb. 4: Schrittweise Bereinigung und damit Reduktion des Unfalldatensatzes in der Vorverarbeitung. Der Filter auf die grossen Tierarten hat auch den Grossteil der älteren Daten (vor 2010) aus dem Kanton Graubünden entfernt, da dort zu Beginn noch keine Tierart erfasst wurde.

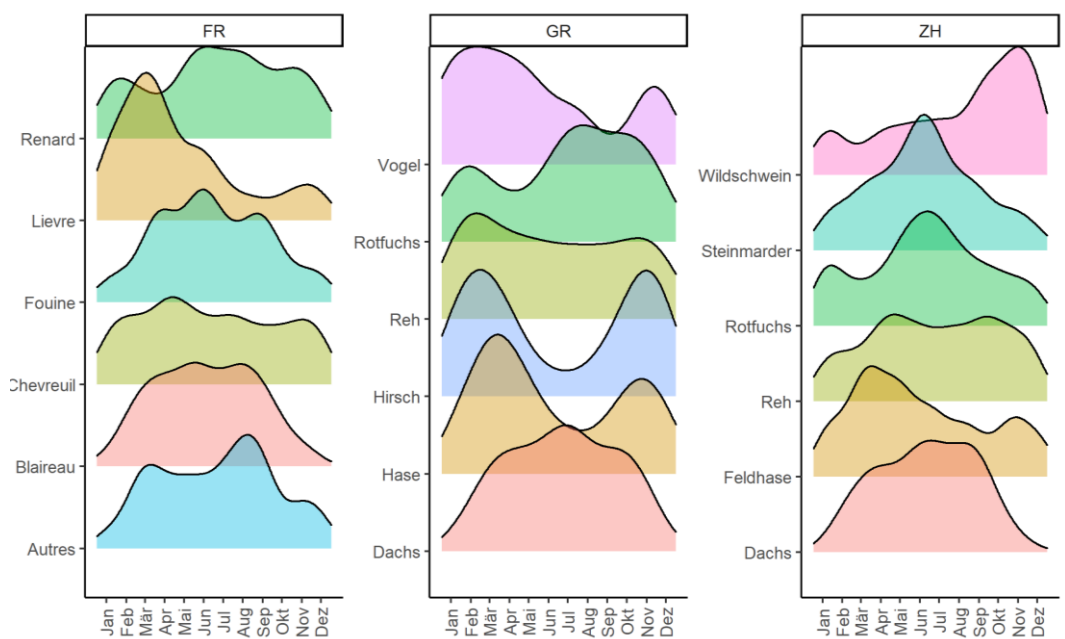


Abb. 5: Saisonale Variation der am stärksten vertretenen Tiergruppen je Kanton (des unbereinigten Datensatzes, Schritt 1).

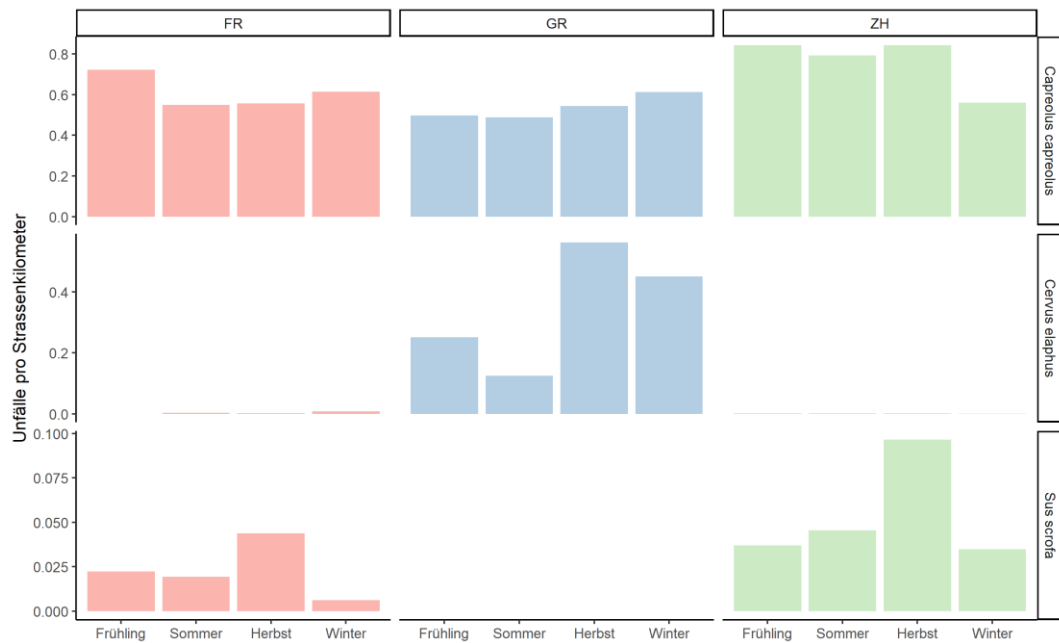


Abb. 6: Summierte Ereignisse (des bereinigten Datensatzes, Schritt 4) über alle Jahre nach Tierart, Kanton und (astronomische) Jahreszeiten. Da nur 4 Meldungen von Gämsen (*Rupicapra rupicapra*) im Datensatz vorhanden sind, werden sie in der Grafik nicht angezeigt.

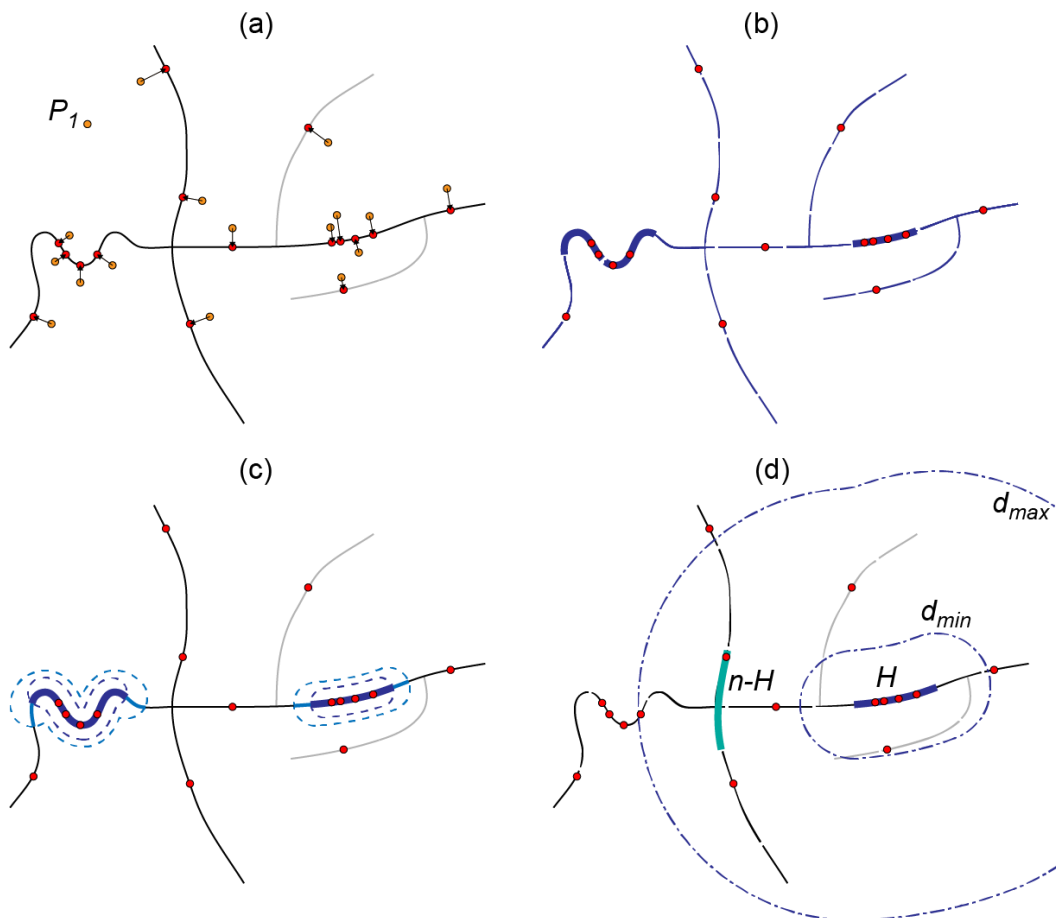


Abb. 7: Map Matching und Segmentierung. (a) Im Vorverarbeitungsschritt Map Matching werden die Punkte der Unfallmeldungen senkrecht auf die nächste Strasse projiziert und verschoben. Punkte ausserhalb einer Maximaldistanz (z.B. P_1) werden von der Analyse

ausgeschlossen. (b) Die regelmässige Segmentierung unterteilt das ganze Strassennetz in gleich lange Segmente, in Fall dieser Studie 200 m. (c) Segmentierung basierend auf einer KDE-Dichteverteilung, in zwei Varianten: *kde_eng* mit kürzerem Kernelradius 100m und engerem Schwellenwert 95% Perzentile (dunkelblau), und *kde_weit* mit grösserem Kernelradius 200m und weiterem Schwellenwert 90% Perzentile. Die Perzentil-Isolinien segmentieren die Strassenlinie und definieren so das Hotspot-Segment. (d) Bestimmung der Kontrollsegmente, welche vom gleichen Strassentyp, ähnlicher Länge und innerhalb einer definierten Nachbarschaft (zwischen d_{min} und d_{max}) liegen müssen.

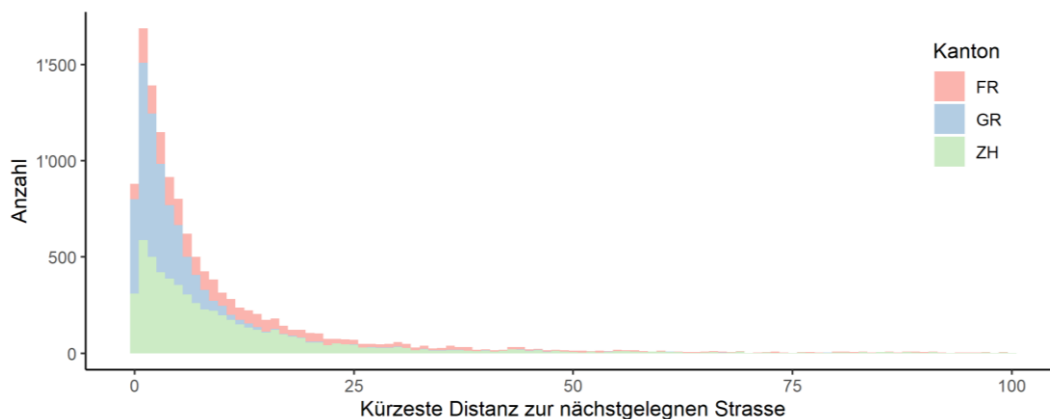


Abb. 8: Verteilung der Distanzen zur nächstgelegenen Strasse (Distanzen > 100m bereits ausgeschlossen).

Vorverarbeitung weiterer Geodatenätze

Verschiedene weitere Datensätze wurden für die Weiterverwendung vorgefiltert, wiederum um nicht relevante Objektkategorien von der Analyse auszuschliessen:

- Fliessgewässer (Liniendaten): Objektart entspricht «Fließgewässer», Verlauf ist oberirdisch,
- Gewässer (Flächendaten, Polygone): Objektart entspricht «Fließgewässer», «stehende Gewässer» oder «Feuchtgebiete»,
- Wald: Objektart entspricht «Wald» oder «Wald offen»
- Primärflächen: Objektwahl entspricht «Baumschule», «Gebüsch», «Geröll», «Graspiste», «Kies- / Lehmgrube», «Obstanlage», «Reben», «Steinbruch», «Sumpfpf» und «übriges Gebiet».

3.2.3 Segmentierung Strassennetz

Die zentralen Untersuchungsgrößen der vorliegenden Studie sind die Strassenabschnitte. Dabei sollen Abschnitte gesucht und analysiert werden, die besonders viele Unfälle aufweisen (sog. Unfall-Hotspots). Wie aber die verwendeten Strassendaten aus swissTLM3D für diese Analyse in einzelne Abschnitte segmentiert werden sollen, ist nicht per se vordefiniert. Denkbar wäre es, die topologische Unterteilung des Strassennetzes zu verwenden, sprich die einzelnen Segmente würden sich automatisch zwischen den Kreuzungen der Strassen ergeben. So entstünden allerdings Segmente sehr unterschiedlicher Länge, u.a. auch sehr lange Abschnitte, was für diese Studie ungeeignet wäre.

Die vorliegende Studie verwendet deshalb eine kleinräumige Segmentierung der Strassen, welche einzelne Strassen weiter in relativ kurze, diskrete Unterabschnitte aufteilt. Hierfür wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet:

- **Regelmässige Segmentierung (reg200):** Segmentierung in Abschnitte von gleicher Länge
- **Datengetriebene Segmentierung (kde_eng und kde_weit):** Segmentierung auf der Basis der räumlichen Verteilung der Unfallereignisse, unter Verwendung einer Kernel Density Estimation (KDE).

Für beide Ansätze gibt es Vor- und Nachteile. Die regelmässige Segmentierung ist einfach und kann ohne Unfalldaten für die ganze Schweiz abgeleitet werden. Damit können sowohl die räumliche Analyse der Unfallverteilung (Kantone FR, GR und ZH) als auch die darauffolgende Modellierung der Unfallwahrscheinlichkeit (ganze CH) mit derselben Segmentierung durchgeführt werden. Denn für die Modellierung der Unfallwahrscheinlichkeit in all jenen Kantonen, für die keine Unfalldaten vorliegen, könnte ja keine datengetriebene Segmentierung der Strassenabschnitte vorgenommen werden. Dagegen verlangt jede regelmässige Segmentierung die Wahl einer Segmentlänge und ist damit zu einem gewissen Grad willkürlich. Ausserdem können durch die regelmässige Setzung der Segment-Grenzen die eigentlichen Unfall-Hotspots verwässert werden (im GIS-Jargon nennt man dies das «Modifiable Areal Unit Problem» und meint damit die Verfälschung von Objekteigenschaften durch willkürlich gezogene Grenzen). Ausserdem entstehen bei dieser Methode zwangsläufig kürzere Abschnitte vor Kreuzungen und an Sackgassen, welche dann separat behandelt werden müssen.

Die datengetriebene Segmentierung verspricht eine viel trennschärfere Erfassung und Abbildung der effektiven Unfall-Hotspots. Hier werden mittels Kernel Density Estimation Zonen hoher Unfalldichte berechnet und anschliessend mit den Strassen verschnitten, um Hotspot-Segmente zu erhalten. Dies ist weit weniger willkürlich. Dafür entstehen so wiederum Segmente unterschiedlicher Länge, was die Ableitung der die Segmente beschreibenden räumlichen Parameter erschweren kann. Und, wie bereits erwähnt, die datengetriebene Segmentierung kann nur für die Analyse der Unfalldaten in den Kantonen ZH, FR und GR, nicht aber für die Modellierung der Unfallwahrscheinlichkeiten in der ganzen Schweiz verwendet werden.

Regelmässige Segmentierung (reg200)

In diesem Ansatz wurde das vorprozessierte Strassennetz der Schweiz (Strassen_final) in Segmente gleicher Länge unterteilt (Abb. 7b). Die Wahl der Segmentlänge 200 m basiert dabei auf Werten aus vergleichbaren Studien aus der Literatur (Elvik, 2008) sowie auf dem Median der Länge der datengetriebenen Segmentierung (kde-basiert). Vor Kreuzungen und bei Sackgassen können sich so Segmente ergeben, die kürzer sind als die Zielgrösse 200 m. Segmente kürzer als 200 m wurden von der Analyse ausgeschlossen. Bei der regelmässigen Segmentierung wurden die Hotspots gebildet durch Segmente mit Unfallzahlen über einem zu definierenden Schwellenwert (Abb. 7b) mehr als $n = 2$.

↖ Toolbox: Reg. Segmentation

Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte und der verwendeten Geodatenverarbeitungs-Werkzeuge siehe Anhang 1.

Datengetriebene Segmentierung (kde_eng und kde_weit)

In diesem Ansatz wurde eine Dichteverteilung der Unfälle mit Kernel Density Estimation für jeden Kanton berechnet. Diese KDE-Dichteverteilung wurde dann dazu verwendet, Unfall-Hotspots auf den Strassensegmenten zu bestimmen und die Strassen danach entsprechend zu segmentieren (Abb. 7c). Die Berechnung von Hotspot-Regionen mittels der KDE-Dichteverteilung braucht zwei Parameter, einen Radius r für den Dichtekern sowie einen Schwellenwert s zur Abgrenzung der Hotspot-Regionen (gegeben als Perzentil-Wert aller Dichtewerte). Beide Parameter bestimmen wie eng resp. grosszügig die Hotspot-Regionen auf den Strassensegmenten abgegrenzt werden. In der Literatur werden Kernel-Radien von 50 m bis 500 m empfohlen (Bíl, et al., 2013; Bíl, et al., 2016). Diese Studie verwendete und verglich entsprechend zwei unterschiedliche KDE-Segmentierungen:

- **Enge, konservative KDE-Segmentierung (kde_eng).** Mit $r = 100$ m und $s = 95$ % Perzentile ergeben sich eng gefasste, kurze, dafür sehr dichte Hotspots.
- **Weite, etwas umfassendere, grosszügigere KDE-Segmentierung (kde_weit).** Mit $r = 200$ m und $s = 90$ % Perzentile ergeben sich weiter gefasste, längere, dafür nicht ganz so dichte Hotspots.

🔧 Toolbox: KDE Segmentation

Für eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsschritte und Werkzeuge siehe Anhang 1.

3.2.4 Auswahl von Kontrollsegmenten

Für die in Kapitel 2.2.6 angewandten statistischen Verfahren zur quantitativen Modellierung des Einflusses der räumlichen Umgebungsvariablen auf die Hotspot-Verteilung braucht es Kontrollsegmente, auf denen wenig bis keine Unfälle passieren und die mit Hotspots statistisch verglichen werden können. In der regelmässigen Segmentierung ergeben sich die Kontrollsegmente von selbst. Da alle Segmente die gleiche Länge aufweisen, können alle Abschnitte, auf denen keine oder wenige Unfälle passiert sind, als Kontrollsegmente dienen.

Bei der datengetriebenen Segmentierung ist die Wahl der Kontrollsegmente aufwändiger. Die datengetriebene Segmentierung liefert nur Hotspotsegmente, vergleichbare Kontrollsegmente müssen in einem Zusatzschritt definiert und ausgewählt werden. Diese speziell definierten Kontrollsegmente werden in der Folge «Non-Hotspots» genannt. In Anlehnung an das vergleichbare Verfahren in Seiler, et al. (2016) und Bíl, et al. (2019) werden die Kontrollsegmente (Non-hotspots) in der vorliegenden Studie für `kde_eng` und `kde_weit` wie folgt definiert (vgl. Abb. 7d): Das Kontrollsegment (Non-Hotspot Segment) soll im Vergleich zum Hotspotsegment

- von ähnlicher Länge sein (eine maximale Abweichung von 10 m),
- die gleiche Strassenkategorie aufweisen,
- in einem Mindestabstand von $d_{min} = 500$ m möglichst nahegelegen sein (innerhalb $d_{max} = 5 \times \text{Segmentlänge}$).

Diese Modellierung der Non-Hotspots sucht gezielt nach nahen Strassensegmenten, die aber von der gleichen Strassenkategorie sind. Dies darum, damit nicht Strassen mit benachbarten Nebenstrassen verglichen werden, die zwar in der Nähe des Hotspots liegen aber eigentlich hinsichtlich der Unfallwahrscheinlichkeit ganz andere Eigenschaften aufweisen. Damit entfällt der Parameter Strassenkategorie in den Modellen, welche auf der datengetriebenen Segmentierung beruhen. In den Modellen auf der regelmässigen Segmentierung hingegen, kann der Parameter Strassenkategorie mit untersucht werden.

🔧 Toolbox: Get Control Segment

Für eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsschritte und Werkzeuge siehe Anhang 1.

3.2.5 Operationalisierung der Umgebungsparameter

Um mit statistischen Verfahren modellieren zu können, welche räumlichen Eigenschaften der natürlichen und künstlichen Umgebung der Segmente zu besonders vielen Wildtierunfällen führen, müssen diese, die Segmente einbettenden Umweltparameter, zunächst quantifiziert werden. Das Beispiel «Hotspots liegen im Wald» kann dies illustrieren. Die räumliche Beschreibung «im Wald» kann mit den verfügbaren Geodaten auf viele unterschiedliche Arten quantitativ beschrieben werden. Es könnte zunächst bestimmt werden, ob ein Segment eine Waldfläche schneidet, und wie lang dieser Anteil des Segments im Wald ist. Oder aber es wird ein Puffer um ein Segment gelegt und dann berechnet, wie gross die Waldfläche innerhalb dieses Puffers ist. Der Datensatz «Vegetationshöhe» bietet nochmals einen anderen Ansatz, indem wiederum innerhalb eines Puffers um das Segment nach hoher Vegetation gesucht wird.

Diese Umsetzung von räumlichen Eigenschaften der Segmente mit Geodaten wird «Operationalisierung» genannt. Die in dieser Studie verwendeten Parameter und deren Operationalisierungen basieren zum einen auf der Theorie (Seiler, et al., 2016; Bíl, et al., 2019), aus lokalem Expertenwissen des Projektteams und berücksichtigen die spezifische Geodatenverfügbarkeit in der Schweiz. In dieser Studie kamen fünf Kategorien von Operationalisierungsansätzen zum Einsatz:

Attributparameter: Attribute der Strassen selbst (z. B. «was ist die mittlere Verkehrsgeschwindigkeit auf der Strasse?» oder «Wie hoch ist die mittlere Verkehrsbelastung der Strasse?»).

Formparameter: Masse, welche die Form der Segmente beschreiben (z. B. «Ist ein Segment gerade oder gewunden?»)

Distanzparameter: Nearest Neighbour Distanzen (z. B. «Wie weit weg vom Segment liegt der nächste Wald?»)

Zonale Parameter: Raumeigenschaften innerhalb einer Nachbarschaftszone, resp. eines Puffers (z. B. «Wie gross ist der Waldanteil innerhalb eines 200 m Puffers rund ums Segment?»)

Komplexe, modellierte Parameter: Bestimmte Raumeigenschaften lassen sich nicht direkt aus einem einzelnen Geodatenatz ableiten, sondern bedürfen eines speziell dafür entwickelten räumlichen Modells (z. B. «Gibt es Leitstrukturen wie etwa Waldränder oder Wasserläufe in der Landschaft, welche Wildtiere besonders auf die Strassen hinleiten?»).

Das folgende Kapitel beschreibt, wie die Eigenschaften der Segmente in der vorliegenden Studie operationalisiert wurden. Die verwendeten Ansätze basieren dabei auf vergleichbaren Ansätzen aus der Literatur sowie, wenn keine derartigen Grundlagen vorlagen, eigenen Modellierungsansätzen. Der dazu entwickelte Python Code ist auf <https://github.zhaw.ch/ASTRA/PythonToolbox> einsehbar.

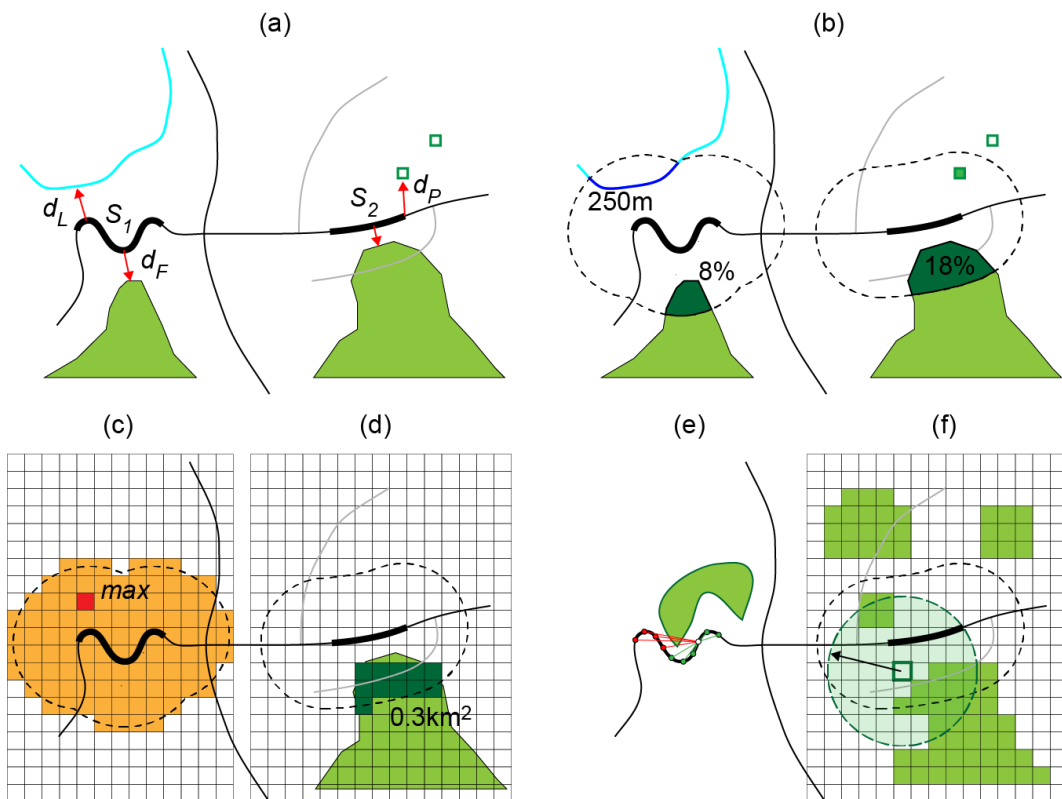


Abb. 9: (a) Form- und Distanzparameter. Sinuosität ist ein Formparameter zur Beschreibung der Sichtbarkeit auf einer Strasse. Die gewundene Strasse S_1 hat eine hohe Sinuosität und eine tiefe Sichtbarkeit, die gerade Strasse S_2 eine tiefe Sinuosität dafür eine hohe Sichtbarkeit. d_L misst die Distanz von Segment S_1 zur nächsten Gewässerlinie, d_F den Abstand zur nächsten Waldfläche, d_P bestimmt hingegen den Abstand zum nächsten Gebäudepunkt. (b) Zonale Parameter mit Vektordaten, zur Anzahl Punkte, zu gemessenen Längen oder zu Flächenanteilen, (c,d) Zonale Parameter aus Rasterdaten, Mittelwerte oder Maximalwerte, Flächenanteile. (e) Sichtbarkeit wird berechnet durch eine Betrachtung von direkten Sichtlinien zwischen regelmässig auf den Segmenten verteilten Punkten, grün: direkte Sicht, rot: Sicht ist verdeckt. (f) Potenzielle Äsungsflächen werden modelliert als Zellen mit tiefer Vegetation, die von mindestens 30% hoher Vegetation umgeben sind.

Attributparameter

Attributparameter können einerseits Attribute sein, die schon im Strassendatensatz aus swissTLM3D als Attribute der Linien hinterlegt sind (z. B. Strassenkategorien). Oder es können Informationen sein, die aus weiteren Datensätzen erst auf den verwendeten Strassendatensatz gemappt werden müssen. In dieser Studie wurden die **Strassenkategorie** aus swissTLM3D sowie das Durchschnittliche Tägliche Verkehrsaufkommen (**Verkehrsaufkommen**) und die modellierte **Geschwindigkeit** aus dem Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) als Attributparameter betrachtet.

Formparameter

Bestimmte Eigenschaften der Segmente selber, ohne Zuzug eines einbettenden Umgebungsdatensatzes, können zur Operationalisierung bestimmter, im Kontext dieser Studie relevanter Eigenschaften der Strassensegmente betrachtet werden. Sichtbarkeit auf der Strasse wird über die Sinuosität des Segments, also deren «Gewundenheit» ausgedrückt. Der Formparameter **Sinuosität** wird dabei als das Verhältnis zwischen der Euklidischen Distanz von Start und Endpunkt und der tatsächlichen Länge des Segmentes berechnet (*Abb. 9a*).

Distanzparameter

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde eine Reihe von Distanzparametern mit Nearest Neighbour Werkzeugen berechnet. Dabei wird die kürzeste Euklidische Distanz eines beliebigen Punktes auf dem Segment zu den gesuchten Landschaftselementen (im Vektorformat, swissTLM3D) bestimmt (*Abb. 9a*). Folgende Distanzparameter unter Verwendung der Datensätze aus Tabelle 1 wurden bestimmt:

- **Distanz_Gewässer:** Kürzeste Distanz zu Wasser, die jeweils kürzere Distanz zu folgenden beiden Datensätzen
 - Fließgewässer
 - Stehende Gewässer
- **Distanz_Wald:** Kürzeste Distanz zu Wald
- **Distanz_Siedlung:** Kürzeste Distanz zu Siedlung
- **Distanz_Wildtierkorridor:** Kürzeste Distanz zu Wildtierkorridoren

Zonale Parameter

Zonale Parameter erlauben es, Raumeigenschaften von Pufferzonen rund um Segmente mit Massen der deskriptiven Statistik zu beschreiben, sog. zonale Statistiken. Dazu muss zunächst eine sinnvolle Pufferbreite bestimmt werden. Je nach Parameter wurden in dieser Studie Pufferbreiten zwischen 50 m (Lärmbelastung) und 200 m (Primärflächen) verwendet. Innerhalb einer Pufferzone kann dann das Vorkommen bestimmter Raumeigenschaften quantifiziert werden, wobei dabei Vektordaten (Punkte, Linien, Polygone) oder Rasterdaten verwendet werden können (*Abb. 9b, c, d*). Vorhandene Punkte können gezählt werden, die Länge von Linienabschnitten können gemessen werden, Flächenanteile können bestimmt werden. Bei Rasterdaten (*Abb. 9c, d*) können Maximal- oder Minimalwerte bestimmt werden, oder es wird der Mittelwert Mean aller Rasterzellen im Puffer bestimmt (z. B. Vegetationshöhe). Natürlich kann auch in Rasterdaten die Gesamtfläche einer Flächenart bestimmt werden, hier nun über die Anzahl Rasterzellen.

Die Wahl einer sinnvollen Pufferbreite für zonale Parameter ist immer schwierig und wird gern als etwas willkürlich kritisiert. Zwar gibt es oft Hinweise aus der Literatur oder von Experten, welche Pufferbreiten sinnvoll sind. Diese Hinweise geben den Rahmen vor, in dem die Pufferbreiten gewählt werden sollten. Im Rahmen dieser Studie wurden allerdings zu den meisten zonalen Parametern mehrere Pufferbreiten berechnet und über die Modellierung der Unfallwahrscheinlichkeiten getestet. So wurde z.B. die Lärmbelastung innerhalb folgender Pufferbreiten berechnet und getestet: 20 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m und 500 m. Natürlich korrelieren diese zonalen Parameter unterschiedlicher Pufferbreite stark. Deshalb wurden in der ersten Parameterauswahl (siehe Abschnitt 2.2.6) diejenigen Parameter ausgewählt mit den besten Resultaten in den Modellen. Beim Lärm war das dann **Strassenlärm_50m**.

In dieser Studie wurden die folgenden zonalen Statistiken untersucht:

- **Strassenlärm_50m**: mittlere Lärmbelastung während der Nacht, Pufferbreite 50 m
- **Primärflächen_200m**: Anteil an Primärflächen, Pufferbreite 200 m
- **Vegetationshöhe_100m**: Mittlere Vegetationshöhe, Pufferbreite 100 m
- **Äsungsfläche_100** sowie **Äsungsfläche_200**: Anteil an potentieller Äsungsfläche, Pufferbreite 100 m sowie 200 m (wird erst weiter unten als komplexe Modellierung beschrieben)

Komplexe, modellierte Parameter

Leitstrukturen

Leitstrukturen sind lineare Merkmale der Landschaft, welche Wildtieren in ihrem Bewegungsverhalten leiten, ggf. auf Verkehrsinfrastrukturen hinleiten (Suter, 2009). Gerade die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Tierarten tendieren stark dazu, sich an lineare Strukturen in der Landschaft zu halten.

Im Rahmen dieses Projekts wurden Leitstrukturen einerseits über lineare Strukturen von Vektorobjekten wie Waldrändern, Flussläufen und Gebüschreihen modelliert, und andererseits über aus dem Rasterdatensatz des Digitalen Geländemodells abgeleitete Geländestrukturen wie Kreten oder Gräben. Diese wurden schweizweit wie folgt modelliert (Abb. 10):

- **Leitstrukturen_TLM**: Leitstrukturen aus ausgewählten natürlichen Objekten des swissTLM3D Landschaftsmodells (Waldränder, Fliessgewässer, Gebüschreihen). Die Modellierung verwendete dabei zwei Puffer, einen inneren mit Breite "binnen" und einen äusseren mit Breite "baussen", und suchte lineare Elemente, welche aus dem äusseren Puffer in den inneren Puffer führen. Die Schnittpunkte dieser linearen Elemente mit dem inneren Puffer resultieren dann in Leitstruktur-Punkten, welche pro Segment gezählt werden.
- **Leitstrukturen_DHM**: Topografische Leitstrukturen wurden über Gräben und Kreten aus dem Digitalen Höhenmodell swissALTI3D abgeleitet. Dabei kamen Hydrologie-Werkzeuge zum Einsatz, welche zur Ableitung von Gewässernetzen verwendet werden (Gräben). Für die Kreten wurde das Höhenmodell invertiert, worauf wiederum das Abflussnetz auf dem nun invertierten Geländemodell berechnet wurde. Die entstehenden Abflusslinien für Gräben und Kreten wurde wiederum mit dem inneren Puffer verschnitten zur Bestimmung von Leitstruktur-Punkten.

Für jedes Strassensegment konnte somit bestimmt werden, wie viele Leitstrukturen vorhanden sind. Neben den separaten Parametern Leitstrukturen_TLM und Leitstrukturen_DHM wurde auch deren Vereinigung **Leitstrukturen_alle** erstellt und in der Modellierung getestet. Konkrete Beispiele aus dem Ableitungsprozess sind in Anhang 2 ersichtlich.

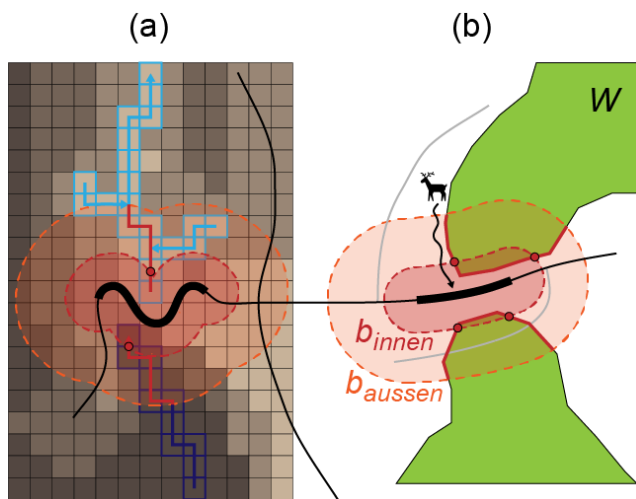


Abb. 10: (a) Ableitung topografischer Leitstrukturen aus dem digitalen Höhenmodell (Rasterdaten), Abflusslinien werden mit einem inneren und einem äusseren Puffer um die Segmente verschnitten. (b) Leitstrukturen aus dem topografischen Landschaftsmodell swissTLM3D (Vektordaten). Im abgebildeten Beispiel werden Waldränder untersucht, ob sie aus einem äusseren Puffer b_{aussen} in einen inneren Puffer b_{innen} führen. In beiden Fällen werden Schnittpunkte mit dem inneren Puffer als zählbare Leitstruktur-Punkte bestimmt.

Potenzielle Äsungsfläche

Äsungsflächen beeinflussen die Raumnutzung von Wildtieren (Sigrist, 2019). Potenzielle Äsungsflächen wurden über die ganze Schweiz modelliert basierend auf dem Datensatz «Vegetationshöhe» (siehe Tabelle 1) der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Potenzielle Äsungsflächen (Äsungsflächen_100, Äsungsflächen_100) wurden als komplexer zonaler Parameter modelliert. Dabei wurden Rasterzellen gesucht, die selbst eine tiefe Vegetationshöhe haben, aber von genügend hoher Vegetation zur Deckung umgeben sind (Abb. 9f). Dabei kommen sog. fokale Funktionen zum Einsatz, welche für jede Rasterzelle eine kreisförmige Nachbarschaft prüfen. Potenzielle Äsungsflächen werden als Zellen modelliert, die selbst eine Vegetationshöhe weniger als 1 m aufweisen, aber von mindestens 30% Zellen umgeben sind, welche eine Vegetation höher als 1 m aufweisen.

Toolbox: Pot.Grazing.Sites

Für eine detaillierte Beschreibung der Arbeitsschritte und Werkzeuge siehe Anhang 1.

Sichtbarkeit

Zusätzlich zum einfachen Formparameter **Sinuosität** wurde die Sichtbarkeit entlang einer Strasse auch noch über den wesentlich komplexeren Parameter **Sichtbarkeit** untersucht. Hier soll nun geprüft werden, ob in Kurven tatsächlich die Sicht verdeckende Objekte die Sichtbarkeit einschränken. Dazu wurde das digitale Oberflächenmodell (DOM) verwendet, welches die Oberfläche des Geländes, also inkl. Vegetationsbedeckung oder Gebäude abbildet.

Das Strassennetz wurde im Abstand von 10 m mit Punkten aufgerastert. Danach wurde zwischen allen Punkten, die 100 m (oder näher) zueinander liegen geprüft, ob es zwischen ihnen eine direkte, unversperrte Sichtlinie gibt. Eine direkte Sichtlinie ist dann gegeben, wenn zwischen den beiden Punkten (die 1.5 m über dem Boden liegen) freie Sicht herrscht. Grundlage dafür bildete das Digitale Oberflächenmodell (DOM, siehe Tabelle 1). Pro Punkt ergab sich so ein numerischer Wert aus der Anzahl von benachbarten Punkten, die von diesem Punkt aus sichtbar sind (auf einer geraden Strecke beträgt dieser Wert maximal 10, gegeben durch den Abstand der Punkte und des Suchradius). Für jedes Strassensegment wurde dann der Mittelwert aller Punkte berechnet, wodurch ein

Sichtbarkeitswert pro Segment generiert werden konnte (Abb. 9e). Exemplarisch an einem Segment ist dieser Prozess in Anhang 3 ersichtlich.

Tab. 2: Zusammenfassung aller berechneten Parameter. Für Details zu den Basisdaten (Datenstand, Datenherr), siehe Tab. 1.

Kategorie	Parameter	Erklärung	Basisdaten
Attribut-Parameter	Strassenkategorie	Strassenkategorie 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, Autostrasse	swissTLM3D
	Verkehrsaufkommen	durchschnittliches, tägliches Verkehrsaufkommen [in Anzahl Fahrzeuge pro 24h] gemäss dem Nationalen Personenverkehrsmodell	Nationales Personenverkehrsmodell
	Geschwindigkeit	Modellierte Geschwindigkeit gemäss dem Nationalen Personenverkehrsmodell	Nationales Personenverkehrsmodell
Form-Parameter	Sinuosität	Gewundenheit der Strasse, Proxy für Sichtbarkeit	swissTLM3D
Distanz-Parameter	Distanz_Gewässer	Kürzeste Distanz zu Fließgewässer oder stehenden Gewässer [m]	swissTLM3D
	Distanz_Wald	Kürzeste Distanz zum Wald [m]	swissTLM3D
	Distanz_Siedlung	Kürzeste Distanz zur Siedlung [m]	swissTLM3D
	Distanz_Wildtierkorridor	Kürzeste Distanz zu Wildtierkorridoren [m]	Wildtierkorridore BAFU
Zonale Parameter	Strassenlärm_Xm	Lärmbelastung in der Nacht (min, max, <u>mean</u> , std) für die Pufferbreiten (Meter) 20, <u>50</u> , 100, 200, 300, 500	Lärm BAFU
	Primärflächen_Xm	Anteil Primärflächen [%] für eine Pufferbreite von 200m	Vektor25
	Vegetationshöhe_Xm	Vegetationshöhe in Meter (min, max, <u>mean</u> , std) für die Pufferbreiten (ebenfalls in Meter) 20, 50, <u>100</u> , 200, 300, 500	Vegetationshöhe WSL
Komplexe Parameter	Leitstrukturen_TLM	Anzahl von auf die Strasse hinleitenden Vektorobjekten (Waldränder, Fließgewässer, Gebüschreihen)	swissTLM3D
	Leitstrukturen_DHM	Anzahl von auf die Strasse hinleitenden Kreten und Gräben	swissALT13D
	Leitstrukturen_alle	Vereinigung von Leitstrukturen_TLM und Leitstrukturen_DHM	swissTLM3D, swissALT13D
	Äsungsfläche_Xm	Anteil potenzielle Äsungsfläche, tiefe Vegetation umgeben mit Deckung [%] für die Pufferbreiten <u>100</u> und <u>200</u> Meter.	Vegetationshöhe WSL
	Sichtbarkeit	Modell unter Verwendung von Sichtlinien und des Digitalen Oberflächen Modells DOM	swissTLM3D, swissALT13D und «DOM»

3.2.6 Statistische Modellierung

Das Ziel der statistischen Modellierung ist die Identifikation der signifikanten Variablen (hier die räumlichen Parameter) für die Vorhersage von Hotspots bzw. Non-Hotspots. Zuerst wurden die einzelnen Parameter mit univariaten Tests daraufhin untersucht, ob sich Kontroll- und Hotspot-Segmente signifikant voneinander unterscheiden (Signifikanzniveau $\alpha=5\%$). Untersucht wurden Attributparameter (**Verkehrsaufkommen**, **Geschwindigkeit**), Formparameter (**Sinuosität**), Distanzparameter (**Distanz_Siedlung**, **Distanz_Wald**, **Distanz_Gewässer**, **Distanz_Wildtierkorridor**), zonale Parameter wie **Strassenlärm** (mit unterschiedlichen zonalen Statistiken zu Mittelwert, Maximum, Standardabweichung), **Primärflächen**, potentielle **Äsungsflächen** mit den verschiedenen Pufferbreiten (je mit 20 m, 50 m, 100 m, 200 m, 300 m, 500 m), sowie die komplexen Parameter **Sichtbarkeit**

und Leitstrukturen (**Leitstrukturen_TLM**, **Leitstrukturen_DTM** und **Leitstrukturen_alle**). Da die Vorhersagevariablen kontinuierlich und die Daten nicht normalverteilt sind, wurde für die univariaten Tests der nichtparametrische Wilcoxon-Test durchgeführt. Um die Kollinearität zu verringern, wurde die Korrelation zwischen den einzelnen Variablen untersucht.

Aufgrund der Unterschiede zwischen Bergregion und Mittelland wurden separate Modelle für die Alpenregion und das Mittelland der Schweiz entwickelt. Insgesamt wurden vier logistische Regressionsmodelle (KER für die enge KDE-basierten Segmentierungen *kde_eng* und KWR für die weite KDE-basierte Segmentierung *kde_weit*, je pro Region) und zwei Klassifikatoren mit maschinellen Lernmethoden erstellt (RML mit der regelmässigen Segmentierung *seg200*, je pro Region).

Die Daten zu den Wildtierunfällen liegen nur für die Kantone Zürich, Freiburg und Graubünden vor. Deshalb wurden die Klassifikatoren auf Basis dieser drei Kantone erstellt. Zürich und ein Teil von Freiburg repräsentieren das Mittelland, der Kanton Graubünden und der Rest des Kantons Freiburg steht für die Alpen Region. In allen Fällen wurden für die Erstellung des Modells zufällig 70% der Daten ausgewählt. Die restlichen 30% wurden als Testdaten für die Validierung des Modells verwendet, analog zu Seiler, et al. (2016).

Die erstellten Modelle wurden zur Vorhersage der regelmässig segmentierten Strassensegmente verwendet. Der Output des Modells ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Segment ein Hotspot ist. Für jedes Modell wurde ein optimaler Grenzwert der Wahrscheinlichkeit ($0 \leq p \leq 1$) für die Klassifizierung von Hotspots und Non-Hotspots ausgewählt. Mit diesem Wert war es möglich, Segmente binär zu klassifizieren (1 für Hotspot, 0 für Nicht-Hotspot).

Erste Parameterauswahl

Die erste Parameterauswahl erfolgte durch schrittweise Regression und Modellleistungsanalyse. Die Leistung eines Modells wurde anhand der folgenden Kennzahlen bewertet:

- 1) **Sensitivität** (Prozentsatz der vom Modell korrekt vorhergesagten Hotspot Segmente),
- 2) **Spezifität** (Prozentsatz der richtig vorhergesagten Non-Hotspot Segmente) und
- 3) **Fehlklassifizierung** (Prozentsatz der fehlklassifizierten Segmente).

Die Modelle wurden bezüglich Sensitivität optimiert. Ein wichtiger Faktor bei der Auswahl der signifikanten Parameter und Radii für die Zonalen Parameter ist die Multikollinearität. Die Modellvariablen sind so ausgewählt worden, dass die Multikollinearität minimiert wurde.

Approach 1 (KDE Based): Logistische Regression

Die ersten Modelle (Approach 1) wurden durch schrittweise Regression erstellt. Basierend auf dem Akaike Information Criterion (AIC) sind die besten Modelle ausgewählt worden. AIC ist eine Schätzung der relativen Qualität statistischer Modelle für einen bestimmten Datensatz. Die Qualität jedes Modells wird im Verhältnis zu den anderen Modellen bewertet.

Die Modellgenauigkeit wurde mit dem Pseudo Bestimmtheitsmass ("Pseudo R^2 ") bewertet. Pseudo R^2 gibt an, wie viele der Daten durch das Modell erklärt werden. Die Rate der erfolgreichen Klassifizierung wurde mittels AUC («Area Under the Curve») d.h. der Fläche unter der ROC Kurve bewertet. Eine ROC-Kurve (Receiver Operating Characteristic Curve) zeichnet die wahre positive Rate (Sensitivität) gegen die falsche positive Rate (1-Spezifität) bei verschiedenen Klassifizierungsschwellen auf. Die Fläche unter dieser Kurve ist ein aggregierter Leistungssmassstab für alle möglichen Einstufungsschwellen. Die beiden Parameter variieren zwischen 0 bis 1. Allgemein gilt: je näher der Wert bei 1 ist, desto besser ist das Modell.

Approach 2 (Regelmässige Segmentierung): «Extra Trees»

Im Gegensatz zu den KDE-basierten Modellen, gibt es bei der datengetriebenen Segmentierung keine Hotspot-entsprechende Kontrollsegmente, sondern Hotspot und Non-Hotspot Segmente. Ein Hotspot wurde als Strassensegment mit einer Anzahl von Unfällen ≥ 4 definiert. Alle Strassensegmente mit weniger oder keinen Unfällen wurden als Non-Hotspot bezeichnet. In diesem Modell gibt es viele Non-Hotspot Segmente und nur wenige Hotspot Segmente (ca. 5%), was bedeutet, dass die Daten sehr ausgewogen sind.

Dadurch war es unmöglich, ein logistisches Regressionsmodell zu erstellen, selbst mit einem Bayes'schen Ansatz. Daher wurden folgende Methoden des maschinellen Lernens untersucht: Entscheidungsbäume, «Random Forest» und der Klassifikator «Extra Trees». Letzterer hat die beste Leistung erbracht. Entscheidungsbaum-basiertes maschinelles Lernen verwendet das Lernen aus einem Entscheidungsbaum als Vorhersagemodell, um von Beobachtungen über ein Objekt (in den Zweigen dargestellt) zu Schlussfolgerungen über den Zielwert des Objekts (in den Blättern dargestellt) zu gelangen.

«Random Forest» ist ein Klassifikator, der aus mehreren, nicht korrelierten Entscheidungsbäumen besteht. Jeder Baum trifft seine eigene Entscheidung und die endgültige Klassifizierung basiert auf der Mehrheit der Stimmen aller Bäume im Wald. Ähnlich wie bei «Random Forest» ist der «Extra Trees Classifier» ein Metaschätzer, der eine Reihe von zufälligen Entscheidungsbäumen enthält. Der Unterschied besteht darin, dass bei dieser Methode die Bäume den verschiedenen Unterproben des Datensatzes angepasst werden und eine Mittelung verwendet wird, um die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern und die Überanpassung zu steuern.

Die ROC-Metrik zur Bewertung der Ausgabequalität des Klassifikators wurde mithilfe einer Kreuzvalidierung vorbereitet. Die ROC-Antworten für verschiedene Datensätze, die aus der k-fachen Kreuzvalidierung erstellt wurden, ermöglichen es, die mittlere Fläche unter der Kurve (AUC) zu berechnen und die Varianz der Kurve zu sehen, wenn der Trainingssatz in verschiedene Teilmengen aufgeteilt wird.

Die Wichtigkeit der Merkmale wurde entsprechend der mittleren Abnahme der Verunreinigung (Gini-Verunreinigung) ermittelt. Jeder Knoten in den Entscheidungsbäumen ist eine Bedingung für ein einzelnes Merkmal, welches den Datensatz in zwei aufteilt, sodass ähnliche Werte im selben Datensatz landen. Das Merkmal, aufgrund dessen die Bedingung gewählt wird, wird als Verunreinigung bezeichnet. Wenn ein Baum trainiert wird, kann berechnet werden, um wie viel jedes Merkmal die gewichtete Verunreinigung in einem Baum verringert. Im Falle der Wald Klassifikatoren (z.B. Extra Trees) geht es um die Durchschnittsberechnung der Verunreinigung von Bäumen. Wir weisen darauf hin, dass diese Technik tendenziell die Bedeutung kontinuierlicher Merkmale oder kategorialer Variablen erhöht.

3.3 Bestimmung der lokalen Parameter

Um die spezifischen Einflussfaktoren, die vor Ort zu Wildtierunfällen führen könnten, zu ermitteln, wurden 40 Hotspots im Kanton Zürich genauer untersucht. Die Feldarbeiten wurden im Juli und August im Jahr 2018 durchgeführt. Die verschiedenen Parameter und Messungen wurden jeweils im Hotspot und gleich angrenzend auf beiden Seiten des Hotspots in Kontrollzonen "Kontrolle 1" und "Kontrolle 2" beidseitig der Strasse erhoben. Beim Grünstreifen wurden Breite, Neigung, Position zur Strasse erhoben und in einem Referenzquadratmeter der Bodenbedeckungsgrad, die Anzahl Pflanzenarten sowie der Anteil Gras und Kräuter bestimmt. In einem Abstand von 15 Meter zum Strassenrand wurde auf einem Transekt von 100 Metern im Hotspot und jeweils 50 Metern in den Kontrollzonen alle Hinweise auf Wildtierpräsenz dokumentiert. Dabei wurden Wildwechsel (Trampelpfade von Wildtieren), Lager (Schlafplätze von Wildtieren), Losung (Kot der Wildtiere) erhoben. Weitere Hinweise auf Wiederkäuer wie Verbiss, Feg- und Schälschäden und bei Wildschweinen auch Suhlen und Mahlbäume wurden ebenfalls dokumentiert. Waren akustische Wildwarner, entlang der kontrollierten Strassenabschnitten installiert, wurden diese auf ihre Funktionalität hin getestet. Beim Test wurde jeweils der Lichtsensor kurz abgedeckt und danach mit einer kleinen Taschenlampe

beleuchtet. Funktionierende Wildwarner lösten dabei einen Pfeifton aus. Für die Bestimmung der Sichtweite stellte sich eine Person mit einem Signalsack in 7 Meter Abstand vom Strassenrand auf. Der Signalsack wurde auf Hüfthöhe gehalten (entsprechend der Höhe eines Rehs). Eine zweite Person ging dann in Fahrtrichtung dem Strassenrand entlang, bis sie mind. 1/3 des Sacks deutlich erkennen konnte. Als Sichtweite gilt nicht die Distanz zwischen den Personen, sondern die äquivalente Distanz entlang der Strasse (Abb. 11).

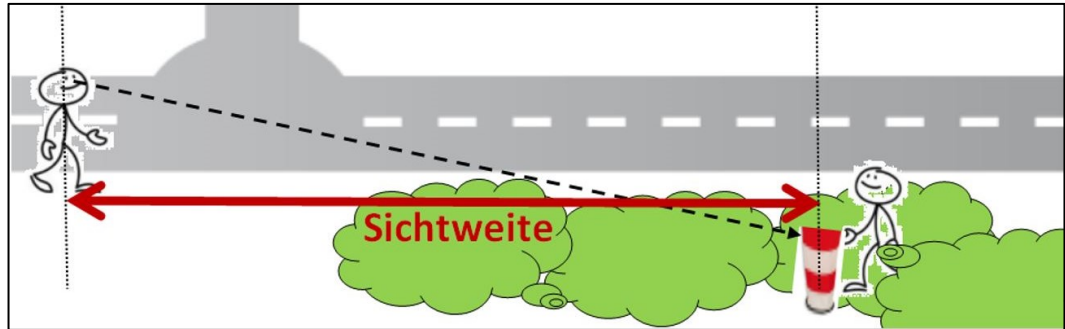


Abb. 11: Die Bestimmung der Sichtweite im Feld mit Hilfe eines Signalsacks.

3.4 Verwendete Software

Für die Ableitung der Parameter wurden folgende Software verwendet:

- ArcGIS Pro, Version 2.4
- Python 3.6 mit der libraries pandas 0.25.1 und geopandas 0.6.0
- PostgreSQL 9.4.5, mit der Extension PostGIS 2.2.1
- R-Software 3.6.0 mit der library sf 2.8-1 und tidyverse

Alle statistischen und logistischen Regressionsmodelle wurden mit der R-Software (3.6.0) berechnet. Die Klassifikatoren wurden mit Python 3.6.8 und sklearn 0.21.2 erstellt.

4 Resultate

4.1 Zusammenstellung potenzieller Einflussfaktoren

Die Faktoren, welche die Unfallwahrscheinlichkeiten mit Wildtieren beeinflussen, sind zahlreich und können sich im Tages- und Jahresverlauf auch ändern. Sie lassen sich in die drei Hauptkategorien ausgehend von Wildtier, Verkehr und Umwelt aufteilen (Abb. 12). Es gilt zu beachten, dass die Faktoren nicht isoliert für sich stehen, sondern auch Interaktionen zwischen den verschiedenen Faktoren auftreten können. Die verschiedenen Einflussfaktoren sind entweder beeinflussbar, bedingt beeinflussbar oder nicht beeinflussbar. Beim Einsatz von möglichen Präventionsmethoden muss deshalb beachtet werden, dass sie nicht auf jeden Einflussfaktor im gleichen Masse einwirken können. Um den Kontext, in dem sich Wildtierunfälle ereignen, besser verstehen zu können, wurde eine detaillierte Übersicht der Einflussfaktoren erstellt (Anhang 4). Die Zusammenstellung diene dann auch als Grundlage für die Auswahl der Parameter für die statistische Modellierung. Nicht für alle Einflussfaktoren liegen jedoch Daten vor, so sind beispielsweise Informationen zu Wildtierdichten und deren räumlichen Verteilung nur selten vorhanden. Dafür liegen schweizweite Daten für Einflussfaktoren wie Übersichtlichkeit, Lebensraum, Topografie, Geschwindigkeit und Verkehrsstärke vor.



Abb. 12: Vereinfachte Darstellung der Einflussfaktoren in den drei Hauptkategorien Wildtiere, Verkehr und Umwelt.

4.2 Parameter der statistischen Modellierung

Erste Parameterauswahl

In den ersten Analysen wurden Durchschnittliches Tägliches **Verkehrsaufkommen** und **Geschwindigkeit** aufgrund fehlender Signifikanz ausgeschlossen. Die beiden Parameter sind jedoch indirekt über den Strassenlärm im Modell vertreten. Die folgenden Raten wurden für die zonalen Parameter festgelegt: **Strassenlärm_50m** (Mittelwert),

Äsungsfläche_100m, **Primärflächen_200m** und **Vegetationshöhe_100m**. Der komplexe Parameter **Sichtbarkeit** verbesserte das Modell nicht signifikant und war in univariaten Tests nur für eine Region signifikant. Aus diesem Grund wurde die Sichtbarkeit von den Modellen ausgeschlossen. Die Sichtbarkeit ist trotzdem über die **Sinuosität** in die Modelle eingeflossen.

Univariate Analyse

Die univariaten Tests von einzelnen Variablen haben Unterschiede zwischen Kontroll- und Hotspot-Segmenten gezeigt. Die relative Signifikanz der Faktoren ist jedoch je nach Region unterschiedlich. Die Parameter, die unabhängig von Modell und Region signifikant sind, waren **Sinuosität**, **Äsungsfläche_100m** und **Strassenlärm_50m**. Tab. 3 zeigt die Ergebnisse der univariaten Tests für die zwei KDE-basierten Modelle für beide Regionen (Alpen und Mittelland). Aufgrund der Diskrepanz der Stichprobengrösse von Hotspotsegmenten und nicht gepaarten Daten, war es unmöglich, univariate Tests für diskret segmentierte Daten (Model RML) durchzuführen.

Tab. 3: Ergebnisse (*p*-Werte) der univariaten Wilcoxon-Tests zwischen Hotspot und Non-Hotspot Segmenten.

Parameter	Mittelland KER	Alpen KER	Mittelland KWR	Alpen KWR
Sinuosität	< 0.001*	< 0.001*	0.00129*	< 0.001*
Distanz_Siedlung	< 0.001*	0.06962	0.59748	0.84004
Distanz_Wald	< 0.001*	0.06889	0.44691	0.01190*
Distanz_Gewässer	0.77505	0.00891*	0.73460	0.48005
Distanz_Wildtierkorridor	0.18573	0.02688*	0.50720	0.21106
Äsungsfläche_100m	< 0.001*	0.03784*	< 0.001*	0.02968*
Äsungsfläche_200m	< 0.001*	0.10948	< 0.001*	0.06390
Vegetationshöhe_100m	< 0.001*	0.00203*	< 0.001*	0.09470
Strassenlärm_50m	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*	< 0.001*
Primärflächen_200m	< 0.001*	0.04420*	< 0.001*	0.81078
Leitstrukturen_DHM	0.77068	0.82592	NA ¹	NA ¹
Leitstrukturen_TLM	< 0.001*	0.19634	< 0.001*	0.46617
Leitstrukturen_alle	0.00231*	0.41236	< 0.001*	0.46617
Sichtbarkeit	< 0.001*	0.68284	NA ²	NA ²

* signifikant (Signifikanzniveau $\alpha=5\%$)

¹ p-Werte konnten wegen fehlender Paarung nicht berechnet werden

² Daten nicht vorhanden

Modellleistung

Alle Modelle ermöglichen die Unterscheidung zwischen Hotspot- und Non-Hotspot-Segmenten. In allen Fällen sind die Modelle effektiver bei der Identifizierung von Hotspot-Segmenten als von Non-Hotspot-Segmenten. Tab. 4 fasst die Ergebnisse der Modelleleistungen zusammen.

In der Region Mittelland können beide Regressionsmodelle (KER und KWR) die Hotspot-Segmente vergleichsweise gut identifizieren (Sensitivität 82.5% bzw. 79.5%). Das Pseudo Bestimmtheitsmass (Pseudo R^2) und die Fläche unter der ROC Kurve (AUC) dieser beiden Modelle sind vergleichbar. Da die Spezifität höher und die Fehlklassifizierung niedriger ist, ist die Leistung von Modell KER am besten. Die Leistung von Modell RML war etwas schlechter.

In der Alpenregion ist ebenfalls die Leistung von Modell KER am besten. Die Fähigkeit, Hotspot-Segmente zu identifizieren, ist bei den Modellen KER und KWR ähnlich (Sensitivität 88.6% bzw. 92.7%). Gleiches gilt für die Parameter Fehlklassifizierung und AUC. Spezifität und Pseudo R^2 sind in Modell KWR deutlich geringer (um jeweils ca. 15%), was bedeutet, dass das entsprechende Modell Nicht-Hotspot-Segmente schlechter identifiziert und deutlich weniger Daten erklären kann.

Tab. 4: Vergleich der Modelleleistungen der beiden KDE-basierten Modelle KER und KWR sowie Modell RML, welches auf maschinellen Lernmethoden beruht.

Model	Sensitivität	Spezifität	Fehlklassifikation	Pseudo R^2	AUC
Model KER Mittelland	82.50%	76.56%	20.14%	25.95%	0.83
Model KER Alpen	88.64%	50.00%	27.03%	29.75%	0.84
Model KWR Mittelland	79.46%	57.94%	31.05%	23.24%	0.82
Model KWR Alpen	92.86%	34.38%	25.49%	14.09%	0.74
Model RML Mittelland	77.19%	76.80%	23.18%	NA*	0.83
Model RML Alpen	76.00%	70.56%	29.17%	NA*	0.76

* Pseudo R^2 ist eine Regressionsmodellmetrik, daher in Modell 2 nicht zu berechnen.

Regressionsmodelle

Die Modelleleistung der beiden KDE-basierten Modelle ist für die zwei Regionen Mittelland und Alpen durchaus vergleichbar. Die Modelle KER und KWR enthielten jedoch unterschiedliche Kombinationen von Variablen. Tab. 5 zeigt die ausgewählten besten Modellvarianten mit standardisierten Schätzungen (Estimate). Unabhängig vom Modell sind folgende Variablen immer signifikant: Sinuosität, Äsungsfläche_100m und Strassenlärm_50m.

Beispielsweise sind beim Modell KER für die Region Mittelland die Parameter Distanz_Wald, Sinuosität, Distanz_Siedlung, Strassenlärm_50m und Äsungsfläche_100m signifikant, angeordnet in ansteigender Reihenfolge ihres p-Werts (d.h. absteigender Signifikanz). Andere Variablen des Modells sind nicht signifikant (p-Wert > 0.05), aber für das Modell relevant (geringere AIC und bessere Leistung). Im Modell KER der Alpen Region sind dagegen die Parameter Sinuosität, Distanz_Wald, Strassenlärm_50m, Distanz_Gewässer, Primärflächen_200m, Äsungsfläche_100m und Vegetationshöhe_100m signifikant, angeordnet in ansteigender Reihenfolge ihres p-Werts.

Die Klassifizierung der KER- und KWR-Modelle unterscheidet sich im Mittelland in 23% und in der Alpenregion in 21% der Segmente. In beiden Regionen identifizierte das KER-Modell mehr Hotspots als das KWR-Modell (Verhältnis 2:1).

Tab. 5: Ausgewählte Variablen für die beste Modelleleistung der KDE-basierten Modelle KER und KWR der beiden Regionen Mittelland und Alpen mit standardisierten Schätzungen.

Model KER Mittelland Variablen	Schätzung	Std. Fehler	Z Wert	Pr(> z)
(Intercept)	0.09139	0.1623	0.563	0.5734
Distanz_Wald	-0.66927	0.18975	-3.527	< 0.001***
Sinuosität	0.97655	0.34341	2.844	0.0045 **
Strassenlärm_50m	0.37766	0.14139	2.671	0.0076 **
Distanz_Siedlung	0.40205	0.15262	2.634	0.0084 **
Äsungsfläche_100m	0.35031	0.16029	2.185	0.0289 *

Leitstrukturen_TLM	0.34585	0.18767	1.843	0.0654
Vegetationshöhe_100m	0.72843	0.39687	1.835	0.0664
Distanz_Gewässer	0.22248	0.13369	1.664	0.0961
Model KER Alpen Variablen	Schätzung	Std. Fehler	Z Wert	Pr(> z)
(Intercept)	0.1893	0.2074	0.913	0.3613
Sinuosität	1.676	0.4293	3.904	< 0.001***
Distanz_Wald	-1.1403	0.3427	-3.327	< 0.001***
Strassenlärm_50m	0.6241	0.212	2.944	0.0032 **
Distanz_Gewässer	0.7673	0.3037	2.526	0.0115 *
Primärflächen_200m	0.5698	0.2473	2.304	0.0212 *
Äsungsfläche_100m	0.4628	0.2076	2.23	0.0258 *
Vegetationshöhe_100m	0.6818	0.3267	2.087	0.0369 *
Leitstrukturen_DHM	0.3244	0.2159	1.503	0.1329
Model KWR Mittelland Variablen	Schätzung	Std. Fehler	Z Wert	Pr(> z)
(Intercept)	0.3664	0.1101	3.329	< 0.001***
Äsungsfläche_100m	0.7104	0.1472	4.826	< 0.001***
Vegetationshöhe_100m	1.2104	0.2599	4.657	< 0.001***
Strassenlärm_50m	0.5297	0.1167	4.537	< 0.001***
Sinuosität	0.7698	0.1731	4.446	< 0.001***
Primärflächen_200m	0.6461	0.2215	2.917	0.0035 **
Leitstrukturen_TLM	0.277	0.1462	1.895	0.0581
Model KWR Alpen Variablen	Schätzung	Std. Fehler	Z Wert	Pr(> z)
(Intercept)	0.3253	0.1618	2.01	0.0445 *
Sinuosität	1.1446	0.3911	2.926	0.0034 **
Äsungsfläche_100m	0.3453	0.1548	2.231	0.0257 *
Strassenlärm_50m	0.3805	0.1725	2.205	0.0274 *
Leitstrukturen_TLM	0.3707	0.1888	1.963	0.0496 *
Distanz_Wald	-0.2314	0.1457	-1.588	0.1123

Signifikanz: *** p < 0.001, ** p < 0.01, * p < 0.05.

Maschinelles Lernen

Die Strassenkategorie war ein wichtiger Faktor in beiden RML Modellen, vor allem die Strassenklassen «4 m Strasse» und «6 m Strasse». In der Bergregion waren folgende Parameter die wichtigsten: «6 m Strasse» und «4 m Strasse», danach Sinuosität. Für die Region Mittelland waren «6 m Strasse» zusammen mit Vegetationshöhe_100m und Strassenlärm_50m die wichtigsten Parameter.

Das auf Maschinellern Lernen basierende Modell RML weist im Vergleich zu den Modellen KER und KWR eine geringere Leistung auf, siehe *Tab. 4*. Die Interpretation der Einflussfaktoren ist bei dieser Methode schwieriger. Aus diesem Grund werden die Modelle KER und KWR bevorzugt.

4.3 Kartenansicht der Resultate

Das zentrale räumliche Resultat der vorliegenden Arbeit bildet eine Schweizerkarte mit Strassensegmenten, für die eine geschätzte Unfallwahrscheinlichkeit mittels verschiedener Modelle berechnet wurde. Für jedes Segment der regelmässigen Segmentierung Seg200 kann gemäss den verschiedenen Modellen eine Unfallwahrscheinlichkeit angegeben und damit auch kartographisch dargestellt werden.

Aufgrund der Informationsdichte der räumlichen Resultate wird für diesen Bericht von einer Übersichtskarte der ganzen Schweiz abgesehen. Dafür wurde eine Webkarte aufbereitet, welche es erlaubt, die Resultate in ihrer räumlichen Vielfalt und Tiefe selbstständig zu erkunden. Für die drei Modelle wurde je eine Karte aufbereitet. Die Übersicht in *Abb. 13* zeigt eine Gegenüberstellung eines kleinen Raumausschnittes, je mit den drei Modellen und den Unfalldaten. Die QR-Codes leiten den Betrachter direkt auf den entsprechenden Raumausschnitt der entsprechenden Karte – als Startpunkt für die eigene Exploration der Resultate.

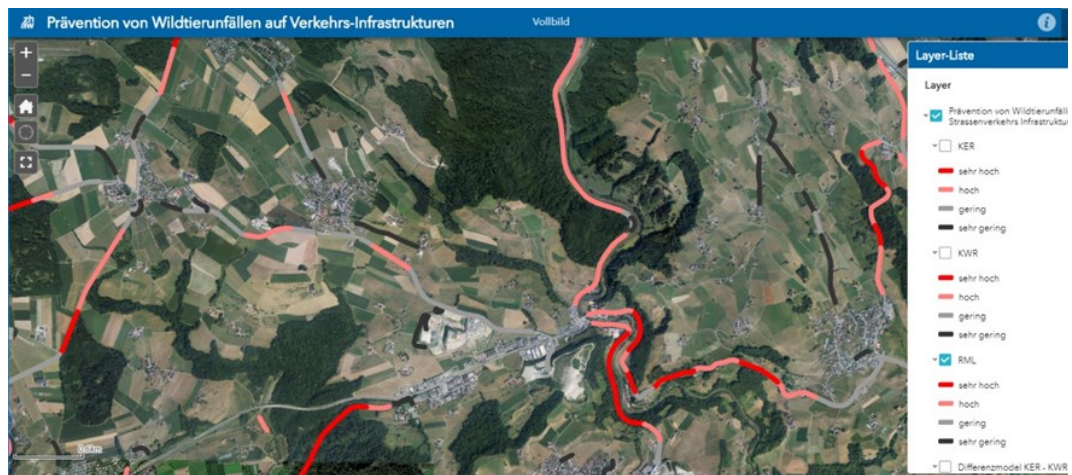
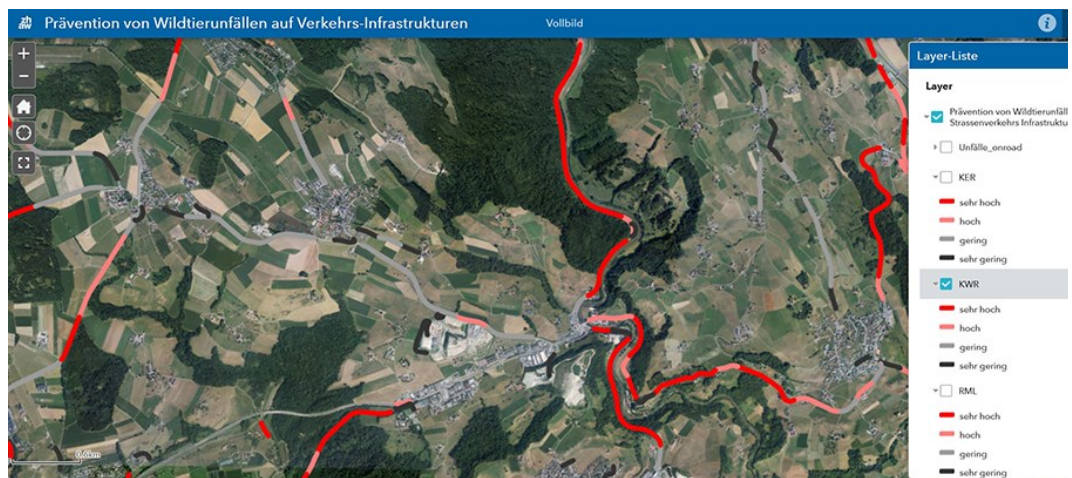
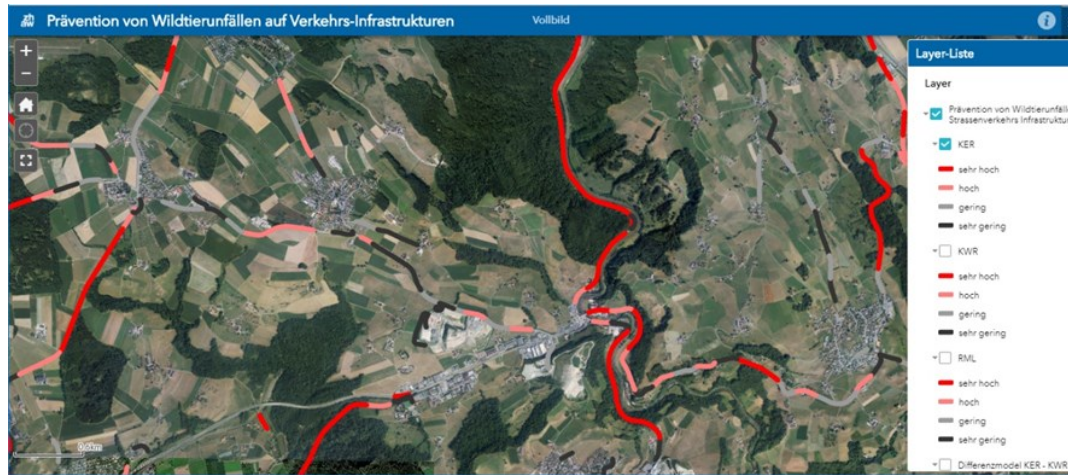
Die interaktive Webkarte ist unter folgendem Link verfügbar:

www.zhaw.ch/iunr/wildtierunfaelle



Um eine verbesserte Lesbarkeit zu erreichen, werden nicht kontinuierliche Wahrscheinlichkeiten pro Segment dargestellt, sondern Farbverläufe über diskrete Unfallwahrscheinlichkeitsklassen. Die Strassensegmente wurden aufgrund der optimalen Wahrscheinlichkeitsgrenze binär als Hotspots und Non-Hotspots identifiziert. Anschliessend wurden die Wahrscheinlichkeitsbereiche jeder Klasse durch eine höhere Hotspot-Wahrscheinlichkeit und eine niedrigere Hotspot-Wahrscheinlichkeit gleichmässig in zwei Hälften geteilt. Diese Methode widerspiegelt die Verteilung der Hotspot- / Non-Hotspot-Segmenten zwar nicht, verbessert jedoch die Visualisierung der klassifizierten Segmente. In der Karte lassen sich nun sehr hohe (dunkelrot), hohe (rot), geringe (grau) und sehr geringe (dunkelgrau) Unfallwahrscheinlichkeit unterscheiden.

Die Differenzmodelle erlauben den direkten Vergleich von zwei Modellen – räumlich explizit in der Webkarte. Die kartierte Differenz entspricht der Differenz der Kategorie in einem Modell und der Kategorie im anderen Modell. Hat ein Segment in KER die Kategorie 4 (sehr hoch) und in KWR die Kategorie 3 (hoch) dann beträgt die Differenz KER minus KWR den Wert -1 (in Worten). Graue Segmente zeigen übereinstimmende Modelle, rote/blau Segmente zeigen Unterschiede zwischen den Modellen.



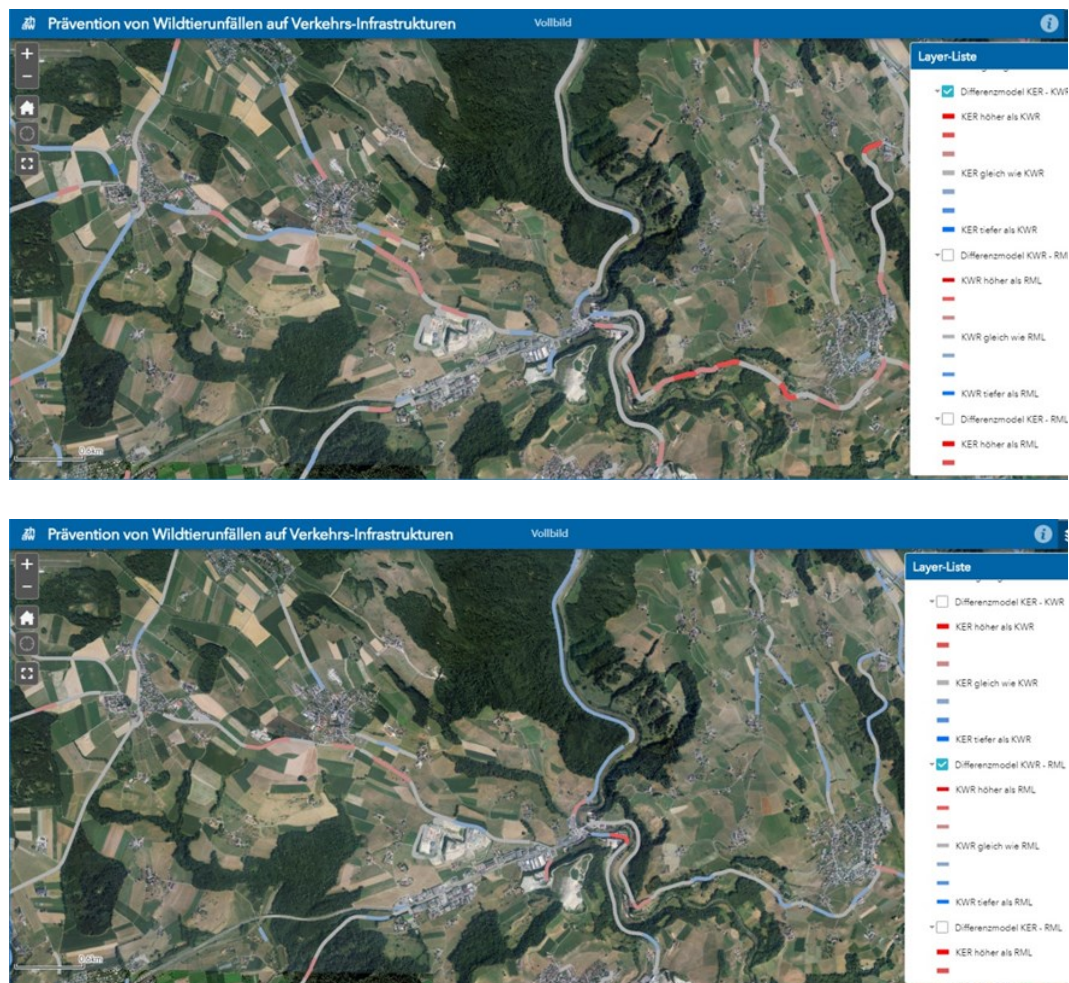


Abb. 13: Webkarten zu den drei Modellen KER, KWR und RML (oben, mitte, unten) und mit dem Differenzmodellen (in der Abbildung nur KER – KWR, oben, und KWR – RML, unten). Ein direkter visueller Vergleich zwischen den zwei Modellen mit Logistischer Regression und dem einen Machine Learning Modell für den beispielhaften Raumausschnitt rund um Sihlbrugg ZH zeigt Ähnlichkeiten und Unterschiede, z.B. auf der Hirzelstrasse unten rechts. Diese unterschiedlichen Resultate der Modelle zeigen sich auch in den gerechneten Differenzmodellen, insbesondere beim Vergleich KER – KWR (rote Segmente auf der Hirzelstrasse).

4.4 Saisonalität und Tageszeit

Je nach Tierart gibt es unterschiedlich viele Unfälle im Jahresverlauf (Abb. 14). Unfälle mit Rehen gibt es viele, unabhängig von der Jahreszeit. Generell gibt es im Winter mehr Unfälle mit Rothirschen als im Sommer. Am meisten Unfälle mit Wildschweinen gibt es im Herbst. Bei Fuchs und Dachs steigen die Unfallzahlen von Frühling bis Mitte Sommer stark an. Wildtierunfälle ereignen sich oft in der Dämmerung und nachts, weil dann die meisten Wildtiere am aktivsten sind (Abb. 15).

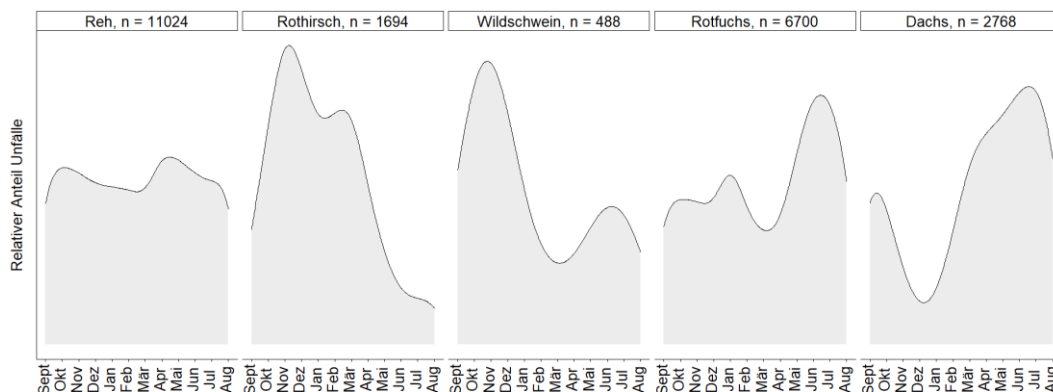


Abb. 14: Jahreszeitliche Verteilung der Wildtierunfälle in den Kantonen Zürich, Freiburg und Graubünden in den Jahren 2010-2015.

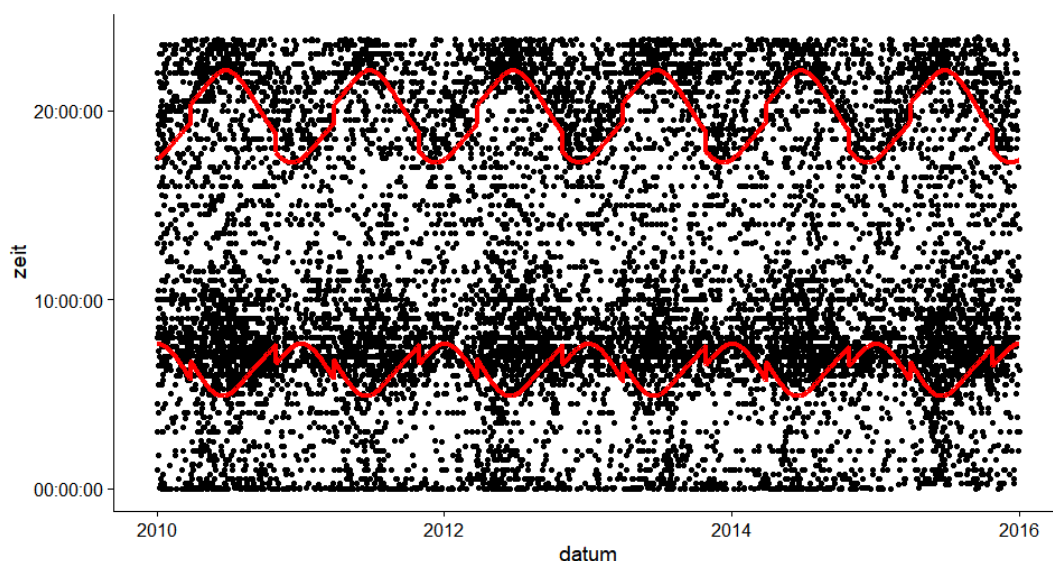


Abb. 15: Tageszeitliche Verteilung der Wildtierunfälle im Kanton Zürich in den Jahren 2010-2015 ($n=12'395$). Die meisten Unfälle ereignen sich in der Dämmerung und in der Nacht. Die vielen Datenpunkte am Morgen sind darauf zurückzuführen, dass wenn das Wildtier nicht tot in Strassennähe liegt, meistens erst am Morgen nachgesucht wird. Die roten Linien bezeichnen den Sonnenaufgang respektive den Sonnenuntergang.

4.5 Lokale Parameter im Feld

Die im Feld erhobenen Parameter zum Grünstreifen und der Sichtweite unterscheiden sich nicht zwischen Hotspots und Kontrollsegmenten (Tab. 6, Tab. 7). Einzig die Anzahl Hinweise auf Wildtiere (Wildwechsel, Lager, Losung, Verbiss usw.) sowie die Anzahl Wildwechsel allein unterscheiden sich signifikant zwischen Hotspots und Kontrollsegmenten (Tab. 8). In den Hotspots wurden mehr Hinweise auf Wildtiere und mehr Wildwechsel gefunden als in den Kontrollsegmenten. Von den 78 akustischen Wildwarnern, die im Feld kontrolliert wurden, funktionierten mit 39 Stück genau die Hälfte. Total wurden zehn Parameter getestet und damit betrug das Signifikanzniveau nach der Bonferroni-Korrektur < 0.005 .

Tab. 6: Resultate der gepaarten t-Tests für Parameter, die normalverteilt waren.

	Parameter	Mean	Df	LCI	UCI	t	p
Hotspot / Kontrolle 1	Anteil Kräuter Grünstreifen A	2.43	38	-3.11	7.99	0.88	0.38
	Anteil Kräuter Grünstreifen B	-3.9	39	-12.12	4.32	-0.95	0.34
	Anteil Gräser Grünstreifen A	-2.61	38	-9.94	4.70	-0.72	0.47
	Anteil Gräser Grünstreifen B	0.42	39	-10.85	11.70	0.07	0.93
	Pflanzenarten Grünstreifen A	0.41	38	-0.50	1.32	0.90	0.37
	Pflanzenarten Grünstreifen B	-0.2	39	-1.12	0.72	-0.43	0.66
Hotspot / Kontrolle 2	Anteil Kräuter Grünstreifen A	-1.17	38	-9.39	7.04	0.29	0.77
	Anteil Kräuter Grünstreifen B	-4.6	39	-13.01	3.81	-1.10	0.27
	Anteil Gräser Grünstreifen A	0.07	38	-8.60	8.76	0.01	0.98
	Anteil Gräser Grünstreifen B	-0.75	39	-12.32	10.82	-0.13	0.89
	Pflanzenarten Grünstreifen A	0.46	38	-0.54	1.46	0.92	0.36
	Pflanzenarten Grünstreifen B	-0.1	39	-0.95	0.75	-0.23	0.81

Tab. 7: Resultate der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests für Parameter, die nicht normalverteilt waren.

Parameter	Hotspot / Kontrolle 1		Hotspot / Kontrolle 2	
	V	p	V	p
Grünstreifenbreite A	278	0.80	304.5	0.66
Grünstreifenbreite B	319.5	0.49	287	0.86
Anteil unbewachsen A	234	0.98	260.5	0.95
Anteil unbewachsen B	378	0.30	404	0.026
Anteil Moos A	13.5	1.00	11.5	0.91
Anteil Moos B	13.5	1.00	6.00	0.78
Neigung A	240	0.47	327	0.85
Neigung B	355	0.73	412.5	0.005
Sichtweite Seite A	215.5	0.10	200	0.35
Sichtweite Seite B	334.5	0.53	360.5	0.15

Tab. 8: Resultate der Wilcoxon-Pratt-Vorzeichen-Rang-Tests für die Parameter Wildtierhinweise und Wildwechsel.

Parameter	Z	p
Wildtierhinweise Strassenseite A	-5.51	< 0.001
Wildtierhinweise Strassenseite B	-5.59	< 0.001
Wildwechsel Strassenseite A	-6.06	< 0.001
Wildwechsel Strassenseite B	-6.76	< 0.001

4.6 Literaturrecherche Präventionsmassnahmen

Weltweit gibt es eine grosse Anzahl verschiedener Massnahmen, wie Wildtiere abgeschreckt und die Verkehrsteilnehmer gewarnt werden sollen. Dabei wird versucht, auf die Wildtiere optisch, akustisch oder olfaktorisch einzuwirken, die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer zu steigern, sie zu informieren und sensibilisieren und Wildtierhabitate und Verkehrsinfrastruktur räumlich voneinander zu trennen. Das Ziel von Präventionsmassnahmen sollte dabei nicht primär sein, die Tiere am Überqueren der Strasse zu hindern, sondern die Überquerung sicherer zu machen, um die Vernetzung der Lebensräume zu garantieren. Fahrzeughersteller arbeiten ausserdem laufend an neuen Technologien zur frühzeitigen Erkennung von Wildtieren und der Verhinderung von Unfällen durch sogenannte Antikollisionssysteme. Eine detaillierte Aufstellung der verschiedenen Präventionsmassnahmen ist im Anhang V aufgelistet.

4.6.1 Räumliche Trennung von Wildtierhabitat und Verkehrsinfrastruktur

Wildzäune gelten nach wie vor als wirksamste Massnahme gegen Wildtierunfälle (Van der Grift, et al., 2017). In der Schweiz ist ein Wildzaun entlang von Nationalstrassen erster und zweiter Klasse (Autobahnen und Autostrassen) obligatorisch. Bei Nationalstrassen dritter Klasse (Hauptstrassen) bedarf es einer vorherigen Risikoabklärung (Bundesamt für Strassen ASTRA, 2015). Es werden heute hauptsächlich drei verschiedene Zauntypen verwendet und die Ausführung sollte an die Tierart angepasst sein. Die höchste Anforderung einer vor Ort vorkommenden Tierart bestimmt also die Ausführung (Abb. 16-16). Tab. 9 fasst die Empfehlungen der Schweiz und der Nachbarländer Frankreich und Deutschland für die wichtigsten Tierarten zusammen.



Abb. 16: Typ 1: Diagonalgeflechte mit unterschiedlichen Drahtstärken und Maschenweiten. © ZHAW WILMA



Abb. 17: Typ 3: Stabgittermatten mit unterschiedlichen Drahtstärken. Hier eine Ausführung mit Flügel als Überspring- und Überkletterschutz. © Martin Strein



Abb. 18: Typ 2: Knotengitter mit unterschiedlichen Maschenweiten. © ZHAW WILMA

Der Rothirsch breitet sich beispielsweise seit rund 15 Jahren auch im dicht besiedelten und bebauten Mittelland aus und die geltende VSS-Norm zu Wildzäunen sollte in diesem Zusammenhang angepasst werden (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), 2019). Die empfohlene Wildzaunhöhe von 1.4 – 2 m ist für Gebiete mit Rothirschbeständen zu niedrig.

Des Weiteren regelt die VSS-Norm auch die Ausführung eines Wildzauns: «Um das Unterdurchschlüpfen oder Untergraben zu erschweren, muss der unterste Draht des Geflechts auf dem Boden aufliegen.» Die Erfahrungen im In- und Ausland haben gezeigt, dass diese Massnahme als Untergrabungsschutz nicht reicht. Die zuständigen Personen aus den Nachbarländern empfehlen die Eingrabung des untersten Teils des Zauns oder eine zusätzliche Montage von Kunststoffbohlen, welche dann mit dem Zaun verbunden werden. Ein am Boden gespannter Stacheldraht hat sich als Untergrabungsschutz nicht bewährt (Carsignol, et al., 2008; Brieger, et al., 2018).

Wildschutzzäune müssen heutzutage nicht mehr nur die Verkehrsteilnehmer vor den Wildtieren schützen, sondern auch geschützte und gefährdete Arten vor dem Tod im Strassenverkehr. Die VSS-Zaunnorm berücksichtigt bisher nicht die anwachsenden Bestände von kletternden Carnivoren wie Wildkatze und Luchs. In Wildkatzen- und Luchshabitaten muss über einen Überkletterschutz in Form eines umgebogenen zusätzlichen Teils des Zauns oder über Kunststoffflügel nachgedacht werden. Da Luchse und Wildkatzen in der Schweiz aber bisher vor allem auf Hauptstrassen zu Tode kamen, scheint ein obligatorischer Überkletterschutz an allen Autobahnzäunen vorläufig nicht notwendig. Bei der Konstruktion müssen zudem zwei wichtige Punkte beachtet werden: Eine kleine Maschenweite ist notwendig, weil sich Wildkatzen bei zu grosser Maschenweite durch den Zaun zwängen und sich strangulieren können und die Knoten der Drähte müssen, gewickelt sein, weil Wildkatzen mit den Krallen in den Knoten hängenbleiben und verenden können (Carsignol, et al., 2008; Brieger, et al., 2018). Auch Amphibien sind auf ihren Wanderungen zu den traditionellen Laichgewässern teilweise gefährdet. Eine separate VSS-Norm über den Schutz der Amphibien hilft den Projektverantwortlichen bei der Planung von Schutzmassnahmen. Die Anweisung, dass Schutzmassnahmen zu realisieren sind, wenn a.) der Fortbestand lokaler Amphibienpopulationen direkt gefährdet ist oder b.) ein Ausmass an Schaden und Leid entsteht, welches aus ethischen Gründen nicht akzeptiert werden kann, scheint aus Sicht Artenschutz zweckmässig.

Um die durch Verkehrsinfrastrukturen fragmentierten Wildtierlebensräume wieder zu verbinden, werden heute in steigender Anzahl sogenannte Querungshilfen in Form von Wildtierunter- und überführungen und Amphibien- und Kleintierdurchlässen gebaut. Die ASTRA-Richtlinie «Querungshilfe für Wildtiere» bietet dabei eine gute Grundlage für die Planung und eine wildtierfreundliche Ausführung (Bundesamt für Strassen, 2014).

Tab. 9: Empfehlungen Wildschutzzaun pro Tierart (aus Brieger, et al., 2018, Carsignol, et al., 2008 und Schweizerischer Verband der Strassen- und verkehrsfachleute (VSS), 2019).

Tierart	Verhalten am Zaun	Zauntyp	Maschenweite (unterhalb 80 cm)	Zaunhöhe	Zubehör
Rothirsch	Springer	2	10 x 15 cm	FR: 2.5 – 2.8 m DE: 1.9 – 2.2 m CH: 1.4 – 2.0 m	40 – 60cm Flügel: Zusatzdraht oder Band über dem Zaun
Reh	Springer, Schlüpfer	2	5 x 15 cm	FR: 1.6 – 1.8 m DE: 1.6 m CH: 1.6 m	Untergrabschutz d.h. Zaun mit Bodennägeln verankern oder eingraben
Wildschwein	Wühler, Zerstörer	2	5 x 15cm	FR: Überirdisch 1.4 m, vergraben 30 – 50 cm DE: 1.6 m CH: 1.6 m	Zusätzliche Verstärkungen an der Zaunbasis, Untergrabschutz d.h. Zaun eingraben, genügend dicke Drähte (Kopf- und Fussdraht 3.7mm, Fülldraht 3mm)
Dachs	Wühler, Schlüpfer	2	5 x 15cm	FR: Überirdisch 1.4 m, vergraben 30 – 50 cm DE: 1 m	Untergrabschutz d.h. Zaun eingraben
Fuchs	Kletterer, Wühler, Schlüpfer	1 oder 2	5 x 15cm (Typ 2)	FR: 1 m DE: 1.6 m	Unten zusätzlich einen engeren Kleintierzaun, Untergrabschutz
Wildkatze	Schlüpfer, Kletterer	1 oder 3	4 x 4cm (Typ 1)	FR: 1.8 m DE: 1.8 – 2 m	Untergrabschutz, Überkletterschutz. Frei von Vegetation und nicht in der Nähe von Bäumen.
Luchs	Kletterer	1 oder 3	4 x 4cm (Typ 1)	FR: 1.8 – 2 m DE: 2.5 – 3 m	Untergrabschutz, Überkletterschutz. Keine Bäume.
Wolf	Schlüpfer, (Springer)	2	5 x 15cm	DE: 1.6 m	Untergrabschutz
Mittelgrosse Säuger (Marder, Hase, Kaninchen)	Schlüpfer, Springer	1 oder 2	5 x 5cm (Typ 2)	FR: 1 m DE: 1.6 m	Untergrabschutz und mind. 30cm unterirdisch
Kleinsäuger (Hermelin, Wiesel, Igel)	Schlüpfer	1 oder 2	0.4 – 0.5 cm, Barrierewirkung schwierig	FR: 1 m CH: 0.6 m	Engmaschig (siehe Maschenweite)
Amphibien und Reptilien	Schlüpfer, Kletterer	1 oder 2	0.5 cm	FR: 0.6 m	Engmaschig (siehe Maschenweite) oder eine zusätzlich angebrachte Kunststoffplatte.

4.6.2 Wildtiere vor dem Verkehr warnen

Eine weitere Möglichkeit, um Wildtierunfälle zu vermeiden ist Wildtiere mittels Wildwarngeräten am Überqueren der Strasse zu hindern bzw. sie von herannahenden Fahrzeugen zu warnen. Die Angebote sind vielfältig und reichen von visuellen Wildwarnern über akustische und olfaktorische Systeme.

Visuelle Wildwarner

Visuelle Wildwarner sind Reflektoren in verschiedenen Farben, Formen und Ausführungen, die an den Strassenleitpfosten befestigt werden (Abb. 19). Trifft Scheinwerferlicht auf die Reflektoren, wird Licht in die Umgebung abgelenkt und soll so die Wildtiere abschrecken. Rote, blaue und weisse Reflektoren werden besonders häufig eingesetzt, doch ihre Wirkungsweise ist umstritten (D'Angelo, et al., 2006). Studien über die Farbempfindlichkeiten in der Retina von Hirschen zeigen, dass diese unterhalb des Bereiches von langwelligen Rottönen liegen (Jacobs, et al., 1994). Blautöne scheinen sie wiederum gut wahrnehmen zu können, doch D'Angelo et al. (2006) stellten im Test von blauen Reflektoren sogar ein erhöhtes Kollisionsrisiko fest. Vermutlich überfordert dieser blaue Reiz zusammen mit den grellen Scheinwerferlichtern der Fahrzeuge das Sehsystem der Tiere (D'Angelo, et al., 2006). Auch weitere Autoren konnten keinen Einfluss der Reflektoren in verschiedenen Farben auf das Verhalten der Tiere beim Überqueren der Strasse feststellen oder gar eine Senkung der Kollisionen (Kämmerle, et al., 2017; Waring, et al., 1991). Ausserdem scheinen sich auch Wildtiere an diese visuellen Stimuli gewöhnen zu können (Ujvári, et al., 1998). Zwei aktuelle Studien konnten zeigen, dass häufig Untersuchungen, die über einen kurzen Zeitraum und auf einer kurzen Untersuchungsstrecke durchgeführt wurden, eine positive Wirkung der Reflektoren nachwiesen. Dabei wurden aber vermutlich jährliche Populationsschwankungen und mögliche Verlagerungen der Unfall-Hotspots an andere Orte nicht erfasst. Ein Rückgang an Unfällen ist daher nicht zwangsweise auf die Reflektoren zurückzuführen (Benten, et al., 2018; Brieger, et al., 2016). Möglicherweise haben die Reflektoren aber eine positive Wirkung auf die Aufmerksamkeit der Fahrer (Rowden, et al., 2008). Es besteht aber auch hier die Möglichkeit der Gewöhnung (Huijser, et al., 2007). Dementsprechende Studien wurden aber noch keine durchgeführt.



Abb. 19: Visuelle Wildwarner sind Reflektoren in verschiedenen Farben, Formen und Ausführungen, die an Leitpfosten angebracht sind. Trifft Licht aus den Scheinwerfern des Fahrzeugs auf den Reflektor, wird das Licht in die Umgebung abgelenkt und soll Tiere warnen und davon abhalten, auf die Strasse zu gehen, oder sie sogar abschrecken.
© WLS.CH

Akustische Wildwarner

Akustische Wildwarner werden in der Schweiz ebenfalls an Strassenleitpfosten montiert und ähnlich wie Reflektoren durch das Auftreffen von Scheinwerferlicht aktiviert. Die Geräte senden dabei einen Pfeifton im Bereich von ca. 3kHz aus, der das Wild am Überqueren der Strasse hindern soll (Philipp, 2009). Studien zufolge liegt der hörbare Bereich von Hirschen zwischen 0.25 kHz und 30 kHz, mit der besten Sensitivität von 4 kHz bis 8 kHz (D'Angelo, et al., 2007). Wissenschaftliche Studien über die Wirksamkeit von akustischen Wildwarner gibt es nach bisherigem Erkenntnisstand keine. Der Kanton Zürich hat aber während 5 Jahren auf insgesamt 400 Strassenkilometern ihre Wirkung getestet (Abb. 20). In dieser Zeit haben sich ihm die Kantone Luzern, Aargau, St. Gallen und Schaffhausen angeschlossen. Die Ergebnisse fielen teils sehr unterschiedlich aus. Es wurden Rückgänge wie auch Zunahmen bei den Fallwildzahlen festgestellt nach dem Anbringen von akustischen Wildwarnern. Teils konnte im ersten Jahr ein Rückgang festgestellt werden, doch in den Folgejahren schwächte sich der Erfolg ab (Thiel, 2013). Die Wirksamkeit von akustischen Wildwarnern kann damit weder bestätigt noch ausgeschlossen werden. Erneut ist darauf hinzuweisen, dass auch andere Faktoren, wie die Bestandesdichten, die Übersichtlichkeit und die Topografie für die Wildunfälle von Bedeutung sind (Thiel, 2013; SVV, 2012).

Die Polnische Bahn (PKP) testete von 2008 bis 2012 Wildwarner, welche kurz vor dem Passieren eines Zuges tierische Warnrufe aussenden. Diese Geräte sind in Abständen von 70 Metern entlang der Bahngleise fix montiert. In rund 90% der Fälle, je nach Tierart, flüchteten die Tiere nach dem Ertönen des Warnrufes. Die häufigste Tierart in der Studie, das Reh (*Capreolus capreolus*), flüchtete in 84% der Fälle im Vergleich zu 68% der Fälle, wenn das Gerät ausgeschaltet war und nur der Zug Geräusche verursachte. Die Reaktion war dabei 20 Sekunden früher als ohne künstliche Warnrufe (Babińska-Werka, et al., 2015).



Abb. 20: Akustische Wildwarner werden an Leitpfosten angebracht und durch das Licht eines sich nähernden Fahrzeugs ausgelöst. Die Geräte geben einen Pfeifton ab, der verhindern soll, dass die Wildtiere die Strasse überqueren. © WLS.CH

In den USA sind seit den 1980er Jahren sogenannte Hirschpfeifen (engl. *deer whistles*) im Einsatz. Diese werden am Auto montiert und die durch den Fahrtwind erzeugten Töne sollen Hirsche abschrecken, so dass es zu keiner Kollision kommt. Es wird aber einerseits bezweifelt, ob die Töne überhaupt im hörbaren Bereich der Tiere liegen und andererseits

wird vermutet, dass die Töne durch die Verkehrsgerausche übertönt werden (Valitzski, et al., 2009; Scheifele, et al., 2003; Romin, et al., 1992). Eine japanische Forschungsgruppe entwickelte angelehnt an das japanische Strassenentwässerungssystem einen gerillten Strassenbelag, welcher warnrufähnliche Töne emittiert, wenn Fahrzeuge darüberfahren. Die Töne sollen ungefähr im Frequenzbereich von Hirsch-Warnrufen liegen (2.16kHz). Es sind aber noch ausführlichere Untersuchungen nötig, um die Wirkungsweise solcher Beläge zu verifizieren und die Lebensdauer der Rillen zu erfahren (Noro, et al., 2012).

Olfaktorische Wildwarner

Olfaktorische Applikationen oder sogenannte «Duftzäune» zum Fernhalten von Wildtieren wurden anfänglich vor allem zum Schutz von land- und forstwirtschaftlichen Kulturen und städtischen Grünflächen verwendet (Kimball, et al., 2009; Andelt, et al., 1992). Teilweise kommen sie nun auch in der Wildtierunfallprävention zum Einsatz (Abb. 21). Synthetisch hergestellte Duftstoffe, ähnlich denen von Menschen oder Prädatoren, haben sich bisher durchgesetzt, doch ausser einer Studie, welche ein bestimmtes Produkt getestet hat («Pacholek» von Ekoplant Company, Prag, Tschechien) kann keine Studie eine verlässliche Wirksamkeit oder einen Rückgang der Wildtierunfälle nachweisen (Bíl, et al., 2018). Wie in anderen Studien stellte auch bei Bíl et al. (2018) die tiefe Zahl an Wildunfällen während der Studiendauer ein Problem dar und die Wirksamkeit des Produkts ist immer noch 3x tiefer als vom Hersteller angegeben. Generell scheinen sich Wildtiere an permanente Düfte zu gewöhnen und meiden z. B. Futterplätze nur, wenn die Gerüche direkt auf ihr Futter aufgetragen werden (Elmeros, et al., 2011; Kimball, et al., 2009; Lutz, 1994; Trent, et al., 2001).



Abb. 21: Olfaktorische Wildwarner oder sogenannte "Duftzäune" werden eingesetzt, um Wildtiere von Strassen fernzuhalten und so Unfälle auf der Verkehrsinfrastruktur zu verhindern. Das Bild zeigt einen kombinierten Wildtierwarner (olfaktorisch und visuell). Die Flüssigkeit mit dem Geruch wird in das obere blau reflektierende Reservoir gegeben.
© WLS.CH

4.6.3 Verkehrsteilnehmer vor Wildtieren warnen

Die einfachste Massnahme, um Verkehrsteilnehmer auf eine mögliche Gefahr von Kollisionen mit Wildtieren aufmerksam zu machen, ist die Installation von einfachen Warnschildern (Abb. 22). Der Strassenbetreiber schützt sich mit dem Aufstellen von solchen Hinweistafeln auch gegen mögliche Klagen von Strassenbenützern, die Ansprüche geltend machen, wenn es zu Kollisionen mit Wildtieren kommt. An der Wirkung solcher Schilder wird aber gezweifelt. Studien zufolge konnte die Anzahl Unfälle mit Wildtieren durch das Anbringen von einfachen Warnschildern nicht reduziert werden (Rogers, 2004; Meyer, 2006). Verkehrsteilnehmer gewöhnen sich schnell an das Schild, besonders wenn es ganzjährig angebracht ist und insbesondere Personen, die die Strecke häufig fahren (z. B. Pendler) (Huijser, et al., 2015; Staines, et al., 2001). Die Schilder bewirkten ausserdem keine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit (Stanley, et al., 2006).



Abb. 22: Hinweistafeln informieren Fahrzeuglenker über die potenzielle Gefahr durch Wildtiere auf der Fahrbahn. © ZHAW WILMA

Teurere, aber effektivere Alternativen bieten verschiedene Varianten von elektronischen Wildwarnanlagen. Man unterscheidet dabei Systeme mit Lichtschranken, Passivinfrarotsensoren und Radar (detaillierte Übersicht in Huijser, et al. 2003). Die Schweizer Firma Calstrom GmbH entwickelte bereits 1992 eine Anlage, welche Lichtschranken und Passivinfrarotsensoren verwendete. Zum einen wird eine Fläche durch ein Netz von elektronischen Lichtschranken überwacht und sobald ein Infrarot-Laserstrahl durchbrochen wird, wird ein Signal an die LED-Warntafel geschickt und ein Warnsignal leuchtet auf mit einer Aufforderung zur Temporeduktion. Zum anderen werden mittels Passivinfrarot-Sensoren Bewegungen durch Messung der Temperaturdifferenz erkannt. Angaben des Produzenten zufolge werden so Warmblüter ab der Grösse eines Fuchses sicher erkannt und es leuchtet ebenfalls die LED-Warntafel auf (Abb. 23) (Calstrom GmbH, 2019).



Abb. 23: Wildwarnanlage mit Erfassungssensor und einer Handlungsanleitung für Verkehrsteilnehmer. © WLS.CH

Die holländische Firma ProWild konnte mittels Sonderalgorithmen Fehlauslösungen reduzieren und das System damit verlässlicher machen (ProWild, 2019). Des Weiteren wurde im Zuge des von der EU finanzierten und in Italien durchgeführten Projektes «Life Strade» ein kombiniertes System entwickelt, welches bei Anwesenheit eines Wildtieres den Verkehrsteilnehmer über LED-Warntafeln zur Temporeduktion auffordert und dessen Reaktion sogleich mittels Radars aufzeichnet. Reduziert der Fahrer das Tempo nicht, ertönen über einen Lautsprecher Warnrufe, welche das Tier zur Flucht bewegen sollen, (Life Strade, 2017).

In einem laufenden Projekt der Forschungsgruppe Wildtiermanagement (ZHAW) wird das neue Wildwarnsystem AniMot getestet. Ein AniMot-Modul besteht grundsätzlich aus einem Erkennungssensor, einer Auswertelektronik und einem optischen Signalgeber. Die Stromversorgung wird durch einen Akku und ein Solarmodul sichergestellt. Mittels Erkennungssensor werden Wildtiere erfasst, die sich in einer Distanz von ca. 27 Meter zur Strasse aufhalten. Der Aufnahmewinkel α beträgt circa 160 Grad (Abb. 24). Die Module werden beidseitig der Strasse an die weissen Randleitpfosten montiert. Nähert sich ein Wildtier der Strasse, wird in der Dämmerung und Nacht (<1000 Lux) ein optisches Warnsignal mit orange blinkenden LED's ausgelöst. Die Module kommunizieren im Radius von 50 Metern mit den umliegenden Einheiten, um die Verkehrsteilnehmenden frühzeitig vor der drohenden Kollisionsgefahr zu warnen. Nebst dieser primären Warnfunktion bietet AniMot die Möglichkeit aufzuzeichnen, wann eine Auslösung stattgefunden hat. Anhand dieser Funktion kann beispielsweise analysiert werden, wie viele Wildtierbewegungen um die Strasse stattfinden oder zu welcher Tages- oder Jahreszeit das Risiko einer Kollision am höchsten ist. Der Vorteil von AniMot gegenüber den vorher genannten fixen Systemen besteht darin, dass das Wildwarnsystem mobil einsetzbar ist und keine Verkabelung benötigt. So kann auf veränderte Lebensraumbedingungen wie beispielsweise einen Holzschlag oder die Ernte landwirtschaftlicher Kulturen reagiert werden. Da aber keine klare Handlungsanweisung (Aufforderung zur Temporeduktion) gegeben wird, bedarf der Einsatz der Wildwarnanlage einer gross angelegten Informationskampagne (AniMot, 2019).

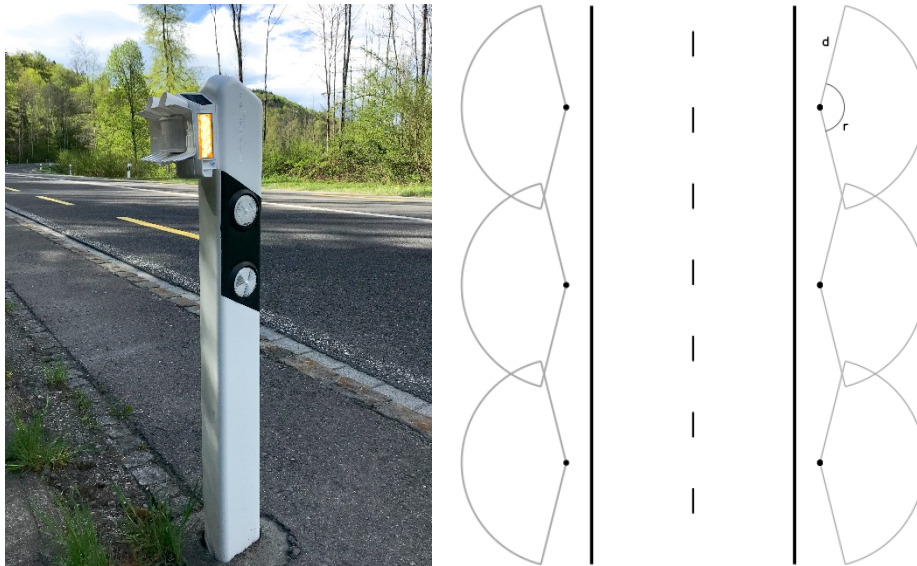


Abb. 24: Wildwarnanlage der Firma «AniMot - motion expert GmbH & Co. KG» und schematische Darstellung der Reichweite und des Erfassungswinkels. © ZHAW WILMA

4.6.4 Antikollisionssysteme in den Fahrzeugen

Zahlreiche Fahrzeughersteller haben bereits Systeme in ihren Fahrzeugen eingebaut, um Tiere im Strassenbereich zu erkennen und Unfälle zu verhindern und die Technologien werden ständig weiterentwickelt. Cadillac hat im Jahr 2000 als erstes den passiven Nachtsicht-Assistenten in einem Serien-PKW eingebaut, der es ermöglicht, Tiere auf weitere Distanz zu erkennen, ohne die entgegenkommenden Fahrer zu blenden, da das menschliche Auge Infrarotstrahlen nicht wahrnehmen kann (Arado, et al., 2019). Die aktiven Nachtsicht-Assistenten generieren aus dem reflektierten Infrarotlicht ein Schwarz-Weiss-Bild, das dann auf einen Bildschirm im Fahrzeuginnenraum projiziert wird (z.B. Audi, www.audi-technology-portal.de). Volvo, welcher bekannt ist für seine hohen Sicherheitsstandards, hat in seinem «City Safety»-Paket ein Radar eingebaut, das Gefahren erkennt und eine Kamera, welche die Gefahr identifiziert. Dank Maschinellen Lernen ist es bereits möglich, Tiere von Menschen und sogar unterschiedliche Tierarten zu unterscheiden (Abb. 25). Zusätzlich ist ein automatisches Notfallbremsssystem eingebaut, welches bezüglich Reaktionsgeschwindigkeit den Fahrzeuglenker übertrifft, (Adams, 2019). Solche Technologien sind auch beim Autonomen Fahren unabdingbar, doch scheinen dort springende Tiere wie Kängurus, welche in Australien zu unzähligen Verkehrsunfällen jährlich führen, noch Probleme zu bereiten, weil das System die Fahrbahn als Referenzpunkt verliert, (Wilkens, 2019). Tesla ist dank einer Software und einem, auf Maschinelles Lernen spezialisierten Kleincomputer bereits in der Lage, Echtzeitauswertungen der Aufnahmen zu machen, welche die in den Fahrzeugen verbauten Kameras generieren. Da dabei auch Gesichter und Nummernschilder ausgewertet werden können, bleiben aber noch offene Fragen bezüglich des Datenschutzes (Ries, 2019).

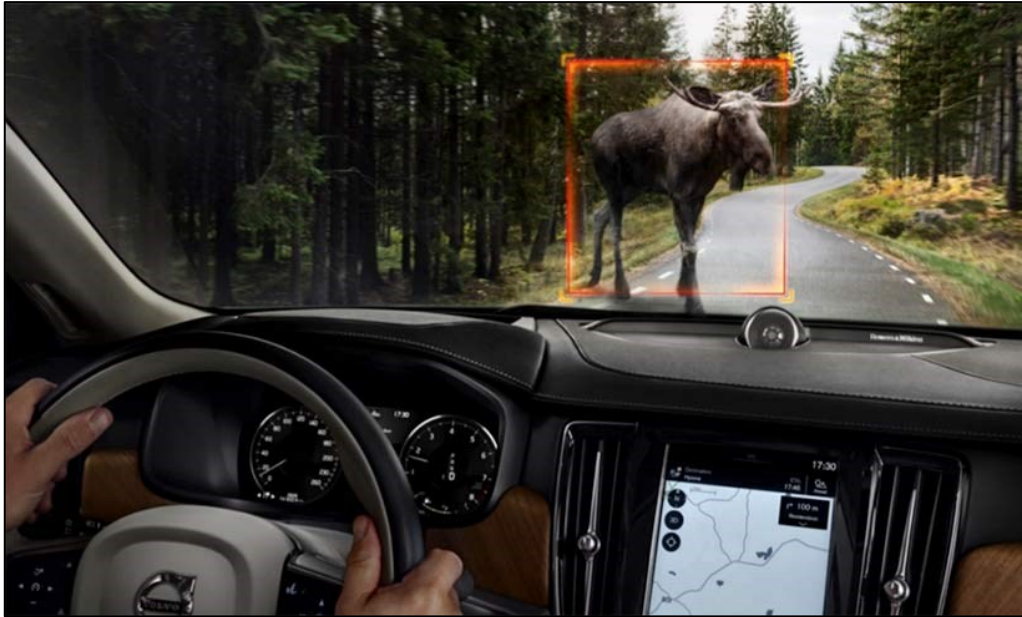


Abb. 25: Viele Fahrzeughersteller haben bereits Systeme in ihre Fahrzeuge eingebaut, um Menschen und Tiere auf der Strasse zu erkennen und Unfälle zu verhindern, und die Technologien entwickeln sich ständig weiter. © Volvo Cars

5 Diskussion

Zusammenstellung der potenziellen Einflussfaktoren

Die Zusammenstellung gibt eine Übersicht über die potenziellen Einflussfaktoren, die zu Wildtierunfällen führen können. Diese Liste ist nicht abschliessend, zeigt aber, dass sehr viele verschiedene Faktoren eine Rolle spielen. Kennt man die Bedeutung der einzelnen Faktoren, können Präventionsmassnahmen gezielter eingesetzt werden. Die Schwierigkeit ist, dass sich viele Einflussfaktoren dynamisch über die Zeit verändern und es zu Interaktionen zwischen den Faktoren kommen kann. Mit diesen Veränderungen können sich auch die Hotspots räumlich verlagern (Bíl, et al., 2019).

Fallwilddaten

Der zentrale Datensatz dieser Studie sind die Fallwilddaten der Kantone Zürich, Freiburg und Graubünden, welche über einen längeren Zeitraum GR (1994), ZH (2009) und FR (2009) digital und mit Angaben zu Tierart, Datum und Standort erfasst wurden. Für die Analysen wurden nur Huftiere berücksichtigt, da sie zum einen aufgrund ihrer Grösse zu schwerwiegenden Unfällen führen, zum anderen eine ganz andere Biologie als Raubtiere wie Fuchs oder Dachs haben. Für weiterführende Studien und insbesondere für die Erfolgskontrolle von Präventionsmassnahmen, ist eine systematische Erfassung des Fallwilds in der ganzen Schweiz erforderlich. Dabei sollten mindestens Datum, Wildtierart und Koordinaten in einer elektronischen Datenbank erfasst werden. Bei den Koordinaten ist es wichtig zu erwähnen, ob es sich um die Koordinaten des Unfallorts oder des Fundorts des verendeten Tiers handelt. Zusätzliche Informationen wie Geschlecht und Alter des verunfallten Tiers, sowie die genaue Uhrzeit, bei der sich der Unfall ereignete, sind weitere wichtige Parameter. Für die Analyse der Einflussfaktoren sind die Position des Unfallorts und deren Genauigkeit entscheidend. Je nach Kanton werden die Daten von unterschiedlichen Personen (Polizei, Wildhut und Jagdgesellschaften) erfasst. Wichtig ist, dass dieselbe Datenbank verwendet wird oder dass ein regelmässiger Austausch stattfindet und die Daten nachgeführt werden. In Deutschland «Tierfund Kataster» und Österreich «Road Kill» wird Fallwild auch mit Citizen-Science Projekten erfasst. Der Vorteil offener Plattform ist, dass auch kleine, nicht jagdbare Tierarten erfasst werden.

Verfügbare Grundlagendaten

Für die drei Kantone wären durchaus weitere Datensätze zu natürlicher und künstlicher Umwelt verfügbar gewesen. Der Schweizer Föderalismus prägt allerdings auch die Geodatenlandschaft. Viele Geodatenätze welche im Rahmen dieser Studie interessant gewesen wären, lagen zwar für einen der Testkantone ZH, FR oder GR vor, jedoch nicht für die anderen, geschweige denn für die ganze Schweiz. Ein solches Beispiel wäre «Strassenbeleuchtung», welche nur für den Kanton ZH verfügbar war. Es wurden jedoch für die Analyse und die Modellierung dann nur Geodatenätze verwendet, welche für die ganze Schweiz verfügbar sind. Damit wurde sichergestellt, dass die angestrebte Modellierung der Wildtierunfälle auch wirklich über die ganze Schweiz gemacht werden kann. Trotz dieser limitierten Datengrundlagen konnten Modelle mit verhältnismässig hohen Sensitivitäten und Spezifitäten erstellt werden.

Im direkten Vergleich mit Seiler, et al. (2016) konnte die vorliegende Studie sehr viele allgemeine Einflussfaktoren mit auch in der Schweiz verfügbaren Geodaten eins-zu-eins nachbilden. Dies reicht von Attributparametern (Geschwindigkeit/ SPEED) über Formparameter (Sinuosität/ CURVATURE) und Distanzparameter (Distanz_Wald/ DIST_FOREST) über eine Vielzahl von zonalen Parametern (Äsungsfläche/ PASTURE) bis hin zu komplexen Parametern (Leitstrukturen/ LEAD_STRUCT). Gleiches gilt für Bíl, et al. (2019), welche auch sehr ähnliche Parameter verwenden (z.B. Distance to forest, Forest area, oder Depression ähnlich zu Leitstrukturen_DHM). In Abhängigkeit von lokalen Besonderheiten oder auch der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Geodaten geschuldet haben alle Studien je einige exklusive Parameter untersucht (z.B. Shannon-Wiener Diversity Index in Seiler, et al. (2016), oder Leitstrukturen ausgeleitet aus dem Geländemodell, Leitstrukturen_DTM) oder ähnliche Konzepte anders operationalisiert.

Gleichwohl kann festgehalten werden, dass die vorliegende Studie von einer sehr umfassenden und sowohl räumlich wie auch semantisch sehr detaillierten, da systematischen Geodatenbasis in der Schweiz profitieren konnte. Z. B. verwendete Seiler, et al. (2016) zur Angabe von VERGE (zu Deutsch etwa «Seitenstreifen») eine binäre qualitative Schätzung aus Luftbildern/Google Street View (mit absent = grass, open vs. present = shrubs, trees). Die vorliegende Studie konnte hingegen einen zonalen Parameter Vegetationshöhe_50m operationalisieren und quantifizieren, basierend auf dem LiDAR-basierten Vegetationshöhenindex der WSL mit einer räumlichen Auflösung von 1 m. Während in Seiler, et al. (2016) und in Bíl et al. (2019) rund die Hälfte der untersuchten Parameter kategorial waren, hat die vorliegenden Studie ausschliesslich numerische Parameter verwendet, welche in der Regel eine höhere Informationsdichte aufweisen dürften.

Segmentierung und Ausscheidung der Hotspots

Der in dieser Studie verwendete Ansatz zur datengetriebenen Segmentierung mit Kernel Density Estimation KDE ist einfacher als etwa der in Bíl et al. (2013, 2016, 2019) vorgeschlagene und auch in Seiler, et al. (2016) verwendete Ansatz KDE+. KDE+ verwendet einen eindimensionalen Raum entlang von Segmenten (vergleichbar einem Netzwerk-DKE) anstatt einer 2-dimensionalen, planaren Dichteverteilung wie im herkömmlichen KDE-Verfahren. KDE+ verwendet ausserdem Monte Carlo Simulation von zufälligen Punktverteilungen auf den Segmenten, um die aussagekräftigsten Hotspots zu identifizieren. Im Rahmen dieses Projekts wurde aber aus zwei Gründen auf die Verwendung von komplexen KDE-Verfahren verzichtet. Zum einen erwiesen sich netzwerk-basierte KDE-Verfahren in einer ersten Testserie als rechenintensiv und daher sehr kostspielig, was ein effizientes Arbeiten erschwerte. Ausserdem, und dies ist der wichtigere Grund, konnten mit der einfachen verwendeten KDE Variante bereits sehr trennscharfe Hotspots identifiziert werden, welche auch mit den Resultaten der aufwändigen Feldaufnahmen der spezifischen Einflussfaktoren sehr gut plausibilisiert werden konnten.

Parameter für die statistische Modellierung

Die Parameter, die unabhängig von Modell und Region signifikant verschieden sind zwischen Orten, wo sich Wildtierunfälle ereignen (Hotspots) und Orten, wo sich keine Wildtierunfälle ereignen (Non-Hotspots), waren Sinuosität, Äsungsfläche_100m und Strassenlärm_50m. Die Sinuosität ist ein Mass für die "Kurvigkeit" eines Strassenabschnitts. Je kurviger eine Strasse ist, desto grösser ist das Risiko für Wildtierunfälle. Dies kann damit erklärt werden, dass bei einem kurvigen Verlauf der Strasse sowohl Fahrzeuglenker wie auch Wildtier eine potenzielle Gefahr später erkennen im Vergleich zur Situation auf einer geraden Strasse. Das frühzeitige Erkennen von Gefahren ist entscheidend für die Verhinderung von Unfällen.

Äsungsflächen, niedrige Vegetation <1m umgeben von hoher Vegetation, wie wir sie entlang von Waldrändern, Leitstrukturen (Hecken, Baumgruppen, Ufergehölzen) oder Lichtungen finden sind für Huftiere attraktive Gebiete da sie sowohl Nahrung wie auch Deckung finden. Befinden sich Äsungsflächen in der Nähe von Verkehrsinfrastrukturen, halten sich die Wildtiere nahe am Gefahrenbereich auf oder durchqueren diesen sogar. Es ist nachvollziehbar, dass dies das Risiko für Wildtierunfälle erhöht. Auch in vergleichbaren Studien in Schweden und Tschechien scheinen die Äsungsflächen ein wichtiger Einflussfaktor im Zusammenhang mit Wildtierunfällen zu sein (Seiler, et al., 2016; Bíl, et al., 2019). Bei einer Studie in Spanien scheint die Äsung kein wichtiger Einflussfaktor zu sein, was mit der dort untersuchten Haupttierart, dem Wildschwein erklärt werden kann (Seiler, et al., 2016). Wildschweine suchen zwar auch Nahrung auf Weiden oder Wiesen, sind jedoch nicht an der eigentlichen Äsung interessiert, sondern an Wirbellosen, die sich im Boden befinden.

Der Strassenlärm ist abhängig von der Geschwindigkeit und dem Verkehrsaufkommen, welche wiederum zwei wichtige Faktoren sind, die das Unfallrisiko beeinflussen (Seiler, et al., 2016). Nimmt die Geschwindigkeit zu, dann verringert sich die Zeit zwischen der Erfassung einer Gefahr und dem potenziellen Zusammenstoss zwischen Fahrzeug und Wildtier. Mit der Geschwindigkeit steigen zudem der Bremsweg und die Aufprallenergie.

Durchschnittliches Tägliches Verkehrsaufkommen (DTV) und Geschwindigkeit wurden aufgrund fehlender Signifikanz in den ersten Analysen ausgeschlossen. Die fehlende Signifikanz kann damit erklärt werden, dass sowohl die Hotspots wie auch Non-Hotspots auf Hauptstrassen liegen, daher eine ähnliche Geschwindigkeit aufweisen, und zusätzlich die Auflösung des Datensatzes aufgrund der punktuellen Messungen für unsere Analysen nicht ausreicht. Auch beim Verkehrsaufkommen ist das Messnetz möglicherweise nicht dicht genug, um den Einfluss dieses Faktors nachzuweisen. Alternativ könnte die sogenannte "deadly trap hypothesis", die eine erhöhte Fallwildzahl bei mittlerem Verkehrsaufkommen voraussagt erklären, warum kein Zusammenhang zwischen Verkehrsaufkommen und Risiko für Wildtierunfälle gefunden wurde (Luell, et al., 2003).

Vergleiche zwischen den Modellen im Mittelland und in den Alpen. Beim Vergleich von KER Mittelland und KER Alpen fällt auf, dass gewisse in der einen Region wichtige Parameter in der anderen fehlen. Z.B. taucht Distanz_Siedlung nur im KER Mittelland auf, nicht aber in den Alpen. Dies kann so erklärt werden, dass der Alpenraum viel weniger dicht besiedelt ist und daher die Distanz zur nächsten Siedlung viel weniger relevant ist. Gerade umgekehrt verhält es sich mit dem Parameter Distanz_Gewässer, welcher in KER Alpen relativ weit oben in der Rangliste auftaucht, in KER Mittelland dagegen nicht signifikant ist. Auch hier erklärt sich dieser Unterschied über die räumliche Verteilung der Gewässerläufe im Mittelland gegenüber den Alpen. Im Mittelland mit deutlich weniger Topographie sind die Gewässerläufe und das Gewässernetz eng verwoben. In den Alpen hingegen hat es schon mal viel weniger Strassen und diese sind fast überall in den Talböden konzentriert, wodurch Gewässerläufe und Strassen eher entflechtet sind. Im Mittelland sind Strassen damit fast ubiquitär, wodurch Nähe zur Strasse ein Strassensegment viel weniger auszeichnen kann als in den Alpen.

Es ist wichtig festzuhalten, dass die Strassenkategorie in den RML-Modellen mit der Sinuosität mit zu den wichtigsten erklärenden Parametern gehört. Dies mag wenig überraschen, denn über die Strassenkategorie bestimmen sich viele für Wildtierunfälle relevante Parameter wie Verkehrsaufkommen oder Geschwindigkeit. Es kann weiter davon ausgegangen werden, dass Strassenkategorie auch ein wichtiger Parameter wäre in den Modellen KER und KWR, wenn der Parameter dort nicht zur Definition der Non-Hotspots verwendet worden wäre. Zwar hätte man dieses Kriterium zur Definition der Non-Hotspots weglassen können. Allerdings wären so viele Hauptstrassen mit Nebenstrassen verglichen worden, wodurch ein zwar sehr signifikanter aber eben gleichwohl nichtssagender Parameter geschaffen worden wäre.

Wie gut sind die Modelle?

Alle Modelle ermöglichen die Unterscheidung zwischen Hotspot- und Non-Hotspot-Segmenten. In allen Fällen sind die Modelle effektiver bei der Identifizierung von Hotspot-Segmenten als von Non-Hotspot-Segmenten. In der Region Mittelland und in der Alpenregion ist die Leistung von Modell KER am besten. Die Ergebnisse in Bezug auf die Modellleistung sind vergleichbar mit gemischten Modellen in Seiler, et al. 2016. Bei einer Fehlklassifizierung von 20% für die Region Mittelland und 27% für die Bergregion sowie einem Pseudo Bestimmtheitsmass von 26% bzw. 29% ist jedoch offensichtlich, dass es noch andere Einflussfaktoren gibt, die im Model bisher nicht enthalten sind. Im Wald und im Bereich von Leitstrukturen wie der Uferbereich von Fliessgewässern, Hecken oder Feldgehölze decken die Modelle die Realität gut ab. Lücken gibt es auf Strassenabschnitten die beidseitig landwirtschaftlichen Kulturen aufweisen. Unfallhotspots werden in den Modellen oft nicht erkannt. Grund ist zum einen die Fruchtfolge, also die Abfolge unterschiedlicher Kulturen in der Vegetationsperiode und im Jahresverlauf. Zum anderen die fehlende Datenverfügbarkeit der aktuellen Kultur auf der Ackerfläche (Mais, Raps, Weizen, Kunstwiese usw.). Je nach Kultur und dessen Stadium können sich potenziell wichtige Faktoren wie Nahrungsverfügbarkeit, Deckung und Übersichtlichkeit im Feld von Jahr zu Jahr und im Verlaufe der Saison stark verändern. In verschiedenen Kantonen sind Erhebungen zu landwirtschaftlichen Grundlagedaten geplant oder laufen bereits. Mit dem Einbezug parzellenscharfer Flächendaten, würden die Modelle auch im Landwirtschaftsgebiet an Aussagekraft gewinnen.

Saisonalität und Tageszeit

Ende März und Anfangs April erhöhen sich die Kollisionen mit Rehen, weil dann die Rehe territorial werden, ihre Reviere aufsuchen und jüngere Tiere verdrängt werden und abwandern müssen. Beim Rothirsch ist Anfangs und Ende Winter die Zeit mit den meisten Unfällen. Dies kann dadurch erklärt werden, dass Rothirsche zu diesen Zeitpunkten zwischen Sommer- und Wintereinständen wechseln und dadurch oft Strassen queren. Generell gibt es im Winter mehr Unfälle mit Rothirschen als im Sommer, weil sie sich im Winter oft in tieferen Lagen und damit in der Nähe von Strassen aufhalten. Am meisten Unfälle mit Wildschweinen gibt es im Herbst. Mehrere Faktoren können diese starke Zunahme erklären. Zum einen gibt es im Herbst am meisten Tiere, zum anderen werden sie durch die Jagd in dieser Jahreszeit mehr bewegt. Zusätzlich führen Rauschzeit und abgeerntete Felder Ende Herbst und Anfangs Winter dazu, dass sich die Tiere mehr bewegen und damit auch das Risiko für Unfälle steigt. Auch beim Fuchs zeigen sich erhöhte Unfallzahlen während der Paarungszeit (Ranzzeit), weil die Füchse dann besonders viel unterwegs sind. Bei Fuchs und Dachs steigen die Unfallzahlen von Frühling bis Mitte Sommer stark an. Dies weil es mit dem Nachwuchs einfach zahlenmässig mehr Tiere gibt und die Jungtiere unerfahren sind und damit leichter dem Verkehr zum Opfer fallen. Wildtierunfälle ereignen sich oft in der Dämmerung und nachts, weil dann die meisten Wildtiere am aktivsten sind. Die Dämmerung ist besonders gefährlich, da viele Wildtiere aus der Deckung treten, um im Offenen Nahrung zu suchen. Je nach Jahreszeit steigt das Verkehrsaufkommen mit dem Arbeits- und Pendlerverkehr genau zur Dämmerungszeit. Dies führt dann zur ungünstigen Kombination von besonders aktiven Wildtieren, die Strassen queren, und hohem Verkehrsaufkommen.

Lokale Einflussfaktoren

Die im Feld erhobenen Parameter zu Grünstreifen und Sichtweite unterscheiden sich nicht zwischen Hotspots und Kontrollsegmenten. Ein Problem bei der Erhebung und der Analyse dieser Daten bestand darin, dass in den verfügbaren Fallwilddaten keine Informationen zur Fahrtrichtung des Fahrzeuges und zur Querungsrichtung des Wildtiers bei den jeweiligen Unfällen dokumentiert sind. Deshalb wurden beide Strassenseiten unabhängig voneinander getestet mit der Annahme, dass ein Wildtier auf der Seite der Fahrtrichtung auf die Fahrbahn gelangte. Die Anzahl Hinweise auf Wildtiere wie Wildwechsel, Lager, Losung, Verbiss, Schälungen, Suhlen und Mahlbäume unterscheiden sich signifikant zwischen Hotspots und Kontrollsegmenten. Auch wenn nur die Anzahl Wildwechsel verglichen wurde, dann waren die Unterschiede zwischen Hotspot und angrenzenden Kontrollsegmenten hoch signifikant. Mit diesem Befund kann in Zukunft auf einem längeren potenziellen gefährdeten Strassenabschnitt mit einer Begehung der Hotspot der Bereich für Präventionsmassnahmen mit wenig Aufwand eingegrenzt werden. Tierarten wie Rothirsch und Wildschwein begehen oft traditionelle Wechsel, die über viele Generation genutzt werden. Die Hälfte der akustischen Wildwarner, die im Feld auf Ihre Funktion hin getestet wurden, haben nicht funktioniert. Das zeigt, dass in der Praxis der Unterhalt gut geplant und die Zuständigkeiten klar sein müssen, damit mögliche Präventionsmassnahmen auch wirkungsvoll umgesetzt werden.

Präventionsmethoden

Weltweit wird eine Vielfalt von Massnahmen angewendet, um das Risiko für Wildtierunfälle zu senken (Danielson, et al., 1998; Putman, et al., 2004; Mosler-Berger, 2011). Die unmittelbare und langfristige Wirksamkeit dieser Massnahmen ist schwierig zu messen, denn viele Studien scheiterten an geringen Unfallzahlen während des beschränkten Untersuchungszeitraums (Putman, et al., 2004; Sielecki, 2001).

Zäune können die Anzahl Wildtierunfälle mindern (Clevenger, et al., 2001; Ignatavicius, et al., 2011), dürfen jedoch nur in Kombination mit Grünbrücken, Unterführungen und anderen Querungshilfen zum Einsatz kommen (Suter, et al., 2012). Ohne solche Zusatzmassnahmen verhindern Zäune den Austausch zwischen Populationen, tragen zu einer erhöhten Fragmentierung bei und können damit langfristig zum Aussterben von Populationen führen (Holzgang, et al., 2005; Di Giulio, et al., 2008).

Mit optischen, akustischen sowie olfaktorischen Reizen wird versucht auf das Verhalten der Wildtiere an der Strasse einzuwirken. Die Wildtiere sollen dabei vor der Gefahr an Strassen gewarnt werden. Die erbrachten Hinweise lassen jedoch an der langfristigen Wirksamkeit dieser Massnahmen zweifeln. Reflektoren unterschiedlicher Farbe zeigten keine Wirkung auf das Verhalten von Huftieren (D'Angelo, et al., 2006; Benten, et al., 2018; Brieger, et al., 2016). Andere Studien wiesen jedoch eine Reduktion der Wildunfallzahlen nach dem Einsatz von Reflektoren nach (Gulen, et al., 2006) (Reduktion der Unfallzahlen mit Hirschartigen um 19 %). Ein Rückgang an Unfällen ist jedoch nicht zwangsweise auf die Reflektoren zurückzuführen (Benten, et al., 2018; Brieger, et al., 2016). Möglicherweise haben die Reflektoren aber eine positive Wirkung auf die Aufmerksamkeit der Fahrer (Rowden, et al., 2008). Olfaktorische Abschreckung (mit Mota FL und Wolfsurin) zeigte bei Reh und Rothirsch nicht die gewünschte Veränderung des Verhaltens (Elmeros, et al., 2011). Die Autoren vermuten eine rasche Gewöhnung sowie das Fehlen einer Sensitivität gegenüber dem Geruch von Raubtieren. An unspezifische und regelmässig angewendete akustische Warnsignale dürften sich Wildhuftiere relativ rasch gewöhnen (Ujvári, et al., 2004). Optimierungspotenzial besteht hingegen bei der Art der verwendeten Warnsignale und der Auslösung dieser Signale (Noro, et al., 2012). Die Verwendung von intelligenten, bioakustischen Wildwarnern, die nur warnen, wenn auch eine Gefahr besteht, das heisst ein Fahrzeug sich nähert und sich Wildtiere in der Nähe der Fahrbahn aufhalten, könnte in Zukunft das Problem der Gewöhnung lösen.

Schon seit Jahrzehnten wird versucht, die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer mit Tafeln "Achtung Wildwechsel" (Abbildung Titelseite) auf Gefahrenabschnitten zu erhöhen. Da sich jedoch meistens keine Wildtiere im Gefahrenbereich aufhalten, verlieren solche permanent sichtbaren Signale bald ihre Wirkung bei den Verkehrsteilnehmern (Mosler-Berger, 2011). Eine relativ gute Wirksamkeit versprechen dagegen Wildwarnanlagen, die erkennen, sobald Tiere sich in der Nähe der Strasse aufhalten und in der Folge ein LED-Wildwarnsignal und / oder ein Signal zur Temporeduktion aufleuchten lassen (Kistler, 1998; Strein, et al., 2008; Huijser, et al., 2010). Diese Massnahme ist jedoch nur punktuell einsetzbar, zum Beispiel im Bereich eines natürlichen oder erzwungenen Wildwechsels. Mit verbesserter Erfassung der Wildtieraktivität entlang von Strassen (Viani, et al., 2013; Viani, et al., 2014; ProWild, 2019) könnte die Wirksamkeit solcher Anlagen noch gesteigert werden.

Die rasante technische Entwicklung, insbesondere Technologien für das autonome Fahren, wird in Zukunft intelligente Fahrzeuge mit ausgeklügelten Antikollisionssystemen hervorbringen. Solche Systeme sind zwar heute schon Realität und werden zukünftig jedoch noch schneller und umfassender die Fahrzeugumgebung nach potenziellen Gefahren absuchen, diese evaluieren und entsprechend schneller als jeder Fahrzeugenker das kann mögliche Kollisionen zu vermeiden versuchen.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlung

Jedes Jahr kommen auf Schweizer Verkehrsinfrastrukturen rund 10'000 grössere Wildtiere wie Rehe, Rothirsche, Gämsen und Wildschweine um. Wildtierunfälle verursachen jährlich Sachschäden in Millionenhöhe und können in schweren Fällen auch zu Personenschäden und Verkehrstoten führen. Durch die aktuelle Ausbreitung von Rothirsch und Wildschwein und dem damit verbundenen Populationswachstum sowie durch das stetig steigende Verkehrsaufkommen wird sich das Risiko für Wildtierunfälle in Zukunft weiter erhöhen.

Der vorliegende Bericht zeigt eindrücklich, wie komplex das System Wildtier-Verkehr-Umwelt ist. Die Zusammenhänge sind vielschichtig, beeinflussen einander teilweise gegenseitig und können sich sowohl tages- und jahreszeitlich als auch längerfristig verändern. Dies erklärt die räumliche Dynamik von Hotspots. Je besser man das System versteht und Hotspots bzw. ihre Ursachen abgrenzen kann, desto gezielter können Präventionsmassnahmen eingesetzt werden. Nachfolgend werden die einzelnen Arbeitsschritte des gewählten Ansatzes zur Erkennung der Hotspots und ihrer Ursachen nochmals aufgegriffen und mögliches Verbesserungspotential aufgezeigt.

Potenzielle Einflussfaktoren

Diverse der identifizierten potenziellen Einflussfaktoren, wie beispielsweise solche die auf der Biologie und Ökologie unserer Wildtiere basieren, können bzw. müssen als gegeben betrachtet werden. Andere hingegen, insbesondere in den Bereichen Infrastruktur und Fahrzeugentwicklung der Kategorie Verkehr erfahren Neuerungen und Verbesserungen. Eine regelmässige Aufarbeitung dieser veränderlichen Einflussfaktoren erscheint empfehlenswert, da sie einen entscheidenden Einfluss auf das System Wildtier-Verkehr-Umwelt haben und allenfalls dabei helfen können Hotspots zu reduzieren.

Datengrundlage

Die in der Schweiz verfügbare Datengrundlage ist generell gut. Basis-Geodaten werden systematisch erhoben und zur Verfügung gestellt. Weiterführende Geodaten sind jedoch häufig lediglich für einzelne Kantone verfügbar. Potential besteht bei der schweizweiten systematischen Erfassung des Fallwilds. Optimal wäre der Aufbau einer elektronischen Datenbank mit den Minimal-Angaben von Datum, Zeit, Wildtierart und Koordinaten des Unfallorts. Weitere Angaben wie Geschlecht und Alter des Tiers wären wünschenswert. Ein einheitliches, klar geregeltes Vorgehen bei der Erfassung dieser Angaben ist wichtig, um die Vergleichbarkeit der Daten über die Kantone bzw. Erfasser hinweg zu gewährleisten. Die Erfassung von Fallwild via Citizen-Science-Plattform wäre ein zusätzlicher Ansatz. Bei gewissen Schweizer Online-Plattformen zur Erfassung von Wildtierarten, besteht bereits die Möglichkeit, Totfunde als Unfallopfer des Strassenverkehrs einzutragen. Wie oft, bzw. zuverlässig diese Funktion jedoch genutzt wird, ist nicht bekannt. Zusammenfassend ist zum Thema der Datengrundlage zu sagen, dass die schweizweite, systematische Erfassung gewisser Parameter voraussichtlich die Qualität der Modellierung verbessern könnte. Es muss aber auch vermerkt werden, dass trotz den aufgezeigten Datendefiziten bereits Modelle mit guten Sensitivitäten und Spezifitäten erstellt werden konnten.

Segmentierung, Operationalisierung und Modellierung

Der in dieser Studie verwendete Ansatz zur datengetriebenen Segmentierung mit Kernel Density Estimation KDE ist einfacher als etwa der, in vergleichbaren Studien verwendete Ansatz KDE+. Die verwendete KDE Variante identifizierte Hotspots, welche mithilfe der spezifischen, lokalen Einflussfaktoren sehr gut plausibilisiert werden konnten, ist zudem weniger rechenintensiv als KDE+ und erlaubt effizienteres Arbeiten. Die Verwendung eines einfacheren Ansatzes zur Segmentierung des Verkehrsnetzes konnte somit qualitativ, aber auch ökonomisch gerechtfertigt werden. Die Parameter, welche für die Modellierung operationalisiert wurden, basierten einerseits auf Erkenntnissen vorhandener Studien, andererseits auf Expertenwissen des Projektteams, wobei auch die Geodatenverfügbarkeit in der Schweiz berücksichtigt wurde. Die zur Operationalisierung verwendeten Ansätze orientieren sich an der vorhandenen Literatur sowie, wenn keine derartigen Grundlagen

vorlagen, eigenen Modellierungsansätzen. Die Zielsetzung der Modellierung war die Identifikation der signifikanten Variablen (hier die räumlichen Parameter) für die Vorhersage von Hotspots bzw. Non-Hotspots. Aufgrund der Unterschiede zwischen Bergregion und Mittelland wurden separate Modelle für die Alpenregion und das Mittelland der Schweiz entwickelt. Schlussendlich wurden die drei besten unterschiedlichen Modellierungsansätze auf das gesamte Strassennetz der Schweiz angewendet. Das Resultat dieses Arbeitsschritts ist ein, auf die Schweiz und ihre Wildtiere abgestimmter Katalog an relevanten Parametern des Wildtier-Verkehr-Umwelt-Systems, als auch drei, den aktuellen statistischen Methoden entsprechenden Modelle, die zwischen Mittelland und Alpenraum differenzieren. Das Endresultat, eine interaktive Webkarte zeigt die Wildtierunfall Hotspots auf dem Schweizer Strassennetz auf und kann als Grundlage für weiterführende Studien und natürlich auch für zielgerichtete Präventionsmassnahmen konsultiert werden. Die Webkarte basiert auf Literatur, Expertenwissen und methodischen Ansätzen, die dem aktuellen Stand des Wissens entsprechen. Bei einer zukünftigen Aufdatierung der Karte sind neue Erkenntnisse und methodische Fortschritte zu berücksichtigen und allenfalls in die hier beschriebene Methode zu integrieren.

Präventionsmassnahmen

Grundsätzlich bestehen vier Möglichkeiten zur Prävention von Wildtierunfällen: (1) Trennung des Lebensraums der Wildtiere von der Verkehrsinfrastruktur, (2) Warnung der Wildtiere vor Fahrzeugen, (3) Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Wildtieren in Strassennähe und (4) technische Lösungen in Fahrzeugen. Obschon Zäune (1) sehr effektiv sind, um Kollisionen zu reduzieren, muss beachtet werden, dass sie die Vernetzung der Wildtierhabitate beeinträchtigen. Ihre Verwendung kann deshalb nur in Kombination mit Wildtierpassagen empfohlen werden. Abschreckungssysteme, die auf Wildtiere einwirken (2), können kurzfristig die Fallwildzahlen senken. Bislang konnte ihre Wirksamkeit noch in keine Langzeitstudie belegt werden, was darauf hindeutet, dass sich die Wildtiere an die Abschreckungssysteme gewöhnen. Wildwarnsysteme, welche die Verkehrsteilnehmer bei Gefahr aktiv warnen (3), können Kollisionen reduzieren. Antikollisionssysteme in Fahrzeugen (4) werden laufend weiterentwickelt. Sie werden voraussichtlich in Zukunft auch dazu beitragen, die Anzahl Wildunfälle zu reduzieren.

Erkenntnisse

Die vorliegende Studie hat mittels Fallwildauswertung und statistischen Modellierungen aufgezeigt wann und wo Wildtierunfälle sich häufen. Es können nun Strassenabschnitte mit hohem Risiko für Wildtierunfälle auch in Gebieten, in denen keine oder nur unvollständige Informationen zu Wildtierunfällen vorliegen, identifiziert werden. Mit einer zusätzlichen Begehung vor Ort können die lokalen Wildwechsel erfasst und damit der Bereich für die Anwendung von Präventionsmethoden genau bestimmt und zur Verfügung stehende Ressourcen effizient eingesetzt werden. Forschungsbedarf besteht in der vertieften Analyse der Situationen, in denen sich Unfälle ereignen. Diese Analysen sollten auf den relevanten räumlichen Ebenen geschehen und auch den Faktor Zeit sowie die zum Unfallzeitpunkt vorherrschenden Umwelteinflüsse berücksichtigen. Wichtig ist, dabei artspezifisch vorzugehen, denn je nach Tierart empfehlen sich andere Massnahmen zur Unfallprävention. Eine zielgerichtete und optimale Wahl der Präventionsmassnahme kann also nur erfolgen, wenn bekannt ist, welche Tierart(en) von den Unfällen betroffen sind. Die tabellarische Methoden-Übersicht (*Anhang 5*), und die Empfehlungen zur Ausgestaltung von Zäunen (*Tab. 9*) bieten Hand, bei der Wahl von Präventionsmethoden. Werden Strassenabschnitte neu mit Präventionsmethoden ausgestattet, empfiehlt sich eine wissenschaftliche Begleitung bzw. Auswertung der Fallwildentwicklung. Solche zukünftigen Studien zur Wirksamkeit von Präventionsmethoden sollten einen Vergleich der verunfallten Tiere im Verhältnis zu den erfolgreichen Wildtierquerungen über die Verkehrsinfrastruktur anstreben. Eine reine Reduktion der Fallwildzahlen ist noch kein Beweis für die Wirksamkeit einer Präventionsmethode, weil auch andere Faktoren, wie zum Beispiel die Reduktion der Wildtierbestände oder Änderungen in der Umgebung des Unfallhotspots zu einer Reduktion der Wildtierunfälle führen könnten.

Ausblick

Was anhand der vorliegenden Studie wiederholt aufgezeigt werden konnte, ist, dass Wildtierunfällen ein komplexes, Interaktionen beinhaltendes und dynamisches System zugrunde liegt. Veränderungen, wie beispielsweise der Bau neuer Verkehrsachsen oder die Ausbreitung vom Rothirsch ins Mittelland, werden die zukünftige Lage der Hotspots beeinflussen. Die aus dieser Studie hervorgehende interaktive Webkarte bildet eine solide, aktuelle Grundlage. Das zugrunde liegende System ist jedoch sehr dynamisch und komplex. Aufgrund von Veränderungen unserer Wildtierbestände und des Strassennetzes können sich aktuelle Hotspots in Zukunft entschärfen, während andernorts neue Hotspots entstehen. Die Datengrundlage und die methodischen Möglichkeiten von Modellierungen werden sich weiterentwickeln und die Autoindustrie bringt laufend Innovationen zur Verbesserung der Fahrsicherheit auf den Markt. Aus diesem Grund wird eine Neubeurteilung bzw. Aufarbeitung der Situation gemäss dem vorliegenden Ansatz als Ausgangspunkt in Zeitintervallen von 5 bis 8 Jahren empfohlen.

Anhänge

I	Anhang I	72
I.1	Geodatenverarbeitungswerkzeuge der Datenvorverarbeitung	72
II	Anhang II	74
II.1	Leitstrukturen	74
III	Anhang III	75
III.1	Sichtbarkeit	75
IV	Anhang IV	76
IV.1	Zusammenstellung der potenziellen Einflussfaktoren	76
V	Anhang V	77
V.1	Übersicht Präventionsmethoden	77

I Anhang I

I.1 Geodatenverarbeitungswerkzeuge der Datenvorverarbeitung

Im Folgenden werden wichtige Tools, die zur räumlichen Modellierung entwickelt wurden, detaillierter beschreiben. In Klammern ist jeweils der entsprechende ArcGIS Befehl angegeben.

🔧 Toolbox: «Reg.Segmentation»

Die regelmässige Segmentierung umfasst die folgenden Geodatenverarbeitungs-Schritte

- 1) Schnittpunkte im Abstand von 200 m entlang des vorprozessierten Strassennetzes verteilen (arcpy.GeneratePointsAlongLines).
- 2) Strassenlinien an Schnittpunkten unterteilen (arcpy.SplitLinesAtPoint),
- 3) Strassensegmente <100 m Länge entfernen.

🔧 Toolbox: «KDE Segmentation»

Die Einzelschritte dieses Ansatzes lauten wie folgt:

- 1) Pro Kanton
 - a) Dichteverteilung mittels KDE berechnen (arcpy.KernelDensity) mit einer Zellgrösse von 5m und einem Suchradius von 100 bzw. 200m «eng» und «weit»
 - b) Schwellwert bestimmen: 95. bzw. 90. («eng» und «weit») Perzentile der Rasterzellenwerte (numpy.percentile)
 - c) Rasterdatensatz klassifizieren: Alle Rasterzellen > Schwellenwert sind Hotspot gebiete (arcpy.Reclassify)
 - d) Hotspot Rasterzellen in Polygon konvertieren (arcpy.RasterToPolygon)
- 2) Alle Polygone zusammenführen (arcpy.Merge_management)
- 3) Anzahl Unfälle pro Polygon-Hotspot berechnen (arcpy.SpatialJoin)
- 4) Hotspot-Polygone mit weniger als 5 Unfällen entfernen (arcpy.SelectLayerByAttribute)
- 5) Hotspot-Polygone mit Strassennetz verschneiden (arcpy.Clip)
- 6) Anzahl Unfälle pro Strassensegment berechnen (arcpy.SpatialJoin)
- 7) Strassensegmente mit weniger als 4 Unfällen entfernen (arcpy.SelectLayerByAttribute)
- 8) Alle Strassensegmente innerhalb eines Hotspot-Polygons verschmelzen (arcpy.Dissolve)
- 9) Dominierenden Strassentyp pro Hotspot bestimmen (auf der Basis der Länge)

🔧 Toolbox: «Get Control Segment»

Um dies zu erreichen wurden folgende Schritte ausgeführt:

- 1) Area of Interest pro Hotspot festlegen:
 - a) Maximalabstand pro Hotspot festlegen (arcpy.Buffer)
 - b) Minimalabstand pro Hotspot festlegen (arcpy.Buffer)
 - c) Minimalabstand stanzt ein Loch in Maximalabstand (arcpy.Erase). Ergibt Ringe / Donut-Formen
- 2) Strassennetz mit «Area of Interest» verschneiden (arcpy.Intersect)
- 3) Filtern: Verschnitte, wo der Strassentyp mit dem gesuchten Strassentyp (aus «Area of Interets») übereinstimmt (arcpy.SelectLayerByAttribute)
- 4) Punkte an den gefilterten Strassensegmenten verteilen (im gleichen Abstand, wie der ursprüngliche Hotspot, arcpy.GeneratePointsAlongLines)
- 5) Strassen an Punkten verschneiden (arcpy.SplitLineAtPoint)

🔧 Toolbox: «Pot.Grazing.Sites»

Um die potentielle Äsungsfläche wurde wie folgt vorgegangen:

- 1) Vegetationshöhenindex einteilen in Vegetationslos (0m), niedrige Vegetation (<1m), hohe Vegetation (>1m) (arcpy.Reclassify):
- 2) Anteil hohe Vegetation innerhalb von 200m pro Zelle bestimmen (arcpy.FocalStatistics)
- 3) Potentielle Äsungsfläche: Alle Zellen, wo die Vegetation niedrig ist (0 – 1m) und Anteil hohe Vegetation > 30%

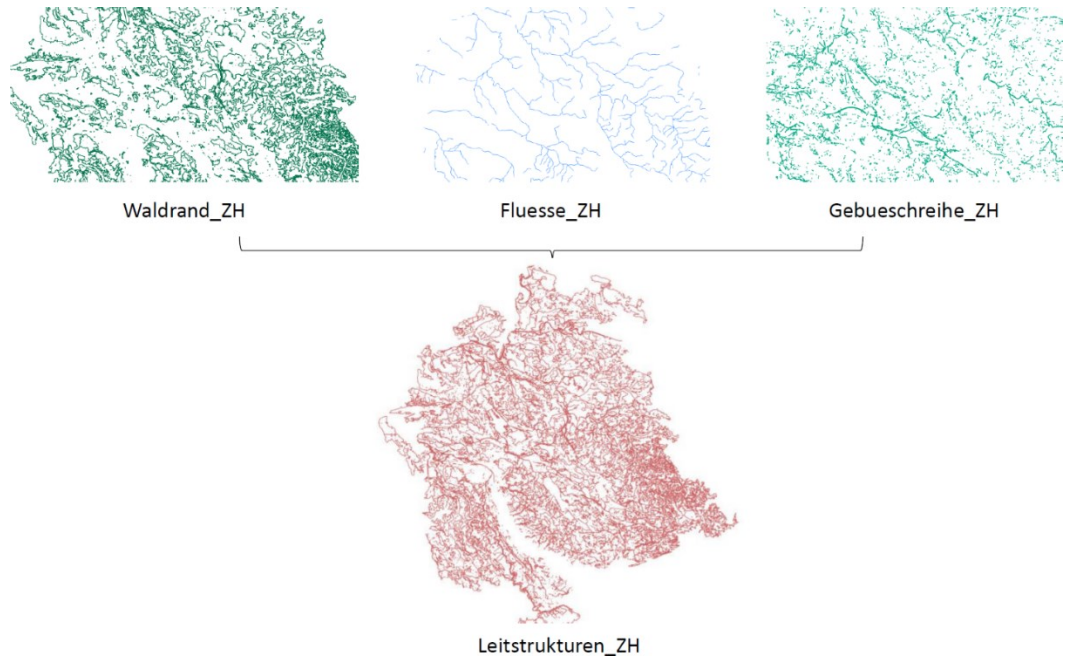
🔧 "Derive Ridgelines / Valleys network from DOM"

- 1) Fill tool DOM (für Graben) / DOM x -1 [nur für Kreten]
- 2) Flow Direction pro Zelle bestimmen (arcpy.FlowDirection)
- 3) Flow Accumulation pro Zelle bestimmen (arcpy.FlowAccumulation)
- 4) Werte über 1000 extrahieren (arcpy.RasterCalculator)
- 5) Strahlerordnung pro Zelle bestimmen (arcpy.StreamOrder)
- 6) Raster in Vektor Konvertieren (arcpy.StreamToFeature)
- 7) Netzwerk auf der basis von Strahlerordnung und Länge selektieren

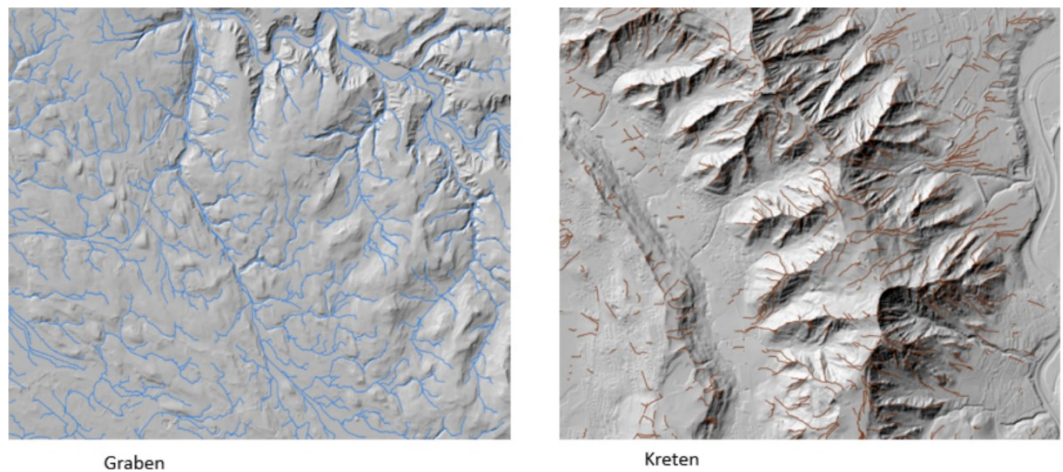
II Anhang II

II.1 Leitstrukturen

Eine Visualisierung zur Ableitung von Leitstrukturen von natürlichen Objekten aus swissTLM3D (Leitstrukturen_TLM) am Beispiel vom Kanton Zürich.



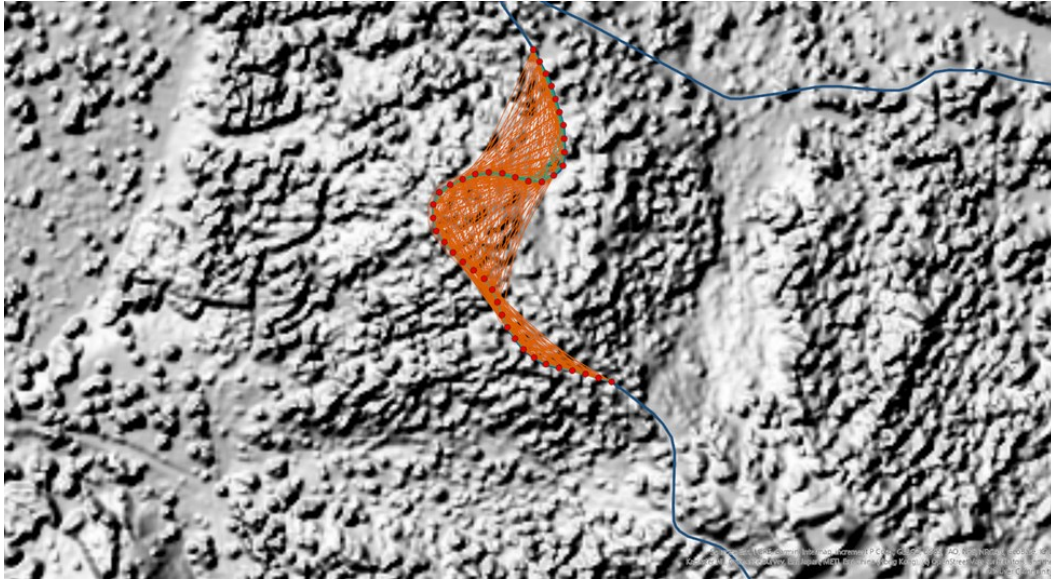
Visualisierung der Ableitung der Leitstrukturen «Graben» und «Kreten» (Leitstrukturen_DHM) anhand zweier Beispiele. Die Linien repräsentieren die abgeleiteten Strukturen, im Hintergrund ist das Digitale Höhenmodell swissALTI3D abgebildet.



III Anhang III

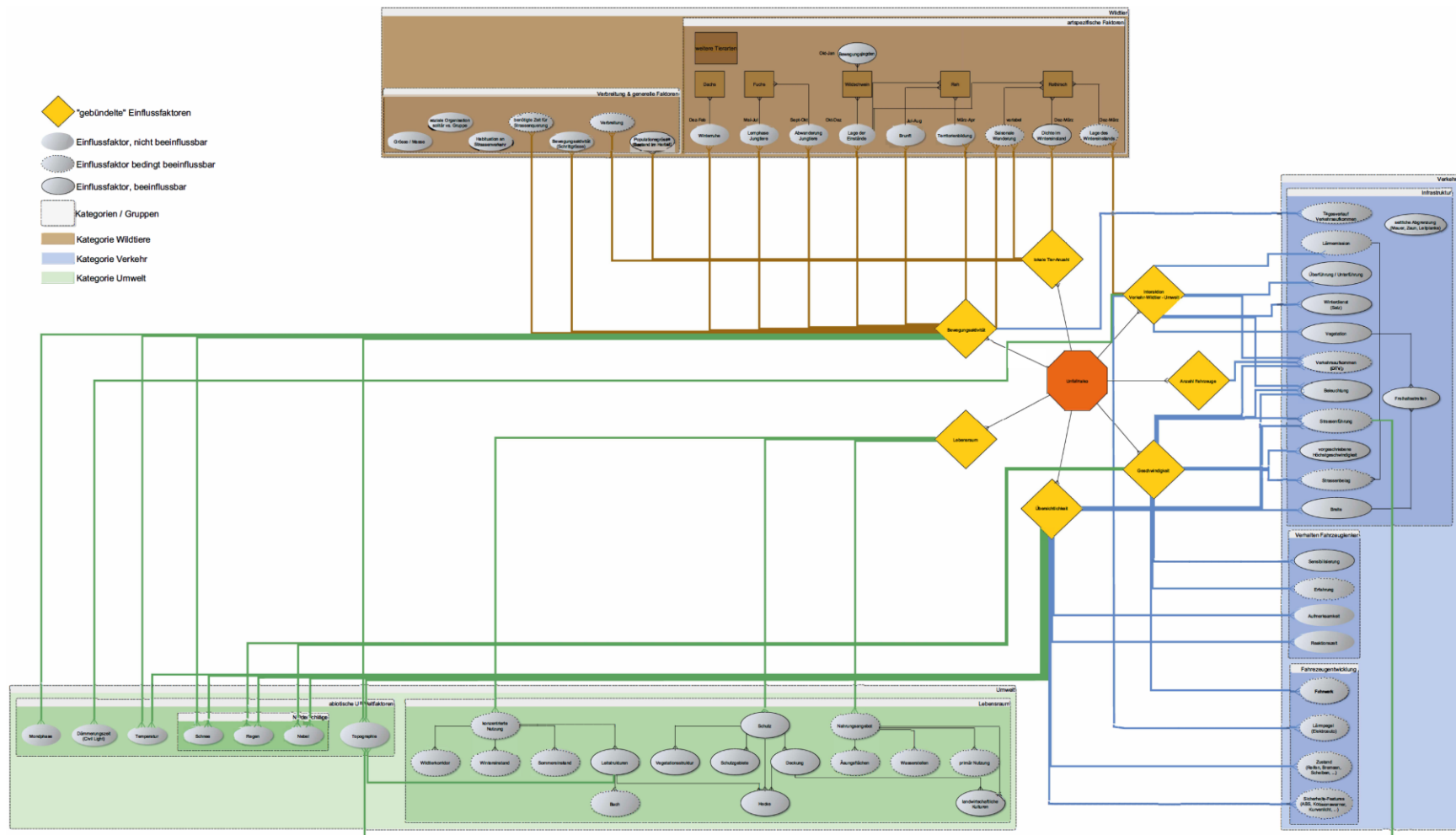
III.1 Sichtbarkeit

Exemplarische Darstellung der Analyse der Sichtbarkeit. Die Verbindungslinien zeigen, welche Sichtlinien berechnet wurden. In diesem Beispiel sind für die meisten Linien keine Sicht gegeben (rot), da sich die Strecke im Wald befindet.



IV Anhang IV

IV.1 Zusammenstellung der potenziellen Einflussfaktoren



V Anhang V

V.1 Übersicht Präventionsmethoden

Es gibt verschiedene Massnahmen, die bei der Prävention von Wildtierunfällen zur Anwendung kommen: Trennung des Lebensraums der Wildtiere von der Verkehrsinfrastruktur (Tab.1), Warnung der Wildtiere vor Fahrzeugen (Tab.2), Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Wildtieren in Strassennähe (Tab.3) und Technische Lösungen in Fahrzeugen (Tab.4). Die Wahl der Methode muss auf die Begebenheiten vor Ort angepasst sein. So kann beispielsweise ein starker Bewuchs am Strassenrand die Wirkung gewisser Präventionsmethoden stark einschränken.

Tab.1 Trennung des Lebensraums der Wildtiere von der Verkehrsinfrastruktur

Methode	Funktion	Wirksamkeit (gut, mittel, schlecht und Begründung)	Kosten (niedrig, mittel, hoch)	Referenzen
Wildschutzzaun	Räumliche Trennung von Verkehr und Wildtieren; je nach Situation verschiedene Zauntypen möglich: mit Untergrabschutz, Überkletterschutz oder Kleintierschutz.	Gut Führt jedoch zur Fragmentierung von Wildtierlebensräumen und sollte deshalb nur in Kombination mit spezifischen Querungshilfen für Wildtiere realisiert werden.	Material: mittel Installation: hoch Wartung: hoch	(Brieger, et al., 2018) (Bundesamt für Strassen, 2014) (Carsignol, et al., 2008) (Strein, et al., 2008)
Kuh- oder Wildtierroste	Hindern Wildtiere am Betreten der Fahrbahn z.B. bei Autobahneinfahrten und Autobahnausfahrten, wo ein Wildschutzzaun zwangsweise unterbrochen ist.	Gut Geeignet für Randbereiche und Raststätten. Ungeeignet für Installation in der Hauptfahrbahn.	Material: mittel Installation: mittel Wartung: niedrig	(Allen, et al., 2013) (Balčiauskas, et al., 2016) (Flower, 2016) (Huijser, et al., 2015) (Peterson, et al., 2003) (Reed, et al., 1974) (Sielecki, 2014) (Van der Ree, et al., 2015) (VerCauteren, et al., 2009)
Elektromatten	Hindern Wildtiere am Betreten der Fahrbahn z.B. bei Autobahneinfahrten und Autobahnausfahrten, wo ein Wildschutzzaun zwangsweise unterbrochen ist.	Gut Sowohl für Installation in der Fahrbahn wie auch in Randbereichen und bei Raststätten geeignet. Wirksamkeit reduziert bei Schnee, Feuchtigkeit und Salz.	Material: mittel Installation: mittel Wartung: mittel	(Flower, 2016) (Huijser, et al., 2015) (Lampman Wildlife Management Services, 2014) (Parks Canada, 2015) (Seamans, et al., 2008) (Seamans, et al., 2008) (Siepel, et al., 2013)

Tab.2 Wildtiere vor dem Verkehr warnen

Methode	Funktion	Wirksamkeit (gut, mittel, gering und Begründung)	Kosten (niedrig, mittel, hoch)	Referenzen
Reflektoren	Blaue, rote oder weisse Reflektoren an Strassenleitpfosten sollen eintreffendes Scheinwerferlicht in die Umgebung ablenken.	Gering-Mittel Studien weisen unterschiedliche Ergebnisse zur Wirksamkeit der Reflektoren aus. Reflexion der Scheinwerfer nur bei Dunkelheit. Bei starkem Bewuchs an Strassen ist die Wirkung eingeschränkt. Reflektoren könnten auch eine positive Wirkung auf die Aufmerksamkeit der Fahrzeuglenker haben.	Material: niedrig Installation: niedrig Wartung: niedrig	(Benten, et al., 2018) (Brieger, et al., 2016) (D'Angelo, et al., 2006) (Kämmerle, et al., 2017) (Schulze, et al., 2017) (Trothe, et al., 2016) (Ujvári, et al., 1998) (Waring, et al., 1991)
Akustischer Wildwarner	Durch Scheinwerferlicht oder Fahrzeuggeräusche werden herannahende Fahrzeuge erkannt und ein akustisches Signal (Pfeifton) ausgelöst. Auch in Kombination mit optischem Warnsignal (LED-Blitze) erhältlich.	Mittel Studien weisen unterschiedliche Ergebnisse zur Wirksamkeit der akustischen Wildwarner aus. Auf den Teststrecken in der Schweiz konnte im ersten Betriebsjahr eine Reduktion der Wildunfälle festgestellt werden; der Effekt schwächte sich aber in Folgejahren ab, was auf einen gewissen Gewöhnungseffekt hinweisen könnte.	Material: niedrig Installation: niedrig Wartung: mittel	(Philipp, 2009) (Moser, 2007) (Steinkeller, 2019) (Suter, et al., 2020) (SVV, 2012) (SWILD, 2013) (Thiel, 2013)
Bioakustische Wildwarner	Heranfahrende Fahrzeuge lösen die Aktivierung von tierischen Warnrufen aus.	Vielversprechend, bisher jedoch nur wenige Studien und Produkte.	Material: hoch Installation: mittel Wartung: niedrig	(Babińska-Werka, et al., 2015) (Suter, 2018)
Hirschpfeifen an Autos	Montage am Fahrzeug, Tonerzeugung durch Fahrtwind.	Gering Studien konnten keinen Effekt feststellen.	Material: niedrig Installation: niedrig Wartung: keine	(Romin, et al., 1992) (Scheifele, et al., 2003) (Valitzski, et al., 2009)
Akustischer Strassenbelag	Strassenbelag wird durch Einfräsungen oder Rüttelstreifen so präpariert, dass beim Befahren warnrufähnliche Töne entstehen,	Bisher zu wenig Studien, um eine Aussage über die Wirksamkeit zu machen. Gewöhnungseffekt möglich.	Material: niedrig Installation: mittel Wartung: niedrig	(Noro, et al., 2012) (Ujvári, et al., 2004)
Duftzäune	Synthetisch erzeugte Menschen- oder Prädatorendüfte zur äusseren Anwendung.	Gering Die meisten Studien konnten keinen Effekt feststellen. Regelmässige Erneuerung notwendig.	Material: niedrig Installation: niedrig Wartung: hoch	(Bíl, et al., 2018) (Danielson, et al., 1998) (Elmeros, et al., 2011) (Hedlund, et al., 2004) (Kimball, et al., 2009) (Knapp, et al., 2004) (Trent, et al., 2001) (Trothe, et al., 2016)

Tab. 3 Verkehrsteilnehmende vor Wildtieren warnen

Methode	Funktion	Wirksamkeit (gut, mittel, gering und Begründung)	Kosten (niedrig, mittel, hoch)	Referenzen
Warnschilder	Die Warnschilder weisen den Fahrzeuglenker auf ein erhöhtes Risiko für Wildtiere auf der Fahrbahn hin.	Gering Bewirken keine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit.	Material: niedrig Installation: niedrig Wartung: niedrig	(Huijser, et al., 2015) (Meyer, 2006) (Stanley, et al., 2006)
Elektronische Wildwarnanlagen	Radar, Lichtschranken oder Passiv-Infrarotsensoren erfassen Wildtiere, die sich in der Nähe der Fahrbahn aufhalten. Die Erfassung aktiviert das Signal an LED-Warnschild mit Aufforderung zur Temporeduktion.	Gut Signal nur aktiv wenn auch reellere Gefahr für eine Kollision mit Wildtieren besteht. Klare Handlungsanweisung durch Temporeduktion. Temporeduktion in der Praxis nicht überall umsetzbar.	Material: hoch Installation: hoch Wartung: mittel	(Huijser, et al., 2003) (Huijser, et al., 2015) (Life Strade, 2017) (Kistler, 1998) (Mosler-Berger, et al., 2003) (Mosler-Berger, 2015) (Strein, et al., 2008)
Elektronische Wildwarngeräte	Gerät erfasst Wildtiere in Fahrbahnnähe und löst ein blinkendes Warnsignal aus. Zusätzliche Aktivierung der Module im Umkreis von 50 m.	Bisher zu wenig Studien, um eine Aussage über die Wirksamkeit zu machen. Erste Tests zeigen Temporeduktion und erhöhte Aufmerksamkeit bei Fahrzeuglenkern.	Material: mittel Installation: niedrig Wartung: niedrig	(Reifler-Bächtiger, et al., 2019)

Tab.4 Antikollisionssysteme in Fahrzeugen

Methode	Funktion	Wirksamkeit (gut, mittel, gering und Begründung)	Kosten (niedrig, mittel, hoch)	Referenzen
Antikollisionssysteme	Erfassung von Lebewesen auf und im Seitenbereich der Fahrbahn. Radar und Wärmebildkameras in Kombination mit Objektidentifizierung durch künstliche Intelligenz und automatischer Notfallbremssysteme.	Gut Ständige Weiterentwicklung und neue Technologien durch die Fahrzeughersteller.		Diverse Fahrzeughersteller

Literaturverzeichnis

Åberg, L. 1981. *The human factor in game-vehicle accidents: A study of drivers' information acquisition.* Uppsala : Uppsala University, Sweden, 1981.

Adams, E. 2019. Wired. [Online] 2019. <https://www.wired.com/2017/01/volvos-cars-now-spot-moose-hit-brakes/>.

Allen, T.D.H., Huijser, M.P. und Willey, D.W. 2013. Effectiveness of wildlife guards at access roads. *Wildlife Society Bulletin.* 2013, Bd. 37, 2, S. 402-408.

Andelt, W.F. und Baker, D.L. 1992. Relative Preference of Captive Cow Elk for Repellent-Treated Diets. *Journal of Wildlife Management.* 1992, Bd. 56, 1, S. 164-173.

AniMot. 2019. Die intelligente Zukunft in der Wildunfallprävention. [Online] 2019. <https://www.animot.eu/>.

Arado, et al. 2019. Nachtsicht-Assistent. [Online] 2019. <https://de.wikipedia.org/wiki/Nachtsicht-Assistent>.

Babińska-Werka, J., et al. 2015. Effectiveness of an acoustic wildlife warning device using natural calls to reduce the risk of train collisions with animals. *Transportation Research Part D.* 2015, Bd. 38, S. 6-14.

Balčiauskas, L. und Balčiauskienė, L. 2016. Safeguarding wild animals and vehicles on the main roads of Lithuania: an assessment of the effectiveness of measures. Lyon : IENE 2016 - Integrating Transport Infrastructure with Living Landscapes, 2016.

Barrientos, R. und Bolonio, L. 2009. The presence of rabbits adjacent to roads increases polecat road mortality. *Biodiversity and Conservation.* 2009, Bd. 18, S. 405-418.

Benten, A., Annighöfer, P. und Vor, T. 2018. Wildlife Warning Reflectors' Potential to Mitigate Wildlife-Vehicle Collisions - A Review on the Evaluation Methods. *Frontiers in Ecology and Evolution.* 2018, Bd. 6, 37.

Bíl, M., Andrasik, R. und Janoska, Z. 2013. Identification of hazardous road locations of traffic accidents by means of kernel density estimation and cluster significance evaluation. *Accident Analysis & Prevention.* 2013, Bd. 55, S. 265-273.

Bíl, M., Andrášik, R. und Sedoník, J. 2019. A detailed spatiotemporal analysis of traffic crash hotspots. *Applied Geography.* 107, 2019, S. 82-90.

Bíl, M., et al. 2018. An evaluation of odor repellent effectiveness in prevention of wildlife-vehicle collisions. *Journal of Environmental Management.* 2018, Bd. 205, S. 209-214.

Bíl, M., et al. 2019. On reliable identification of factors influencing wildlife-vehicle collisions along roads. *Journal of Environmental Management.* 2019, Bd. 237, S. 297-304.

Bíl, M., et al. 2016. The KDE+ software: a tool for effective identification and ranking of animal-vehicle collision hotspots along networks. *Landscape Ecology.* 2016, Bd. 31, 2, S. 1-7.

Bíl, M., Kubeček, J. und Andrášik, R. 2020. Ungulate-vehicle collision risk and traffic volume on roads. *European Journal of Wildlife Research.* 2020, Bd. 66, 59, S. 1-10.

Bissonette, J.A., Kassar, C.A. und Cook, L.J. 2008. Assessment of costs associated with deer-vehicle collisions: human death and injury, vehicle damage, and deer loss. *Human-Wildlife Conflicts.* 2008, Bd. 2, 1, S. 17-27.

- Brieger, F. und Schmüser, H. 2018.** *Wirtschaftliche Randbedingungen für die Herstellung und Unterhaltung von Wildschutzmaßnahmen an Bundesfernstraßen / Auswertung von Wildunfalldaten.* 2018.
- Brieger, F., et al. 2016.** Effectiveness of light-reflecting devices: A systematic reanalysis of animal-vehicle collision data. *Accident Analysis and Prevention.* 2016, Bd. 97, S. 242-260.
- Bundesamt für Statistik BFS. 2019.** *Verkehrsunfälle 2018.* Neuchâtel : Bundesamt für Statistik BFS, 2019.
- Bundesamt für Strassen ASTRA. 2015.** *Grünräume an Nationalstrassen. Gestaltung und Betrieblicher Unterhalt.* Bern : Bundesamt für Strassen ASTRA, 2015.
- Bundesamt für Strassen, ASTRA. 2014.** *Querungshilfe für Wildtiere.* Bundesamt für Strassen ASTRA. Bern : Bundesamt für Strassen ASTRA, 2014.
- Bundesamt für Umwelt BAFU. 2018.** Eidgenössische Jagdstatistik. [Online] 2018. <https://www.jagdstatistik.ch/>.
- Calstrom GmbH. 2019.** Wirksame Unfallverhütung dank Wildwarnsystemen von Calstrom. [Online] Calstrom GmbH, 2019. <http://www.calstrom.ch/wildwarn.php>.
- Carsignol, J., Pineau, C. und Bielsa, S. 2008.** *Clôtures routières et faune.* s.l. : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements, 2008.
- Clevenger, A.P., Chruszcz, B. und Gunson, K.E. 2001.** Highway mitigation fencing reduces wildlife-vehicle collisions. *Wildlife Society Bulletin.* 2001, Bd. 29, 2, S. 646-653.
- Collinson, W.J., et al. 2014.** Wildlife road traffic accidents: a standardized protocol for counting flattened fauna. *Ecology and Evolution.* 2014, Bd. 4, 15, S. 3060-3071.
- D'Angelo, G.J., et al. 2006.** Evaluation of Wildlife Warning Reflectors for Altering White-Tailed Deer Behavior Along Roadways. *Wildlife Society Bulletin.* 2006, Bd. 34, 4, S. 1175-1183.
- D'Angelo, G.J., et al. 2007.** Hearing Range of White-Tailed Deer as Determined by Auditory Brainstem Response. *Journal of Wildlife Management.* 2007, Bd. 71, 4, S. 1238-1242.
- Danielson, B.J. und Hubbard, M.W. 1998.** *A Literature Review for Assessing the Status of Current Methods of Reducing Deer-Vehicle Collisions.* 1998.
- Di Giulio, M. und Schlup, B. 2008.** Mehr Vernetzung für Wildtiere. *Geomatik Schweiz.* 2008, S. 4-7.
- Elmeros, M, et al. 2011.** Effectiveness of odour repellents on red deer (*Cervus elaphus*) and roe deer (*Capreolus capreolus*): a field test. *European Journal of Wildlife Research.* 2011, Bd. 57, 6, S. 1223-1226.
- Elvik, R. 2009.** *The Power Model of the relationship between speed and road safety: Update and new analyses.* Oslo : Institute of Transport Economics, 2009.
- Elvik, R. 2008.** A survey of operational definitions of hazardous road locations in some european countries. *Accident Analysis & Prevention.* 2008, Bd. 40, S. 1830-1835.
- Flower, J.P. 2016.** Emerging Technology to Exclude Wildlife from Roads: Electrified Pavement and Deer Guards in Utah, USA. *MSc Thesis.* Utah State University : s.n., 2016.
- Garrah, E., et al. 2015.** Hot Spots and Hot Times: Wildlife Road Mortality in a Regional Conservation Corridor. *Environmental Management.* 2015, Bd. 56, 4.

Grosman, P.D., et al. 2009. Reducing moose-vehicle collisions through salt pool removal and displacement: an agent-based modelling approach. *Ecology and Society*. 2009, Bd. 14, 2.

Gulen, S., et al. 2006. *Evaluation of wildlife refelctors in reducing vehicle-deer collisions on Indiana Interstate 80/90*. 2006.

Gunson, K.E., et al. 2009. A Comparison of Data Sets Varying in Spatial Accuracy Used to Predict the Occurrence of Wildlife-Vehicle Collisions. *Environmental Management*. 2009, Bd. 44, S. 268-277.

Gunson, K.E., Mountrakis, G. und Quackenbush, L. 2011. Spatial wildlife-vehicle collision models: a review of current work and its application to transportation mitigation projects. *Journal of Environmental Management*. 2011, Bd. 92, S. 1074-1082.

Hedlund, J.H., et al. 2004. Methods to reduce traffic crashes involving deer: what works and what does not. *Traffic Injury Prevention*. 2004, Bd. 5.

Hilfiker, K., et al. 2019. *Auswertung der Ereignisse von Wildtierunfällen an SBB Bahnstrecken zwischen 2003 und 2017*. Wädenswil : Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, 2019.

Holzgang, O., Righetti, A. und Pfister, H.P. 2005. Schweizer Wildtierkorridore auf dem Papier, in den Köpfen und in der Landschaft. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*. 2005, Bd. 14, 2, S. 148-151.

Hothorn, T., Brandl, R. und Müller, J. 2012. Large-Scale Model-Based Assessment of Deer-Vehicle Collision Risk. *Plos One*. 2012, Bd. 7, 2, S. 1-10.

Huijser, M P, et al. 2007. *Wildlife-vehicle collision reduction study. Report to Congress*. Washington, DC : U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2007.

Huijser, M. und Hayden, L. 2010. *Evaluation of the reliability of an animal detection system in a test-bed - Final report*. 2010.

Huijser, M.P. und McGowen, P.T. 2003. Overview of animal detection and animal warning systems in North America and Europe. *ICOET Proceedings*. 2003.

Huijser, M.P., et al. 2015. Wildlife warning signs and animal detection systems aimed at reducing wildlife-vehicle collisions. [Buchverf.] R. Van der Ree, D.J. Smith und C. Grilo. *Handbook of Road Ecology*. West Sussex : Wiley Blackwell, 2015.

Huijser, M.P., McGowen, P. 2003. Overview of animal detection and animal warning systems in North America and Europe. *ICOET Proceedings*. 2003.

Ignatavicius, G., Oskinis, V. und Vildaite, V. 2011. Investigation of the impact of wildlife-vehicle collision prevention installations on highway Vilnius-Panevezys (Lithuania) traffic safety. *Environmental Engineering*. 2011, Bd. 8, S. 1082-1088.

Iuell, B., et al. 2003. *Wildlife and Traffic: A European Handbook for Identifying Conflicts and Designing Solutions*. 2003.

Jacobs, G.H., et al. 1994. Electrophysiological measurements of spectral mechanisms in the retinas of two cervids: white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) and fallow deer (*Dama dama*). *Journal of Comparative Physiology A*. 1994, Bd. 174, S. 551-557.

Jägerbrand, A.K., Antonson, H. und Ahlström, C. 2018. Speed reduction effects over distance of animal-vehicle collision countermeasures – a driving simulator study. *European Transport Research Review*. 2018, Bd. 10, 2, S. 1-12.

- Kämmerle, J.-L., et al. 2017.** Temporal patterns in road crossing behaviour in roe deer (*Capreolus capreolus*) at sites with wildlife warning reflectors. *Plos One*. 2017, S. 1-18.
- Kimball, B.A., et al. 2009.** Deer responses to repellent stimuli. *Journal of Chemical Ecology*. 2009, Bd. 35, 12, S. 1461-1470.
- Kistler, R. 1998.** *Wissenschaftliche Begleitung der Wildwarnanlage Calstrom WWA-12-S*. 1998.
- Knapp, K. und Rathmann, C. 2004.** *Deer-vehicle crash countermeasure toolbox: A decision and choice resource*. Wisconsin : Midwest Regional University Transportation Center, 2004.
- Laliberté, J. und St-Laurent, M-H. 2020.** In the wrong place at the wrong time: Moose and deer movement patterns influence wildlife-vehicle collision risk. *Accident Analysis & Prevention*. 2020, Bd. 135, S. 1-9.
- Lampman Wildlife Management Services. 2014.** Lampman Electromat Product Information Sheet. s.l. : http://www.lampmanwildlifeservices.com/usercontent//Lampman_Electromat.pdf, 2014.
- Life Strade. 2017.** *Final Technical Report*. Perugia : s.n., 2017.
- Litvaitis, J.A. und Tash, J.P. 2008.** An Approach Toward Understanding Wildlife-Vehicle Collisions. *Environmental Management*. 2008, Bd. 42, S. 688-697.
- Lutz, W. 1994.** Ergebnisse der Anwendung eines sogenannten Duftzaunes zur Vermeidung von Wildverlusten durch den Strassenverkehr nach Gehege- und Freilandorientierungen. *Zeitschrift für Jagdwissenschaft*. 1994, Bd. 40, S. 91-108.
- Malo, J., Suarez, F. und Diez, A. 2004.** Can we mitigate animal-vehicle accidents using predictive models? *Journal of Applied Ecology*. 41, 2004, S. 701-710.
- Meyer, E. 2006.** *Assessing the effectiveness of deer warning signs. Final Report*. Lawrence, Kansas : University of Kansas, 2006.
- Moser, E. 2007.** Akustische Wildwarner im Test. *Der OÖ Jäger*. 2007, Bd. 4, S. 1-2.
- Mosler-Berger, C. 2011.** Massnahmen gegen Wildunfälle auf Strassen - ein Überblick. *Strasse und Verkehr*. 2011, Bd. 6.
- Mosler-Berger, C. und Pomer, J. 2003.** Wildwarnsystem Calstrom. *Wildbiologie*. 2003, Bd. 3.
- Mosler-Berger, C. 2015.** *Was hilft gegen Wildunfälle auf Strassen wirklich?* Zürich : Wildtier Schweiz, 2015.
- Neumann, W., et al. 2012.** Difference in spatiotemporal patterns of wildlife road-crossing and wildlife-vehicle collisions. *Biological Conservation*. 2012, Bd. 145, 1, S. 70-78.
- Noro, M., et al. 2012.** *Prevention of deer-vehicle collisions by using the sound produced by tires passing over grooved pavement*. 2012.
- Parks Canada. 2015.** *Electrified mat testing in Banff and Yoho National Parks - Parks Canada and Pacific Joint Action Plan*. Banff : Parks Canada, 2015.
- Peterson, N. und Silvy, N.J. 2003.** Evaluation of deer-exclusion grates in urban areas. *Wildlife Society Bulletin*. 2003, Bd. 31, 4, S. 1198-1204.
- Philipp, U.J. 2009.** *Status Projekt "Wildwarnanlage im Kanton Zürich". Teilprojekt des Präventionsprojekts "Weniger Wildunfälle"*. 2009.

ProWild. 2019. Prowild Wilddetectiesystemen. [Online] 2019. <https://www.prowild.net/>.

Putman, R.J., Langbein, J. und Staines, B.W. 2004. *Deer and road traffic accidents: A review of mitigation measures: Costs and cost-effectiveness.* 2004.

Reed, D.F., Pojar, T.M. und Woodard, T.N. 1974. Mule deer responses to deer guards. *Journal of Range Management.* 1974, Bd. 27, 2, S. 111-113.

Reifler-Bächtiger, M., et al. 2019. *Zwischenbericht 2019 -Wildwarnsystem AniMot.* Wädenswil : Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, 2019.

Ries, U. 2019. Open-Source-Projekt: Teslas zu rollenden Überwachungsstationen machen. [Online] 2019. <https://www.heise.de/security/meldung/Open-Source-Projekt-Teslas-zu-rollenden-Ueberwachungsstationen-machen-4493443.html>.

Rogers, E. 2004. *An ecological landscape study of deer vehicle collisions in Kent County, Michigan. Report by White Water Associates Inc. Prepared for Kent County Road Commission, Grand Rapids, Michigan.* 2004.

Romin, L.A. und Dalton, L.B. 1992. Lack of Response by Mule Deer to Wildlife Warning Whistles. *Wildlife Society Bulletin.* 1992, Bd. 20, S. 382-384.

Rowden, P., Steinhardt, D. und Sheehan, M. 2008. Road crashes involving animals in Australia. *Accident Analysis and Prevention.* 2008, Bd. 40, 6, S. 1865-1871.

Scheifele, P.M., Browning, D.G. und Collins-Scheifele, L.M. 2003. Analysis and effectiveness of deer whistles for motor vehicles: frequencies, levels, and animal threshold responses. *Acoustics Research Letters Online.* 2003, Bd. 4, 3, S. 71-76.

Schulze, C. und Polster, J.U. 2017. *Wirkungsweise von Wildwarnern.* Bremen : Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH, 2017.

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). 2019. Fauna und Verkehr - Wildzäune. VSS Norm 640 693A. 2019.

Seamans, T. und Helon, D. 2008. Comparison of electrified mats and cattle guards to control white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) access through fences. [Buchverf.] R.M., Madon, M.B. Timm. *Proceedings of the 23rd Vertebrate Pest Conference.* Davis : University of California, 2008.

Seamans, T.W. und Helon, D.A. 2008. Evaluation of an electrified mat as a white-tailed deer (*Odocoileus virginianus*) barrier. *International Journal of Pest Management.* 2008, Bd. 54, 1, S. 89-94.

Seiler, A., et al. 2016. *Case studies on the effect of local road and verge features on ungulate-vehicle collisions.* s.l. : SAFEROAD Technical Report, 7., 2016.

Seiler, A., et al. 2016. *Case studies on the effect of local road and verge features on ungulate-vehicle collisions.* Brussels : SAFEROAD Technical Report, 8. Conference of European Directors of Roads (CEDR)., 2016.

Sielecki, L. 2014. *Wildlife Exclusion Systems.* Victoria : Ministry of Transportation and Infrastructure, 2014.

Sielecki, L.E. 2001. Evaluating the effectiveness of wildlife accident mitigation installations with the wildlife accident reporting system (WARS) in British Columbia. *ICOET 2001 Proceedings.* 2001, S. 473-489.

Siepel, N.R., et al. 2013. Saving lives and training the next generation: State route 101 wildlife corridor safety project. *ICOET 2013 Proceedings.* 2013.

Staines, B.W., Langbein, J. und Putman, R.J. 2001. *Road Traffic Accidents and Deer in Scotland. Report to the Deer Commission, Scotland.* 2001.

Stanley, L., Hardy, A. und Lassacher, S. 2006. Responses to Enhanced Wildlife Advisories in a Simulated Environment. *Journal of the Transportation Research Board.* 2006, Bd. 1980, 1, S. 126-133.

Steinkeller, G. 2019. Neues Projekt Wildschutz 2024. *Pressekonferenz 17.12.2019.* 2019.

Strein, M., et al. 2008. *Pilotprojekt Elektronische Wildwarnanlage B292 bei Aglasterhausen. Endbericht.* Freiburg : Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 2008.

Suter, S M. 2009. *Wildtierkorridore und Vernetzungsachsen im Kanton Zürich - Räumliche Ausscheidung, Evaluation der Durchlässigkeit und Massnahmenkatalog zur Sanierung der Wildtierkorridore.* s.l. : WLS.CH im Auftrag der Fischerei- und Jagdverwaltung des Kantons Zürich, 2009.

Suter, S. und Graf, R.F. 2012. Wildtierpassagen: Bauwerke für vernetzte Lebensräume. *Ingenieurbilogie.* 22, 2012, Bd. 2, S. 20-25.

Suter, S.M. und Stephani, A.,. 2020. *Evaluation der akustischen Wildwarner im Bereich der SBB-Bahnlinie bei Schützen. Zwischenbericht 2020.* Lossy : WLS.ch, 2020.

Suter, S.M. 2018. Wildschweinschäden mit akustischer Methode verhindern. www.zhaw.ch/de/medien/medienmitteilungen/detailansicht-medienmitteilung/event-news/wildschweinschaeden-mit-akustischer-methode-verhindern/. [Online] 2018.

SVV, Schweizerischer Versicherungsverband. 2012. *Präventionsprojekt "Weniger Wildunfälle!". Abschlussbericht, 16 S.* Download: www.svv.ch/praevention : s.n., 2012.

SWILD. 2013. *Wissenschaftliche Begleitung und Erfolgskontrolle der «Wildwarnanlagen im Kanton St. Gallen». Schlussbericht zuhanden des Amtes für Natur, Jagd und Fischerei des Kantons St. Gallen.* 2013.

Thiel, D. 2013. Lassen sich Wildunfälle reduzieren? *Umwelt Aargau.* 2013, Bd. 62, S. 33-34.

Trent, A., Nolte, D. und Wagner, K. 2001. Comparison of Commercial Deer Repellents. *Timber Tech Tips.* 2001.

Trothe, C., Meissner, M. und Herzog, S. 2016. *Wildunfälle verhindern - was hilft wirklich? Präventionsmaßnahmen auf dem Prüfstand.* Göttingen : Institut für Wildtierbiologie Göttingen und Dresden e. V., 2016.

Ujvári, M, Baagøe, H J und Mdsen, A B. 2004. Effectiveness of acoustic road markings in reducing deer-vehicle collisions: a behavioural study. *Wildlife Biology.* 2004, S. 155-159.

Ujvári, M., Baagøe, H.J. und Madsen, A.B. 1998. Effectiveness of Wildlife Warning Reflectors in Reducing Deer-Vehicle Collisions: A Behavioral Study. *Journal of Wildlife Management.* 1998, Bd. 62, 3, S. 1094-1099.

Valitzski, S.A., et al. 2009. Deer Responses to Sounds from a Vehicle-Mounted Sound-Production System. *Journal of Wildlife Management.* 2009, Bd. 73, 7, S. 1072-1076.

Van der Grift, E.A., et al. 2017. *Safe roads for wildlife and people. SAFEROAD Final Report. CEDR Transnational Road Research Programme Call 2013: Roads and Wildlife.* Brussels : CEDR, 2017.

Van der Ree, R., Gagnon, J.W. und Smith, D.J. 2015. Fencing: a valuable tool for reducing wildlife-vehicle collisions and funnelling fauna to crossing structures. [Buchverf.] D.J., Smith, D.J., Grilo, C. Van der Ree. *Handbook of Road Ecology.* Wet Sussex : Wiley Blackwell, 2015.

Van Langevelde, F. und Jaarsma, R. 2004. Using traffic flow theory to model traffic mortality in mammals. *Landscape Ecology*. 2004, Bd. 19, S. 895-907.

VerCauteren, K.C., et al. 2009. Deer guards and bump gates for excluding white-tailed deer from fenced resources. *Human-Wildlife Conflicts*. 2009, Bd. 3, 1, S. 145-153.

Viani, F., et al. 2014. Advances in Wildlife Road-Crossing Early-Alert System: New Architecture and Experimental Validation. *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*. 2014, S. 3457-3461.

Viani, F., et al. 2013. WSN-based Early Alert System for Preventing Wildlife-Vehicle Collisions in Alps Regions - From the Laboratory Test to the Real-World Implementation. *7th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2013)*. 2013, S. 1913-1916.

Waring, G.H., Griffis, J.L. und Vaughn, M.E. 1991. White-tailed deer roadside behavior, wildlife warning reflectors, and highway mortality. *Applied Animal Behaviour Science*. 1991, S. 1-12.

Wilkens, A. 2019. Fahrassistenzsysteme: Volvo hat Probleme mit Känguru-Erkennung. [Online] 2019. <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Fahrassistenzsysteme-Volvo-hat-Probleme-mit-Kaenguru-Erkennung-3757786.html>.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 19.11.2020

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2015/212

Projekttitel: Prävention von Wildtierunfällen auf Strassenverkehrsinfrastrukturen

Enddatum: 30.06.2020

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Jedes Jahr kommen auf Schweizer Verkehrsinfrastrukturen rund 10'000 grössere Wildtiere wie Rehe, Rothirsche, Gämsen und Wildschweine um. Wildtierunfälle verursachen jährlich Sachschäden in Millionenhöhe und können in schweren Fällen auch zu Personenschäden und Verkehrstoten führen. Durch die aktuelle Ausbreitung von Rothirsch und Wildschwein und dem damit verbundenen Populationswachstum sowie durch das stetig steigende Verkehrsaufkommen wird sich das Risiko für Wildtierunfälle in Zukunft weiter erhöhen. Genaue Kenntnisse über die Umstände und Einflussfaktoren, welche zu Wildtierunfällen führen, sind daher zentral für einen gezielten und effizienten Einsatz von Präventionsmassnahmen.

In der vorliegenden Studie wurde eine umfassende Zusammenstellung der potenziellen Einflussfaktoren, die Wildtierunfälle begünstigen können, erstellt. Basierend auf diesen potenziellen Einflussfaktoren wurden Parameter, für die schweizweite Geodaten verfügbar waren, bestimmt und operationalisiert. Mit verschiedenen Modellierungsansätzen wurden diese Parameter anschliessend verwendet, um das Auftreten der vorhandenen Fallwilddaten in den Kantonen Zürich, Freiburg und Graubünden zu untersuchen. Diese erklärenden Modelle erlauben zunächst Aussagen darüber, welche Parameter besonders stark zum Auftreten von Wildtierunfällen führen. Mit den optimierten Modellen war es weiter möglich, Orte mit besonders vielen Wildtierunfällen, sogenannte Hotspots, zu 80-90% korrekt vorherzusagen. Diese Modelle erlauben nun auch in jenen Gebieten eine Vorhersage über die Unfallwahrscheinlichkeit zu machen, wo keine Datengrundlagen zu Wildtierunfällen verfügbar sind. Während die Modelle Hotspots entlang und in Wäldern zuverlässig aufzeigen, werden Hotspots im offenen Feld weniger gut erkannt. Dies ist einerseits auf die Veränderung der Vegetation auf landwirtschaftlichen Flächen im Laufe des Jahres und der Folgejahre zurückzuführen und andererseits auf das Fehlen flächendeckender Daten auf diesen Flächen. Feldaufnahmen an Hotspots haben ergeben, dass Wildtierwechsel die Lage und Ausdehnung eines Hotspots relativ genau anzeigen. Aufgrund dieser Erkenntnis kann zukünftig durch eine Begehung der gefährdeten Strassenabschnitte der Bereich für Präventionsmassnahmen eingegrenzt werden.

Eine umfassende Literaturrecherche hat aufgezeigt, dass grundsätzlich vier Möglichkeiten zur Prävention von Wildtierunfällen zur Anwendung kommen: 1. Trennung des Lebensraums der Wildtiere von der Verkehrsinfrastruktur, 2. Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Wildtieren in Strassennähe, 3. Warnung der Wildtiere vor Fahrzeugen und 4. Technische Lösungen in Fahrzeugen wie Radar und Echtzeit-Objekterkennung. Verschiedene Studien weisen darauf hin, dass Zäune sehr effektiv sind, um Kollisionen zu reduzieren. Jedoch sollten Zäune nur in Kombination mit Wildtierpassagen verwendet werden, damit die Vernetzung der Wildtierhabitate weiterhin gewährleistet bleibt. Auch Wildwarnsysteme, welche die Verkehrsteilnehmer warnen, haben sich als wirksam erwiesen, um Kollisionen nachhaltig zu reduzieren. Die aktuell verfügbaren Systeme sind allerdings relativ teuer und eignen sich nur für kurze Strassenabschnitte. Visuelle, akustische und olfaktorische Abschreckungssysteme, welche Wildtiere vor Gefahren auf der Verkehrsinfrastruktur warnen, können zwar kurzfristig die Fallwildzahlen senken, aber bisher hat keine Langzeitstudie ihre Wirksamkeit belegen können. Antikollisionssysteme in Fahrzeugen werden laufend weiterentwickelt und in Zukunft auch dazu beitragen, die Anzahl Wildunfälle zu reduzieren.

Die vorliegende Studie liefert die Grundlagen, um das Risiko für Wildtierunfälle auf Schweizer Verkehrsinfrastrukturen situationsgerecht zu entschärfen. Das zentrale räumliche Resultat bildet eine Schweizerkarte mit Strassensegmenten, für die eine geschätzte Unfallwahrscheinlichkeit mittels verschiedener Modelle berechnet wurde (www.zhaw.ch/unr/wildtierunfaelle). Dies ermöglicht zukünftig die für Präventionsmethoden verfügbaren finanziellen Mittel effizienter einzusetzen und dadurch Kosten zu sparen. Zugleich sind Wildtiere und Menschen besser vor Kollisionen und deren negativen Folgen geschützt, da die Verkehrssicherheit mit gezielten Massnahmen erhöht werden kann.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

1. Ausführliche Zusammenstellung der potentiellen Einflussfaktoren (Anhang 4)
2. Das bessere Verständnis der Faktoren, die zu Wildtierunfällen auf Straßenverkehrsinfrastrukturen führen. (Faktoren Literatur S.10, Faktoren Analysen S.30-32)
3. Umfassende Recherche zu erfolgreichen bzw. vielversprechenden Präventionsmaßnahmen. (S.38-47)
4. Direkten und indirekten Begleitfaktoren ermitteln sowie die aus den Analysen resultierenden Faktoren (Sinuosität = Übersichtlichkeit, Äsungsfläche_100m = Futterangebot in der Nähe der Straße und Strassenlärm_50m = Verkehrsaufkommen und Geschwindigkeit, Wildwechsel)
5. Räumlich-zeitliche Verteilungsmuster von Wildtierunfällen aufzeigen (Räumlich Karte S.33, Zeitlich S.35-36)
6. Katalog von Präventionsmaßnahmen erstellt werden, der auch Informationen zur Wirkung sowie zum Aufwand für Material, Installation und Wartung enthält. (Anhang 5)

Dieses Projekt liefert ein Instrument, um das Risiko für Wildtierunfälle situationsgerecht zu entschärfen.

Folgerungen und Empfehlungen:

-Die vorliegende Studie liefert die Grundlagen, um das Risiko für Wildtierunfälle auf Schweizer Verkehrsinfrastrukturen situationsgerecht zu entschärfen. Das zentrale räumliche Resultat bildet eine Schweizerkarte mit Straßensegmenten, für die eine geschätzte Unfallwahrscheinlichkeit mittels verschiedener Modelle berechnet wurde.

-Abhängig von Standort und Tierart nur nachweislich wirksame Präventionsmethoden anwenden Anhang 5 und Dokument Praxishilfe

-In Zukunft systematische Erfassung der Fallwildaten (Koordinaten, Tierart, Datum)

Publikationen:

Suter, S.M., Reifler-Bächtiger, M., Koch, T., Stephani, A., Sigrist, B., Graf, R.F., Laube, P., Ratnaweera, N., Kaelin, I., Wróbel, A. 2020. Prävention von Wildtierunfällen auf Strassenverkehrsinfrastrukturen, VSS 2015/212.

Suter, S.M., Reifler-Bächtiger, M., Koch, T., Stephani, A., Laube, P., Ratnaweera, N., Kaelin, I., Wróbel 2020. Praxishilfe zur Prävention von Wildtierunfällen auf Verkehrsinfrastrukturen. ZHAW, Wädenswil.

Laube, P., Ratnaweera, N., Kaelin, I., Wróbel, Reifler-Bächtiger, M., Koch, T., Stephani, A., Suter S.M. 2020. Analysing and modelling animal-vehicle collision hot-spots for the Swiss road network. (in prep.)

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Stefan

Vorname: Suter

Amt, Firma, Institut: Dozent, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW Wädenswil

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "Prävention von Wildtierunfällen auf Strassenverkehrs-Infrastrukturen" liefern sehr wichtige Erkenntnisse zur Strassensicherheit. Dank dem aufgebauten Modell wird es in Zukunft leichter sein, Unfallhotspots mit dem Wild vorauszusagen. Es zeigt auch, wie wichtig die Sammlung und Bewirtschaftung von Daten zu Wildunfällen ist um Risikostrecken zu erkennen. Die Erkennung von solchen Unfall-Hotspots ist eine Kernaufgabe der Strassensicherheit. Der umfassende Review und die Bewertung der Effizienz von Präventionsmassnahmen gegen Kollisionen bieten eine wichtige Grundlage für die kantonalen Tiefbauämter. Die Begleitkommission ist sehr zufrieden mit dieser Arbeit. Diese bildet auch eine wichtige Grundlage für die Revision der VSS-Normen im Bereich Fauna und Verkehr. Die Kommission hofft das zusätzliche Daten diese Modell-Webkarte weiter verbessern werden.

Umsetzung:

- Potentielle Hotspots angehen
- Präventionsmethoden gezielter einsetzen
- Systematische Erfassung des Fallwilds wichtig
- VSS Normen Fauna und Verkehr

weitergehender Forschungsbedarf:

- Rothirsch im Mittelland
- AniMot
- Bioakustische Wildwarnanlagen

Einfluss auf Normenwerk:

Faunaanalysemethoden (640 692) update
Wildzäune (640 693a) update
Schutzmassnahmen (640 694) update Tab.1

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Marguerite

Vorname: Trocmé

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen ASTRA

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

M. Trocmé 14.12.20