



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

DOKUMENTATION
INVASIVE NEOPHYTEN
AN
NATIONALSTRASSEN

Automatisierte Kartierung

Ausgabe 2023 V1.02
ASTRA 88022

Impressum

Autoren

Marguerite Trocmé	ASTRA Abt. N-SSI, Vorsitz
Michael Nobis	WSL, Leitung, Bericht
Adrian Lang	WSL, ETHZ/CVL
Christoph Mayer	WSL, ETHZ/CVL
Christian Ginzler	WSL
Radu Timofte	ETHZ/CVL

Teilnehmer Workshop

Françoise Okopnik	ASTRA, Abtl-Ost
Martin Wyss	ASTRA, Abt. I Betrieb
Yvonne Zippert	ASTRA, F4

Erwin Egger	GE II
Christian Ryffel	GE V
Felix Schlumpf	GE VI
Kassio Pinho	GE VII
Adrian Aregger	GE VIII
Pierre Porret	GE IX
Willi Krummenacher	GE X
Pius Jauch	GE XI

Gian-Reto Walther	BAFU
-------------------	------

Jörg Bürgin	Kanton BE, Tiefbauamt
Sascha Gregori	Kanton GR, ANU
Mauro Togni	Kanton TI, Umweltamt

Originalsprache

Deutsch

Herausgeber

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abteilung Strassennetze N
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI
3003 Bern

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch heruntergeladen werden.

© ASTRA 2023

Abdruck - ausser für kommerzielle Nutzung - unter Angabe der Quelle gestattet.

Zusammenfassung

Invasive Neophyten sind neu auftretende, gebietsfremde Problempflanzen, deren Vorkommen mit ökonomischen, ökologischen oder gesundheitlichen Risiken verbunden sind. Diese Arten breiten sich zum Teil besonders entlang von Verkehrsachsen aus, doch ist ihre Verbreitung wegen der eingeschränkten Zugänglichkeit und der Grösse der Verkehrsinfrastruktur oft kaum bekannt. In der vorliegenden Arbeit werden die mit Kamerafahrten und automatisierter Arterkennung durch künstliche Intelligenz (KI) kartierten drei invasive Neophyten Götterbaum (*Ailanthus altissima*), Schmalblättriges Greiskraut (*Senecio inaequidens*) und Beifussblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) auf dem gesamten Nationalstrassennetz dokumentiert.

Der Ansatz der automatisierten Kartierung wurde in einem Vorprojekt für Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut an Autobahnen im Mittelland entwickelt [12]. Mit Kamerafahrten bei maximal 90 km/h wird zunächst die fahrbahnnahe Vegetation mit zwei Kameras auf beiden Seiten eines Fahrzeugs gefilmt und die Fahrzeugpositionen mit einem GPS-GNSS-Logger aufgezeichnet. Anschliessend erfolgt die automatisierte Arterkennung in georeferenzierten Bildern im Abstand von fünf Metern in jeweils 15 gleichgrossen Bildkacheln je Bild. Für die Kartendarstellung werden die Anzahl der Bildkacheln mit erkannten Artvorkommen an den Fahrzeugpositionen verwendet.

Die automatisierte Arterkennung beruht für Götterbaum und Greiskraut auf einem bereits vorhandenen neuronalen Netzen des Vorprojekts, während die KI für die Ambrosie zunächst mit Bildern aus Internetquellen trainiert wurde. Für alle Arten wurden die KI mit Bildern des gesamten Nationalstrassennetzes nachtrainiert.

Das Nationalstrassennetz wurde im Jahr 2021 über die Vegetationsperiode verteilt dreimal befahren, wobei eine Befahrung sieben Tage dauerte. Für die Verbreitungskarten erfolgte die KI-basierte Arterkennung in insgesamt 3.8 Millionen georeferenzierten Bildern mit 58 Millionen Bildkacheln. Die Verbreitungskarten von Götterbaum und Greiskraut basiert auf 99% «Precision», d.h. von 100 Bildern mit erkannten Artvorkommen wurde durchschnittlich in einem Bild die Art irrtümlich erkannt. Für die seltenere Beifussblättrige Ambrosie konnten dagegen auch bei niedrigerer «Precision» und somit auch unsicher erkannten Vorkommen sämtliche Bilder nachträglich überprüft werden. Das Risiko übersehener Vorkommen ist so reduziert und die Verbreitungskarte zeigt ausschliesslich bestätigte Funde. Neben Detailkarten mit der Anzahl erkannter Bildkacheln an den Fahrzeugpositionen wurden Übersichtskarten erstellt, in denen das Auftreten der drei Arten in längeren Streckenabschnitten mit vier Häufigkeitsklassen abgebildet ist. Die Karten stehen in digitaler Form zur Verfügung und können interaktiv im Webbrowser betrachtet werden.

Von den drei kartierten Arten zeigt die Beifussblättrige Ambrosie an Nationalstrassen die geringste Verbreitung (Abb. 4.11; Anhang I.3). Abgesehen von einem grossen Bestand bei Fribourg wurde die Art im Tessin und am Genfersee festgestellt. Sie kommt vereinzelt aber auch im übrigen Mittelland an Nationalstrassen vor. Der Verbreitungsschwerpunkt des deutlich häufigeren Götterbaums liegt im Tessin und am Genfersee, doch tritt die Art besonders in der Nähe von Städten auch in den übrigen Tieflagen auf (Abb. 4.9; Anhang I.1). Das Schmalblättrige Greiskraut ist die am weitesten verbreitete Art. Sie zeigt grosse Vorkommen im gesamten Mittelland und ist im Tessin dagegen deutlich seltener (Abb. 4.10; Anhang I.2).

Der KI-basierte Ansatz ermöglicht eine detaillierte Kartierung auf dem gesamten Nationalstrassennetz – es gibt jedoch auch Limitierungen. Der Ansatz ist effizient, wenn auf bereits trainierte neuronale Netze zurückgegriffen werden kann. Das Trainieren neuer Arten ist dagegen zunächst zeitaufwendig. Auch können nur Vorkommen kartiert werden, die von der Fahrbahn aus sichtbar sind. Die Sichtbarkeit der Arten wird zusätzlich durch die Phänologie der Arten und Mahd beziehungsweise Gehölzschnitt beeinträchtigt, so dass Mehrfachbefahrungen sinnvoll sind. Hinzu kommen von der KI irrtümlich erkannte oder übersehene Vorkommen. Diese Einschränkungen gelten auch für klassische Kartierungen zu Fuss oder aus einem langsam fahrenden Fahrzeug, doch können die Karten beim KI-basierten Ansatz nachträglich im Bildmaterial überprüft werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden drei Arten kartiert, doch gibt es weitere invasive Neophyten an Nationalstrassen. Ein umfassendes Management soll neben weiteren Arten auch die Eintragswege der Arten und die Ausbreitung von Nationalstrassen in die Umgebung berücksichtigen. So sind beispielsweise Samenbäume in Städten offenbar der Ursprung für die Ausbreitung des Götterbaums an Nationalstrassen. Netzweite Verbreitungskarten können solche Zusammenhänge aufzeigen und ein am Befall orientiertes Streckenmanagement unterstützen. Die Resultate zeigen, dass Streckenabschnitte wie auch Gebietseinheiten unterschiedlich stark betroffen sind und die drei Arten sich netzweit in unterschiedlichen Invasionsstadien befinden. Netzweite Verbreitungskarten können so durch Früherkennung das Freihalten von Strecken unterstützen oder auch auf besonders grosse Befallsherde hinweisen. Wiederholte netzweite Kartierungen können nicht zuletzt bei der Erfolgskontrolle von Massnahmen und für ein Monitoring der Bestände genutzt werden.

Götterbaum (*Ailanthus altissima*)

Digitale Formate zu Abb. 4.9:

- Interaktive Verbreitungskarte (47 MB): https://purl.org/wsl/astra_ailanthus_html
- Karte mit Häufigkeitsklassen (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_ailanthus_png

Schmalblättriges Greiskraut (*Senecio inaequidens*)

Digitale Formate zu Abb. 4.10:

- Interaktive Verbreitungskarte (49 MB): https://purl.org/wsl/astra_senecio_html
- Karte mit Häufigkeitsklassen (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_senecio_png

Beifussblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*)

Digitale Formate zu Abb. 4.11:

- Interaktive Verbreitungskarte (32 MB): https://purl.org/wsl/astra_ambrosia_html
- Karte mit Häufigkeitsklassen (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_ambrosia_png

Résumé

Les néophytes envahissantes sont des plantes exotiques problématiques récemment introduites sur le territoire et dont la présence comporte des risques économiques, écologiques ou sanitaires. Certaines de ces espèces se propagent principalement le long des axes de circulation, mais leur répartition est souvent mal connue en raison de la dimension et de la difficulté d'accès des routes nationales. Le présent travail établit une cartographie des trois néophytes envahissantes que sont l'ailante glanduleux (*Ailanthus altissima*), le séneçon du Cap (*Senecio inaequidens*) et l'ambroisie à feuilles d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia*) sur l'ensemble du réseau des routes nationales, grâce à des prises de vue au moyen de caméras embarquées sur des véhicules et à une identification automatisée des espèces par intelligence artificielle (IA).

Cette méthode de cartographie automatisée a été développée dans le cadre d'un avant-projet portant sur l'ailante glanduleux et le séneçon du Cap le long des autoroutes du Plateau [12]. Un véhicule équipé de deux caméras, dont la position est enregistrée à l'aide d'un dispositif GPS/GNSS, circule à une vitesse maximale de 90 km/h et filme ainsi la végétation proche de la chaussée. Ensuite, la reconnaissance automatisée des espèces s'effectue sur des photos géolocalisées, espacées de cinq mètres, et divisées en quinze carreaux de même taille. La représentation cartographique est établie en fonction du nombre de carreaux présentant des espèces reconnues aux différents endroits où le véhicule a été géolocalisé.

Pour l'ailante et le séneçon, la reconnaissance automatisée des espèces s'effectue à l'aide du réseau neuronal existant de l'avant-projet, tandis que pour l'ambroisie, l'IA a d'abord été entraînée avec des images provenant d'Internet. Pour toutes les espèces, l'IA a été réentraînée avec des images de l'ensemble du réseau routier national.

Le réseau des routes nationales a été parcouru trois fois en 2021, au cours de la période de végétation, chaque passage ayant duré sept jours. Afin de réaliser les cartes de répartition, la reconnaissance des espèces par intelligence artificielle a été effectuée sur un total de 3,8 millions de photos géolocalisées, soit 58 millions de carreaux. Les cartes de répartition de l'ailante glanduleux et du séneçon du Cap ont un degré de précision de 99 %, c'est-à-dire que sur 100 images où l'espèce est reconnue, une erreur d'identification a été relevée sur une image en moyenne. Pour l'ambroisie à feuilles d'armoise, plus rare, toutes les images ont pu être contrôlées ultérieurement, lorsque le degré de précision était plus faible et que la présence de l'espèce n'était donc pas certaine. Le risque de passer à côté de spécimens est ainsi réduit, et la carte de répartition ne comporte que les localisations confirmées. En plus des cartes détaillées montrant le nombre de carreaux identifiés à chaque emplacement du véhicule, des cartes synoptiques ont été générées ; elles indiquent la présence des trois espèces sur de longs tronçons, avec quatre classes de fréquence. Les cartes sont disponibles au format numérique et peuvent être consultées de manière interactive dans un navigateur web.

Parmi les trois espèces cartographiées, l'ambroisie à feuilles d'armoise est la moins répandue sur les routes nationales (Abb. 4.11 ; annexe I.3). Outre sa forte présence près de Fribourg, l'espèce a surtout été observée au Tessin et sur l'arc lémanique. Elle est également présente de manière sporadique sur le reste du Plateau, le long des routes nationales. L'aire de répartition principale de l'ailante glanduleux, nettement plus fréquent, se trouve au Tessin et sur l'arc lémanique, mais on peut également le voir dans d'autres régions de basse altitude, en particulier à proximité des villes (Abb. 4.9 ; annexe I.1). Le séneçon du Cap est l'espèce la plus répandue. Il est très présent sur l'ensemble du Plateau mais nettement plus rare au Tessin. (Abb. 4.10 ; annexe I.2).

Cette approche reposant sur l'IA permet de réaliser une cartographie détaillée sur l'ensemble du réseau routier national, mais elle se heurte aussi à des limites. Elle est efficace lorsqu'il est possible de recourir à des réseaux neuronaux déjà entraînés. Par contre, entraîner un système à reconnaître de nouvelles espèces prend beaucoup de temps au début. Par ailleurs, seuls les spécimens visibles depuis la chaussée peuvent être cartographiés. La visibilité des espèces est en outre influencée par leur phénologie et par la fauche de l'herbe ou la taille des arbres, de sorte qu'il est judicieux d'effectuer plusieurs passages.

À cela s'ajoutent les spécimens détectés par erreur ou ignorés par l'IA. Ces limites s'appliquent également aux cartographies classiques réalisées à pied ou depuis un véhicule roulant à faible vitesse, mais l'approche avec IA permet de contrôler les cartes a posteriori grâce aux images.

Trois espèces ont été cartographiées dans le présent travail, mais d'autres néophytes envahissantes sont présentes sur les routes nationales. Une gestion globale doit prendre en considération, outre les autres espèces, leurs voies d'introduction et la progression des routes nationales dans l'environnement. Par exemple, les arbres semenciers des villes semblent être à l'origine de la propagation de l'ailante glanduleux le long des routes nationales. Des cartes de répartition à l'échelle du réseau peuvent mettre en évidence de telles corrélations et contribuer à une gestion des routes tenant compte de l'infestation. Les résultats montrent que les tronçons et les unités territoriales sont touchés à des degrés variables et que les trois espèces se trouvent à des stades d'infestation différents sur l'ensemble du réseau. Ces cartes peuvent ainsi contribuer à maintenir les tronçons dégagés grâce à une détection précoce ou à signaler des foyers d'infestation particulièrement importants. Des cartographies répétées à l'échelle du réseau peuvent notamment être utilisées pour contrôler l'efficacité des mesures et pour le suivi des populations.

Ailante glanduleux (*Ailanthus altissima*)

- Carte de répartition (1,4 Mo) : https://purl.org/wsl/astra_ailanthus_png

Séneçon du Cap (*Senecio inaequidens*)

- Carte de répartition (1,4 Mo) : https://purl.org/wsl/astra_senecio_png

Ambrosie à feuilles d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia*)

Version numérique de la Abb. 4.11 :

- Carte de répartition (1,4 Mo) : https://purl.org/wsl/astra_ambrosia_png

Sintesi

Le neofite invasive sono piante alloctone problematiche, di recente comparsa, la cui presenza comporta rischi economici, ecologici o sanitari. Alcune specie si diffondono in particolare lungo gli assi stradali, ma il fenomeno spesso è poco noto a causa dell'accessibilità limitata e dell'estensione della rete viaria. Il presente lavoro contiene una mappatura della presenza lungo le strade nazionali di tre specie aliene, ailanto (*Ailanthus altissima*), senecione sudafricano (*Senecio inaequidens*) e ambrosia con foglie di artemisia (*Ambrosia artemisiifolia*), identificate mediante telecamere in movimento e riconoscimento automatizzato basato sull'intelligenza artificiale (IA).

Il metodo della cartografia automatizzata è stato sviluppato in un progetto preliminare riguardante la presenza di ailanto e senecione sudafricano lungo le autostrade dell'Altopiano [12]. La vegetazione ai bordi della carreggiata viene prima filmata da due telecamere poste su entrambi i lati di un veicolo circolante a una velocità massima di 90 km/h, mentre un localizzatore GPS-GNSS ne registra la posizione. Successivamente si procede al riconoscimento automatizzato su immagini georeferenziate a cinque metri di distanza l'una dall'altra, ciascuna divisa in 15 celle di uguali dimensioni. Per la rappresentazione cartografica si utilizza il numero delle celle in cui la specie è stata individuata nella posizione del veicolo.

Per l'ailanto e il senecione il riconoscimento automatizzato si basa su una rete neurale già presente nel progetto preliminare, mentre per l'ambrosia l'IA è stata preventivamente addestrata con immagini tratte da Internet e, per tutte le specie, attraverso foto dell'intera rete delle strade nazionali.

Nel 2021 la rete autostradale è stata ispezionata in tre occasioni, ogni volta su un arco temporale di sette giorni, durante il periodo vegetativo. Per redigere le mappe distributive il riconoscimento basato sull'IA è stato effettuato su un totale di 3,8 milioni di immagini georeferenziate con 58 milioni di celle. La «precisione» nel caso dell'ailanto e del senecione è pari al 99%, vale a dire che su 100 immagini di esemplari identificati, mediamente una sola era un «falso positivo». Per quanto riguarda l'ambrosia, più rara, la minore precisione e i potenziali falsi positivi sono stati controbilanciati dalla possibilità di verificare a posteriori tutte le foto. In questo modo si riduce il rischio di falsi negativi e la mappa riporta soltanto informazioni comprovate. Oltre a cartine dettagliate, sono state realizzate mappe panoramiche in cui la presenza dei tre esemplari su tratti più lunghi è riportata con quattro categorie di frequenza; la documentazione è disponibile in formato digitale e consultabile in modo interattivo nel browser.

Tra le tre neofite mappate, l'ambrosia sembra la meno diffusa lungo le strade nazionali (Abb. 4.11; all. I.3): oltre a Friburgo, dove risulta essere particolarmente presente, è stata individuata anche in Ticino e lungo il lago Lemano e occasionalmente nel resto dell'Altopiano. L'ailanto, molto più frequente, si trova soprattutto in Ticino e ai bordi del lago Lemano, ma anche a bassa quota, in particolare in prossimità delle città (Abb. 4.9; all. I.1). Il senecione sudafricano è il più diffuso, specialmente nell'intero Altopiano ed è invece nettamente meno frequente in Ticino (Abb. 4.10; all. I.2).

Il sistema coadiuvato dall'IA, sebbene consenta una mappatura dettagliata del territorio, ha comunque dei limiti: si rivela efficiente quando può ricorrere a reti neurali già addestrate; l'apprendimento di nuove specie, invece, richiede inizialmente tempo. Inoltre, è possibile rappresentare su mappa solo esemplari visibili dalla carreggiata; la visibilità dipende altresì da fenologia, sfalcio e potatura, motivo per cui è opportuno effettuare più sopralluoghi. A ciò si aggiungono falsi positivi e falsi negativi. Queste limitazioni riguardano anche la cartografia tradizionale effettuata a piedi o con un veicolo circolante a bassa velocità, ma il metodo moderno consente di verificare in un secondo momento le mappe su foto.

Il presente lavoro contiene la cartografia di tre esemplari, però lungo le strade nazionali è presente anche altra flora infestante. Una gestione completa deve prendere in considerazione, oltre alle altre specie, anche le vie di ingresso e la proliferazione nelle aree circostanti: per esempio, all'origine della propagazione dell'ailanto lungo le autostrade sembrano esserci le piante madri in città. Le mappe possono evidenziare simili correlazioni e contribuire a gestire i tratti predisposti all'insediamento di organismi infestanti. I risultati

mostrano che il fenomeno interessa le sezioni viarie e le Unità territoriali in misura diversa e che le tre specie sono presenti in differenti stadi di invasione. Le mappe dell'intera rete possono favorire l'eradicazione mediante il rilevamento precoce o indicare le aree maggiormente colpite. Cartografie sistematiche possono infine essere utilizzate per controllare l'efficacia delle misure e monitorare la presenza della flora infestante.

Ailanto (*Ailanthus altissima*)

- Mappa con categorie di frequenza (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_ailanthus_png

Senecio sudafricano (*Senecio inaequidens*)

- Mappa con categorie di frequenza (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_senecio_png

Ambrosia con foglie di artemisia (*Ambrosia artemisiifolia*)

Formato digitale *Abb. 4.11*:

- Mappa con categorie di frequenza (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_ambrosia_png

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	2
	Zusammenfassung	3
	Résumé	5
	Sintesi	7
1	Einleitung	11
1.1	Zweck	11
1.2	Geltungsbereich	11
1.3	Adressat	11
1.4	Inkrafttreten und Änderungen	11
2	Ausgangslage	12
2.1	Invasive Neophyten an Nationalstrassen und Ziel der Arbeit	12
2.2	Steckbriefe der kartierten Arten	12
2.2.1	Götterbaum (<i>Ailanthus altissima</i>)	12
2.2.2	Schmalblättriges Greiskraut (<i>Senecio inaequidens</i>)	14
2.2.3	Beifussblättrige Ambrosie (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>).....	15
3	Ansatz der automatisierten Kartierung	17
3.1	Filmen der fahrbahnnahen Vegetation.....	17
3.2	Arterkennung durch künstliche Intelligenz	17
3.3	Schwellenwerte der Arterkennung	19
4	Netzweite Verbreitungskarten	21
4.1	Götterbaum (<i>Ailanthus altissima</i>)	23
4.2	Schmalblättriges Greiskraut (<i>Senecio inaequidens</i>)	24
4.3	Beifussblättrige Ambrosie (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>).....	25
5	Vergleich der Kartierungen 2019 und 2021	26
6	Grenzen der automatisierten Kartierung	28
6.1	Sichtbarkeit der Arten und Bestände	28
6.2	Aufwand für das Trainieren der neuronalen Netze	28
6.3	Irrtümlich erkannte und übersehene Vorkommen.....	28
7	Aspekte einer netzweiten Neophytenbekämpfung	31
7.1	Welche Arten sollen berücksichtigt werden?	31
7.2	Eintrag, Ausbreitung und Austrag invasiver Neophyten	32
7.3	Wie weit sind die Arten bereits verbreitet?.....	33
7.4	Am Befall orientiertes Streckenmanagement.....	34
7.5	Allgemeine Freihaltezonen und Schwerpunktgebiete.....	35
7.6	Grüne Mittelstreifen fördern Ausbreitung	35
7.7	Ausbreitung von Nationalstrassen in die Umgebung	37
7.8	Früherkennung, Monitoring und Erfolgskontrolle	39
	Anhänge	41
	Literaturverzeichnis	45
	Auflistung der Änderungen	47

1 Einleitung

1.1 Zweck

Die vorliegende Dokumentation beschreibt eine Methodologie zur automatischen Kartierung von invasiven Neophyten mit Kamerafahrten entlang der Nationalstrassen. Sie beinhaltet die Resultate einer netzweiten Kartierung von 3 Neophytenarten aus dem Jahr 2021: Götterbaum (*Ailanthus altissima*), Schmalblättriges Greiskraut (*Senecio inaequidens*) und Beifussblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*).

1.2 Geltungsbereich

Die Methodologie kann für die Zustandserhebung von Grünräumen und die Erhebung von invasiven Neophyten entlang von Strassen angewendet werden.

1.3 Adressat

Diese Dokumentation richtet sich an die Erhaltungsplanung und die Gebietseinheiten.

1.4 Inkrafttreten und Änderungen

Die vorliegende Dokumentation tritt am 15.03.2023 in Kraft. Die Auflistung der Änderungen ist auf Seite 47 zu finden

2 Ausgangslage

2.1 Invasive Neophyten an Nationalstrassen und Ziel der Arbeit

Eine Auswirkung der Globalisierung, insbesondere des globalen Handels, ist die weltweite Zunahme gebietsfremder Arten. Es handelt sich dabei um Organismen, die erst durch den Menschen absichtlich oder unabsichtlich und oft über grosse Entfernungen in neue Gebiete gelangen und sich dort ausbreiten. Sind die Organismen erst nach der Entdeckung Amerikas in ein Gebiet gekommen, werden sie allgemein als **Neobiota** bezeichnet – im Fall von Pflanzen als **Neophyten**. Es ist davon auszugehen, dass die Artenzahlen und Bestände von Neobiota weltweit weiter zunehmen werden [1][2]. Das gilt auch für die Schweiz [3].

Invasive Neophyten sind **gebietsfremde Problemarten** deren Auftreten mit ökonomischen, ökologischen oder gesundheitlichen Risiken verbunden ist [3][4][5][6][7][8]. Für einen Teil dieser Arten sind Verkehrsinfrastruktur wie Strassen und Eisenbahnlinien bedeutende Ausbreitungskorridore [9][10][11]. Samen oder Pflanzenteile invasiver Neophyten werden an Fahrzeugen, durch Transportverluste oder bei Unterhaltmassnahmen entlang der Verkehrsinfrastruktur über grössere Entfernungen verschleppt, oder die Arten breiten sich selbstständig entlang der Verkehrswege aus. **Verkehrsinfrastruktur trägt so zur Ausbreitung invasiver Neophyten bei** und kann Ausgangspunkt für die Besiedlung der angrenzenden Landschaft sein. Eine besondere Bedeutung haben dabei Nationalstrassen, da sie eine höhere Verkehrsdichte aufweisen und Neophyten so häufiger und über grössere Entfernungen verschleppt werden.

Der Umgang mit besonders invasiven Neophyten wird **durch Bund und Kantone geregelt**. Für einzelne Arten besteht eine Melde- und Bekämpfungspflicht. Diese Regelungen sollen im Rahmen der laufenden Revision des Umweltschutzgesetzes durch Verordnungen und ein **Stufenkonzept** für invasive Arten [3] weiter präzisiert werden. Wegen der zum Teil raschen Ausbreitung invasiver Neophyten, der Grösse des Strassennetzes und der erschwerten Zugänglichkeit an Strassen ist die aktuelle Verbreitung der Arten an Nationalstrassen jedoch kaum bekannt. Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL hat daher in Zusammenarbeit mit dem Computer Vision Lab der ETH Zürich in einem durch VSS und ASTRA geförderten Pilotprojekt einen **Ansatz zur automatisierten Erfassung invasiver Neophyten an Strassen** entwickelt [12]. Dieser basiert auf Kamerafahrten und der automatisierten Arterkennung mit Hilfe künstlicher Intelligenz. Er wurde an Autobahnen im Schweizer Mittelland für die beiden invasiven Neophyten Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut entwickelt.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, diesen Ansatz der automatisierten Kartierung invasiver Neophyten auf das **gesamte Nationalstrassennetz** auszudehnen und dabei die Beifussblättrige Ambrosie als weiteren Art zu berücksichtigen. Im Anschluss werden **allgemeine Aspekte für ein Neophytenmanagement** besprochen und die Ergebnisse der Kartierung hinsichtlich ihres Nutzens diskutiert.

2.2 Steckbriefe der kartierten Arten

Es folgen Kurzbeschreibungen der drei kartierten invasiven Neophyten (aktualisiert und erweitert aus [12]). Kriterien für die Auswahl der Arten werden in Kapitel 7.1 besprochen.

2.2.1 Götterbaum (*Ailanthus altissima*)

Der Götterbaum stammt **ursprünglich aus China** und wurde bereits in den 1740er Jahren nach Europa eingeführt [13]. Er ist gegenüber Salz und Trockenheit tolerant und fand in der Schweiz lange Zeit als **Strassenbaum vor allem in Städten** Verwendung. Die Art **wächst sehr schnell**, bis zu drei Meter pro Jahr, und erreicht unter günstigen Wachstumsbedingungen eine Höhe von rund 30 Metern [13]. Der Blattaustrieb erfolgt erst spät im Mai, die Art blüht von Juni bis Juli, ihre Samen reifen zwischen September und Oktober und der Laubfall erfolgt im Gegensatz zum ähnlichen Essigbaum ohne Herbstfärbung Anfang bis Mitte November. Der Götterbaum ist **zweihäusig**, d.h. Pollen und Samen werden von unterschiedlichen Pflanzen gebildet. Unter günstigen Bedingungen produzieren

Jungpflanzen bereits nach vier Jahren Samen. Ausgewachsene Einzelbäume können deutlich über eine Million Samen bilden [14]. Die Samen werden primär durch den Wind und meist über kürzere Distanzen ausgebreitet, können aber auch mit Wasser über grössere Strecken transportiert [13] und **mit Fahrzeugen verschleppt** werden. Für die Nahausbreitung ist zusätzlich **Wurzelbrut** bedeutend. Ein einzelnes Individuum kann so noch vor der Samenbildung und trotz mehrfachem Zurückschneiden durch Stockausschläge und Wurzelsprosse zur Besiedelung grösserer Flächen führen. Wurzelbrut wurde noch in einem Abstand von 15 bis 27 Metern von der Ausgangspflanze beobachtet [15]. Entlang von Strassen konnte eine Besiedelung durch Wurzelbrut auf einer Länge von 120 Metern Länge beobachtet werden [16].

Das starke Wachstum des Götterbaums kann zu einem **Mehraufwand beim Strassenunterhalt** führen und die **Verkehrssicherheit** beeinträchtigen [17]. Da die Art sich neben Samen auch vegetativ durch Wurzelsprosse lokal ausbreitet und mit Stockausschlägen gut regeneriert, ist ihr **Zurückdrängen aufwendig**. Der Götterbaum kann **Bauwerke schädigen** und dringt ausserhalb von Siedlungen und Verkehrsinfrastruktur **auch in Wälder** ein. Letzteres konnte in der Schweiz seit längerem im Tessin beobachtet werden [18] und tritt neuerdings auch in der Nordschweiz auf [19]. Der Götterbaum steht seit 2001 auf der **«Schwarzen Liste»** invasiver Neophyten der Schweiz [4][6] und ist eine prioritäre Art beim Management invasiver Neophyten in verschiedenen Kantonen (z.B. Kanton Zürich, [20]). In der aktuellen Publikation «Gebietsfremde Arten in der Schweiz» des **BAFU** [3] wird der Götterbaum als invasive Art geführt, für die eine Einstufung gemäss Stufenkonzept erfolgen soll. In der **Europäischen Union** steht der Götterbaum seit 2019 auf der «Liste invasiver gebietsfremder Arten von unionsweiter Bedeutung» [8].



Abb. 2.1 Götterbaum auf einem Autobahnmittelstreifen. Der dichte Bestand kann durch Wurzelbrut aus einem einzelnen Samen entstanden sein. Wurzelbrut wird durch Zurückschneiden gefördert.

2.2.2 Schmalblättriges Greiskraut (*Senecio inaequidens*)

Das Schmalblättrige Greiskraut stammt **ursprünglich aus Südafrika** und wurde Ende des 19. Jahrhunderts mehrfach mit Rohwolle nach Europa eingeschleppt [9]. Es handelt sich um einen mehrjährigen, 40-60 cm hohen (an Zäunen oder Gehölzen auch höher), basal verholzenden Halbstrauch. Die Art kann bei Störung wie regelmässiger Mahd ähnlich einer Staude auch nur mit krautigen Trieben wachsen. Das Schmalblättrige Greiskraut zeichnet sich durch eine **lange Blütezeit** von Juni bis Dezember aus, wobei ältere Triebe aus den Vorjahren bereits Anfang Mai erste Blüten bilden [21]. Die Samen der Art können durch den **Wind über grössere Distanzen ausgebreitet** werden – also auch durch den Fahrtwind von Fahrzeugen. Für ältere Pflanzen wird eine Samenproduktion von 18'000 bis 29'000 Samen angegeben [9]. **Jungpflanzen können bereits im ersten Jahr Samen bilden** [22], und selbst Keimlinge aus Samen derselben Vegetationsperiode, die ab Juli-August austreiben, können noch im selben Jahr zur Blüte und Samenreife gelangen [21]. Es wird angenommen, dass die Art eine **langlebige Samenbank** aufbaut (30-40 Jahre in [23]).

In der Schweiz wurde das Schmalblättrige Greiskraut erstmals 1921 nachgewiesen und kam damals eventuell nur vorübergehend vor [24]. So wurde die Art beispielsweise in der Umgebung von Basel erst seit Mitte der 1980er Jahre festgestellt [25], nachdem sich die Art in Deutschland Richtung Süden ausgebreitet hatte [26]. Im Stadtgebiet von Zürich wurde sie erstmal 1995 auf Bahnarealen [27][28] und kurze Zeit später auch an Autobahnen beobachtet [29]. Die Art hat sich seither **im Schweizer Mittelland besonders entlang von Autobahnen rasant ausgebreitet**. Die Besiedlung von Siedlungsgebieten erfolgte dagegen offenbar meist sekundär.

Das Schmalblättrige Greiskraut enthält für den Menschen und Nutztiere schädliche **Pyrrrolizidinalkaloide**, die in der Leber zu hochtoxischen Metaboliten abgebaut werden, die **akute und chronische Leberschäden** verursachen können. Dies ist besonders für die Landwirtschaft problematisch, sollte die Art von Strassenrändern auf Kulturen, Wiesen oder Weiden übergehen. Im Ursprungsland Südafrika sind tödlichen Vergiftungen bei Kühen bekannt [30], und aus Frankreich wurde mit der Ausbreitung des Schmalblättrigen Greiskrauts eine Zunahme von Vergiftungsfällen bei Pferden berichtet [31]. Im Gegensatz zu frischen Pflanzen, die von Weidetieren gemieden werden, trifft dies für Heu oder Silage nicht zu. Pyrrolizidinalkaloide können über Honig oder Milch auch vom Menschen aufgenommen werden. Kontaminierte Lebensmittel müssen aus dem Verkehr gezogen werden [32].

An Autobahnen besiedelt das Schmalblättrige Greiskraut vor allem fahrbahnahe, offene oder lückige Vegetation der intensiven Unterhaltszone (Definition gemäss [33]). Die Art kann nach Mahd bereits innerhalb von 6-8 Wochen wieder blühen und so gegenüber schlechter regenerierenden Konkurrenzarten **gegebenenfalls durch Mahd indirekt gefördert** werden [34]. Das Schmalblättrige Greiskraut zeichnet sich durch eine hohe Herbizidresistenz aus [35], wodurch das Zurückdrängen der Art weiter erschwert wird.

Das Schmalblättrige Greiskraut steht seit 2001 auf der «**Schwarzen Liste**» invasiver Neophyten der Schweiz [4][6] und gehört zu den verbotenen Arten gemäss Anhang 2 der **Freisetzungsverordnung** [36]. Im Kanton Zürich besteht eine **Melde- und Bekämpfungspflicht** für Grundstückseigentümer und Bewirtschafter [37]. Die Art wird in einem Merkblatt des **ASTRA** zur Bekämpfung invasiver Neophyten an Nationalstrassen 2014 als **eine der vier wichtigsten Arten** genannt [38]. In der aktualisierten Publikation «Gebietsfremde Arten in der Schweiz» des **BAFU** [3] wird die Art ebenfalls als invasiver Neophyt geführt.



Abb. 2.2 Das Schmalblättrige Greiskraut auf einem Autobahnmittelstreifen. Dichte Bestände kommen hier oft zur Blüte und können aussamen, während im Hintergrund die fahrbahnahe Vegetation am Seitenstreifen bereits gemäht wurde.

2.2.3 Beifussblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*)

Die Beifussblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*) – auch Wermutblättrige Ambrosie oder Aufrechtes Traubenkraut genannt – stammt ursprünglich aus Nordamerika. Die Art ist **einjährig**, entwickelt sich erst spät im Jahr und wird 20-90(-180) cm hoch. Die Pflanzen keimen ab März und **blühen erst von August bis Oktober**. Durchschnittliche Pflanzen produzieren 3'000 bis 4'000 Samen, wobei für besonders grosse Individuen bis zu 62'000 Samen angegeben werden [39]. Die natürliche Ausbreitung findet fast ausschliesslich in unmittelbarer Nähe der Samenpflanzen statt (< 2 Meter), doch wird auch über Ausbreitung durch Vögel, Nagetiere und mit Wasser berichtet [40]. An Strassen wird die Ausbreitung durch den Fahrtwind der Fahrzeuge begünstigt. Samen treten hier in Fahrtrichtung noch im Abstand von 3-15 Metern zur Samenpflanze auf [41]. Die Art bildet eine ausdauernde Samenbank, wobei die Samen **mehrere Jahrzehnte lang keimfähig** bleiben [40].

Die Art gefährdet durch **hoch-allergenen Pollen** die menschliche Gesundheit, kann Dyspnoe (Atemnot) und Asthmaanfällen auslösen und erhöhte Kosten im Gesundheitswesen verursachen. Es ist bekannt, dass ein hoher Anteil der Bevölkerung auf *Ambrosia*-Pollen reagieren [40]. Als spätblühende Art verlängert die Beifussblättrige Ambrosie ferner die Pollensaison für Allergiker [42]. Auch in der Landwirtschaft gilt die Beifussblättrige Ambrosie durch Verringerung der Ernteerträge und Bekämpfungskosten als bedeutende Problempflanze [43] auch wenn die Schäden in der Schweiz noch gering ausfallen. Betroffen sind vor allem Sommerkulturen wie Sonnenblumen oder Soja, aber auch Erbsen, Raps und weitere Kulturen. Die Beifussblättrige Ambrosie verringert das Wachstum der Kulturpflanzen dabei durch das Ausscheiden chemischer Substanzen (**Allelopatie**). Gemäss einer aktuellen Studie gehört die Beifussblättrige Ambrosie zusammen mit einer zweiten *Ambrosia*-Art in Europa zu den 10 Arten(gruppen), welche die höchsten nachgewiesenen Kosten durch invasive Neobiota verursacht [44].

In der Schweiz ist die Beifussblättrige Ambrosie bereits seit 1865 bekannt, breitete sich aber erst seit den 1990er Jahren parallel mit einer deutlichen Zunahme auch in Deutschland stärker aus. Zahlreiche und teilweise grössere Vorkommen wurden vor allem bei Genf und im Tessin bekannt, während die Art im Mittelland und bis in Alpentäler hinein meist mit kleineren Vorkommen gemeldet wurde. In die Schweiz gelangte die Art vermutlich mit **landwirtschaftlichen Erntemaschinen und kontaminiertem Erdaushub** sowie durch Einschleppung **mit Fahrzeugen**, da frühe Fundorte unter anderem an Autobahnen bekannt wurden [45]. Ein wichtiger Einschleppungsweg ist ferner **Vogelfutter**, das mit *Ambrosia*-Samen verunreinigt ist. Nachdem dieses inzwischen keine keimfähigen *Ambrosia*-Samen mehr enthalten darf und seitens der Kantone Vorkommen der Quarantäneart überwacht

und bekämpft werden, sind die Funde der Beifussblättrigen Ambrosie teilweise wieder zurückgegangen [45]. Für die weitere Ausbreitungsdynamik wird die Fortführung dieser Massnahmen entscheidend sein, zumal die Art vom Klimawandel profitieren dürfte [40].

Die Beifussblättrige Ambrosie ist seit 2001 auf der «**Schwarzen Liste**» invasiver Neophyten der Schweiz [4][6] und zählt seit 2008 zu den verbotenen Arten gemäss Anhang 2 der **Freisetzungsverordnung** [36]. Sie gilt gemäss **Pflanzengesundheitsverordnung** [46] als besonders gefährliches Unkraut. Wie das Schmalblättrige Greiskraut wird die Art seitens **ASTRA** in einem Merkblatt zur Bekämpfung invasiver Neophyten an Nationalstrassen 2014 als **eine der vier wichtigsten Arten** genannt [38]. In der aktualisierten Publikation «Gebietsfremde Arten in der Schweiz» listet das **BAFU** [3] die Beifussblättrige Ambrosie ebenfalls als invasiven Neophyt.



Abb. 2.3 Vorkommen der Beifussblättrigen Ambrosie auf einem Mittelstreifen der A1 bei Payerne (VD). Im linken Bild der Juli-Befahrung ist im vorderen Bereich ein Band von Jungpflanzen zu sehen. Das rechte Bild zeigt das gleiche Vorkommen mit blühenden Pflanzen während der dritten Befahrung im September.

3 Ansatz der automatisierten Kartierung

Die Kartierung der invasiven Neophyten erfolgte durch **Kamerafahrten** und eine Auswertung des Bildmaterials mit automatisierter **Arterkennung durch künstliche Intelligenz** (maschinelles Sehen, Deep Learning). Der Ansatz wurde im Schweizer Mittelland für Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut entwickelt und ist ausführlich in [12] beschrieben. Im Folgenden wird das Vorgehen zusammengefasst und auf Weiterentwicklungen eingegangen.

3.1 Filmen der fahrbahnnahen Vegetation

Für die Kartierung wird zunächst die **fahrbahnahe Vegetation** vom fließenden Verkehr aus auf beiden Seiten eines Fahrzeugs senkrecht zur Fahrtrichtung gefilmt (Abb. 3.4). Das Fahrzeug fährt mit **maximal 90 km/h**, und **zwei Kameras** (Sony A7s II) filmen mit 24 Bildern pro Sekunde in 4K-Auflösung (3840 x 2160 Pixel). Schnellstrassen mit Mittelstreifen werden in beide Fahrtrichtungen befahren. Im Jahr 2021 wurde während drei Perioden (25.5.-3.6.; 20.7.-31.7. und 17.9.-25.9.) an jeweils sieben Tagen das **gesamte Nationalstrassennetz** befahren (ca. 1860 km Strassenlänge; ohne zusätzliche Strecken gemäss neuem Bundesbeschluss über das Nationalstrassennetz – NEB 2020). Die **wiederholte Befahrung** dient dazu, die unterschiedliche Phänologie der Arten besser abzudecken und den Einfluss von Mahd und Gehölzschnitt auf die Kartierung zu reduzieren. Während den Fahrten wird die Position des Fahrzeugs mit einem GPS-GNSS-Logger (Qstarz BL1000GT) aufgezeichnet, um später eine Georeferenzierung der Bilder vornehmen zu können. Die Kartierung erfolgt mit Bildern, die im Abstand von fünf Metern aus den Filmen extrahiert werden.

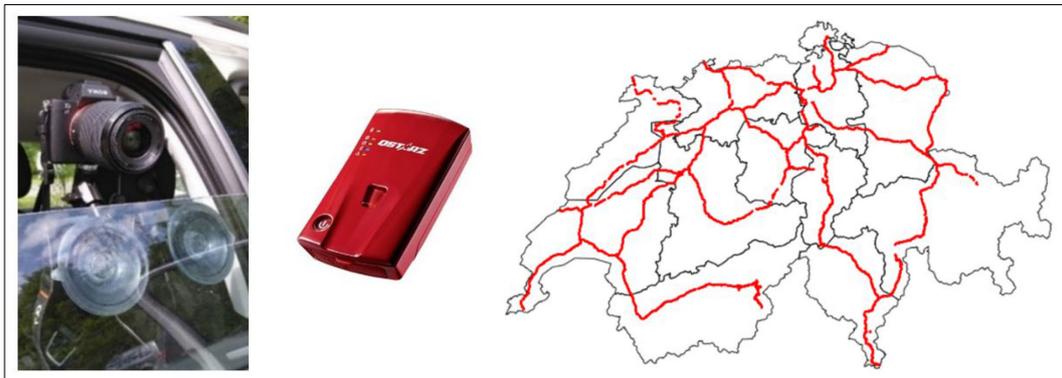


Abb. 3.4 Eine der zwei Kameras für das Filmen der fahrbahnnahen Vegetation, GPS-GNSS-Logger zur Erfassung der Fahrzeugposition und das Netz der kartierten Nationalstrassen. In der Karte sind in Rot die Koordinaten der ausgewerteten Bilder dargestellt. Unterbrechungen stellen Tunnelpassagen dar.

3.2 Arterkennung durch künstliche Intelligenz

Die automatisierte Arterkennung erfolgt mit **Resnet152**, einem Convolutional Neural Network (CNN), in 15 gleichgrossen Bildkacheln je Bild [12]. Für **Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut** konnte auf das bereits mit Bildern von Schweizer Nationalstrassen trainierte CNN der Vorstudie zurückgegriffen werden, welches für Mittellandautobahnen eine gute Arterkennung zeigte (bei F1-Optimierung für beide Arten «Precision» > 0.97, d.h. mehr als 97% der erkannten Bildkacheln enthalten tatsächlich die Art, und «Recall» > 0.87, d.h. mehr als 87% der vom Botaniker markierten Kacheln wurden vom neuronalen Netz erkannt; siehe [12]).

Bei der Arterkennung auf dem gesamten Nationalstrassennetz ergab eine visuelle Überprüfung für Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut allerdings besonders ausserhalb des Mittellands immer wieder irrtümlich erkannte Vorkommen in mehreren Bildkacheln pro Bild (sog. «False Positives»). Dies war besonders auffällig in höheren Lagen, in denen

beide Arten nicht vorkommen. Das Netz wurde daher mit Bildern des gesamten Nationalstrassennetzes weitertrainiert. Für die Auswahl zusätzlicher Trainingsbilder wurde das **Nationalstrassennetz in 250 Segmente aufgeteilt**, die jeweils gleich viele Bilder aufweisen (Abb. 3.5), um eine übermässige Anpassung des neuronalen Netzes an einzelne Vorkommen oder Regionen zu vermeiden und so die allgemeine Anwendbarkeit der Arterkennung auf dem gesamten Nationalstrassennetz besser zu gewährleisten. In jedem Segment wurden für Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut jeweils zwei Bilder mit der höchsten Anzahl erkannter Bildkacheln (bei F1-optimiertem Schwellenwert) bestimmt und vom Botaniker überprüft, d.h. das Vorkommen oder Fehlen der Arten für jede Bildkachel notiert. Mit diesen zusätzlichen Bildkacheln und Angaben wurde das Netz weitertrainiert, anschliessend erneut das Vorkommen der Arten für das gesamte Nationalstrassennetz vorhergesagt und der Vorgang insgesamt fünfmal wiederholt. Mit Hilfe dieses **Active Learning-Ansatzes** konnten irrtümlich erkannten Vorkommen mit mehreren erkannten Kacheln je Bild deutlich reduziert werden, ohne dass die Güte der Arterkennung für unabhängige Testbilder aus der Vorstudie zurückging.

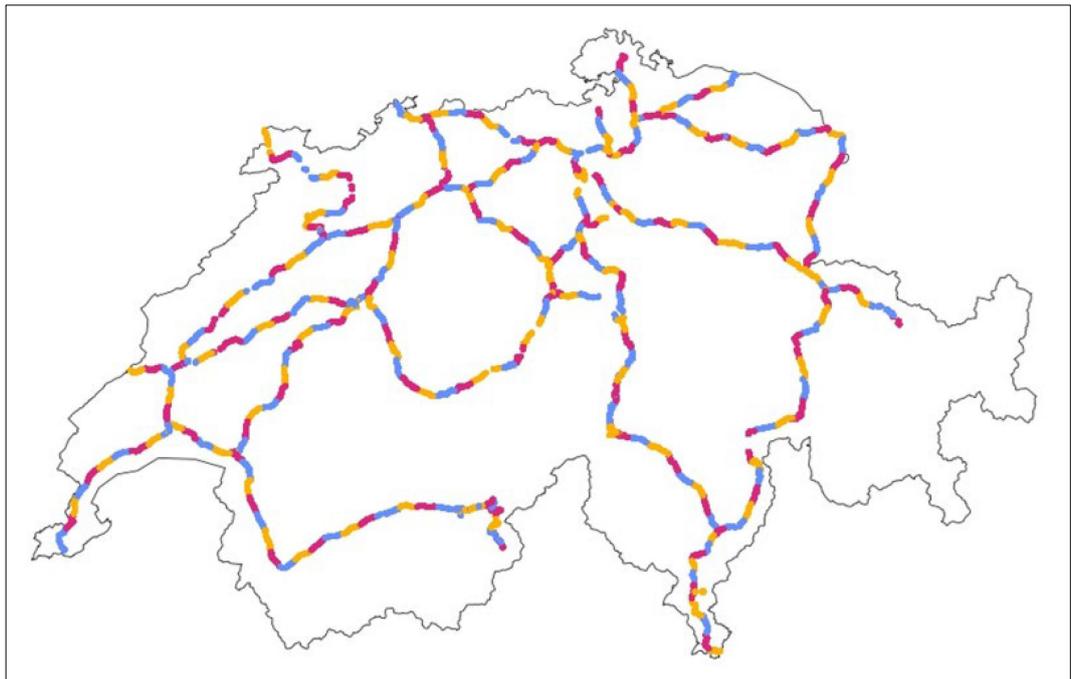


Abb. 3.5 Das Nachtrainieren der neuronalen Netze erfolgte mit Bildern aus 250 Segmenten des gesamten Nationalstrassennetzes, um der übermässigen Anpassung des Netzes an einzelne Populationen oder Streckenabschnitte entgegenzuwirken.

Für die **Beifussblättrige Ambrosie** konnte kein bereits trainiertes neuronales Netz der Vorstudie genutzt werden, da die Art dort nicht berücksichtigt wurde. Beim Sichten des Bildmaterials war die Art nur von einzelnen Zufallsfunden bekannt, die ausschliesslich aus der zweiten und dritten Befahrung stammten. Die Beifussblättrige Ambrosie entwickelt sich erst spät im Jahr und blüht vor allem zwischen August und Oktober. Für die Kartierung der Art wurde daher nur Bildmaterial der zweiten und dritten Befahrung ausgewertet. Da die Art an Nationalstrassen deutlich seltener als Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut ist, konnten nicht genügend Trainingsbilder für das Trainieren des neuronalen Netzes gefunden werden. Basierend auf Angaben des **«Global Biodiversity Information Facility» Portals (www.gbif.org)** wurden daher zunächst 11'500 Bilder aus Internet-Quellen heruntergeladen. Diese enthielten auch Makroaufnahmen, Herbarbelege und andere vom eigenen Bildmaterial stark abweichende Aufnahmen, so dass zunächst **711 Bilder** ausgewählt wurden, auf denen die Beifussblättrige Ambrosie in ähnlichen Situationen wie an Nationalstrassen vorkam. Zusammen mit 19'976 weiteren GBIF-Bildern ohne Ambrosie (zufällige Gefässpflanzenaufnahmen) wurde ein erstes neuronales Netz trainiert (wiederum Resnet152). Mit einer «Precision» von 1.00 und einem «Recall» von 0.95 erkannte das Netz Vorkommen der Beifussblättrigen Ambrosie in den GBIF-Bildern sehr gut. Allerdings war dies **nicht auf Nationalstrassen übertragbar**. Hier trat die Art zwar in Bildern mit höchsten

Wahrscheinlichkeiten für Vorkommen vereinzelt auf, doch liessen sich diese Funde anhand der Wahrscheinlichkeiten nicht gut von Bildern ohne Vorkommen trennen. Das Netz konnte daher nicht direkt zur Kartierung der Art verwendet werden.

Um die Güte der Arterkennung zu verbessern, wurde wieder ein **Active Learning-Ansatz** gewählt. Dabei wurden zunächst für jedes der 250 Streckensegmente (Abb. 3.5) zwei Bilder mit den höchsten Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Beifussblättrigen Ambrosie ausgewählt. Es folgte eine visuelle Überprüfung, bei der das Vorkommen oder Fehlen der Art für jede der 15 Bildkacheln pro Bild notiert wurde. Mit diesen Informationen zu **7'500 zusätzlichen Bildkacheln pro Active Learning-Durchlauf** wurde das Netz weitertrainiert und das Auftreten der Art für das gesamte Nationalstrassennetz erneut vorhergesagt. Dieser Active Learning-Ansatz wurde mehrfach wiederholt, wobei die Güte der Arterkennung rasch zunahm (Abb. 3.6). Der optimierte F1-Score für die je Durchlauf überprüften 500 Bildern stieg rasch an, und auch die Zahl der Bilder, in denen die Beifussblättrige Ambrosie tatsächlich auftrat, nahm stark zu. Während der F1-Score der Bildkacheln bereits nach 4-5 Durchläufen nicht mehr weiter anstieg, nahm die Zahl der Bilder mit korrekt erkanntem Vorkommen der Beifussblättrigen Ambrosie zunächst noch weiter zu, und das Active Learning wurde bis zum zehnten Durchlauf fortgesetzt (Abb. 3.6). Ein einzelner Durchlauf mit Überprüfen der Bilder, erneutem Trainieren des Netzes und der Vorhersage sämtlicher Bilder der zweiten und dritten Befahrung dauerte gut drei Tage.

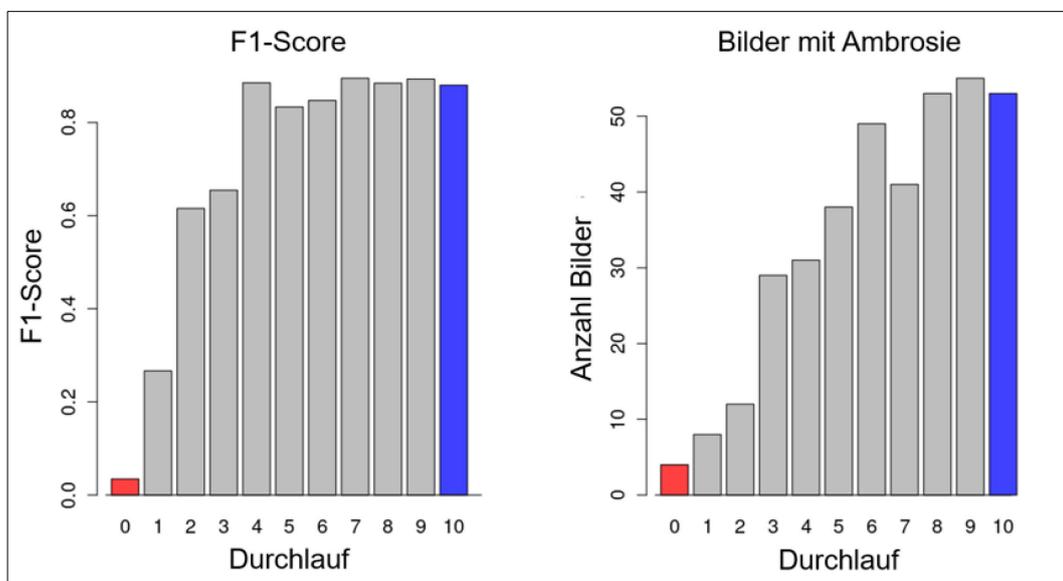


Abb. 3.6 Active Learning und Zunahme der Güte der Arterkennung für Ambrosie mit Bildern von Nationalstrassen. In Rot sind F1-Score und die Anzahl bestätigter Funde des initialen Netzes (nur mit GBIF-Bildern trainiert) dargestellt. Die übrigen Werte zeigen die Zunahme der Netzgüte nach wiederholten Active Learning-Durchläufen.

3.3 Schwellenwerte der Arterkennung

Die trainierten neuronalen Netze liefern zunächst nur **Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der Arten**. Es muss daher ein Schwellenwert bestimmt werden, ab dem die Wahrscheinlichkeiten als Vorkommen gewertet werden. Ein solcher Schwellenwert trennt jedoch die Vorkommen und das Fehlen der Arten nicht perfekt, so dass die Art auch bei Wahrscheinlichkeiten über dem Schwellenwert fehlen und bei Wahrscheinlichkeiten unterhalb des Schwellenwerts vorkommen kann (sog. «**False Positives**» und «**False Negatives**»).

In der Vorstudie im Mittelland wurden die Schwellenwerte für Vorkommen von Götterbaum und Schmalblättrigem Greiskraut mit Hilfe von Bildern bestimmt und überprüft, die nicht zum Trainieren des Netzes verwendet wurden [12]. Für das gesamte Nationalstrassennetz existierten solche Testbilder nicht, weshalb die Schwellenwertbestimmung empirisch anhand der Bilder der Kartierung erfolgte. Die resultierenden Karten sollten dabei eine **empirische «Precision» von rund 99%** (bzw. 0.99) aufweisen. Dies bedeutet, dass bei 100 Bildern mit erkanntem Vorkommen durchschnittlich lediglich ein Bild zu erwarten ist, in dem

die Art irrtümlich vorhersagt wurde. Zur Schwellenwertbestimmung wurden die Wahrscheinlichkeiten absteigend sortiert und in regelmässigen Abständen Bilder visuell überprüft, bis die «Precision» von 0.99 unterschritten wurde. Die Abstände der überprüften Bilder wurden so gewählt, dass die «Precision» von 99% erst nach einer grösseren Zahl überprüfter Bilder unterschritten wurde (bei Ambrosie nach 170 Bildern, Schmalblättriges Greiskraut nach 209 Bildern, Götterbaum nach 292 Bildern). *Abbildung 2.7* zeigt Beispiele der KI-basierten Erkennung der drei Arten in Bildkacheln. Bei der Beifussblättrigen Ambrosie konnten für die finale Karte wegen der Seltenheit der Art zusätzlich sämtliche 5723 Bilder mit Wahrscheinlichkeiten der Arterkennung von mindestens 0.5 visuell überprüft werden (siehe folgendes Kapitel).

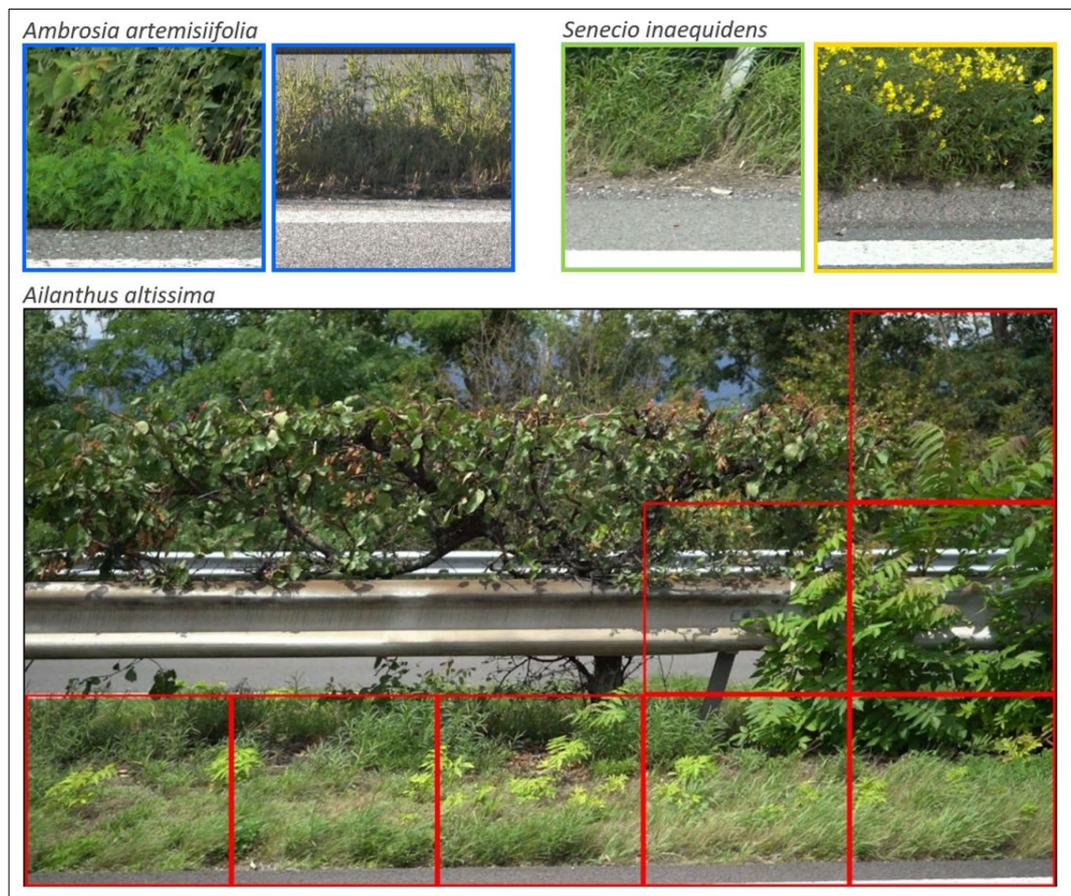


Abb. 3.7 Beispiele für Artvorkommen, die von den neuronalen Netzen korrekt erkannt wurden (Bildkacheln mit farbigen Rahmen). Bei der Ambrosie werden Jungpflanzen der zweiten Befahrung ebenso wie ältere Entwicklungsstadien der dritten Befahrung erkannt. Das Schmalblättrige Greiskraut wird auch steril ohne Blüten erfasst, und beim Götterbaum (Beispiel aus der Vorstudie, [12]) werden neben den grossen Blättern auch kleine Pflanzen aus Wurzelbrut erkannt.

4 Netzweite Verbreitungskarten

Für die Kartierung wurden die neuronalen Netze nach dem letzten Active-Learning-Durchlauf verwendet. Die **Arterkennung auf dem gesamten Nationalstrassennetz** mit rund **3.8 Millionen Bildern** und **58 Millionen Bildkacheln** dauerte mit einer GPU-Workstation (drei RTX3090 GPUs) **rund sieben Tage**. Die Ergebnisse sind in den folgenden Karten als Anzahl der Bildkacheln mit erkannten Artvorkommen je Bild an den Fahrzeugkoordinaten während der Aufnahme dargestellt. Diese **koordinatengenauen Verbreitungskarten** können im Bericht die Detailfülle von 3.8 Millionen Bildern jedoch nur unzureichend wiedergeben. Daher stehen die Resultate auch als **interaktive Karten** zur Verfügung (siehe Anhang I). Die Karten können in einem Web-Browser betrachtet werden und bieten neben unterschiedlichen Zoom-Stufen verschiedene Basiskarten als Hintergrund (Strassenkarten, Luftbilder). Neben den koordinatengenauen Karten werden im Folgenden auch Übersichtskarten gezeigt, in denen die Nationalstrassen entsprechend der Häufigkeit der Arten in vier Klassen eingeteilt wurden – von «absent or very low», «low», «medium», bis «high». Dieser zweite Kartentyp mit **Häufigkeitsklassen** gibt einen besseren Überblick zur allgemeinen Verbreitung an Nationalstrassen.

Die vier Häufigkeitsklassen wurden wie folgt berechnet: Die maximale Anzahl der Bildkacheln mit Artvorkommen wurde zunächst schweizweit in 100 Meter-Auflösung gerastert, anschliessend mit einem Gauss-Filter ($\sigma = 1000$ Meter) geglättet, die resultierenden Werte der Rasterzellen wieder den Koordinaten zugeordnet und die wurzel-transformierten Werte mittels k-Means-Klassifikation in vier Klassen eingeteilt.

Abbildung 3.9 zeigt die beiden Kartendarstellungen für den **Götterbaum**. Sie basieren wie beschrieben auf einer empirischen «Precision» von 99%. Der Anteil der Bilder mit irrtümlich erkannten Vorkommen («False Positives») liegt lediglich bei rund einem Prozent. Der Götterbaum wurde besonders häufig entlang des Genfersees und im Tessin kartiert. Innerhalb dieser Regionen zeigt die Art wiederum Schwerpunkte in der Nähe von Städten – beispielsweise bei Lausanne, Vevey oder Lugano. Diese Nähe zu Städten und Agglomerationen ist auch in den übrigen Regionen der Schweiz festzustellen. Auch wenn die Art hier zwar auf grossen Streckenabschnitten fehlt oder nur vereinzelt erfasst wurde, wurde sie auch hier oft in der Nähe von Städten und Agglomerationen festgestellt – beispielsweise bei Zürich, Basel oder mit kleineren Beständen bei Chur.

Im Unterschied zum Götterbaum ist das **Schmalblättrige Greiskraut** im gesamten Mittelland vom Genfersee bis ins Rheintal an Nationalstrassen bereits weit verbreitet (*Abb. 4.10*). Eine Nähe zu Städten oder Agglomeration lässt sich nicht erkennen. Im Tessin wurden im Gegensatz zum Götterbaum nur kleinere Vorkommen kartiert. Auch diese Karten weisen eine empirische «Precision» von 99% auf. In höheren Lagen von Alpen und Jura, wo die Art fehlen sollte, wurde sie von der KI zwar nicht in zahlreichen Bildkacheln pro Bild gefunden, doch treten hier immer wieder Bilder mit ein oder zwei erkannten Bildkacheln auf (blau Kartensymbole). Eine Überprüfung im Bildmaterial ergab, dass es sich hier meist um irrtümlich erkannte Vorkommen («False Positives») handelt. In der generalisierten Karte liegen diese Streckenabschnitte in der Häufigkeitsklasse «absent or very low». Auf die **Problematik der «False Positives»** bei der Interpretation vereinzelt erkannter Bildkacheln wird in Kapitel 6.3 näher eingegangen.

Für die **Beifussblättrige Ambrosie** wurden neben der Karte mit 99% «Precision» (*Abb. 4.8, oben*) sämtliche 5723 Bilder mit Wahrscheinlichkeiten über 0.5 (*Abb. 4.8, unten*) vom Experten überprüft und die Anzahl bestätigter Bildkacheln als koordinatengenaue Verbreitungs- und generalisierte Häufigkeitskarte dargestellt (*Abb. 4.11*). Die finale Verbreitungskarte zeigen im Gegensatz zu den beiden anderen Arten somit ausschliesslich bestätigte Vorkommen und gemäss der Überprüfung **keine «False Positives»**. Ein Vergleich mit den Funden bei 99% «Precision» zeigt, dass trotz der grossen Zahl zusätzlich überprüfter Bilder nur vier neue Vorkommen gefunden wurden (grüne Kreise in *Abb. 4.11, oben*) und drei Vorkommen der 99% «Precision»-Karte nicht bestätigt werden konnten (graue Kreise in *Abb. 4.11, oben*). Das mit Abstand grösste Vorkommen der Beifussblättrigen Ambrosie wurde an der **A12 bei Fribourg** kartiert. Es erstreckt sich dort **auf dem Mittelstreifen über rund 14 Kilometer**. Drei Bestände, die bereits einen Bereich von mehreren Duzend Metern Länge besiedeln, wurden auf einem Seitenstreifen der A9 bei

Lausanne sowie zwei Mittelstreifen der A1 bei Payerne (VD) und Gossau (SG) erfasst. Ansonsten wurde die Art vor allem im Tessin und am Genfersee mit kleinen Gruppen oder Einzelpflanzen dokumentiert.

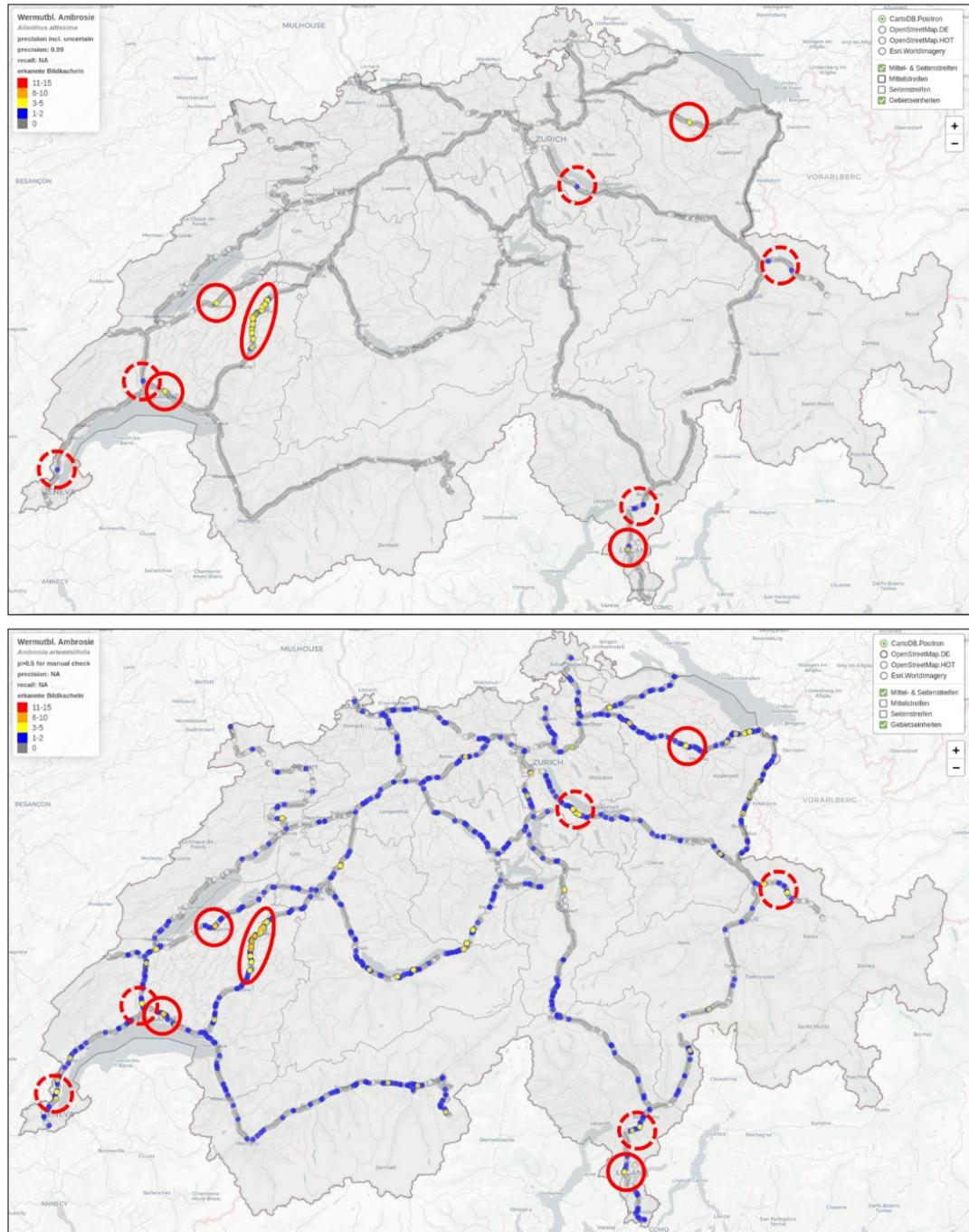


Abb. 4.8 Zwischenschritte zur finalen Karte der Beifussblättrigen Ambrosie. Obere Karte: Erkannte Vorkommen bei 99% «Precision». Wegen ihrer Seltenheit sind die erkannten Vorkommen rot markiert, wobei gestrichelte Kreise auf Vorkommen mit nur wenigen erkannten Bildern hinweisen. Die untere Karte enthält zusätzlich zahlreiche, auch sehr unsicher erkannte Vorkommen (5723 Bilder mit Wahrscheinlichkeiten > 0.5) mit meist nur ein oder zwei erkannten Bildkacheln (in Blau). Die roten Markierungen der oberen Karte dienen hier der Orientierung beim Kartenvergleich.

4.1 Götterbaum (*Ailanthus altissima*)

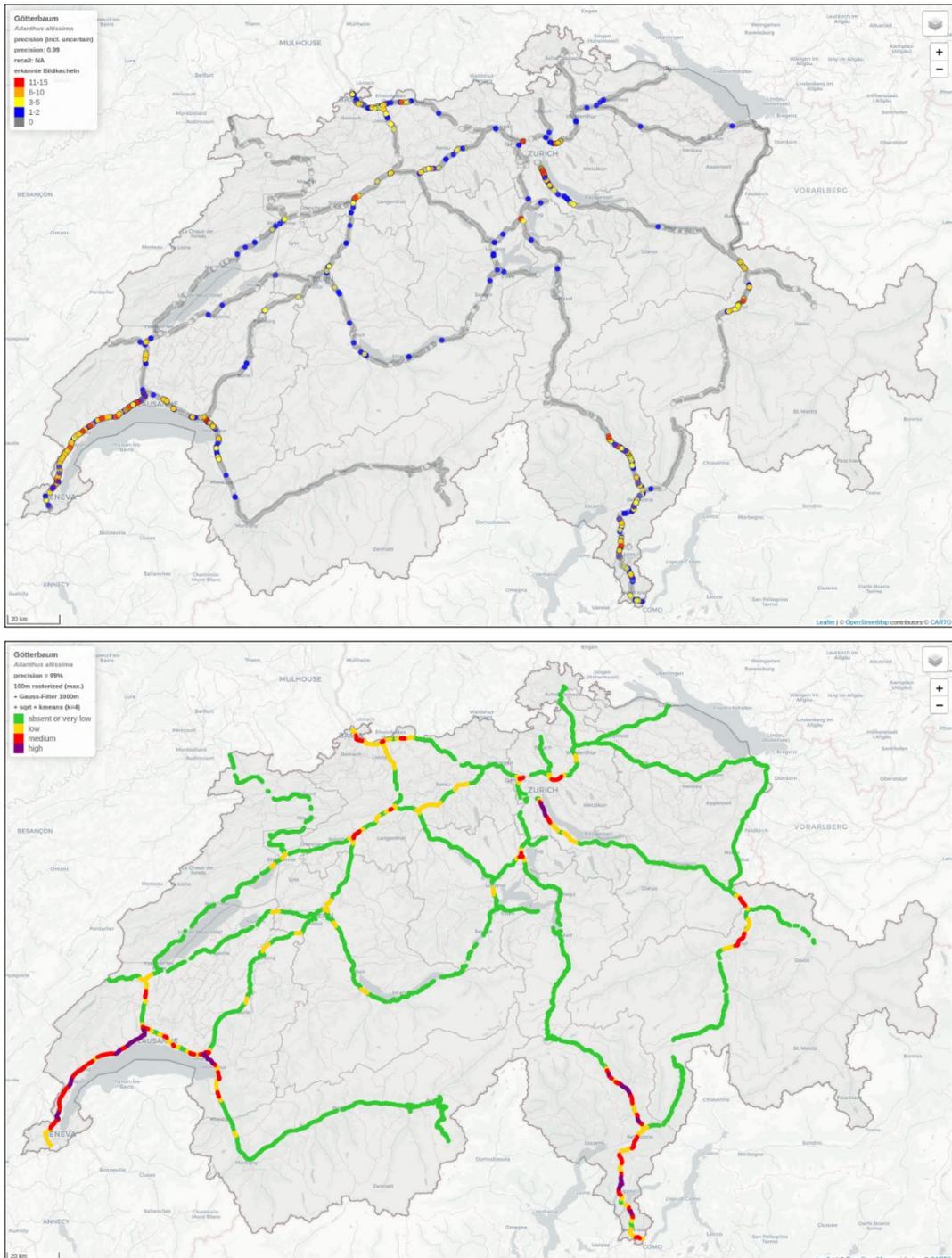


Abb. 4.9 Verbreitungskarten des Götterbaums mit einer empirischen «Precision» von 99%. Die obere Karte zeigt die Anzahl erkannter Vorkommen (Bildkacheln) je Bild von Grau (0 Kacheln) bis Rot (11-15 Kacheln). Die untere Karte ist eine generalisierte Darstellung mit vier Häufigkeitsklasse von Grün («absent or very low») bis Purpur («high»). Digitale Formate der Karten stehen in Anhang I.1 als Download zur Verfügung.

4.2 Schmalblättriges Greiskraut (*Senecio inaequidens*)

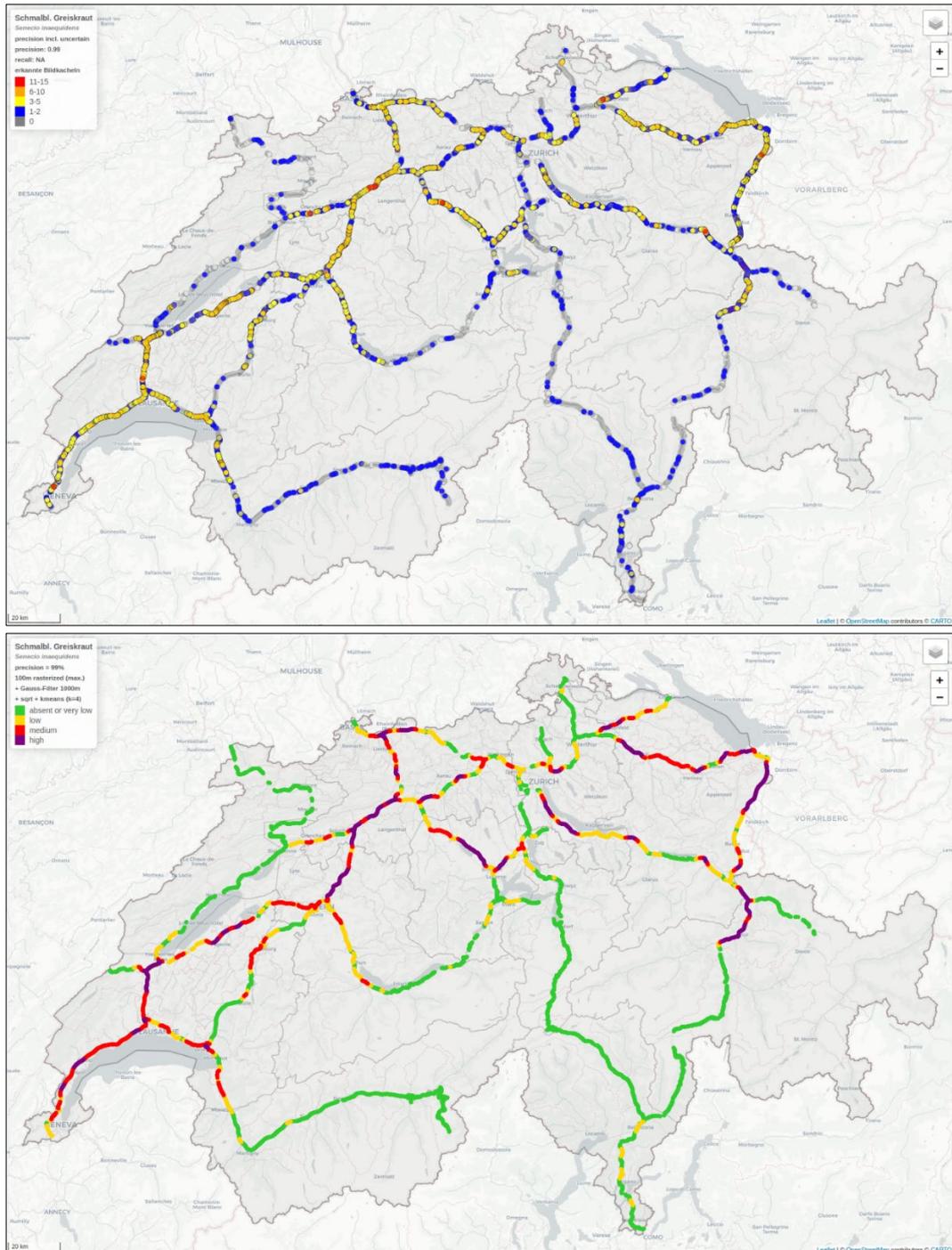


Abb. 4.10 Verbreitungskarten des Schmalblättrigen Greiskrauts mit einer empirischen «Precision» von 99%. Die obere Karte zeigt die Anzahl erkannter Vorkommen (Bildkacheln) je Bild von Grau (0 Kacheln) bis Rot (11-15 Kacheln). Die untere Karte ist eine generalisierte Darstellung mit vier Häufigkeitsklasse von Grün («absent or very low») bis Purpur («high»). Digitale Formate der Karten stehen in Anhang I.2 als Download zur Verfügung.

4.3 Beifussblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*)

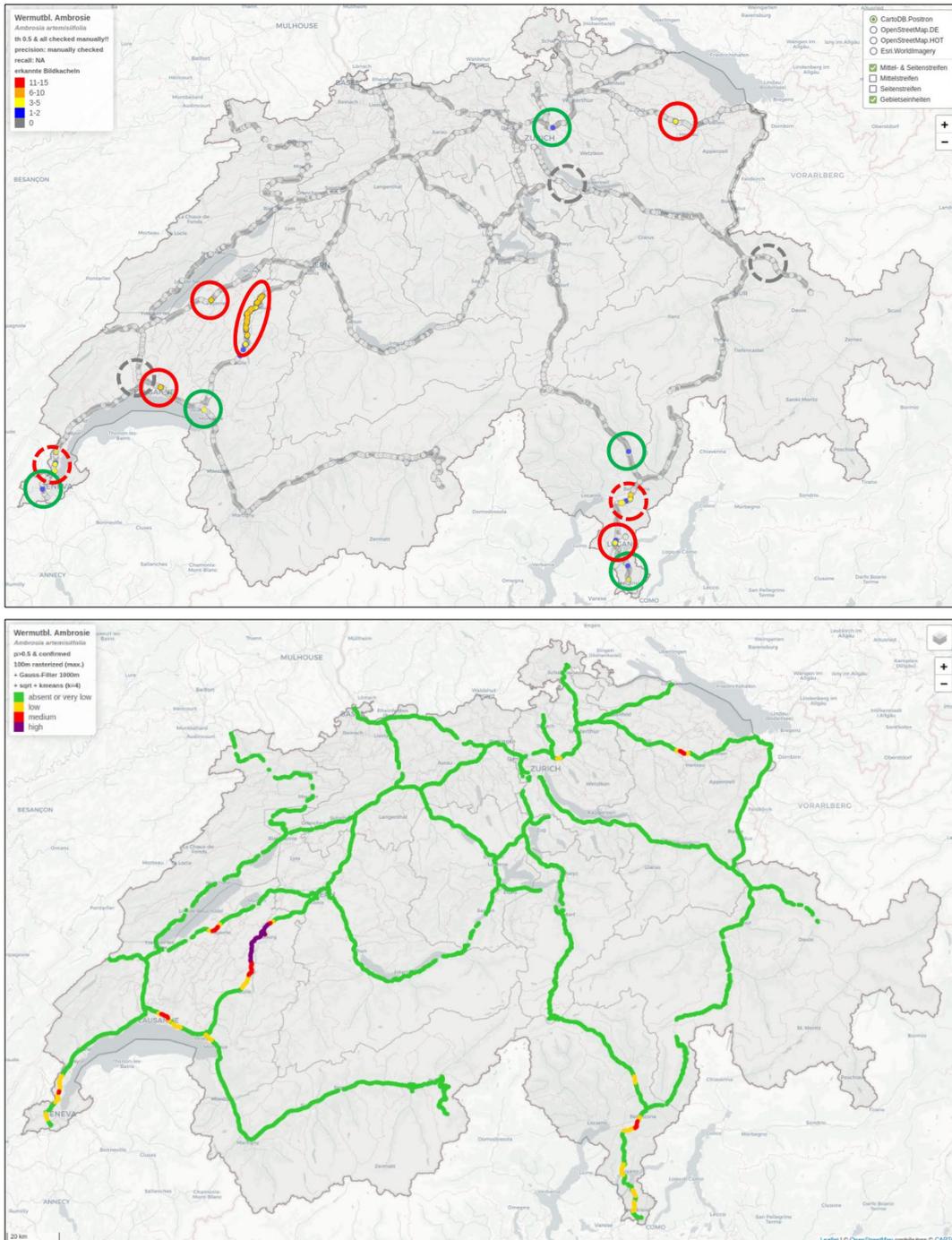


Abb. 4.11 Verbreitungskarten der Beifussblättrigen Ambrosie basierend auf 5723 Bildern mit Wahrscheinlichkeiten über 0.5. Die obere Karte zeigt die Anzahl bestätigter Bildkacheln. Zusätzliche Kreise dienen dem Vergleich mit der 99% «Precision»-Karte (Abb. 4.8, oben): Rot = bestätigt, «True Positives»; Grau = nicht bestätigt, «False Positives»; Grün = Neufunde, «False Negatives». Die untere Karte ist eine generalisierte Darstellung mit vier Häufigkeitsklassen von Grün («absent or very low») bis Purpur («high»). Digitale Formate der Karten stehen in Anhang I.3 als Download zur Verfügung.

5 Vergleich der Kartierungen 2019 und 2021

Die automatisierte Kartierung wurde zunächst am Beispiel von Götterbaum und Schmalblättrigem Greiskraut an **Autobahnen im Schweizer Mittelland** entwickelt [12]. Aus diesem Vorprojekt stehen Verbreitungskarten zur Verfügung, die mit den Resultaten der vorliegenden Arbeit verglichen werden können. Eine **Gegenüberstellung von Kartenausschnitten der 2019 beziehungsweise 2021 kartierten Vorkommen** des Götterbaums bei Lausanne und Schmalblättrigen Greiskrauts bei Lenzburg zeigen die beiden folgenden Abbildungen (Abb. 5.12 und Abb. 5.13).

In beiden Kartenvergleichen wurden grössere Vorkommen mit zahlreich erkannten Bildkacheln sehr ähnliche erfasst. Dennoch ist die Zahl der erkannten Bildkacheln 2021 allgemein niedriger und Bilder aus 2019 mit nur wenigen erkannten Kacheln (in Blau) wurden 2021 oft nicht bestätigt. Neben der Optimierung des neuronalen Netzes für die Kartierung des gesamten Nationalstrassennetzes liegt dies vor allem an unterschiedlichen Schwellenwerten und der **2021 höher gewählten «Precision» der Arterkennung**. Während 2019 ein Kompromiss zwischen «Precision» und «Recall» gewählt wurde (Optimierung des F1-Werts) und die «Precision» erkannter Bildkacheln beim Götterbaum bei 97.5% und beim Greiskraut bei 97.7% lag, wurden wegen der Problematik irrtümlich erkannter Vorkommen («False Positives») 2021 höhere Schwellenwerte gewählt. Die «Precision» beträgt 2021 für beide Arten 99% und bezieht sich nicht auf erkannte Vorkommen in Bildkacheln, sondern auf Vorkommen in Bildern.

Der Vergleich bestätigt grundsätzlich eine **gute Reproduzierbarkeit** des Ansatzes beim Erkennen grösserer Vorkommen. Er zeigt gleichzeitig aber auch den Einfluss unterschiedlicher Schwellenwerte und die **Problematik irrtümlich erkannter oder übersehener Vorkommen**. Hierauf wird in Kapitel 6.3 ausführlicher eingegangen.

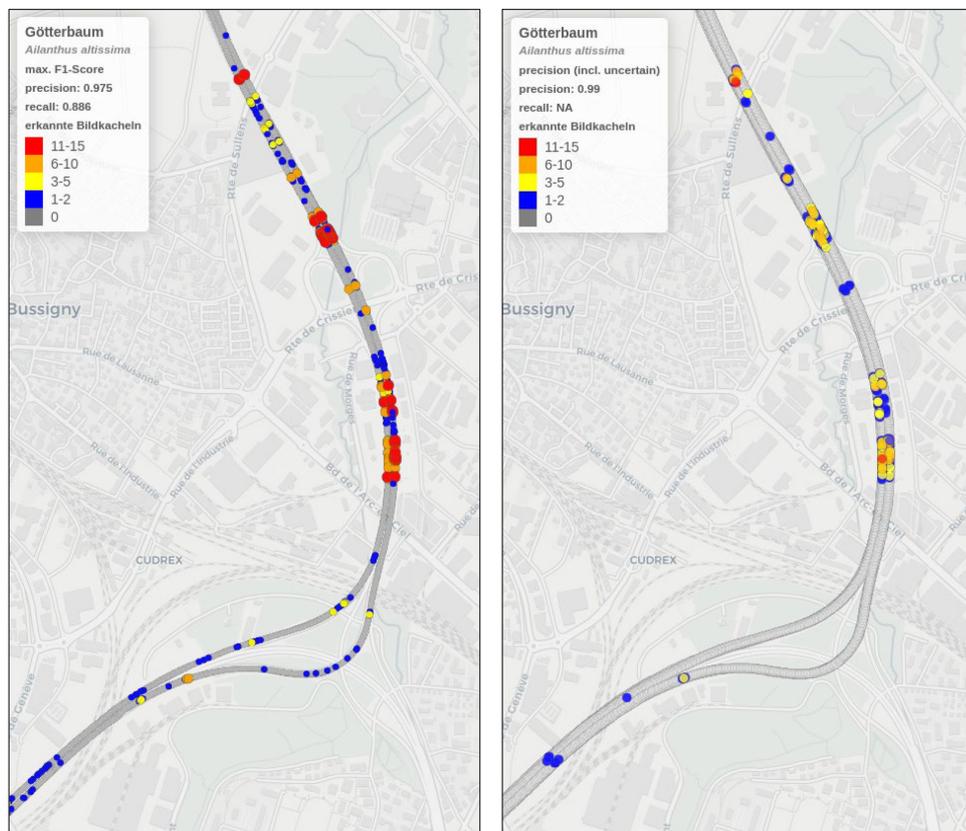


Abb. 5.12 Gegenüberstellung der erfassten Vorkommen des Götterbaums nahe Lausanne in den Kartierungen 2019 (links) und 2021 (rechts).

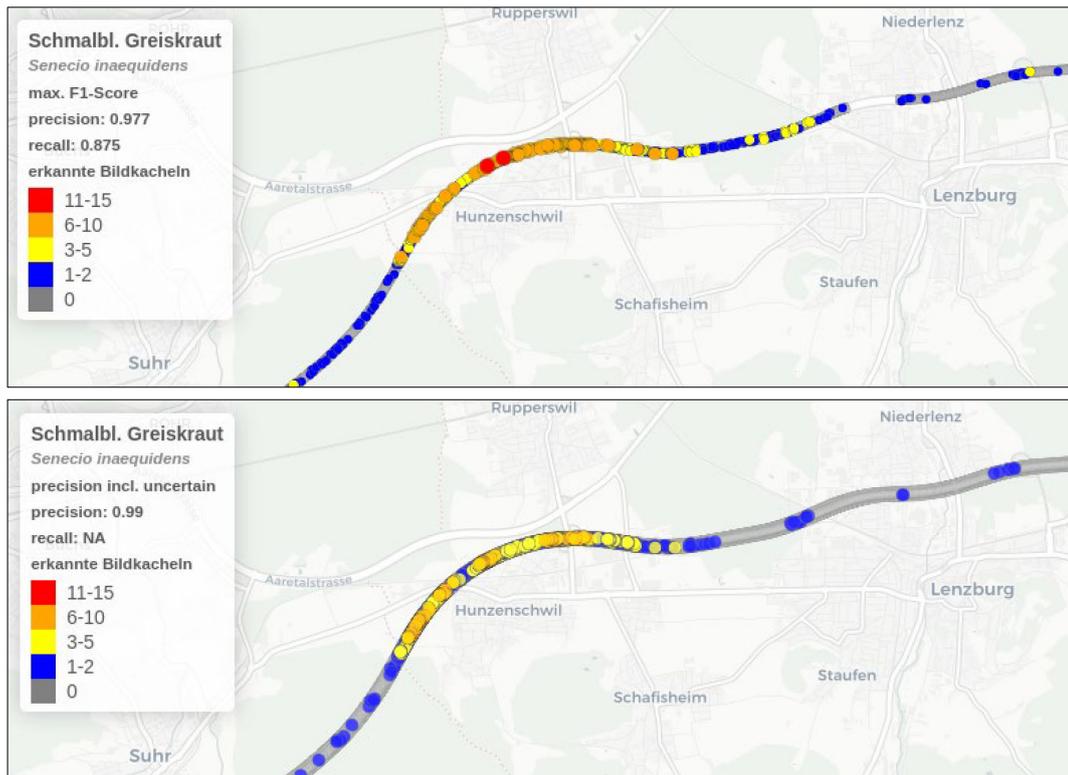


Abb. 5.13 Gegenüberstellung der erfassten Vorkommen des Schmalblättrigen Greiskrauts nahe Lenzburg in den Kartierungen 2019 (oben) und 2021 (unten).

6 Grenzen der automatisierten Kartierung

Im Vergleich zu klassischen Kartierungen ermöglicht erst der automatisierte, KI-basierte Ansatz eine effiziente und zugleich detaillierte Erfassung der Arten auf dem gesamten Nationalstrassennetz. Doch auch dieses Vorgehen hat Grenzen, die im Folgenden diskutiert werden.

6.1 Sichtbarkeit der Arten und Bestände

Da es sich um eine bildbasierte Methode handelt, müssen die invasiven Arten im Bildmaterial sichtbar sein und von einer Person für Trainingsbilder oder das Überprüfen der KI-Ergebnisse auch sicher bestimmt werden können. Die automatisierte Arterkennung der Beifussblättrigen Ambrosie und vor allem steriler Exemplare des Schmalblättrigen Greiskrauts zeigt, dass auch unscheinbare Arten oder Entwicklungsstadien kartiert werden können. Dennoch ist die Methode nicht für alle Arten geeignet. So können besonders kleine Arten oder wichtige Bestimmungsmerkmale in den Bildern nicht oder nicht sicher zu erkennen sein. Ein Beispiel ist das Dänische Löffelkraut (*Cochlearia danica*), das aus Küstenregionen West- und Nordeuropas stammt und sich mit der Verwendung von Streusalz als Neophyten auch an Schweizer Nationalstrassen ausgebreitet hat. Die Art ist nur wenige Zentimeter hoch und tritt vermutlich häufiger auf, konnte aber nur in seltenen Fällen in den Bildern zweifelsfrei erkannt werden. Das Dänische Löffelkraut gilt jedoch nicht als invasiv, und die bisher an Strassen relevanten invasiven Neophyten sind in den Bildern gut zu erkennen.

Wie bei klassischen Kartierungen zu Fuss beeinflusst auch beim automatisierten Ansatz der Schnitzeitpunkt der Grünpflege die Sichtbarkeit der Arten. Die dreimalige Befahrung während der Vegetationsperiode verringerte zwar diesen Einfluss, kann ihn aber nicht ausschliessen. Die Auswertung noch häufigerer Kamerafahrten wäre sinnvoll. Dies gilt besonders, falls Kamerafahrten bereits für andere Zwecke durchgeführt werden.

Eine weitere Limitierung besteht darin, dass nur die von der Fahrbahn aus sichtbaren Vorkommen kartiert werden können. Bei der Vorstellung der Kartierung am «Workshop invasive Neophyten an Nationalstrassen» (16. Juni 2022, ASTRA, Ittigen) wurden die kartierten Bestände von kantonalen Neophyten-Beauftragten und Vertretern der Gebietseinheiten anhand ihrer Lokalkenntnisse generell bestätigt. Es gab aber auch Fälle, bei denen Vorkommen nicht erfasst wurden, da sie von der Fahrbahn aus nicht sichtbar waren. Das kann beispielweise an tiefergelegenen Böschungen oder hinter Sicht- und Schallschutzwänden der Fall sein. Es ist daher zu betonen, dass es sich um eine Kartierung invasiver Neophyten in fahrbahnnahen und von der Fahrbahn aus einsehbaren Bereichen handelt.

6.2 Aufwand für das Trainieren der neuronalen Netze

Das Trainieren der neuronalen Netze mittels Active Learning und die Arterkennung im umfangreichen Bildmaterial ist **zeitaufwendig**. Der gewählte Ansatz des Active Learning dauerte für die Beifussblättrige Ambrosie rund einen Monat. Auch wenn sich der Ansatz sicherlich optimieren lässt, so können neue Arten nicht innerhalb weniger Tage hinzugefügt werden. Dies gilt wie bei der Ambrosie besonders dann, wenn nicht genügend Bilder von Nationalstrassen für das Trainieren der Netze zur Verfügung stehen. Der Aufwand ist jedoch notwendig, um die Rate irrtümlich erkannter Artvorkommen zu reduzieren (siehe Kapitel 6.3). Sind bereits trainierte neuronale Netze jedoch erst einmal vorhanden, so können diese direkt für die automatisierte Kartierung der jeweiligen Arten eingesetzt werden.

6.3 Irrtümlich erkannte und übersehene Vorkommen

Eine auf KI-basierte Arterkennung kann – wie auch eine Fachperson – Artvorkommen in den Bildern übersehen (sog. «**False Negatives**») oder irrtümlich die Art in Bildern erkennen, in denen sie nicht vorkommt (sog. «**False Positives**»). Diese Fehler können nicht unabhängig optimiert werden. Wird die «False Positive»-Rate verringert indem nur

besonders sichere Arterkennungen genutzt werden, steigt die «False Negative»-Rate – und umgekehrt. Das Übersehen von Vorkommen ist bei der Kartierung von grösseren Beständen oder gar Hotspots kein Problem, da die Arten immer noch in ausreichend vielen Bildkacheln erkannt werden, um die Vorkommen gut zu erfassen.

Beide Fehlertypen sind dagegen **besonders bei nicht oder kaum besiedelten Streckenabschnitten problematisch**. So fallen bei der Verbreitungskarte des Schmalblättrigen Greiskrauts grössere Streckenabschnitte auf, in denen immer wieder Bilder mit nur einzelnen erkannten Bildkachel zu sehen sind (blaue Symbole in der Verbreitungskarte). In solchen Abschnitten ist nicht direkt zu erkennen, ob es sich um tatsächlich besiedelte oder aber wegen «False Positives» um unbesiedelte Abschnitte handelt. Umgekehrt können in Abschnitten ohne Funde unsichere Arterkennungen vorliegen, die beim gewählten Schwellenwert nicht als Vorkommen gewertet wurden, obwohl die Art dort vorkommt. Solchen Unsicherheiten kann nur durch eine **nachträgliche Überprüfung von Bildern durch eine Fachperson** begegnet werden. Unsichere Funde können dabei wie im Beispiel der Beifussblättrigen Ambrosie durch besonders niedrigere Schwellenwerte berücksichtigt werden. Die **KI wird dann lediglich zur Vorauswahl der Bilder genutzt** und die Karte zeigt schliesslich nur die von einer Fachperson bestätigten Funde. Für die Beifussblättrige Ambrosie war dies netzweit möglich, da es sich um eine noch seltene Art handelt und sogar bei Berücksichtigung von sehr unwahrscheinlichen Funden (Wahrscheinlichkeit > 0.5) nur vergleichsweise wenige Bilder (N=5723) überprüft werden mussten (siehe Kapitel 4). Die netzweite Karte der Beifussblättrigen Ambrosie zeigt so ausschliesslich die von einer Fachperson überprüften und bestätigten KI-Funde.

Für Götterbaum und Schmalblättriges Greiskraut konnten selbst für die 99% «Precision»-Karten nicht sämtliche KI-Funde nachträglich überprüft werden, da für die viel weiter verbreiteten Arten die Zahl der zu überprüfenden Bilder um ein Vielfaches höher lag. Auf Nachfrage von Neophyten-Beauftragten der Kantone Wallis und Tessin wurde im Anschluss an den Workshop allerdings für einzelne Teile des Nationalstrassennetzes eine solche Überprüfung der Bilder durchgeführt.

Im **Wallis** stellte sich die Frage, ob das **Schmalblättrige Greiskraut** tatsächlich von Martigny Richtung Simplon vorkommt. Die Überprüfung zeigte, dass die Art nur bis kurz nach Sion in den Bildern bestätigt werden konnte und es sich im weiteren Verlauf um «False Positives» handelt (*Abb. 6.14*). Allerdings konnte die Art zwischen Martigny und Sion auch in einem Abschnitt mit nur wenigen erkannten Kacheln pro Bild (blaue Symbole) bestätigt werden.

Eine weitere Überprüfung betraf den **Götterbaum auf der Alpensüdseite** und die Frage, wie weit die Art an Nationalstrassen in die Alpentäler vordringt. Der Götterbaum wurde von der KI mit hoher Sicherheit (99% «Precision») und mit zahlreichen Bildkacheln je Bild entlang der A2 zwischen Chiasso und Altiolo gefunden (*Abb. 6.15, oben links*). Eine Karte mit 95% «Precision» und somit zusätzlichen, eher unsicher erkannten Vorkommen (*Abb. 6.15, oben rechts*) lässt dagegen weitere Vorkommen nördlich von Altiolo und an der A13 auf der San-Bernardino-Route vermuten. Die Überprüfung der Bilder ergab allerdings keine weiteren Vorkommen an der Nationalstrasse nördlich von Altiolo – dafür aber Einzelpflanzen in Graubünden Richtung San Bernadino, obwohl die meisten neuen Bilder bei 95% «Precision» auch dort irrtümliche Arterkennungen sind.

Beide Beispiele zeigen die Problematik bei der Interpretation von reinen KI-Karten durch das Auftreten von «False Positives» and «False Negatives», insbesondere wenn nur wenige Bildkacheln je Bild erkannt wurden (blaue Kartensymbole). Die Beispiele zeigen aber auch die Möglichkeit, trotz dieser Unsicherheit durch eine nachträgliche Überprüfung von KI-Funden zu besser abgesicherten Verbreitungskarten zu gelangen.

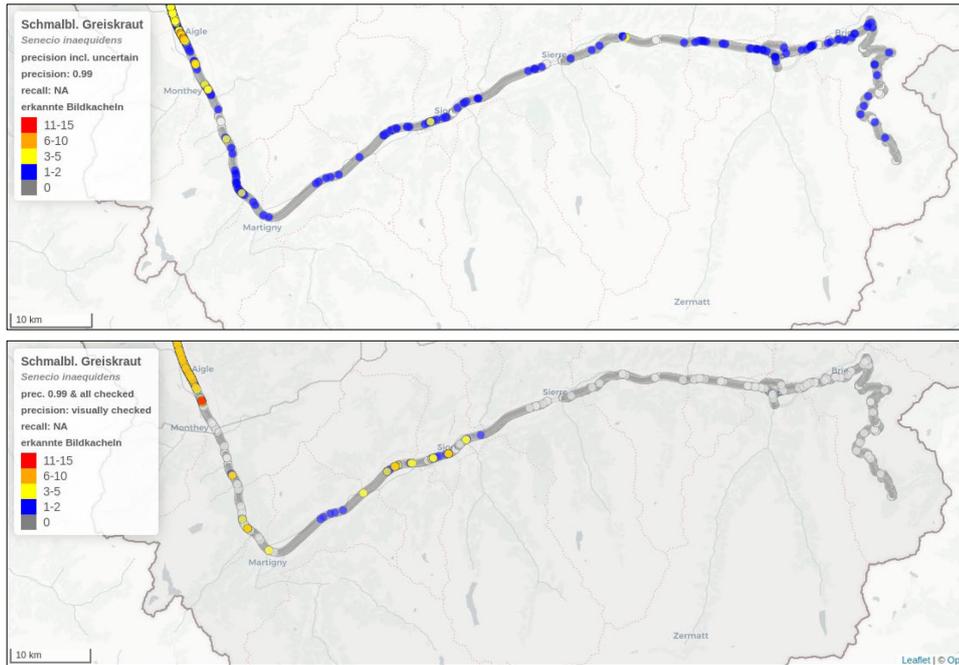


Abb. 6.14 Nachträgliche Überprüfung von KI-Funden des Schmalblättrigen Greiskrauts im Wallis. Die obere Karte zeigt KI-Funde in Bildern von beiden Fahrzeugseiten bei 99% «Precision» (Ausschnitt der Karte in Abb. 4.10, oben). In der unteren Karte sind nachträglich bestätigten Funde für Bilder der Seitenstreifen dargestellt (die Art wurde ab Martigny nur auf Bildern von Seitenstreifen bestätigt, da ein grüner Mittelstreifen dort fehlt).

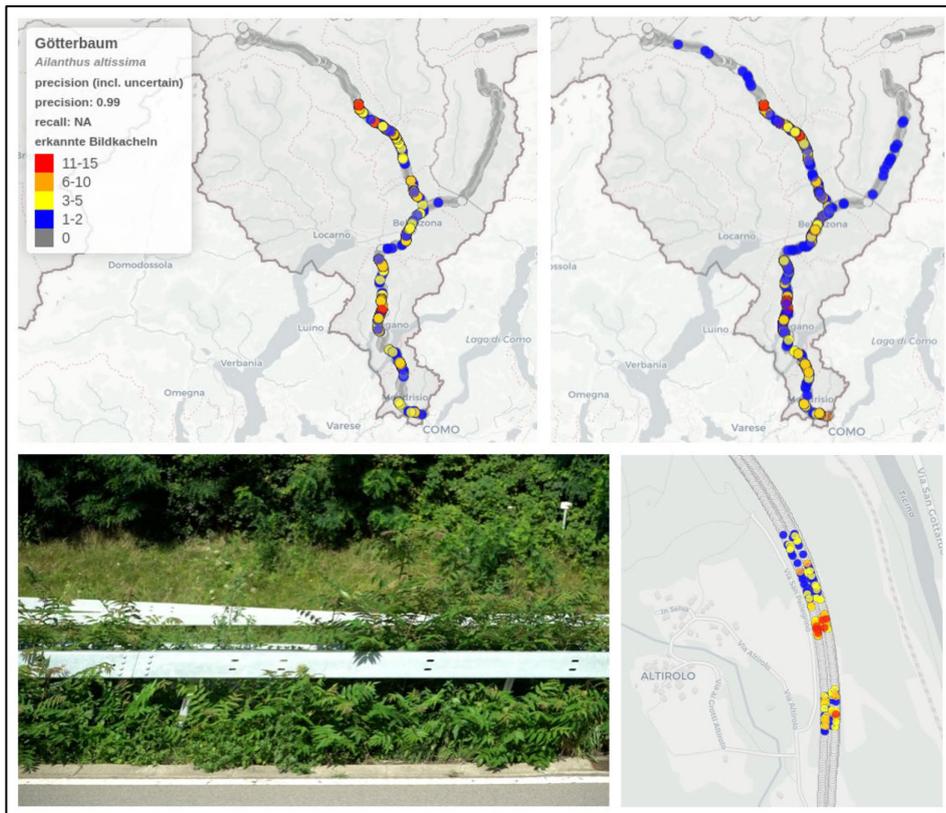


Abb. 6.15 Nachträgliche Überprüfung von KI-Funden des Götterbaums auf der Alpensüdseite an der A2 Richtung Airolo und A13 Richtung San Bernadino. Die Karte oben links zeigt die KI-Funde bei 99% «Precision» (Ausschnitt aus Abb. 4.9, oben), während die rechte Karte zusätzliche Funde mit höherer Unsicherheit bei 95% «Precision» enthält. Unten ist in Bild und Karte (99% «Precision») das nördlichste, erkannte Vorkommen des Götterbaums Richtung Gotthard auf einem Mittelstreifen bei Altirolo zu sehen.

7 Aspekte einer netzweiten Neophytenbekämpfung

Das folgende Kapitel geht auf wichtige Aspekte bei der Entwicklung eines netzweiten Ansatzes zum Umgang mit invasiven Neophyten an Nationalstrassen ein. Dabei stehen die Ökologie und die Ausbreitungsdynamik der Arten sowie der Nutzen einer automatisierten Kartierung im Vordergrund. Bekämpfungsmethoden für einzelne Arten, das konkrete Einbinden in betriebliche Abläufe [33] oder auch bauliche Präventivmassnahmen [47] werden nicht besprochen, sind aber für einen umfassenden Ansatz und dessen Umsetzung von grosser Bedeutung.

Die Resultate der netzweiten Neophytenkartierung wurden an einem «**Workshop invasive Neophyten an Nationalstrassen**» am 16. Juni 2022 beim Bundesamt für Strassen in Ittigen vorgestellt und diskutiert (Abb. 7.16). Resultate des Workshops und Rückmeldungen von Gebietseinheiten, kantonalen Neophyten-Beauftragten, BAFU, ASTRA SSI und ASTRA Betrieb werden im Folgenden berücksichtigt.



Abb. 7.16 Vorstellung und Diskussion der netzweiten Neophytenkartierung beim «Workshop invasive Neophyten an Nationalstrassen», 16. Juni 2022, ASTRA, Ittigen.

7.1 Welche Arten sollen berücksichtigt werden?

Der Umgang mit gebietsfremden Organismen wird in der Schweiz grundsätzlich durch das Umweltschutzgesetz (USG) geregelt. Dieser Umgang darf weder Menschen, Tiere und Umwelt gefährdet noch die biologische Vielfalt und deren nachhaltige Nutzung beeinträchtigen. Die Freisetzungsverordnung von 2008 nennt hierzu in Anhang 2 (Art. 15, Abs. 2) invasive Neophyten [36], die zum Teil auch an Nationalstrassen vorkommen. Für einzelne dieser Arten sind Nationalstrassen bedeutende Ausbreitungskorridore (Tab. 7.1).

Solche Listen sind nicht abschliessend und müssen fortlaufend aktualisiert werden. Die «**Schwarze Liste**» und «**Watch List**» [4][6] nennen als unverbindliche Expertenlisten seit langem für die Schweiz weitere invasive Neophyten, die teilweise auch an Nationalstrassen vorkommen. Die aktuelle Publikation «**Gebietsfremde Arten in der Schweiz**» des BAFU [3] führt inzwischen 49 Arten und Artengruppen invasiver gebietsfremder Neophyten mit nachgewiesenen Schäden in der Umwelt und 32 invasive Neophyten, bei denen von Schäden auszugehen ist. Der Umgang mit diesen Arten soll mit der aktuellen USG-Revision durch ein **Stufenkonzept** des BAFU und entsprechende Verordnungen geregelt werden. Es ist davon auszugehen, dass dies den Umgang mit weiteren invasiven Neophyten an Nationalstrassen betreffen wird. Zuvor könnten einzelne Arten bereits durch die aktuelle Revision der Freisetzungsverordnung hinzukommen, die sich derzeit in der

Vernehmlassung befindet. Ein Neophytenmanagement an Nationalstrassen sollte vor allem auf invasive Arten fokussieren, für die bekannt ist oder gut begründet erwartet werden kann, dass Nationalstrassen **für ihre weitere Ausbreitung in der Schweiz einen bedeutenden Einfluss** haben. Neben den drei Arten dieser Studie betrifft dies nur einen Teil der zusätzlich vom BAFU [3] gelisteten invasiven Neophyten, da diese zum Teil nicht an Nationalstrassen vorkommen oder Nationalstrassen keine grössere Bedeutung für die weitere Ausbreitung der Arten haben. Ein netzweiter Ansatz für ein Neophytenmanagement sollte jedoch neue invasive **Arten frühzeitig berücksichtigen** können. Dabei kann in gut begründeten Fällen auch proaktives Handeln noch vor der gesetzlichen Regulierung einer Art sinnvoll sein, um Folgekosten zu vermeiden.

Tab. 7.1 Invasive Neophyten gemäss Anhang 2 der Freisetzungsverordnung von 2008 [36] und die gutachterliche Bedeutung von Nationalstrassen für ihre Ausbreitung in der Schweiz («-» = ohne grössere Bedeutung; «!» = kommt an NS vor und breitet sich entlang dieser aus; «! !» = kommt an NS vor und diese sind bedeutende Ausbreitungskorridore).

NS	Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Nom français	Nome italiano
!!	<i>Ambrosia artemisiifolia</i>	Aufrechte Ambrosie, Beifussblättriges Traubenkraut	Ambroisie à feuilles d'armoise, Ambroisie élevée	Ambrosia con foglie di artemisia
-	<i>Crassula helmsii</i>	Nadelkraut	Orpin de Helms	Erba grassa di Helms
-	<i>Elodea nuttallii</i>	Nuttalls Wasserpest	Elodée de Nuttall	Peste d'acqua di Nuttall
!	<i>Heracleum mantegazzianum</i>	Riesenbärenklau	Berce du Caucase, Berce de Mantegazzi	Panace di Mantegazzi
-	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	Grosser Wassernabel	Hydrocotyle faussere-noncule	Soldinella reniforme
!	<i>Impatiens glandulifera</i>	Drüsiges Springkraut	Impatiante glanduleuse	Balsamina ghiandolosa
-	<i>Ludwigia</i> spp. (<i>L. grandiflora</i> , <i>L. peploides</i>)	Südamerikanische Heusenkräuter	Jussies sudaméricaines	Porracchie sudamericane
!	<i>Reynoutria</i> spp. (<i>Fallopia</i> spp., <i>Polygonum polystachyum</i> , <i>P. cuspidatum</i>)	Asiatische Staudenknöteriche inkl. Hybride	Renouées asiatiques, hybrides incl.	Poligoni asiatici, incl. ibridi
!	<i>Rhus typhina</i>	Essigbaum	Sumac	Sommacco maggiore
!!	<i>Senecio inaequidens</i>	Amerikanische Goldruten inkl. Hybride	Séneçon du Cap	Senecione sudafricano
!	<i>Solidago</i> spp. (<i>S. canadensis</i> , <i>S. gigantea</i> , <i>S. nemoralis</i> , ohne <i>S. virgaurea</i>)	Amerikanische Goldruten inkl. Hybride	Solidages américains, Verges d'or américaines, hybrides incl.	Verghe d'oro americane, incl. ibridi

7.2 Eintrag, Ausbreitung und Austrag invasiver Neophyten

Die Neophytenbekämpfung an Nationalstrassen betrifft zunächst vor allem den Umgang mit den Arten unmittelbar an den Nationalstrassen. Ein umfassender Ansatz sollte jedoch auch die Eintragswege der Arten aus der Umgebung an die Nationalstrassen und die Austragswege von Nationalstrassen in die umgebende Landschaft berücksichtigen.

Ziel sollte dabei zunächst sein, den **Eintrag invasiver Neophyten an Nationalstrassen** zu reduzieren. Dies ist oft kaum möglich, wenn Arten beispielsweise an Fahrzeugen verschleppt werden (z.B. *Ambrosia*-Samen) oder sich selbstständig ausbreiten (z.B. Flugsamen des Schmalblättrigen Greiskrauts). Kenntnisse hierzu können jedoch für ein differenziertes Streckenmanagement genutzt werden (siehe Kapitel 7.4), um den Eintrag in noch Neophyten-freie Abschnitte zu reduzieren (bei Beifussblättriger Ambrosie und Greiskraut z.B. durch verschleppte Samen an **Unterhaltsmaschinen**). Bei einzelnen Arten ist auch der Austausch mit weiteren Akteuren ausserhalb der Nationalstrassen sinnvoll. So weist die Verbreitung des Götterbaums an Nationalstrassen darauf hin, dass sein Auftreten eng mit Samenbäumen im Siedlungsbereich zusammenhängt [12]. Es ist davon auszugehen,

dass **Götterbaumsamen von Fahrzeugen**, die dort unter Samenbäumen abgestellt wurden, bei höheren Geschwindigkeiten auf Nationalstrassen in die fahrbahnahe Vegetation ausbreiten werden. Ohne Samenbäume im Siedlungsbereich dürfte die Ausbreitung an Nationalstrassen der Nordschweiz deutlich langsamer erfolgen und die Koordination verschiedener Akteure erscheint hier angezeigt. So verfolgt beispielsweise der Kanton Zürich das Ziel, dass es langfristig im Kanton keine Samenbäume mehr gibt [20].

Neben dem Eintrag ist auch der Austrag invasiver Neophyten von Beständen an Nationalstrassen in die umgebende Landschaft für das weitere Invasionsgeschehen einzelner Arten bedeutend. Nachdem die folgenden Kapitel zunächst auf das Neophyten-Management unmittelbar an den Nationalstrassen eingehen, wird die Ausbreitung invasiver Neophyten von Nationalstrassen in die Landschaft in Kapitel 7.7 besprochen.

7.3 Wie weit sind die Arten bereits verbreitet?

Die Ausbreitungsphase, in der sich invasive Neophyten an Nationalstrassen befindet, hat einen grossen Einfluss auf die Möglichkeiten und Kosten beim Umgang mit diesen Arten. Bei der Ausbreitungsdynamik invasiver Arten werden **verschiedene Phase** unterschieden (Abb. 7.17). Nach dem Einschleppen oder der bewussten Einführung einer Art muss diese sich zunächst im neuen Gebiet etablieren und Populationen aufbauen, die sich selbst erhalten. Eine starke Zunahme und Ausbreitung erfolgt oft deutlich später, weshalb die Etablierungsphase auch als «Lag»-Phase bezeichnet wird. Ohne Gegenmassnahmen kommt es nach der Ausbreitungsphase schliesslich zu einer Sättigung, sobald geeignete Wuchsorte im neuen Gebiet weitgehend besiedelt wurden.

Da die Bekämpfung noch kleiner Vorkommen während der Etablierungs- und frühen Ausbreitungsphase gegenüber späteren Phasen einfacher ist und geringere Kosten verursacht, ist für die Planung und Durchführung von Massnahmen die **Kenntnis der aktuellen Verbreitung der Arten** zentral. Die automatisierte Kartierung kann hier einen guten Überblick liefern und helfen, die kartierten Arten entsprechend einzustufen (Abb. 7.17). Im Beispiel basiert die Einstufung auf der netzweiten Häufigkeit und der Annahme, dass alle drei Arten eine ähnliche, maximale Verbreitung an Nationalstrassen erreichen können – von Tieflagen des Mittellands und Tessins bis in die Alpentäler hinein. Während die Beifussblättrige Ambrosie netzweit noch am Beginn ihrer Ausbreitung steht, hat das Schmalblättrige Greiskraut vor allem im Mittelland bereits einen Grossteil des Nationalstrassennetzes besiedelt. Wegen beschränkter Ressourcen können für die Arten daher nicht die gleichen, netzweiten Ziele verfolgt werden. **Die Bedeutung frühzeitiger Massnahmen** verdeutlicht das Schmalblättrige Greiskraut eindrücklich, da sich die Art erst in den vergangenen rund 20 Jahr auf dem Nationalstrassennetz stark ausgebreitet hat. Zuvor war die Art wahrscheinlich in einer ähnlichen Situation wie heute die Beifussblättrige Ambrosie.

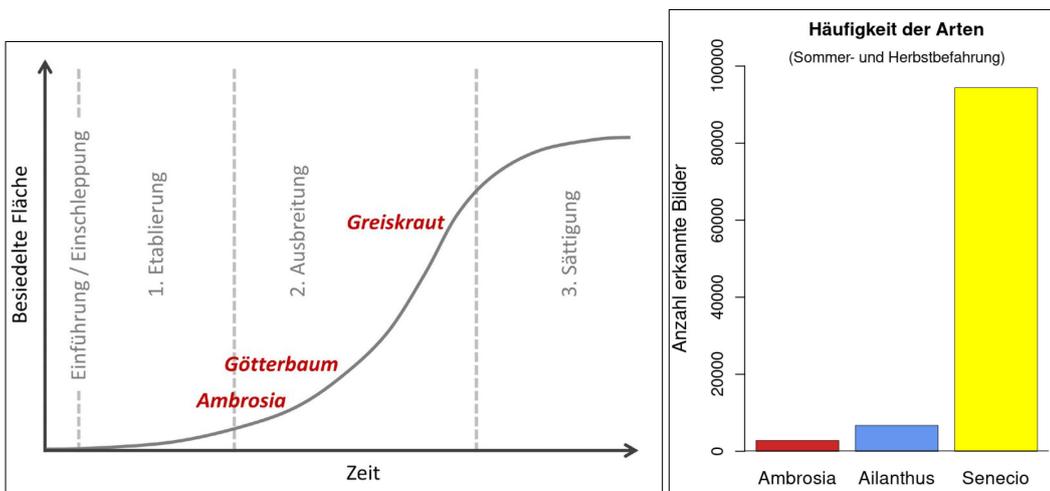


Abb. 7.17 Phasen biologischer Invasionen und die Zuordnung der drei kartierten invasiven Neophyten (links) anhand ihrer Häufigkeit an Nationalstrassen (rechts).

7.4 Am Befall orientiertes Streckenmanagement

Die unterschiedliche Verbreitung der Arten an Nationalstrassen erfordert ein **räumlich differenziertes, am tatsächlichen Befall orientiertes Management** auf Ebene Gebietseinheiten bis hin zu einzelnen Streckenabschnitten. Dabei ist die **Situation in den Gebietseinheiten sehr unterschiedlich** (Abb. 7.18). Während Gebietseinheit II das mit weitem Abstand grösste Vorkommen der Beifussblättrigen Ambrosie aufweist und auch die beiden anderen Arten dort in grossen Beständen vorkommen, weisen andere Gebietseinheiten kaum Vorkommen auf. Dies betrifft besonders Gebietseinheiten deren Nationalstrassen mehrheitlich in höheren Lagen der Alpen oder im Jura verlaufen (v.a. GE III, GE IX und GE XI).

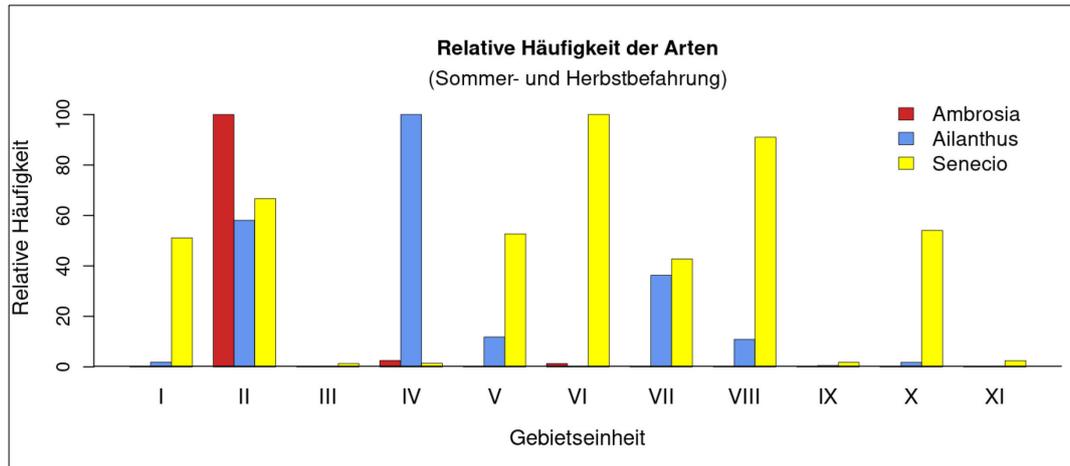


Abb. 7.18 Relative Häufigkeiten der drei invasiven Neophyten in den einzelnen Gebietseinheiten. Der höchste Wert je Art entspricht jeweils 100%.

Die generalisierten Verbreitungskarten der drei kartierten Arten in den Abbildungen 9-11 lassen erkennen, dass auch innerhalb der Gebietseinheiten verschiedene Streckenabschnitte sehr unterschiedlich betroffen sein können. So liegen die mit Abstand grössten Bestände der Beifussblättrigen Ambrosie der Gebietseinheit II auf einem grünen Mittelstreifen eines rund 14 Kilometer langen Streckenabschnitts bei Fribourg, während die Art in anderen Bereichen derselben Gebietseinheit wie auch netzweit meist fehlt. Die Kartierung könnte daher wie folgt für ein am tatsächlichen Befall orientiertes Streckenmanagement mit unterschiedlichen Stufen genutzt werden:

Stufe I - Freihalten: Streckenabschnitte, in denen eine Art bisher fehlt oder nur vereinzelt auftritt (Häufigkeitsklasse «absent or very low» der Karten in Kapitel 4), sollten nach Möglichkeit freigehalten werden, indem auftretende Pflanzen mit dem Ziel entfernt werden, eine Etablierung zu verhindern. Das Verschleppen oder Einwandern der Arten aus bereits befallenen Abschnitten gilt es zu verhindern (z.B. bei durchgehenden Unterhaltsmassnahmen von befallenen in nicht befallene Abschnitte; dabei ist das Erdbewegungskonzept bestimmend).

Stufe II - Zurückdrängen (und mittelfristiges Tilgen): An Streckenabschnitten mit kleineren Vorkommen (Häufigkeitsklasse «low» der Karten in Kapitel 4) sollten die Arten oft noch erfolgreich zurückgedrängt oder mittelfristig gar getilgt werden können. Die gezielte Durchführung auch aufwendigerer Massnahmen erscheint bei den meist noch kurzen Streckenabschnitten vertretbar.

Stufe III - Eindämmen (und mittelfristiges Zurückdrängen): An Streckenabschnitten mit bereits grösseren Vorkommen (Häufigkeitsklasse «medium») sollten Massnahmen darauf abzielen, eine weitere Ausbreitung auf angrenzende Strassenabschnitte zu verhindern und nach Möglichkeit die bestehenden Vorkommen mittelfristig zurückzudrängen. Ein Tilgen der Arten ist in dieser Phase oft nicht mehr mit vertretbarem Aufwand mittelfristig möglich.

Stufe VI – Eindämmen und Ausbreitung in Umgebung verhindern/reduzieren (ggf. Sanierung): Bei Streckenabschnitten mit besonders grossen Vorkommen (Häufigkeitsklasse «high») ist vor allem die weitere Ausbreitung von Nationalstrassen in deren

Umgebung zu reduzieren oder falls möglich zu verhindern (wenn beispielsweise Bestände des Schmalblättrigen Greiskrauts einen besonders hohen Samendruck in die umgebende Landschaft erzeugen). Ein Zurückdrängen der Bestände ist in dieser Phase mit vertretbarem Aufwand oft nicht mehr innerhalb weniger Jahre möglich. Im Einzelfall ist die Möglichkeit einer Sanierung zu prüfen – beispielsweise im Rahmen von anstehenden Bauvorhaben (siehe auch grüner Mittelstreifen in Kapitel 7.6).

Ein differenziertes Vorgehen, dass sich am tatsächlichen Befall orientiert, ist auch bei anderen Strategien zu invasiven Arten vorgesehen. So umfasst der «Massnahmenplan Neobiota 2022-2025» des Kantons Zürich ebenfalls eine flächenspezifische, am Befall orientierte Strategie – von Freihalten, über Reduktion auf mittelstark befallenen Flächen bis hin zu Einzelfallmassnahmen bei sehr starkem Befall [48]. Auch das zukünftigen Stufenkonzept des BAFU für invasive gebietsfremde Neobiota der Schweiz soll neben dem Schadpotential für die Umwelt auch die Verbreitung und Häufigkeit der Arten berücksichtigen [7]. Dabei sollen regionale und standortspezifische Unterschiede berücksichtigt werden, wenn beispielsweise «das Ziel der Tilgung nicht möglich oder der Aufwand nicht gerechtfertigt erscheint» [7].

Ein am Befall orientiertes Vorgehen findet schon heute an Nationalstrassen statt. So werden Einzelpflanzen oder kleine Gruppen der Beifussblättrigen Ambrosie oder des Schmalblättrigen Greiskraut, die bei Streckenkontrollen gefunden werden, entfernt. Und bei grossen Beständen des Schmalblättrigen Greiskrauts erfolgt teilweise bereits eine zusätzliche Mahd der Bestände, um den Samenauswurf in die Umgebung zu reduzieren. Dieses Vorgehen ist bisher aber nicht netzweit abgestimmt und erfolgt ohne eine netzweite Übersicht zu besonders stark betroffenen Streckenabschnitten. Die netzweiten Verbreitungskarten der vorliegenden Arbeit können hier eine wertvolle Entscheidungshilfe bieten.

7.5 Allgemeine Freihaltezonen und Schwerpunktgebiete

Ein am Befall orientierter Ansatz kann wie beschrieben streckenspezifische Ziele für bestimmte Arten vorsehen. Grössere Abschnitte des Nationalstrassennetzes können aber auch als allgemeine Schwerpunktgebiete gelten, falls dort gleich mehrere invasive Arten mit grossen Beständen vorkommen. Umgekehrt können Teile des Nationalstrassennetzes als allgemeine Freihaltezonen eingestuft werden, falls dort invasive Neophyten noch fehlen oder kaum vorhanden sind. Dies trifft zum einen für Nationalstrassen in Alpentälern und im Jura zu, da invasive Neophyten sich fast ausschliesslich zunächst in den Tieflagen ausbreiten und erst von dort an höher gelegene Nationalstrassen vordringen. Ferner können neue Nationalstrassen oder Abschnitte nach Streckensanierungen als Freihaltezonen definiert werden, bevor invasive Neophyten sich dort etablieren.

7.6 Grüne Mittelstreifen fördern Ausbreitung

Die drei kartierten invasiven Neophyten wurden auf Mittelstreifen deutlich häufiger gefunden als an Seitenstreifen (*Abb. 7.19*). Vorkommen auf Mittelstreifen liegen dabei fast ausschliesslich auf grünen Mittelstreifen, die nicht versiegelt und mit Vegetation bewachsen sind. Die Förderung von Neophyten an Nationalstrassen durch Leitplanken und andere Hindernisse bei der Mahd wurde bereits an Seitenstreifen untersucht und bestätigt [47]. Auch die Unterschiede zwischen Mittel- und Seitenstreifen dürften mit dem Grünunterhalt zusammenhängen (siehe auch [33]). Während die fahrbahnahe Vegetation an Seitenstreifen häufiger und früher gemäht wird und frei von Gehölzen ist, erfolgt der Unterhalt auf Mittelstreifen weniger intensiv und lässt oft fahrbahnahe Gehölze zu. Letzteres kommt dem Götterbaum direkt zugute, während die sich spät im Jahr entwickelnden Arten Schmalblättriges Greiskraut und Beifussblättrige Ambrosie von der weniger intensiven Grünpflege der Mittelstreifen profitieren (*Abb. 7.20*) und zwischen Mittelleitplanken oder an Gehölzen vor Mahd geschützte Kleinstandorte vorfinden.

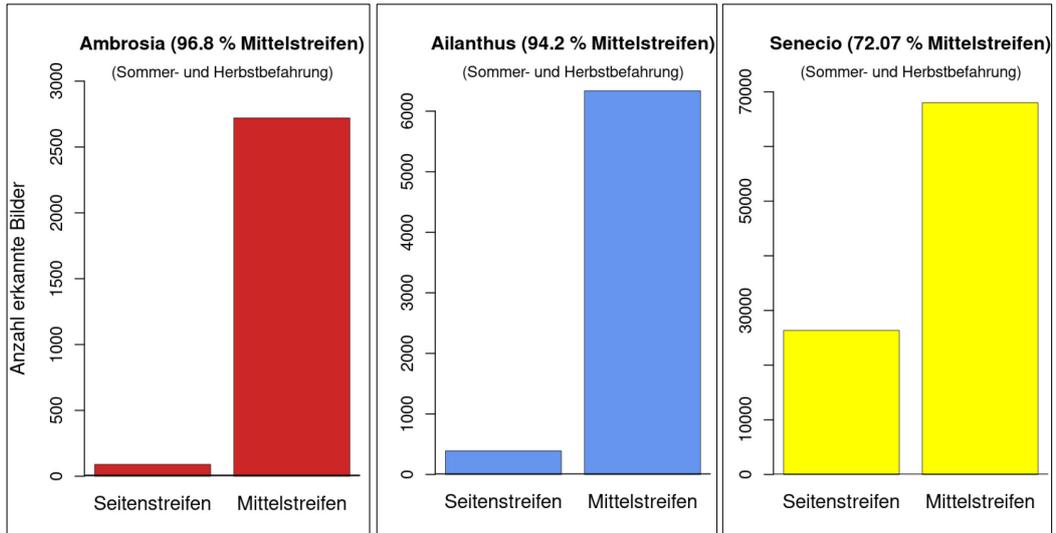


Abb. 7.19 Alle drei kartierten Arten zeigen einen deutliche Schwerpunkt auf Mittelstreifen. Für die Darstellung wurden die Vorkommen der zweiten und dritten Befahrung verwendet.



Abb. 7.20 Ein Bestand der Beifussblättrigen Ambrosie auf einem grünen Mittelstreifen. Während die Art hier zwischen den Leitplanken zum Aussamen gelangt, ist im Hintergrund die Vegetation am Seitenstreifen bereits gemäht.

Die Unterschiede in der Häufigkeit der Arten zwischen Mittel- und Seitenstreifen ist auch auf längeren Streckenabschnitten zu beobachten. Die folgende Abbildung zeigt als Beispiel die kartierten Vorkommen des Götterbaums an der A1 zwischen Genf und Lausanne (Abb. 7.21). Die Art wächst hier fast ausschliesslich auf dem Mittelstreifen.

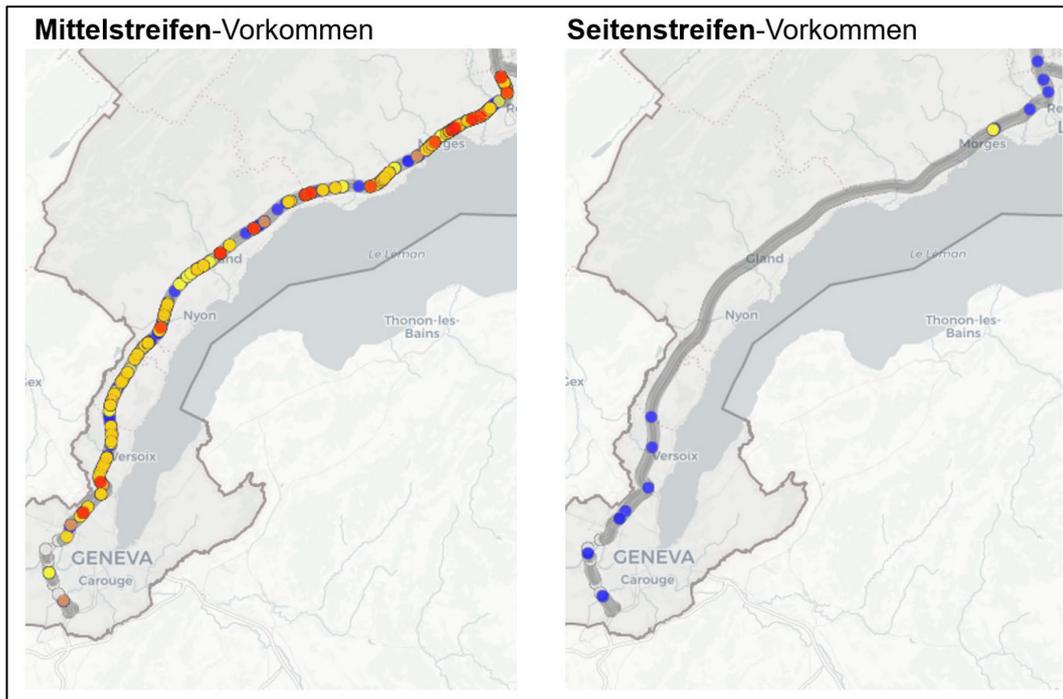


Abb. 7.21 Verbreitung des Götterbaums an der A1 zwischen Genf und Lausanne, getrennt für Vorkommen auf Mittelstreifen (linke Karte) und Seitenstreifen (rechte Karte).

Grüne Mittelstreifen sind durch ihre grossen Vorkommen invasiver Neophyten für deren Bekämpfung von grosser Bedeutung. Bei der Erneuerung von Strassenabschnitten sollten daher grüne Mittelstreifen mit grossen Neophytenvorkommen saniert (z.B. Beifussblättrige Ambrosie bei Fribourg) und gegebenenfalls aus Sicht des Neophytenmanagements auf grüne Mittelstreifen verzichtet werden.

7.7 Ausbreitung von Nationalstrassen in die Umgebung

Zur Vermeidung von Folgeschäden sind nicht nur die Vorkommen invasiver Arten an den Strassen selbst, sondern auch das Potential für ihre weitere Ausbreitung in die angrenzende Landschaft zu berücksichtigen. Dieses Risiko wird vom jeweiligen Landschaftskontext beeinflusst und im Folgenden für die drei kartierten Arten diskutiert.

Beim Götterbaum sind für die Ausbreitung in die umgebende Landschaft nicht so sehr die bereits grossen Vorkommen auf Mittelstreifen von Bedeutung. Diese breiten sich zwar auf den Mittelstreifen seitlich durch Wurzelbrut weiter aus, doch bilden die Pflanzen hier wegen des jährlichen Gehölzschnitts nur in Ausnahmefällen Samen. Für die Ausbreitung von Nationalstrassen in die Umgebung sind die selteneren Vorkommen des Götterbaums in Gehölzen an Seitenstreifen von viel grösserer Bedeutung. Diese wurden bei der Kartierung der fahrbahnnahe Vegetation nicht systematisch erfasst, waren zum Teil aber im Hintergrund zu sehen (Abb. 7.22, links und Mitte). Bei Gehölzvorkommen an Seitenstreifen werden die Pflanzen nicht oder zumindest nicht regelmässig zurückgeschnitten, können so zur Samenreife gelangen und zur Ausbreitung in die Landschaft beitragen. Solche Samenbäume dürften meist auf denselben Sameneintrag zurückzuführen sein, der auch für die Besiedelung der Mittelstreifen verantwortlich ist (Abb. 7.22, links). Besonders in Bereichen mit grosser Mittelstreifenvorkommen sollte daher auch auf Götterbäume in Gehölzen an Seitenstreifen geachtet werden. An Nationalstrassen, die von gehölzarmen Landwirtschaftsflächen umgeben sind, ist die Ausbreitung des Götterbaums in die Landschaft weniger wahrscheinlich als bei angrenzenden Gehölz- und Waldflächen. Besonders zu achten ist auch auf schützenswerte Lebensräume. Beim Götterbaum sind dies neben Auenstandorten (Tessin) vor allem offene Felsstandorte (Abb. 7.22, rechts).

Für das Schmalblättrige Greiskraut besteht das Risiko, dass sich die Art mit ihren Flugsamen in die Umgebung ausbreitet. Aus diesem Grund wird an Nationalstrassen teilweise bereits eine zusätzliche Mahd von besonders grossen Beständen empfohlen. Die

Ausbreitung von Strassen in die Landwirtschaftszone ist in den letzten Jahren zunehmend festzustellen, bewegt sich aber aktuell noch auf niedrigem Niveau. *Abbildung 6.23* zeigt Grünlandvorkommen im angrenzenden Ausland. Das Vorkommen in einer Bergweide in Südtirol auf ca. 1340 m zeigt, dass bei der Art auch mit dem Vordringen in höhere Lagen gerechnet werden muss. Die Ausbreitung ausgehend von Strassen in Wiesen und Weiden wurde auch in der Schweiz bereits beobachtet [49].

Für die Beifussblättrige Ambrosie ist davon auszugehen, dass das Risiko einer spontanen Ausbreitung von Nationalstrassen in die Umgebung vor allem bei angrenzenden Ackerflächen gegeben ist, da die Art in Äckern grosse Bestände bilden kann (*Abb. 7.24*). Insgesamt ist das Risiko der Verschleppung von Samen entlang der Strassen an Fahrzeugen oder auch an Unterhaltsmaschinen (z.B. an Mäh- oder Mulchwerk) aber vermutlich grösser als das Risiko der spontanen Ausbreitung in die umgebende Landschaft. Auf ein allgemein geringes Ausbreitungsvermögen weisen auch die dichten und deutlich abgegrenzten Bestände bei Payerne, Gossau und Lausanne hin, die noch vergleichsweise kurze Streckenabschnitte besiedeln. Beim grossen Vorkommen bei Fribourg ist dagegen anzunehmen, dass bei Unterhaltsarbeiten spät im Jahr die Samen über mehrere Jahre immer wieder über grössere Distanzen verschleppt wurden.

Insgesamt bietet die vorliegende Kartierung der invasiven Neophyten für die Beurteilung ihres Ausbreitungspotentials in die Landschaft eine wertvolle Hilfestellung, da in den interaktiven Karten die Landnutzung in der Umgebung von grösseren Beständen anhand von Luftbildern berücksichtigt werden kann.



Abb. 7.22 Beim Götterbaum geht das Risiko der Ausbreitung in die Landschaft vor allem von Vorkommen in Gehölzen an Seitenstreifen aus (links und Mitte), da diese zur Samenreife gelangen können (Mitte). Ausser in Gehölze und Wälder kann sich der Götterbaum auch an Felsstandorte mit schützenswerter Vegetation ausbreiten (rechts; Tessin nahe Biasca, Aufn. M. Nobis, 2022).



Abb. 7.23 Das Schmalblättrige Greiskraut in einer Wiese neben einem Autobahnzubringer nahe Freiburg i. Br., Deutschland (links), sowie in einer Bergweide auf ca. 1340 m ü. M. neben einer Hofzufahrt nahe Bozen, Italien (rechts). Aufnahmen M. Nobis, 2022.



Abb. 7.24 Die Landnutzung in der Nachbarschaft von Nationalstrassen dürfte einen Einfluss auf das Ausbreitungsrisiko der Arten in die angrenzende Landschaft haben. Bei der Beifussblättrigen Ambrosie ist bei benachbarten Ackerflächen (links; mittleres Bild bei Payerne) von einem grösseren Risiko auszugehen als bei angrenzendem Dauergrünland oder Waldflächen (rechte Karte, Gossau). Im linken Bild kommt die Art im Vordergrund mehrfach vor, wobei aber nur die von der KI erkannte Bildkachel mit der höchsten Wahrscheinlichkeit markiert ist.

7.8 Früherkennung, Monitoring und Erfolgskontrolle

Eine wiederholt durchgeführte, KI-basierte Kartierung invasiver Neophyten an Nationalstrassen kann ein wichtiges Hilfsmittel für ein Neophytenmanagement sein. Das frühzeitige Erkennen von Vorkommen ist wichtig, um präventiv zu einem frühen Zeitpunkt mit noch geringem Aufwand gegen Arten vorgehen zu können. Früherkennung wird in der «Strategie der Schweiz zu invasiven gebietsfremden Arten» [7] genannt und ist ein zentraler Bestandteil einer Bekämpfungsstrategie. Frühzeitig erkannte und behandelte Vorkommen sollten in Folgejahren vor Ort kontrolliert und gegebenenfalls nachbehandelt werden. Eine automatisierte Kartierung grösserer Streckenabschnitte oder des gesamte Nationalstrassennetzes erscheint dagegen nur in mehrjährigen Abständen sinnvoll. Solche wiederholten Kartierungen dienen dann neben der Früherkennung auch dem Monitoring, d.h. der Erfassung der Dynamik der Bestände. Auf diese Weise können wiederholte Kartierungen auch zur Erfolgskontrolle genutzt werden, da überprüft werden kann, ob die am Befall orientierten Ziele «Freihalten», «Zurückdrängen» und «Eindämmen» in bestimmten Streckenabschnitten mit den durchgeführten Massnahmen und Unterhaltsarbeiten erreicht wurden. Eine Erfolgskontrolle durch Kartierung der Bestände vor und nach durchgeführten Massnahmen ist auch in anderen Neophytenstrategien vorgehen (z.B. im Kanton Zürich, [20]).

Ein Beispiel für Früherkennung und Erfolgskontrolle zeigt folgende Abbildung (Abb. 7.25). Bei der Vorstudie wurden 2019 mehrere Exemplare der Beifussblättrige Ambrosie zufällig in Bildern an einem Seitenstreifen der A1 bei Dietlikon im Kanton Zürich gefunden. Das

Vorkommen wurde der zuständigen kantonalen Stelle (Strickhof) gemeldet und behandelt. Die automatisierte Kartierung erfasste 2021 im selben Bereich noch eine Einzelpflanze. Dies zeigt, dass die Etablierung eines grösseren Bestandes bisher nicht stattgefunden hat und lässt vermuten, dass durch die Massnahme das Vorkommen reduziert aber noch nicht getilgt wurde. Da Samen der Ambrosie noch nach mehreren Jahrzehnten keimen können ist eine Nachkontrolle in diesem Bereich auch weiterhin angezeigt.

Beispiele für die Dynamik grösserer Vorkommen von Götterbaum und Schmalblättrigem Greiskraut zeigt der Vergleich der Kartierungen von 2019 und 2021 in Kapitel 4. Neben den diskutierten, methodisch bedingten Abweichungen zeigen die grösseren Bestände bei beiden Arten im Abstand von zwei Jahren keine deutlichen Veränderungen. Für ein Monitoring scheinen daher wiederholte Kartierungen im Abstand von drei bis fünf Jahren ausreichend.

Obwohl in der vorliegenden Arbeit nur drei invasive Neophyten kartiert wurden, ist das netzweite Bildmaterial nicht zuletzt auch eine Dokumentation der Vegetation an Nationalstrassen, die im Gegensatz zu klassischen Kartierungen auch später noch retrospektiv für eine Kartierung und die Erfassung der Dynamik weiterer Arten genutzt werden kann.



Abb. 7.25 Beifussblättrige Ambrosie an einem Seitenstreifen der A1 bei Dietlikon (ZH). Die Art wurde hier 2019 zufällig mit einzelnen Pflanzen im Bildmaterial gefunden und 2021 bei der netzweiten Kartierung bestätigt. Das Risiko der Etablierung grösserer Bestände kann hier noch mit geringem Aufwand reduziert werden, sofern das weitere Aussamen der Pflanzen verhindert wird.

Anhänge

Götterbaum (<i>Ailanthus altissima</i>)	4
Schmalblättriges Greiskraut (<i>Senecio inaequidens</i>)	4
Beifussblättrige Ambrosie (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>)	4
Ailante glanduleux (<i>Ailanthus altissima</i>)	6
Séneçon du Cap (<i>Senecio inaequidens</i>)	6
Ambroisie à feuilles d'armoise (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>)	6
Ailanto (<i>Ailanthus altissima</i>)	8
Senecio sudafricano (<i>Senecio inaequidens</i>)	8
Ambrosia con foglie di artemisia (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>)	8
I	
Digitale Verbreitungskarten	43
I.1 Götterbaum (<i>Ailanthus altissima</i>)	43
I.2 Schmalblättriges Greiskraut (<i>Senecio inaequidens</i>)	43
I.3 Beifussblättrige Ambrosie (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>)	43

I Digitale Verbreitungskarten

Die Verbreitungskarten der drei invasiven Neophyten an Nationalstrassen stehen als sogenannte **self-contained HTML-Dateien** zur Verfügung. Nach dem Download einer gepackten Datei (**ZIP-Format**), muss diese zunächst entpackt werden und kann dann mit einem **Webbrowser** geöffnet und betrachtet werden. Dabei stehen unterschiedliche **Zoomstufen** und **Kartenhintergründe** zur Verfügung. Erkannte Vorkommen an **Mittel- oder Seitenstreifen** können **getrennt angezeigt werden**.

Bei der **Interpretation der Karten von Götterbaum und Schmalblättrigem Greiskraut** ist zu berücksichtigen, dass es sich um die von der KI erkannte Vorkommen handelt und besonders Bilder mit nur wenigen erkannten Bildkacheln (blaue Symbole) **irrtümliche Funde («False Positives»)** sein können (vgl. Kapitel 6.3). Bei der Beifussblättrigen Ambrosie besteht diese Einschränkung nicht, da sämtliche KI-Funde in den Bildern überprüft wurden (vgl. Kapitel 4).

I.1 Götterbaum (*Ailanthus altissima*)

Digitale Formate zu Abb. 4.9:

- Interaktive Verbreitungskarte (47 MB): https://purl.org/wsl/astra_ailanthus_html
- Karte mit Häufigkeitsklassen (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_ailanthus_png

I.2 Schmalblättriges Greiskraut (*Senecio inaequidens*)

Digitale Formate zu Abb. 4.10:

- Interaktive Verbreitungskarte (49 MB): https://purl.org/wsl/astra_senecio_html
- Karte mit Häufigkeitsklassen (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_senecio_png

I.3 Beifussblättrige Ambrosie (*Ambrosia artemisiifolia*)

Digitale Formate zu Abb. 4.11:

- Interaktive Verbreitungskarte (32 MB): https://purl.org/wsl/astra_ambrosia_html
- Karte mit Häufigkeitsklassen (1.4 MB): https://purl.org/wsl/astra_ambrosia_png

Literaturverzeichnis

-
- [1] Seebens, H., Blackburn, T.M., Dyer, E.E., Genovesi, P., Hulme, P.E., Jeschke, J.M., Pagad, S., u.a. (2017), „**No saturation in the accumulation of alien species worldwide**“, *Nature Communications* 8, 14435.
-
- [2] Pyšek, P., Hulme, P.E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T.M., Carlton, Wayne Dawson, J.T., u. a. (2020), „**Scientists' warning on invasive alien species**“, *Biological Reviews* 95, 1511–1534.
-
- [3] BAFU (Hrsg.) (2022), „**Gebietsfremde Arten in der Schweiz. Übersicht über die gebietsfremden Arten und ihre Auswirkungen**“, 1. aktualisierte Auflage 2022, Erstausgabe 2006, Bundesamt für Umwelt, Bern, *Umwelt-Wissen* 2220, 62 S.
-
- [4] SKEW (2001), „**Schwarze Liste besonders aggressiver invasiver Neophyten**“, Schweizerische Kommission für die Erhaltung von Wildpflanzen, http://www.cps-skew.ch/deutsch/empfehlungen_saatgut.htm (Artenliste IVa; Stand 1.5.2001, aufgerufen via www.archive.org am 14.6.2020).
-
- [5] Wittenberg, R. (Hrsg.) (2006), „**Gebietsfremde Arten in der Schweiz. Eine Übersicht über gebietsfremde Arten und ihre Bedrohung für die biologische Vielfalt und die Wirtschaft in der Schweiz**“, Bundesamt für Umwelt, Bern, *Umwelt-Wissen* 0629, 154 S.
-
- [6] Buholzer, S., Nobis, M., Schoenenberger, N., Rometsch, S. (2014), „**Schwarze Liste und Watch Liste invasiver Neophyten der Schweiz**“, Info Flora, Bern (<https://www.infoflora.ch/de/neophyten/listen-und-infobl%C3%A4tter.html>, aufgerufen am 10.02.2023).
-
- [7] BAFU (2016), „**Strategie der Schweiz zu invasiven gebietsfremden Arten**“, Beilage zum Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 13.3636 „Stopp der Ausbreitung von invasiven gebietsfremden Arten“ von Nationalrat Karl Vogler vom 21.06.2013, Schweizerische Eidgenossenschaft.
-
- [8] European Commission (2022), „**List of Invasive Alien Species of Union concern**“, (https://ec.europa.eu/environment/nature/invasivealien/list/index_en.htm, aufgerufen am 18.11.2022).
-
- [9] Ernst, W.H.O. (1998), „**Invasion, dispersal and ecology of the South African neophyte *Senecio inaequidens* in The Netherlands: from wool alien to railway and road alien**“, *Acta Botanica Neerlandica* 47, 131–151.
-
- [10] Zwaenepoel, A., Roovers, P., Hermy, M. (2006), „**Motor vehicles as vectors of plant species from road verges in a suburban environment**“, *Basic and Applied Ecology* 7, 83–93.
-
- [11] von der Lippe, M., Kowarik, I. (2007), „**Long-Distance Dispersal of Plants by Vehicles as a Driver of Plant Invasions**“, *Conservation Biology* 21, 986–996.
-
- [12] Nobis, M., Christoph M., Ginzler, C., Timofte, R. (2020), „**Automatisierte Erfassung invasiver Neophyten an Autobahnen**“, Bundesamt für Strassen, VSS 2016/224, *Forschungsberichte ASTRA* 1690, 67 S. (https://www.mobilityplatform.ch/fileadmin/mobilityplatform/normenpool/21785_1690_Inhalt.pdf, aufgerufen am 10.02.2023).
-
- [13] Kowarik, I., Säumel, I. (2008), „**Water dispersal as an additional pathway to invasions by the primarily wind-dispersed tree *Ailanthus altissima***“, *Plant Ecology* 198, 241–252.
-
- [14] Martin, P.H., Canham, C.D. (2010), „**Dispersal and recruitment limitation in native versus exotic tree species: life-history strategies and Janzen-Connell effects**“, *Oikos* 119, 807–824.
-
- [15] Fryer, J.L. (2010), „***Ailanthus altissima***“, Fire Effects Information System (FEIS) [Webseite]. *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory* (<https://www.fs.usda.gov/database/feis/plants/tree/ailant/all.html>, aufgerufen am 18.11.2022).
-
- [16] Kowarik, I. (1983), „**The distribution of the Tree of Heaven (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle) in the French Mediterranean area (Bas-Languedoc)**“, *Phytocoenologia* 11, 389–405.
-
- [17] Burch, P.L., Zedaker, S.M. (2003), „**Removing the invasive tree *Ailanthus altissima* and restoring natural cover**“, *Journal of Arboriculture* 29, 18–24.
-
- [18] Wunder, J., Knüsel, S., Dorren, L., Schwarz, M., Bourrier, F., Conedera, M. (2018). „**Götterbaum und Paulownie: die «neuen Wilden» im Schweizer Wald?**“, *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 169, 69–76.
-
- [19] Gurtner, D., Conedera, M., Rigling, A., Wunder, J. (2015), „**Der Götterbaum dringt in die Wälder nördlich der Alpen vor**“, *Wald und Holz* 7, 22–24.
-
- [20] Kanton Zürich (2018), „**Massnahmenplan invasive gebietsfremde Organismen 2018-2021**“, Baudirektion, AWEL, 12 S.
-
- [21] Werner, D.J., Rockenbach, T., Hölscher, M.-L. (1991), „**Herkunft, Ausbreitung, Vergesellschaftung und Ökologie von *Senecio inaequidens* DC. unter besonderer Berücksichtigung des Köln-Aachener Raumes**“, *Tuexenia* 11, 73–107.
-
- [22] López-García, M.C., Maillet, J. (2005), „**Biological characteristics of an invasive south African species**“, *Biological Invasions* 7, 181–194.
-

- [23] Heger, T., Böhmer, H.J. (2006), „**NOBANIS – Invasive Alien Species Fact Sheet – *Senecio inaequidens***“, *Online Database of the European Network on Invasive Alien Species – NOBANIS*. www.nobanis.org (aufgerufen am 18.11.2022).
- [24] Lenzin, H., Huck, C., Gross, A., Nagel, P. (2009), „**Verbreitung und Standorte des Schmalblättrigen Kreuzkrauts (*Senecio inaequidens*) und anderer Neophyten in der Stadt Basel (Schweiz)**“, *Bauhinia* 21, 17–24.
- [25] Brodtbeck, T., Zemp, M., Frei, M., Kienzle, U., Knecht, D. (1999), „**Flora von Basel und Umgebung 1980–1996, Teil II**“, *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel*, Volume 3.
- [26] Heger, T., Böhmer, H.J. (2005), „**The invasion of Central Europe by *Senecio inaequidens* DC. - a complex biogeographical problem**“, *Erdkunde* 59, 34–49.
- [27] Landolt, E. (2001), „**Flora der Stadt Zürich (1984–1998)**“, Birkhäuser, Basel.
- [28] Landolt, E. (2013), „**Flora des Sihltals - von der Stadt Zürich bis zum Höhrönen**“, *Fachstelle Naturschutz Kanton Zürich*, <http://www.naturschutz.zh.ch>.
- [29] Federer, C. (2015), „**Distribution of *Senecio inaequidens* in Zurich from 1985 to 2015**“, Masterarbeit, ETH Zürich.
- [30] Dimande, A.F.P., Botha, C.J., Prozesky, L., Bekker, L., Rosemann, G.M., u.a. (2007), „**The toxicity of *Senecio inaequidens* DC.**“, *Journal of the South African Veterinary Association* 78, 121–129.
- [31] Passemard, B., Priymenko, N. (2007), „**L'intoxication des chevaux par les séneçons, une réalité en France**“, *Revue de Médecine Vétérinaire* 158, 425–430.
- [32] BABS (2015), „**Nationale Gefährdungsanalyse – Gefährdungsdossier Massenausbreitung invasiver Arten**“, Bundesamt für Bevölkerungsschutz, www.babs.admin.ch.
- [33] ASTRA (2015), „**Grünräume an Nationalstrasse – Gestaltung und Betrieblicher Unterhalt**“, *Richtlinie* 18007, 59 S., www.astra.admin.ch
- [34] Böhmer, H.J. (2001), „**Das Schmalblättrige Greiskraut (*Senecio inaequidens* DC. 1837) in Deutschland - eine aktuelle Bestandesaufnahme**“, *Floristische Rundbriefe* 35, 47–54.
- [35] Feichtinger, G. (2012), „**Erfahrungsbericht zur Bekämpfung des Schmalblättrigen Kreuzkrauts (*Senecio inaequidens*) im Kanton Zürich**“, Strickhof: Fachstelle Pflanzenschutz des Kanton Zürich.
- [36] Schweizerische Eidgenossenschaft (2008), „**Verordnung über den Umgang mit Organismen in der Umwelt (Freisetzungsverordnung, FrSV)**“, *SR 814.911*, www.admin.ch.
- [37] Fischer, K., Landergott, U. (2014), „**Schmalblättriges Greiskraut: Bekämpfungspflicht**“, *Zürcher UmweltPraxis (ZUP)* 77, 35–36.
- [38] ASTRA (2014), „**Bekämpfung Neophyten**“, *Fachhandbuch Betrieb, Technisches Merkblatt Grünpflege* 26 010-03020.
- [39] Alberternst, B., Nawrath, S., Klingenstein, F. (2006), „**Biologie, Verbreitung und Einschleppungswege von *Ambrosia artemisiifolia* in Deutschland und Bewertung aus Naturschutzsicht**“, *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* 58, 279–285.
- [40] Essl, F., Biró, K., Brandes, D., Broennimann, O., Bullock, J.M., Chapman, D.S., Chauvel, B., u. a. (2015), „**Biological Flora of the British Isles: *Ambrosia artemisiifolia***“, *Journal of Ecology* 103, 1069–1098.
- [41] Lemke, A., Kowarik, I., von der Lippe, M. (2019), „**How traffic facilitates population expansion of invasive species along roads: The case of common ragweed in Germany**“, *Journal of Applied Ecology* 56, 413–422.
- [42] Allergiezentrum Schweiz (2022), „**Pollenkalender**“ (<https://www.aha.ch/allergiezentrum-schweiz/aha-shop?action=details&id=265&Pollenkalender>, aufgerufen am 18.11.2022).
- [43] Hall, R.M., Urban, B., Wagentristl, H., Karrer, G., Winter, A., Czerny, R., Kaul, H. (2021), „**Common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) causes severe yield losses in soybean and impairs *Bradyrhizobium japonicum* infection**“, *Agronomy* 11, 1616.
- [44] Haubrock, P.J., Turbelin, A.J., Cuthbert, R.N., Novoa, A., Taylor, N.G, Angulo, E., Ballesteros-Mejia, L. u. a. (2021), „**Economic costs of invasive alien species across Europe**“, *NeoBiota* 67, 153–190.
- [45] Bohrer, C., Delabays, N., Mermillod, G., Keimer, C., Kündig, C. (2005), „***Ambrosia artemisiifolia* in der Schweiz – eine herbologische Annäherung**“, *AGRARForschung* 12, 71–78.
- [46] Schweizerische Eidgenossenschaft (2008), „**Verordnung über den Schutz von Pflanzen vor besonders gefährlichen Schadorganismen (Pflanzengesundheitsverordnung, PGesV)**“, *SR 916.20*, www.admin.ch.
- [47] Buser, H., Klaiber, A., Münter, L., Richter, T. (2021), „**Neophytenprävention an Nationalstrassen**“, *Forschungsberichte ASTRA FB 1706, VSS 2018/229*, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen.
- [48] Kanton Zürich (2021), „**Massnahmenplan Neobiota 2022–2025**“, www.zh.ch (aufgerufen am 18.11.2022).
- [49] Landergott, U. (2020), „**Schmalblättriges Greiskraut: Monitoring und Bekämpfung im Kanton Zürich**“, FORNAT AG, Zürich.

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2023	1.02	13.11.2023	Kapitel 1 Einleitung hinzugefügt.
2023	1.01	10.06.2023	Zusammenfassung auf Französisch und Italienisch hinzugefügt
2023	1.00	15.03.2023	Inkrafttreten Erstausgabe 2023

