



Entwicklung eines Alternativ- verfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen



Berichte
des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung

Bericht 77 (2026)



Berichte des Deutschen Zentrums
für Schienenverkehrsforschung, Bericht 77 (2026)
Projektnummer 2018-U-5-1202

Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen

von

Carolina Archut, Nils Jendry, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler
Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (ifs),
RWTH Aachen University, Aachen

Aileen Schulte-Marxloh, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Uwe Conrath
Institut für Pflanzenphysiologie (iPP), RWTH Aachen University, Aachen

Matthias Eberius
crop.zone GmbH, Aachen

im Auftrag des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

Impressum

HERAUSGEBER

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt

August-Bebel-Straße 10
01219 Dresden

www.dzsf.bund.de

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

RWTH Aachen University, Institut für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme

Seffenter Weg 8
52074 Aachen

RWTH Aachen University, Institut für Pflanzenphysiologie

Worringer Weg 1
52074 Aachen

crop.zone GmbH¹

Pascalstraße 55
52076 Aachen

ABSCHLUSS DER STUDIE

September 2024

REDAKTION

Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt
Dr. Sabrina Michael, Fachbereich Klimaschutz, Umwelt und Nachhaltigkeit

BILDNACHWEIS

Fotograf Archut, Jendryn/ifs
Fotograf Schulte-Marxloh/iPP
Fotograf Abdo, Eberius/cz

PUBLIKATION ALS PDF

<https://www.dzsf.bund.de/Forschungsergebnisse/Forschungsberichte>

ISSN 2629-7973

doi: [10.48755/dzsf.260007.01](https://doi.org/10.48755/dzsf.260007.01)

Dresden, Februar 2026



This work is openly licensed via CC BY 4.0.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

¹ Zuarbeit bei Textpassagen für die Zwischenberichte.

Kurzbeschreibung

Eisenbahnbetreiber sind verpflichtet, die Eisenbahninfrastruktur sicher zu bauen und zu unterhalten. Einen wichtigen Bestandteil bildet dabei das Vegetationsmanagement zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit von Bahnanlagen und der Sicherheit des Schienenverkehrs, um möglichen Betriebsgefahren vorzubeugen. Es erfolgte in den letzten Jahrzehnten in Deutschland und Europa primär durch den Einsatz chemischer Blatt- und Bodenherbizide. Während die Ausbringung von Herbiziden als gängige Methode anerkannt ist, trägt sie allerdings auch zur Umweltbelastung bei. Die Eisenbahninfrastrukturbetreiber stehen daher unter gesellschaftlichen Druck, umweltfreundlichere Ersatzverfahren einzusetzen und sehen sich vermehrt Einschränkungen bei der Anwendung von Herbiziden ausgesetzt. Daher steht die Entwicklung eines nichtchemischen Alternativverfahrens zunehmend im Fokus vieler Forschungsarbeiten.

Im Rahmen des hier beschriebenen Projekts wurde gezielt nach Möglichkeiten einer nichtchemischen Vegetationskontrolle gesucht, um ein geeignetes Verfahren auszuwählen und weiterzuentwickeln. Die Grundlage bildete eine umfangreiche Literatur- und Datenrecherche zur Bewertung bestehender und neuer Alternativverfahren in Bezug auf die Eignung zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich. Zudem wurde in einem dreijährigen Monitoring die Wachstumsdynamik der Vegetation im Gleisbereich untersucht und damit ein erweitertes Verständnis für die Bewertung der Alternativverfahren zur Vegetationskontrolle geschaffen. Ergänzend zur Literaturrecherche wurden einige Orientierungsversuche unternommen, um die Verfahrensauswahl zu unterstützen. Aus diesen Untersuchungen leiteten sich drei als geeignet erscheinende Alternativverfahren ab. Es handelt sich um das maschinelle Jäten (MJ, Zupfen der Pflanzen), das sog. Elektroweeding (EL, Schädigung der Pflanzen durch elektrischen Strom) und die Verwendung von mit Abrasivmittel versetztem Druckwasser (Schneiden oder Zerfasern von Pflanzenteilen).

Diese drei Verfahren wurden im weiteren Projektverlauf konzeptionell weiterentwickelt und durch Vorversuche wurden geeignete Parameter zur Nutzung im Gleisbereich ermittelt. Anschließend wurden die gewonnenen Erkenntnisse als Grundlage für die Entwicklung und den Bau eines Versuchsträgers verwendet. Es handelt sich hierbei um ein angetriebenes Zweiradfahrzeug und ein sog. Trägermodul, ein Anhänger, auf dem die Applikatoren der drei ausgewählten Verfahren montiert sind. Im Rahmen von umfangreichen Versuchsfahrten erfolgte die Erprobung des Versuchsträgers. Die Ergebnisse zeigten die grundsätzliche Eignung der Einzelverfahren für den Einsatz im Gleisbereich. Insgesamt konnte durch die Kombination der drei Verfahren eine Leistungssteigerung im Vergleich zu den Einzelverfahren erzielt werden.

Die Verfahrenskombination wird den durch aufeinanderfolgenden Einsatz der drei entwickelten Verfahren erzeugt. Zunächst wird durch die Anwendung des MJ die Wuchshöhe der Pflanzen auf ca. 20 cm reduziert. Im Versuch ließ sich das bei 5 km/h mit zwei Überfahrten realisieren. Durch das Zählen der nötigen Überfahrten konnte festgelegt werden, wie viele Applikationseinheiten ein zukünftiges Fahrzeug benötigt, um denselben Effekt bei nur einer Überfahrt zu erreichen. Die anschließende Behandlung mittels EL führte zu einer Abnahme der Vegetationsdichte (VD) um 80 % bis 90 %. Dazu waren entsprechend der vorhandenen Vegetation vier bis acht Überfahrten bei einer

Fahrgeschwindigkeit von bis zu 10 km/h notwendig. Schließlich wurde der Nahbereich entlang der Schienen durch zwei bis drei Überfahrten mit dem Druckwasser behandelt. Für eine krautige Vegetation war es effektiver, die Düsen mit drei verschiedenen Winkeln für jede Überfahrt einzustellen, um eine größere Fläche behandeln zu können. Bei verholzender bis verholzter Vegetation (z. B. Brombeerranken, Bäume) blieb der Düsenwinkel unverändert, um die Schneidleistung an einer Stelle zu erhöhen.

Basierend auf der Auswertung der Versuchsergebnisse wurden Handlungsempfehlungen für den weiteren Einsatz des Versuchsträgers und die zukünftige Forschung erarbeitet. Die entwickelte Technologie kann eine hohe VD und -höhe (ca. 50 cm) mit geringerem Energiebedarf als andere Alternativverfahren behandeln. Sie stellt somit eine gute Alternative für die Behandlung von Strecken in Schutzgebieten oder mit geringem Verkehrsaufkommen, welche einen hohen Bewuchs aufweisen können, dar. Darüber hinaus stehen nach dem Bau und der Erprobung der Verfahrenskombination die Ergebnisse dieser neuen Methode zur Vegetationskontrolle für den Bahnsektor offen. Der Erprobungsträger kann in zukünftigen Projekten eingesetzt und weiterentwickelt werden.

Abstract

Railway operators are obligated to safely construct and maintain railway infrastructure. Vegetation management is an important component of this to maintain the functionality of railway facilities and the safety of rail traffic, preventing potential operational hazards. In recent decades, this has primarily been achieved in Germany and Europe through the use of chemical foliar and soil-based herbicides. While the application of herbicides is recognized as a common method, it also contributes to environmental pollution. Railway infrastructure operators are therefore under social pressure to use more environmentally friendly alternative methods and are increasingly facing restrictions on the use of herbicides. Therefore, the development of a non-chemical alternative method is increasingly the focus of much research.

Within the scope of the project described here, a targeted search was conducted for non-chemical vegetation control options in order to select and further develop a suitable method. The research was based on extensive literature and data studies to evaluate existing and new alternative methods with regard to their suitability for vegetation control in track areas. Furthermore, a three-year monitoring program examined the growth dynamics of vegetation in track areas, thus providing a broader understanding for evaluating alternative vegetation control methods. In addition to the literature research, several orientation experiments were conducted to support the method selection process. These investigations resulted in three alternative methods that appeared suitable. These are mechanical weeding (pulling out plants), electro weeding (damaging plants with electrical current), and the use of pressurized water mixed with abrasive agents (cutting or shredding plant parts).

These three processes were further developed conceptually over the course of the project, and suitable parameters for use in track areas were determined through preliminary tests. The findings were then used as the basis for the development and construction of a test vehicle. This consists of a powered road-rail vehicle and a so-called carrier module, a trailer on which the applicators of the three selected processes are mounted. The test vehicle was tested during extensive test drives. The results demonstrated the fundamental suitability of the individual processes for use in track areas. Overall, the combination of the three processes achieved an increase in performance compared to the individual processes.

The combined treatment is achieved through the sequential application of the three developed methods. First, mechanical weeding reduces the plant height to approximately 20 cm. In the test, this was achieved at a speed of 5 km/h with two passes. By counting the required passes, it was possible to determine how many application units a future vehicle would need to achieve the same effect in just one pass. The subsequent treatment with electro weeding resulted in a reduction in vegetation density of 80% to 90%. Depending on the existing vegetation, this required four to eight passes at a speed of up to 10 km/h. Finally, the immediate area along the tracks was treated with two to three pressurized water passes. For herbaceous vegetation, it was more effective to set the nozzles at three different angles for each pass in order to treat a larger area. For woody to lignified vegetation (e.g. blackberry vines, trees), the nozzle angle remained unchanged in order to increase the cutting performance in one area.

Based on the evaluation of the test results, recommendations for further use of the test vehicle and future research were developed. The developed technology can treat high vegetation density and height (approximately 50 cm) with lower energy requirements than other alternative methods. It therefore represents a good alternative for treating routes in protected areas or with low traffic volumes that may have high vegetation cover. Furthermore, after construction and testing of the combined method, the results of this new vegetation control method will be available for the railway sector. The test vehicle can be used and further developed in future projects

Inhaltsverzeichnis

Kurzbeschreibung.....	V
Abstract.....	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Abbildungsverzeichnis	XIV
Tabellenverzeichnis.....	XVI
1 Einleitung.....	18
1.1 Ursachen für die Vegetationskontrolle im Gleisbereich	19
1.2 Verfahren und Methodik der bisher eingesetzten Vegetationskontrolle.....	20
1.2.1 Einsatz der chemischen Vegetationskontrolle	20
1.2.2 Einsatz der nichtchemischen Vegetationskontrolle.....	22
1.2.3 Anwendungsbereich der Vegetationskontrolle.....	23
2 Relevante Eigenschaften des Gleisbereichs für die Vegetationskontrolle.....	24
2.1 Bauliche Eigenschaften des Gleisbereichs.....	24
2.2 Ökologische Eigenschaften des Gleisbereichs	26
2.2.1 Wachstumsbedingungen im Gleisbereich	26
2.2.2 Pflanzenvielfalt und ihre Verteilung im Gleisbereich	27
2.2.3 Beschaffenheit des Schotterkörpers.....	30
3 Wechselwirkungen zwischen Gleisanlagen und Umwelt.....	32
3.1 Gleisanlagen als künstlich geschaffenes Biotop	32
3.1.1 Allgemeine artenschutzrechtliche Einordnung.....	33
3.1.2 Relevante Tierarten für die Risikobewertung	34
3.1.3 Ansätze zur Risikobewertung der chemischen Vegetationskontrolle	39
4 Nichtchemische Alternativverfahren zur Vegetationskontrolle	41
4.1 Kurzbeschreibung der Einzelverfahren	41
4.1.1 Mechanische Verfahren	41
4.1.2 Thermische Verfahren.....	42
4.1.3 Sonstige Verfahren.....	42
4.2 Studien zum Vergleich der Alternativverfahren	43
5 Auswahl geeigneter nichtchemischer Alternativverfahren	45
5.1 Vorgehen bei der Auswahl der Alternativverfahren.....	45
5.2 Anforderungen an die Vegetationskontrolle im Gleisbereich.....	46
5.2.1 Ermittlung der Anforderungen	47
5.2.2 Anforderungsliste eines nichtchemischen Verfahrens	49

5.3	Bewertung der nichtchemischen Verfahren	51
5.3.1	Gewichtung der Anforderungen eines nichtchemischen Verfahrens	51
5.3.2	Skalen zur Bewertung der Anforderungen (Bepunktung)	52
5.3.3	Bewertungsergebnisse und Auswahl der geeigneten Verfahren („Best/Worst Case“)	53
6	Design und Konstruktion des Versuchssystems	56
6.1	Versuchsträger	56
6.2	Trägermodul	58
6.2.1	Arbeitsprinzip und Eigenschaften des maschinellen Jätens	59
6.2.2	Arbeitsprinzip und Eigenschaften des Druckwasser-Verfahrens	62
6.2.3	Arbeitsprinzip und Eigenschaften des El	64
7	Praxisversuche im Gleis	66
7.1	Zielsetzung der Versuche	66
7.1.1	Grundlagen und Methoden der Wirksamkeitsbewertung	66
7.1.2	Merkmale der Versuchsstrecken	71
7.1.3	Versuchsparameter	73
7.2	Ergebnisse und Diskussion der Versuche	75
7.2.1	Auswertung der Ergebnisse der Einzelverfahren	77
7.2.2	Auswertung der Ergebnisse der Verfahrenskombination	96
7.2.3	Anwendungsempfehlungen der Parameterkombinationen	102
7.2.4	Geräuschentwicklung des Versuchssystems	103
7.2.5	Abschätzung des Risikopotentials der Verfahren auf im Gleisbereich lebende Tiere	107
8	Bewertung und Einstufung der Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Verfahren	109
8.1	Ermittlung des direkten Energiebedarfs	109
8.2	Berechnung der Ausbringungsmengen der Verbrauchsmaterialien	113
8.3	Vergleich der entwickelten Verfahren mit den aktuell eingesetzten Verfahren	114
8.4	Bewertung der Wirtschaftlichkeit	117
9	Handlungsempfehlungen	121
9.1	Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung und weitere Nutzung des Versuchsträgers	121
9.2	Ausblick für zukünftigen Forschungsbedarf	125
10	Zusammenfassung	127
	Quellenverzeichnis	129
	Anhänge	142

Abkürzungsverzeichnis

AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AGES	Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, Wien
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie (morphologischen Entwicklungsstadien einer Pflanze)
BG	besonders geschützt
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BO	bleibt auf Oberfläche
BS	Beobachtungsstrecke
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
BVL	Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit
DB AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DW	Druckwasser
EBA	Eisenbahn-Bundesamt, Bonn
EBO	Eisenbahn-Betriebsordnung
El	Elektroweeding
EM	erhebliche Mortalität im Normalbetrieb
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
ETCS	European Train Control System (dt. europäisches Zugbeeinflussungssystem)
EU	Europäische Union
FO	Fluchtoption

FS	Fortpflanzungsstätte
GW	geringe Wirksamkeit
IP	International Protection
KGF	kein gesichertes Fluchtverhalten
kS	ganztägig beschattet
LKW	Lastkraftwagen
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
MJ	maschinelles Jäten
MW	Mittelwert
NA	Neuaustrieb
ÖBB	Österreichische Bundesbahn
OGewV	Oberflächengewässerverordnung (BGBl I S. 1373)
PE	Polyethylen
PEP	Produktentwicklungsprozess
PH	Pflanzenhöhe
PZB	punktförmige Zugbeeinflussung
QW	Querung/Wanderung
Ril	Richtlinie
RNA	reduzierter Neuaustrieb
RS	Ruhestätte
RW	reduziertes Wachstum
RWS	Reinwasserstrahl
S	ganztägig sonnenexponiert
SBB	Schweizerische Bundesbahn

SNCF	Société nationale des chemins de fer français (dt. staatliche französische Eisenbahngesellschaft)
TA	temporärer Aufenthalt
TRISTRAM	Transition Strategy on Vegetation Management
tS	teilweise sonnenexponiert
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
UIC	Union Internationale des Chemins de fer (dt.: Internationaler Eisenbahnverband)
VA	vollständig abgestorben
VD	Vegetationsdichte
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VS	Versuchsstrecke
WAIS	Wasser-Abrasiv-Injektorstrahl
WASS	Wasser-Abrasiv-Suspensionsstrahl

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung des Gleisquerschnittes [24].	23
Abbildung 2: Eingriffsbereiche bei Instandhaltungsmaßnahmen mit Wirkung auf Pflanzenwuchs und Tierleben. Modifiziert nach [24].	33
Abbildung 3: Vorgehen des allgemeinen PEP zur Auswahl der geeignetsten Verfahren.	46
Abbildung 4: Versuchsträger: Fahrzeug und Trägermodul mit den drei Applikationsmodulen in halbseitiger Anordnung und Ausleger in Schotterflanke.	56
Abbildung 5: Ansicht des Trägermoduls mit Beschriftung der Komponenten.	58
Abbildung 6: Hochdruckwasserstrahldüse und Ausbringungseinheit für die Kontaktflüssigkeit an der Fahrzeugfront.	59
Abbildung 7: Darstellung des Arbeitsprinzips des maschinellen Jätens.	60
Abbildung 8: Darstellung des Ausführungskonzepts des maschinellen Jätens.	61
Abbildung 9: Applikationsmodul für das MJ.	61
Abbildung 10: Verbreitete Varianten der Wasser-Abrasivestrahlerzeugung: Der WAIS und der WASS [81].	62
Abbildung 11: Ansicht der Düse zur Anwendung des Druckwasser-Verfahrens.	64
Abbildung 12: Rückansicht des Trägermoduls mit den Applikatoren des EL.	65
Abbildung 13: Applikationsmodul EL.	65
Abbildung 14: Darstellung der heterogenen Vegetationsverteilung im Gleisbereich und der halbseitigen Behandlung mit dem Versuchsträger. Beispiel: Behandlung 1 (blau) = MJ, Behandlung 2 (gelb) = EL, Behandlung 3 (lila) = Druckwasser, jeweils mit gegenüberliegender Kontrollfläche.	66
Abbildung 15: Kategorie 1: niedriger Feinanteil, keine Vegetation.	68
Abbildung 16: Kategorie 2: niedriger Feinanteil, Wuchshöhe unterhalb Schienenoberkante und einwachsende Vegetation aus Randbereich.	68
Abbildung 17: Kategorie 3: niedriger Feinanteil, Wuchshöhe oberhalb Schienenoberkante.	69
Abbildung 18: Kategorie 4: mittlerer bis hoher Feinanteil, Wuchshöhe unterhalb/oberhalb Schienenoberkante.	69
Abbildung 19: Kategorie 5: Verholzte Pflanzen.	70
Abbildung 20: Prozentualer Anteil der identifizierten Arten der VS Vetschau mit dessen Wuchsformen (links) und den Lebensformen (rechts).	72
Abbildung 21: Prozentualer Anteil der identifizierten Arten der VS Bergheim mit dessen Wuchsformen (links) und den Lebensformen (rechts).	73
Abbildung 22: Links: Wuchshöhe nach dem maschinellen Jäten auf 20 cm im Vergleich zur unbehandelten Vegetation (50 cm). Rechts: Nahansicht der abgetrennten Stängel.	77
Abbildung 23: Links: durch die Rollen des MJ verursachte Verletzung der Rinde. Rechts: vollständig entwurzelter Baum durch das MJ.	80
Abbildung 24: Links: Pflanzenteile mit direktem Kontakt abgestorben (braune Nadeln), bedeckte Pflanzenteile vital (grüne Nadeln). Rechts: Neuer Austrieb einer oberhalb abgestorbenen Birke.	89
Abbildung 25: Links: sonnenexponiertes Gleis, geringer Feinanteil, krautige Vegetation nach einer Überfahrt mit 2,5 km/h. Rechts: beschattetes Gleis, hoher Feinanteil, krautige Vegetation nach 4 Überfahrten mit 2,5 km/h (jeweils rechte Gleishälfte).	89

Abbildung 26: Links: durchtrennter Stamm (9 mm), Mitte: teilweise durchtrennter Stamm (12 mm). Rechts: durchtrennte Brombeerranke (10 mm). Alle mit 2 Überfahrten bei 2,5 km/h.	94
Abbildung 27: Links: Schnitt im Schutzmantel des Kabels, Mitte: abgetragenes Moos auf Betonschwelle. Rechts: Spuren des Druckwasserstrahls auf Schottersteinen.	95
Abbildung 28: Einsatz des Druckwasserstrahls im Weichenbereich.	96
Abbildung 29: Links: Großflächige Behandlung mit dem MJ und El (noch ohne Druckwasser). Rechts: Bereich zusätzlich mit Druckwasser entlang der rechten Schienenaußenseite.....	101
Abbildung 30: Gesamtsystem aus Zugfahrzeug und Geräteträger (links), Vergrämungseinrichtung vorne am Zugfahrzeug aus lautstärkemaximierten Metalllamellen (rechts).	105
Abbildung 31: Grafische Darstellung der Schallspektren. Y-Achse: Frequenz steigend, X-Achse: zeitlicher Verlauf der Geräusche (*Messung von vorne mit ca. 5 m Abstand). Die Schallintensität wird als Heatmap mit steigender Intensität in den Farben schwarz- gelb-orange-rot-violett dargestellt.	106
Abbildung 32: Energiebedarf des MJ bei hoher VD bei 4 Fahrten im Bereich A (3 m Arbeitsbreite) für alle Varianten.	110
Abbildung 33: Energiebedarf des El in den Bereichen A und B (5,5 m Arbeitsbreite).	111
Abbildung 34: Energiebedarf des Druckwasserstrahls. Anwendung ausschließlich entlang den Schienen.	112
Abbildung 35: Vergleich des Energiebedarfs der Verfahren pro Anwendung.	116
Abbildung 36: Oberbau W.	146
Abbildung 37: Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB-Gleismagnet) neben der Schiene.	149
Abbildung 38: Versuchsaufbau Temperaturmessung in verschiedenen Schotterschichten.	169
Abbildung 39: Temperaturkurve 10 L/m ² Heißwasser.	170
Abbildung 40: Links: Austrittstemperatur am Applikator. Rechts: Oberflächentemperatur nach Applikation.	171
Abbildung 41: Messergebnisse WHK mit umgerechneten Schichtdicken (40 cm) bei allen Schotterversuchen.	174
Abbildung 42: Temperaturkurve 5 kg/m ² Trockeneis.	175
Abbildung 43: Erwärmungskurven verschiedener Oberflächen.	183
Abbildung 44: Schwellenfach bewachsen mit Aufrechte Trespe (<i>Bromus erectus</i>). Gesamtsumme des Frischgewichts nach dem Abschneiden: 729 g, nach dem Ausreißen: 833 g. ...	184
Abbildung 45: Schwellenfach bewachsen mit Ruprechtskraut (<i>Geranium robertianum</i>). Gesamtsumme des Frischgewichts nach dem Abschneiden: 149 g, nach Ausreißen: 97 g.	185

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl häufig vertretener streng geschützter und besonders geschützter Arten mit bekannter Affinität zu Gleisanlagen.....	36
Tabelle 2: Anforderungsliste eines nichtchemischen Verfahrens – Teil I.	49
Tabelle 3: Anforderungsliste eines nichtchemischen Verfahrens – Teil II.....	50
Tabelle 4: Gewichtung der einzelnen Kriterien zur Verfahrensauswahl – Teil I.....	51
Tabelle 5: Gewichtung der einzelnen Kriterien zur Verfahrensauswahl – Teil II.	52
Tabelle 6: Beispiel einer Bewertungsskala für eine Anforderung.....	53
Tabelle 7: Ergebnisse der Bewertung der nichtchemischen Verfahren.	53
Tabelle 8: Versuchsparameter für das MJ.	74
Tabelle 9: Versuchsparameter für das EL.....	74
Tabelle 10: Versuchsparameter für das Druckwasser.	74
Tabelle 11: Wirkung des maschinellen Jätens bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.....	78
Tabelle 12: Wirkung des maschinellen Jätens bei zunehmend verholzter Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.....	81
Tabelle 13: Wirkung des EL bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem niedrigen Feinanteil.....	84
Tabelle 14: Wirkung des EL bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.....	86
Tabelle 15: Wirkung des EL bei zunehmend verholzender Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.....	88
Tabelle 16: Wirkung des Druckwassers auf hauptsächlich krautiger Vegetation entlang der Schiene.	91
Tabelle 17: Wirkung des Druckwassers bei zunehmend verholzender Vegetation entlang der Schiene.....	93
Tabelle 18: Wirkung der Kombination (MJ und EL) bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem niedrigen Feinanteil.....	97
Tabelle 19: Wirkung der Kombination (MJ und EL) bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.....	98
Tabelle 20: Wirkung der Kombination (MJ und EL) bei zunehmend verholzender Vegetation in einem Schotterbett mit mittleren bis hohen Feinanteil.....	100
Tabelle 21: Liste der wirksamsten Parameterkombinationen für jedes Alternativverfahren in häufig auftretenden Gleisumgebungen.	102
Tabelle 22: Empfohlene Parameter der Verfahrenskombination mit Ermittlung des Energiebedarfs pro km.....	113
Tabelle 23: Ausbringungsmenge von Wasser und Abrasivmittel des Druckwasser-Verfahrens.....	114
Tabelle 24: Wirtschaftlichkeitsabschätzung des Materialeinsatzes der Verfahrenskombination pro km und Behandlung.....	118
Tabelle 25: Wirtschaftlichkeitsabschätzung der Lohnkosten der Verfahrenskombination pro km und Behandlung.....	119
Tabelle 26: Wirtschaftlichkeitsabschätzung des Trägerfahrzeugs der Verfahrenskombination pro km und Behandlung.....	120

Tabelle 27: Informationsbedarf und Begründungen für Versuche mit Versuchsüberblick – Teil I.	165
Tabelle 28: Informationsbedarf und Begründungen für Versuche mit Versuchsüberblick – Teil II.	166
Tabelle 29: Versuchsplan und Versuchsergebnisse Heißwasser.	170
Tabelle 30: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – Heißwasser.	172
Tabelle 31: WHK auf 40 cm Schichtdicke berechnet beim Einsatz unterschiedlicher Wasserdosierungen.	175
Tabelle 32: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – Frosten.	176
Tabelle 33: Versuchsübersicht – UV-C.	177
Tabelle 34: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – UV-C – Teil I.	177
Tabelle 35: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – UV-C – Teil II.	178
Tabelle 36: Versuchsübersicht Infrarot.	180
Tabelle 37: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – Infrarot.	180
Tabelle 38: Versuchsübersicht und Versuchsergebnisse Infrarot + Rückschnitt – Effekte bis Tag 19.	181
Tabelle 39: Modellverhaltensmuster der Tierarten in Kombination mit den Wirkmechanismen der Verfahren.	271
Tabelle 40: Einteilung und Erklärung der Parameter zur Kategorisierung des Gleiszustands.	274
Tabelle 41: Steckbriefe der VS und BS.	274
Tabelle 42: Erfasste Arten der BS und VS und den Wuchsorten Gleisrost/Schotterflanke (GL) und Randweg (RW).	276

1 Einleitung

Seit Beginn des Eisenbahnzeitalters stellt die Entfernung bzw. der Rückschnitt von Pflanzen im Bereich des Fahrwegs eine wichtige Tätigkeit zur Gewährleistung der Funktion und Betriebssicherheit des Systems Eisenbahn dar. Zur Reduktion möglicher Betriebsgefahren wird daher eine systematische und kontinuierliche Kontrolle der Vegetation durchgeführt, um eine vorzeitige Alterung und Schädigung der Infrastruktur zu vermeiden und Sicherheitsaspekte wie die freie Sicht auf Signale oder das Freihalten von Arbeits- und Fluchtwegen einzuhalten und sicherzustellen [1]. In § 4 Abs. 3 des Allgemeinen Eisenbahngesetzes (AEG) [2] sowie der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) [3] ist gesetzlich vorgeschrieben, dass Eisenbahnbetreiber verpflichtet sind, die Eisenbahninfrastruktur sicher zu bauen und zu unterhalten [4].

Sowohl der Schotterkörper als auch die Randbereiche werden daher durch unterschiedliche Maßnahmen in einem betriebsgerechten Zustand gehalten. Die aktuell im Schotterkörper angewandten Verfahren im deutschen wie auch im europäischen Raum basieren weitestgehend auf der Verwendung von Blatt- und Bodenherbiziden. Obwohl die chemische Vegetationskontrolle das bislang noch effektivste und kostengünstigste Verfahren ist, nimmt der Einsatz von Herbiziden durch Anwendungsbeschränkungen [5], die sich ändernden Witterungsbedingungen und den Wandel zu einem ökologischeren Bahnbetrieb immer weiter ab [6]. Deshalb ist die Entwicklung eines nichtchemischen Alternativverfahrens zunehmend von Bedeutung.

Trotz der Vielzahl an bekannten Alternativverfahren und veröffentlichten Studien stehen viele dieser Verfahren noch in unterschiedlichen Phasen der Technologiereife. Derzeit ist kein serienreifes Verfahren für den Einsatz im Gleisbereich verfügbar [7].

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte eine wissenschaftliche Grundlage geschaffen und empirische Daten erhoben werden, mit der Zielsetzung, neue bzw. bestehende chemiefreie Verfahren zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich (weiter) zu entwickeln oder anzupassen, welche in Feldversuchen auf ihre Effizienz und Umsetzbarkeit überprüft werden sollten. Dazu waren folgende Themenschwerpunkte zu bearbeiten:

- Auswahl, Konzeption und Entwicklung eines oder mehrerer nachhaltiger, chemiefreier Verfahren zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen,
- Entwicklung und Bau eines Demonstrators zum Testen des oder der Verfahren in Bezug auf Eignung und Effizienz,
- Ableitung von Handlungsempfehlungen und Maßnahmen für die Einführung des/der neuen Verfahren(s) und den weiteren Umgang bzw. den Verzicht von chemischen Vegetationskontrollverfahren auf Bahnanlagen.

Zur Realisierung wurde folgendes Vorgehen gewählt:

Zunächst sollte eine Sachstandsermittlung der auftretenden Vegetation, der Bahninfrastruktur und der im Eisenbahnbereich verwendeten Vegetationskontrollverfahren durchgeführt werden, um

hieraus die Anforderungen und Randbedingungen für ein innovatives Vegetationskontrollverfahren zu ermitteln.

Weiterhin sollten in einer umfangreichen Literaturstudie passende Alternativverfahren gesammelt und systematisch anhand ihrer Eigenschaften und ihres technologischen Reifegrads kategorisiert und bewertet werden.

Im nächsten Schritt sollte eines oder mehrere Verfahren ausgewählt, ggf. in Kleinversuchen getestet und in einen zu entwickelnden und zu bauenden Erprobungsträger integriert werden. Mit diesem sollten dann Feldversuche durchgeführt werden, die Erkenntnisse über die Wirksamkeit des/der neuen Verfahren(s) erwarten lassen.

In der letzten Projektphase sollten aus den Versuchsergebnissen Rückschlüsse auf die Wirtschaftlichkeit und die Effizienz der Verfahren gezogen sowie Handlungsempfehlungen für den Einsatz von nichtchemischen Vegetationskontrollverfahren auf Bahnanlagen abgeleitet werden. Vegetationsmanagement im Eisenbahnbereich

1.1 Ursachen für die Vegetationskontrolle im Gleisbereich

Das Vegetationsmanagement im Eisenbahnbereich nimmt eine bedeutende Rolle bei der Aufrechterhaltung der Sicherheit und Funktionsfähigkeit von Bahnanlagen ein. Schon seit Beginn der Eisenbahn standen die Eisenbahnbetreiber vor der Herausforderung Pflanzen, die aus dem Schotterbett heraus oder von den Seiten in den Gleisbereich hinein wucherten, möglichst nachhaltig entfernen zu müssen. Die im Allgemeinen Eisenbahngesetz [2] und der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung [3] geforderte Erhaltung des betriebssicheren Zustandes der Eisenbahninfrastruktur bedingt eine Vorbeugung von möglichen Betriebsgefahren, die durch die Vegetation im Gleisbereich verursacht werden können [4].

Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit sind [1]:

- die Gleislagestabilität, Drainage und Funktionsfähigkeit mechanischer Komponenten zu erhalten,
- Traktion und kurze Bremswege durch Vermeiden von Schmierfilmen sicherzustellen,
- die Signalsicht auf am Boden befindliche sowie niedrigstehende Signale zu gewährleisten,
- der Rand- bzw. Rangierweg für Arbeiten im Gleisbereich sowie als Not-/Fluchtweg freizuhalten,
- eine angemessene Lebensdauer von Bahnanlagen zu sichern,
- der Instandhaltungsaufwand (u. a. Bettungsreinigung) zu begrenzen und
- die Humusbildung, Brandgefahr und Ansiedlung von invasiven Arten zu minimieren.

Bei Ausbleiben der Vegetationskontrolle wird die Entstehung von Problemen im Gleisbereich begünstigt:

- Stolpergefahr für Mitarbeitende auf dem Randweg,
- Behinderung der Sicht auf niedrigstehende Signale,
- Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit von mechanischen Komponenten,
- schlechtere Inspektion des Oberbaus (z. B. überwachsene Schwellen),
- verminderter Kraftschlussbeiwert (Pflanzen auf Schienen erzeugen Schmierfilm),
- verschlechterte Drainage,
- erhöhter Instandhaltungsaufwand und
- langfristige Schädigung der Gleislage (Frost-/Schlammstellen).

Dadurch entstehen Gefahren für Mitarbeitende im Gleis, erhöhte Kosten bei der Instandsetzung der Infrastruktur sowie Einbußen bei der möglichen Kapazität aufgrund von Schäden, z. B. durch Langsamfahrstellen zur Gewährleistung des sicheren Betriebs.

1.2 Verfahren und Methodik der bisher eingesetzten Vegetationskontrolle

1.2.1 Einsatz der chemischen Vegetationskontrolle

Bis heute dominiert im Gleisbereich der Einsatz chemischer Verfahren zur Vegetationskontrolle, welche sich einer langen Geschichte von Produktwechseln, Erfolgen und Einschränkungen unterzogen. Damals wurden in Deutschland zur Vegetationskontrolle die ersten Herbizide in Form von Arsen und Natriumchlorat zugelassen. Bis 1984 wurde ein Maximum von 24 zugelassenen Herbiziden erreicht, gefolgt von einer starken Reduktion bis 1990 aus Gründen des Gewässerschutzes [8]. Die Anzahl der zugelassenen und auch eingesetzten Herbizide wurde nochmals im Jahr 2006 bis auf drei Herbizide (Glyphosat, Flumioxazin, Flazasulfuron) reduziert [8]. Im Jahr 2017 wurde dann ein Kombinationspräparat aus zwei Wirkstoffen (Iodosulfuron, Diflufenican) neu zugelassen [9], welches in vielen Ländern der Union Internationale des Chemins de fer (UIC, dt.: Internationaler Eisenbahnverband) als Bodenherbizid eingesetzt wird [10]. In Deutschland wird der Wirkstoff Diflufenican und auch das Kombinationspräparat aufgrund der negativen Einflussmöglichkeiten auf Oberflächengewässer gemäß der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) [11] nicht eingesetzt [12].

Bis 2022 wurden in Deutschland die für den Gleisbereich zugelassenen Herbizidwirkstoffe Glyphosat, Flazasulfuron und Flumioxazin eingesetzt [6, 13, 14]. Seit Anfang 2023 verzichtet die Deutsche Bahn Aktiengesellschaft (DB AG) auf den Einsatz von Glyphosat und wendet den seit Anfang 2023 vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) durch eine Zulassungserweiterung mit dem Anwendungsgebiet für Gleisanlagen hinzugekommenen Wirkstoff Pelargonsäure an [15]. Das bislang eingesetzte Herbizid Flazasulfuron hat laut BVL-Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland (Stand Juni 2024) keine Zulassung mehr für den Gleisbereich [16]. Somit stehen in Deutschland derzeit vier Wirkstoffe Glyphosat, Pelargonsäure, Flumioxazin und das Kombinationspräparat Diflufenican + Iodosulfuron zur chemischen Vegetationskontrolle zur Verfügung.

Eigenschaften und Einsatzgebiete von Pelargonsäure

Bei der Pelargonsäure handelt es sich um ein nichtsystemisches und nichtselektives Kontaktherbizid natürlichen Ursprungs, das aus pflanzlichen Ölen (z. B. Raps-, Sonnenblumen- oder Palmöl) industriell hergestellt werden kann oder natürlich in Storchschnabelgewächsen (*Geraniaceae*) vorkommt. Die Pelargonsäure kann gegen einjährige einkeimblättrige Unkräuter (Gräser) und einjährige zweikeimblättrige Unkräuter eingesetzt werden. Bei Kontakt mit den Pflanzenteilen wird die Wachsschicht (Kutikula) ähnlich einem physikalischen Ätzworgang angegriffen, wodurch die Zellen Wasser verlieren und nach etwa 2 bis 3 Stunden ein Austrocknen der Pflanzen einsetzt. Da die Wirkung nur bei Kontakt erreicht wird, werden verdeckte Pflanzenteile und Wurzeln nicht erfasst. [17, 18]

Mit Pelargonsäure kommt durch seine ausgeprägte Ätzwirkung (H315 – verursacht Hautreizungen, H318 – verursacht schwere Augenschäden [19]) eine neue Eigenschaft im Gleiseinsatz hinzu, da die Spritzflüssigkeit auf Schienen und Schotter im Gegensatz zu Erde nicht einzieht und durch langsames Eintrocknen und Wiederanlösen durch Tau dort eine Ätzwirkung zeigen könnte. Der Wirkstoff ist als schädigend für Nutzinsekten, Raubmilben und Spinnen eingestuft. Langzeitbeobachtungen und Untersuchungen zu den möglichen Auswirkungen liegen aktuell für den Eisenbahnbereich nicht vor. [20].

Die Anwendung von Pelargonsäure ist in der Vegetationsperiode zweimal mit einer Menge von 16 L/ha in 200 bis 400 L Wasser/ha zugelassen. Außerdem darf zum Grundwasserschutz zwischen dem 1. Oktober und dem 31. März keine Anwendung erfolgen. Allgemein baut sich der Wirkstoff in der Umwelt schnell ab, die Halbwertszeit beträgt weniger als 2 Tage ($DT_{50} < 2$ Tage). Die beim Abbau der Pelargonsäure entstehenden Zerfallsprodukte bestehen zu 90 % aus CO_2 und Wasser. [18, 20]

Studien der Société nationale des chemins de fer français (SNCF – dt. staatliche französische Eisenbahngesellschaft – Réseau Frankreich) zur Wirksamkeit der Pelargonsäure zeigten, dass eine Kombination mit dem Wirkstoff Flazasulfuron (Sulfonylharnstoffe) eine erhöhte Wirksamkeit gegenüber dem Einsatz als Einzelsubstanz zeigte. Bei einer alleinigen Anwendung von Pelargonsäure konnte ein Effekt nur auf benetzten Pflanzenteilen erzielt werden, wobei nach weniger als einem Monat die Pflanzen wieder austrieben. Bei der in Frankreich verwendeten Kombination von Pelargonsäure (KATOUN 16 L/ha) + Flazasulfuron (PALMA 7,5 L/ha) wurde eine bessere Wirksamkeit für über zwei Monate erzielt, solange die Vegetation zum Behandlungszeitpunkt nicht zu stark entwickelt war (Wuchshöhe und VD). [7]

Für Deutschland liegt (Stand September 2024) keine Zulassung eines Kombinationspräparats (Pelargonsäure mit einem Bodenherbizid) vor [16]. Die ausgelaufene Zulassung von Flazasulfuron in Deutschland reduziert zudem die Möglichkeit einer Kombination der Pelargonsäure mit einem Bodenherbizid. Lediglich Flumioxazin kann als möglicher Kombinationspartner eingesetzt werden.

Behandlungshäufigkeiten und Ausbringungsverfahren der Herbizide

In Deutschland erfolgte die bisherige chemische Vegetationskontrolle einmal pro Jahr (Glyphosat und Flumioxazin) während der Vegetationsperiode. Zusätzliche Fahrten, sogenannte

Nachbehandlungen, beziehen sich nur auf die nachträgliche Behandlung von Bereichen, die bei der ersten Überfahrt, z. B. aufgrund der Wetterverhältnisse (z. B. starker Regen oder Wind), nicht behandelt werden konnten [12]. Die Anwendung von Pelargonsäure kann zweimal pro Jahr durchgeführt werden [20].

Die Ausbringung der Blatt- und Bodenherbizide erfolgt in Deutschland im Wesentlichen durch wenige Unternehmen mittels Spritzzügen mit sensorgestützter Applikationstechnik (Fahrgeschwindigkeit bis ca. 40 km/h) und Zweiwegefahrzeugen in Bahnhofsbereichen oder vereinzelt auf Nebenstrecken (Fahrgeschwindigkeit bis ca. 20 km/h) [12].

Obwohl die chemische Vegetationskontrolle das bislang schnellste und kostengünstigste Verfahren ist, nimmt der Einsatz von Herbiziden durch Anwendungsbeschränkungen, den herrschenden Witterungsbedingungen und der Wandel zu einem ökologischeren Bahnbetrieb immer weiter ab [13]. Hinzu kommt, dass auslaufende Wirkstoffzulassungen und strengere Verwendungsvorgaben die Nutzung der chemischen Verfahren beeinträchtigen und somit nur wenige effektive Herbizide für den Bahnbereich zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund stellt die Entwicklung eines nichtchemischen Alternativverfahrens eine zukunftsorientierte Lösung zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich dar.

1.2.2 Einsatz der nichtchemischen Vegetationskontrolle

Neben den chemischen Verfahren werden bereits auch mechanische Verfahren im Bahnbereich zur Vegetationskontrolle eingesetzt, insbesondere in Bereichen, in denen keine Herbizide angewendet werden dürfen. Dazu gehören die Bereiche der Randflächen und Böschungen (6 m von der Gleismitte zur Seite), Bahnsteige und Bahnhofsbereiche, die mit mechanischen Verfahren wie Mähen und Mulchen bearbeitet werden. Streckenbegehungen oder Inspektionen der Vegetation werden durch Fachleute einmal im Jahr durchgeführt [4, 21].

Im Böschungsbereich wird die tolerierte Vegetation (Wiesen, Büsche und Bäume) hauptsächlich durch Freischneider, Schlegelmulcher, Balkenmäher oder durch Gehölzschnitte bearbeitet. Diese sind bei guter Zugänglichkeit an landwirtschaftliche Fahrzeuge oder ferngesteuerte Mähraupen montiert, die außerhalb des Schienenverkehrs arbeiten können. Bei schwierig zugänglichen Bereichen werden Zweiwegefahrzeuge vom Gleis aus mit einem ausfahrbaren Arm eingesetzt oder ein manueller Rückschnitt (z. B. mit Fadenmähern) vorgenommen. Entsprechend ist die Auswahl der geeigneten Methoden zur Vegetationskontrolle spezifisch auf den Anwendungsbereich, die betrieblichen Nutzungsanforderungen, die Flächeneigenschaften und die Vegetation abgestimmt.

Zusätzlich zu den genannten nichtchemischen Verfahren zur Vegetationskontrolle werden auch bauliche Maßnahmen genutzt, die jedoch vornehmlich der Ursachenbekämpfung dienen. Dazu gehören der Einbau von bituminösen Sperren, Sickerbetonriegeln oder anderen seitlichen Hindernissen sowie der Einbau von Folien [7, 22]. Zusätzlich ist die Bettungsreinigung zu nennen, die allerdings als Hybrid aus Symptom- und Ursachenbekämpfung zu sehen ist.

1.2.3 Anwendungsbereich der Vegetationskontrolle

Gleisanlagen lassen sich anhand eines Gleisquerschnittes in einzelne Bereiche unterteilen, die durch verschiedene Vegetationskontrollmaßnahmen individuell bearbeitet werden. Dabei beschreibt Bereich A den Gleisrost, Bereich B die Schotterflanke und Bereich C den Randweg sowie den Zwischenraum zwischen zwei Gleiskörpern (z. B. auf zweigleisigen Strecken oder in Rangierbahnhöfen) (Abbildung 1).

In den gesamten Bereichen A und B werden, soweit genehmigungsfähig, die chemischen Verfahren angewandt. Der Bereich C erfährt aktuell ebenfalls in Teilen eine chemische Vegetationskontrolle, die von der jeweiligen Reichweite des eingesetzten Spritzfahrzeugs und der Nutzung der Bereiche (z. B. als Flucht- und begehbare Kontrollweg/Randweg) abhängt. Im Bereich D findet grundsätzlich keine chemische Vegetationskontrolle statt. Generell werden nur unversiegelte Oberflächen (Auf-
lage aus Schotter, Splitt) chemisch behandelt. Befestigte Flächen, wie Feste-Fahrbahn Systeme, sind rechtlich von der chemischen Vegetationskontrolle ausgenommen [23] und zählen selbst als bauliche Maßnahmen zur Eindämmung der Vegetation auf Gleisanlagen [10].

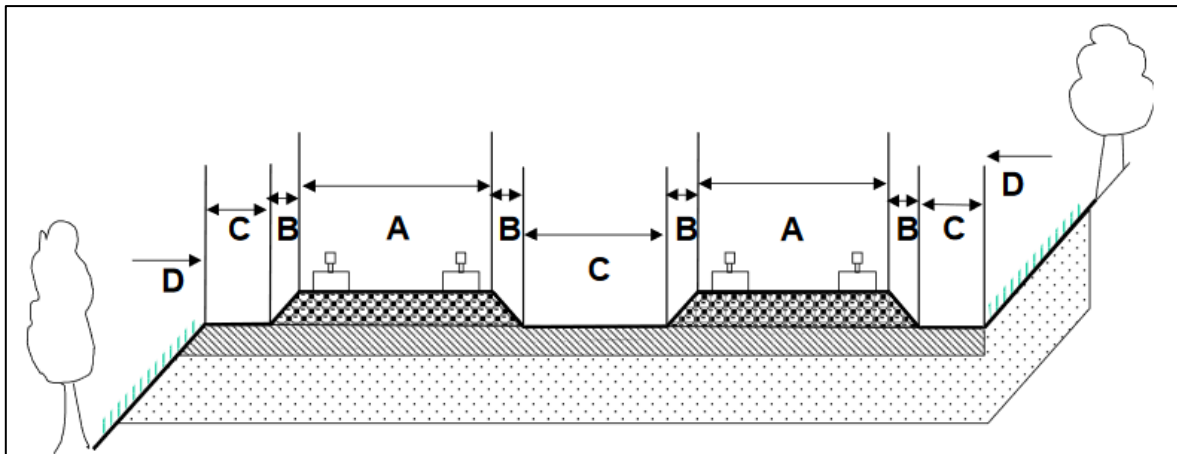


Abbildung 1: Einteilung des Gleisquerschnittes [24].

Anwendungsbereich des Alternativverfahrens

Generell stellt die Einteilung des Gleisbereichs in die oben genannten Abschnitte eine Idealisierung des Gleiskörpers dar (Abbildung 1). Dementsprechend erfolgt im Weiteren die allgemeine Bezeichnung der Bereiche und die Differenzierung des im Projekt genutzten Anwendungsbereichs für das zu entwickelnde Alternativverfahren zur chemischen Vegetationskontrolle. Beabsichtigt ist wie bei den chemischen Verfahren eine Behandlung der Bereiche von einem Fahrzeug aus durchzuführen. Die Behandlung der Bereiche außerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie ist abhängig vom Verfahren nicht ohne Sperrung der Strecke möglich. In einigen Fällen ist diese Behandlung zumindest mit einer erheblichen Geschwindigkeitsreduktion verbunden. Darüber hinaus gilt, dass die Behandlung der äußeren Bereiche von außerhalb ohne Einfluss auf den Bahnverkehr technisch möglich ist, jedoch eine Behandlung der Schotterfläche im Betrieb von außen nicht erfolgen kann. Im weiteren Bericht wird dieser Anwendungsbereich der Einfachheit halber als Gleisbereich bezeichnet.

2 Relevante Eigenschaften des Gleisbereichs für die Vegetationskontrolle

2.1 Bauliche Eigenschaften des Gleisbereichs

Der Gleisbereich zeichnet sich durch stark variierende Beschaffenheiten der baulichen Struktur aus. So befinden sich zwar gewisse Komponenten immer an denselben Positionen relativ zum Gleis gesehen, andere wiederum können nahezu beliebig angeordnet sein. Zwar ist der Gleiskörper an sich in Bauvorschriften und Normen (z. B. DB AG Richtlinie (Ril) 820 und 836) gut beschrieben, jedoch stammt die Streckeninfrastruktur aus unterschiedlichen Jahrzehnten. Der Unterbau wie Bahndämme sind teils sogar über 100 Jahre alt. Zusätzlich müssen unterschiedliche lokale Gegebenheiten berücksichtigt werden und nicht immer ist die Dokumentation ausreichend vorhanden.

Prinzipiell lassen sich Gleisanlagen aber anhand eines Gleisquerschnittes in einzelne Bereiche unterteilen, die verschiedene bauliche und sicherheitstechnische Merkmale aufweisen und durch verschiedene Vegetationskontrollmaßnahmen individuell bearbeitet werden (Abbildung 1).

In dem standardisierten Gleisquerschnitt beschreibt Bereich A den Gleisrost, welcher eine Breite von ca. 3,2 bis 3,8 m hat [25]. Bereich B beschreibt die Schotterflanke, die, sofern sie vorhanden ist, einen natürlichen Schüttwinkel von ca. 39° aufweist [25]. Die Breite beträgt 2,4 bis 2,8 m von der Gleismitte und hängt von der Streckengeschwindigkeit und der Neigung des Unterbaus ab. Die Bereiche A und B beschreiben gemeinsam den Schotterkörper der Gleisbettung. Neben Schotter, Schwellen und Schienen ist hier auch ein Großteil der Sicherungstechnik untergebracht. Gleichzeitig ist die Zugänglichkeit des Bereichs beschränkt, da hier der laufende Betrieb stattfindet und der Bereich fast vollständig im Lichtraumprofil bzw. unterhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie liegt. Das Lichtraumprofil beschreibt den freizuhaltenden Raum neben den Schienen, der nicht durch Gegenstände oder Bauten eingenommen werden darf, um Kollisionen mit Fahrzeugen auszuschließen. Die Fahrzeugbegrenzungslinie stellt das fahrzeugseitige Gegenstück dar, innerhalb derer sich sämtliche Anbauten des Fahrzeugs befinden müssen.

Der Bereich C beschreibt den Randweg sowie den Zwischenraum zwischen zwei Gleiskörpern, wie er z. B. auf zweigleisigen Strecken oder in Rangierbahnhöfen vorkommt. Hier kommen je nach Art der Flächennutzung aber auch Region andere Materialien als Schotter wie z. B. feiner Splitt zum Einsatz. Auf neueren Strecken ist der Randweg teilweise geteert [7]. Auch in diesem Bereich finden sich viele Komponenten der Sicherungstechnik sowie Signale, Versorgungsleitungen und kleinere Bauten wie beispielsweise Schaltschränke.

Komponenten der Gleisinfrastruktur

In der technisch geprägten Umgebung der Bahnanlagen werden zahlreiche Komponenten, Materialien und Elemente der Sicherungstechnik verbaut, aus denen sich das Gleisbett und seine nähere Umgebung zusammensetzen. Diese stellen teilweise kritische Einflussgrößen hinsichtlich der

zukünftigen Alternativverfahren dar und wurden daher bei der Verfahrensauswahl berücksichtigt. Hierbei liegt der Fokus auf den standardisierten Gleisaufbau mit Schotterbettung, da Feste-Fahrbahn-Systeme von der bisherigen Vegetationskontrolle ausgenommen sind (versiegelte Flächen).

Im Folgenden ist ein kurzer Überblick der im Gleisbereich vorhandenen Infrastrukturkomponenten gegeben, die die Oberkategorien darstellen und mit Beispielen benannt sind.

- Schotterbett und Unterbau (Gesteinskörnung, Planumsschutzschicht etc.)
- Randweg (Feines Gestein, Zugänglichkeit etc.)
- Schwellen (Holz, Beton, Stahl, Kunststoffschwellen etc.)
- Schienenbefestigung, Schienen und Weichen (Elastische Zwischenlage, Weichenantriebe, Stellmechanismus etc.)
- Kabel (Signalkabel, Erdungskabel, Kabelkanäle, Kontaktkästen etc.)
- Sicherungstechnik (Gleismagnete, LZB-Linienleiter (Linienförmige Zugbeeinflussung), Achszähler, Gleisstromkreise etc.)

Genauere Ausführungen zu den einzelnen Komponenten sowie den für die Vegetationskontrolle relevanten Kenngrößen finden sich im Anhang 1.

Relevante Merkmale/Berührungspunkte der Infrastruktur gegenüber den Alternativverfahren

Nach genauerer Betrachtung lässt sich feststellen, dass die alternativen Vegetationskontrollmaßnahmen noch stärker auf ein Schädigungspotential gegenüber den im Gleisbereich vorhandenen Infrastrukturkomponenten hin untersucht werden müssen, als es bisher bei der chemischen Vegetationskontrolle der Fall war.

Die baulichen Komponenten sowie die Leit- und Sicherungstechnik sind generell sehr robust und wetterfest ausgeführt, was im Wesentlichen auf den generellen Einsatzort im Gleisbereich zurückzuführen ist. Viele für die Bewertung der unterschiedlichen Verfahren zur Vegetationskontrolle benötigten Festigkeits- oder Werkstoffparameter (z. B. UV-C-Stabilität, Isolationsgrad, Hitzebeständigkeit, Wasserdichtigkeit gegenüber Druckwasser und Heißwasser) sind jedoch nicht verfügbar, da bei der Zulassung der einzelnen Komponenten nur die zum Zeitpunkt der Zulassung bekannten Faktoren berücksichtigt werden. Durch den Einsatz neuer Verfahren ergeben sich neue Randbedingungen für die Infrastrukturkomponenten. Dennoch ist davon auszugehen, dass sich auch komplexere technische Anforderungen z. B. hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) für spezifische Alternativverfahren lösen lassen.

Betrachtet man alle genannten Elemente im Gleisbereich, so haben sie durch die Normierung bedingt vergleichbare Eigenschaften, was die Temperatur- und Witterungsbeständigkeit angeht. So kann ein Temperaturbereich von -30 °C bis +60 °C als allgemeingültig angesehen werden. Bei der Schutzart nach IP-Klassifikation unterscheiden sich die Komponenten nur geringfügig, wobei hier ältere Weichenantriebe auszunehmen sind. Darüber hinaus liegt die Spannungsfestigkeit zumindest für neue Komponenten immer über 2 000 V.

Aufgrund der langen Liegezeiten der im Gleisbereich verbauten Komponenten kann jedoch nicht abschließend sichergestellt werden, ob diese Eigenschaften wirklich auf alle verbauten Einzelteile zutreffen oder ältere Komponenten noch mit geringeren Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit ausgelegt wurden.

Hinsichtlich neuer Verfahren sind somit die abhängig vom Verfahren auftretenden Schädigungsmöglichkeiten zu betrachten. Für elektrische Verfahren muss insbesondere die EMV sowie die mechanische Abriebfestigkeit einzelner Komponenten überprüft werden. Für Verfahren, die mit Wasser arbeiten, muss weiterhin eine Wasserdichtigkeit auch bei hohen Wasserdrücken und bei Zusatz von Strahlmitteln gegeben sein. Je nachdem, ob das Verfahren thermisch oder mechanisch arbeitet, müssen zudem entweder die Temperaturbeständigkeit oder die mechanische Festigkeit der Komponenten gewährleistet sein. Bei mechanischen Verfahren muss zudem eine Kollision des Applikators mit Bauteilen im Gleisbereich ausgeschlossen werden können.

2.2 Ökologische Eigenschaften des Gleisbereichs

2.2.1 Wachstumsbedingungen im Gleisbereich

Neben zahlreichen baulichen Eigenschaften zeichnet sich der Gleisbereich auch durch vielfältige biologische Besonderheiten aus. Allgemein stellt der Gleisbereich ein Standort mit örtlich stark variierenden Bedingungen für das Wachstum von Pflanzen dar. Abschnittsweise können Bereiche durch Bäume beschattet sein oder sind der Sonne exponiert, wodurch hohe Temperaturen entstehen können. Auch im Jahresverlauf ist der Standort durch starke Temperaturunterschiede zwischen hohen Temperaturen im Sommer und frostoffenen Lagen im Winter geprägt. Es etablieren sich daher vor allem wärme- und trockenheitsverträgliche sowie anspruchslose und anpassungsfähige Arten in diesem Lebensraum. Dadurch kommt es zu einer Artenzusammensetzung, die in anderen Lebensräumen am gleichen Ort nicht vorzufinden wäre [26].

Das technisch geprägte Bauwerk zeichnet sich außerdem durch die stark wasserdurchlässige Bauweise mit grobkörnigem Schotter und einer wasserableitenden Planumsschutzschicht aus, wodurch kein Anschluss zum Grundwasser besteht. Vor allem neuere Gleisanlagen werden so zu einem trockenen und nährstoffarmen Standort, sodass durch ständigen Wassermangel regelmäßige Trockenphasen für die Pflanzen auftreten. Auch der meist leicht saure pH-Wert (pH 6) und der Nährstoffmangel sind weitere Faktoren des Standortes [27]. Nährstoffe können sich lediglich durch Einträge aus der Atmosphäre, Ladungsverlusten und Verwehungen von organischen und anorganischen Substanzen ansammeln. Allerdings werden diese bei baulich intakten Gleiskörpern durch das geringe Sorptionsvermögen des Schotterkörpers bei Niederschlägen wieder ausgewaschen.

Kommt es zu baulichen Mängeln, starken Einträgen von organischem Material (z. B. Wasserschutzgebieten) oder zunehmenden Alter einer Bettung ohne Bettungsreinigung, so erhöht sich der Feinanteil im Schotterkörper und es können zunehmend Nährstoffe und Wasser gespeichert werden.

Diese Merkmale beziehen sich hauptsächlich auf den Gleisrost und die Schotterflanken, hingegen können die Zustände auf dem Randweg (Splitt anstatt Schotter oder verdichtete Wege) stark abweichen [28].

2.2.2 Pflanzenvielfalt und ihre Verteilung im Gleisbereich

Pflanzen im Gleisbereich wurden unter ökologischen und pflanzengesellschaftlichen Gesichtspunkten schon häufig wissenschaftlich erfasst. In der zahlreichen Literatur der letzten 40 Jahre findet sich eine Reihe von ökologischen Bestandsaufnahmen von Eisenbahnbiotopen. Dabei wurden vor allem Bahnhofsbereiche und dessen Brachflächen untersucht. Daraus wird deutlich, dass diese Bereiche zu den artenreichsten Habitaten Mitteleuropas gehören und eine starke Vernetzung und damit Ausbreitungswege für die Pflanzen im Gleisbereich darstellen [26]. In den entsprechenden Vegetationsstudien im Gleisbereich [22, 26–36] wurden deutschlandweit rund 350 unterschiedliche Pflanzenarten zusammengetragen, die Relevanz für den Eisenbahnbereich besitzen.

Im Rahmen des Projekts wurde ebenfalls ein Monitoring der Vegetation durchgeführt. Dabei wurde über einen Zeitraum von drei Jahren eine monatliche Begehung von drei unterschiedlichen Strecken in der Städteregion Aachen durchgeführt. Die Strecken wiesen dabei Unterschiede in der Nutzung und Beschaffenheit auf, von einem per Hand gejäteten Anschlussgleis im städtischen Bereich Aachens über ein Abstellgleis im ländlichen Raum hin zu einem seit Jahrzehnten stillgelegten Gleis zwischen Feldern. Zusätzlich wurde die Vegetation auf den für die Erprobung des Versuchsträgers genutzten Versuchsstrecken (VS) erfasst. Im Rahmen des Monitorings konnten so regional begrenzt (Nordrhein-Westfalen) rund 160 Arten gefunden werden. Die gesamte Liste mit den erfassten Arten ist in Kapitel 9 des Anhangs zu finden.

Generell lässt sich die Vegetation im Gleisbereich in folgende Hauptgruppen/Lebensformen einordnen (orientiert an [28]).

Einjährige Pflanzen

- Pflanzen durchlaufen den Lebenszyklus innerhalb einer Vegetationsperiode (in einem Jahr)
Keimung → Blüte → Samenbildung → Absterben
- krautige Pflanzen, nicht verholzend
- besitzen keine Überdauerungsorgane, sondern überdauern als Samen, die in der nächsten Vegetationsperiode einen neuen Lebenszyklus beginnen
- Beispiel: Ruprechtskraut (*Geranium robertianum*), Taube Trespe (*Bromus sterilis*)

Zweijährige Pflanzen

- Pflanzen benötigen zwei Vegetationsperioden für den Lebenszyklus
 1. Jahr: Keimung und Bildung von Wurzeln und Blättern
 2. Jahr: nach einer Frostperiode Bildung von Blüten → Samen → Absterben
- krautige Pflanzen, nicht verholzend
- besitzen Überdauerungsorgane
- Beispiel: Kanadisches Berufkraut (*Conyza canadensis*)

Ausdauernde Pflanzen

- Pflanzen durchlaufen den Lebenszyklus innerhalb einer Vegetationsperiode (Blüte und Samenbildung), sterben aber nicht ab, sondern leben mehrere Jahre
- krautige Pflanzen (Stauden, Gräser) bis verholzend
- besitzen Überdauerungsorgane
- Beispiel: Rot-Schwingel (*Festuca rubra*), Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*)

Holzgewächse

- durchlaufen den Lebenszyklus innerhalb einer Vegetationsperiode (Blüte und Samenbildung), sterben aber nicht ab, sondern leben mehrere Jahre
- verholzte Pflanzen
- besitzen Überdauerungsorgane
- Beispiel: Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus*)

Die Vegetationsperiode beschreibt hierbei die Zeit im Jahr, in der für die Pflanzen die Bedingungen gegeben sind, um zu wachsen, zu blühen und zu fruchten. Es konnte festgestellt werden, dass sich die Vegetationsperiode in den letzten 60 Jahren um etwa zwei Wochen verlängert hat [37].

In dem im Projekt durchgeführten Monitoring über drei Jahre konnte ebenfalls festgestellt werden, dass von Jahr zu Jahr Veränderungen der Vegetation in Form des Artenaufkommens und des Wachstums zu erkennen waren. Auch der Beginn und das Ende der Vegetationsperiode ließ sich durch das Monitoring bestimmen. In den aufgezeichneten drei Jahren begann die Vegetationsperiode zwischen Ende April bis Mitte Mai bei den meisten Pflanzenarten im Gleisbereich. Das Wachstum nahm dann zum Sommer hin stetig zu und stagnierte ab August/September (z. B. aufgrund hoher Temperaturen, geringen Niederschlägen etc.). Erst Minusgrade im Winter (meist zwischen November und Februar) führten entweder zum vollständigen Verschwinden einjähriger Pflanzen oder zu einer Reduktion der Biomasse (Laubabwurf, vertrocknete Pflanzenteile) bei ausdauernden Pflanzen (z. B. Brombeeren oder Gräser) und Holzgewächsen.

Neben den unterschiedlichen Lebensformen der Pflanzen und dem Wuchsverlauf innerhalb der Vegetationsperiode, unterschieden sich diese weiter in der Form der Ausbreitung und Vermehrung (orientiert an [28]):

Samen

- Verbreitung durch Wind, Wasser, Tiere oder Menschen
- bei Kontakt mit Boden und erforderlichen Bedingungen (Temperatur, Licht, Feuchtigkeit) beginnt die Keimung
- Beispiel: Acker-Kratzdistel (*Cirsium arvense*), Löwenzahn (*Taraxacum officinale*)

Ausläufer (oberirdisch)

- Pflanze bildet Ausläufer zur Verbreitung, die bei Kontakt mit Boden anwurzeln

- Ausläufer bleibt dabei mit der Mutterpflanze verbunden, somit können Ausläufer auch an Orte mit schwierigeren Wachstumsbedingungen vordringen
- Beispiel: Brombeere (*Rubus fruticosus*)

Rhizome (unterirdisch)

- Pflanze bildet unterirdisch Spross- oder Wurzelausläufer, die an anderer Stelle als weitere Pflanze aufwachsen können
- die unterirdischen Ausläufer dienen ebenfalls als Speicherorgan für Wasser und Nährstoffe
- Beispiel: Acker-Schachtelhalm (*Equisetum arvense*), Gemeine Quecke (*Elymus repens*)

Es zeichnet sich ab, dass ausdauernde krautige Pflanzen den größten Teil mit ca. 40 % der Vegetation im Gleisbereich ausmachen, da diese den Bedingungen am besten angepasst sind. Dazu zählen Eigenschaften wie die Wurzeltiefe, die Verbreitung durch Rhizome (unterirdisch) oder Ausläufer (oberirdisch) und die Horstbildung, die vorwiegend bei Gräsern zu sehen ist. Es folgen einjährige Pflanzen, die ihre Verbreitung über Samen sichern. Durch meist sehr hohe Samenproduktion können sich die Pflanzen rasch ausbreiten [28]. Auch durch die derzeitige chemische Vegetationskontrolle konnte festgestellt werden, dass das Auftreten von Pflanzen mit genau diesen Eigenschaften (hoher Vermehrungsrate, kurze Lebenszyklen und unterirdische Überdauerungsorgane) gefördert wird. Ebenso entstehen immer wieder vegetationsfreie Standorte, die wiederum für konkurrenzschwächere Pflanzen, oder Pionierpflanzen, die Möglichkeit bieten sich dort anzusiedeln und auszubreiten [27]. Verholzende Pflanzen treten häufig in Wald- oder Wasserschutzgebieten auf, die durch Einwachsen aus dem Randbereich oder mittels Sameneintrag durch Wind verbreitet werden. Zweijährige Pflanzen sind in den meisten Quellen nur untergeordnet aufgetreten. [28]

Diese Erfassung der Arten und Wuchsformen der Vegetation im Gleisbereich ist häufig in der Literatur als Momentaufnahme eines Monitorings zu finden. Darüber hinaus ist aber für das Projekt auch eine Unterscheidung des Auftretens der Vegetation in den einzelnen Bereichen wie Gleisrost, Schotterflanke und Randweg von Bedeutung. Diese Einteilung fand jedoch nur selten in der vorhandenen Literatur statt. Auch lassen die Daten meist keine Aussagen über die Pflanzendichten und Pflanzenhäufigkeiten zu. In einer Studie zur Bewuchsentwicklung typischer Pflanzenbestände auf Gleisanlagen [28] wurden jedoch diese Kriterien strukturiert in der Auswertung der Bonitur aufgeführt. Dabei wurde deutlich, dass die meisten Arten im Randweg auftraten, gefolgt von der Schotterflanke und die geringste Artenanzahl wurde direkt im Gleisrost gefunden. Die gleiche Verteilung ergibt sich ebenso für die Pflanzendichte. Auch das im Projekt durchgeführte Monitoring ergab diese Verteilung. Es wurden mehr Arten im Randbereich und der Schotterflanke gefunden als im Gleisrost.

Neben der normal erfassten Vegetation im Gleisbereich, stellen auch invasive Pflanzen ein zunehmendes Problem für Gleisanlagen dar. Generell stehen Verkehrssysteme wie Straßen, Eisenbahnen und Schifffahrtswege im Fokus, da sie als Verbreitungswege fungieren (Wirbelschleppen, Ladungsverluste oder Ab- und Anschwemmung) und kaum bewirtschaftete Randbereiche als Linienbiotope geeignete Lebensräume darstellen und sich von dort aus verbreiten können. Außerdem kann die bauliche Infrastruktur und Funktionstüchtigkeit durch einige Pflanzenarten massiv gefährdet werden. [38]

Das Risiko von invasiven Pflanzen für die Eisenbahn wurde unter anderem in einer Literaturstudie des Eisenbahn-Bundesamt (EBA) geprüft. Es stellte sich heraus, dass für eine Vielzahl der invasiven Arten die Möglichkeit besteht, auf den Randweg und ins Gleisbett einzudringen. Zu diesen invasiven Arten gehören zum Beispiel der Götterbaum (*Ailanthus altissima*), der Schmetterlingsstrauch (*Buddleja davidii*), Staudenknöteriche (*Fallopia*-Arten) oder die Robinie (*Robinia pseudoacacia*). [36]

Im Projekt durchgeführten Monitoring konnten ebenfalls invasive Arten auf den Strecken erfasst werden. Im Arbeitsbereich der Alternativverfahren (Gleisrost und Schotterflanke) wurde das Drüsige Weidenröschen (*Epilobium ciliatum*) und das Schmalblättrige Greiskraut (*Senecio inaequidens*) gefunden. Außerhalb des Arbeitsbereichs (Randbereich) wuchs der Riesen-Bärenklau (*Heracleum mantegazzianum*) und der Schmetterlingsflieder (*Buddleja davidii*).

2.2.3 Beschaffenheit des Schotterkörpers

Entscheidend für das Verständnis der Wachstumsbedingungen der Vegetation im Gleis, ist die allgemeine Beschreibung der Beschaffenheit des Untergrundes. Generell zeichnet sich ein intakter Gleiskörper durch eine wasserdurchlässige Planumsschutzschicht aus, die Staunässe vermeiden soll. Durch den nicht vorhandenen Grundwasseranschluss und der fehlenden Kapillarität, hat der Gleiskörper nur eine geringe Wasserhaltekapazität und kann kaum Wasser speichern. Auch ist die Nährstoffspeicherung durch die fehlende Sorption des Schotters begrenzt und wird permanent durch Niederschläge ausgewaschen [28]. Kommt es jedoch über längere Zeit zu einer Anreicherung von Feinmaterial und Humus im Gleisbett, werden die Wuchsbedingungen für Pflanzen durch Nährstoff- und Wasserspeicherung begünstigt.

Die Entwicklung und der Status der Verfüllung mit Feinmaterial sind von vielen Einzelfaktoren abhängig und lassen sich aus den Entstehungspfaden von anorganischem Feinmaterial und organischem Material direkt ableiten.

Anorganisches Feinmaterial im Schotterbett entsteht durch [39]:

- Abrieb und Bruch von Schotter
- Lufteintrag von Staub/Sand von außen
- Ladungsverluste

Organisches Feinmaterial im Schotterbett entsteht durch [28]:

- Rückstände von Pflanzen und Moose
- Lufteintrag von organischem Staub
- Herabgefallene oder hereingewehte Blätter, Äste, Samen
- Ladungsverluste

Der Anteil des Feinmaterials im Schotterbett hängt daher von vielen Faktoren ab und kann stark variieren, wodurch beispielsweise auch Unterschiede im Pflanzenaufwuchs entstehen können. Um mögliche Unterschiede in der Vegetation, aber auch weitere Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der Alternativverfahren vollständig ableiten zu können, wurde der Feinanteil als Versuchsparameter mit

aufgenommen. Im Projekt wurde daher die Menge des Feinanteils anhand an der Oberfläche sichtbaren Merkmale bestimmt. Dabei wurde zwischen einem niedrigen Feinanteil (bis ca. 15 cm unter der Schotteroberfläche kein Feinmaterial), einem mittleren Feinanteil (bis wenige cm unter der Oberfläche verfüllt) und einem hohen Feinanteil (bis zur Schotteroberfläche sichtbar verfüllt) unterschieden.

3 Wechselwirkungen zwischen Gleisanlagen und Umwelt

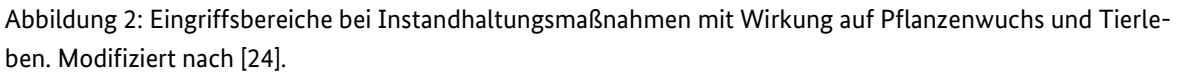
3.1 Gleisanlagen als künstlich geschaffenes Biotop

Gleisanlagen sind zu rein technischen Zwecken von Menschenhand geschaffene Betriebsbereiche des Transportsystems Eisenbahn. Die dadurch neu geschaffenen Flächen unterscheiden sich durch die besonderen technisch bedingten Notwendigkeiten stark von der umgebenden Landschaft. Sie werden von vielen spezifischen Pflanzen- und Tierarten als vernetztes Linienbiotop mit starker interner Gliederung (vom Schotter oft bis zum Waldrand) besiedelt. [40]

Viele Pflanzen und Tierarten, die in großem Umfang zur Biodiversität beitragen, benötigen gerade solche durch permanente Vegetationskontrolle gestörte Ökosysteme, die weitab vom Endzustand des Ökosystems mit stabilem Gleichgewicht liegen. Gerade die Tatsache, dass der Bahnverkehr die Ökosysteme durch Betrieb und Vegetationskontrolle am gleichen Ort konstant stört, erlaubt vielen Tier- und Pflanzenarten eine dauerhafte Ansiedlung [41, 42]. Ohne permanenten menschlichen Eingriff (Betrieb und Pflege) sammelt sich zunehmend organisches Material (z. B. Blätter) im Gleisbett an und bildet Humus. Rankenbildende Pflanzen wie Brombeeren wachsen von der Seite her ins Gleisbett und überwuchern die Gleise, Büsche und Bäume ersetzen offene Schotterflächen und sonnige Waldränder.

Ohne die Vegetationskontrolle verschwinden somit innerhalb von wenigen Jahren z. B. wärmeliebende Offenlandarten wie Eidechsen, viele Insektenarten oder typische Pflanzengesellschaften an Eisenbahnlinien [41]. Die Vegetationskontrolle, die den Gleisbereich vegetationsfrei hält, ist daher wichtig für die technische Funktionsfähigkeit sowie den Biotoperhalt mit hohem Biodiversitätsfaktor.

Um diesen Zustand zu erhalten, werden zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich verschiedene Maßnahmen mit unterschiedlicher Eingriffstiefe und -breite angewendet (Abbildung 2). Die bislang eingesetzten chemischen und nichtchemischen Verfahren werden auf dem Gleisrost, der Schotterflanke und auf dem Randweg eingesetzt (Bereich A und B, grün). Diese Vegetationskontrolle hat die geringste Eingriffstiefe, da sie nur oberflächlich und ohne Materialverlagerung stattfindet. Zunehmende Eingriffstiefen mit Materialbewegung entstehen z. B. bei der Bettungsreinigung (Bereich A bis C, rot) oder der Randwegerneuerung (Bereich C, blau). Die Vegetationskontrolle im Randbereich (Bereich D, gelb) findet ausschließlich mechanisch statt [1]. Da die nichtchemische Vegetationskontrolle die chemische Vegetationskontrolle in Zone 1 (grün) ersetzen soll, wird dementsprechend die Betrachtung der artenschutzrechtlichen Bewertung der nichtchemischen Alternativverfahren ausschließlich im grün hinterlegten Bereich durchgeführt, da die Reichweite der Verfahren in den Schotter hinein und neben die Zielbehandlungsfläche sehr begrenzt ist.



3.1.1 Allgemeine artenschutzrechtliche Einordnung

Die für Naturschutz und Landschaftspflege zuständigen Behörden können von den Verboten des § 44 im Einzelfall Ausnahmen zulassen, u. a. aus zwingenden Gründen des überwiegenden öffentlichen Interesses einschließlich solcher sozialen oder wirtschaftlichen Art (vgl. § 45 Abs. 7 BNatSchG). Eine Ausnahme darf nur zugelassen werden, wenn zumutbare Alternativen nicht gegeben sind und sich der Erhaltungszustand der Populationen einer Art nicht verschlechtert.

Auf Grundlage dieser rechtlichen Bestimmungen lassen sich weitere Untersuchungsgegenstände ableiten, die als Basis für eine weitergehende Prüfung dienen können, darunter:

- für welche Tiere es eine ausreichende Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens mit Verfahren der Vegetationskontrolle gibt
- wie groß und welcher Art die Schäden für das Einzeltier beim Zusammentreffen sind
- wie sich die Schäden oder Schadenshäufigkeit technisch oder durch Verfahrensoptimierung minimieren lassen
- wie groß die möglichen Schäden für die existierende lokale Population oder eine modellhaft anzunehmende Population sind (im Verhältnis zu den allgemeinen Lebensrisiken der Tiere in diesem Lebensbereich)
- wie weit Naturschutz und Landschaftspflege und die damit verbundenen Gesetze und Verordnungen auf die Vegetationskontrolle angewendet werden müssen
- wie weit das öffentliche Interesse im Bereich des ökologischen Transportwesens reicht und ob jenseits der allgemeinen Sorgfaltspflicht des Naturschutzrechtes (§ 39 (1) BNatSchG) weitere Einzelgenehmigungen verfahrensspezifisch notwendig sind

3.1.2 Relevante Tierarten für die Risikobewertung

In Anlehnung an die rechtlichen Grundlagen wurde im Rahmen der vorliegenden Studie eine Überprüfung der besonders relevanten Tierarten und deren Risiken versucht. Der Schwerpunkt lag dabei auf den besonders geschützten und streng geschützten Arten. Es wurde auf Basis von Literaturdaten eine theoretische Annahme getroffen, welche dieser Tierarten oder deren Entwicklungsformen während der Vegetationskontrolle mit den Alternativverfahren räumlich im zuvor beschriebenen Arbeitsbereich zusammentreffen können und ob es durch die Anwendung der verschiedenen Alternativverfahren zu einer erheblichen Störung der Population von streng geschützten Arten bzw. bei besonders geschützten Arten zur Verletzung, Tötung oder der Entnahme, Beschädigung oder Zerstörung ihrer Entwicklungsformen kommen kann (Tabelle 1).

Vögel und wirbellose Tiere, insbesondere Insekten wie Schmetterlinge, Heuschrecken, Stechimmen und Käfer [41], werden aus der Detailbetrachtung ausgeschlossen. Es wird davon ausgegangen, dass sie bei der Verwendung von Fahrzeugen mit niedriger Geschwindigkeit durch Aerodynamik, Versteckmöglichkeiten oder Fluchtverhalten unbeeinträchtigt bleiben. Aufgrund der deutlich höheren Risiken, die im Normalbetrieb auf dem Gleis durch schnellere und häufigere Bewegungen entstehen, kann das Risiko für die Populationen durch die Vegetationskontrolle als gering eingeschätzt werden. Versuche und Simulationen deuten trotz schlechter Datenlage darauf hin, dass Insekten bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 40 km/h Hindernisse umfliegen und damit Kollisionen verhindern können [42]. Innerorts (ca. 50 km/h) sind Kollisionen zwischen Autos und Vögeln sehr selten, was darauf hindeutet, dass auch Vögel im Schienenverkehr ein ähnliches Ausweichverhalten zeigen.

Da die alternative Vegetationskontrolle nur in der Vegetationsperiode (Frühjahr bis Frühherbst) angewendet wird, werden nur diese Zeiträume berücksichtigt und somit keine Winterbedingungen und Winterquartiere einbezogen. Weiterhin werden die Alternativverfahren nur im Gleisrost, den Schotterflanken und den zu begehenden Randwegen eingesetzt, weshalb nur diese Bereiche in die

Betrachtung einfließen. Da die untersuchten Verfahren aus Energie-, Effizienz- und Sicherheitsgründen randscharf arbeiten, sind relevante Fernwirkungen auf benachbarte, nicht zu behandelnde Bereiche auszuschließen.

Die Arten, die für eine weitergehende Bewertung in Betracht kommen, werden anhand des Aufenthaltsgrunds im Gleis identifiziert. Dieser kann als temporärer Aufenthalt (TA), Querung/Wanderung (QW), Fortpflanzungsstätte (FS) oder Ruhestätte (RS) klassifiziert werden. Zusätzlich wird das Fluchtverhalten evaluiert, ob eine Fluchtoption (FO) bei langsamen Fahrzeugen (< 40 km/h) besteht oder kein gesichertes Fluchtverhalten (KGF) vorliegt. Zudem wird berücksichtigt, ob eine erhebliche Mortalität im Normalbetrieb (EM) auftritt und ob streng geschützte Arten bekanntermaßen an der Oberfläche bleiben (BO).

Tabelle 1: Auswahl häufig vertretener streng geschützter und besonders geschützter Arten mit bekannter Affinität zu Gleisanlagen.

ARTEN NACHGEWIESEN IM GLEISBEREICH	GRUND DES AUFENTHALTS	BESONDERE EIGENSCHAFTEN	SCHUTZSTATUS	IDENTIFIZIERTE ARTEN FÜR WEITERE BEWERTUNG
SÄUGETIERE				
GROßSÄUGER (Z. B. FUCHS, DACHS, REH)	QW1	EM1, meist FO1	Einige SG	
HASELMAUS²	QW3	FO3	SG	
MÄUSE¹	TA, QW1	-	-	
FLEDERMÄUSE (ALLG.)¹	QW1	EM1, FO1	SG	
HASEN¹	QW1	EM1	-	
REPTILIEN				
ZAUNEIDECHSE¹	TA1, QW1, FS1, RS1	KGF1	SG	X
MAUEREIDECHSE¹	TA1, QW1, RS1	KGF1	SG	X
SMARAGDEIDECHSEN¹	QW1	KGF1	SG	
SCHLANGEN (Z. B. SCHLINGNATTER)¹	TA1, QW1	EM1, BO1	Einige SG	(X)
AMPHIBIEN				
ERDKRÖTE¹	QW1	BO1	BG	
GRASFROSCH¹	QW1	EM1, BO1	BG	

Begriffserläuterungen:

- Aufenthaltsgrund: Fortpflanzungsstätte (FS), Ruhestätte (RS), Querung/Wanderung (QW), temporärer Aufenthalt (z. B. Aufwärmen (TA)).
- Besondere Eigenschaften: Erhebliche Mortalität im Normalbetrieb (EM), Fluchtoption (FO) bei langsamen Fahrzeugen < 40 km/h, bleibt auf Oberfläche (BO), Kein gesichertes Fluchtverhalten (KGF) bedeutet, dass auch für Fahrgeschwindigkeiten von 20–40 km/h entweder das Fluchtverhalten unbekannt ist oder dass sich zumindest Teile der Population auf oder nahe der Oberfläche sitzenbleiben, sodass ein Schadenpotential existiert.
- Schutzstatus: Besonders geschützt (BG) § 7 Abs. 2 Nr. 13 BNatSchG ((EG) Nr. 709/2010)), streng geschützt (SG) nach § 7 Abs. 2 Nr. 14 BNatSchG.

Literatur: ¹ [41]; ² [44]; ³ [45]

Ein bloßer Aufenthalt während der QW ist für die vorliegende Betrachtung nicht ausreichend. Im Normalbetrieb kommt diese Art der Gefährdung (z. B. Hochschleudern, mechanisches Überfahren auf der Schiene, direkte Kollision mit Fahrzeugen [41]) häufiger vor und aufgrund der höheren Geschwindigkeiten auch intensiver (Vorbelastung). Die Vegetationskontrollverfahren arbeiten im Gegensatz zum normalen Verkehr mit geringerer Geschwindigkeit und Nutzungsfrequenz. Verbunden mit den Aufenthaltsmuster der meisten Tiere besteht nur eine geringe Wahrscheinlichkeit für ein Zusammentreffen mit Schienenfahrzeugen zur Vegetationskontrolle.

Aufgrund der oben vorgenommenen Auswahl (Tabelle 1) ist für die weitergehende Bewertung der Einfluss der Alternativverfahren gegenüber der Zaun- und Mauereidechse zu berücksichtigen sowie gegenüber Schlingnattern (Schlangen) weiter zu erörtern.

Für die oft im gleichen Atemzug aufgeführte Haselmaus gibt es dagegen keine qualifizierbare Gefährdung durch die Alternativverfahren, da:

- sie als strikte Bewohner lockerer Wälder angesehen werden, sich ihr Lebensraum im Waldbereich mit Totholz befindet [45–47] und in Baumkronen und Sträuchern leben [48, 49]
- sie sehr ortstreu sind, wobei sie ihre Nester in Baumhöhlen, Nistkästen und teilweise auch in Bodenhöhlen haben [46]
- offene Bereiche grundsätzlich als Hindernis und nie als Lebensraum angesehen werden, selbst wenn es sich um landwirtschaftliche Flächen handelt [45]
- in der neueren Literatur auch Populationen von Haselmäusen zunehmend in straßennahen Heckenbeständen in höherer Zahl erfasst wurden und dies dafür spricht, dass sie sogar mit den auf Straßen gegenüber Schienen deutlich höheren Unfallgefahren wahrscheinlich durch das Meiden offener Bereiche umgehen können [50] und deshalb ihre Populationen auch an Straßen höher oder gleichwertig sein können [49]
- die generelle Bedeutung von Gehölzstrukturen entlang von Verkehrstrassen für die Haselmaus noch nicht hinreichend geklärt ist [51, 52]

Somit kann ein Zusammentreffen oder eine erhebliche Störung als gering eingestuft werden, da die Alternativverfahren selten und zeitlich begrenzt eingesetzt werden und in keinem relevanten Lebens- oder Aufenthaltsraum der Haselmaus arbeiten.

Allgemeine Informationen zur Datenlage der Eidechsen

Trotz der hohen Wichtigkeit für Entscheidungs- und Bewertungsprozesse ist das Wissen über das Verhalten von Eidechsen im Gleisbereich begrenzt. Die vorhandenen Berichte müssen daher als Einzelfallstudien angesehen werden. Eine Verallgemeinerung der Aussagen aus den Studien ist nicht möglich, jedoch stellen die vorhandenen Beobachtungen die bestmögliche Grundlage für die orientierende Risikobetrachtung dar.

Bisher ist bekannt, dass die Mortalität von Eidechsen im Gleisbett im Normalbetrieb gering ist, da es im Gegensatz zu Singvögeln kaum Totfunde gibt. Die Querung von Strecken ist dementsprechend als unproblematisch anzusehen [41, 53].

Die im Rahmen dieser orientierenden Betrachtungen ausgewerteten Veröffentlichungen mit erkennbarer Relevanz für die Vegetationskontrolle zum Verhalten der Tiere lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen.

Kerninformationen zu Zauneidechsen

- Bei der Beobachtung einer Instandhaltungsmaßnahme hielt sich die Mehrzahl der nachgewiesenen Zauneidechsen vor allem im Randbereich neben der Gleisanlage auf [54].
- Bei Zauneidechsen wurde beobachtet, dass bei jeglicher Annäherung, die vom normalen Zugverkehr abweicht, auch bei langsameren Schienenfahrzeugen der Fluchtreflex sehr früh ausgelöst wird [54].
- Bei Alttieren wurde beobachtet, dass diese bei Gefahr/Annäherung mit großer Mehrheit in den Randbereich flüchten und nur von den kleineren Jungtieren sich eine größere Minderheit tief im Schotterbett verkriecht [54].
- Zumindest im konkreten Fall einer Gleisbettreinigung mit Schienenerneuerung und Randwegerneuerung wurden keine Hinweise dafür erbracht, dass Zauneidechsen ungewöhnlich stark von diesen Erneuerungsmaßnahmen betroffen waren [50, 54].
- Sie benötigen für eine erfolgreiche Eiablage Untergründe, die Grabungen von einer Tiefe von 30 bis 70 cm zulassen [54].
- Offene Stein- und Schotterflächen werden zur Thermoregulation genutzt [54].
- Ca. 15 % (Medianwert) der Zauneidechsen konnten nur mit Hilfe künstlicher Verstecke nachgewiesen werden [55].

Kerninformationen zu Mauereidechsen

Die Mehrheit der Beobachtungsgebiete sind natürliche Lebensräume z. B. in Weinbergen [56] und nicht der Eisenbahnbereich, dessen Betreten gefährlich und auch nicht gestattet ist (vgl. § 62 EBO) [3].

- Die Mauereidechse besiedelt auch vollständig gehölzfreie Streckenabschnitte [53], ein Deckungsgrad der Vegetation von 10 bis 40 % fördert die Tierdichte [56].
- Sie benötigt für eine erfolgreiche Eiablage sandige Untergründe, die Grabungen in Bereichen von 10 bis 20 cm Tiefe zulassen. Die Sandlinsen (mit Anteilen von Löss, Lehm und Mergel) sollten möglichst lange Ränder mit lockerer Schuttvegetation haben. [56]
- Die Mauereidechse nutzt offene, besonnte Flächen zur Thermoregulation [56].
- Die Mauereidechse überwintert in frostfreien Gesteinsspalten [56].
- Jagdreviere sind kleinräumig strukturierte, nährstoffarme Bereiche mit lockerer Schuttvegetation, kleinen Büschen und Freiflächen mit Versteckplätzen [56].
- Auch das Fluchtverhalten ist temperaturabhängig [56]. Mauereidechsen suchen bevorzugt Deckung im Pflanzenbewuchs, nutzen aber auch Spalten [57]. Konkrete Beobachtungen zum Fluchtverhalten im Bahnbereich liegen nicht vor.

Kerninformationen zu Schlingnattern

- Schlingnattern bevorzugen trockene Lebensräume mit steinigen Elementen, sandigen Heiden sowie Moor- und Küstengebiete und grenzen sich damit von Zauneidechsen tendenziell ab, die offene, relativ trockene Lebensräume bevorzugen [58].
- Die Lebensräume haben eine Nähe zu Bahndämmen und Straßen, die Hauptgefährdungen erfolgen jedoch durch Habitatzerstörung, Flächenverlust und Verinselung [59].
- Die Lebensräume auf und an Bahnanlagen werden gerade für Schlingnattern und allgemein für geschützte Reptilien durch Aufgabe und Unterlassen von Pflegemaßnahmen gefährdet [41].
- Die Hinweise auf das Verhalten von Schlingnattern bei der Annäherung von Zügen sind seltene Einzelbetrachtungen. [41]
- Ca. 75 % (Medianwert) der Schlingnattern konnten nur mit Hilfe künstlicher Verstecke nachgewiesen werden [55].

Im Rahmen dieser orientierenden Betrachtung kann die artenschutzrechtliche Relevanz der Schlingnatter für die Bewertung nicht abschließend geklärt werden. Hierzu sind tiefergehende fachliche Untersuchungen nötig, wobei besonders Daten über die reale Häufigkeit der Tiere im Bereich von Gleisbett, Schotterflanke und Randweg und deren Flucht- und Versteckverhalten bei außergewöhnlichen Annäherungen (keine normale Zugüberfahrt) relevant sein dürften. Ohne besonders aufgebaute Fallen/Verstecke ist das Monitoring kaum möglich.

Des Weiteren lässt sich feststellen, dass besonders Eidechsen eine hohe Affinität zum Gleisbereich zeigen und mit der Wirkungsweise eines Alternativverfahrens in Kontakt kommen können. Vergleichsweise sind die Aufenthaltsmuster anderer im Gleisbereich auftretender Tierarten weniger überschneidend mit den Berührungspunkten eines Alternativverfahrens. Zur Betrachtung der Risikopotentiale der Alternativverfahren können die bisher wenigen Informationen der Verhaltensmuster von Eidechsen aber auch Schlingnattern für erste Abschätzungen genutzt werden. Diese weisen auf ein Fluchtverhalten in den Schotterkörper oder in den Randbereich bei ungewöhnlichen Ereignissen hin, wie es die im Vergleich zum normalen Zugbetrieb selten vorkommende Vegetationskontrolle darstellt.

3.1.3 Ansätze zur Risikobewertung der chemischen Vegetationskontrolle

Nach den ersten Annahmen der Risikobewertung für das Zusammentreffen der im Gleisbereich lebenden Tieren und den darin anzuwendenden Alternativverfahren, wird ergänzend die aktuelle Entwicklung in der Bewertung von Windkraftanlagen hinzugezogen und auch die Datenlage für die chemische Vegetationskontrolle beleuchtet.

Im Bereich der Windenergie liegt ein gut ausgearbeitetes Modell und eine Verfahrensanleitung für die Risikobewertung rechtlich und inhaltlich ausgearbeitet für die rechtskonforme Bestimmung der signifikanten Erhöhung des Tötungsrisikos von Brutvögeln an Windenergieanlagen gem. § 44 BNatSchG vor. Dort werden in einem mehrschrittigen Verfahren betroffenen Arten ermittelt, die ein

allgemeines und durch die Maßnahme zusätzliches Tötungsrisiko aufweisen (basierend auf Wahrscheinlichkeitsmodellen). Danach wird geprüft, ob eine vorgegebene Signifikanzschwelle des Zusatzrisikos überschritten wird und ob dieses Zusatzrisiko durch weitere Maßnahmen ausreichend verringert werden kann. [60, 61]

Ein wichtiger und in Entscheidungen des Bundesverwaltungsgerichts (BVerwG) weiter ausgeführter Grundaspekt ist dabei, dass die Windkraftanlagen in von Menschenhand gestalteten Naturräumen stehen, dass es dort ein von vorneherein vorhabenunabhängiges Grundrisiko gibt, das regelmäßig hinzunehmen ist und dass die Windenergieanlagen „zur Ausstattung des natürlichen Lebensraums der Tiere gehören“ (vgl. BVerwG, Urteil v. 28.04.2016 – 9 A 9.15, Rn. 141, BVerwG, Urteil v. 27.11.2018 – 9 A 8.17, Rn.98; BVerwG, Urteil v. 09.02.2017 – 7 A 2.15, Rn. 466, zitiert nach [61]).

Wie weit eine Übertragung dieses Ansatzes und ggf. die Nutzung von allgemeinen Modellrechnungen für neue Maßnahmen zur Vegetationskontrolle im Bahnbereich eingesetzt werden, ist noch nicht abschließend geklärt. Festzuhalten bleibt, dass es sich im Gleisbereich nicht um einen von Menschenhand gestalteten Naturraum handelt, sondern um ein technisches System, das von Tieren als zeitweiliger Aufenthaltsort genutzt wird.

Vergleich mit der vorläufigen Risikobewertung für neue chemische Kontrollverfahren

Der Mangel an quantitativen Daten bei nichtchemischen Verfahren im Gleisbereich unterscheidet sich nicht von den begrenzten Bewertungsgrundlagen bei chemischen Verfahren. Auch dort liegt der Fokus auf der Toxizität gegenüber Boden- und Wasserorganismen sowie bestimmten Insekten wie Bienen. Für Eidechsen existieren beispielsweise keine genormten oder anerkannten Testverfahren.

Bezüglich des Nachfolgepräparats Pelargonsäure sind keine Studien bekannt, die im Rahmen der landwirtschaftlichen Zulassung durchgeführt wurden, die Auswirkungen auf Eidechsen untersuchen [62]. Bei einer sachlogischen Prüfung der Expositionsszenarien stellt sich jedoch die Frage, ob es durch die speziellen, agraruntypischen Expositionswege zu nachteiligen Effekten kommen könnte. Pelargonsäure zieht in den Boden auf dem Feld ein und wird dort absorbiert oder schnell mikrobiell abgebaut. Auf harten Oberflächen könnten Spritzbeläge hingegen länger flüssig bleiben oder durch Tau wieder gelöst werden, was dazu führen könnte, dass hohe Konzentrationen flüssig vorhanden sind. In diesem Fall wären die generellen Warnhinweise für Pelargonsäure (Ätz-/Reizwirkung auf der Haut, schwere Augenschädigung, Augenreizung) [19] relevant für den Kontakt mit Reptilien.

Dieses Beispiel eines potenziellen risikobehafteten Pfades im Bahnbereich verdeutlicht, dass ein Risikomanagement, insbesondere für neue Verfahren (unabhängig davon, ob chemisch oder physikalisch), sinnvoll ist. Gleichzeitig zeigt die Einführung von Pelargonsäure in mehreren europäischen Ländern, dass nicht explizit regulierte oder weniger offensichtliche Risiken oft auch ohne detaillierte Analysen in der Einführungsphase akzeptiert werden, was wichtig ist, um zügige Innovationen zu fördern. Im weiteren Verlauf sollten jedoch für alle Verfahren die Angemessenheit und mögliche Nebenwirkungen durch praxisnahe Tests oder langfristiges Monitoring geprüft werden.

4 Nichtchemische Alternativverfahren zur Vegetationskontrolle

4.1 Kurzbeschreibung der Einzelverfahren

Verfahren zur Vegetationskontrolle, die nicht auf dem Einsatz von chemischen Herbiziden beruhen, existieren in Bereichen wie der Landwirtschaft, im kommunalen Bereich (Straßen, Wege, Plätze) und teilweise bereits im Bahnbereich. Bei den nichtchemischen Alternativverfahren wurde neben bisher durchgeführten Studien für deren Potentiale im Bahnbereich auch die landwirtschaftliche Vegetationskontrolle auf Feldern und die urbane/industrielle Vegetationskontrolle im Bereich von zumeist befestigten Verkehrsflächen entlang Straßen und in Städten betrachtet. Aus dem Bereich der Landwirtschaft sind nur Vegetationskontrollverfahren übertragbar, die ohne mechanische Eingriffe in den Boden auskommen, da derartige Eingriffe in den Eisenbahnbereich nicht möglich sind.

Im Folgenden werden thermische, mechanische, elektrische und strahlungsbasierte Verfahren präsentiert. Eine erweiterte Beschreibung der Verfahren mit den wichtigsten Merkmalen aus dem Stand der Technik, den Eigenschaften sowie potenziellen Vor- und Nachteilen sind im Anhang 2 zu finden. Außerdem wurden Screening- und Limit-Versuche (Versuche ohne Wiederholung) zum Verständnis der Wirkprinzipien (Anhang 4) sowie eine Evaluierung der Verfahren anhand der Anforderungskriterien eines Verfahrens zur Vegetationskontrolle (Anhang 6) durchgeführt, die Bestandteile der späteren Bewertung der Verfahren im Kapitel 6 sind.

4.1.1 Mechanische Verfahren

Unter mechanischen Verfahren verstehen sich die Verfahren, die die Pflanzen mechanisch durch Krafteinwirkung schädigen bzw. entfernen. Darunter fallen Verfahren wie das Jäten (sowohl maschinell als auch von Hand), das Mähen, das Abbürsten oder auch der Einsatz von Druckwasser. Charakteristisch für mechanische Verfahren ist die Behandlung von größeren Unkräutern [63], jedoch werden in der Regel keine Samen abgetötet. Bezüglich der Anwendung und der Wirksamkeit unter verschiedenen Wetterbedingungen zeigen die mechanischen Verfahren eine geringe Abhängigkeit von Regen, Trockenheit, Wind und Temperatur [24]. Der Energiebedarf für die Anwendung der Verfahren ist gering [64]. Zusätzlich wird bei der Verwendung von mechanischen Verfahren bis auf dem Druckwasser-Verfahren kein Betriebsmittel ausgebracht. Daher sind die Umwelteinflüsse als sehr gering einzustufen. Die Auswirkung vom Metall- und Kunststoffabrieb der Werkzeuge muss untersucht werden. Die mechanischen Verfahren umfassen:

- Handjäten (Manuelles Jäten der Pflanzen)
- Mähen und Mulchen (Abschneiden bzw. Zerfasern der Pflanzen)
- Bürsten (Schädigung und Abtrennen der Pflanzen an der Oberfläche)
- Druckwasser (Abtrennen bzw. Zerfasern der Pflanzen mit einem Hochdruckwasserstrahl)
- MJ (Aus- bzw. Abreißen der Pflanzen, Zupfen)

4.1.2 Thermische Verfahren

Thermische Verfahren setzen die Vegetation kurzzeitig hohen oder niedrigen Temperaturen aus. Durch diesen meist schnellen Temperaturwechsel können die Pflanzen nachhaltig geschädigt werden. Eine Erhöhung der Temperatur der Pflanzen auf über 45 °C führt bereits zu einer Denaturierung der Proteine. Im Bereich von 55 bis 95 °C werden letale Pflanzenschäden erreicht. [65, 66]

Zu den thermischen Verfahren gehören Hochtemperaturverfahren wie das Abflammen, das Infrarot-Verfahren und Heißluft sowie Verfahren mit erhöhter Temperatur (unter der Zündtemperatur der Pflanzen) wie Heißwasser und Heißschaum. Zu den Tieftemperaturverfahren gehört das Frosten. Vorteil der Methode Heißwasser ist die mögliche Behandlung der Gleisbereiche vom Fahrzeug aus ohne die Fahrzeugbegrenzungslinie zu überschreiten [67]. Analog zum Heißwasserverfahren gilt die Eigenschaft für die Verfahren Heißschaum und Frosten. Ein Nachteil der thermischen Verfahren ist jedoch der hohe Energiebedarf und der hohe Bedarf an Betriebsmitteln [64]. Insgesamt wurden die folgenden Verfahren für die Bewertung berücksichtigt:

- Abflammen (Erhitzen und ggf. entzünden der Pflanzen durch direkten Kontakt mit offener Flamme)
- Infrarot (Erhitzen der Pflanze mittels Infrarotstrahlung)
- Heißluft (Erhitzen der Pflanze mit heißer Luft/Abgasen)
- Heißwasser (Erhitzen der Pflanze mit heißem Wasser nahe dem Siedepunkt)
- Heißschaum (Erhitzen der Pflanze mit heißem Wasser und Schaum zur Wärmespeicherung)
- Dampf (Erhitzen der Pflanze mit überhitztem, gesättigtem Wasserdampf)
- Frosten (Erfrieren der Pflanze mit flüssigem Stickstoff oder Trockeneis)

4.1.3 Sonstige Verfahren

Die sonstigen Verfahren beschreiben all die Verfahren, die nicht pauschal den beiden anderen Kategorien zugeordnet werden können. Zwar liegt im Einzelnen beispielsweise beim Laser ein thermischer Effekt vor, jedoch gibt es darüber hinaus noch andere Effekte, die die Wirkung beeinflussen (Schneiden mittels Laser). Abgesehen vom El (Behandeln der Pflanzen mit elektrischem Strom), arbeiten alle Verfahren mit elektromagnetischer Strahlung von unterschiedlicher Wellenlänge. Diese liegt teils im sichtbaren Bereich (Laser), teils im langwelligen Bereich (Mikrowellen) und teils im kurzwelligen Bereich (UV-C). Die bekannten sonstigen Verfahren sind:

- Elektrischer Strom (auch „El“; Schädigung der Zellstruktur der Pflanzen durch elektrischen Strom)
- Mikrowellen (Erwärmen der Pflanze durch Mikrowellenstrahlung)
- UV-C (Schädigung der Zellstruktur durch Strahlung und Wärmeentwicklung)
- Laser (Erwärmen und schneiden der Pflanzen mittels Laserstrahl)

4.2 Studien zum Vergleich der Alternativverfahren

Neben dem frühen Einsatz zahlreicher chemischer Verfahren, begann auch bereits seit Beginn der 1990er Jahre die Suche nach umweltfreundlicheren Vegetationskontrollmethoden zur Entwicklung und Bewertung nichtchemischer Alternativverfahren. Im Jahre 1995 veröffentlichte das Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung im Auftrag der Deutschen Bahn AG die Studie „Ökologischer Vergleich der Verfahren zur Vegetationskontrolle bei der Deutschen Bahn AG unter Berücksichtigung von Kostenberechnungen“ [68]. Dort wurden bereits erste Vergleiche verschiedener chemischer, aber auch thermischer Verfahren unternommen. Insbesondere das Infrarot-Verfahren wurde hier genauer betrachtet und analysiert. Zu den Ergebnissen der Analyse zählen neben den durch die unterschiedlichen Verfahren entstandenen CO₂-Emissionen, die Kostenabschätzungen zum Einsatz von Herbiziden (u. a. Glyphosat) auf Gleisanlagen sowie umfangreiche Daten zum Energiebedarf und der notwendigen Anwendungsfrequenz des thermischen Infrarotverfahrens. Die Daten zum Infrarot-Verfahren basieren dabei auf einer durch die DB AG und die Gleisbaufirma Wiebe durchgeführten Studie mit einem eigens dafür angefertigten Fahrzeug. Das Verfahren wurde vor dem damaligen Bewertungshintergrund und der guten Verfügbarkeit von Glyphosat und anderen Herbiziden als nicht konkurrenzfähig eingestuft.

Im Jahre 2003 veröffentlichte die UIC eine umfassende Studie unter dem Namen „UIC Vegetation Control Project“ [24]. Dort wurde versucht, das Wissen unterschiedlicher europäischer Akteure aus dem Bahn-Sektor zum Thema Vegetationskontrolle zu bündeln und eine Bewertung der verschiedenen Verfahren vorzunehmen. Ein Ziel der Studie war es, mögliche Einsparpotentiale für Kosten und Herbizide zu identifizieren. Das Wissen wurde durch Umfragen bei den unterschiedlichen Bahninfrastrukturbetreibern, eine begleitende Literaturrecherche sowie Expertenwissen gesammelt. Daraus gingen unter anderem eine generelle Definition der zu behandelnden Bereiche im Gleis, erste Aussagen zum Einfluss der Pflanzen auf die Infrastruktur und generelle Anforderungen an die Verfahren hervor.

Die Studie enthielt neben den mechanischen, thermischen und elektrischen Verfahren auch biologische Verfahren und solche, die als baulich zu bezeichnen sind. Hinsichtlich neuerer Verfahren, die erst in den letzten Jahren weiterentwickelt wurden (UV-C, EL, Heißschaum) wurde keine Bewertung vorgenommen, da zum Zeitpunkt der Studie noch nicht ausreichend Daten zur Verfügung standen. Wichtige Grundlagen des Vegetationsmanagements wurden hier ebenfalls zusammengefasst. Die Studie warf auch die Fragestellung auf, inwieweit Bewuchs toleriert werden kann, gab dazu jedoch keine abschließende Antwort. Es wurden außerdem Empfehlungen für nichtchemische Methoden ausgesprochen, die auf Bereichen, in denen Herbizide nicht eingesetzt werden dürfen oder wo deren Einsatz ineffizient ist, zum Einsatz kommen können.

Im Jahr 2018 erschien das Folgeprojekt zur UIC-Studie unter dem Namen „Herbie – Guidelines, State of the Art and Integrated Assessment of Weed Control and Management for Railways“ [10]. Diese Studie wurde ebenfalls durch die UIC veröffentlicht und stellt eine Fortschreibung der Studie von 2003 dar. Auch in der „Herbie-Studie“ wurden Eisenbahninfrastrukturbetreiber zu ihren aktuellen Verfahren zum Vegetationsmanagement befragt und diese Daten in Form einzelner

länderspezifischer Steckbriefe zusammengefasst. Aus diesen kann abgelesen werden, dass der Einsatz von Herbiziden europaweit im Vegetationsmanagement vorherrscht und innerhalb der verwendeten Herbizide wiederum Glyphosat den Hauptanteil darstellt. Auch in dieser Studie werden Verfahren zur Vegetationskontrolle aufgezeigt und bewertet. Die Liste entspricht hier weitestgehend den Verfahren, die bereits in der vorangehenden Studie genannt wurden. Allerdings sind vereinzelt neuere technische Umsetzungen berücksichtigt. Das Frosten, Heißschaum-, UV-C- sowie Laserverfahren finden jedoch erneut keine Berücksichtigung in der Bewertung. Als Handlungsempfehlung spricht sich die Studie für die Weiterentwicklung der Verfahren „Heißwasser“, „Nassdampf“, „elektrophysikalische Pflanzenkontrolle“ und „organische Säuren“ aus.

Den aktuellen Wissensstand der UIC bildet der TRISTRAM (Transition Strategy on Vegetation Management) Final Report, der im April 2021 veröffentlicht wurde ab [7]. In diesem Bericht wird erneut der Stand der Technik aufgeführt. Anders als die bisherigen Berichte der UIC, wird hier der Fokus auf den Forschungsstand zu alternativen Verfahren gelegt. So werden die einzelnen Alternativverfahren und der bisherige Entwicklungsstand bei den einzelnen europäischen Infrastrukturbetreibern genauer betrachtet.

In der aktuellen Übergangsstrategie der UIC (TRISTRAM) wird stärker als in den vorangegangenen Studien eine dynamische zustandsbasierte Vegetationskontrolle mit unterschiedlichen Verfahren betont. Diese unterschiedlichen Verfahren hängen dabei sowohl von den Gegebenheiten vor Ort als auch dem jeweiligen zu behandelnden Bereich (Gleisrost, Randweg) ab. Auch wird eine digitale Erfassung des Streckenzustandes zur zielgenauen Vegetationskontrolle thematisiert.

Im Anhang 3 findet sich eine Gesamtübersicht der bisherigen vergleichenden Studien und Veröffentlichungen aus dem Bahnbereich (zusätzlich Schweizerische Bundesbahn (SBB) 2001 [22], Österreichische Bundesbahn (ÖBB) 2017 [69], SBB 2018 [70], Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES) 2019 [71], SBB 2020 [72]). Weit vor dem Bahnbereich und der Anwendung auf versiegelten Flächen ist die chemische und nichtchemische Vegetationskontrolle in der Landwirtschaft das größte fachspezifische Einsatzgebiet und Forschungsfeld. Neue Technologien stammen, wie auch die Herbizide, fast immer aus der Landwirtschaft. Einzelne Technologien aus dem urbanen Raum wurden für den Bahneinsatz lediglich grob adaptiert. Aus diesem Grund wurden derartige Studien aus dem urbanen Bereich ebenfalls für dieses Projekt genutzt (University of Copenhagen 2008 [73], Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL Bayern) 2016 [74], University of Pisa 2019 [75]).

Neben den vergleichenden Studien, die sich mit mehreren unterschiedlichen Verfahren bzw. anwendungsnahen Verfahren befassen, existiert eine Vielzahl kleinerer meist technisch orientierter Studien, Paper, Firmeninformationen und sonstiger Veröffentlichungen, die sich auf einzelne Verfahren und Einzelaspekte konzentrieren. Diese werden zusätzlich zu den Informationen dieses Kapitels in den Ergebnissen der Verfahrensbewertung (Anhang 6) bearbeitet und eingeordnet. So wurde gerade für die Verfahren, die bisher für den Eisenbahnbereich noch nicht als praxistauglich eingestuft wurden, eine aktuelle Datengrundlage zur Abschätzung von zukünftigen Potentialen als Alternativverfahren geschaffen.

5 Auswahl geeigneter nichtchemischer Alternativverfahren

5.1 Vorgehen bei der Auswahl der Alternativverfahren

Basierend auf der generellen Notwendigkeit der Vegetationskontrolle im Gleisbereich und dem Ziel ein nichtchemisches Verfahren zu bauen und im Gleisbereich zu erproben, musste zuerst ein Alternativverfahren oder eine Verfahrenskombination ausgewählt werden. Darum wurde das Vorgehen des allgemeinen Produktentwicklungsprozesses (PEP) genutzt, welches von Aufgabenspezifizierung bis zur Konstruktion eines Produkts aus vier Hauptphasen besteht [76]. Zur Auswahl einer passenden Lösung der geeignetsten Verfahren wurden folgende Schritte unternommen (Abbildung 3).

In der ersten Phase des PEP wird die Aufgabenstellung geklärt. Hier wurden die Anforderungen an das zu entwickelnde nichtchemische Verfahren in einer Liste gesammelt. Die Anforderungen betreffen im Kern die zu erhaltende, aus Sicherheitsgründen zu schonende Infrastruktur, die unvermeidbaren aber minimal zu haltenden Einflüsse auf die Umwelt (Tiere, Energie, Lärm, Mensch, Luft, Boden, Wasser etc.) und die Vegetation, die zielgerecht und angemessen zu kontrollieren, d. h. in Wachstum und Ausbreitung zu begrenzen ist.

In der Phase II des PEP, welche die Suche nach Lösungen enthält, folgt das Konzipieren. Hier wurden als Lösungen die nichtchemischen Verfahren untersucht, die im Gleisbereich einsetzbar sind und mittels der Anforderungsliste bewertet. Da nicht alle Anforderungen für die Verfahrensauswahl gleich entscheidend sind, fand eine Gewichtung der Anforderungen statt. Ein Bewertungsmaßstab wurde für jedes Kriterium gesetzt und mit einer Bepunktung versehen. Da die Informationen der Literatur Inkonsistenzen zeigten, wurden bei einigen der nichtchemischen Verfahren zusätzlich orientierende Versuche und ebenso ein Streckenmonitoring zum Verständnis der kontrollrelevanten Wuchsaspekte der Vegetation durchgeführt. Zusätzlich wurde die Bewertung in „Best Case“ und „Worst Case“ aufgeteilt, um die Varianz der verfügbaren Daten besser abzubilden. Daraus resultierten zwei Rankings, die zur Auswahl der am besten geeigneten Verfahren dienten.



Abbildung 3: Vorgehen des allgemeinen PEP zur Auswahl der geeignetsten Verfahren.

5.2 Anforderungen an die Vegetationskontrolle im Gleisbereich

Durch die Analyse der Wirkungsgrundlagen, Verfahren und Einsatzbedingungen der bisherigen Vegetationskontrolle und die Integration neu aufkommender äußerer Ansprüche wurden Anforderungen und Erwartungen an zukünftig einsetzbare, nichtchemische Alternativverfahren identifiziert.

Zur ergebnisoffenen Beschreibung der Anforderungen ist es dabei notwendig, sowohl den Gleisoberbau mit der Infrastruktur als auch die dort anzutreffende Vegetation funktional zu beschreiben. Aus dieser Beschreibung können dann Anforderungen abgeleitet werden, die nicht nur die einzelnen Funktionalitäten der chemischen Vegetationskontrolle ersetzen, sondern für sich stehende optimierte Bewertungskriterien festlegen. Dies ist notwendig, da die aktuelle chemische Vegetationskontrolle auch nur eine pragmatische Lösung auf der Basis vorhandener Technologie und Wirkstoffe

darstellt und der Schutz der Eisenbahninfrastruktur bei der Suche nach Alternativen bisher kaum beachtet wurde.

5.2.1 Ermittlung der Anforderungen

Die Zusammenstellung und Analyse von Anforderungen folgen einem strukturierten Vorgehen. Zunächst wurden die geäußerten Anforderungen ermittelt, die die Rahmenbedingungen und die Funktion von Vegetationskontrollverfahren im Gleis beschreiben. Dazu gehören Vorgaben zur im AEG geforderten Aufrechterhaltung der sicheren Betriebsfähigkeit [2], wie die Erhaltung der Stabilität und Elastizität des Schotterbettes [24]. Generell ist zu erkennen, dass der Eintrag und die Bildung von Pflanzenmaterial im Schotterbett minimiert werden sollen. Dies betrifft zuerst Wurzeln und Rhizome, aber weiterhin auch Sprosse, Blätter und verholzte Pflanzenteile, die am Ende ihres Lebenszyklus auf dem Schotter liegen bleiben. Daraus ergeben sich die folgenden konkreten Anforderungen:

- hohe Wirksamkeit gegenüber Spross/Blättern an der Oberfläche
- hohe Wirksamkeit gegenüber Wurzeln und Rhizomen
- hohe Wirksamkeit gegenüber verholzenden Pflanzenteilen

Weitere geäußerte Anforderungen zur Betriebssicherheit sind die Sicherung der Traktion durch Verhinderung von Schmierfilmen sowie die störungsfreie Funktion von mechanisch arbeitenden Anlagen. Aus diesen Anforderungen leitet sich ab, dass die Verfahren auch gegen größere Pflanzen (ca. 20 bis 30 cm) wirken müssen. Da die Behandlung aus logistischen Gründen nur selten erfolgen soll, wurden die Kontrollmechanismen für unterschiedliche Pflanzenstadien separat definiert und damit weitere Anforderungen zur Wirksamkeit des nichtchemischen Verfahrens festgelegt:

- hohe Wirksamkeit des Verfahrens auch auf eine größere Wuchshöhe der Pflanzen (ca. 20 bis 30 cm)
- hohe Wirksamkeit gegenüber Samen
- effektives Abtöten der oberirdischen Pflanzenteile durch wiederholte Behandlungen, um Rhizome und Wurzeln zu schwächen bzw. auszuhungern

Parallel zur Wirksamkeit gegenüber Pflanzen wird auch der notwendige Schutz der Bahninfrastruktur analysiert. So wurden die Grenzen der thermischen, mechanischen und elektrischen Belastungen der Komponenten untersucht. Die baulichen Eisenbahnkomponenten wie Schienen, Schwellen, Weichen und Kreuzungen sind in mehreren Abmessungen, Formen und Materialien zu finden, deshalb wurden sie in einer Einzelkategorie betrachtet. Befestigungselemente, Kanäle etc. wurden unter der Kategorie „bauliche Komponenten“ angeordnet. Signal-, Sicherungs- und Telekommunikationstechnik werden nach den gleichen Standards gebaut und geprüft. Daher sind ihre technischen Eigenschaften ähnlich und wurden zusammen bewertet. So lauten die Anforderungen zur Eisenbahninfrastruktur:

- Einsatz nahe an den Schienen
- Einsatz auf Schwellen

- Anwendung auf Weichen und Kreuzungen
- Anwendung auf baulichen Komponenten
- Anwendung auf/an Signal-, Sicherungs- und Telekommunikationstechnik
- Erfüllung der allgemeinen Vorgaben zur EMV

Weitere äußere Anforderungen sind die Berücksichtigung von umwelt-, natur- und artenschutzrechtlichen Vorgaben. Hier wurden aus den entsprechenden Verordnungen und Gesetzen die möglichen Anforderungen zusammengestellt, die für den Einsatz der Alternativverfahren relevant sind:

- bevorzugter Einsatz von umweltfreundlichen oder nicht persistenten Betriebsstoffen zur Minimierung von unerwünschten Umweltauswirkungen
- Minimierung der Emissionen ins Wasser
- Minimierung der Emissionen in den Boden
- Minimierung der Emissionen in die Luft
- Minimierung der Risikopotentiale für die Tierwelt, insbesondere von geschützten Arten

Um die Aufgabe weiter zu konkretisieren, wurden die Anforderungen mithilfe von Merkmalslisten erweitert. So werden Punkte vorgestellt, die durch Assoziationen relevante Anforderungen erkennen lassen. Übliche Methoden sind die Hauptmerkmalliste und die Szenariotechnik [76]. Die Hauptmerkmalliste enthält Begriffe hauptsächlich zu technischen Eigenschaften, während die Szenariotechnik die Lebensphasen des Produkts durchgeht. Für jeden Aspekt wird analysiert, ob daraus Restriktionen oder Erwartungen an nichtchemische Verfahren entstehen.

Aus der Hauptmerkmalsliste ergaben sich die folgenden Anforderungen:

- Geometrie: Behandlung der Bereiche A bis D vom Fahrzeug aus möglich
- Energie: Geringer Energiebedarf bei der Herstellung der Betriebsmittel und Ausbringung
- Stoff: Geringer Verbrauch von Betriebsmitteln (Wasser etc.)
- Mechanik und Logistik: Hohe Arbeitsgeschwindigkeit
- Sicherheit: Minimierung des Risikopotentials für den Menschen durch die angewendeten oder bei der Anwendung direkt und indirekt freigesetzten Stoffe
- Sicherheit: Geringer Aufwand der Schutzmaßnahmen für das Betriebspersonal sowie für Dritte zum Schutz von Risiken durch besondere nichtstoffliche Gefahren
- Einsatz: Keine Geräuschentwicklung/Schallemissionen, die über die erlaubten Emissionen von dort zugelassenen Eisenbahnfahrzeugen wesentlich hinausgehen
- Logistik: Niedrige Anwendungsfrequenzen
- Planung: Hoher Reifegrad der Technologie
- Nachhaltigkeit: Hohes Umstellungspotential auf regenerative Energieträger

Mithilfe der Szenariotechnik wurden die folgenden Anforderungen identifiziert:

- Zulassung: Geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit
- Betrieb: Einsatz an Bahnübergängen, Anwendung in Bahnsteigbereichen
- Betrieb: Hohe Wirksamkeit des Verfahrens unabhängig von Wetterlagen und Jahreszeiten

5.2.2 Anforderungsliste eines nichtchemischen Verfahrens

Die ermittelten Anforderungen wurden nach Funktionalität (Fu), Sicherheit (Si), Umwelt (Um), Wirtschaftlichkeit (Ko) und Planung (Pl) klassifiziert. Zur Funktionalität gehören die Aspekte der Wirksamkeit und Technik. Unter Sicherheit fällt die Minimierung des Risikos für die Bahninfrastruktur und den Menschen, sowohl die Mitarbeitende als auch Dritte, die sich in der Nähe befinden. Umweltaspekte bezeichnen die Interaktion der Methode mit Boden, Luft, Gewässer, angrenzender Flora und Fauna. Unter Wirtschaftlichkeit werden Kriterien berücksichtigt, die die Kosten der Anwendung direkt beeinflussen, und unter Planung die organisatorischen Rahmenbedingungen. Die zusammengestellten Anforderungen sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 2: Anforderungsliste eines nichtchemischen Verfahrens – Teil I.

NR.	ANFORDERUNG QUALITATIV
FU01	Hohe Wirksamkeit gegenüber Spross/Blätter an der Oberfläche
FU02	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens auch auf größere Wuchshöhen der Pflanzen (ca. 20 – 30 cm)
FU03	Effektives Abtöten der oberirdischen Pflanzenteile durch wiederholte Behandlungen, um Rhizome und Wurzeln zu schwächen bzw. auszuhungern
FU04	Hohe Wirksamkeit gegenüber verholzten Pflanzenteilen an der Oberfläche
FU05	Hohe Wirksamkeit gegenüber Wurzeln und Rhizomen
FU06	Hohe Wirksamkeit gegenüber Samen
FU07	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens unabhängig von Wetterlagen und Jahreszeiten
FU08	Hohe Arbeitsgeschwindigkeit
FU09	Eindämmung/Entfernung von Vegetation, die die Betriebsfähigkeit der Eisenbahninfrastruktur beeinträchtigen: Vegetation, ... die einen Schmierfilm auf den Gleisen ausbildet. ... die an Sperr-, Rangier- und Weichensignale wächst. ... die die Funktion von mechanisch arbeitenden Anlagen stört.
FU10	Eindämmung/Entfernung von Vegetation, die die bedingten Störeffekte im Gleisbett erzeugt: Gefährdung der Stabilität und Elastizität, Einschränkung des elektrischen Widerstands (Bettungswiderstand).
FU11	Behandlung der Bereiche A – D vom Fahrzeug aus möglich
KO01	Niedrige Anwendungsfrequenz
KO02	Geringer Energiebedarf für das Verfahren bei benötigter Anwendungsfrequenz pro Jahr
KO03	Geringer Verbrauch von Betriebsmitteln (Wasser etc.)
PL01	Geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit
PL02	Hoher Reifegrad der Technologie für Großgeräte im Einsatzprofil Bahn zum Zeitpunkt der Technologieauswahl

NR.	ANFORDERUNG QUALITATIV
SI01	Keine Geräuschentwicklung/Schallemissionen, die über die erlaubten Emissionen von dort zugelassenen Eisenbahnfahrzeugen wesentlich hinausgehen
SI02	Minimierung des Risikopotentials für den Menschen durch die angewendeten oder bei der Anwendung direkt und indirekt freigesetzten Stoffe
SI03	Geringer Aufwand der Schutzmaßnahmen für das Betriebspersonal sowie für Dritte zum Schutz von Risiken durch besondere nichtstoffliche Gefahren

Tabelle 3: Anforderungsliste eines nichtchemischen Verfahrens – Teil II.

NR.	ANFORDERUNG QUALITATIV
SI04	Keine Gefährdung der Stabilität und Elastizität des Schotterbettes durch das Verfahren
SI05	Anwendung in Bahnsteigbereichen
SI06	Einsatz an Bahnübergängen
SI07	Einsatz nahe an den Schienen
SI08	Einsatz auf Schwellen
SI09	Anwendung auf Weichen und Kreuzungen
SI10	Anwendung auf baulichen Komponenten. *Schienen, Schwellen, Weichen und Kreuzungen hier nicht berücksichtigt
SI11	Anwendung auf/an Signal-, Sicherungs- und Telekommunikationstechnik
SI12	Erfüllung der allgemeinen Vorgaben zur EMV
SI13	Verhinderung durch selbst erzeugte langfristige Störeffekte auf den elektrischen Widerstand im Gleisbett
UM01	Bevorzugter Einsatz von umweltfreundlichen oder nicht persistenten Betriebsstoffen zur Minimierung von unerwünschten Umweltauswirkungen
UM02	Minimierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächengewässer
UM03	Minimierung der Emissionen in den Boden
UM04	Minimierung der Emissionen in die Luft
UM05	Minimierung spezifischer Risikopotentiale für die Tierwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen oder Nebenwirkungen der Verfahren
UM06	Hohes Umstellungspotential auf regenerative Energieträger

5.3 Bewertung der nichtchemischen Verfahren

Aus der Liste der ermittelten Anforderungen, wurden diejenigen selektiert, die für die Entscheidung der geeignetsten Alternativverfahren aufgrund einer möglichen Vergleichbarkeit genutzt werden konnten. Die potenziellen Effekte der Alternativverfahren auf die Eisenbahnkomponenten sind nicht explizit getestet, da viele der Einwirkungen bisher nicht vorkamen und sich dementsprechend auch nicht in den Prüfnormen wiederfinden. Deswegen wurde der Schwerpunkt für die Auswahl der geeigneten Verfahren auf die allgemeinen Anforderungen in den Bereichen Wirksamkeit, Technik/Logistik und Risiken für Mensch und Umwelt gelegt, die insgesamt 22 Kriterien ausmachen.

5.3.1 Gewichtung der Anforderungen eines nichtchemischen Verfahrens

Mithilfe des paarweisen Vergleichs nach Pahl/Beitz [76] wurden die Bewertungskriterien priorisiert. Es handelt sich um eine Matrix, in der die Anforderungen einzeln miteinander verglichen werden. Dabei wird jeweils das wichtigste Kriterium eingetragen. Je höher die Anzahl der Nennungen ist, desto höher ist die Gewichtung der Anforderung. Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die 22 Anforderungen zur Verfahrensauswahl nach Wichtigkeit geordnet. Die Kriterien wurden von den Projektmitarbeitenden nach der Untersuchung der Ausgangssituation und Gesprächen mit Fachleuten des Bereichs Vegetationskontrolle gewichtet.

Tabelle 4: Gewichtung der einzelnen Kriterien zur Verfahrensauswahl – Teil I.

Nr.	Anforderung	Gewichtung
Um02	Minimierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächengewässer	0,87
Si03	Einfacher Schutz des Betriebspersonals sowie von Dritten vor nicht stofflichen Gefahren (Lärmschutz ausgenommen)	0,82
Si02	Minimierung des Risikopotentials für den Mensch durch die angewendeten oder bei der Anwendung direkt und indirekt freigesetzten Stoffe	0,80
Um04	Minimierung der Emissionen in die Luft	0,73
Um03	Minimierung der Emissionen in den Boden	0,72
Fu03	Effektives Abtöten der oberirdischen Pflanzenteile durch wiederholte Behandlung, um Rhizome und Wurzeln zu schwächen	0,63
Um01	Bevorzugter Einsatz von nicht umweltrelevanten oder leicht biologisch abbaubaren Betriebsstoffen zur Minimierung von unerwünschten Umweltwirkungen	0,61
Um05	Minimierung des Risikopotentials für im Gleis/Randbereich lebende Fauna	0,56
Fu01	Hohe Wirksamkeit gegenüber Spross/Blätter an der Oberfläche	0,56

Nr.	Anforderung	Gewichtung
Fu02	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens auch auf größere Wuchshöhen der Pflanzen	0,52
Fu05	Hohe Wirksamkeit gegenüber Wurzeln und Rhizome	0,52
Si01	Keine Geräuschentwicklung/Schallemission, die über die erlaubten Emissionen dort zugelassener Eisenbahnfahrzeuge wesentlich hinausgehen	0,51
Fu08	Hohe Arbeitsgeschwindigkeit	0,51
Um06	Hohes Umstellungspotential auf regenerative Energieträger	0,49
Ko01	Niedrige Anwendungsfrequenz	0,45
Ko02	Geringer Energiebedarf für das Verfahren bei benötigter Anwendungsfrequenz pro Jahr	0,42

Tabelle 5: Gewichtung der einzelnen Kriterien zur Verfahrensauswahl – Teil II.

Nr.	Anforderung	Gewichtung
Pl02	Hoher Reifegrad der Technologie für Großgeräte im Einsatzprofil Bahn zum Zeitpunkt der Technologieauswahl	0,33
Fu06	Hohe Wirksamkeit gegenüber Samen	0,31
Ko03	Geringer Verbrauch von Betriebsmitteln (Wasser etc.)	0,24
Fu04	Hohe Wirksamkeit gegenüber verholzten Pflanzenteilen an der Oberfläche	0,23
Fu07	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens unabhängig von Wetterlagen und Jahreszeiten	0,20
Pl01	Geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit	0,04

5.3.2 Skalen zur Bewertung der Anforderungen (Bepunktung)

Um eine Bewertung der nichtchemischen Verfahren zu ermöglichen, wurde jeweils die Anforderung in ein Bewertungskriterium umformuliert, welches eine skalierte Klassifizierung erlaubt. Diese Klassifizierung ist in vielen Fällen rein methodisch und nicht auf die Eisenbahnanwendung konkret bezogen, da sehr viele Daten nicht aus dem Eisenbahnbereich stammen. Zur Punkteverteilung zwischen 0 (Kriterium nicht erfüllt) und 1 (Kriterium erfüllt) wurden jeweils konkrete Zwischenstufen beschrieben. Je nach Kriterium und vorhandenen Datendichte wurden 1 bis 3 Zwischenstufen genutzt. In manchen Fällen wurde eine feste Größe für die vollständige Erfüllung gesetzt (Benchmark).

Tabelle 6 zeigt als Beispiel die Punkteverteilung der Anforderung „Fu01 – Hohe Wirksamkeit gegenüber Spross und Blättern. Diese dafür benötigten Begrifflichkeiten, Definitionen und Erläuterungen wurden jeweils anforderungsbezogen dargestellt. Die tabellarischen Darstellungen finden sich detailliert im Anhang 5.

Tabelle 6: Beispiel einer Bewertungsskala für eine Anforderung.

Anforderung	Hohe Wirksamkeit gegenüber Spross/Blätter an der Oberfläche Nr. Fu01
Punkteverteilung	Die Potentialbewertung bezieht sich immer auf die einmalige Behandlung der Pflanzen und nicht auf die Möglichkeit des Wiederaufwuchses Aufwuchs stirbt ab – 1 P Aufwuchs größtenteils abgestorben oder zerstört – 0,75 P Aufwuchs im Wachstum zurück – 0,5 P Aufwuchs kaum verändert – 0,25 P Aufwuchs unverändert – 0 P

5.3.3 Bewertungsergebnisse und Auswahl der geeigneten Verfahren („Best/Worst Case“)

Für die im Projekt betrachteten Alternativverfahren wurde für die einzelnen Anforderungen der Grad der Erfüllung bewertet und entsprechend den angepassten Skalen die Punkte vergeben. Es wurden insgesamt 22 Bewertungskriterien für die Erstbewertung genutzt, die sich in die Hauptaspekte Wirksamkeit, Technik-Logistik und Mensch-Umwelt-Risiken gliedern lassen. Daraus ergab sich eine Matrix mit 18 Verfahren x 22 Anforderungen = 396 Bewertungen. Bei der Ermittlung der Daten gab es in einigen Fällen Unterschiede in den Literaturangaben. Aufgrund der Abweichungen der Daten wurden für die Auswertung der Anforderungen zwei Bewertungsschemen angewendet. Zum einen der „Best Case“, in dem aus den Daten die besten Effekte und Ergebnisse der Verfahren für die Berechnung der Punkte genutzt werden. Zum anderen der „Worst Case“, bei dem die schlechteren Angaben der Literatur verwendet werden. Durch die „Best/Worst Case“-Betrachtung verdoppeln sich die Einzelbewertungen noch einmal auf 792. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse beider Bewertungen.

Tabelle 7: Ergebnisse der Bewertung der nichtchemischen Verfahren.

Best Case			Worst Case		
Rang	Normierte Punktzahl	Rangfolge	Rang	Normierte Punktzahl	Rangfolge
1	100,0	MJ	1	100,0	Strom
2	91,3	Strom	2	95,0	MJ
3	89,2	Handjäten	3	94,8	Handjäten
4	86,5	Druckwasser	4	93,1	Druckwasser

Best Case			Worst Case		
5	86,2	Heißschaum	5	88,5	Laser (schneiden)
6	85,7	Bürsten	6	87,9	Bürsten
7	84,6	Heißwasser	7	87,4	Mähen
8	82,7	Mähen	8	85,2	Absaugen
9	80,5	Laser (schneiden)	9	84,7	Heißschaum
10	75,8	Laser (überhitzen)	10	83,3	Laser (überhitzen)
11	72,6	Heißluft	11	81,6	Heißwasser
12	71,1	Absaugen	12	76,0	UV-C
13	70,8	UV-C	13	72,0	Heißluft
14	69,6	Dampf	14	70,0	Frost
15	66,3	Infrarot	15	67,0	Infrarot
16	61,2	Frost	16	66,0	Dampf
17	60,4	Mikrowellen	17	56,6	Mikrowellen
18	52,3	Abflammen	18	49,9	Abflammen

In Anbetracht der Größe der Matrix wurden die Zwischenergebnisse der Bewertung im Detail im Anhang 6 tabellarisch geordnet nach Anforderungen dargestellt. Zusätzlich wurde eine Erstbetrachtung der Risiken für die Tierwelt ermittelt, sie befindet sich im Anhang 8. Die aufsummierten Ergebnisse der „Best Case“-Bewertungen zeigen in der Spitzengruppe MJ, Handjäten, Strom, Druckwasser und Bürsten.

In den Spitzengruppen befinden sich Strom, Handjäten, MJ und Druckwasser. Die unsicherste Bewertung (große Differenz zwischen „Best Case“ und „Worst Case“) wurden für Mikrowellen, Heißwasser und Dampf ermittelt. Damit stellte sich interessanterweise heraus, dass eine unsichere Bewertung nicht nur durch eine schlechte Datenlage wie z. B. bei dem Mikrowellenverfahren entstand, sondern genauso bei gut untersuchten Verfahren, wenn die Datenlage heterogen und widersprüchlich war, wie dies beim Heißwasserverfahren der Fall war. Dies begründet z. B. auch die Durchführung der eigenen Versuche mit Heißwasser.

Generell wurde festgestellt, dass alle mit eigenen Versuchen zur Verbesserung der Datenlage bearbeiteten Verfahren (Frost, UV-C, Heißschaum, Heißwasser) sich auch bei der Unsicherheit nach „Worst Case“-Bewertung in der unsichereren Hälfte der Verfahrensbewertungen bewegten. Dies bestätigt die Sinnhaftigkeit des generellen Vorgehens, bei dem unsichere Datenlagen durch eigene Versuche verbessert werden, um Verfahren eine Chance zu geben, sich durch bessere Daten zu qualifizieren.

Zusätzlich lassen sich für die weitere Verfahrensauswahl folgende Randbedingungen festlegen:

- Handjäten ist ein Referenzverfahren, welches keine technologische Entwicklung hat.
- Bürsten und Mähen sind von der reinen Effizienzbewertung her nur in Kombinationen mit anderen Verfahren sinnvoll. Sie können deshalb nicht als Einzelverfahren ausgewählt werden und werden ggf. später zur Effizienzsteigerung eingesetzt.
- Heißwasser ist wegen seines hohen Stoff- und Energieeinsatzes auf lange Sicht nicht ressourcenschonend.

Als Schlussfolgerung daraus sind MJ, Strom und Druckwasser die Verfahren in der engsten Auswahl.

6 Design und Konstruktion des Versuchssystems

6.1 Versuchsträger

Um die ausgewählten Alternativverfahren im Gleis testen zu können, wurde ein Versuchsträger entworfen, der zum einen realistische und praxisnahe Tests der Verfahren zulässt und zum anderen den Anforderungen an die Nutzung im Bahnbereich angepasst ist. Im Folgenden wird zunächst der Versuchsträger vorgestellt und im Anschluss auf Details der Konstruktion eingegangen. Nähere Informationen zu den Anforderungen an das Fahrzeug mit technischen Details finden sich im Anhang 7.

Das Gesamtkonzept für den Versuchsträger besteht aus einem Zweigegefahrzeug als Zugfahrzeug (Typ Unimog U 406 des Herstellers Daimler-Benz) und einem gezogenen Trägermodul. Das Zugfahrzeug dient dabei grundlegend der Bereitstellung der nötigen Energie zum Betrieb der Verfahren (Generatoren) sowie dem Speichern von Betriebsstoffen (Wasser). Das Trägermodul enthält die Applikationsmodule für das MJ und das El (Abbildung 4).

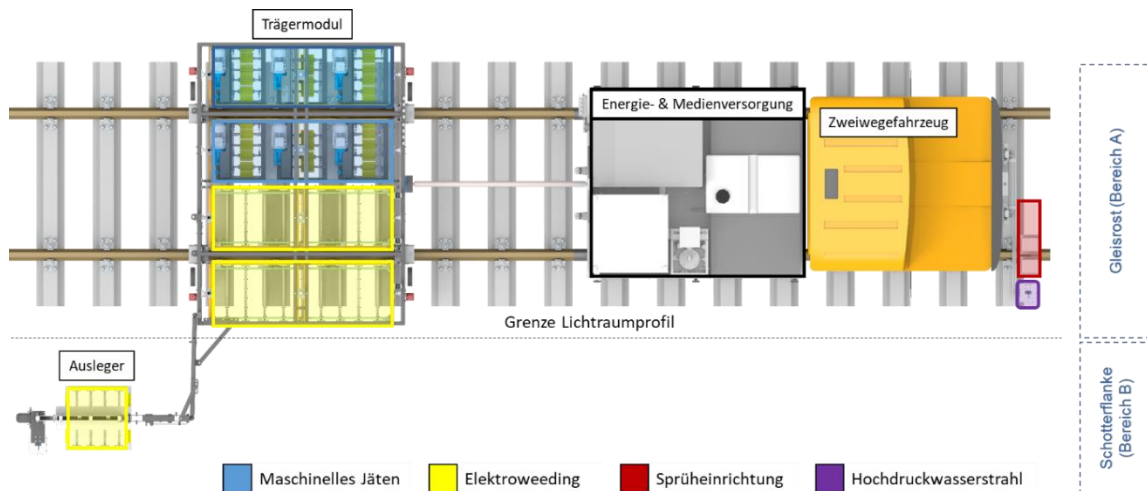


Abbildung 4: Versuchsträger: Fahrzeug und Trägermodul mit den drei Applikationsmodulen in halbsseitiger Anordnung und Ausleger in Schotterflanke.

Die Verfahren auf dem Trägermodul sind jeweils halbseitig angeordnet, können also immer eine Hälfte der Streckenbreite behandeln. Dadurch können entweder die einzelnen Verfahren halbseitig gegen eine unbehandelte Kontrollfläche oder im Vergleich zum jeweils anderen Verfahren eingesetzt werden. Weitere Vorteile der halbseitigen Behandlung werden im Versuchskonzept in Abschnitt 7.1 aufgezeigt.

Durch Drehen der Versuchsplattform an der Eingleisstelle und Fahrt in die Gegenrichtung ist es möglich, die doppelte Arbeitsbreite mit dem jeweilig vorhandenen Verfahren zu behandeln und so das

gleiche Verfahren mit unterschiedlichen Parametern (z. B. andere Geschwindigkeit oder Dosis) zu vergleichen. Zur Behandlung der Bereiche seitlich des Gleisrosts mit dem El kann ein Ausleger ausgefahren werden, der die Vegetation in diesen Bereichen erfasst.

Der Weg von der Auswahl der Verfahren auf Basis von Vorversuchen und Werten aus der Literatur hin zu einem einsetzbaren Versuchsträger enthielt eine genaue Spezifikation der Anforderungen an das technische System. Dazu wurden die anhand der Bewertung ausgewählten Verfahren zur Vegetationskontrolle mithilfe des systematischen Vorgehens aus VDI 2221 [77] ausgearbeitet und in ein technisches System zur Überprüfung der Verfahren weiterentwickelt.

Aufbauend aus den in Abschnitt 5.2 genannten lösungsneutralen Anforderungen an die Wirksamkeit und die Eigenschaften der Verfahren wurden für die Konstruktion des Versuchsträgers weitere technische Anforderungen gebraucht.

Die technischen Anforderungen an das Trägermodul stammen aus den folgenden Kategorien:

- Grundanforderungen für den sicheren Betrieb im Bahnbereich
- funktionale Anforderungen für das Betreiben und Testen der drei Alternativverfahren
- Anforderungen an die Versuchslogistik
- Anforderungen an die Zulassung des Fahrzeugs
- Anforderungen an die Arbeitssicherheit

Zu den Grundanforderungen gehörte beispielsweise das Einhalten der Fahrzeugbegrenzungslinie. Hierfür wurde die in Deutschland und weiten Teilen Europas gültige Bezugslinie G1 ausgewählt [3]. Die funktionalen Anforderungen ergaben sich aus den Eigenschaften der drei ausgewählten Verfahren, wie z. B. die Führung der Applikationsmodule oder die Anordnung der Applikatoren.

Hinsichtlich der Versuchslogistik musste der Versuchsplan mit einbezogen werden. Das bedeutet, dass ein ausreichender Vorrat an Betriebsstoffen für die Versuchsdurchführung gewährleistet sein musste. Außerdem ist das Trägermodul so konzipiert, dass es auf einem herkömmlichen Lastkraftwagen (LKW) transportiert werden kann.

Als Anforderungen an die Zulassung wurden Kriterien für eine Zulassung nach der Verordnung über den Bau und Betrieb von Anschlussbahnen (BOA) vorgesehen, da diese in Absprache mit den Betreibern der VS für den geplanten Versuchsbetrieb als ausreichend betrachtet wurden.

Zur Gewährleistung der Sicherheit des Personals während des Versuchsbetriebs wurden Gefahren identifiziert und Vorkehrungen getroffen, um diese zu minimieren.

Eine ausführliche Liste der technischen Anforderungen findet sich im Anhang 7.

6.2 Trägermodul

Das Trägermodul stellt die Schnittstelle zwischen Zugfahrzeug und den eigentlichen Verfahren zur Vegetationskontrolle dar. Es erfüllt die Funktion der Führung der Applikatoren im Gleis, ermöglicht ein Anheben und Absenken der Applikationsmodule und dient der Unterbringung von Versorgungsleitungen. Abbildung 5 zeigt das Trägermodul im realen Aufbau.

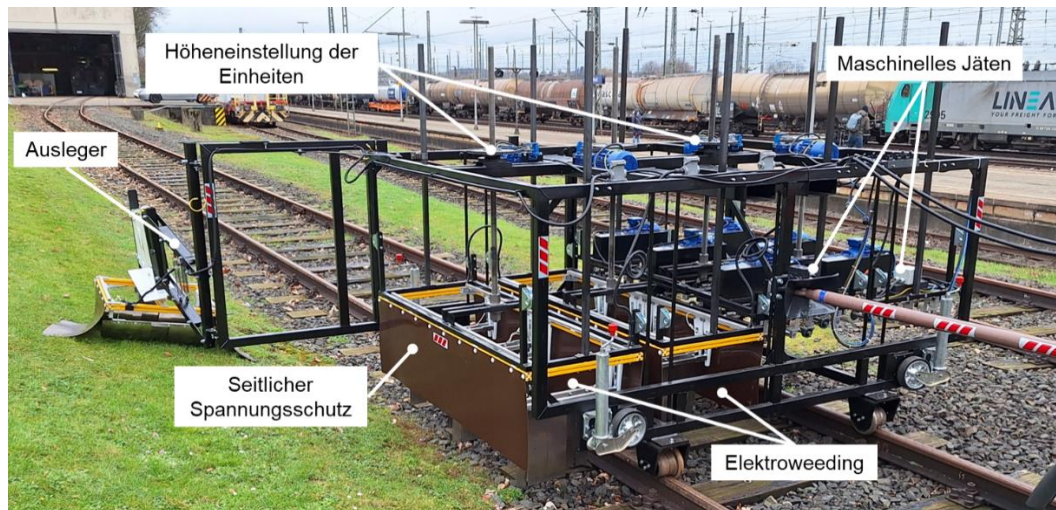


Abbildung 5: Ansicht des Trägermoduls mit Beschriftung der Komponenten.

Das Trägermodul wurde so konzipiert, dass es ausreichend Platz für die drei ausgewählten Verfahren (El, MJ und Druckwasser) bietet, um eine effektive Vegetationskontrolle hinsichtlich Kontaktzeit und Dosis gewährleisten zu können. Dabei sind die Applikationsmodule für das El sowie für das MJ in jeweils zwei halbseitig angeordneten Heberahmen montiert, um die Vegetation innerhalb der beiden Schienen sowie neben der Schiene behandeln zu können. Diese Rahmen können über einen Spindeltrieb angehoben und abgesenkt werden, sodass die Verfahren gezielt mit der Vegetation in Kontakt gebracht werden können.

Die Düse des Druckwasserverfahrens ist an der Front des Zugfahrzeugs befestigt (Abbildung 6), da hier eine bessere optische Kontrolle des Verfahrens während des Versuchsbetriebs möglich ist. Ein Anbringen der Düse am Trägermodul ist jedoch auch möglich. Zusätzlich befindet sich dort auch die Ausbringungseinheit für die Kontaktflüssigkeit (Salzlösung) für das El.

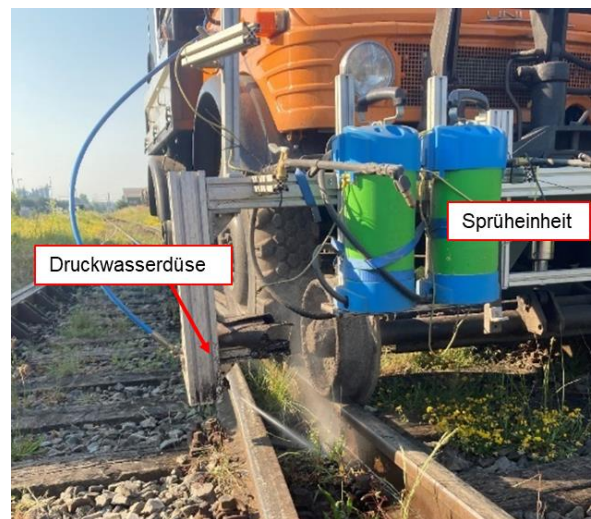


Abbildung 6: Hochdruckwasserstrahldüse und Ausbringungseinheit für die Kontaktflüssigkeit an der Fahrzeugfront.

6.2.1 Arbeitsprinzip und Eigenschaften des maschinellen Jätens

Im Folgenden wird näher auf die Einzelheiten der drei Applikationsmodule und die verwendete Ausprägung der Verfahren eingegangen. Die innerhalb des Trägermoduls befindlichen Applikationsmodule haben ebenfalls einen systematischen Konstruktionsprozess von Konzept über einzelne Vorversuche bis hin zur fertigen Konstruktion durchlaufen.

Der Begriff MJ umfasst alle Arten von automatisierten Mechanismen, die das Jäten ermöglichen. Für den Versuchsträger wurde ein System aus gegenläufig drehenden Zahnrädern gewählt. Die Zahnräder stehen dabei im gegenseitigen Kontakt und ziehen die ungewünschten Pflanzen aus dem Untergrund bzw. trennen diese ab (Abbildung 7).

Der verwendete Mechanismus hat den Vorteil gegenüber anderen Jätsystemen (z. B. robotische Greifer), dass durch kontinuierliche und flächendeckende Behandlung eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit ermöglicht wird. Darüber hinaus ist der Aufbau der Maschine robust und die Steuerung unkompliziert.

Um die Pflanzen mit zwei Rollen auszureißen oder abzutrennen, muss es in die Kontaktzone zwischen den zwei horizontal nebeneinander angeordneten Rollen gelangen, um dort mit genügend Kraft nach oben herausgezogen zu werden. Wie in Abbildung 7 gezeigt, ist der Punkt, an dem die Rollen sich berühren, der Greifpunkt der Pflanze.

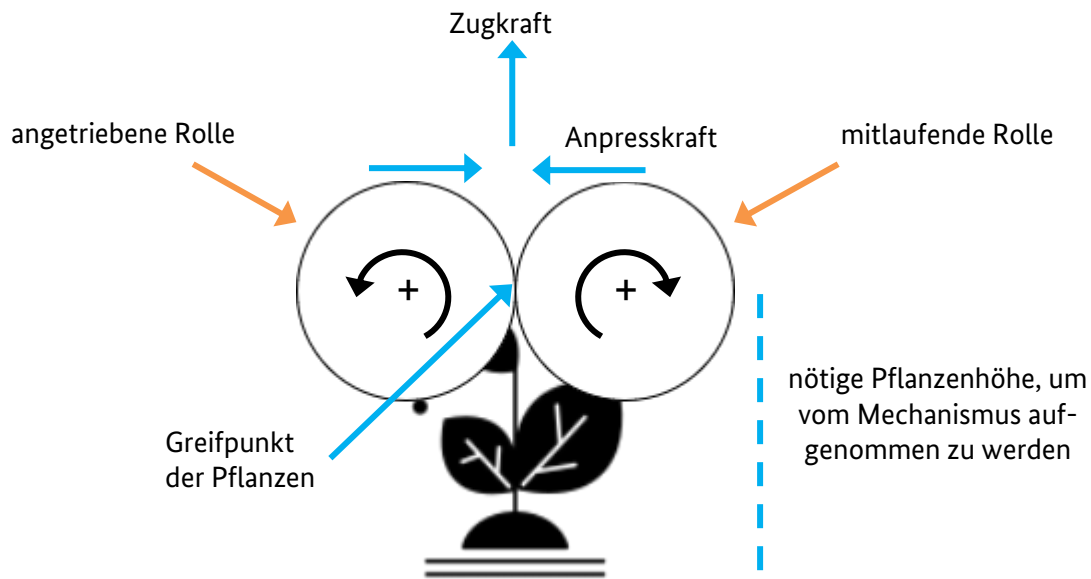


Abbildung 7: Darstellung des Arbeitsprinzips des maschinellen Jätens.

Je kleiner der Rollendurchmesser ist, desto größer ist die Möglichkeit, den Greifpunkt näher Richtung Boden zu verschieben und die Pflanzensprosse tiefer zu erfassen. Deshalb ist ein kleinerer Rollendurchmesser von Vorteil. Allerdings wird der Rollendurchmesser nach unten durch die Größe der Lagerung der Antriebswellen sowie der nötigen Anzahl an Wellen begrenzt.

Da sich die Zugkraft durch kleinere Rollen erhöht, ist die Durchmesser verringering auch zur Krafterhöhung vorteilhaft. Laut Versuchen mit verschiedenen Pflanzenarten und -größen [78] liegt die benötigte Zugkraft zwischen ca. 20 und 340 N.

Die Zugkraft wird über den Reibkontakt zwischen den Flächen erzeugt. Befindet sich eine dicke Pflanze in der Kontaktstelle, werden die Rollen getrennt und die Zugkraft ausschließlich über die Pflanze aufgebaut. Wenn die Reibung zwischen Pflanze und Rollen nicht ausreichend zum Entwurzeln ist, verbleibt diese im Boden. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Anpresskraft = Normalkraft benötigt, welche die Ausreißkraft unterstützt. Eine starre Verbindung zur Erhöhung der Presskraft kann genug Kraft aufbauen, allerdings behindert sie die Aufnahme und Transport der Pflanzen in den Mechanismus. Deshalb ist hier die Nutzung einer flexiblen Verbindung über eine Feder nötig.

Das vorliegende Konzept ist die Implementierung der in Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse. Hier wurden drei Zahnradpaare quer zur Fahrtrichtung nebeneinander angebracht, um eine größere Arbeitsbreite auf dem Schotterbett abzudecken. Das Konzept besteht aus den Zahnradpaaren, einer Linearführung, einem Kettengetriebe, dem Motor und einem Rahmen (Abbildung 8). Dieser Rahmen entspricht einem Jätmodul, welches später im Trägermodul mehrmals eingebaut wird.

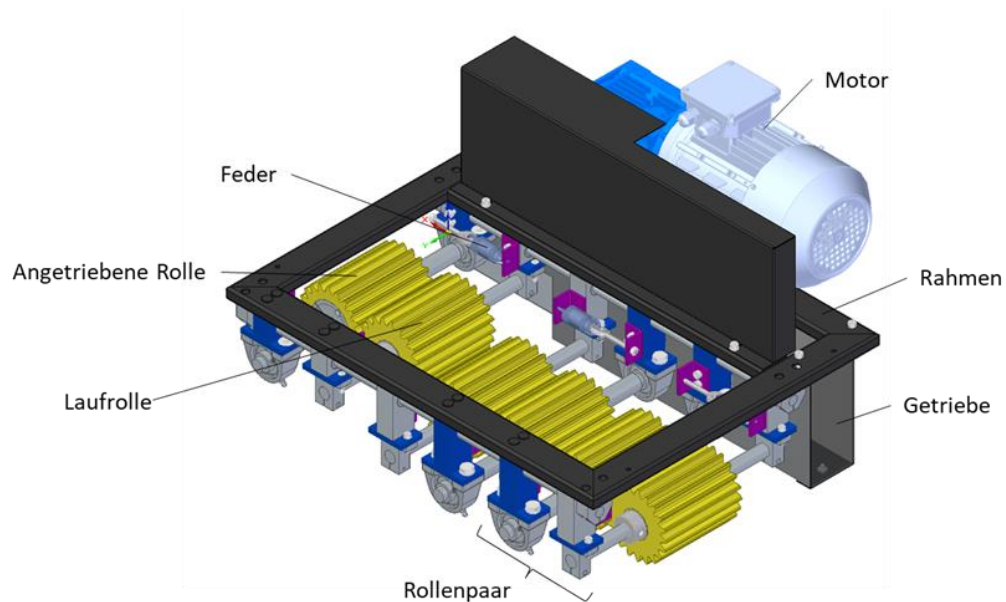


Abbildung 8: Darstellung des Ausführungskonzepts des maschinellen Jätens.

Pro Jätmodul gibt es Bereiche, in denen keine Pflanzen erfasst werden können. Daher sind für eine intensive Behandlung mehrere Jätmodule mit versetzten Zahnradpaaren hintereinander montiert. Aus diesem Grund erlaubt der Aufbau ein flexibles Positionieren der Zahnradpaare entlang der Linienführung. Für den Versuchsträger wurden drei gegeneinander versetzte Einheiten zum maschinellen Jäten vorgesehen, was mit allen Steuerungselementen zu einer benötigten Gesamtleistung von maximal 4 bis 5 kW je Applikationsmodul führt. Abbildung 9 zeigt die finale Umsetzung des Applikationsmoduls.



Abbildung 9: Applikationsmodul für das MJ.

6.2.2 Arbeitsprinzip und Eigenschaften des Druckwasser-Verfahrens

Die Anwendung von Druckwasser wird in vielen Bereichen eingesetzt und lehnt sich für die hier gewählte Ausführung an Verfahren zur Materialbearbeitung und Schienenkopfreinigung an. Generell unterscheidet sich die Verwendung von Druckwasser in der technischen Anwendung in mehrere Verfahren. Der Reinwasserstrahl (RWS) stellt die einfachste Form eines Wasserstrahls dar und auf weniger feste und weiche Werkstoffe beschränkt. Werden dem Wasserstrahl Feststoffpartikel oder abrasive Medien zugemischt, spricht man generell vom Wasser-Abrasive-Strahl. Die Trennleistung des Wasser-Abrasive-Strahls ist durch die abrasive Hauptwirkung der Strahlmittel vielfach höher, wodurch im Gegensatz zum RWS auch hochfeste Werkstoffe bearbeitet werden können.

Industriell wird die Technologie des Wasser-Abrasive-Strahls, je nach Art der Strahlerzeugung, in den Wasser-Abrasive-Injektorstrahl (WAIS) und den Wasser-Abrasive-Suspensionsstrahl (WASS) eingeteilt. Der Unterschied besteht in der Zuführung und Beschleunigung des Strahlmittels: Beim WAIS trifft der Wasserstrahl nach der Düse auf die Feststoffpartikel und beschleunigt diese schlagartig, während beim WASS die Partikel gemeinsam als Suspension mit dem Wasser in einer Düse beschleunigt werden (Abbildung 10). [79, 80]

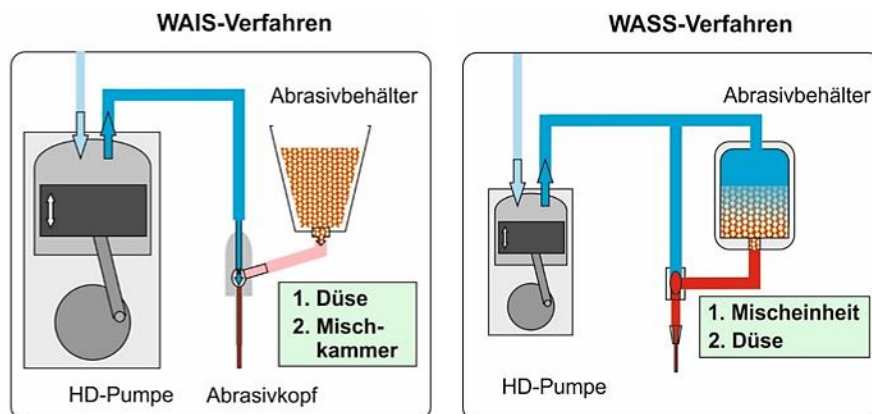


Abbildung 10: Verbreitete Varianten der Wasser-Abrasive-Strahlerzeugung: Der WAIS und der WASS [81].

Die Schneidleistung des WASS ist bei deutlich geringeren Systemdrücken jedoch um ein Vielfaches höher als beim WAIS. Durch die hohe Leistungsdichte des Suspensionsstrahls und des besseren Umsetzungsgrades während der Strahlerzeugung können die Schnittraten des WASS bei einem vergleichsweise geringen Pumpendruck von 150 MPa gegenüber dem WAIS mit einem typischen Pumpendruck von 400 MPa bereits auf das bis zu dreifache gesteigert werden.

Nachteilig steht der unterbrechungsbehaftete Einsatz des WASS der hohen Leistungsdichte gegenüber. Sobald der druckbeaufschlagte Suspensionsbehälter leergefahren wurde, muss dieser drucklos befüllt und erneut druckbeaufschlagt werden. Derartige diskontinuierliche Systeme können aufgrund ihrer kompakten Ausführung meist nur in mobilen Anwendungen wie dem Industrierückbau

oder der Kampfmittelräumung eingesetzt werden. [82, 83] Für den Versuchsbetrieb ist dieser Nachteil jedoch tolerabel.

Aus diesen Gründen wurde der WASS als geeignetes System für die geplanten Versuche im Bahnbereich festgelegt. Das System hat die folgenden Eigenschaften:

- max. Betriebsdruck: 150 MPa
- Volumen des Hochdruckbehälters: 3,7 L
- Düsendurchmesser: 0,60 mm
- max. Abrasivverbrauch: ca. 860 g/min (abhängig vom Abrasivmittel)
- max. Wasserverbrauch: 8,4 L/min
- Leistungsbedarf: 20 kW bei 150 MPa / 17 kW bei 100 MPa

Der theoretische Wasserverbrauch des Druckwasser-Verfahrens bei der maximalen Ausbringung beläuft sich bei einer 0,60 mm Düse auf ca. 8,4 L/min. Daraus ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 4 km/h eine mögliche Behandlung von ca. 4 km Gleis im Alleinbetrieb mit 500 L Wasser ohne Abschaltung, bevor der Tank aufgefüllt werden muss. Pro Füllung der Mischeinheit ist bei den oben genannten Behandlungsparametern und einem Abrasivbehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 7 kg eine für Versuchszwecke ausreichende Reichweite von etwas mehr als einen halben Kilometer zu erzielen. Der im Versuchsbetrieb ermittelte Verbrauch lag sowohl beim Wasser als auch beim Abrasivmittel deutlich unter den theoretischen Werten. Die gemessenen Werte fließen in die abschließende Effizienzbewertung mit ein. Eine weitere Reduktion des Bedarfs an Betriebsmitteln lässt sich durch die Verwendung eines schaltbaren Systems sowie die Optimierung der Parameter anhand der durchgeführten Versuche erreichen.

Durch die Nutzung eines Abrasiv-Druckwasserstrahls wird eine geringe Menge an Abrasivmittel in das Gleisbett eingetragen. Die ausgebrachte Menge wird als vergleichsweise gering eingeschätzt und durch den kleinen Korndurchmesser (0,18 bis 0,25 mm) wird ein Ausspülen begünstigt.

Bei den möglichen einsetzbaren Abrasivmitteln handelt es sich um rein mineralische Stoffe, die lokal verfügbar sind, wie Quarzsand (z. B. Bremssand), Olivin und Basalt. Auch der Einsatz von alternativen nachwachsenden Rohstoffen, beispielsweise Nussschalen und Maiskolben, wird berücksichtigt. Organisches Material ist generell möglich, aber kostenintensiver.

Für die praktische Umsetzung des ausgewählten Wasserstrahlsystems wurde die Anlage spezifisch für den Einsatz umgebaut. Das System enthält eine Düse, die an einem Halter an der Fahrzeugfront in unterschiedliche Positionen und Winkelstellungen angebracht werden kann (Abbildung 11).



Abbildung 11: Ansicht der Düse zur Anwendung des Druckwasser-Verfahrens.

6.2.3 Arbeitsprinzip und Eigenschaften des El

Das Gesamtsystem besteht auf der Leistungsebene aus einer Stromquelle für Drehstrom (2 x 10 kW ausgelegte Nutzleistung) und zwei Hochspannungseinheiten zur Erzeugung von teilgeglättetem Gleichstrom mit einer Maximalspannung von 5 500 V. Die Hochspannungseinheiten passen die abgebbare Leistung mit hoher Abtastrate dem gemessenen Widerstand an, um in einem möglichst großen Arbeitsbereich die volle Leistung abgeben zu können. Steigt der Widerstand zu stark oder sinkt er außerhalb des Vollastbereichs ab, wird die Leistung entsprechend gedrosselt, um das Gesamtsystem nicht zu überlasten. Die Einheit wird über eine Steuereinheit im Fahrerhaus geschaltet und befindet sich auf dem Zugfahrzeug.

Zur Minimierung des Pflanzenwiderstandes und damit auch der benötigten Gesamtspannung wird über einen ausklappbaren Sprüharm vorne am Unimog eine Leitflüssigkeit mit einer Dosis von 150 bis 300 L/ha aufgetragen. Diese Leitflüssigkeit besteht aus einem für Beton in diesen Konzentrationen unschädlichen Mineralsalz und geringen Mengen einer organischen Benetzungskomponente, die keinen relevanten Einfluss auf Beton Grundwasser oder Oberflächengewässer hat. Die Benetzungskomponente wurde bereits als Netzmittel im chemischen Pflanzenschutz auf Eisenbahngleisen zuverlässig eingesetzt [84]. Festzuhalten ist, dass diese Leitflüssigkeit keinerlei phytotoxische oder herbizide Wirkung hat und auch im Zusammenhang mit Strom keine reaktiven phytotoxischen Moleküle entstehen. Dementsprechend unterliegt die Leitflüssigkeit und ihre Komponenten nicht dem Pflanzenschutzgesetz und verfügt über eine hohe Umweltfreundlichkeit. Die Ausbringung erfolgt mit abdriftgeminderten Düsen genau in dem Bereich, wo sie gebraucht wird.

Auf der mechanischen Ebene stehen die beiden großen Applikatoren innerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie und der kleinere Applikator am Ausleger im Mittelpunkt. In der Trägerplattform befinden sich die gut 2 m langen und 650 mm breiten Applikatoren (Abbildung 12 „1“ und „2“) jeweils links

und rechts einer Schiene, um die Gleisbreite halbseitig abzudecken. Die kleinere Einheit befindet sich am Auslegerarm (Abbildung 12 „3“) und kann mit diesem außerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie bewegt werden.

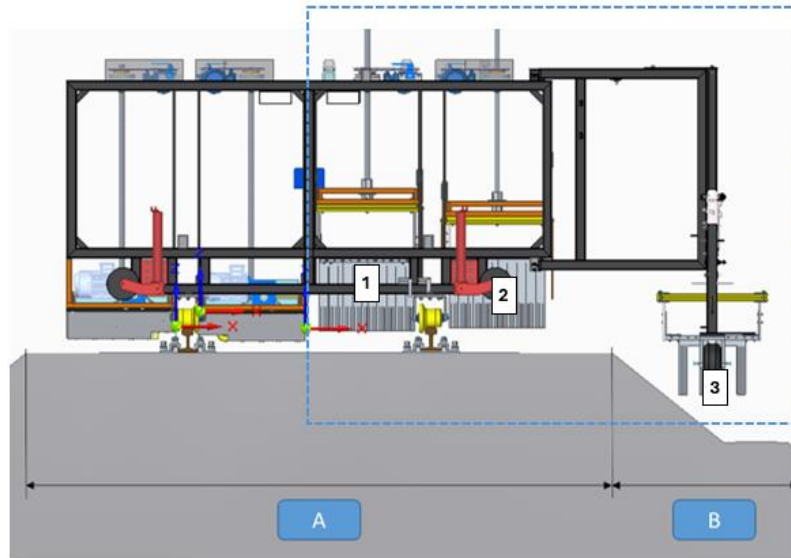


Abbildung 12: Rückansicht des Trägermoduls mit den Applikatoren des EL.

Die Grundanforderung des Systems ist es, eine Spannung von bis zu 5 000 V in die Pflanzen und in Wurzeln einzuleiten, um damit die Pflanzen zu behandeln. Der Einsatz des Systems in der Landwirtschaft zeigte, dass bei der gewählten Arbeitsbreite eine maximale elektrische Leistung von 10 kW pro Einheit für eine effektive Behandlung benötigt wird. Dabei wird von Einbauten und den Schienen so viel Abstand gehalten, dass es hier nicht zum Kurzschluss kommt. Damit die elektrische Leistung optimal auf die Pflanzen übertragen werden kann, war es für die Versuchsphase nötig, die Applikatorpositionen und -typen modular flexibel zu gestalten und die Energieversorgung entsprechend geometrisch variieren zu können. Diese Konfigurierung und Parametrierung musste empirisch ermittelt werden, da die begrenzte Datenlage über die Variabilität des Pflanzenwachses keine umfassenden Simulationen zulässt. Dazu sind die modularen Applikatoren in einem 25 mm Raster aufgehängt und können verschoben und in unterschiedlichen Konfigurationen angeordnet und elektrisch verschaltet werden. Abbildung 13 zeigt den abschließenden Aufbau der Applikatoren.



Abbildung 13: Applikationsmodul EL.

7 Praxisversuche im Gleis

7.1 Zielsetzung der Versuche

Durch das dreijährige Monitoring und Streckenbegehungen konnte festgestellt werden, dass die natürliche Vegetation im Gleisbereich in Fahrtrichtung häufig heterogen verteilt ist. Hingegen zeigte sich quer zur Fahrtrichtung eine homogenere Verteilung der Vegetation. Aus diesem Grund wurde der Gleisrost in Fahrtrichtung in zwei Hälften geteilt sowie daran angepasst auch die halbseitige Anordnung der Verfahren im Trägermodul. Dadurch verdoppelte sich die Nutzbarkeit der Vegetation auf den VS. In der einen Hälfte konnten die Pflanzen mit einer Methode behandelt werden und die andere Hälfte war zeitgleich die individuelle Kontrollfläche. Bei begrenzter Vegetation oder kurzen Streckenabschnitten konnte zudem die zweite Fläche zur Behandlung einer weiteren Methode oder durch Drehung des Versuchsträgers die Kombination genutzt werden. Zusätzlich zur halbseitigen Behandlung des Gleisrosts wurde auch die Schotterflanke mit einem am Versuchsträger ausklappbaren Ausleger bearbeitet (Abbildung 14).

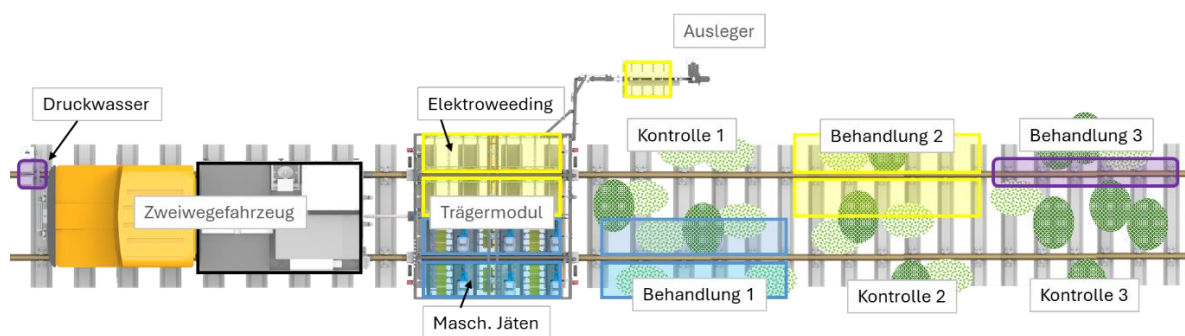


Abbildung 14: Darstellung der heterogenen Vegetationsverteilung im Gleisbereich und der halbseitigen Behandlung mit dem Versuchsträger. Beispiel: Behandlung 1 (blau) = MJ, Behandlung 2 (gelb) = EL, Behandlung 3 (lila) = Druckwasser, jeweils mit gegenüberliegender Kontrollfläche.

Die grundlegende Idee der Anwendung und möglichen Kombination der drei Methoden war es, die Synergie der Wirkungsweisen und Anwendungsbereiche der Methoden zu nutzen. Jedes Verfahren hat Stärken und Schwächen bei der Anwendung im Gleis zur Vegetationskontrolle. So kann der Einsatz vom EL und dem maschinellen Jäten flächenmäßig einen Großteil abdecken. Die Methode Druckwasser kann hingegen in kleinräumigeren Bereichen nahe den Schienen oder in Weichenbereichen eingesetzt werden, die durch die bodennahen Applikatoren des Stroms und des maschinellen Jätens nicht erreicht werden.

7.1.1 Grundlagen und Methoden der Wirksamkeitsbewertung

Die Praxisversuche im Projekt sollten im Allgemeinen die Wirkungsweisen der gewählten Alternativverfahren sowie die Kombination der Verfahren an der natürlichen und heterogenen Vegetation im Gleisbereich zeigen. Bei der Planung von Freilandversuchen im Gleisbereich muss generell

berücksichtigt werden, dass keine standardisierten Bedingungen gegeben sind und somit viele Faktoren die Ergebnisse beeinflussen können. Die identifizierten Eigenschaften sind durch das im Projekt durchgeführte dreijährige monatliche Monitoring verschiedener Beobachtungsstrecken (BS) sowie aus der Begehung der VS für die Erprobung des Versuchsträgers zusammengetragen worden.

Eigenschaften der Versuchsumgebung

Die wichtigsten ermittelten Eigenschaften, die für jede der VS teilflächenspezifisch überprüft wurden, sind:

- die Schotterbeschaffenheit (Menge des Feinanteils)
- die Vegetationsart
- die VD
- die Wuchshöhe der Vegetation
- die umliegende Vegetation (Wald, Feld, Gewässer etc.)
- die Beschattung (starker Bewuchs im Randbereich, geringer Bewuchs etc.)
- die bisherige Vegetationskontrolle,
- die Anlagennutzung
- das Anlagenalter

Da es in der Literatur kein vergleichbares Schema zur Bewertung der Strecken gab, wurde anhand von einzelnen Bausteinen aus der Literatur und den eigenen Erkenntnissen der Begehungen und dem Monitoring der VS die Einteilung abgeleitet. Dadurch wurden einerseits Unterschiede des Gleiszustands, aber auch teilflächenspezifische Unterschiede festgehalten und diese in die Wirkungsbewertung der angewendeten Alternativverfahren eingebracht. Abweichungen bei der Wirksamkeit konnten so nachvollziehbar mit dem gegebenen Gleiszustand verglichen werden. Andererseits konnten aber auch die Versuchsfahrten präziser geplant werden, da die Eigenschaften der Vegetation unterschiedliche Anwendungen der Alternativverfahren mit sich bringen.

Für die Erprobung der Alternativverfahren sind die wichtigsten Faktoren zur Kategorisierung der Strecken die Wuchshöhe und die Art der Vegetation. Die Art der Vegetation bezieht sich hierbei vor allem auf die Pflanzenmorphologie/Wuchsform, also ob es sich um Gräser und krautige Pflanzen, aus dem Randbereich einwachsende ausläuferbildende Pflanzen oder verholzte Pflanzen handelt. Die Wuchshöhe der Pflanzen wurde in zwei Stufen unterschieden: unterhalb Schienenoberkante ($uS \leq \text{ca. } 20 \text{ cm}$) und oberhalb Schienenoberkante ($oS \geq \text{ca. } 20 \text{ cm}$) und ist beispielsweise entscheidend für die Anwendung des maschinellen Jätens, welches bei dem aktuellen Durchmesser der Rollen hauptsächlich Pflanzen mit einer Wuchshöhe oberhalb der Schienenoberkante erfassen kann. Das El und das Druckwasser-Verfahren können bei beiden Wuchshöhen eingesetzt werden.

Des Weiteren wurde die Menge des Feinanteils erfasst, um mögliche Unterschiede bei der Wirksamkeit der Verfahren erkennen zu können. Die Menge des Feinanteils wurde durch optische Beurteilung erfasst. Ein niedriger Feinanteil war dann gegeben, wenn bei einer Probegrabung auch in 15 cm Tiefe kaum Feinmaterial im Schotter zu finden war. Ein mittlerer Feinanteil bestand, wenn zwischen den ersten Schottersteinen Feinmaterial zu sehen war und ein hoher Feinanteil, wenn das Schotterbett

mit Feinmaterial von oben ersichtlich zugesetzt war. Die Einteilung der Kategorien wird im Folgenden anhand von Beispielen beschrieben.

In der Kategorie 1 ist das Schotterbett in einem guten Zustand (Abbildung 15). Es ist gering mit Feinmaterial verfüllt und es befindet sich keine Vegetation im Gleis. Bei dieser Kategorie ist keine Vegetationskontrolle erforderlich. Auf den VS wurden solche Bereiche entsprechend mit der Kategorie markiert, um diese für Versuche auszusparen.



Abbildung 15: Kategorie 1: niedriger Feinanteil, keine Vegetation.

In der Kategorie 2 ist der Feinanteil im Schotterbett ebenfalls niedrig, die Vegetation hat eine Wuchshöhe unter der Schienenoberkante (uS) oder ausläuferbildende Pflanzen aus dem Randbereich wachsen in das Gleisbett hinein (Abbildung 16). Diese Kategorie bedingt daher den Einsatz des El und des Druckwassers.



Abbildung 16: Kategorie 2: niedriger Feinanteil, Wuchshöhe unterhalb Schienenoberkante und einwachsende Vegetation aus Randbereich.

Kategorie 3 ist ähnlich wie die Kategorie 2 ebenfalls mit einem niedrigen Feinanteil, jedoch besteht hier der Unterschied, dass die Wuchshöhe der Vegetation oberhalb der Schienenoberkante liegt (Abbildung 17). In solchen Bereichen können daher alle drei Verfahren gleichermaßen einzeln oder in Kombination getestet werden.



Abbildung 17: Kategorie 3: niedriger Feinanteil, Wuchshöhe oberhalb Schienenoberkante.

In Kategorie 4 ändert sich hauptsächlich der Feinanteil im Schotter (Abbildung 18). Hier findet sich ein mittlerer bis hoher Feinanteil mit verschiedener Vegetation, die eine Wuchshöhe unterhalb oder oberhalb der Schienenoberkante aufweisen kann. Die Kategorie ist häufig in waldnahen Wasserschutzgebieten, aber auch auf Strecken mit einem normalen Regelbetrieb erfasst worden. Die Kategorie wurde aufgenommen, um mögliche Unterschiede in der Wirkungsweise der Verfahren bei stärkerer Verfüllung des Schotters mit Feinmaterial identifizieren zu können.



Abbildung 18: Kategorie 4: mittlerer bis hoher Feinanteil, Wuchshöhe unterhalb/oberhalb Schienenoberkante.

Als letzte Kategorie 5 sind verholzte Pflanzen als einzelnes Merkmal in einer Kategorie aufgenommen, da die chemische Vegetationskontrolle als auch Alternativverfahren häufig Probleme bei der Kontrolle von verholzten Pflanzen haben (Abbildung 19). Im Versuchsbereich vorhandene verholzte

Pflanzen wurden im Versuchsplan aufgenommen und während der Versuchsfahrten und in der nachfolgenden Bonitur beobachtet, um zu erfassen, wie die Alternativverfahren darauf wirkten.



Abbildung 19: Kategorie 5: Verholzte Pflanzen.

Erfassung der Versuchsabschnitte

Die VS wurden nach den genannten Eigenschaften in 25 bis 50 m lange Versuchsabschnitte unterteilt, was ca. 40 bis 80 Schwellenfächern entspricht (Fläche zwischen zwei Schwellen). Die ausgewählten Versuchsabschnitte wurden beschriftet, die Eigenschaften dokumentiert und mit Fotos der Ausgangszustand vor jeder Behandlung festgehalten. Danach wurden einzelne Schwellenfächer markiert, die eine Bearbeitung der Parameter an immer derselben Stelle erlaubten. In den markierten Bereichen wurden die Arten bestimmt, die VD visuell abgeschätzt und die Pflanzenhöhe (PH) vermessen. Im restlichen Teil außerhalb der markierten Bereiche wurde nicht einzelpflanzenspezifisch ausgewertet, sondern die VD geschätzt und die PH gemittelt.

Nach den Versuchen wurde im Abstand von zehn Tagen über knapp vier Wochen die Bonitur der Versuchsabschnitte durchgeführt. Dabei wurden erneut die Arten, die VD und die Wuchshöhe erfasst. Die Ergebnisse der Wirkungsbewertung beziehen sich im Folgenden immer auf die letzte durchgeführte Bonitur (ca. vier Wochen nach der Behandlung), um möglichst eine Aussage über die anhaltende Wirkung der Anwendung darstellen zu können. Außerdem wurden innerhalb des Versuchszeitraums von April bis Juli die gesamten Streckenabschnitte weiter beobachtet, allerdings ohne systematische Auswertung. Trotzdem lässt sich eine Annahme über eine längere Wirkung der Verfahren abschätzen. Für eine genaue Ermittlung einer Langzeitwirkung der Verfahren innerhalb eines Jahres oder über mehrere Jahre, sind Versuche über einen längeren Zeitraum nötig.

Zur einfacheren Bewertung wurde eine Kategorisierung erstellt, die die Wirksamkeit der Behandlung einteilt:

Geringe Wirksamkeit (GW): Die Pflanze wächst nach der Behandlung weiter. Einzelne Triebe können beschädigt sein, was jedoch keine Auswirkung auf die weitere Entwicklung der Pflanze hat.

Reduziertes Wachstum (RW): Die Pflanze ist im weiteren Wuchs reduziert. Es ist ein Wachstumsrückstand im Vergleich zu unbehandelten Pflanzen zu sehen, wodurch die Ausbildung von Blüten und Samen reduziert ist oder ausbleibt. Bei verholzten Pflanzen (Bäume) bildet sich das Laub verzögert.

Abgestorbene Pflanze mit Neuaustrieb (NA): Der Großteil der Pflanze ist abgestorben, aber es gibt einen neuen Austrieb aus den Wurzeln oder der Basis.

Abgestorbene Pflanze mit reduziertem Neuaustrieb (RNA): Die meisten Pflanzen sind abgestorben und nur wenige Pflanzen treiben neu aus. Bei verholzten Pflanzen (Bäume) bildet sich kaum Laub.

Vollständig abgestorben (VA): Die Pflanze ist abgestorben und es wächst keine neue auf.

Zusätzlich zur Vegetationserfassung wurden auch die Wetterdaten vor, während und nach einem Versuch erfasst. Dabei beschreibt das Wetter einen lokal variierenden Zustand für einen kurzen Zeitraum (Stunden oder Tage), der z. B. durch Temperatur, Niederschlag, Wind und Bewölkung beeinflusst wird. Dementsprechend erzeugen Wetterereignisse einen direkten Einfluss und lokal variierende Bedingungen auf Pflanzen und Versuchsbedingungen innerhalb einer Vegetationsperiode. Um daher mögliche Abweichungen der Wirksamkeit der Verfahren begründen zu können, wurden die Wetterdaten von öffentlichen Wetterstationen in unmittelbarer Nähe der einzelnen Teststrecken abgerufen [85]. Zu den hier relevanten Messwerten für eine Beurteilung der Versuchsergebnisse gehörten der Niederschlag und die Temperatur.

7.1.2 Merkmale der Versuchsstrecken

Bei der ersten VS handelt es sich um einen 1,3 km langen Gleisabschnitt der Miljoenenlijn zwischen Simpelveld (NL) und Vetschau (D). Der Gleisabschnitt liegt in einem Landschaftsschutzgebiet, daher findet keine chemische Vegetationskontrolle statt, sondern ein jährlicher mechanischer Rückschnitt der Vegetation. Entlang der Gleise ist weitestgehend eine dichte Vegetation aus Büschen und Bäumen zu finden, wodurch der Gleisbereich die meiste Zeit beschattet ist und einen hohen Eintrag von organischem Material aufweist. Auf der VS wurden 52 Arten identifiziert und es lagen längere Abschnitte mit einer homogenen VD und Artenzusammensetzung vor.

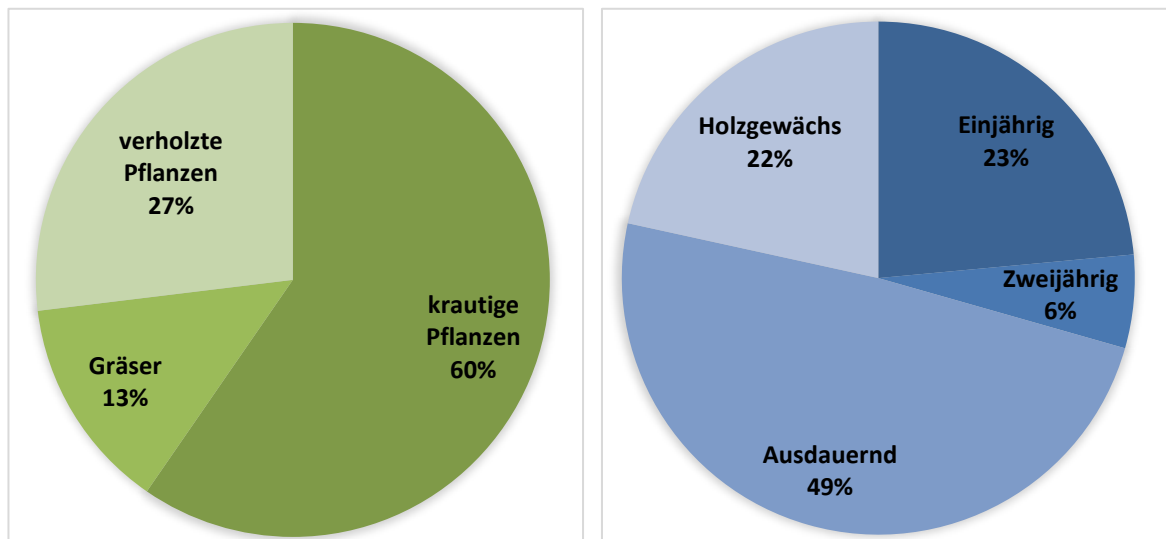


Abbildung 20: Prozentualer Anteil der identifizierten Arten der VS Vetschau mit dessen Wuchsformen (links) und den Lebensformen (rechts).

Bei den am häufigsten aufgetretenen Wuchsformen handelte es sich um krautige Pflanzen (60 %), gefolgt von verholzten Pflanzen und Gräsern (Abbildung 20). Innerhalb der verschiedenen Lebensformen stellten mit 48 % die ausdauernden Arten (Holzgewächse gesondert dargestellt) den größten Anteil dar, gefolgt von einjährigen Arten. Die gesondert dargestellten Holzgewächse nahmen einen Anteil von 21 % ein und zuletzt zweijährige Arten nur 6 %. Auf der VS Vetschau wurde in der Kategorie der invasiven Arten der Riesen-Bärenklau (*Heracleum mantegazzianum*) erfasst. Der Riesen-Bärenklau zählt zu den ausdauernd und krautig wachsenden Pflanzen. Da die Einzelpflanzen ausschließlich im Randbereich aufgewachsen sind und damit außerhalb des Arbeitsbereichs des Versuchsträgers, konnte die Wirksamkeit der Alternativverfahren auf diese invasive Art nicht untersucht werden.

Die weiteren VS für die Erprobung des Versuchsträgers befanden sich im Schienennetz der RWE Power AG in Bergheim-Niederaußem (Rhein-Erft-Kreis). Dabei teilten sich die Gleise noch mal auf zwei Standorte auf. Bei dem ersten Standort handelt es sich um sechs Gleisabschnitte (Rangier- und Abstellgleise), bei denen weitestgehend keine größere Vegetation (Büsche, Bäume) im Randbereich wächst. Dadurch sind die Gleise stark sonnenexponiert oder werden teilweise durch abgestellte Waggons zeitweise beschattet. An dem zweiten Standort ist der Randbereich auf einer Seite mit Büschen und Bäumen bewachsen und wird damit zeitweilig beschattet. Auf allen für die Versuche genutzten Gleisen wird jährlich eine mechanische Vegetationskontrolle durchgeführt.

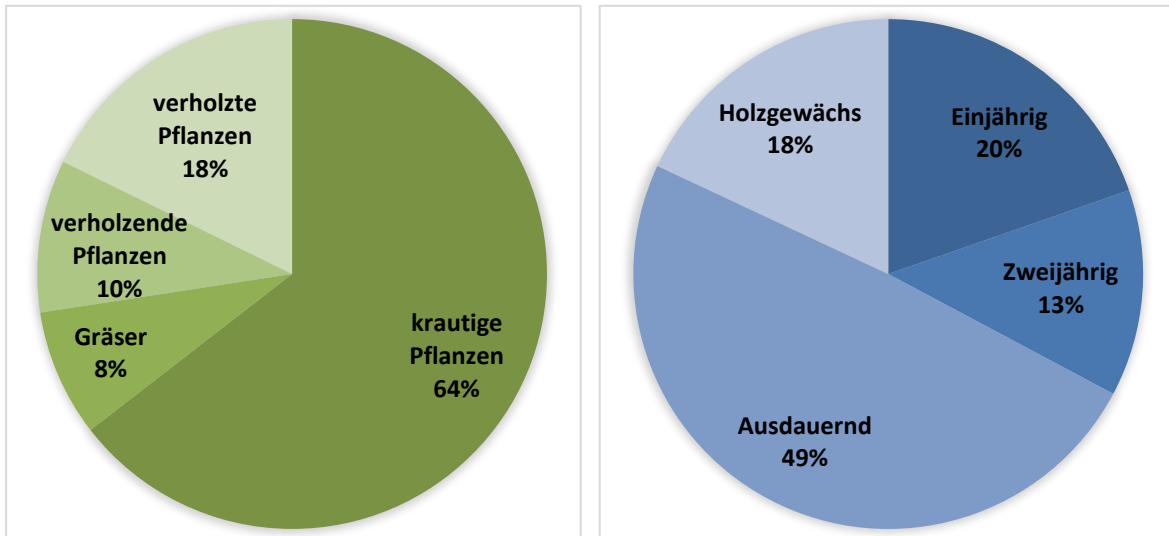


Abbildung 21: Prozentualer Anteil der identifizierten Arten der VS Bergheim mit dessen Wuchsformen (links) und den Lebensformen (rechts).

Die einzelnen Strecken weisen dabei viele verschiedene Eigenschaften auf, wie die VD, der Feinanteil oder die Lage. Auf den Gleisen wurden insgesamt 61 Arten identifiziert und die einzelnen Streckenabschnitte zeigten eine homogene VD und Artenzusammensetzung. Die Wuchsformen der identifizierten Arten bestand hauptsächlich aus krautigen Pflanzen (64 %), gefolgt von verholzten (18 %) und verholzenden Pflanzen (10 %) und zuletzt Gräsern mit 8 % (Abbildung 21). Dabei handelte es sich bei fast der Hälfte der Pflanzen mit 49 % um ausdauernde Arten (Holzgewächse gesondert dargestellt). Abnehmend folgten dann Holzgewächse, einjährige Pflanzen und schließlich zweijährige Arten.

In der Kategorie der invasiven Arten sind auf der VS Bergheim drei verschiedene Arten aufgetreten. Das Drüsige Weidenröschen (*Epilobium ciliatum*) wuchs vereinzelt im zu behandelnden Arbeitsbereich ebenso wie das Schmalblättrige Greiskraut (*Senecio inaequidens*). Diese beiden Arten zählen zu den ausdauernden und krautig wachsenden Pflanzen und wurden während der Versuche genau wie die anderen krautig wachsenden Pflanzen behandelt. Außerdem wuchs der Schmetterlingsflieder (*Buddleja davidii*) im Randbereich der VS und damit außerhalb des Arbeitsbereichs des Versuchsträgers. Der Schmetterlingsflieder zählt zu den ausdauernden Holzgewächsen.

Eine gesamte Übersicht der Streckeneigenschaften und den vorkommenden Arten ist im Anhang 9 zu finden.

7.1.3 Versuchsparmeter

Die Feldversuche zur Erprobung der Alternativverfahren enthielten verschiedene Parameter, Kombinationsmöglichkeiten und Stellgrößen, die während verschiedener Durchgänge angepasst wurden. Dadurch ergab sich eine mehrfaktorielle Versuchsanordnung, da neben der Hauptwirkung der Einzelverfahren zur Vegetationskontrolle auch die Wechselwirkungen zwischen diesen von Bedeutung waren. Die Versuchsfahrten zur Erprobung der ausgewählten Alternativverfahren fanden in den

Monaten April, Mai und Juni statt. Die Termine zwischen den Monaten lagen immer etwa vier Wochen auseinander. Die ersten Versuchsfahrten im April bestanden hauptsächlich aus der Erprobung der Einzelverfahren, um zunächst die Parameteroptimierung der Verfahren zu erreichen. Danach folgten im Mai weitere Einzelversuche und die ersten Versuche zur Erprobung der Kombinationen. Bei den Kombinationen wurden dann aus der vorherigen Auswertung der Wirksamkeit der Einzelverfahren die effektivsten Parameter zusammengelegt und miteinander getestet. Zur Erprobung der Wirksamkeit höherer Dosierungen wurden mehrere Überfahrten durchgeführt, die in einem größeren System durch den Einbau mehrerer Behandlungseinheiten hintereinander ersetzt werden würden.

Für die Erprobung des maschinellen Jätens wurden drei wesentliche Parameter variiert: die Fahrgeschwindigkeit, die Anzahl der Überfahrten und die Rotationsgeschwindigkeit der Rollen (Tabelle 8). Die Fahrgeschwindigkeit wurde systematisch aufsteigend in fünf Stufen getestet, von 1 km/h bis zu 10 km/h und die Anzahl der Überfahrten in drei Varianten untersucht. Außerdem wurde die Rotationsgeschwindigkeit der Rollen mit drei Stufen getestet.

Tabelle 8: Versuchsparameter für das MJ.

Parameter	Varianten
Fahrgeschwindigkeit [km/h]	1; 2,5; 5; 7,5; 10
Anzahl der Überfahrten / vgl. Einheiten im Großgerät	2; 4; 8
Rotationsgeschwindigkeit der Rollen [1/min]	100; 200; 300

Bei der Untersuchung der Wirksamkeit des El wurde nur die Fahrgeschwindigkeit und die Anzahl der Überfahrten variiert (Tabelle 9), da das System die nötige Spannung entsprechend dem Widerstand selbst reguliert und somit variabel bis zu 5 000 V abgerufen werden kann. Bei der Fahrgeschwindigkeit wurden drei Stufen: 2,5 km/h, 10 km/h und 20 km/h getestet und die Anzahl der Überfahrten zwischen 2 bis 8 Überfahrten gewechselt.

Tabelle 9: Versuchsparameter für das El.

Parameter	Varianten
Fahrgeschwindigkeit [km/h]	2,5; 10; 20
Anzahl der Überfahrten / vgl. Einheiten im Großgerät	2; 4; 6; 8

Für das dritte Verfahren Druckwasser wurde die Fahrgeschwindigkeit immer verdoppelt und die Wirkung bei bis zu 20 km/h und 1 bis 3 Überfahrten angewendet. Außerdem wurden drei Abrasivmittel (Olivin, Basalt und Granatsand) getestet und der Winkel der Düse bei 30°, 35° und 40° eingestellt (Tabelle 10). Bei einer mehrmaligen Überfahrt blieb entweder die Düsenposition gleich, um die Wirkung auf einer Stelle zu erhöhen, oder wurde verstellt, um die Wirksamkeit in einem breiteren Bereich zu testen. Es wurde immer ein Druck von 100 MPa verwendet, da dies ein ermitteltes Optimum zwischen der Wirksamkeit und der Auswirkung auf die Infrastruktur darstellte.

Tabelle 10: Versuchsparameter für das Druckwasser.

Parameter	Varianten
Fahrgeschwindigkeit [km/h]	2,5; 5; 10; 20
Anzahl der Überfahrten / vgl. Einheiten im Großgerät	1; 2; 3
Abrasivmittel	Olivin, Basalt, Granatsand
Winkel	30°, 35°, 40°

7.2 Ergebnisse und Diskussion der Versuche

In den beiden folgenden Abschnitten werden die gesamten Ergebnisse der durchgeführten Einzelversuche für die Alternativverfahren MJ, El und Druckwasser und die Kombination der drei Verfahren tabellarisch dargestellt. Aufgrund der Berücksichtigung der individuellen Unterschiede der Versuchsfächen, wie die Beschattung, die Wuchshöhen der Pflanzen, die unterschiedlichen Vegetationsdichten oder Wuchsformen, wäre eine Zusammenführung der Versuchsergebnisse ungenau. Daher wurden die Ergebnisse einzeln aufgeführt und ausgewertet.

Bei den Versuchen handelt es sich außerdem um allgemeine Dosis-Wirkungs-Versuche eines Versuchsträgers und nicht um eine Erprobung eines serienreifen Systems. Somit ist die Bauweise des Versuchsträgers an die Versuchszwecke im kleinen Maßstab angepasst, wie beispielsweise die halbseitige Behandlung. Höhere Dosierungen wurden während der Erprobung durch die Erhöhung der Überfahrten erzeugt. In einem größeren System würden die häufigen Überfahrten wegfallen und durch den Einbau mehrerer Behandlungseinheiten ersetzt werden. Die Versuche mit dem hier gebauten Versuchsträger helfen daher grundlegend bei der Ermittlung der benötigten Dosis für größere Systeme. Die Ergebnisse beziehen sich auf den Zustand vier Wochen nach der Behandlung. Die mitgeführten unbehandelten Kontrollflächen zeigten im Verlauf der vierwöchigen Bonitur nur geringfügige Veränderungen, sodass die VD und PH mit den in den Tabellen vor der Behandlung aufgeführten Werten vergleichbar sind.

Die Ergebnisse zur Auswertung sind tabellarisch aufgeführt und enthalten folgende Daten:

- Parameter: die variierenden Einstellungen des Systems
- Ø VD vor [%]: durchschnittliche VD vor dem Versuch in Prozent
- Ø VD nach [%]: durchschnittliche VD nach dem Versuch in Prozent
- Änderung VD [%]: prozentuale Änderung der VD
- Ø PH vor [cm]: durchschnittliche PH vor dem Versuch in Zentimetern
- Ø PH nach [cm]: durchschnittliche PH nach dem Versuch in Zentimetern
- Änderung PH [cm]: Änderung der PH in Zentimetern
- Beschattung: Grad der Beschattung, unter der der Versuch durchgeführt wurde
- Entwicklung: Entwicklung der Vegetation nach vierwöchiger Bonitur

Die VD und die PH sind immer gemittelte Werte aus den einzelnen Boniturbereichen eines jeden Versuchsabschnitts. Die PH wurde beim El nicht aufgeführt, da das Verfahren im Vergleich zu den

anderen beiden nicht mechanisch arbeitet und somit nicht direkt einen Einfluss auf die Wuchshöhe hat, sondern immer auf die gesamte Pflanze. Die Beschattung ist unterteilt in ganzjährig beschattete (kS) Flächen, teilweise sonnenexponierte (tS) Flächen und ganzjährig sonnenexponierte Flächen (S). Hierbei lag auch hauptsächlich der Unterschied zwischen den beiden Standorten. Der Standort Vetschau variierte zwischen kS- und tS-Flächen, hingegen waren die Strecken in Bergheim fast alle S. Eine gesamte Übersicht der Streckeneigenschaften befindet sich im Anhang im Kapitel 9. Die Entwicklung der Vegetation nach der vierwöchigen Bonitur ist ebenfalls in einzelne Kategorien eingeteilt und wurde bereits in Kapitel 7.1.1 beschrieben.

Die Ergebnisse teilen sich weiterhin in zwei übergeordnete Wuchsformen auf – krautige Pflanzen (inkl. Gräser) sowie verholzende bis verholzte Pflanzen. Dies erfolgte, da die Verfahren eine zunächst angenommene und durch die Versuche bestätigte unterschiedliche Wirksamkeit zwischen diesen Gruppen aufwiesen und die Anwendung daher spezifiziert wurde.

Zu den am häufigsten aufgetretenen krautigen Pflanzen im Projekt, aber auch in Vegetationsstudien im Gleisbereich erfassten Arten, zählen:

- Wilde Möhre (*Daucus carota*)
- Weidenröschen (*Epilobium spec.*)
- Ackerschachtelhalm (*Equisetum arvense*)
- Kletten-Labkraut (*Galium aparine*)
- Storchschnäbel (*Geranium spec.*)
- Gewöhnliches Ferkelkraut (*Hypochaeris radicata*)
- Echtes Leinkraut (*Linaria vulgaris*)
- Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*)
- Greiskräuter (*Senecio spec.*)
- Ehrenpreis (*Veronica spec.*)
- Wicken (*Vicia spec.*)

Die am häufigsten erfassten Gräser waren:

- Aufrechte Tresse (*Bromus erectus*)
- Taube Tresse (*Bromus sterilis*)
- Land-Reitgras (*Calamagrostis epigejos*)
- Wolliges Honiggras (*Holcus lanatus*)

Auf den VS häufig auftretende verholzende bis verholzte Pflanzen waren:

- Ahorn-Arten (*Acer spec.*)
- Weißbirke (*Betula pendula*)
- Schmetterlingsflieger (*Buddleja davidii*)
- Hainbuche (*Carpinus betulus*)
- Echtes Johanniskraut (*Hypericum perforatum*)
- Hundsrose (*Rosa canina*)

- Brombeeren (*Rubus fruticosus*)
- Schwarzer Holunder (*Sambucus nigra*)

7.2.1 Auswertung der Ergebnisse der Einzelverfahren

Einzelverfahren – Maschinelles Jäten

Krautige Vegetation

Bei der Übersicht der Ergebnisse handelt es sich um die Auflistung der Versuche beider Versuchstandorte. Die Bedingungen der dafür genutzten Versuchsabschnitte wiesen alle eine hohe VD auf, einhergehend mit einem mittleren bis hohen Feinanteil im Schotter.



Abbildung 22: Links: Wuchshöhe nach dem maschinellen Jäten auf 20 cm im Vergleich zur unbehandelten Vegetation (50 cm). Rechts: Nahansicht der abgetrennten Stängel.

Zu Beginn der Versuche lag die Wuchshöhe der krautigen Pflanzen meist zwischen 25 und 50 cm. Wegen den Unebenheiten des Schotters und der Bahninfrastruktur musste der Greifpunkt des Mechanismus einen Abstand von mindestens 20 cm zum Boden einhalten. Dadurch wurde nach den Überfahrten eine PH von 20 cm erreicht (Abbildung 22). Insgesamt wurde die Wuchshöhe in den verschiedenen Versuchen im Schnitt zwischen 5 und 20 cm reduziert.

Tabelle 11: Wirkung des maschinellen Jätens bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.

	Parameter		Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
1	2 Überfahrten, 100 1/min	1 km/h,	kS	90	80	40	25	11	15	RW
2	2 Überfahrten, 100 1/min	1 km/h,	kS	30	20	25	20	33	5	RW
3	4 Überfahrten, 100 1/min	1 km/h,	kS	90	80	40	20	11	20	RW
4	2 Überfahrten, 100 1/min	2,5 km/h,	kS	30	20	25	20	33	5	RW
5	2 Überfahrten, 100 1/min	2,5 km/h,	kS	90	80	40	30	11	10	RW
6	4 Überfahrten, 100 1/min	2,5 km/h,	kS	90	70	40	25	22	15	RW
7	2 Überfahrten, 200 1/min	2,5 km/h,	kS	90	70	40	30	22	10	RW
8	4 Überfahrten, 200 1/min	2,5 km/h,	kS	90	70	40	20	22	20	RW
9	2 Überfahrten, 300 1/min	5 km/h,	S	90	80	40	30	11	10	GW
10	4 Überfahrten, 300 1/min	5 km/h,	kS	80	70	30	25	13	5	RW
11	4 Überfahrten, 300 1/min	5 km/h,	S	70	70	30	25	0	5	GW
12	8 Überfahrten, 300 1/min	5 km/h,	S	70	70	30	20	0	10	GW
13	2 Überfahrten, 300 1/min	7,5 km/h,	S	90	90	30	30	0	0	GW
14	4 Überfahrten, 300 1/min	7,5 km/h,	tS	80	70	30	25	13	5	GW

	Parameter			Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
15	4	Überfahrten, 300 1/min	7,5 km/h,	S	90	90	30	25	0	5	GW
16	8	Überfahrten, 300 1/min	7,5 km/h,	S	90	90	30	25	0	5	GW
17	2	Überfahrten, 200 1/min	10 km/h,	tS	90	90	40	40	0	0	GW
18	4	Überfahrten, 200 1/min	10 km/h,	tS	90	90	40	30	0	10	RW

*Begriffserläuterung: GW = geringe Wirksamkeit, RW = reduziertes Wachstum.

Die größte Reduktion der VD von bis zu 33 % entstand bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten von 1 km/h und 2,5 km/h (Versuch 2, 4, 6–8) in Kombination mit einer Rotationsgeschwindigkeit der Rollen von 100 1/min und 200 1/min (Tabelle 11). Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h zeigte sich weiterhin eine Abnahme der PH durch die Behandlung, jedoch ging das Potential zur Reduktion der VD zurück. Bei weiter zunehmenden Fahrgeschwindigkeiten von 7,5 km/h und 10 km/h gab es keine oder nur eine geringe Veränderung der VD und der PH. Zu begründen ist das an dem Verhältnis zwischen Fahrgeschwindigkeit und der derzeitigen Rotationsgeschwindigkeit der Rollen. Die Umdrehungen der Rollen pro Schwellenfach müssen ausreichend sein (mindestens 2 Umdrehungen), um die Pflanzen erfassen zu können. Ist die Fahrgeschwindigkeit zu hoch und die Rotationsgeschwindigkeit der Rollen zu gering, so werden die Pflanzen nicht wesentlich eingezogen.

Außerdem kam es bei hohen Fahrgeschwindigkeiten häufig dazu, dass die Vegetation von tiefliegenden Bauteilen des Versuchsträgers heruntergedrückt wurde und sich bei den höheren Fahrgeschwindigkeiten nicht schnell genug wieder aufrichten konnte, um von den hinteren Rolleneinheiten aufgenommen zu werden. Wurde die Vegetation insgesamt zu hoch (> 40 cm), wie beispielsweise bei Gräsern, dann wurde dieser Effekt verstärkt. Bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten war der Impuls geringer und die Pflanzen bogen sich nicht so stark. Ein größerer Abstand zwischen den Rollenreihen könnte den Effekt ausgleichen. Zusätzlich trat vor allem bei langen Gräsern oder hohen Wuchshöhen der Pflanzen das Problem auf, dass der Mechanismus verstopfte, da sich die langen Pflanzenteile um die Rollen wickelten. Bei hohen Wuchshöhen könnte daher ein größerer Rollendurchmesser oder eine stufenweise Behandlung sinnvoll sein, sodass die Rolleneinheiten in verschiedenen Höhen positioniert werden und jede Rolleneinheit nur einen Teil entfernt und sich das Aufwickeln dadurch reduziert.

Zunehmend verholzende und verholzte Vegetation

Im Folgenden wird die Wirksamkeit an einer zunehmend verholzenden bis verholzten Vegetation betrachtet. Da eine homogene Verteilung verholzter Pflanzen auf der VS Vetschau aufgetreten ist, beziehen sich die Daten aus der Tabelle 12 auf diesen Standort. Damit besteht für die Daten durchgehend ein mittlerer bis hoher Feinanteil und eine häufige Beschattung der Versuchsflächen durch die umliegende Vegetation im Randbereich.



Abbildung 23: Links: durch die Rollen des MJ verursachte Verletzung der Rinde. Rechts: vollständig entwurzelter Baum durch das MJ.

Die in hauptsächlich verholzter Vegetation durchgeführten Versuche hatten ein Maximum der Abnahme der VD von 33 % und eine Reduktion der PH um 20 cm. Diese Ergebnisse entstanden bei den Parameterkombinationen in Versuch 3, 6, 10 und 14. Allgemein konnte bei einer niedrigen Fahrgeschwindigkeit von 1 km/h und 2,5 km/h in den meisten Versuchsfahrten eine Reduktion der VD zwischen 14 und 33 % erzielt werden. Wurde die Geschwindigkeit erhöht, trat wieder der Fall ein, dass die Fahrgeschwindigkeit zu schnell für die Rotationsgeschwindigkeit der Rollen war. Außerdem haben sich die Pflanzen zunehmend gebogen und wurden nicht mehr von den hinteren Rollenreihen erfasst. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h konnte keine Reduktion der VD mehr erzielt werden, aber weiterhin ein Abtrennen der oberen Pflanzenteile.

Tabelle 12: Wirkung des maschinellen Jätens bei zunehmend verholzter Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
1	2 Überfahrten, 1 km/h, 100 1/min	tS	70	60	30	20	14	10	RW
2	2 Überfahrten, 1 km/h, 100 1/min	tS	80	70	30	20	13	10	RW
3	2 Überfahrten, 1 km/h, 100 1/min	tS	90	60	45	25	33	20	RW
4	4 Überfahrten, 1 km/h, 100 1/min	tS	70	60	30	20	14	10	RW
5	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 100 1/min	tS	80	70	30	20	13	10	RW
6	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 100 1/min	tS	90	60	45	25	33	20	RW
7	2 Überfahrten, 5 km/h, 300 1/min	tS	75	75	30	25	0	5	GW
8	4 Überfahrten, 5 km/h, 300 1/min	tS	75	75	30	25	0	5	GW
9	4 Überfahrten, 5 km/h, 300 1/min	tS	80	70	30	20	13	10	GW
10	4 Überfahrten, 5 km/h, 300 1/min	tS	90	60	45	25	33	20	RW
11	2 Überfahrten, 7,5 km/h, 300 1/min	tS	75	75	30	30	0	0	GW
12	4 Überfahrten, 7,5 km/h, 300 1/min	tS	75	75	30	30	0	0	GW
13	4 Überfahrten, 7,5 km/h, 300 1/min	tS	80	70	30	20	13	10	GW
14	4 Überfahrten, 7,5 km/h, 300 1/min	tS	90	60	45	25	33	20	RW

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
15	4 Überfahrten, 10 km/h, 200 1/min	tS	70	70	40	25	0	15	RW
16	8 Überfahrten, 10 km/h, 200 1/min	tS	70	70	40	25	0	15	RW

*Begriffserläuterung: GW = geringe Wirksamkeit, RW = reduziertes Wachstum.

Bei aufwachsenden verholzten Pflanzen (Bäume) wurden die Laubblätter abgerissen und ein Wachstumsrückstand im Vergleich zu unbehandelten Bäumen erzielt. Teilweise konnten aber auch gesamte Bäume mit Wurzeln entfernt werden, was insbesondere bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten vor- kam. Wurden die Bäume zwar von den Rollen erfasst, aber nicht entwurzelt, so zeigte die Rinde eine starke Verletzung, was teilweise auch sekundär zu einer Wuchshemmung führte, aber nicht automa- tisch zum Absterben der Pflanze (Abbildung 23).

Fazit

Als Fazit der Erprobung des maschinellen Jätens ist zusammenzufassen, dass das Verfahren vor allem die PH reduziert. Zwar kam es zum Ende der vierwöchigen Boniturzeit zu einem NA und einer Zu- nahme der PH, dennoch war ein Unterschied zwischen den maschinell gejäteten Flächen und unbe- handelten Kontrollflächen erkennbar. Insbesondere blieben die Blüte und Samenbildung aus oder traten deutlich später ein.

Auch die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst die Wirksamkeit, denn je langsamer die Fahrgeschwindig- keit war, desto weniger Überfahrten wurden benötigt. Erhöhte man die Fahrgeschwindigkeit, wurden die Pflanzen zu stark bewegt und nicht mehr gut von den hinteren Rollenreihen erfasst, daher trat bei höheren Fahrgeschwindigkeiten erst bei mehreren Überfahrten eine homogenere Wirkung ein. Außerdem ist das Verhältnis zwischen Fahrgeschwindigkeit und Rotationsgeschwindigkeit der Rol- len wichtig. Beide Parameter müssen proportional erhöht werden, sodass mindestens zwei vollstän- dige Umdrehungen der Rollen innerhalb eines Schwellenfaches erreicht werden.

Um die aus den Versuchen ermittelte erforderliche Anzahl von vier Überfahrten für einen ausrei- chenden Effekt des Einzelverfahrens zu erzielen, müssten in einem größeren Fahrzeug entsprechend vier Einheiten hintereinander eingebaut werden. Damit ist bei der genutzten Rotationsgeschwindig- keit der Rollen und bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h eine effektive Behandlung sicher- gestellt.

Auswirkung des maschinellen Jätens auf Infrastrukturkomponenten

Durch das MJ können allgemein nur mechanische Störungen auf Infrastrukturkomponenten entstehen. Beispielsweise können Hohlräumen in der oberen Schicht des Schotters (oberen 5 bis 10 cm) durch das vollständige Entwurzeln von Pflanzen entstehen und das Schotterbett destabilisieren. Dies wurde beim Ausreißen verholzter Pflanzen (ca. 1 cm Stammdurchmesser) beobachtet. Außerdem muss der Mechanismus einen Sicherheitsabstand zur Schotteroberfläche und zur Seite einhalten, um Kollisionen zu vermeiden. Insgesamt wurde kein Schotterflug beobachtet, der ohnehin durch den Mechanismus abgeschirmt wäre, sodass der Schotter maximal gegen die Rollen schlägt.

Die starren Rollen sind beim Einsatz des Verfahrens im Weichen- und Kreuzungsbereich beeinträchtigt, da der Applikator in die Zwischenräume der Weichen geführt werden muss. Ohne spezielle Anpassung des Systems können in diesem Bereich so lediglich Pflanzen behandelt werden, die höher als die Schienenoberkante sind.

Einzelverfahren – Elektroweeding

Krautige Vegetation – niedriger Feinanteil

Als nächstes werden in Tabelle 13 die Ergebnisse der Versuche zur Wirkung des El bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit niedrigem Feinanteil gezeigt. Hierbei erfolgt die Differenzierung zusätzlich bei einem niedrigen Feinanteil, da geklärt werden sollte, inwiefern sich die Wirksamkeit des El zwischen einem Schotterbett mit einem niedrigen Feinanteil gegenüber einem höher verfülltem Schotterbett zeigt. Die Wuchshöhe der Pflanzen lag vor der Behandlung im Schnitt bei mindestens 15 cm bis maximal 40 cm.

Zunächst war auf den BS und VS festzustellen, dass ein Zusammenhang zwischen der Menge des Feinanteils im Schotter und der VD bestand. In einem Schotterbett mit niedrigem Feinanteil war die VD geringer als in einem Schotterbett mit einem höheren Feinanteil. Im Bereich mit niedrigem Feinanteil wurde ein Wert von maximal 50 % Bedeckung erfasst. Am häufigsten trat vor den Versuchsfahrten eine VD zwischen 20 bis 30 % auf den Versuchsabschnitten auf. Die höchste Reduktion der VD nach den Versuchsfahrten lag bei bis zu 75 %.

Insgesamt konnte bei allen Fahrgeschwindigkeiten eine hohe Abnahme der VD erreicht werden. Aber vor allem bei einer niedrigeren Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h sind die meisten Pflanzen innerhalb der vierwöchigen Bonitur VA. Nur vereinzelt wurden Pflanzen im Versuchsabschnitt erfasst, wodurch eine verbliebene VD von 5 bis 10 % entstand. Bei den Pflanzen handelte es sich häufig um Gräser oder einzelne Brombeerpflanzen, die bei dieser Dosierung nicht VA sind. Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten von 10 und 20 km/h konnte ebenfalls eine Reduktion der VD erfasst werden, jedoch kam es bei einer Vielzahl der Pflanzen zu einem Neuaustrieb (RNA und NA). Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h wurde auf sonnenexponierten Strecken mit geringer Vegetation und niedrigem Feinanteil eine hohe Reduktion der VD bereits bei vier Überfahrten erreicht und bei 20 km/h wurden acht Überfahrten als wirksam eingestuft.

Tabelle 13: Wirkung des El bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem niedrigen Feinanteil.

	Parameter	Beschat- tung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Reduktion VD [%]	Entwick- lung*
1	1 Überfahrt, 2,5 km/h	S	30	10	67	RNA
2	2 Überfahrten, 2,5 km/h	S	30	20	33	RNA
3	2 Überfahrten, 2,5 km/h	S	20	10	50	VA
4	2 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	10	10	0	VA
5	4 Überfahrten, 2,5 km/h	S	30	10	67	VA
6	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	10	5	50	VA
7	6 Überfahrten, 2,5 km/h	S	20	10	50	VA
8	2 Überfahrten, 10 km/h	S	20	10	50	RNA
9	4 Überfahrten, 10 km/h	S	20	5	75	RNA
10	4 Überfahrten, 10 km/h	S	50	20	60	RNA
11	4 Überfahrten, 10 km/h	S	40	15	63	NA
12	8 Überfahrten, 10 km/h	S	40	10	75	RNA
13	8 Überfahrten, 10 km/h	S	20	5	75	RNA
14	8 Überfahrten, 20 km/h	S	25	10	60	NA

*Begriffserläuterung: NA = Neuaustrieb, RNA = reduzierter Neuaustrieb, VA = vollständig abgestorben.

Krautige Vegetation – mittlerer bis hoher Feinanteil

In diesem Abschnitt wird die Wirksamkeit bei einem Feinanteil im mittleren bis hohen Bereich dargestellt (Tabelle 14). Die Beobachtungen zeigten zunächst, dass auf den Streckenabschnitten mit einem mittleren bis hohen Feinanteil auch die VD höher war. Dies passt zur vorher gemachten Beobachtung auf den Streckenabschnitten mit niedrigem Feinanteil. Die Daten zeigen, dass eine fast

vollständige Bedeckung von 90 % am häufigsten auftrat und somit eine etwa dreimal so hohe VD im Vergleich zu den Daten aus der vorherigen Tabelle 13 festzustellen ist. Außerdem war der Randbereich oft stärker bewachsen und damit das Gleis kS oder tS (VS Vetschau). Hingegen kam es auf den VS in Bergheim auf S- Abschnitten und tS-Gleisabschnitten aufgrund der Ladungsverluste von Kohle abschnittsweise ebenfalls zu einem hohen Feinanteil. Die Wuchshöhe der Pflanzen lag vor der Behandlung im Schnitt bei mindestens 15 cm bis maximal 40 cm.

Die größte Abnahme der VD lag bei bis zu 89 % und erfolgte bei den Behandlungen 5, 9, 13 und 14 bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h. Dabei fällt auf, dass schon die geringste Dosierung von zwei Überfahrten die gleiche Vegetationsabnahme wie eine höhere Anzahl an Überfahrten hatte. Der Effekt der hohen Vegetationsabnahme könnte auf die Standortbedingungen zurückzuführen sein, da beispielsweise der Versuch 5 auf einem voll sonnenexponierten Abschnitt (S) durchgeführt wurde und das Wetter im darauffolgenden Boniturzeitraum sonnig und warm war. Vergleicht man diese Werte mit den gleichen Parametern an tS- bis kS-Flächen (Versuch 9), so erhöhte sich die nötige Anzahl der Überfahrten für eine ähnliche Wirksamkeit auf mindestens vier Überfahrten bei 2,5 km/h. Jedoch kam es im Boniturzeitraum im Versuch 5 mit nur zwei Überfahrten zu einem vermehrten NA der Pflanzen. Im Vergleich verbesserte sich die Wirksamkeit bei vier Überfahrten, da die meisten Pflanzen VA sind. Dieselbe Wirksamkeit ist auch bei acht Überfahrten aufgetreten, jedoch ohne zunehmenden Effekt, wodurch eine Erhöhung der Überfahrten keinen Nutzen hat. Daher sind 2 bis 4 Überfahrten bei 2,5 km/h für eine hohe Reduktion (> 80 %) der VD ausreichend.

Bei Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit auf 10 km/h sind 4 oder 8 Überfahrten nötig, um eine hohe Abnahme der VD zu erzielen. Auch hier zeigte sich, dass vier Überfahrten bei 10 km/h auf einer sonnenexponierten Strecke mit anschließend warmen sonnigen Wetter nach der Behandlung bereits eine hohe Vegetationsabnahme erzeugten (Versuch 18, 19). Hingegen wurde eine ähnlich starke Vegetationsabnahme auf schattigen Streckenabschnitten erst mit acht Überfahrten erreicht (Versuch 20). Zu berücksichtigen ist, dass die Pflanzen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten eine stärkere Regeneration innerhalb der Boniturzeit zeigten, wodurch die Wirksamkeit geringer gegenüber niedrigen Fahrgeschwindigkeiten einzustufen ist und mit häufigeren Behandlungen zu rechnen ist.

Das Optimum bei einer dichten krautigen Vegetation mit einem mittleren bis hohen Feinanteil im Schotter liegt im Schnitt bei vier Überfahrten mit einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h und acht Überfahrten bei 10 km/h. Der Effekt bei 20 km/h mit vier Überfahrten war nur gering ausgefallen, jedoch lässt sich prinzipiell die Wirkung des El durch eine Erhöhung der Überfahrten erreichen.

Tabelle 14: Wirkung des El bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Reduktion [%]	Entwicklung*
1	1 Überfahrt, 2,5 km/h	kS	90	50	44	NA
2	2 Überfahrten, 2,5 km/h	kS	90	20	78	RNA
3	2 Überfahrten, 2,5 km/h	kS	90	40	56	NA
4	2 Überfahrten, 2,5 km/h	S	50	20	60	NA
5	2 Überfahrten, 2,5 km/h	S	90	10	89	NA
6	2 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	20	10	50	VA
7	2 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	80	20	75	RNA
8	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	70	20	71	RNA
9	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	90	10	89	VA
10	4 Überfahrten, 2,5 km/h	S	80	20	75	RNA
11	4 Überfahrten, 2,5 km/h	S	80	20	75	RNA
12	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	20	10	50	VA
13	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	80	10	88	VA
14	8 Überfahrten, 2,5 km/h	kS	90	10	89	VA
15	2 Überfahrten, 10 km/h	tS	90	70	22	GW
16	2 Überfahrten, 10 km/h	S	70	50	29	RW

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Reduktion [%]	Entwicklung*
17	4 Überfahrten, 10 km/h	tS	90	50	44	GW
18	4 Überfahrten, 10 km/h	S	90	20	78	NA
19	4 Überfahrten, 10 km/h	S	90	20	78	RW
20	8 Überfahrten, 10 km/h	tS	90	20	78	RW
21	4 Überfahrten, 20 km/h	S	70	50	29	RW

*Begriffserläuterung: GW = geringe Wirksamkeit, RW = reduziertes Wachstum, NA = Neuaustrieb, RNA = reduzierter Neuaustrieb, VA = vollständig abgestorben.

Zunehmend verholzende Vegetation – mittlerer bis hoher Feinanteil

Im Weiteren wird die Wirksamkeit an einer zunehmend verholzenden bis verholzten Vegetation beschrieben (Tabelle 15). In diesen Versuchsabschnitten wuchsen neben krautigen Pflanzen vermehrt Brombeeren oder 1 bis 3-jährige Aufwüchse von Bäumen. Die Vegetation hatte vor der Behandlung eine durchschnittliche Wuchshöhe von 30 cm und vor allem die Bäume lagen durch die rein mechanische Behandlung der Strecke alle bei einer Wuchshöhe von bis zu 30 cm. Außerdem trat dieser Bewuchs über längere Abschnitte nur am Standort Vetschau auf, wodurch die Eigenschaften des hohen Feinanteils und eines stärker beschatteten Gleises bei der Auswertung zu berücksichtigen sind.

Die VD vor den Versuchen lag bei 50 bis 80 %. Eine geringere VD von beispielsweise 50 % wurde häufig in Abschnitten erfasst, die hauptsächlich mit Aufwüchsen von Bäumen besiedelt waren und somit nur einen geringen Teil der Oberfläche bedeckt war. Eine höhere VD wurde gemessen, wenn vermehrt Brombeeren mit einer großen Bedeckung der Oberfläche aufgetreten sind oder krautige Pflanzen und Gräser als Mischvegetation auftraten.

Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h nahm bei vier Überfahrten (Versuche 4, 5, 6) die VD insgesamt am stärksten um 75 bis 80 % ab und erreichte einen Wert von 10 bis 20 % Bedeckung. Hingegen war die Wirksamkeit bei nur zwei Überfahrten geringer und wurde nur um maximal 63 % reduziert. Bei acht Überfahrten wurde ebenfalls eine hohe Abnahme der VD erreicht, jedoch ist dies auch bereits bei vier Überfahrten eingetreten.

Mit einer höheren Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h wurde bei vier Überfahrten eine Reduktion der VD von maximal 63 % erreicht (Versuch 8, 9) und es kam häufiger zu einem NA der Pflanzen. Mit einer Verdopplung auf acht Überfahrten konnte eine geringere Bedeckung von 20 % erreicht werden und die Pflanzen zeigten einen RNA.

Tabelle 15: Wirkung des El bei zunehmend verholzender Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Reduktion VD [%]	Entwicklung*
1	2 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	70	30	57	NA
2	2 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	50	20	60	RNA
3	2 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	80	30	63	RNA
4	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	80	20	75	RNA
5	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	50	10	80	RNA
6	4 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	80	20	75	RNA
7	8 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	50	10	80	RNA
8	4 Überfahrten, 10 km/h	tS	80	40	50	NA
9	4 Überfahrten, 10 km/h	tS	80	30	63	NA
10	8 Überfahrten, 10 km/h	tS	70	20	71	RNA
11	8 Überfahrten, 10 km/h	tS	70	20	71	RNA

*Begriffserläuterung: NA = Neuaustrieb, RNA = reduzierter Neuaustrieb.

Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Vegetation durch den Einsatz des El in allen Fällen reduziert und stark geschädigt wurde. Bei niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten sind die Pflanzen häufig VA oder es wurde ein RNA festgestellt. Im Vergleich wurde bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ab 10 km/h die Vegetation weiterhin reduziert, jedoch zeigte sich häufiger ein erneuter Austrieb. Eine Begründung könnte sein, dass die Pflanzen nicht ausreichend berührt oder von anderen Pflanzenteilen bedeckt wurden. Dies ließ sich in einigen Fällen sehr gut erkennen, wie es beispielsweise in Abbildung 24 zu sehen ist.

Der Effekt der Behandlung bei Gräsern sowie verholzenden und verholzten Pflanzen war im Zeitraum der Bonitur deutlich zu erkennen, sodass ein erheblicher Wachstumsrückstand erzielt wurde. Außerdem bleibt festzuhalten, dass die Menge des Feinanteils und die VD einen Einfluss auf die Wirksamkeit des El hatte (Abbildung 25). Je höher der Feinanteil und die VD war, desto mehr Überfahrten wurden für ein ähnliches Ergebnis benötigt. Somit ist es sinnvoll die Dosierung an die Gegebenheiten anzupassen (Grünerkennung, Analyse der VD) oder im Zweifel immer die maximale Dosierung zu wählen, die alle Bedingungen abdeckt.



Abbildung 24: Links: Pflanzenteile mit direktem Kontakt abgestorben (braune Nadeln), bedeckte Pflanzenteile vital (grüne Nadeln). Rechts: Neuer Austrieb einer oberhalb abgestorbenen Birke.



Abbildung 25: Links: sonnenexponiertes Gleis, geringer Feinanteil, krautige Vegetation nach einer Überfahrt mit 2,5 km/h. Rechts: beschattetes Gleis, hoher Feinanteil, krautige Vegetation nach 4 Überfahrten mit 2,5 km/h (jeweils rechte Gleishälfte).

In einem Großgerät müssten entsprechend 4 bis 8 Einheiten hintereinander eingebaut werden, um bei einer Fahrgeschwindigkeit bis 10 km/h auf verschiedener Vegetation, unterschiedlicher VD und unterschiedlichem Feinanteil im Schotter einen ausreichenden Effekt des Einzelverfahrens erzielen zu können.

Ergebnisse der Versuche mit dem Ausleger

Zuletzt werden die Ergebnisse der Versuchsfahrten mit dem El am Ausleger kurz beschrieben. Allgemein ermöglicht der Ausleger die Behandlung einer größeren Arbeitsbreite und kann auf ebener Fläche, aber auch auf der Schotterflanke eingesetzt werden. Insgesamt zeigte die Anwendung des El am Ausleger die gleiche Wirkung wie die Applikator-Einheiten im Gleisrost. Die besten Ergebnisse wurden mit vier Überfahrten bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h erreicht und es wurden nur noch teilweise neu aufwachsende Einzelpflanzen bonitiert. Besonders freistehende Pflanzen mit vollständigem Kontakt mit den Applikatoren sind im Ganzen abgestorben. Aus dem Randbereich einwachsende Brombeeren und bis 30 cm hohe Bäume konnten mit acht Überfahrten bei 2,5 km/h wirksam behandelt werden. Jedoch zeigte sich, dass bei sehr dicht und groß gewachsenen Brombeerpflanzen, Bäumen oder Sträuchern keine ausreichende Wirkung mehr erzielen konnte und die Pflanzen überlebten. Dabei trat derselbe Effekt der Abdeckung dicht gewachsener Pflanzenteile ein wie in Abbildung 24 gezeigt.

Auswirkung des El auf Infrastrukturkomponenten

Das Verfahren kann allgemein im Großteil des Gleisbereichs eingesetzt werden, besonderes auf Betonschwellen und Schotter besteht keine Gefahr bei dem Einsatz, da die eingesetzte Leitflüssigkeit für Beton unschädliche Konzentrationen von Mineralsalzen enthält und die Bewegung der Schottersteine minimal ist. Der Abstand zu metallischen Komponenten wie Schienen, Weichen und Kreuzungen muss jedoch eingehalten werden, um Kurzschlüsse mit den Applikatoren zu vermeiden. Dieses Problem kann gegebenenfalls durch einzeln abschaltbare Elektroden reduziert werden, sodass diese Bereiche umgangen werden können.

Die genutzten VS enthielten keine elektrischen oder elektronischen Komponenten, welche die Erprobung einer Kompatibilität mit dem Verfahren ermöglicht hätten. Eine Prüfung der generellen Systemverträglichkeit sowie der EMV und möglicher Störaussendungen wurde bisher noch nicht durchgeführt. Die Nutzung des Verfahrens in anderen Studien lässt jedoch zumindest auf eine theoretische Machbarkeit in bestimmten Streckenbereichen schließen [7]. Vor einer Zulassung des Verfahrens müssen entsprechend Versuche zur Systemverträglichkeit durchgeführt werden, die jedoch abhängig vom Gerät und den gewählten Arbeitsparametern sind. Aktuell kann eingestuft werden, dass die für das hier entwickelte System gewählte Anwendung von Gleichstrom den Vorteil hat, keine Frequenzen zu erzeugen und daher nur ein geringes Störpotential aufweist.

Einzelverfahren – Druckwasser

Krautige Vegetation

Bei der Erprobung des Druckwassersystems wurde eine Düse zur Behandlung der Vegetation entlang der Schiene eingesetzt. Diese Düse wurde bei drei verschiedenen Winkeln von 30°, 35° bis 40° getestet. Entweder wurde ein Winkel beibehalten (eine Position) und damit durch eine oder mehrere Überfahrten die Wirkung mehrerer hintereinander verbauter Düsen dargestellt und die Schneidleistung auf einer Stelle erhöht. Oder die Position der Düse wurde bei jeder Überfahrt verstellt, sodass eine größere Fläche behandelt wurde (zwei bis drei Positionen). Wenn beispielsweise drei unterschiedliche Düsenpositionen getestet wurden, mussten entsprechend drei Überfahrten durchgeführt werden, da bei jeder Überfahrt die Düse mit einem anderen Winkel eingestellt wurde. In diesem Falle sind in der Tabelle 16 nur die Anzahl der Düsenpositionen aufgeführt. Außerdem wurden die Abrasivmittel Olivin, Basalt und Granatsand auf unterschiedliche Wirksamkeit getestet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirkung des Druckwasser bei krautigen Pflanzen insgesamt gut ausfiel, da am häufigsten eine niedrige VD von 15 % erreicht wurde und auch eine Reduktion auf 5 und 10 % erzielt werden konnte (Tabelle 16, Versuch 4, 12, 14). Diese Durchgänge wiesen auch die höchste Reduktion der VD um 75 bis 88 % auf. Bei einigen Durchgängen wurde die Vegetation nur geringfügig um 25 % reduziert, unter anderem bei Versuch 1 mit nur einer Düsenposition. Bereits während der Versuche wurde ersichtlich, dass nur eine Düsenposition eine zu geringe Wirkung erzeugte und dadurch dieser Parameter ausgenommen wurde und nur noch mit zwei oder drei Einstellungen des Winkels getestet wurde.

Tabelle 16: Wirkung des Druckwassers auf hauptsächlich krautiger Vegetation entlang der Schiene.

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Änderung VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
1	2,5 km/h, 1 Position, Olivin	S	40	30	20	15	25	-5	GW
2	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 1 Position, Basalt	S	30	20	15	10	33	-5	RW
3	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 1 Position, Olivin	kS	20	10	20	10	50	-10	RNA
4	2,5 km/h, 2 Positionen, Olivin	kS	20	5	20	10	75	-10	RNA
5	5 km/h, 2 Positionen, Olivin	S	35	30	20	15	14	-5	RW
6	5 km/h, 2 Positionen, Olivin	S	35	30	20	15	14	-5	RW
7	5 km/h, 3 Positionen, Olivin	S	25	15	20	20	40	0	RW

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Änderung VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
8	3 Überfahrten, 5 km/h, 2 Positionen, Olivin	S	25	15	20	20	40	0	RW
9	10 km/h, 2 Position, Olivin	S	20	15	15	10	25	-5	RW
10	10 km/h, 2 Position, Olivin	S	20	15	15	10	25	-5	RW
11	3 Überfahrten, 10 km/h, 2 Position, Olivin	S	50	15	20	15	70	-5	RW
12	10 km/h, 3 Position, Olivin	S	40	10	20	10	75	-10	RW
13	20 km/h, 3 Position, Olivin	S	30	15	15	15	50	-5	RW
14	20 km/h, 3 Position, Olivin	S	40	5	15	5	88	-10	RW

*Begriffserläuterung: GW = geringe Wirksamkeit, RW = reduziertes Wachstum, RNA = reduzierter Neuaustrieb.

Die Durchgänge mit drei Düsenpositionen erzeugten eine höhere Reduktion der VD. Dies ist damit zu begründen, dass eine größere Fläche einer krautigen Pflanze erfasst wurde und so generell mehr Pflanzenteile abgetrennt oder beschädigt wurden. Auch anhand der Wuchshöhe der Pflanzen nach den Versuchen ist erkennbar, dass die Pflanzen entweder vollständig oder nur teilweise erfasst wurden, da neben der Reduktion der Bedeckung auch eine Reduktion der allgemeinen Wuchshöhe entstand. Dennoch zeigte sich im Rahmen der Bonitur, dass manche Pflanzen nicht ausreichend geschädigt oder getroffen wurden und weiterwachsen konnten, wodurch die Wirksamkeit vor allem an sonnenexponierten Standorten mit einer reduzierten Wirkung (RW) bewertet wurde.

Lediglich in einem sehr schattigen Abschnitt auf dem Versuchsgleis Vetschau wurde bei Versuch 3 und 4 auch Wochen nach der Behandlung nur ein geringer Weiterwuchs festgestellt und mit einem RNA bewertet. Des Weiteren ist zu erkennen, dass unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit (2,5 bis 20 km/h) ebenfalls eine gleichbleibend hohe Wirksamkeit bei krautigen Pflanzen erzielt werden konnte. Dennoch war die Regeneration der Pflanzen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten stärker, da sie teilweise nicht ausreichend erfasst wurden und somit nachwachsen konnten. Eine unterschiedliche Wirkung der in diesem Durchgang eingesetzten Abrasivmittel Olivin und Basalt ließ sich nicht erkennen. Insgesamt wurde ein gleichbleibend gutes Ergebnis mit Olivin erreicht und daher kein Wechsel des Abrasivmittel vorgenommen.

Verholzende bis verholzte Pflanzen

In den Versuchsbereichen mit verholzenden bis verholzten Pflanzen wurden vor allem Ausläufer von Brombeeren und verschiedene Aufwüchse von Bäumen behandelt. Die Dicke der Brombeerranken sowie der Bäume reichte von rund 4 mm bis zu 20 mm. Daher wurde in diesen Versuchsbereichen

die Düse hauptsächlich mit einer Position getestet, damit weniger eine große Fläche wie bei den empfindlicheren krautigen Pflanzen abgedeckt wurde, sondern sich die Wirkung auf eine Stelle konzentrierte. Außerdem lag der Fokus auf einer niedrigen Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h in allen Versuchen, um die Schneidleistung des Druckwasserstrahls zu verstärken (Tabelle 17).

Tabelle 17: Wirkung des Druckwassers bei zunehmend verholzender Vegetation entlang der Schiene.

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
1	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 1 Position, Olivin	tS	60	40	25	15	33	-10	GW
2	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 1 Position, Olivin	tS	70	60	35	30	14	-5	GW
3	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 1 Position, Olivin	tS	70	50	20	15	29	-5	GW
4	2 Überfahrten, 2,5 km/h, 1 Position, Granat	tS	50	20	20	15	60	-5	GW
5	2,5 km/h, 2 Positionen, Olivin	tS	60	40	25	15	33	-10	GW

*Begriffserläuterung: GW = geringe Wirksamkeit.

Insgesamt zeigte sich, dass die VD in allen Fällen abnahm, dies aber häufig durch das Abtrennen von Blättern entstand. Nur wenig Effekt zeigte sich daher bei der Reduktion der Wuchshöhe, da die Stämme in fast allen Fällen stehen blieben. Bis zu einer Dicke von ca. 10 mm konnten verholzte Pflanzenteile bei zweifacher Überfahrt abgetrennt werden. Mit zunehmendem Durchmesser wurden die Stämme tief eingeschnitten, aber nicht mehr abgetrennt (Abbildung 26). Daraus resultierte nur bei Einzelpflanzen eine ausreichende Schädigung, wodurch der Effekt der Behandlung nach der Bonitur auf eine GW eingestuft wurde.

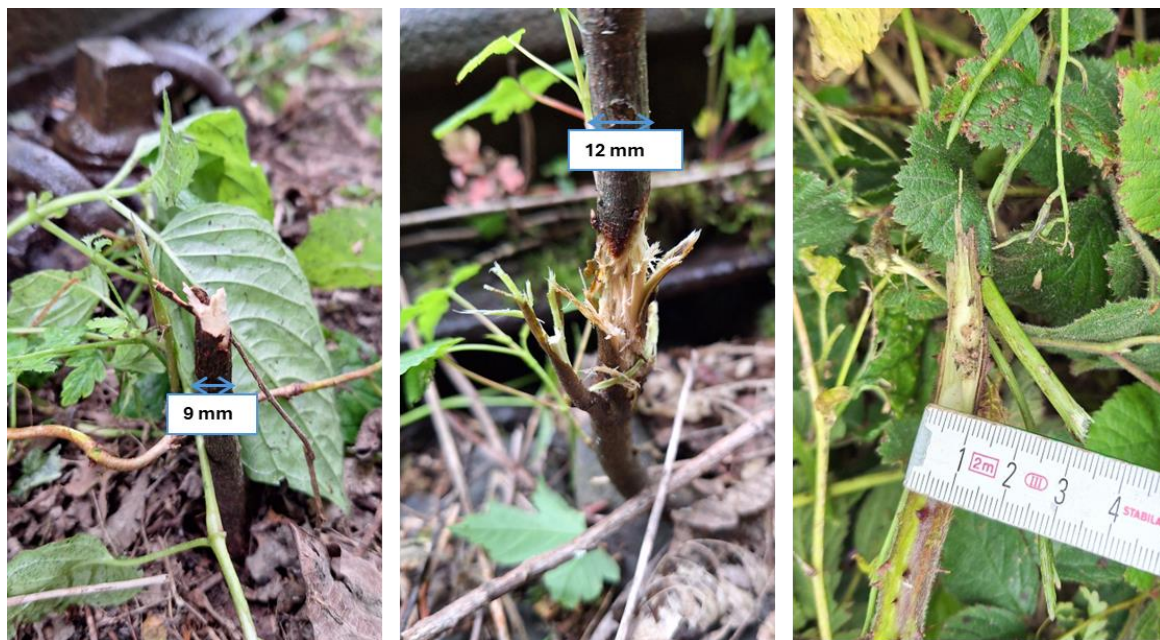


Abbildung 26: Links: durchtrennter Stamm (9 mm), Mitte: teilweise durchtrennter Stamm (12 mm). Rechts: durchtrennte Brombeerranke (10 mm). Alle mit 2 Überfahrten bei 2,5 km/h.

Die Verwendung von Granatsand als Abrasivmittel zeigte in einem Durchgang im Vergleich zum hauptsächlich eingesetzten Olivin eine bessere Wirkung (Versuch 4). Dieser Effekt war aber nicht eindeutig auf das Abrasivmittel zurückzuführen, da die Schneidleistung von Olivin ebenso effektiv war. Die höhere Abnahme der VD kann in dem Einzelversuch auf Unterschiede in der Vegetation zurückzuführen sein. Da Olivin und Basalt preiswerter und lokal produziert werden können, sind diese im Hinblick der Nachhaltigkeit vorzuziehen.

Fazit

Insgesamt zeigte sich bei der Anwendung des Druckwassersystems, dass Pflanzen die nah an dem Schienenfuß gewachsen sind und nicht von den beiden anderen Verfahren erfasst wurden, gut mit diesem Verfahren reduziert werden konnten. Bei einer krautigen Vegetation erwies es sich als wirksam, zwei bis drei verschiedene Winkelpositionen der Düse einzustellen, um eine größere Fläche und damit einen Großteil der Pflanzen erfassen zu können. Außerdem zeigte sich, dass das Abrasivmittel im Druckwasserstrahl eine gewisse Streuwirkung hatte und neben dem Fokus des auftreffenden Strahls auch ein Streukegel entstand, wodurch weitere Pflanzenteile indirekt geschädigt wurden.

Bei einer zunehmend verholzenden Vegetation mit dickeren Stämmen und Ranken war hingegen eine bessere Wirkung bei gleichbleibender Winkelposition erzielt worden. So konnte die Wirkung des Schneidens auf einer Stelle mit zwei bis drei Überfahrten erhöht und Pflanzenteile bis zu 10 mm Dicke durchtrennt werden. Mit zunehmendem Durchmesser wurden die Pflanzenteile teilweise stark geschädigt, sodass sich die Pflanze zunächst nicht weiter entwickeln konnte.

Entsprechend müssen für die Anwendung in einem Großgerät bei einer einzelnen Überfahrt zwölf Düsen eingebaut werden, um mit einer Fahrgeschwindigkeit bis 10 km/h die Vegetation entlang der Schienen (innen und außen) behandeln zu können. Die Leistung würde bei verschiedener Vegetation (krautig bis verholzt) und unterschiedlicher VD einen ausreichenden Effekt erzielen.

Auswirkung des Druckwassers auf Infrastrukturkomponenten

Bei diesem Alternativverfahren war eine direkte Schadensanalyse von Infrastrukturkomponenten nach den Fahrten zu beobachten und konnte damit im Rahmen der Versuchsfahrten untersucht werden. Dafür wurden Kabelstücke eines Signalkabels (Durchmesser 20 mm) mit einer Isolierung aus Polyethylen im Versuchsbereich ausgelegt und nach den Überfahrten betrachtet. In den Versuchen wurde der Schutzmantel des Kabels um ca. 2 mm Tief aufgeraut und somit besteht unter den gewählten Versuchsparametern ein Potential zur Beschädigung freiliegender Kabel im Gleis (Abbildung 27). Auch die Bereiche auf denen der Druckwasserstrahl auf die Schiene, die Schwellen oder den Schotter aufkam wurden nach den Fahrten untersucht. Dabei zeigte sich, dass die oberste Rostschicht der Schiene teilweise abgetragen wurde, auf Betonschwellen der Belag aus Schmutz und Moos entfernt wurde und auf älteren Holzschwellen Einschnitte bis zu 3 mm Tiefe zu erkennen waren. Auf Strecken mit Holzschwellen könnte als vorbeugende Maßnahme der Wasserstrahl ohne Abrasivmittel genutzt werden, um dadurch das Potential zur Beschädigung zu reduzieren. Auf dem Schotter war ebenfalls eine Spur entlang des Druckwasserstrahls erkennbar, aber insgesamt kam es während der Anwendung zu keinem ersichtlichen Schotterflug. Lediglich bei viel Feinmaterial und Splitt wurden Teile davon hochgeschleudert.



Abbildung 27: Links: Schnitt im Schutzmantel des Kabels, Mitte: abgetragenes Moos auf Betonschwelle. Rechts: Spuren des Druckwasserstrahls auf Schottersteinen.

Druckwasser im Weichenbereich

Da das Druckwasserverfahren außerdem als einziges Verfahren der ausgewählten Alternativverfahren die Möglichkeit bietet, im Weichenbereich zu arbeiten, wurde dieser Einsatz getestet. Es zeigte sich, dass prinzipiell der Wasserstrahl zielgenau im Weichenbereich ausgerichtet werden kann (Abbildung 28), um dort aufwachsende Vegetation zu entfernen. Jedoch bleibt zu berücksichtigen, dass der Wasserstrahl im Bereich der Spitze der Weichenzunge und den dazwischenliegenden Schmierstellen abgeschaltet oder abgeschirmt werden muss, um eine Abtragung des Schmiermittels zu verhindern. Ein serienreifes System müsste eine solche Funktion verfügen, um auch im Stand, beim Hochfahren des Systems oder in Bereichen mit kritischer Infrastruktur keine Schädigung zu erzeugen.



Abbildung 28: Einsatz des Druckwasserstrahls im Weichenbereich.

7.2.2 Auswertung der Ergebnisse der Verfahrenskombination

Auf Basis der Auswertung der Einzelversuche wurden die wirksamsten Parameterkombinationen ausgewählt und für die Kombination der Verfahren zusammengebracht. Die Kombinationen wurden dann in Versuchsabschnitten mit allen zuvor ebenfalls genutzten Eigenschaften getestet. Der Ablauf der Versuche erfolgte immer zuerst mit dem Einsatz des MJ zur Reduktion der Wuchshöhe und teilweise der VD. Für das MJ wurden die Parameter weitestgehend beibehalten und nur zwischen zwei Überfahrten bei 2,5 km/h mit 200 1/min sowie zwei Überfahrten bei 5 km/h und 300 1/min unterschieden. Der Grund dafür war, dass die Wirksamkeit bei den beiden gewählten Einstellungen zuverlässig funktionierte und somit immer eine ähnliche Vorbereitung der Versuchsflächen ermöglicht wurde. Im zweiten Schritt wurde dann die Versuchsfläche mit dem El behandelt. Die Parameter für das El variierten zwischen Geschwindigkeiten von 2,5 km/h, 10 km/h und 20 km/h sowie der Anzahl an Überfahrten zwischen 1, 2, 4 und 8.

Die Kombination mit Druckwasser erfolgte nicht direkt aufeinanderfolgend, da die Anwendung unabhängig von den anderen beiden Verfahren in einem anderen Bereich genutzt wird. Die Parameter

für die Erprobung vom Druckwasser sind daher nur die der Einzelversuche für das Verfahren und somit hier nicht nochmal aufgeführt.

Bei der Anwendung der Kombination der drei Alternativverfahren traten keine negativen Wechselwirkungen zwischen diesen auf. So beeinflusst das MJ beispielsweise das El nur positiv durch die Reduktion der Vegetation. Auch zwischen dem El und dem Druckwasser gab es keinen negativen Effekt, da der Druckwasserstrahl nur lokal entlang der Schiene eingesetzt wird, in dem das El nicht zur Anwendung kommt. Außerdem werden nur geringe Wassermengen ausgebracht, wodurch keine Gefahr besteht, dass der mit Druckwasser behandelte Bereich das El beeinträchtigt.

Anwendung der Kombination bei krautiger Vegetation mit niedrigem Feinanteil

Die Versuchsabschnitte befanden sich auf einem sonnenexponierten Gleis mit einer niedrigen krautigen Vegetation und einem geringen Feinanteil. Die Versuchsabschnitte wurden zunächst einheitlich bei 5 km/h mit zwei Überfahrten und 300 l/min mit dem maschinellen Jäten vorbereitet und anschließend das El bei einer Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h und einer aufsteigenden Anzahl an Überfahrten behandelt (Tabelle 18).

Auf den Versuchsabschnitten trat eine gleichmäßige VD von 20 % auf, die nach den Versuchen auf 5 bis 10 % zurückging. Die verbliebene Vegetation bestand aus Einzelpflanzen, die einen RNA aufwiesen und bis zum Ende der Bonitur auf etwa 10 cm nachgewachsen sind (vor allem Gräser). Aus den Versuchen geht hervor, dass mit dem vorherigen maschinellen Jäten und zwei Überfahrten mit dem El eine niedrige verbleibende VD erreicht wurde. Mit einer Erhöhung des El auf vier Überfahrten konnte die Wirksamkeit verbessert werden, nahm bei acht Überfahrten aber nicht weiter zu.

Tabelle 18: Wirkung der Kombination (MJ und El) bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem niedrigen Feinanteil.

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
1	MJ: 2 Überfahrten, 5 km/h, 300 l/min El: 2 Überfahrten 10 km/h	S	20	10	25	15	50	-10	RNA
2	MJ: 2 Überfahrten, 5 km/h, 300 l/min El: 4 Überfahrten 10 km/h	S	20	5	30	10	75	-20	RNA
3	MJ: 2 Überfahrten, 5 km/h, 300 l/min El: 8 Überfahrten 10 km/h	S	20	5	25	10	75	-15	RNA

*Begriffserläuterung: RNA = reduzierter Neuaustrieb.

Anwendung der Kombination bei krautiger Vegetation mit einem mittleren bis hohen Feinanteil

In der nächsten Übersicht der Daten (Tabelle 19) setzte sich die Vegetation weiterhin hauptsächlich aus krautigen Pflanzen zusammen mit einer hohen VD von 80 bis 90 %, einer mittleren Wuchshöhe der Pflanzen von 30 cm und einem mittleren bis hohen Feinanteil. Die Parameter des El wurden zwischen 2,5 km/h mit einer und zwei Überfahrten, 10 km/h mit zwei und vier Überfahrten und 20 km/h mit vier Überfahrten variiert.

Tabelle 19: Wirkung der Kombination (MJ und El) bei krautiger Vegetation in einem Schotterbett mit einem mittleren bis hohen Feinanteil.

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
1	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 1 Überfahrt, 2,5 km/h	S	80	60	25	20	25	-5	RW
2	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 1 Fahrt, 2,5 km/h	kS	90	10	45	5	89	-40	RNA
3	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h	S	80	60	25	20	25	-5	RW
4	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h	kS	90	5	45	5	94	-40	RNA
5	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h	S	50	30	20	20	40	0	NA
6	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h	S	90	20	30	20	78	-10	NA
7	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 10 km/h	S	80	60	30	15	25	-15	NA
8	MJ: 2 Überfahrten, 5 km/h, 300 1/min	tS	90	20	40	5	78	-35	RNA

	Parameter	Beschattung	Ø VD vor [%]	Ø VD nach [%]	Ø PH vor [cm]	Ø PH nach [cm]	Reduktion VD [%]	Änderung PH [cm]	Entwicklung*
	El: 2 Überfahrten, 10 km/h								
9	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 4 Überfahrten, 10 km/h	S	90	40	30	20	56	-10	NA
10	MJ: 2 Überfahrten, 5 km/h, 300 1/min El: 4 Überfahrten, 10 km/h	tS	90	30	40	10	67	-30	NA
11	MJ: 2 Überfahrten, 5 km/h, 300 1/min El: 4 Überfahrten, 10 km/h	S	90	30	40	20	67	-20	RW
12	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 4 Überfahrten, 20 km/h	S	80	60	30	15	25	-15	NA

*Begriffserläuterung: RW = reduziertes Wachstum, NA = Neuaustrieb, RNA = reduzierter Neuaustrieb.

Trotz einer hohen VD vor den Versuchen konnte durch die Kombination in den Versuchen 2, 4, 6 und 8 eine erhebliche Reduktion von über 78 % erreicht werden, sodass die VD bis unter 20 % fiel. Auffällig hierbei ist, dass im Vergleich zu allen anderen Versuchsergebnissen dies vor allem in den deutlich beschatteten Gleisabschnitten eingetreten ist und die sonnenexponierten Versuchsabschnitte insgesamt eine geringere Reduktion aufwiesen. Auch zeigte sich, dass in den beschatteten Abschnitten die Vegetation nur geringfügig wieder nachgewachsen ist, während in den sonnenexponierten Abschnitten die Vegetation tendenziell stärker wieder ausgetrieben ist.

Nach der Bonitur zeigte sich, dass einzelne Pflanzen im Versuchsabschnitt weitergewachsen sind und für eine verbliebene VD von 5 % sorgten. Die häufig nach der Behandlung verbliebenen Pflanzen waren einzelne verholzte Pflanzen, wie die Hundsrose (*Rosa canina*), die häufig bonitierten Ahorn-Arten (*Acer spec.*), Brombeeren und Gräser, die eine starke Regenerationsmöglichkeit aufwiesen. Das bedeutet, dass durch den heterogenen Bewuchs des Gleisbereichs auch in einem krautigen Abschnitt verholzende bis verholzte Pflanzen auftraten und somit diese bei der angepassten Dosierung für krautige Pflanzen vereinzelt überleben konnten.

Anwendung der Kombination bei zunehmend verholzender bis verholzter Vegetation mit einem mittleren bis hohen Feinanteil

Zuletzt erfolgte die Erprobung der Kombination auch in den zunehmend verholzenden Versuchsbereichen (Tabelle 20). Die Vegetation in den Versuchsbereichen bestand hauptsächlich aus Brombeeren, ein- bis dreijährigen Aufwüchsen von Bäumen und vereinzelt aus krautigen Pflanzen.

Tabelle 20: Wirkung der Kombination (MJ und El) bei zunehmend verholzender Vegetation in einem Schotterbett mit mittleren bis hohen Feinanteil.

	Parameter	Beschattung	Ø V D vor [%]	Ø V D nach [%]	Ø P H vor [cm]	Ø P H nach [cm]	Änderung V D [%]	Änderung P H [cm]	Entwicklung*
1	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 1 Überfahrt, 2,5 km/h	tS	90	20	45	5	78	-40	RNA
2	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 1 Überfahrt, 2,5 km/h	kS	80	20	30	5	75	-25	RNA
3	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h	tS	90	20	45	5	78	-40	RNA
4	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h	kS	80	20	30	5	75	-25	RNA
5	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 10 km/h	tS	70	30	35	15	57	-20	NA
6	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 10 km/h	kS	70	20	30	10	71	-20	RNA
7	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 4 Überfahrten, 10 km/h	tS	70	20	35	15	71	-20	RNA
8	MJ: 2 Überfahrten, 2,5 km/h, 200 1/min El: 4 Überfahrten, 10 km/h	kS	60	10	30	5	83	-25	RNA

*Begriffserläuterung: NA = Neuaustrieb, RNA = reduzierter Neuaustrieb.

Ausgehend von einer VD von über 60 % zeigten alle Behandlungen eine Reduktion der VD auf größtenteils 20 %. Die durchschnittliche Wuchshöhe der Pflanzen lag im Mittel bei 5 bis 15 cm. Zu berücksichtigen ist, dass es sich hierbei um einen Mittelwert (MW) handelt. Die Stämme der Bäume blieben größtenteils auch nach der Anwendung der Kombination im Gleis erhalten und hatten eine Höhe von rund 20 cm. Nach dem Boniturzeitraum wiesen die Bereiche lediglich einzelne NA krautiger Pflanzen auf und bei einzelnen Bäumen trieb neues Laub aus.

Einsatz des Druckwassers in der Kombination

Nach einem Einsatz der Kombination des MJ mit dem El wurde der Großteil der Flächen im Gleis behandelt und die Wuchshöhe und die VD reduziert. Als weitere Kombination diente dann die Anwendung des Druckwasserverfahrens. Es zeigte sich, dass vor allem auf den zuvor behandelten Flächen mit der Kombination die Wirksamkeit des Druckwassers verbessert war. Dies lag vermutlich daran, dass nur noch vereinzelt Pflanzen entlang der Schiene wuchsen und der Wasserstrahl diese ungehindert erfassen konnte. War der Bereich hingegen stark bewachsen, so wurde die Leistung des Druckwasserstrahls durch davorliegende Vegetation geschwächt und die eigentlichen Pflanzen nahe der Schiene nicht ausreichend behandelt. Außerdem ist die Vegetation in den danebenliegenden unbehandelten Bereichen weitergewachsen und hat nach kurzer Zeit den schmalen behandelten Bereich erneut überwachsen.



Abbildung 29: Links: Großflächige Behandlung mit dem MJ und El (noch ohne Druckwasser). Rechts: Bereich zusätzlich mit Druckwasser entlang der rechten Schienenaußenseite.

In Abbildung 29 ist beispielhaft das Ergebnis einer behandelten Fläche der Kombination aller drei Verfahren dargestellt. Das linke Bild zeigt die Versuchsfläche nach der Anwendung der Kombination

aus maschinellem Jäten und El und es ist zu erkennen, dass die Bereiche entlang der Schiene aufgrund des Mindestabstands nicht von den Verfahren erfasst wurden. Das rechte Bild zeigt dann den Unterschied nach der Behandlung mit Druckwasser vier Wochen nach der Anwendung der anderen beiden Verfahren. Hierbei wurde zum Vergleich nur auf der Außenseite der Schiene das Druckwasserverfahren eingesetzt und es zeigt sich ein deutlicher Unterschied im Vergleich zur Innenseite der Schiene.

7.2.3 Anwendungsempfehlungen der Parameterkombinationen

Nach der Erprobung der Kombination der Verfahren zeigte sich, dass jedes Verfahren einzeln seine Stärken und Schwächen hat. Durch die Kombination der Verfahren konnten die Eigenschaften kombiniert werden und eine Steigerung der Wirksamkeit hervorgerufen werden. Jedoch zeigte sich im Allgemeinen, dass die Verfahren nicht pauschal mit einer Parameterkombination in der heterogenen Gleisumgebung eingesetzt werden können. Daher sind im Folgenden (Tabelle 21) aufgeführt, welche Parameterkombinationen am wirksamsten bei den verschiedenen Pflanzengruppen und Gleisumgebungen wirkten.

Tabelle 21: Liste der wirksamsten Parameterkombinationen für jedes Alternativerfahren in häufig auftretenden Gleisumgebungen.

Pflanzengruppe, Feinanteil, VD	Maschinelles Jäten	El	Druckwas- ser	Kombination
Krautig, niedriger Feinan- teil, niedrige VD	2 Überfahr- ten, 2,5 km/h, 200 1/min	4 Überfahr- ten, 2,5 km/h	3 Düsen- pos., 1 Über- fahrt, bis 10 km/h	MJ: 2 Überf., 2,5 km/h, 200 1/min El: 2–4 Überfahrten, 2,5 km/h DW: 3 Düsenpositionen, 1 Überf.
	2 Überfahr- ten, 5 km/h, 300 1/min	4 Überfahr- ten, 10 km/h		MJ: 2 Überf., 5 km/h, 300 1/min El: 2–4 Überfahrten, 10 km/h DW: 3 Düsenpositionen, 1 Überf.
Krautig, hoher Feinanteil, hohe VD	2 bis 4 Überf., 2,5 km/h, 200 1/min	4 Überfahr- ten, 2,5 km/h	3 Düsen- pos., 1 Über- fahrt,	MJ: 2 Überf., 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h DW: 3 Düsenpositionen, 1 Überf.

Pflanzengruppe, Feinanteil, VD	Maschinelles Jäten	El	Druckwas- ser	Kombination
	4 Überfahr- ten, 5 km/h, 300 1/min	4 Überfahr- ten, 10 km/h	bis 10 km/h	MJ: 2 Überf., 5 km/h, 300 1/min El: 2–4 Überfahrten, 10 km/h DW: 3 Düsenpositionen, 1 Überf.
Gräser, beliebig, beliebig	4 Überfahr- ten, 2,5 km/h, 200 1/min	4 Überfahr- ten, 2,5 km/h	3 Düsen- pos., 1 Über- fahrt, bis 10 km/h	MJ: 2 Überf., 2,5 km/h, 200 1/min El: 4 Überfahrten, 2,5 km/h DW: 3 Düsenpositionen, 1 Überf.
Verholzend bis ver- holzte Pflanzen, beliebig, beliebig	2 Überfahr- ten, 2,5 km/h, 100 1/min	4 Überfahr- ten, 2,5 km/h	1 Düsen- pos., 2–3 Überf., 2,5 km/h	MJ: 2 Überf., 2,5 km/h, 200 1/min El: 2 Überfahrten, 2,5 km/h 1 Düsenposition, 2–3 Über- fahrten
	4 Überfahr- ten, 5 km/h, 300 1/min	8 Überfahr- ten, 10 km/h		MJ: 2 Überf., 2,5 km/h, 200 1/min El: 4 Überfahrten, 10 km/h 1 Düsenposition, 2–3 Über- fahrten

*Begriffserläuterung: Überfahrten teilweise mit Überf. und Düsenposition mit Düsenpos. abgekürzt.

Die Pflanzengruppen teilen sich weiterhin in krautige und zunehmend verholzende und verholzte Pflanzen auf, zusätzlich werden auch Gräser gesondert betrachtet. Bisher sind die Gräser in den Ergebnissen der Versuche in der Gruppe der krautigen Pflanzen zusammengefasst. Außerdem basiert die Empfehlung auf der Berücksichtigung der VD und dem Feinanteil. Bisher lassen sich die Verfahren mit einer gesicherten Funktion und Wirksamkeit bei Fahrgeschwindigkeiten bis 10 km/h bestätigen. Die Anwendung des Druckwassers kann aber auch bereits bei einer niedrigen VD und einer krautigen Vegetation bei 20 km/h arbeiten.

7.2.4 Geräuschentwicklung des Versuchssystems

Neben der Wirksamkeit des Versuchsträgers zur Vegetationskontrolle wurde auch eine Messung der Geräuschentwicklung durchgeführt. Diese Messung liefert wichtige orientierende Aussagen für die Bereiche Arbeitsschutz, Lärmemission/Immission und Vergrämung von Tieren im Gleisbett. Um

erste Aussagen zur Lärmemission des Versuchsträgers treffen zu können, wurden orientierende Messungen am Versuchsgleis des ifs in verschiedenen Betriebszuständen mit dem fahrenden System aus Zugfahrzeug und Trägermodul durchgeführt. Soweit nicht anders vermerkt, befand sich das Messgerät (Sauter Schallpegelmessgerät-sw-1000) 5 m seitlich der Gleismittelachse in 1,5 m Höhe über der Gleisoberkannte, was Mitarbeitenden in sicherem Abstand zum Fahrzeug im Gleis nahekommt. Dies entspricht einem Vorgehen der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (LärmVibrationsArbSchV), bei der die Lärmexposition am tatsächlichen Arbeitsplatz gemessen wird [86]. Im Vergleich zu den in den Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) Noise geforderten Messung der Grenzwerte ist der Abstand um 2,5 m näher gewählt [87].

Es wurde die Schallausbreitung quer zur Fahrtrichtung gemessen (Abbildung 30). Nur die besonderen Messungen für die Tiervergrämung wurden in 60 cm Höhe über dem Gleis gegen die Fahrtrichtung mit 1,5 m Abstand zur Gleismitte bei einer Fahrzeugannäherung bis auf 5 m gemessen. Es wurden bei den Vorbeifahrten Schalldruckmessungen zur Ermittlung von dB(A) Werten mit einer Mittelung über 2 s durchgeführt und jeweils der höchste Wert für die Auswertung übernommen. Dies entspricht in Grundzügen dem Maximalpegel beim Messverfahren des EBA [88]. Die Mikrofonaufzeichnungen wurden in Frequenzspektren grafisch umgesetzt [89].

Die Hintergrundgeräusche auf dem Seitengleis neben einem Personenbahnhof schwankten zwischen 51 und 59 dB(A), selbst anführende moderne Triebzüge erreichten nicht mehr als 69 dB(A).

Alle im Betrieb des Systems relevanten Geräuschquellen, bestehend aus

- Zugfahrzeugen,
- Fahrgeschwindigkeiten von 2 bzw. 5 km/h,
- Stromgeneratoren,
- Elektromotoren,
- Stromapplikatoren auf dem Gleis und
- mechanischem Jäten,

überschritten einzeln die Marke von 75 dB(A) und erreichten gemeinsam 88 dB(A). Abgesenkte Metallapplikatoren des EL und des MJ allein erreichten jeweils 80 dB(A).

Die Anbringung eines zusätzlichen aktiven Lärmerzeugers vorne am Fahrzeug wurde als Modell für die Vergrämung von Tieren, insbesondere von Eidechsen, eingebaut. Diese Einheit aus optimierten Blechelementen führte in 5 m Abstand frontal vor dem Fahrzeug bereits einzeln gemessen zu einem Schallpegel von 78,1 dB(A) und damit fast zum gleichen Wert wie das Gesamtfahrzeug mit voller Funktionsaktivität bei 78,8 dB(A). Direkt am Wirkort auf dem Schotter ist mit einem sehr breiten Schallspektrum im Bereich von ≥ 100 dB(A) zu rechnen.



Abbildung 30: Gesamtsystem aus Zugfahrzeug und Geräteträger (links), Vergrämungseinrichtung vorne am Zugfahrzeug aus lautstärkemaximierten Metalllamellen (rechts).

Aspekt Arbeitsschutz

Als Bezugswerte für die Geräuschbewertung werden der untere Auslösewert des Tages-Lärmexpositionspegels für Maßnahmen bei 80 dB(A) und der obere bei 85 dB(A) genutzt. Ab 85 dB(A) ist mit einer Beeinträchtigung des Hörvermögens zu rechnen. Zur weiteren Orientierung werden die Werte 70 dB(A) (Tätigkeiten mit mittlerer Konzentration und Sprachverständlichkeit) und 55 dB(A) (Tätigkeiten mit hoher Konzentration und Sprachverständlichkeit) genutzt. [90]

Generell ist klar, dass spätere Seriengeräte wegen der technisch bedingten Überschreitung der 80 dB(A) des Gerätes so weit wie möglich lärmgedämmt werden sollten, auch wenn im Normalbetrieb kein Mensch neben den Geräten läuft und die fahrende Person im Normalfall in einer Schallisolierenden Kabine sitzt. Eine Geräuschdämmung zu den Seiten, nach oben und hinten ist innerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie problemlos möglich, nach vorne und hinten müssen die Öffnungen jeweils etwas höher als die Unterkante der Fahrzeugbegrenzungslinie sein, um ggf. höhere Pflanzen nicht vorab herunterzudrücken.

Aspekt Lärmemission

Die oben genannten Werte entsprechen in Grundzügen dem Maximalpegel des vom EBA angewendeten Messverfahrens [88]. Die für die Genehmigung von Emissionen wichtigen Werte sind jedoch Mittelungspegel, die über ganze Tage oder Nächte berechnet werden. Dementsprechend sind die Daten nicht direkt vergleichbar. Da die Vegetationskontrolle nur wenige Male pro Jahr stattfindet und damit nur einen kleinen Anteil am Mittelungspegel bekommen kann, ist davon auszugehen, dass ein aus Arbeitsschutzgründen geräuschminimiertes Gerät im Betrieb kein relevantes Lärmproblem darstellen wird, selbst wenn es nachts fährt. Vorbeifahrpegel von über 80 dB(A) und Maximalpegel von über 90 dB(A) kommen auch im normalen Bahnverkehr (noch) vor [88, 91]. Darüber hinaus wurden bisher aufgrund der versuchsbezogenen Anordnung des Versuchsträgers noch keine Lärmschutzmaßnahmen unternommen. Es ist zu erwarten, dass das Vorbeifahrgeräusch in Arbeitsstellung dadurch unter die geltenden Grenzwerte gebracht werden kann.

Zu beachten ist auch, dass die unten näher erläuterte zusätzliche Lärmquelle zur Tiervergrämung nachts abgestellt werden kann, wenn man davon ausgeht, dass die Tiere nicht auf dem Schotter schlafen, sondern ihn am Tag zum Aufwärmen nutzen [54].

Aspekt Tiervergrämung

Die technische Vergrämung erfolgt durch zusätzliche Schleifbleche vorne am Fahrzeug. Sie erlaubt den Eidechsen eine höhere Fluchtzeit aus dem Schotterbett oder tief ins Schotterbett hinein [54]. Je nach Zuglänge können hier die Fluchtzeiten verlängert werden. Fluchtzeiten von beispielsweise 2,5 s (7 m Abstand Vergrämungseinheit vom Zugfahrzeug zum Arbeitsgerät bei 10 km/h) und z. B. 4,5 s (50 m Abstand bei Spritzzügen mit Lokomotive und Versorgungswagen bei 40 km/h) können problemlos erreicht werden.

Da z. B. Eidechsen nur noch auf vom Normalbetrieb abweichende Geräusche mit Flucht reagieren [54], wurde zusätzlich das Geräuschespektrum bewertet und grafisch dargestellt (Abbildung 31).

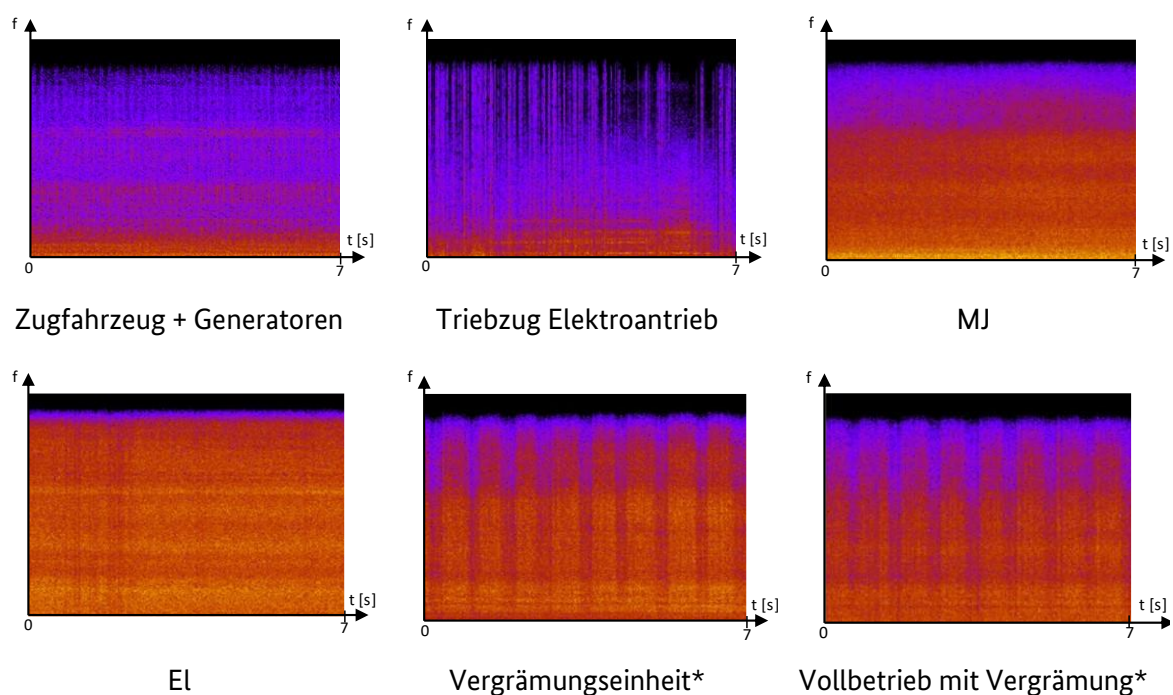


Abbildung 31: Grafische Darstellung der Schallspektren. Y-Achse: Frequenz steigend, X-Achse: zeitlicher Verlauf der Geräusche (*Messung von vorne mit ca. 5 m Abstand). Die Schallintensität wird als Heatmap mit steigender Intensität in den Farben schwarz-gelb-orange-rot-violett dargestellt.

Abbildung 31 zeigt, dass insbesondere das Geräuschespektrum der Metallapplikatoren deutlich von allen anderen vorkommenden Geräuschen abweicht. Die Vergrämungseinheit liefert außerdem zusätzlich ein besonders rhythmisiertes Signal durch den Wechsel von Schwelle und Schotter.

Die grafische Darstellung bestätigt den subjektiven akustischen Eindruck, dass sich insbesondere die Geräusche von El und Vergrämungseinheit deutlich vom normalen Zugverkehr unterscheiden. An der Schotteroberfläche muss mit Schalldruckpegeln von über 100 dB(A) gerechnet werden, da schon

bei 5 m Abstand ≥ 80 dB(A) gemessen wurde. Gerade hohe Frequenzen beim El und eine zusätzliche Rhythmisierung durch Schotter und Schwellen bei der Vergrämungseinheit unterscheidet die Geräusche von den Lärmquellen im normalen Betrieb.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die noch nicht eingehausten Behandlungseinheiten in den orientierenden Messungen Lärmpegel bis 87,7 dB(A) erreichten und damit über allen Auslösewerten lagen. Eine Lärminderung ist technisch jedoch insbesondere durch weitgehende Einhausung möglich. Dadurch ist absehbar, dass auch Emissionswerte so weit minimiert werden, dass die Einheiten bedingt durch die seltenen Fahrten zur Vegetationskontrolle keinen relevanten Anteil zu den Mittelungspegeln liefern. Für die Tiervergrämung stehen am Boden erzeugbare Geräuschquellen zur Verfügung, die sich sehr deutlich vom normalen Fahrbetrieb unterscheiden und vergrämend wirken können. Ein relevantes Lärmproblem wird absehbar von den verbauten Alternativverfahren nicht ausgehen.

7.2.5 Abschätzung des Risikopotentials der Verfahren auf im Gleisbereich lebende Tiere

Die in Kapitel 3 vorgestellte orientierende Betrachtung der Verhaltensmuster der Tiere zeigte anhand der verfügbaren Literaturdaten, dass die Wahrscheinlichkeit eines Zusammentreffens zwischen der Anwendung von Alternativverfahren zur Vegetationskontrolle und den zu schützenden Tieren als gering angesehen werden kann. Diese Aussage steht vor dem klaren Hintergrund, dass konkrete empirische Daten für das Verhalten der Tiere bei der Vegetationskontrolle fehlen und auch für eine Extrapolation nur wenige Daten stringent zur Verfügung stehen. Durch das Scheue Verhalten der Tiere, erscheint allgemein eine Vertreibung der Tiere aus dem Arbeitsbereich ein erfolversprechender Ansatz zur Minimierung der Wahrscheinlichkeit des Zusammentreffens zu sein. Somit könnten spezifische Warnsignale während der Vegetationskontrolle mit den Alternativverfahren eingesetzt werden, die sich vom normalen Eisenbahnbetrieb abgrenzen. Die im Projekt genutzte Vergrämungseinheit an der Fahrzeugfront erzeugte dabei die gleisuntypischen Geräusche, wie sie während der Lärmpegelmessung im vorherigen Kapitel 7.2.4 beschrieben wurden.

Allgemein sind derartige Annahmen über ein Nichtzusammentreffen schwer darstellbar. Auch zur Wirkung von Instandhaltungsmaßnahmen (Stopfen, Schotterreinigung) gibt es nur wenige Studien, aus denen sich wegen der tiefen Eingriffe ins Schotterbett und der sehr geringen Geschwindigkeit kaum Aussagen für die Vegetationskontrolle ableiten lassen. Sollte dennoch bei der Anwendung der hier ausgewählten Alternativverfahren mit einer niedrigen Geschwindigkeit und für den Gleisbereich unüblichem Lärm Tiere im Arbeitsbereich verbleiben, kann folgende Risikoabschätzung für die einzelnen Verfahren vorgenommen werden:

Maschinelles Jäten

Das Verfahren des MJ hat wenige Faktoren, die eine Schädigung der Tiere hervorrufen könnte. Da das Verfahren nur oberflächennah arbeitet und keinen direkten Kontakt zur Schotteroberfläche hat, werden auf dem Schotter verweilende Tiere nicht erfasst. Lediglich Tiere, die sich auf der zu behandelnden Vegetation aufhalten, können von dem Mechanismus erfasst werden. Dieses Verfahren ist

vergleichbar zum häufig im Gleisbereich eingesetzten Mähen oder Mulchen (z. B. in Wasserschutzgebieten), somit ist von keinen besonderen artenschutzrechtlichen Problemen auszugehen.

Elektroweeding

Bei der Anwendung des El kann eine direkte Gefährdung entstehen, wenn sich der Stromkreis auf der Schotteroberfläche aufbaut und sich Tiere auf der zu behandelnden Vegetation im Arbeitsbereich aufhalten. Dabei können die Tiere einen elektrischen Schlag erhalten. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass der Stromkreis im Schotter über die Wurzeln geschlossen wird. In diesem Fall fließt der Strom durch tiefere Schotterschichten und hat mit auf der Oberfläche befindlichen Tieren keinen Kontakt. Ein weiteres mögliches Risiko könnte durch die Entstehung von Lichtbögen an der Oberfläche auftreten, jedoch ist dies nur bei näherem Kontakt zu metallischen Gegenständen möglich und bleibt ansonsten durch die vorherige Applikation der leitfähigkeitsverbessernden Flüssigkeit nahezu aus.

Druckwasser

Bei dem Einsatz des Hochdruckwasserstrahls können Tiere, die sich im kleinräumigen Bereich entlang der Schiene, der von dem Wasserstrahl behandelt wird, erfasst werden. Dabei ist zu erwarten, dass die hohe Energie des Wasserstrahls Verletzungen an Tieren hervorrufen kann, die sich an der Oberfläche aufhalten. Der Gefahrenbereich begrenzt sich jedoch auf einen kleinen Bereich, da im umliegenden Bereich die Energie des Wasserstrahls nach dem ersten Auftreffen bereits stark reduziert ist. Auch im Schotter versteckte Tiere werden somit nicht mehr von dem Wasserstrahl erfasst.

8 Bewertung und Einstufung der Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Verfahren

8.1 Ermittlung des direkten Energiebedarfs

Die benötigte Energie für die Behandlung einer bewachsenen Oberfläche entspricht der direkten Energie des Verfahrens zur Vegetationskontrolle [64]. Sie wird in diesem Abschnitt in kWh pro km ermittelt. Grundlage dafür sind die gemessenen Energiebedarfe der Verfahren während der Versuchsfahrten (Kapitel 7). Aus den erfassten Daten wurden die Messungen der wirksamsten Arbeitsparameter jedes Verfahrens und der Verfahrenskombination für die weitere Bearbeitung der Energiewerte ausgewählt. Darüber hinaus wurden die evaluierten Pflanzengruppen (krautig, zunehmend verholzende Pflanzen und Gräser), der Feinanteil im Schotterbett und die ermittelten Überfahrten für die Bewertung der Daten berücksichtigt.

Wie im Kapitel 6 erwähnt, sind für die Erprobung die Verfahren MJ und EL nur auf einer Hälfte der Arbeitsbreite aufgebaut, ebenso wurde der Druckwasserstrahl nur mit einer Düse verwendet. Für eine Behandlung des ganzen Gleisquerschnitts (5,5 m) ist mit breiteren Einheiten der Verfahren oder mehr Düsen zu rechnen, weshalb die aufgenommenen Daten hochgerechnet wurden. Das MJ wird auf dem Bereich A (ebener Teil des Schotterbetts) eingesetzt, daher wird die Leistung über 3 m Arbeitsbreite berechnet. Im Unterschied dazu wird das EL auf der vollständigen Gleisbreite angewendet und geht mit einer Breite von 5,5 m in die Berechnung ein. Das Verfahren Druckwasser wird an jeder Seite des Schienenfußes appliziert, wodurch mindestens vier Düsen pro Überfahrt berechnet werden.

Die hier berichteten Daten wurden unter bestimmten Einsatzbedingungen erzeugt. Für eine Bestätigung der Daten sind weitere Testfahrten über mehrere Vegetationsperioden nötig. Zusätzlich wurden die Verfahren in Bereichen eingesetzt, die bisher nur eine unregelmäßige mechanische Vegetationskontrolle erfahren haben, daher kommt es dort zu besonders hohen und speziellen Anforderungen z. B. durch tief verwurzelte Gräser, Vegetation größer als 50 cm oder verholzte Pflanzen, die die Daten stark beeinflussen.

Energiebedarf des maschinellen Jätens

Den größten Einfluss auf den Energiebedarf des Jätsystems machte die Pflanzenhöhe und -stärke aus. Bereiche mit krautiger Vegetation konnten mit einer ähnlichen Energiemenge wie im Leerlauf der Rollen behandelt werden, während Bereiche mit zunehmend verholzenden bis verholzten Pflanzen (Stammdurchmesser ca. 10 mm) und hohen Gräsern (teilweise über 1 m hoch) die höchste Leistung der Motoren abriefen. Zusätzlich hing der Energiebedarf des Verfahrens von der Fahrgeschwindigkeit und der Drehzahl der Rollen ab. Es war zu beachten, dass die Drehzahl der Rollen mit der Fahrgeschwindigkeit wachsen musste, um den gleichen oder ähnlichen Effekt in der Vegetation zu erreichen. Die Drehzahl wurde von 100 bis 300 1/min bei Geschwindigkeiten von 1 bis 10 km/h

variiert. Für noch höhere Fahrgeschwindigkeiten sind Drehzahlen der Rollen über 300 1/min nötig, was mit dem aktuellen System nicht möglich ist.

Allgemein wurden für alle Varianten zwei bis vier Überfahrten für ein gutes Ergebnis benötigt. In Abbildung 32 wird der durchschnittliche Energiebedarf pauschal für vier Überfahrten gezeigt. In den krautigen Bereichen liegt der Energiebedarf zwischen ca. 4 und 12 kWh/km, bei den zunehmend verholzenden bis verholzten Pflanzen bei ca. 15 bis 44 kWh/km und bei hohen Gräsern zwischen ca. 9 bis 51 kWh/km. Der Feinanteil im Schotterbett verursachte keinen großen Unterschied in den Ergebnissen und wurde deswegen nicht berücksichtigt. Alle Daten sind über den Bereich A des Schotterbetts (Breite von 3 m) ermittelt.

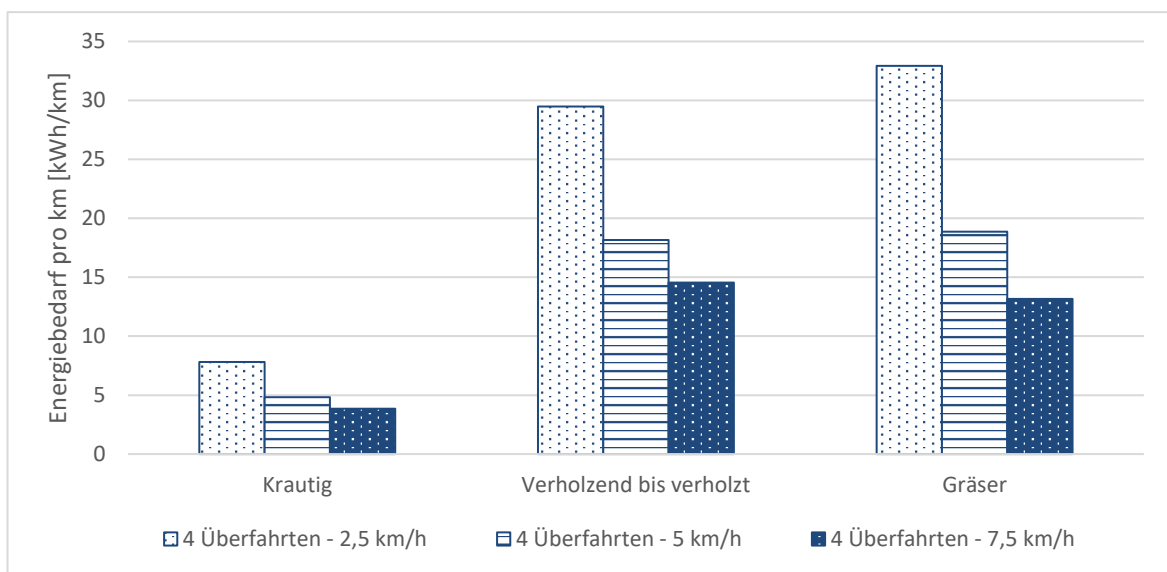


Abbildung 32: Energiebedarf des MJ bei hoher VD bei 4 Fahrten im Bereich A (3 m Arbeitsbreite) für alle Varianten.

Energiebedarf für das Elektroweeding

Der durchschnittliche Energiebedarf des El lag bei allen Pflanzengruppen in ähnlichen Bereichen. Unterschiede machten sich nur bei hohen Gräsern (z. B. ca. 1 m) oder großen verholzten Pflanzen bemerkbar. Im Unterschied beeinflussten die VD, der Feinanteil im Schotterbett und die Fahrgeschwindigkeit den Energiebedarf stark. Dies kann anhand der krautigen Vegetation gut beobachtet werden (Abbildung 33). Trotz ähnlicher Vegetation war die Energiemenge im Durchschnitt ca. 60 % geringer auf Flächen mit einem geringen Feinanteil und einer niedrigen VD als auf stark zugewachsenen und verfüllten Flächen.

Längere Kontaktzeiten der Applikatoren mit den Pflanzen ermöglichten eine höhere Stromableitung und deshalb einen besseren Effekt. Durch zusätzliche Überfahrten konnten ähnliche Dosierungen auch bei höheren Geschwindigkeiten appliziert werden, was eine vergleichbare Wirksamkeit ermöglichte. Insgesamt waren vier Überfahrten bei 2,5 km/h bei allen Pflanzengruppen ausreichend. Bei den Behandlungen mit 10 km/h wurden maximal acht Überfahrten durchgeführt, welche bei allen

Pflanzenarten bis auf Gräser mit einer hohen Wuchshöhe (über 1 m) effektiv gewirkt haben. Daher bezieht sich der hier dargestellte Energiebedarf zur Behandlung der Gräser nur auf die Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h. Bei den anderen Varianten werden beide Fahrgeschwindigkeiten gezeigt. Zur Darstellung der Daten wurde von einer Breite von 5,5 m ausgegangen, da das System auf der ganzen Streckenbreite anwendbar ist.

Der durchschnittliche Energiebedarf lag bei krautigen zugewachsenen Flächen mit niedrigem Feinanteil sowie niedriger VD zwischen 15 und 30 kWh/km. Um krautige bis verholzte Bereiche mit hohem Feinanteil und hoher VD zu behandeln war eine Energie von ca. 40 bis 80 kWh/km nötig. Bei Gräsern sind ca. 90 kWh/km vonnöten.

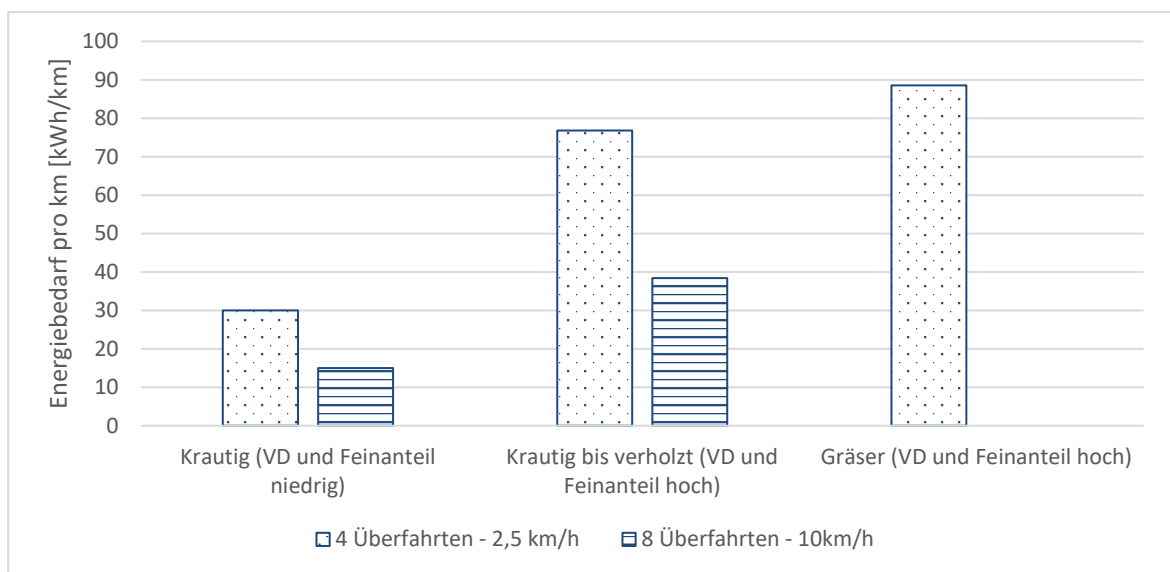


Abbildung 33: Energiebedarf des El in den Bereichen A und B (5,5 m Arbeitsbreite).

Energiebedarf des Druckwasser-Verfahrens

Da die Düsen des Druckwasserstrahls an den Schienenfüßen kontinuierlich arbeiten, ist der Energiebedarf des Verfahrens unabhängig vom Feinanteil im Schotterbett und der Bewuchsdichte. Bei konstantem Druck lag der Unterschied hauptsächlich in der Anzahl der nötigen Überfahrten. Diese hing von der Art der zu behandelnde Vegetation ab. Krautige Pflanzen konnten bereits mit einer Überfahrt abgetrennt oder zerfasert werden, allerdings mussten dazu drei Düsenpositionen mit unterschiedlichen Winkeln genutzt werden. Dadurch wurde eine größere Fläche abgedeckt, mehr Pflanzenteile erfasst und die Pflanzen nahmen größeren Schaden. Verholzende bis verholzte Pflanzen sind häufig als Einzelstämme zu finden und benötigten zwei bis drei Überfahrten an derselben Stelle. Somit wurden zwei bis drei Düsen mit einer Position oder mit variierender Düsenposition an jeder Seite der Schiene benötigt. Dadurch erhöhte sich die Düsenanzahl auf acht bis zwölf Düsen. Diese wurden für die Berechnung der Energiemenge berücksichtigt.

In Abbildung 34 wird der durchschnittliche Energiebedarf des Druckwasserstrahls mit Fahrgeschwindigkeiten von 2,5 bis 20 km/h dargestellt. Bei krautiger Vegetation haben auch die

Behandlungen bei 20 km/h eine gute Wirksamkeit erreicht und wurden daher mit in die Analyse genommen. Um eine Wirksamkeit in krautigen Bereichen zu erreichen, wurde ein Energiebedarf von ca. 6 bis 50 kWh/km benötigt. Bei verholzenden bis verholzten Pflanzen lag der Energiebedarf zwischen ca. 8 und 34 kWh/km mit acht Düsen und zwischen ca. 12 bis 50 kWh/km mit zwölf Düsen.

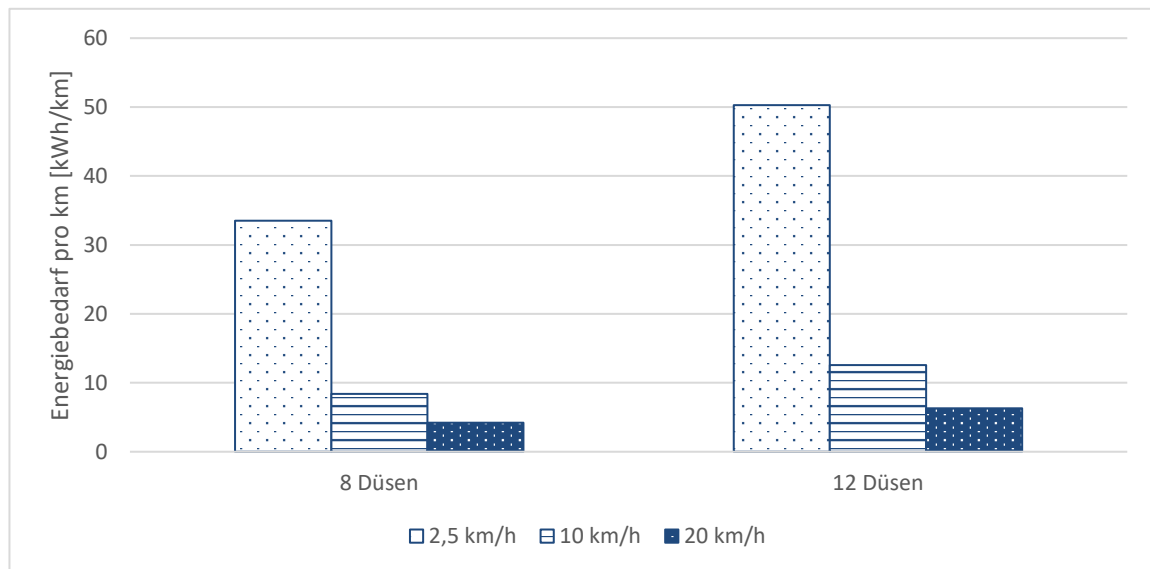


Abbildung 34: Energiebedarf des Druckwasserstrahls. Anwendung ausschließlich entlang den Schienen.

Energiebedarf der Verfahrenskombination

Wie im Kapitel 7.2.2 gezeigt wurde, kann die Dosis der Einzelverfahren verringert werden, wenn sie in Kombination arbeiten. So wurde häufig mit der Hälfte der Überfahrten vom maschinellen Jäten und El eine gute Wirksamkeit in der Kombination erreicht. Zusätzlich ist der gemessene Energiebedarf des El in den zuerst gejäteten Flächen bis zu 30 % geringer als im Einzeleinsatz des Verfahrens. Das Verfahren Druckwasser wurde in einem von den anderen Verfahren getrennten Bereich angewendet, deshalb ändert sich hier keine Dosis.

Die unterschiedlichen Szenarien werden ebenso in der Tabelle 22 mit den empfohlenen Parametern dargestellt und mit der Einschätzung der Energiemenge korreliert. Der höchste Energiebedarf wurde für die Behandlung von hohen Gräsern benötigt. Die Werte erreichten ca. 170 kWh/km. Allerdings ist mit solchen stark bewachsenen Bereichen auf durchschnittlichen Bahnstrecken selten zu rechnen. Das übliche Szenario bezieht sich auf eine hauptsächlich krautige Vegetation. Dabei liegen die Werte bei niedrigen Vegetationsdichten sowie einem geringen Feinanteil im Schotter von 21 bis 31 kWh/km mit einem MW von 26 kWh/km. Diese Ergebnisse werden als Kombination 1 bezeichnet und für den Vergleich mit den aktuell eingesetzten Verfahren im Abschnitt 8.3 genutzt. Bei hohen VD und hohem Feinanteil liegt der Energiebedarf zwischen 70 und 133 kWh/km mit einem MW von 110 kWh/km. Diese Werte werden als Kombination 2 bezeichnet.

Tabelle 22: Empfohlene Parameter der Verfahrenskombination mit Ermittlung des Energiebedarfs pro km.

PFLANZENGRUPPE, FEINANTEIL, VD	NIEDRIGE FAHRGE- SCHWINDIGKEIT	ENERGIEBE- DARF [KWH/KM]	HOHE FAHRGE- SCHWINDIGKEIT	ENERGIEBE- DARF [KWH/KM]
KRAUTIG, NIEDRIGER FEIN- ANTEIL, NIEDRIGE VD	MJ: 2,5 km/h, 2 Überf. El: 2,5 km/h, 2 Überf., (Bereich A), 4 Überf., (Bereich B)	MW: 76 MIN: 60 MAX: 93	MJ: 5 km/h, 2 Überf. El: 10 km/h, 4 Überf., (Bereich A), 8 Überf., (Bereich B)	MW: 26 MIN: 21 MAX: 31 <u>*Kombination 1</u>
KRAUTIG, HOHER FEINAN- TEIL, HOHE VD	DW: 2,5 km/h, 3 Düsenpositionen, 1 Überf.	MW: 110 MIN: 70 MAX: 133 <u>*Kombination 2</u>	DW: 10 km/h, 3 Düsenpositionen, 1 Überf.	MW: 43 MIN: 26 MAX: 51
GRÄSER, BELIEBIG, BELIEBIG	MJ: 2,5 km/h, 2 Überf. El: 2,5 km/h, 4 Überf., (Bereich A), 8 Überf., (Bereich B) DW: 2,5 km/h, 3 Düsenpositionen, 1 Überf.			MW: 131 MIN: 93 MAX: 172
VERHOLZEND BIS VERHOLZTE PFLAN- ZEN, BELIEBIG, BELIEBIG	MJ: 2,5 km/h, 2 Überf. El: 2,5 km/h, 2 Überf., (Bereich A), 4 Überf., (Bereich B) DW: 2,5 km/h, 1 Düsenposition, 2 Überf.	MW: 104 MIN: 62 MAX: 129	MJ: 2,5 km/h, 2 Überf. El: 10 km/h, 4 Überf., (Bereich A), 8 Überf., (Bereich B) DW: 2,5 km/h, 1 Düsenposition, 3 Überf.	MW: 93 MIN: 61 MAX: 116

Begriffserläuterungen: Maschinelles Jäten (MJ), Elektroweeding (El), Druckwasser (DW), Vegetationsdichte (VD), Mittelwert (MW), Überfahrt (Überf.). * Bereich A (3 m breit), Behandlung mit MJ und El. Bereich B (2,5 m breit), Behandlung mit El.

8.2 Berechnung der Ausbringungsmengen der Verbrauchsmaterialien

Maschinelles Jäten

Beim maschinellen Jäten wird kein Material ausgebracht oder verbraucht. Das Jätsystem besteht hauptsächlich aus Zahnrädern aus Kunststoff, deren Außendurchmesser nach den Versuchen auf hundertstel Millimeter geprüft wurde. Jedoch wurde kein Unterschied im Vergleich zu neuen

Zahnradern und somit kein Verschleiß gemessen. Ein verschleißbedingter Austausch wird somit eher unregelmäßig nach langen Einsatzzeiträumen erwartet.

Druckwasser

Zur Anwendung des Druckwasserstrahls wird Wasser und das Abrasivmittel gebraucht. Die Ausbringungsmengen sind vom Druck abhängig. Bei 100 MPa sind nominal 6 L/min Wasser und 250 g/min Abrasivmittel nötig. Die Daten wurden in Tabelle 23 für die unterschiedliche Anzahl der Düsen und Arbeitsgeschwindigkeiten berechnet.

Tabelle 23: Ausbringungsmenge von Wasser und Abrasivmittel des Druckwasser-Verfahrens.

ANZAHL DER DÜSEN	WASSERVERBRAUCH [L/KM]			ABRASIVMITTEL [KG/KM]		
	2,5 km/h	10 km/h	20 km/h	2,5 km/h	10 km/h	20 km/h
8 DÜSEN	1152	288	144	48	12	6
12 DÜSEN	1728	432	216	72	18	9

Elektroweeding

Bei dem Einsatz vom El wird eine Flüssigkeit zur Verbesserung der Leitfähigkeit verwendet, um den elektrischen Widerstand ohne chemische Rückstände zu senken und die Energie effizienter in die Pflanze zu leiten. Die getestete Ausbringungsmenge lag bei 10 L/ha aktiver Flüssigkeit und 150 L/ha Wasser. Dies macht bei einer Breite von 5,5 m insgesamt ca. 18 L/km aktive Flüssigkeit und ca. 273 L/km Wasser.

8.3 Vergleich der entwickelten Verfahren mit den aktuell eingesetzten Verfahren

Die Verfahren wurden sowohl quantitativ als auch qualitativ verglichen. Der quantitative Vergleich berücksichtigt den Energiebedarf und die Menge der eingesetzten Materialien während der Vegetationskontrolle. Der qualitative Vergleich hingegen konzentriert sich auf weitere Aspekte, die aktuell noch nicht quantifiziert werden können, aber dennoch einen Einfluss auf die Umstellung der Vegetationskontrolle im Bahnbereich haben.

Quantitativer Vergleich

Der Energiebedarf und die Menge der eingesetzten Betriebsstoffe für die Anwendung der Vegetationskontrollverfahren werden durch verschiedene Faktoren beeinflusst, wie z. B. die Pflanzenart, die VD, die Wuchshöhe, den Boden sowie den Wetterbedingungen. Zusätzlich spielt der Entwicklungsstand der angewendeten Technologie eine wichtige Rolle. Die Effizienz der Verfahren hängt ebenso von der Weiterentwicklung und Optimierung der Anlage ab. Ältere oder weniger entwickelte

Technologien sind oft weniger effizient. Daher beziehen sich die in der Literatur angegebenen Daten auf spezifische Einsatzbedingungen und erlauben keinen absoluten Vergleich der Verfahren.

Die vorgestellte Analyse dient als erste Einstufung des entwickelten Systems auf Grundlage der in der Literatur verfügbaren Daten. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf dem Vergleich der Verfahrenskombinationen 1 und 2 mit den Studien zum Energiebedarf im Bahnbereich. Für die Verfahrenskombination 1 wurde die ermittelte Energiemenge für Bereiche mit krautiger Vegetation und niedriger VD verwendet (Tabelle 22). Bei der Verfahrenskombination 2 wurden die mit hoher VD ermittelten Werte berücksichtigt. Für Verfahren, die bisher noch nicht im Gleisbereich zu Einsatz kamen, wurden Daten aus der Landwirtschaft und urbanem Bereich herangezogen.

Studien zu einer flächendeckenden Erprobung oder Anwendung der Verfahren im Schotterbett wurden zu chemischen Herbiziden [68], Infrarot [68] und Heißwasser [72] gefunden. Aus der Landwirtschaft und urbanem Bereich wurden in den meisten Fällen Daten verglichen, deren Messwerte ebenso im flächendeckenden Einsatz bzw. mit mittleren bis großen Anlagen erzeugt wurden. Dazu zählen die Verfahren Mähen [92], elektrischer Strom [93], Laser (Überhitzen) [94], Abflammen [95], Frosten [64], Dampf [96], Heißschaum [73], Heißluft [73] und UV-C [97]. Die Daten der Verfahren Laser (Schneiden) [98] und Mikrowellen [64] wurden mit Handgeräten und im Labor erzeugt. Abbildung 35 zeigt den Vergleich des Energiebedarfs der Verfahren pro Anwendung (ohne Wiederholung) aus vorhandenen Studien. Die umgerechneten Angaben aus dem Bahnbereich sind mit * markiert.

Mit der Verfahrenskombination konnte der Energiebedarf der Alternativverfahren pro Anwendung verringert werden. Im Vergleich zum Heißwasser [72] ist der durchschnittliche Energiebedarf der Verfahrenskombination 1 nahezu siebenmal geringer und der Verfahrenskombination 2 nahezu um die Hälfte geringer. Der Wasserverbrauch beträgt 705 L/km bei der Verfahrenskombination 1 und 2 000 L/km bei der Verfahrenskombination 2, während er beim Heißwasserverfahren 1 300 L/km beträgt. Zusätzlich ist bei der entwickelten Kombination mit 18 bis 72 kg/km Abrasivmittel zu rechnen. Bezüglich des Einsatzes von Herbiziden ist der Energiebedarf der Kombination 5 bis 22-mal höher und benötigt ca. 400 bis 1 700 L mehr Wasser pro km [17].

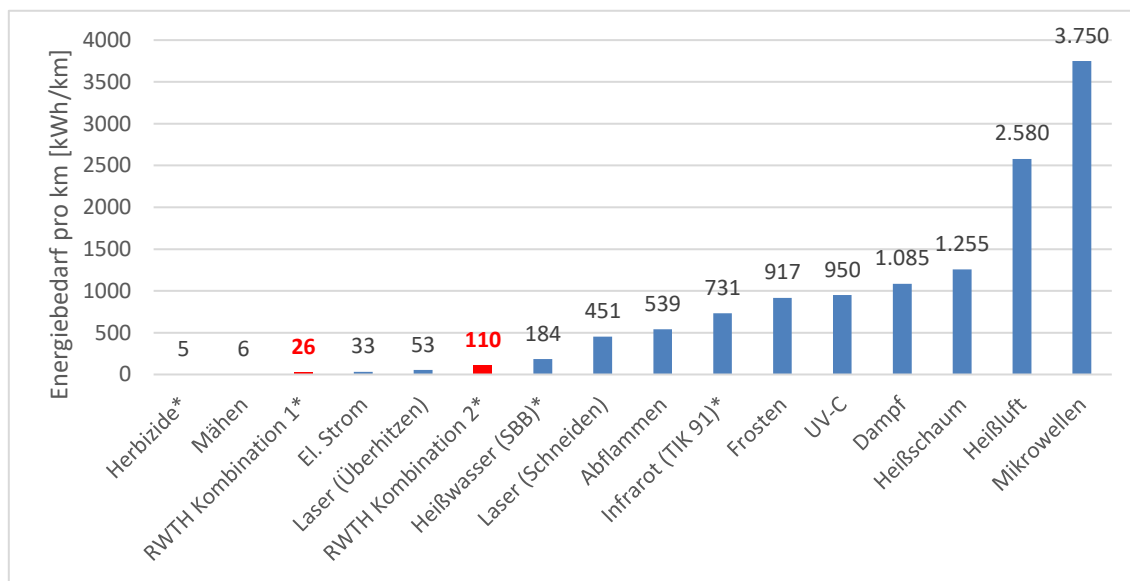


Abbildung 35: Vergleich des Energiebedarfs der Verfahren pro Anwendung.

Qualitativer Vergleich

Die entwickelte Verfahrenskombination hat gegenüber der chemischen Vegetationskontrolle in vier Aspekten Nachteile. Erstens führt die Überschreitung der Fahrzeugbegrenzungslinie bei der Durchführung der Vegetationskontrolle zu Streckensperrungen und einer verringerten Arbeitsgeschwindigkeit. Zweitens arbeitet die Verfahrenskombination in der Regel mit Geschwindigkeiten von weniger als 20 km/h, was ebenfalls Streckensperrungen erforderlich macht. Drittens ist eine höhere Behandlungsfrequenz notwendig, da die Verfahrenskombination keine präventive Wirkung wie Bodenherbizide besitzt und daher häufiger eingesetzt werden muss. Der vierte und letzte wesentliche Aspekt ist das erhöhte Gewicht und der größere benötigte Bauraum der nichtchemischen Technologie im Vergleich zur chemischen Vegetationskontrolle. Dies liegt darin begründet, dass sie eine längere Bearbeitungsvorrichtung benötigt im Gegensatz zu den wenigen Düsenreihen der chemischen Spritzsysteme. Dadurch ergeben sich insgesamt größere und längere Fahrzeuge für den serienmäßigen Einsatz.

Verbesserungspotential der Technologie

Aufgrund der Zunahme an elektrifizierten Strecken und des ansteigenden Anteils an regenerativ erzeugtem Strom steht dieser auch für die Vegetationskontrolle immer öfter zur Verfügung. Daraus ergibt sich die Option für Verfahren, die elektrischen Strom nutzen können, diesen aus der Oberleitung zu entnehmen. Dies ist umweltfreundlicher, als der Einsatz von externen Energieträgern und Generatoren und spart zudem Bauraum.

Aufgrund der sich zunehmend verbessernden Digitalisierung der Infrastrukturdaten und -karten können besondere bauliche Gegebenheiten und Sicherheitstechnik im Gleis zuverlässiger verortet werden. Daraus ergeben sich Möglichkeiten, räumliche oder sicherheitstechnische Kollisionen zu

vermeiden und die Vegetationskontrolltechnik ohne Fahrtverzögerung abzuschalten oder zu positionieren.

8.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Während in vielen Bereichen der Technologieentwicklung über lange Jahre der direkte Kostenfaktor der Haupttreiber für Innovation war, kommen in den letzten Jahren immer mehr darüberhinausgehende Innovationstreiber hinzu. So führen neue Gesetze und Vorschriften dazu, dass bestimmte Technologien oder Produkte trotz niedriger direkter Kosten nicht mehr eingesetzt werden dürfen, weil sie z. B. umweltschädlich sind, was sich in den externen Kosten umrechnen lässt, in der normalen Kostenrechnung aber betriebswirtschaftlich keine Rolle spielt.

Die Kostenkalkulation von innovativen Verfahren oder Geräten ist generell eine Herausforderung. Darum stehen im Maschinenbau und der Verfahrensentwicklung die Methoden der Expertenschätzung, Kostenfunktionen, Ähnlichkeitsmethoden und analytische Kalkulation im Vordergrund [99]. Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der Methoden sind ausreichende Daten über ähnliche Produkte und Prozesse. Generell sollte es möglich sein, aus den bisher genutzten Verfahren eine Abschätzung für die Gesamtkosten eines Vegetationskontrollsystems auf nichtchemischer Basis abzuleiten. Auch wenn es im innovativen Bereich noch viele offene Fragen gibt, stellt die schlechte Datengrundlage zumindest das beste oder schlechteste Szenario dar.

Die Kosten der chemischen Vegetationskontrolle setzen sich zusammen aus dem System zur Vegetationskontrolle, den Verbrauchsmaterialien und dem nötigen Personal. In Deutschland wird die Vegetationskontrolle häufig von externen Firmen als Gesamtlösung angeboten bzw. ist in öffentlichen Daten als Gesamtdienstleistungspaket in den Kosten verfügbar [10]. In anderen europäischen Ländern besitzen manche Eisenbahnbetreiber eigene Schienenfahrzeuge mit den entsprechenden Aggregaten und führen selbst die Vegetationskontrolle durch.

Ähnlich zur chemischen Vegetationskontrolle wird für den Einsatz der entwickelten Verfahrenskombination ein Trägerfahrzeug sowie Betriebs- und Sicherheitspersonal benötigt. Deshalb werden die damit verbundenen Kosten in beiden Aspekten für eine erste Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Verfahrenskombination berücksichtigt. Dabei zeigt die Erfahrung von Betreibenden, dass bei der Durchführung der chemischen Vegetationskontrolle mit Zweiwegefahrzeugen im Durchschnitt 10 km pro Schicht (1,25 km/h) behandelt werden, auch wenn die Fahrzeuge eine maximale Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h haben. Gründe dafür sind Anfahrt, Auf- und Abbauzeiten, Gleisfreigaben u. a. Die Kosten der direkten Energiemenge und Betriebsstoffe der chemischen Verfahren wurden mit den in den Abschnitten 8.1 und 8.2 für die Verfahrenskombination ermittelten Werten gerechnet.

Tabelle 24 bis Tabelle 26 zeigen die Summen der unterschiedlichen Aspekte. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass mindestens zwei Behandlungen pro Jahr benötigt werden. Daher werden die Daten für zwei Behandlungen berechnet. Wenn lediglich das Gerät oder die gesamte Dienstleistung benötigt wird, können die Kosten aus den aufgeführten Summen entnommen werden. Die

Gesamtkosten der Kombination 1 (10 km/h) betragen ca. 870,00 €. Die Kosten der Kombination 2 (2,5 km/h) betragen ca. 1 050,00 €. Die Daten beziehen sich auf den Einsatz pro Kilometer für zwei Behandlungen. Eine Erläuterung der zugrunde liegenden Kalkulationsannahmen findet sich unten.

Energie- und Materialkosten

Anhand der ermittelten Energie- und Materialmenge der Verfahrenskombination (Kapitel 8.1 und 8.2) wurden die entsprechenden Kosten berechnet.

Tabelle 24: Wirtschaftlichkeitsabschätzung des Materialeinsatzes der Verfahrenskombination pro km und Behandlung.

Bezeichnung	Kombination 1 (10 km/h)		Kombination 2 (2,5 km/h)		Notizen
	Menge	Kosten	Menge	Kosten	
Wasser (L/km)	432	0,72 €	1728	2,87 €	1,66 € pro 1 m³ in NRW [100]
Abrasivmittel (kg/km)	18	14,40 €	72	57,60 €	20 €/Packung (25 kg) [101]
Energiebedarf (kWh/km)	26		110		
Dieserverbrauch der Verfahrenskombination (L/km)	7,58	12,05 €	32,1	50,99 €	Heizwert Diesel 9,8 kWh/L, Wirkungsgrad eines Dieselerators = 0,35. [102] Preis 1 L Diesel NRW (26.08.2024) = 1,59 € [103]
Dieserverbrauch des Zuges (L/km)	3	4,77 €	3	4,77 €	1 L/km aus IZT-Studie [68] 3 L/km aus [104]
Kosten Materialeinsatz €/km pro Behandlung		31,94 €		116,23 €	
Gesamtkosten Materialeinsatz €/km für zwei Behandlungen		63,88 €		232,46 €	

Besonders wichtig für die Berechnung sind die Bewuchsdichte und -größe, die die Arbeitsparameter beeinflussen. Für die Kostenkalkulation wurden in erster Instanz die Daten der Verfahrenskombination 1 und 2 genommen, die in krautigen Bereichen ermittelt wurden, da dieser Zustand sich den Bedingungen einer Strecke im Betrieb annähert. Die Verfahrenskombination 1 entspricht dem Einsatz der Verfahren bei 10 km/h in krautigen Bereichen mit niedrigem Feinanteil und geringer VD. Die Verfahrenskombination 2 wurde bei 2,5 km/h in Bereichen mit krautiger Vegetation, einem hohen Feinanteil und einer hohen VD eingesetzt. Als Betriebsmittel für die Energieerzeugung wurde Diesel ausgewählt. Dies vereinfacht den Vergleich mit Angaben aus der Literatur, in der manche Daten aus

dem Dieserverbrauch ermittelt wurden. Jedoch besteht das Potential andere Energiequellen zu nutzen.

Kosten des Betriebs- und Sicherheitspersonals

Die Personal- und Logistikanforderungen werden bei allen Systemen ähnlich ablaufen und sich lediglich im Umfang unterscheiden. An der Qualifikation des Personals ändert sich grundsätzlich nichts, wobei natürlich eine Schulung für die Bedienung der neuen Anlage erforderlich ist. Der nötige Personalaufwand sowie die Berechnung des aktuellen Stundenlohns basieren auf Hinweise von Eisenbahnbetreibenden.

Tabelle 25: Wirtschaftlichkeitsabschätzung der Lohnkosten der Verfahrenskombination pro km und Behandlung.

BEZEICHNUNG	MENGE	KOSTEN	NOTIZEN
Aufsichtspersonal	1	90,00 €	pro Stunde
Fahrzeugführende	1	90,00 €	pro Stunde
Bedienende der Geräte zur Vegetationskontrolle	1	90,00 €	pro Stunde
Rangierbegleitpersonal/Lotsende	1	90,00 €	pro Stunde
Arbeitsstunden pro km (Arbeitsgeschwindigkeit 1,25 km/h)	0,8		*Aus Erfahrung von Eisenbahnbetreiber werden im Durchschnitt 1 km pro Arbeitsschicht mit Zweigegefahrzeugen behandelt.
Lohnkosten €/km pro Behandlung		288,00 €	
Gesamtkosten Lohn €/km für zwei Behandlungen		576,00 €	

Kosten des Trägerfahrzeugs

Herbizide können sowohl mit Zweigegefahrzeugen als auch mit schienengebundenen Spezialzügen ausgebracht werden. Obwohl die Verfahrenskombination derzeit mit einem Zweigegefahrzeug angewendet wird, ist noch unklar, ob zukünftige Bauweisen wieder ein Zweigegefahrzeug oder ein Vollbahnfahrzeug umfassen werden. Für die erste Kostenermittlung der Verfahrenskombination wurden die Fahrzeugkosten aus der IZT-Studie [68] entnommen, in der ein Spritzzug und ein Thermischer-Infrapuls-Zug (TIK91) ökonomisch und wirtschaftlich verglichen wurden. Die Angaben wurden in Euro inflationsbereinigt umgerechnet [105].

Tabelle 26: Wirtschaftlichkeitsabschätzung des Trägerfahrzeugs der Verfahrenskombination pro km und Behandlung.

BEZEICHNUNG	MENGE	KOSTEN	NOTIZEN
Zugkosten [DM]		1 800 000	Basierend auf IZT- Studie [68]
Betriebsstunden/Lebensdauer	5 500		
Arbeitsgeschwindigkeit (km/h)	1,25		*Aus Erfahrung von Eisenbahnbetreiber werden im Durchschnitt 10 km pro Arbeitsschicht mit Zweiwegefahrzeugen behandelt.
Zugkosten pro km [DM/km]		261,82	
Gesamtkosten pro km in Euro nach Inflationsrate		223 €	1 DM = 0,51 € [106], Inflationsrate von 1995 auf 2024: 1 € = 1,67 € [105]

9 Handlungsempfehlungen

9.1 Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung und weitere Nutzung des Versuchsträgers

Der Versuchsträger ermöglichte eine erste Erprobung und Bewertung der Wirksamkeit der ausgewählten Einzelverfahren sowie der Verfahrenskombination. Die Ergebnisse dieses neuen Verfahrensansatzes stehen somit dem Bahnsektor zur Verfügung. Um den Reifegrad der entwickelten Technologien zu erhöhen, werden in diesem Abschnitt Optimierungsmöglichkeiten diskutiert. Zudem werden Einsatzgebiete und Perspektiven für die weitere Anwendung der Verfahrenskombination erläutert.

Zukünftige Einsatzbereiche der Technologie

Die entwickelte Verfahrenskombination kann eine Anwendung auf Streckenabschnitten mit hoher VD und geringem Verkehr, wie beispielsweise in Schutzgebieten oder auf Museumsbahnen, finden. Zur Behandlung ganzer Strecken sollte der Versuchsträger bzw. ein zukünftiges Serienfahrzeug so angepasst werden, dass die gesamte Gleisbreite ohne Drehen des Fahrzeuges behandelt werden kann. Bei Strecken, auf denen zwar punktförmige Zugbeeinflussung aber keine Gleisstromkreise verbaut sind, ist ein Einsatz der Verfahren abseits der verbauten Gleismagnete und Signale ebenfalls möglich.

Generell bietet die Technologie des MJ eine gute Alternative zum Mähen und Mulchen. Der nachfolgende kombinierte Einsatz des El schädigt die durch das Jäten verkürzten Pflanzen, sodass diese weitgehend absterben. Der Abrasiv-Hochdruckwasserstrahl kann neben der Vegetationskontrolle auch zur Reinigung des Schienenkopfes genutzt werden. Hier sind Kombinationsanwendungen möglich.

Technische Verbesserungen der Konstruktion des Versuchsträgers

Für die weitere Optimierung des Versuchsträgers ist es wichtig, auf den bereits gewonnenen Erkenntnissen zur wirksamen Dosierung der Einzelverfahren und Verfahrenskombinationen (Kapitel 7.2.3) aufzubauen. Diese Informationen dienen als Grundlage zur Festlegung der optimalen Anzahl der benötigten Applikatoren sowie der Größe der Einheiten für die Weiterentwicklung des Erprobungsträgers in Richtung eines höheren Technologiereifegrades. Im Zuge dessen können und sollten Verbesserungen der konstruktiven Ausführung durchgeführt werden.

Beim maschinellen Jäten wurden drei Faktoren identifiziert, um die Effektivität zu steigern. Zum einen die Erhöhung des Abstands zwischen den Rollenreihen, sodass die Pflanzen leichter aufgenommen werden können und nicht heruntergebogen werden. Zum anderen eine höhergelegene

Anordnung des Rollengetriebes, ebenfalls um ein Herunterbiegen der Pflanzen zu verhindern. Zusätzlich würde die kontinuierliche Freihaltung der Rollen beispielweise durch den Einsatz von Bürsten oder scharfen Klingen eine längere effektive Behandlung von hohen Pflanzen (über 50 cm) ermöglichen und das Einwickeln der Pflanzen in den Rollen vermeiden.

Bei der Anwendung von Druckwasser und El liegt der Schwerpunkt der Optimierung auf der Reduzierung des Energiebedarfs. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist der Einsatz von Grünerkennungssystemen, die es mittels Sensorik und Künstlicher Intelligenz ermöglichen, die Verfahren gezielt nur auf unerwünschte Pflanzen anzuwenden. Darüber hinaus könnte die Anpassung der Druckbereiche beim Druckwasserverfahren oder die Variation der Spannungen beim El zu einem effizienteren Betrieb beitragen. Neben der Energieoptimierung ist es außerdem wichtig, den Einfluss der Verfahren auf die Eisenbahninfrastruktur weiter zu untersuchen.

Arbeitsschutz

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Gleisanlagen und die unmittelbar angrenzenden Flächen, mit wenigen Ausnahmen (wie beispielsweise Bahnsteige in Bahnhöfen), ausschließlich von geschultem Fachpersonal betreten werden dürfen. Der Umgang mit den eingesetzten Geräten erfolgt daher nur durch speziell ausgebildete Mitarbeitende, die sich in einem definierten Sicherheitsbereich aufhalten. Dies stellt einen wesentlichen Aspekt eines effektiven Arbeitsschutzes dar.

Der Arbeitsschutz des Versuchsträgers wurde vor allem durch strukturierte Abläufe während des Versuchsbetriebs gewährleistet. Dazu zählen unter anderem klare Sichtverhältnisse auf die Applikatoren, um den Mechanismus kontinuierlich beobachten zu können. Für den späteren Serienbetrieb des Systems können einige der im Versuchsbetrieb notwendigen Sicherheitsmaßnahmen vereinfacht oder modifiziert werden, da der Fokus dann stärker auf standardisierten Sicherheitskonzepten liegt. Dadurch lässt sich das Gesamtsicherheitsniveau weiter erhöhen und an die Anforderungen des regulären Betriebs anpassen.

Allgemeine technische Elemente des Arbeitsschutzes für alle Verfahren:

- Es sind generelle Schutzmaßnahmen gegen Eingriff durch eine Einhausung vorhanden.
- Die Geräte sind mit Schlüsselschaltern gegen unbefugtes Einschalten gesichert.
- Die Freigabeschaltung des Betriebs erfordert mehrere bewusste Handlungen der fahrzeugführenden Person (Drücken von Knöpfen über längere Zeit).
- Notausschalter sind in der Steuerung integriert.
- Die Arbeitsgeschwindigkeiten sind niedrig im Vergleich zu üblichen Zuggeschwindigkeiten.
- Alle leitenden Bestandteile der Geräte sind geerdet.
- Alle Bestandteile der Geräte sind für den Transport innerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie positioniert bzw. Kollisionen mit Infrastruktur während des Betriebs werden auf diese Weise vermieden.

Für den Einsatz der Verfahren zur Vegetationskontrolle liegen im Bereich Arbeitsschutz verschiedene Sicherungsebenen. Im Versuchsträger sind aufgrund der Bedienung durch geschultes Personal nicht

alle dieser Maßnahmen umgesetzt, jedoch werden sie in Seriengeräten berücksichtigt. Die folgende Kurzaufstellung beschreibt verfahrensspezifische Schutzvorkehrungen, die auf bewährter Technik basieren und sowohl für Prototypen als auch für Serienfahrzeuge anwendbar sind.

Maschinelles Jäten

- Die Rolleneinheiten sind gegen menschliche Eingriffe abgeschottet.
- Ausgerissenen Pflanzenteile und evtl. mitgerissenen Schottersteine werden abgeschirmt.

Elektroweeding

- Die Schienen und alle leitenden und nicht arbeitsstromführenden Bestandteile sind während des Einsatzes geerdet.
- Eine Erdungs- und Fehlerstromüberwachung der Fahrzeuge ist redundant ausgeführt.
- Im Gegensatz zum einpoligen Oberleitungssystem findet die Stromdurchleitung immer nur über kleine Distanzen und zweipolig statt, was Bereiche mit Schrittspannungen und möglichen Lichtbogenbildungen minimiert.
- Schon kleine und kurzfristige Lichtbögen werden durch den Einsatz von einer Kontaktflüssigkeit minimiert und – sofern sie doch auftreten – elektronisch erkannt und gelöscht.
- Nur flexible Teile hängen aus der Fahrzeugbegrenzungslinie nach unten heraus, sodass beim Anfahren von Hindernissen kein weiterer Anfahrerschutz nötig ist.
- Das Personal hält einen systemabhängigen Mindestabstand zu den Applikatoren ein.
- Die Stromapplikationseinheiten sind gegen menschliche Eingriffe abgeschottet.

Druckwasser

- Die Düsen sind gegen unerwünschte Positionsänderungen und Abreißen gesichert, sodass keine unkontrollierte Veränderung der Wasserstrahlrichtung möglich ist.
- Der Bereich um den Druckwasserstrahl ist mit druckwasserfestem Material abgeschirmt.
- Der Wasserstrahl erzeugt keinen ausreichenden Impuls für die Bewegung größerer Objekte über relevante Distanzen. Wegspritzende Kleinobjekte werden von der druckwasserfesten Umhausung abgeschirmt.

Ausleger des gleisgebundenen Systems

- Der freie Platz vor dem Ausleger außerhalb des Lichtraumprofils wird mit mechanischen Schlagleisten oder elektronischen Raumüberwachungen (z. B. LIDAR – Light Detection and Ranging) überwacht.
- Im Falle einer Hinderniserkennung erfolgt ein passives Einklappen in das Lichtraumprofil basierend auf gespeicherter mechanischer Energie.
- Der Ausleger, der im Betrieb über die Fahrzeugbegrenzungslinie hinausreicht, ist mit Abstreif- und Abreißsicherungen geometrisch so installiert, dass er im Falle einer Kollision nach hinten in das Lichtraumprofil einschwenkt.

Lärm

Die Bewertung der Geräuscentwicklung des Versuchsträgers im Hinblick auf Arbeitsschutz sowie Lärmemission und -immission beruht auf den geltenden Vorschriften. Die TSI im Bereich „Fahrzeug – Lärm“ (TSI Noise) legen die Anforderungen an die Lärmemissionen von Fahrzeugen bei der Vorbeifahrt fest, wie sie in der Verordnung (EU – Europäische Union) Nr. 1302/2014 (TSI LOC&PAS) und der Verordnung (EU) Nr. 321/2013 (TSI WAG) definiert sind [107]. Allerdings sind Gleisbaumaschinen in Arbeitsstellung von der TSI LOC&PAS ausgenommen [108]. Im Arbeitsmodus unterliegen diese Maschinen stattdessen der DIN EN 14033-3, die normative Vorgaben zu Schallemissionsmessungen für Gleisbaumaschinen festlegt [109].

Die Messergebnisse aus Kapitel 7.2.4 zeigten, dass die Einzelsysteme der nichtchemischen Vegetationskontrolle ohne Abschirmung die Lärmschwellen von 80 und 85 dB(A) in 5 m Abstand überschreiten. Technische Abschirmungen innerhalb des Lichtraumprofils sind jedoch problemlos umsetzbar. Da die Systeme im Vergleich zum normalen Eisenbahnbetrieb selten eingesetzt werden, ist eine Überschreitung von Mittelungspegeln nicht zu erwarten. Dennoch ist sowohl aus Gründen des Arbeitsschutzes als auch für den Betrieb des Systems in der Nacht eine Lärmreduktion erforderlich.

Für einen sicheren und leisen Betrieb sollte ein Prototyp und muss ein späteres Serienprodukt von Beginn an mit Lärmschutzeinrichtungen ausgestattet werden. Im Betrieb wird das Personal in einer schallgedämmten Maschinenführerkabine sitzen, wodurch der Arbeitsschutz gewährleistet ist. Hinsichtlich des Immissionsschutzes ist zu berücksichtigen, dass die Vorbeifahrten nur wenige Male pro Jahr stattfinden. Zudem sind die am offenen Versuchsgerät gemessenen Schalldruckpegel nicht direkt mit denen eines serienmäßigen Geräts vergleichbar, da bei diesem die Lärmquellen weitgehend eingehaust werden. Für die Lautstärke der Vergrämungseinrichtung ist zu berücksichtigen, dass diese nur nach vorne wirken muss, wobei Schallpegel und Tonlage in empirischen Tests mit den Zieltieren in späteren Projekten zu ermittelt sind.

Genehmigung

Die rechtliche Genehmigung von nichtchemischen Alternativverfahren stellt eine Herausforderung dar, da für sie kein gängiges Vorgehen zur Zulassung besteht. Hingegen unterliegt die chemische Vegetationskontrolle dem Pflanzenschutzmittelgesetz und den damit verbundenen Umweltvorschriften. Die Validierung der Auswirkungen der Alternativverfahren hinsichtlich der Leit- und Sicherungstechnik der Eisenbahnsysteme ist besonders komplex. Einige Verfahren können bereits aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften als schwer validierbar identifiziert werden. Andere hingegen erfordern umfassende Tests auf speziellen Prüfständen, in Simulationen sowie auf Modellstrecken, um ihre Effektivität und Sicherheit zu überprüfen und gegebenenfalls weiter zu optimieren.

Effizienzoptimierung

Die Effizienz von Vegetationskontrollverfahren mit Pflanzenschutzmitteln wird aufgrund der hohen Variabilität von Vegetation, Wetter, Klima und anderen Einsatzbedingungen im Normalfall über mindestens drei Zonen Europas geprüft [110]. Auch nach diesen Grundprüfungen werden weitere Optimierungen durch Rückmeldungen von Anwendern permanent vorgenommen. Der Einsatz von

Vegetationskontrollverfahren bleibt auch dann ein Expertenverfahren, da externe Berater im Verbund mit erfahrenen Anwendern kontinuierlich nach möglichst wirksamen Einsatzmodalitäten suchen. Dies gilt insbesondere für die Vegetationskontrolle im Gleis, wo zusätzliche Herausforderungen wie Termindruck und geringe Zeitflexibilität bestehen. Wie beim Übergang von Glyphosat auf Pelargonsäure so ist auch beim Einsatz nichtchemischer Alternativverfahren mit kontinuierlichen Lernprozessen und Anpassungen zu rechnen. Daher wird es weder nach der Erstvalidierung noch zu Beginn des Einsatzes von Großgeräten umfassende Nutzungsvorschriften oder endgültige Effizienzaussagen geben. Schon die wetterbedingten unterschiedlichen Einsatzmengen von Glyphosat in den letzten Einsatzjahren [6, 13, 14, 111–115] verdeutlichen, wie schnell und präzise die Vegetationskontrolle spezifisch in den Regionen an die jeweiligen witterungsbedingten Wachstumsverhältnisse angepasst werden muss.

Kombinationsverfahren für Anwendungsbereiche optimieren

Eine Funktionsanalyse der chemischen Vegetationskontrolle hat ergeben, dass auch hier ein Kombinationsverfahren mit mehreren Wirkprinzipien und einer differenzierten Strategie des Geräteeinsatzes für die jeweiligen Einsatzbereiche erforderlich ist.

Daher ist es notwendig, die hier entwickelte Verfahrenskombination unter verschiedenen Einsatzbedingungen über einen längeren Zeitraum oder mehrere Vegetationsperioden hinweg zu testen. Auf diese Weise lässt sich eine Tendenz in der Wirksamkeit feststellen, die es ermöglicht, die Leistung des Versuchsträgers zu optimieren. Beispielsweise kann ermittelt werden, ob durch die Anpassung der Anzahl der eingesetzten Einheiten oder der Dosis eine höhere Effizienz erzielt werden kann.

Tiervergrämung einfach umsetzbar

Die Tiervergrämung wird durch direkt am Boden anliegende Geräuschquellen aus speziell geformten Blechen erzeugt. Diese Einrichtungen werden möglichst weit vorne am Fahrzeug montiert, um die Fluchtzeiten zu vergrößern. Die Geräusche unterscheiden sich deutlich von denen im normalen Fahrbetrieb, sodass Tiere im Gleisbett frühzeitig durch untypische Geräusche gewarnt werden, um zu flüchten oder sich im Gleisbett zu verstecken.

Die Wirkung der akustischen Vergrämungseinrichtung sollte in Praxisversuchen in Gebieten mit z. B. Eidechsen abschließend validiert und ggf. auch bei anderen Maßnahmen, wie z. B. bei Bauprojekten, in Betracht gezogen werden.

9.2 Ausblick für zukünftigen Forschungsbedarf

Neben den in Kapitel 9.1 aufgelisteten notwendigen konstruktiven Ergänzungen und Verbesserungen am Versuchsträger sind weitere Untersuchungen zur optimalen Anwendung der drei ausgewählten Verfahren zur Vegetationskontrolle im Gleisbereich und ihrer kombinierten Anwendung notwendig.

Zudem sind Langzeitstudien über die Wirkung der Verfahren und der Verfahrenskombination während mehrerer Vegetationsperioden und in unterschiedlichen Vegetationszonen der Bundesrepublik erforderlich.

Es wird erwartet, dass die Feineinstellung der Verfahrenskombination, die Bearbeitungsgeschwindigkeit und die Bearbeitungsfrequenz stark von den lokalen Gegebenheiten abhängen. Genau hier fehlt es aber an publizierten wissenschaftlichen Grundlagen, insbesondere in den Bereichen Vegetationsbewuchs und im Gleis lebender Fauna.

Verbesserung der Datenverfügbarkeit zur Vegetation im Gleisbereich

Vegetationsdaten für eine größere und möglichst repräsentative Zahl von Strecken standen dem Projekt nicht zur Verfügung. Es besteht demnach Forschungsbedarf auf diesem Gebiet, wobei mehr geeignete VS für die Verfahrensoptimierung zur Verfügung gestellt werden sollten.

Weiterhin fehlen zeitlich und räumlich dokumentierte Vegetationsdaten sowie Informationen über die bisher dort durchgeführte chemischen Vegetationskontrolle. Diese Daten würden ermöglichen, die neuen Technologien zur Vegetationskontrolle gezielter zu erforschen, Anforderungen noch besser zu ermitteln und Kostenmodelle zu erstellen. Eine Darstellung der Vegetationsdaten auf digitalen Karten wäre ein großer Gewinn für die Forschung und die Anwendung.

Datenlücken zum Thema Tiere im Gleis schließen

Weiterer Forschungsbedarf besteht zum Thema der Fauna im Gleis und ihrem Fluchtverhalten. Zur Ermittlung notwendiger Daten könnten unter Einsatz von Sensorik und kontinuierlicher Messtechnik mithilfe von rechnergestützten Vegetationskarten Prognosen erstellt werden, die die Einsatzlogistik optimieren und gezielte Maßnahmen zum Schutz der Tiere erlauben.

Übersicht der Infrastruktur und der Leit- und Sicherungstechnik

Die detaillierten Anforderungen und die räumliche Verteilung vieler Technischelemente im und am Gleis konnten bisher nur auszugsweise ermittelt werden, was bei einigen Verfahren je nach vorhandener Infrastruktur zu Ausschlusskriterien führen könnte. Um funktionale Einsatzszenarien für die neuen Verfahren zu bestimmen, ist es hilfreich, dass die Positionen und Schutzbedürfnisse von Infrastruktur und Sicherheitstechnik vollständig und raumbezogen bekannt sind. Daher wäre es vorteilhaft, in weiteren Forschungsarbeiten eine umfassende Dokumentation der Eisenbahninfrastruktur zu erstellen.

10 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde auf Basis einer umfangreichen wissenschaftlichen Recherche und selbst generierter empirischer Daten eine nichtchemische Verfahrenskombination zur Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen entwickelt und in Feldversuchen auf ihre Effizienz und Eignung geprüft. Dazu wurden die Verfahren auf einem selbst entwickelten und gebauten Erprobungsträger bestehend aus einem Zug- und Versorgungsfahrzeug in Zweiwege-Technologie und einem angehängten Geräteträger umgesetzt. Mit dieser Einheit wurde die entwickelte Verfahrenskombination umfangreich getestet und hinsichtlich Einsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit bewertet und im Vergleich zu anderen Verfahren eingestuft.

Zunächst wurden insgesamt 18 verschiedene nichtchemische Vegetationskontrollverfahren hinsichtlich der Anforderungen an den Einsatz auf Gleisanlagen untersucht und anhand von 22 Bewertungskriterien evaluiert. Da nicht für alle Verfahren ausreichende Informationen aus der einschlägigen Literatur zur Verfügung standen, wurden für einige von ihnen Screening- und Limit-Versuche (Versuche ohne statistische Auswertung) durchgeführt. Zum weiteren Verständnis fand außerdem ein Streckenmonitoring statt, um Aspekte wie die Wachstumsbedingungen und die Vegetation im Gleisbereich zu untersuchen.

Aus der Gesamtheit der Untersuchungen leiteten sich drei als am besten geeignet bewertete Alternativverfahren ab. Es handelt sich um das MJ (Zupfen der Pflanzen), das El (Schädigung der Zellstruktur durch elektrischen Strom) und das mit Abrasivmittel versetzte Druckwasserverfahren (Schneiden oder zerfasern von Pflanzenteilen).

Diese Verfahren wurden im weiteren Verlauf konzeptionell und konstruktiv im Rahmen der Vorbereitung zur Fertigung des o. g. Erprobungsträgers weiterentwickelt. Aus den damit durchgeführten Versuchsfahrten zeigte sich, dass sich das MJ am besten zur Reduktion eines hohen Pflanzenbestands und das El zur wurzeltiefen Behandlung der Pflanzen eignet. Das Druckwasserverfahren ist besonders für schwer zugängliche Bereiche prädestiniert, wie beispielsweise nah an den Schienen oder im Weichenbereich, wo die anderen beiden Verfahren nicht hingelangen.

Mit der Verfahrenskombination konnte bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 2,5 km/h und einer hohen VD eine Reduktion von 80 bis 90 % erreicht werden. Bei geringer VD waren Geschwindigkeiten von bis zu 10 km/h möglich. Durch Anwendung des El direkt im Anschluss an das MJ wurde dessen Wirksamkeit wegen der nun gekürzten Pflanzen deutlich erhöht. Der Einsatz nur des Hochdruckwasserstrahls war auch mit 20 km/h auf krautig bewachsenen Flächen effektiv. Nach aktuellem Stand wird eine Anwendungsfrequenz der Verfahrenskombination von mindestens zwei Mal während der Vegetationsperiode empfohlen.

Der Energiebedarf ist gegenüber der Ausbringung von Herbiziden zwar fünf bis zwanzigmal höher, im Vergleich zum bisher bereits im Betrieb erprobten Heißwasserverfahren wird aber zwei bis siebenmal weniger Energie benötigt.

Die Wirksamkeit der Verfahrenskombination auf invasive Arten konnte nicht abschließend geklärt werden, da es sich bei den Funden meist nur um einzelne Pflanzen in geringer Anzahl handelte.

Basierend auf der Auswertung der Versuchs- und Projektergebnisse wurden abschließend Handlungsempfehlungen für die weitere Anwendung und Entwicklung des Versuchsträgers formuliert. Die Verfahrenskombination lässt sich bei aktuellem Stand am ehesten in Schutzgebieten oder auf Museumsbahnen, in denen die chemischen Verfahren nicht zugelassen sind und der Verkehr mit geringer Frequenz oder geringer Geschwindigkeiten fährt, anwenden.

Konstruktive Weiterentwicklungen ggf. unter Einsatz von Sensorik und Künstlicher Intelligenz versprechen weitere Verbesserungen der Verfahrenskombination.

Das Ziel, geeignete nichtchemische Verfahren aufgrund wissenschaftlicher Untersuchungen zu identifizieren und ihre Eignung nachzuweisen, ist in diesem Projekt erfolgreich gelungen. Die gefundene und in einem Erprobungsträger realisierte Verfahrenskombination ist sehr wirksam und nachhaltig. Im Vergleich zum chemischen Ausbringen von Herbiziden muss noch an der Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit und der weiteren Reduktion des Energieverbrauchs gearbeitet werden.

Quellenverzeichnis

- [1] DB Umwelt, DB Netze Fahrweg, Hg., Okt. 2016, „Die Leitlinien für eine nachhaltige Vegetationspflege im Rahmen der Instandhaltung von Anlagen und Flächen: Integrierter Pflanzenschutz im DB Konzern in Deutschland“, Deutsche Bahn AG, Berlin. [Online]. Verfügbar unter: https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/anlage_8_-_praesentation_psm_db.pdf. Zugriff am: 12. November 2021.
- [2] *Allgemeines Eisenbahngesetz vom 27. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2378, 2396; 1994 I S. 2439), das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 10. September 2021 (BGBl. I S. 4147) geändert worden ist*, 1994. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/aeg_1994/
- [3] *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*, 1967. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/EBO.pdf>
- [4] Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Deutsche Bahn AG, DB Netze Fahrweg und DB Fahrwegdienste GmbH, Hg., 2019, „Vegetationsmanagement an Bahntrassen der Deutschen Bahn AG in Niedersachsen: Ein Leitfaden für die Zusammenarbeit zwischen Naturschutz-, Waldbehörden und DB“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4134622/fd58466d6fc49cf19242dd87e051c176/vegetationsleitfaden_niedersachsen-data.pdf. Zugriff am: 17. August 2021.
- [5] *Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung: PflSchAnwV 1992*, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/pflschanwv_1992/
- [6] Deutsche Bahn AG, Hg., 31. März 2022, „Integrierter Bericht 2021 - Deutsche Bahn Konzern“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/db-konzern-und-db-ag>. Zugriff am: 20. Mai 2022.
- [7] Pietras-Couffignal, K., Below, M., Yilmazer, P., Nolte, R. und Schuh, T., Apr. 2021, „Future vegetation control of European Railways State-of-the-art report (TRISTRAM Final Report)“, Paris ISBN 978-2-7461-3068-5. Zugriff am: 18. August 2021.
- [8] Hurle, K. und Aderhold, D., 1996, „Gutachten zur Auswahl von Herbiziden für die Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen – Abschlussbericht im Auftrag der Deutschen Bahn AG: (unveröffentlicht)“.
- [9] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, *Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland* (Zugriff am: 10. Oktober 2023).
- [10] Nolte, R., Behrendt, S., Magro, M. und Pietras-Couffignal, K., 2018, *HERBIE - Guidelines, State of the Art and Integrated Assessment of Weed Control and Management for Railways*. Paris: UIC-ETF.
- [11] BGBl, *Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahU-KEwiJ_ZXIk-P1AhUcSPEDHcaKDM0QFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.gesetze-im-internet.de%2Fogewv_2016%2F0GevV.pdf&usg=AOvVaw3pEt15hLTznuHA0TweCRt
- [12] DB Netz AG, Feb. 2022, „Pflanzenschutzmitteleinsatz bei der DB AG“, unveröffentlicht.
- [13] Deutsche Bahn AG, Hg., 30. März 2023, „Integrierter Bericht 2022 - Deutsche Bahn Konzern“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ibir.deutschebahn.com/2022/de/weitere-informationen/download-center/>. Zugriff am: 11. Mai 2023.
- [14] Deutsche Bahn AG, Hg., 25. März 2021, „Integrierter Bericht 2020 - Deutsche Bahn Konzern“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/db-konzern-und-db-ag>. Zugriff am: 12. Januar 2022.

- [15] Deutsche Bahn AG, Hg., 21. März 2024, „Integrierter Bericht 2023 – Deutsche Bahn Konzern“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ibir.deutschebahn.com/2023/de/start/>. Zugriff am: 28. Juni 2024.
- [16] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, *Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland* (Zugriff am: 12. September 2024).
- [17] Krauss, J., Baur, B. und Keller, M., 2021, „Pelargonsäure: ein neuer Baustein bei der Unkrautbekämpfung in Zwiebeln“.
- [18] Belchim Crop Protection, *Beloukha: Infoblatt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://certisbelchim.de/produkt/Beloukha/> (Zugriff am: 6. Januar 2025).
- [19] Belchim Crop Protection, *Sicherheitsdatenblatt Beloukha – Pelargonsäure: Version 2.1*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.raiffeisen.com/agrar_sdb/detail/22606 (Zugriff am: 10. Oktober 2023).
- [20] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, *Datenblatt Anwendung Beloukha: Anwendungsnummer: 008528-00/08-001*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bvl.bund.de/SharedDocs/Downloads/04_Pflanzenschutzmittel/01_zulassungsberichte/008528-00-00.html (Zugriff am: 12. September 2024).
- [21] Industrieverband Agrar, *Unkraut – ein Sicherheitsrisiko im Gleisbett der Bahn*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iva.de/iva-magazin/umwelt-verbraucher/unkraut-ein-sicherheitsrisiko-im-gleisbett-der-bahn> (Zugriff am: 7. Februar 2022).
- [22] Müller, C., Kuppelwieser, H., Arx, R. von und Beyeler, R., 2001, „Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen“, Diverse Schriften DIV DIV-4806-D. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/boden/publikationen-studien/publikationen/vegetationskontrolle-auf-bahnanlagen.html>. Zugriff am: 17. August 2021.
- [23] Deutsche Bahn AG, *Integrierter Pflanzenschutz im DB-Konzern in Deutschland*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nap-pflanzenschutz.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/IPS/Integrierter_Pflanzenschutz/Leitlinien_IPS/Leitlinie_IPS_DeutscheBahn.pdf (Zugriff am: 17. August 2021).
- [24] Below, M., Kuppelwieser, H. und Gächter, F., 2003, „UIC “Vegetation Control” Project“. [Online]. Verfügbar unter: https://uic.org/IMG/pdf/uic_alternative_vegetation_control_022303-uic-project-2003.pdf. Zugriff am: 17. August 2021.
- [25] Matthews, V., 2011, *Bahnbau*, 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- [26] Brandes, D., 30. Nov. 2004, „Exkursionsziel Eisenbahnbrache?: Der unerwartete Artenreichtum von innerstädtischen Eisenbahnflächen“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.ruderal-vegetation.de/epub/eisenbahnbrache.pdf>
- [27] Brandes, D., 27. Okt. 2015, „Die Flora auf (städtischen) Gleisanlagen“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.flora-deutschlands.de/Dateien_2015/Brandes-Flora%20auf%20staedtschen%20Bahngleisen.pdf
- [28] Eggers, T., Zwerger, P. und Aderhold, D., 2001, „Bewuchsentwicklung und Bildung typischer Pflanzenbestände auf Gleisanlagen“, *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzbundes*, Bd. 53, Nr. 4, S. 91–97.
- [29] van der Meer, M. und Buholzer, S., 2019, „Vorprojekt «Begrünung von Geleise-Banketten und Vegetationskontrolle ohne Herbizide»: Bericht zur Machbarkeitsstudie 2018“ 90. [Online]. Verfügbar unter: <https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/42927>. Zugriff am: 2. Februar 2021.
- [30] Brandes, D., 1. Okt. 2002, „Bahnhof Freising: Exkursionsnotizen zur Flora“, Technischen Universität Braunschweig. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ruderal-vegetation.de/epub/bahnhof_freising.pdf. Zugriff am: 16. August 2021.
- [31] Brandes, D., 2004, „Zur Flora des Bahnhofs Halberstadt“, Technischen Universität Braunschweig. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ruderal-vegetation.de/epub/bahnhof_halberstadt.pdf. Zugriff am: 16. August 2021.

- [32] Büscher, D., Keil, P. und Loos, G., 2008, „Neue Ausbreitungstendenzen von primär als Eisenbahnwanderer aufgetretenen Pflanzenarten im Ruhrgebiet: Die Beispiele *Eragrostis minor*, *Geranium purpureum* und *Saxifraga tridactylites*“ (de), *Braunschweiger Geobotanische Arbeiten*, Nr. 9, S. 97–106, doi: 10.24355/DBBS.084-201701201707-0.
- [33] Brandes, D., 1. Okt. 2002, „Hauptbahnhof Rostock: Exkursionsnotizen zur Flora“, Institut für Pflanzenbiologie der TU Braunschweig. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ruderal-vegetation.de/epub/hbf_rostock.pdf. Zugriff am: 17. August 2021.
- [34] Geyer, H., Loos, G. und Büscher, D., 2008, „Rezentvorkommen von Adventivpflanzen und Apophyten auf Bahnhöfen im mittleren Westfalen und ihre Ausbreitungstendenzen“ (de), *Braunschweiger Geobotanische Arbeiten*, Nr. 9, S. 177–188, doi: 10.24355/DBBS.084-201701201724-0.
- [35] Leiblein-Wild, M. und Bartels, P., 2020, „Problematische invasive Arten – Herausforderungen für den Schienensektor“ (ger), *Der Eisenbahningenieur*, 05/2020, S. 43–45.
- [36] Tackenberg, O., 2018, „Ermittlung und Risikobewertung der für den Verkehrsträger Schiene kritischen invasiven Arten“, Bonn, EBA-Forschungsbericht 2018-11.
- [37] Umweltbundesamt, *Veränderung der jahreszeitlichen Entwicklungsphasen bei Pflanzen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/veraenderung-der-jahreszeitlichen#pflanzen-als-indikatoren-fur-klimaveranderungen> (Zugriff am: 6. Oktober 2023).
- [38] F. Trognitz, A. Sessitsch, S. Follak, M. Koch, A. Fördös und N. Sedlacek, *ControlInRoad: Controlling the spread of invasive species with innovative methods in road construction and maintenance*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.controlinroad.org/documents> (Zugriff am: 8. Oktober 2021).
- [39] Gleisbau-Welt, *Gleisbau und Instandhaltung/ Maschineller Gleisbau/ Bettungsreinigung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/gleisbau-und-instandhaltung/maschineller-gleisbau/bettungsreinigung> (Zugriff am: 20. Januar 2022).
- [40] Coch, T., 1994, *Waldrandpflege: Grundlagen und Konzepte*, 1. Aufl. Ulmer.
- [41] Roll, E., 2004, „Hinweise zur ökologischen Wirkungsprognose in UVP, LBP und FFH-Verträglichkeitsprüfungen bei Aus- und Neubaumaßnahmen von Eisenbahnen des Bundes“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.naturschutzrecht.eu/wp-content/uploads/2008/05/EBA-Wirkungsprognose-11-2006.pdf>.
- [42] Bock, M., 2021, „Experimentelle und numerische Studie des Kollisionsverhaltens von Insekten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei Straßenfahrzeugen“, Technische Hochschule Ingolstadt.
- [43] *Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG) § 39 Allgemeiner Schutz wild lebender Tiere und Pflanzen; Ermächtigung zum Erlass von Rechtsverordnungen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-inter-net.de/bnatschg_2009/_39.html
- [44] Matthäus, G. und Vetter, B., 2018, „Wiederinbetriebnahme der Bahnstrecke Weil der Stadt – Calw (4810): Spezielle artenschutzrechtliche Prüfung“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiV4-E4vf1AhW-Q_EDHYIhBNQQFnoECACQAQ&url=https%3A%2F%2Frp.baden-wuerttemberg.de%2Ffileadmin%2FRP-Internet%2FKarlsruhe%2FAbteilung_1%2FReferat_17%2F_DocumentLibraries%2FHermann_Hesse_Bahn%2FHHB_Diverse_Eisenbahnkreuzungs-_und_Verkehrsstationsmassnahmen%2FPlanunterlagen%2FAnlg._07_Spezielle_artenschutzrechtliche_Pruefung.pdf&usq=AOvVaw1T4IH25iS1K78_tjBj4IXN.
- [45] Kelm, J., Lange, A., Schulz, B., Götsche, M., Steffens, T. und Reck, H., 2015, „How often does a strictly arboreal mammal voluntarily cross roads? New insights into the behaviour of the hazel dormouse in roadside habitats“, *Folia Zoologica -Praha-*, Jg. 64, Nr. 4, S. 342–348, doi: 10.25225/fozo.v64.i4.a9.2015.

- [46] Runge, H., Simon, M. und Widding, T., 2010, „Rahmenbedingungen für die Wirksamkeit von Maßnahmen des Artenschutzes bei Infrastrukturvorhaben: FuE-Vorhaben im Rahmen des Umweltforschungsplanes des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz - FKZ 3507 82 080“, Hannover, Marburg.
- [47] Tester, R., 2018, „Fachinformationen Pro Bilche: Biodiversitätsförderflächen im Wald mit der Zielart Haselmaus *Muscardinus avellanarius* mit Fokus Strukturförderung“. [Online]. Verfügbar unter: <https://probilche.ch/wp-content/uploads/2018/05/Pro-Bilche-Fachinformation-Struktur%C3%B6rderung-Wald.pdf>.
- [48] Büchner, S. und Lang, J., 2014, *Die Haselmaus (Muscardinus avellanarius) in Deutschland – Lebensräume, Schutzmaßnahmen und Forschungsbedarf*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/269335282_Die_Haselmaus_Muscardinus_avelanarius_in_Deutschland_-_Lebensraume_Schutzmassnahmen_und_Forschungsbedarf
- [49] Schleicher, A., Albrecht, K., Bosert, S., Jocher, P. und Engler, J. O., 2021, „Minderung der indirekten Fallenwirkung für Tiere in Straßenseitenräumen“.
- [50] Bartels, P., Esser, D., Leiblein-Wild, M. und Nagel, K.-O., 2018, „Auswirkungen von Verkehr auf planungsrelevante Tierarten“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmvi-experten-netzwerk.de/DE/Termine/2018/Daten-VIT/Poster-5-3.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- [51] Albrecht, K., Hör, T., Henning, F. W., Töpfer-Hofmann, G. und Grünfelder, C., 2014, *Leistungsbeschreibungen für faunistische Untersuchungen im Zusammenhang mit landschaftsplanerischen Fachbeiträgen und Artenschutzbeitrag: Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 02.0332/2011/LRB im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Schlussbericht 2014*. Fachverl. NW.
- [52] Büchner, S. und Lang, J., 2017, „Falsch gebaute Haselmauskästen als Todesfalle“, *Natur und Landschaft*, Jg. 92, Nr. 8.
- [53] Laufer, H., 1998, „Ein bedeutendes Vorkommen der Mauereidechse, *Podarcis muralis*, am Bahnkörper nördlich von Offenburg (Baden-Württemberg)“, *Zeitschrift für Feldherpetologie*, Nr. 5, S. 55–64.
- [54] Kolleck, J., Vorreier, E., Wöhler, S. und Rehfeld, D., Okt. 2020, „Auswirkungen von Instandhaltungsmaßnahmen im Gleisbett der Bahn auf Zaun- und Mauereidechsen-Populationen“, Bonn, EBA-Forschungsbericht 2018-10.
- [55] Hachtel, M., Schmidt, P., Brocksieper, U. und Roder, C., 2009, „Erfassung von Reptilien - eine Übersicht über den Einsatz künstlicher Verstecke (KV) und die Kombination mit anderen Methoden“, *Methoden der Feldherpetologie*, Jg. 15, S. 85–134. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/profile/monika-hachtel/publication/264046173_erfassung_von_reptilien_-_eine_übersicht_über_den_einsatz_kunstlicher_verstecke_kv_und_die_kombination_mit_anderen_methoden
- [56] Schulte, U., Laufer, H., Mayer, W. und Meyer, A., 2011, „Die Mauereidechse: Reptil des Jahres 2011“.
- [57] Börner, A.-R., 2019, „Saurologica: No. 6“, Köln. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEWjzafTx2L32AhXv7rsIHZNcB8IQFnoECA0QAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.boerner-law.de%2Fpdf%2FSaurologica_6r.pdf&usq=AOvVaw0KITIJWrJ54aPL97zl8X1W. Zugriff am: 11. März 2022.
- [58] DB Netz AG, 2020, „Stationsoffensive Bayern: Neubau Haltepunkt Würzburg-Heidingsfeld Ost“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.regierung.unterfranken.bayern.de/mam/aufgaben/bereich2/sg23/planunterlagen_haltepunkt_w%C3%BCrzburg%E2%80%93heidingsfeld-ost.pdf.
- [59] Schmellekamp, C. und Tegethof, U., 2012, *Vernetzungseignung von Brücken im Bereich von Lebensraumkorridoren: Pilotstudie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://opus4.bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/year/2012/docId/372>

- [60] Bernotat, D. und Dierschke, V., 2016, „Übergeordnete Kriterien zur Bewertung der Mortalität wildlebender Tiere im Rahmen von Projekten und Eingriffen: 3. Fassung“.
- [61] BDEW, Hg., 2021, „Anwendungshilfe zur Bestimmung der signifikanten Erhöhung des Tötungsrisikos von Brutvögeln an Windenergieanlagen gem. § 44 BNatSchG: Bewertungs- methode unter Heranziehung probabilistischer Ansätze“.
- [62] BVL Bund, Hg., 2019, „Registration Report for Pelargonic acid: S19690“.
- [63] Finge, K. und Schroth, M., 2014, „Instandhaltung im grünen Bereich - Baumfällungen an den Gleisen: Eine präventive Bearbeitung der Vegetation an Bahnstrecken ist wichtig für einen störungsfreien Bahnbetrieb und die Verkehrssicherheit.“, *EI - Der Eisenbahningenieur*, 07/2014, S. 40–44.
- [64] Coleman, G. R. et al., 2019, „Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control“, *Weed Technology*, Nr. 33, S. 633–650, doi: 10.1017/wet.2019.32.
- [65] Upadhyaya, M. K. und Blackshaw, R. E., Hg., 2007, *Non-chemical Weed Management: Principles, Concepts and Technology*. Oxfordshire: CABI: CABI.
- [66] Daniell, J. W., Chappell, W. E. und Couch, H. B., 1969, „Effect of Sublethal and Lethal Temperatures on Plant Cells“, *Plant Physiology*, Jg. 44, Nr. 12, S. 1684–1689, doi: 10.1104/pp.44.12.1684.
- [67] Adolph, G. und Tanner, L., 2020, „NoHerbie – Alternativen bei der Vegetationskontrolle“, *EI - Der Eisenbahningenieur*, 12/2020, S. 48–51.
- [68] Atmatzidis, E. und Behrendt, S., 1995, *Ökologischer Vergleich der Verfahren zur Vegetationskontrolle bei der Deutschen Bahn AG unter Berücksichtigung von Kostenberechnungen*. Berlin: IZT.
- [69] Kolb, E., 14. Dez. 2017, „Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zukunft-pflanzenbau.at/fileadmin/Redakteure_ZP/Zukunft_Pflanzenbau/Glyphosat/Vortrag_Kolb_Vegetationskontrolle_RT_Glyphosat.pdf
- [70] Gmünder, M. und Damo, M., 30. Aug. 2018, „Begrünte Bankette 1. Workshop“. Bern. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agroscope.admin.ch/dam/agroscope/fr/dokumente/themen/umwelt-ressourcen/biodiversitaet-und-landschaft/sbb-begruente-bankette.pdf.download.pdf/PDF-1_WS1_Input-SBB.pdf
- [71] Bundesministerium Nachhaltigkeit und Tourismus, Hg., Juni 2019, „NATIONALE MACHBARKEITSSTUDIE ZUM GLYPHOSATAUSSTIEG: Endbericht zum Forschungsprojekt Nummer 101347“, Universität für Bodenkultur Wien - Institut für Pflanzenschutz - Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Wien.
- [72] Bohren, C., Adolph, G. und Tanner, L., 2020, „Wirkungsvergleich Heißwasser und Herbizid: Schweizer Bahnen wollen ab 2025 weitgehend auf Herbizideinsatz verzichten“, 29. *Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung*, doi: 10.5073/jka.2020.464.063.
- [73] Kristoffersen, P., Rask, A. M. und Larsen, S. U., 2008, „Non-chemical weed control on traffic islands: a comparison of the efficacy of five weed control techniques“, *Weed Research*, Jg. 48, Nr. 2, S. 124–130, doi: 10.1111/j.1365-3180.2007.00612.x.
- [74] J. Maier und J. Huber, *Freiflächenpflege im kommunalen Bereich Unkrautmanagement auf Wegen und Plätzen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/unkrautmanagement-freiflaechenpflege-kommunaler-be-reich_lfl-information.pdf (Zugriff am: 18. August 2021).
- [75] Martelloni, L., Frascioni, C., Sportelli, M., Fontanelli, M., Raaelli, M. und Peruzzi, A., 2019, „The Use of Different Hot Foam Doses for Weed Control“, *Agronomy*, Jg. 9, 490, doi: 10.3390/agronomy9090490.
- [76] Feldhusen, J. und Grote, K.-H., Hg., 2013, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0>

- [77] *Entwicklung technischer Produkte und Systeme*, 1993: *Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*, VDI 2221, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin.
- [78] Archut, C., Jendry, N., Schulte-Marxloh, A., Eberius, M., Conrath, U. und Schindler, C., 2022, „Entwicklung eines Alternativverfahrens zur chemischen Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen“, Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [79] Klocke, F. und König, W., 2007, *Fertigungsverfahren: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*, 4. Aufl. Berlin, New York: Springer.
- [80] Putz, M., Dix, M., Morczinek, F. und Dittrich, M., 2018, „Suspension Technology for Abrasive Waterjet (AWJ) Cutting of Ceramics“, *Procedia CIRP*, Jg. 77, S. 367–370, doi: 10.1016/j.procir.2018.09.037.
- [81] Bergs, T., 2020, „Laser- und Wasserstrahl-Materialbearbeitung“. Aachen.
- [82] ConSus – ANT Stationary Cutting Solutions GmbH & ANT Applied New Technologies AG, 2020, „ANT optimiert Wasser Abrasiv Suspension Systeme. Wasserstrahlschneiden mit ConSus® vereint Produktivität und Schnittqualität“.
- [83] G. Hoffmann, *Systemvergleich der beiden Wasserstrahlschneidverfahren Injektor (WAIS) versus Suspension (WASS)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.schneidforum.de/schneidwissen/wasserstrahlschneiden/suspension-vs-injektor.html> (Zugriff am: 29. November 2022).
- [84] M. Below und F. Gerhard, *Weed Control within the tracks of Deutsche Bahn AG - status quo and future prospects: 2nd UIC International Workshop on Vegetation Management Paris, May 24 and 25, 2016*. [Online]. Verfügbar unter: https://uic.org/events/IMG/pdf/session_1a_-_micheal_below_-_db_-_weed_control_within_the_tracks_of_deutsche_bahn_-_status_quo.pdf (Zugriff am: 27. Oktober 2023).
- [85] Meteostat, *Wetterrückblick und Klimadaten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://meteostat.net/de/> (Zugriff am: 29. August 2022).
- [86] *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen: LärmVibrationsArbSchV*, 2021.
- [87] *VERORDNUNG (EU) Nr. 1304/2014 DER KOMMISSION vom 26. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lärm“ sowie zur Änderung der Entscheidung 2008/232/EG und Aufhebung des Beschlusses 2011/229/EU: TSI Noise*, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1304>
- [88] Isert, N., Lutzenberger, S., Brammer, H. und Jöckle, C., 2022, „Lärm-Monitoring: Schallmessungen im Schienenverkehr“.
- [89] DCode, *Spectral Analysis*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dcode.fr/spectral-analysis>.
- [90] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Hg., 2021, „Lärm am Arbeitsplatz: DGUV Information 209-023“.
- [91] Möhler, U. et al., Nov. 2017, „Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht“, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. [Online]. Verfügbar unter: https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/171114_schlussbericht_moe.pdf. Zugriff am: 18. August 2021.
- [92] Rotz, C. A. und Muhtar, H. A., 1992, „Rotary Power Requirements for Harvesting and Handling Equipment“, *Applied Engineering in Agriculture*, 8(6), doi: 10.13031/2013.26109.
- [93] Slaven, M. J., Koch, M. und Borger, C. P. D., 2023, „Exploring the potential of electric weed control: a review“, *Weed Science*, Jg. 71, S. 403–421, doi: 10.1017/wsc.2023.38.
- [94] Krupanek, J., Gonzales de Santos, P., Emmi, L., Wollweber, M. und Sandmann, H., 2024, „Environmental Performance of an Autonomous Laser Weeding Robot—A Case Study“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 29, S. 1021–1052, doi: 10.1007/s11367-024-02295-w.
- [95] Ascard, J., 1995, „Effects of flame weeding on weed species at different developmental stages“, *Weed Research*, Jg. 35, S. 397–411, doi: 10.1111/j.1365-3180.1995.tb01636.x.

- [96] Kolberg, R. L. und Wiles, L. J., 2002, „Effect of Steam Application on Cropland Weeds“, *Weed Technology*, Jg. 16, S. 43–49, doi: 10.1614/0890-037X(2002)016[0043:EOSAOC]2.0.CO;2.
- [97] Andreasen, C., Hansen, L. und Streibig, J. C., 1999, „The Effect of Ultraviolet Radiation on the Fresh Weight of Some Weeds and Crops“, *Weed Technology*, Jg. 13, S. 554–560.
- [98] Heisel*, T., Schou, J., Andreasen, C. und Christensen, S., 2002, „Using laser to measure stem thickness and cut weed stems“, *Weed Research*, Jg. 42, S. 242–248, doi: 10.1046/j.1365-3180.2002.00282.x.
- [99] Boos, W., Salmen, M., Wiese, J.-H., Pitsch, M., Lange, J. de und Kelzenberg, C. M. B., 2015, *Erfolgreich Kalkulieren im Werkzeugbau*, 1. Aufl.
- [100] Verivox, *Wasserkosten berechnen und sparen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.verivox.de/strom-gas/ratgeber/wasserkosten-berechnen-und-sparen-1000796/> (Zugriff am: 30. Juli 2024).
- [101] HMB Machines, *HMB 25 Kilogramm Olivin-Sand im Beutel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hbm-machines.com/de/p/hbm-25-kilogramm-olivin-sand-im-beutel> (Zugriff am: 30. Juli 2024).
- [102] energie.ch, *Wirkungsgrad*. [Online]. Verfügbar unter: <https://energie.ch/wirkungsgrad/> (Zugriff am: 30. Juli 2024).
- [103] WDR, *So viel bezahlen Sie heute für Benzin und Diesel in NRW*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www1.wdr.de/nachrichten/aktuelle-benzinpreise-in-nrw-100.html> (Zugriff am: 26. August 2024).
- [104] Fassbinder, S., „Wie Energie-effizient ist der Bahnverkehr wirklich?“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10002264/ews/2019-wise/2020-01-13-folien.pdf>
- [105] Finanz-Tools, *Inflationsrechner für Preissteigerung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.finance-tools.de/inflationsrechner-preissteigerung> (Zugriff am: 30. Juli 2024).
- [106] Umrechner Euro, *DM Euro Rechner*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umrechner-euro.de/dm-euro> (Zugriff am: 30. Juli 2024).
- [107] Achs, G. und Floss, S., 2023, „Schalltechnische Untersuchung bei unterschiedlichen Antriebsarten von Stopfmaschinen“, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 10, S. 50–54.
- [108] VERORDNUNG (EU) Nr. 1302/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union: TSI LOC&PAS, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1302>
- [109] *Bahnanwendungen – Oberbau – Schienengebundene Bau- und Instandhaltungsmaschinen – Teil 3: Allgemeine Sicherheitsanforderungen; Deutsche Fassung EN 14033-3:2017*, Okt. 2017, DIN EN 14033-3, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [110] Deutscher Bundestag, Hg., 2016, „Zonales Pflanzenschutzmittelzulassungsverfahren: Gründe der Einführung“.
- [111] Deutsche Bahn AG, Hg., 16. März 2016, „Integrierter Bericht 2015 - Deutsche Bahn“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/archiv/detail/integrierte-bericht-2015-deutsche-bahn/>. Zugriff am: 25. Januar 2022.
- [112] Deutsche Bahn AG, Hg., 23. März 2017, „Integrierter Bericht 2016 - Deutsche Bahn“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/archiv/detail/integrierter-bericht-2016-deutsche-bahn/>. Zugriff am: 25. Januar 2022.
- [113] Deutsche Bahn AG, Hg., 28. Feb. 2018, „Integrierter Bericht 2017 - Deutsche Bahn“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/archiv/detail/integrierter-bericht-2017-deutsche-bahn/>. Zugriff am: 25. Januar 2022.
- [114] Deutsche Bahn AG, Hg., 28. März 2019, „Integrierter Bericht 2018 - Deutsche Bahn“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/archiv/detail/integrierter-bericht-2018-deutsche-bahn/>. Zugriff am: 25. Januar 2022.

- [115] Deutsche Bahn AG, Hg., 26. März 2020, „Integrierter Bericht 2019 - Deutsche Bahn Konzern“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ir.deutschebahn.com/de/berichte/db-konzern-und-db-ag>. Zugriff am: 25. Januar 2022.
- [116] Gleisbau-Welt, *Gleisbau-Welt - Unterbau*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/unterbau> (Zugriff am: 25. Januar 2022).
- [117] Lichtberger, B., 2010, *Handbuch Gleis: Unterbau - Oberbau - Instandhaltung - Wirtschaftlichkeit*, 3. Aufl. PMC Media House, 2010.
- [118] *Technische Lieferbedingungen Gleisschotter*, Aug. 2021, DBS 918 061, DB Netz AG.
- [119] Fendrich, L. und Fengler, W., Hg., 2013, *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [120] *Richtlinie 836: Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten*, 2019.
- [121] Servis, I., 2018, „Entwässerung von Bahnstrecken“, *RegioTrans 2018*, S. 33–35. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fwt.fichtner.de/userfiles/fileadmin-fwt/Publikationen/RegioTrans_2018_Entwaesserung_von_Bahnstrecken_Fachbeitrag_von_I._Sevis.pdf
- [122] *Mechanische Schwingungen – Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen*, Aug. 2010: *Teil 1: Begriffe, Klassifizierung, Prüfverfahren*, DIN 45673-1, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- [123] Hoffmann, A., 2014, „Physikalische und elektrische Eigenschaften gefüllter Bahnsignalkabel“, *EIK - Eisenbahn Ingenieur Kompendium*, S. 167–180.
- [124] PENGKABEL GmbH, *Bahnkabel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.yumpu.com/de/document/read/51077310/bahnkabel-peng-kabel-gmbh>.
- [125] *Bahnanwendung - Umweltbedingungen für Betriebsmittel*, Dez. 2002: *Teil 3: Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen*, DIN EN 50125-3 :2002-07, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Berlin.
- [126] Richter, M., 06.2002, „Die Bedeutung städtischer Gliederungsmuster für das Vorkommen von Pflanzenarten unter besonderer Berücksichtigung von *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud. – dargestellt am Beispiel Stuttgart“. Dissertation, Institut für Landschafts- und Pflanzenökologie, Universität Hohenheim, Hohenheim.
- [127] Braess, H. P. und Koller, G., 2020, „Versuche zur Schienentemperatur und deren Reduktion: Erkenntnisse über die maximal zu erwartende Schienentemperatur sowie deren Beeinflussung durch Farbe oder das Abschirmen mit Schienenstegabschirmungen“, *EI - Der Eisenbahningenieur*, Dezember, S. 35–39.
- [128] *Kabel, isolierte Leitungen und Glasfaserkabel – Prüfverfahren für nichtmetallene Werkstoffe*, Dez. 2012, DIN EN 60811-100, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Berlin.
- [129] *FFIS for Eurobalise*, Feb. 2012: *SUBSET-036*, 3.0.0, European Union Agency for Railways. [Online]. Verfügbar unter: https://www.era.europa.eu/sites/default/files/filesystem/ertms/ccs_tsi_annex_a_-_mandatory_specifications/set_of_specifications_2_etcs_b3_mr1_gsm-r_b1/index009_-_subset-036_v300.pdf
- [130] GTB Bahntechnik GmbH, *Kennblatt PZB-Gleismagnete: PZB-Gleismagnete Bauform GWT*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/31760789-Kennblatt-pzb-gleismagnete-pzb-gleismagnete-bauform-gwt.html> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [131] Thales Management & Services Deutschland GmbH, *Axle Counter Az LM*. [Online]. Verfügbar unter: <https://myproducts-thales.com/de/products/axle-counter-systems/az-lm> (Zugriff am: 10. Februar 2021).
- [132] Thales Management & Services Deutschland GmbH, *Axle Counter Az LS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://myproducts-thales.com/products/axle-counter-systems/az-ls> (Zugriff am: 10. Februar 2021).

- [133] Siemens Mobility GmbH, *Wayguard simis LC: Bahnübergänge intelligent sichern*. [Online]. Verfügbar unter: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f3d2a76d-4534-4120-ac37-2b37e1959fed/wayguard-simis-lc-de.pdf>.
- [134] Rask, A. M. und Kristoffersen, P., 2007, „A review of non-chemical weed control on hard surfaces“, *Weed Research*, Jg. 47, Nr. 5, S. 370–380, doi: 10.1111/j.1365-3180.2007.00579.x.
- [135] Kappis, C., Schreiter, H. und Reichenbacher, K., 2015, „Grünes Gleis - Stand und Überblick: Ein Beitrag des Grüngleisnetzwerkes“, *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, Nr. 6, S. 63–69.
- [136] Besa Strassenunterhalt AG, Mai. 2021, „Mähen im Eisenbahnbereich“, Persönliche Korrespondenz.
- [137] Weed Control, *STEEL MAXIMO - Weed Control*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.weedcontrol.nl/en/products/steel-maximo/> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [138] Terrell, S. und Schubert, M., 2016, „Die Schneeräumtechnik der DB Netz AG, Teil 2“, *BahnPraxis B*, Nr. 11, S. 3–5.
- [139] Misar, H., 2001, „Kosteneinsparungen durch intelligentes Schottermanagement“, *EI - Der Eisenbahningenieur*, Jg. 52, Nr. 8, S. 38–41.
- [140] Network Rail, *Seasonal track treatment and weather support fleet - Network Rail*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/our-fleet-machines-and-vehicles/seasonal-track-treatment-and-weather-support-fleet/> (Zugriff am: 24. September 2021).
- [141] Caffini S.P.A., *Grasskiller*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.caffini.com/de/grasskiller/121-grasskiller.html> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [142] Martin, F., Lohrmann, G. und Stoll, A., 2022, „Selective weed control in grassland using high-pressure water jets“, *VDI-Berichte*, Nr. 2395.
- [143] Fritz, A. H. und Schulze, G., 2008, *Fertigungstechnik*, 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [144] Bourquin, D. T., „Weed Puller Apparatus,“ US 4183411 A. USA, 15.01.
- [145] H. Klünder, *Unkrautzupfer - Klünder Agrarmaschinen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kluender-agrar.de/unkrautzupfer> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [146] Scholz, C., Kinski, D., Mentrup, D., Kohlbrecher, M. und Ruckelshausen, A., „Camera-based selective weed control application module ("Precision Spraying App") for the autonomous field robot platform BoniRob“ in *International Conference of Agricultural Engineering 2014 Zürich*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/276936970_Camera-based_selective_weed_control_application_module_Precision_Spraying_App_for_the_autonomous_field_robot_platform_BoniRob
- [147] Scholz, C., Möller, K., Ruckelshausen, A., Hinck, S. und Göttinger, M., Juli 2014, „Automatic Soil Penetrometer Measurements and GIS-based Documentation with the Autonomous Field Robot Platform BoniRob“, Sacramento, 12th International Conference on Precision Agriculture.
- [148] Astatkie, T., Rifai, M. N., Harvard, P. und Adsett, J., 2007, „Effectiveness of Hot Water, Infra-red and open flame thermal units for controlling weeds“, *Biological Agriculture and Horticulture*, Jg. 25, S. 1–12.
- [149] Weeding Technologies Limited, *Alternative methods to weed control - What's The Difference*. [Online]. Verfügbar unter: [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4955436/\(English%20UK\)%20Alternative%20methods%20of%20weed%20control%20ebook%20v3%20Feb%2020.pdf?__hstc=142353517.06909d55a07ac5927890339d7de67b4f.1629216230263.1629216230263.1629216230263.1&__hssc=142353517.2.1629216230263&__hsfp=3067048317&hsCtaTracking=37ee2663-f547-4f9e-ad68-dffed686a785%7Cfa1a4484-0d75-4490-bc06-d4bf0bea8b29](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4955436/(English%20UK)%20Alternative%20methods%20of%20weed%20control%20ebook%20v3%20Feb%2020.pdf?__hstc=142353517.06909d55a07ac5927890339d7de67b4f.1629216230263.1629216230263.1629216230263.1&__hssc=142353517.2.1629216230263&__hsfp=3067048317&hsCtaTracking=37ee2663-f547-4f9e-ad68-dffed686a785%7Cfa1a4484-0d75-4490-bc06-d4bf0bea8b29) (Zugriff am: 7. Februar 2024).
- [150] Rask, A. M., Larsen, S. U., Andreasen, C. und Kristoffersen, P., 2013, „Determining treatment frequency for controlling weeds on traffic islands using chemical and non-chemical weed control“, *Weed Research*, Jg. 53, S. 249–258, doi: 10.1111/wre.12019.

- [151] Stavermann GmbH, *ZACHO Wildkrautbeseitigung & Unkrautbekämpfung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wildkrautbeseitigung.com/> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [152] Kärcher, *Effektiv und Umweltschonend: Unkrautentfernung mit Heißwasser*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kaercher.com/de/professional/loesungen-fuer-professionals/anwendungsloesungen/unkraut-mit-heisswasser-entfernen.html> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [153] Forschungsinformationssystem Agrar und Ernährung, *Vegetationskontrolle auf Gleisanlagen mit Heißwasser (Gleis frei)*. [Online]. Verfügbar unter: https://fisaonline.de/projekte-finden/details/?tx_fisaresearch_projects%5Baction%5D=projectDetails&tx_fisaresearch_projects%5Bas_id%5D=&tx_fisaresearch_projects%5Bcontroller%5D=Projects&tx_fisaresearch_projects%5Bgt_id%5D=&tx_fisaresearch_projects%5Bp_id%5D=15596&tx_fisaresearch_projects%5Bsa_id%5D=&tx_fisaresearch_projects%5Bss_id%5D=&cHash=a5d6854530fcc534895c2e16c834c31d#more (Zugriff am: 29. Juli 2022).
- [154] Hansson, D. und Ascard, J., 2002, „Influence of developmental stage and time of assessment on hot water weed control“, *Weed Research*, Jg. 42, S. 307–316, doi: 10.1046/j.1365-3180.2002.00290.x.
- [155] Huber, B. und Kleisinger, S., 27. Sep. 2006, „Umweltgerechte thermische Unkraut- und Vegetationsregulierung: Abschlussbericht“, Universität Hohenheim, Stuttgart. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/0330120A_-_Abschlussbericht.pdf. Zugriff am: 18. August 2021.
- [156] De Cauwer, B., Bogaert, S., Claerhout, S., Bulcke, R. und Reheul, D., 2015, „Efficacy and reduced fuel use for hot water weed control on pavements“, *Weed Research*, Jg. 55, Nr. 2, S. 195–205, doi: 10.1111/wre.12132.
- [157] Iprogreen, *Herbizidfreie Wildkrautregulierung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iprogreen.de/> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [158] *Lexikon der Biologie: Stratifikation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/stratifikation/64158> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [159] Krier, P., Lanigan, J., Ferriday, P. und Lewis, R., 2020, „Development and implementation of novel cryogenic railhead cleaning technology“, *Permanent Way Institution Journal*, Jg. 138, S. 35–39. [Online]. Verfügbar unter: <https://eprints.whiterose.ac.uk/159974/>
- [160] Scheible, A., „Apparatus for Exterminating Vegetation,“ US546682A. USA 535761, 24. September.
- [161] ADAS UK Ltd, 26. Feb. 2014, „An economic assessment of electric weed control and comparable alternatives“ PS2143.
- [162] Koch, M., Tholen, T., Drießen, P. und Ergas, B., 2020, „The Electroherb Technology: A new technique supporting modern weed management“, 29. *Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung*, S. 261–263, doi: 10.5073/jka.2020.464.039.
- [163] Exmoor National Park, *Rootwave Trials (Rootwave Pro technology)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.exmoor-nationalpark.gov.uk/Whats-Special/exmoor-non-native-invasive-species-ennis/about-the-ennis-project/organic-rootwave-trials> (Zugriff am: 15. Februar 2022).
- [164] 2021, „Kartoffelkraut unter Strom“, *Kartoffelbau: die Fachzeitschrift für Spezialisten*, Jg. 72, S. 26–28. [Online]. Verfügbar unter: <https://cdn.nufarm.com/wp-content/uploads/sites/24/2021/08/17162612/Beitrag-Kartoffelbau-Kartoffelkraut-unter-Strom-Nufarm-NUCROP.pdf>
- [165] Landwirtschaftskammer NRW, *Mit Strom dem Unkraut zu Leibe rücken*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oekolandbau.nrw.de/fachinfo/pflanzenbau/ackerbau/2019/mit-strom-dem-unkraut-zu-leibe-ruecken> (Zugriff am: 25. Januar 2022).
- [166] LfULG Sachsen, DB, SBB, JKI, RWTH, 4. März 2021, „Fachgespräch Vegetationsmanagement auf Gleisanlagen“.

- [167] Kaçan, K., Engin, Ç. und Ikbil, A., 2018, „Determination of possibilities of microwave application for weed control“, *INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURE & BIOLOGY*, Jg. 20, S. 966–974, doi: 10.17957/IJAB/15.0584.
- [168] Rana, A. und Derr, J. F., 2018, „Responses of Ten Weed Species to Microwave Radiation Exposure as Affected by Plant Size“, *Journal of Environmental Horticulture*, 36(1), S. 14–20, doi: 10.24266/0738-2898-36.1.14.
- [169] Sartorato, I., Zanin, G., Baldoin, C. und Zanche, C. D. E., 2006, „Observations on the potential of microwaves for weed control“, *Weed Research*, Jg. 46, S. 1–9, doi: 10.1111/j.1365-3180.2006.00484.x.
- [170] Brodie, G. und Hollins, E., 2015, „The Effect of Microwave Treatment on Ryegrass and Wild Radish Plants and Seeds“, *Glob. J. Agric. Innov. Res. Dev.*, Jg. 2, S. 16–24, doi: 10.15377/2409-9813.2015.02.01.2.
- [171] WAYLAND, J., MERKLE, M., DAVIS, F., MENGES, R. M. und ROBINSON, R., 1975, „Control of weeds with UHF electromagnetic fields“, *Weed Research*, Jg. 15, S. 1–5, doi: 10.1111/j.1365-3180.1975.tb01088.x.
- [172] Bintsis, T., Litopoulou-Tzanetaki, E. und Robinson, R., 2000, „Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry – a critical review“, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Nr. 80, S. 637–645.
- [173] Urban, L., Charles, F., Alcântara de Miranda, M. R. und Aarrouf, J., 2016, „Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its agronomic potential before and after harvest“, *Plant Physiology and Biochemistry*, Nr. 105, S. 1–11, doi: 10.1016/j.plaphy.2016.04.004.
- [174] Klärner, S., Berkelmann-Löhnertz, B., Herrmann, G., Flemming, B., Pfliehring, M. und Keicher, R., 2013, „Fungizidreduzierung: Bestrahlung mit UV C-Licht“, *Der Deutsche Weinbau*, Nr. 8, S. 80–85.
- [175] Klärner, S., Flemming, B. und Berkelmann-Löhnertz, B., 2015, „Untersuchungen zur Fäulnisprävention im Weinbau durch UV-C-Bestrahlung der Rebe (*Vitis vinifera* L.)“, *Landtechnik*, 70(4), S. 139–149, doi: 10.1515/lt.2015.2669.
- [176] Aarrouf, J. und Urban, L., 2020, „Flashes of UV-C light: An innovative method for stimulating plant defences“, *PloS One*, 15(7), doi: 10.1371/journal.pone.0235918.
- [177] Bridgen, M. P., 2016, „Using ultraviolet-C (UV-C) irradiation on greenhouse ornamental plants for growth regulation“, *Acta Hort. (Acta Horticulturae)*, Nr. 1134, S. 49–56, doi: 10.17660/ActaHortic.2016.1134.7.
- [178] K. Jensen, *Optocleaner: Cut CO2 emissions - Organic Weed Control by UV Light* (Zugriff am: 18. August 2021).
- [179] Mathiasen, S. K., Bak, T., Christensen, S. und Kudsk, P., 2006, „The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method“, *Biosystems Engineering*, 95(4), S. 497–505, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2006.08.010.
- [180] M. Oitzman, *Carbon Robotics unveils a new generation of weed killing robots - Mobile Robot Guide*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mobilerobotguide.com/2021/04/13/carbon-robotics-unveils-a-new-generation-of-weed-killing-robots/> (Zugriff am: 7. Februar 2024).
- [181] Wöltjen, C., Haferkamp, H., Rath, T. und Herzog, D., 2008, „Plant growth depression by selective irradiation of the meristem with CO2 and diode lasers“, *Biosystems Engineering*, Jg. 101, S. 316–324, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2008.08.006.
- [182] Kaierle, S., Marx, C., Rath, T. und Hustedt, M., 2013, „Find and Irradiate – Lasers used for Weed Control: Chemical free elimination of unwanted plants“, *Laser-journal*, Jg. 3, S. 44–47, doi: 10.1002/latj.201390038.
- [183] Heisel *et al.*, 2001, „Cutting weeds with a CO2 laser“, *Weed Research*, Jg. 41, S. 19–29, doi: 10.1046/j.1365-3180.2001.00212.x.
- [184] Deutscher Bundestag, Hg., 26. Nov. 2019, „Kosten von Alternativen zu klassischen Breitbandherbiziden: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Karlheinz

- Busen, Frank Sitta, Dr. Gero Clemens Hocker, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP“, Berlin Drucksache 19/15447. [Online]. Verfügbar unter: <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/154/1915447.pdf>.
- [185] Rurtalbahn, Mrz. 2021, "Wassereintrag in Gleiskörper bei Alternativverfahren", mündlich.
- [186] van der Meer, M. und Buholzer, S., 2021, „Grüner Teppich – gezielte Begrünung von Banketten und Randbereichen im Schienennetz der SBB“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ira.agroscope.ch/it-ch/Page/Publikation?einzelpublikationId=50678&parentUrl=%2Fit-ch%2Fpage%2F>.
- [187] Siemens AG, *ICE 4, der Hochgeschwindigkeitszug für die Deutsche Bahn*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/schiene/fahrzeuge/hochgeschwindigkeit-intercity/ice-4.html-4.html> (Zugriff am: 12. Januar 2022).
- [188] RS Components GmbH, *Adaptaflex CP Kunststoff Leerrohr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.rs-online.com/web/p/kabelrohre/8300008> (Zugriff am: 12. Januar 2022).
- [189] Bayerische Kabelwerke AG, *Produktinformation Linienleiterkabel BayRail® A-2Y(ZG)2Y*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bayka.de/productDocs/Produktinformation.132927390.pdf> (Zugriff am: 10. Februar 2021).
- [190] Annovi Reverberi, *Datenblatt Pumpe AR 320 BP Twin*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spritzenteile.de/media/products/0434748001430143770.pdf> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [191] NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V., *Hintergrundwissen – Gefährdung unserer Amphibien durch den Straßenverkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nabu-heppenheim.de/artenschutz/amphibien/hintergrundwissen/> (Zugriff am: 20. Januar 2025).
- [192] Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Haselmaus (Muscardinus avellanarius)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lfu.bayern.de/natur/sap/arteninformationen/steckbrief/zeige?stb-name=Muscardinus+avellanarius> (Zugriff am: 22. Januar 2025).
- [193] v. Frisch, O., 1951, „Fluchtverhalten der Haselmaus (Muscardinus avellanarius)“, *Zeitschrift für Tierpsychologie*, (8) 3, S. 368–369.
- [194] Brodie, G., Khan, M. J., Gupta, D. und Foletta, S., 2018, „Microwave Weed and Soil Treatment in Agricultural Systems“, *Global Journal of Agricultural Innovation, Research & Development*, Jg. 5, S. 1–14, doi: 10.15377/2409-9813.2018.05.1.
- [195] Barker, A. V. und Probst, R. G., 2008, „Herbicide Alternatives Research“ SPRII03.23. [Online]. Verfügbar unter: <https://trid.trb.org/view/911483>.
- [196] besa, *Pflege von Eisenbahn-Böschungen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.besa.ch/pflege-von-bahnboeschungen> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [197] Mizuno, A. und Tenma, Takamasa and Yamano, Nobuaki, 1990, „Destruction of weeds by pulsed high voltage discharges“, *Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, S. 720–727, doi: 10.1109/IAS.1990.152264.
- [198] CERTIS EUROPE Railservice, *Prospekt Railservice*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.certis-railservice.de/fileadmin/RS/Downloads/CERTIS_Railservice.pdf (Zugriff am: 18. August 2021).
- [199] coomuno LLC, *Heatweed Wave X*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.coomuno.com/en/products-solutions/> (Zugriff am: 7. Februar 2024).
- [200] Hoinkis, J., 2016, *Chemie für Ingenieure*, 14. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH.
- [201] S. User, *UV-Samenentkeimer – Dinies Technologies GmbH*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinies.com/samenentkeimer.html> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [202] Rifai, M. N., Astatkie, T., Lacko-Bartosova, M. und Gadus, J., 2002, „Effect of two different thermal units and three types of mulch on weeds in apple orchards“, *Journal of Environmental Engineering and Science*, Jg. 1, S. 331–338, doi: 10.1139/S02-027.
- [203] Brodie et al., 2018, *Microwave based Weed Control and Soil Treatment*. Berlin: DE GRUYTER.
- [204] Deter, A., 2019, „Holmer Terra Variant mit Bredal-Streuaufbau erhältlich“, *top agrar online*, 23. Apr. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.topagrar.com/technik/news/holmer->

- terra-variant-mit-bredal-streuaufbau-erhaeltlich-11525801.html. Zugriff am: 18. August 2021.
- [205] N. Railways, VAKTRAK - *Vacuum Train*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.neu-railways.fr/en/cleaning-of-railways/menu-vaktrak> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [206] Maschinenring Österreich, *Grass Killer Vorführungen / Maschinenring Region Weinviertel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenring.at/maschinenring-region-weinviertel/grass-killer-vorfuehrungen> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [207] akkugaertner.de, *Bosch Akku-Heckenschere Test (18 Volt): Alle Geräte im Vergleich*. [Online]. Verfügbar unter: <https://akkugaertner.de/bosch-akku-heckenschere> (Zugriff am: 18. August 2021).
- [208] Arfsten, D. P., Schaeffer, D. J. und Mulveny, D. C., 1996, „The effects of near ultraviolet radiation on the toxic effects of polycyclic aromatic hydrocarbons in animals and plants: a review“ (eng), *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Jg. 33, Nr. 1, S. 1–24, doi: 10.1006/eesa.1996.0001.
- [209] Wang, Y., Liu, C. S., Li, F. B., Liu, C. P. und Liang, J. B., 2009, „Photodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbon pyrene by iron oxide in solid phase“ (eng), *Journal of Hazardous Materials*, Jg. 162, 2–3, S. 716–723, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.05.086.
- [210] Hillert, D., Gehring, J., Pardey, A. und Reinecke, T., 2016, „Schutz vor Gefahrstoffen beim Umgang mit Holzschwellen“, *BauPortal*, Jg. 5, S. 19–22.

Anhänge

1.	Weiterführende Informationen zu den baulichen Komponenten des Gleisbereichs	143
2.	Liste der nichtchemischen Alternativverfahren	149
3.	Studien zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen	162
4.	Datenlage der Alternativverfahren und ergänzende Ergebnisse projekteigener Versuche..	165
5.	Punkteverteilung für die Bewertung und Auswahl der geeignetsten Verfahren	186
6.	Ergebnisse der Bewertung	218
7.	Anforderungen an den Versuchsträger	267
8.	Erstbetrachtung der potenziellen Risiken für besonders geschützte Tiere im Gleisbereich	270
9.	Steckbriefe und Artenliste der Versuchsstrecken	274

1. Weiterführende Informationen zu den baulichen Komponenten des Gleisbereichs

Schotterbett (Bereich A und B)

Das Schotterbett (auch als Bettung bezeichnet) hat die Aufgabe die Kräfte in den Untergrund weiterzuleiten. Gleichzeitig dient es der Dränage von Regenwasser. Eine mögliche Schädigung ist durch den Eintrag von Pflanzenmaterial bedingt, welches die Zwischenräume des Schotters zusetzt und so zu einer verschlechterten Dränagewirkung führt. Darüber hinaus ist der Effekt selbstverstärkend, da durch das organische Material abgestorbener Pflanzen erneut Nährboden zum Aufwachsen neuer Pflanzen entsteht.

Als Folge dieser Schädigung schreiten die Alterungsprozesse in der Gleisbettung schneller als üblich voran. Das bedeutet im konkreten Fall, dass die Elastizität des Schotterbettes verloren geht, wodurch sich die Gleislage lokal verschlechtern kann [1]. Feuchte Holzschwellen altern schneller und müssen früher ersetzt werden. Durch eine schlechtere Dränage können sich Frost- oder Schlammstellen bilden, die zu lokal schlechteren Gleislagen führen und den sicheren Bahnbetrieb gefährden [116].

Als Schotter werden generell Hartgesteine, wie Basalt, Diabas oder Granit, verwendet [117]. Die Körnung liegt nach DIN EN 13450 im Bereich zwischen 31,5 und 63 mm [118]. Durch die andauernde Belastung nutzen die Steine nach und nach ab, es bildet sich Feinmaterial aus Abrieb und gebrochenen Steinen und die Elastizität der Bettung wird reduziert [39].

Aktuell wird die Güte des Schotterbettes unter anderem anhand von auftretenden Setzungserscheinungen bewertet. Übersteigt die Setzung die zulässigen Grenzwerte, muss der Gleisschotter gestopft bzw. im Falle von erheblichen Verschmutzungen zusätzlich gereinigt werden. Die zulässigen Grenzwerte hängen von der Streckengeschwindigkeit ab [119]. Ril 836 gibt dabei den zulässigen Setzungsunterschied an. Dieser beträgt beispielsweise bei einer Setzungslänge von 10 m und einer Entwurfsgeschwindigkeit von 100 km/h ca. 6 mm. Bei höheren Setzungslängen steigt der zulässige Setzungsunterschied, bei höheren Entwurfsgeschwindigkeiten sinkt er. [120]

Über die Schädigung der Bettung durch den Pflanzenbewuchs hinaus muss eine Schädigung durch das Vegetationskontrollverfahren selbst verhindert werden. So darf die Position der einzelnen Schottersteine höchstens für einzelne Steine an der Oberfläche verändert werden. Dies ist insbesondere für die langanhaltende Vorspannung der Schottersteine wichtig, da ansonsten ein Stopfen des Schotters früher als nötig erfolgen muss. Ebenfalls dürfen die Steine nicht durch das Verfahren beschädigt werden, sodass mehr Feinmaterial erzeugt wird. Die Gleislage darf ebenfalls nicht durch auftretende Kräfte und Schwingungen sowie thermische Effekte verändert werden.

Unterbau

Unter der Schotterschicht, die typischerweise eine Stärke von mindestens 300 mm aufweist [119], befindet sich die Planumsschutzschicht. Diese besteht aus hochverdichteten Feinmaterial (Sand oder Split) und wird je nach Bauform zusätzlich mit einer Kunststoffolie aus Polyethylen (PE) ausgeführt. Das Planum ist um 5 % geneigt (1:20) und dient dem seitlichen Abführen des vom Schotterbett aufgenommenen Wassers. Neuere Unterbauformen verwenden teilweise asphaltierte Planumsschutzschichten, die eine weitaus bessere Aufwuchshemmung erzielen. Durch unterirdisch einwachsende Pflanzen kann es auch hier zu einer eingeschränkten Dränage und somit Schädigung kommen.

Randweg (Bereich C)

Auch der Randweg kann durch den Aufwusch von Vegetation erheblich geschädigt oder unpassierbar werden und somit seiner Funktion als Flucht- und Arbeitsweg nicht mehr gerecht werden. Daher ist er laut AEG freizuhalten, um schnelle Evakuierung zu ermöglichen und gleichzeitig eine Verletzungsgefahr durch Stolpern und Stürzen zu minimieren. Das Randwegmaterial ist meist feiner als der im Gleis verwendete Schotter und bietet somit einen anderen Lebensraum für Pflanzen. Beispielsweise wird Betonkies B32 nach DIN 1045 oder Filterkies mit einer Körnung von 16 bis 32 mm verwendet [121]. Es wird jedoch ortsabhängig auch Gleisschotter oder eine Asphalttschicht verwendet.

Schwellen

Das Schotterbett nimmt nicht nur die vertikalen, sondern auch die lateralen und longitudinalen Gleiskräfte über den Kontakt mit den Schwellen auf. Die Schwelle dient der Krafteinleitung der Radaufstands-, Führungs- und Traktionskräfte in das Schotterbett. Diese können aus unterschiedlichen Materialien bestehen und haben unterschiedliche Schnittpunkte mit möglichen Verfahren zur Vegetationskontrolle. Die meisten Schwellen fallen unter eine der folgenden Gattungen:

- Spannbetonschwelle
- Stahlschwelle (Trog- oder Y-Schwelle)
- Holzschwelle
- Kunststoffschwelle

Beim Großteil der aktuell in Deutschland verbauten Gleisschwellen handelt es sich um Spannbetonschwellen. Dennoch finden auch noch immer an vielen Stellen Holz- und Stahlschwellen Anwendung. Holzschwellen werden auf Brückenbauwerken oder an Stellen, an denen eine besonders gute Körperschallisolierung gefordert ist, eingesetzt. Stahlschwellen sind historisch bedingt auf vielen Altbaustrecken vorhanden. Als neuartiges Schwellenmaterial wird zurzeit Kunststoff erprobt, da so preiswerter eine gute Körperschallisolierung erreicht werden kann.

Hinsichtlich der möglichen Schnittpunkte mit einem zukünftigen Vegetationskontrollverfahren, hat jede Schwellenart ihre eigenen kritischen Punkte. Bei Betonschwellen ist darauf zu achten, dass das Verfahren keine unzulässigen Kräfte auf die Schwelle ausübt, die zu Rissen führen. Darüber hinaus darf ein ggf. eingesetzter Betriebsstoff nicht zur verfrühten Alterung des Betons (Betonkorrosion)

oder des im Beton vorhandenen Spannstahls führen. Bei besohnten Betonschwellen ist darauf zu achten, dass die Schwellensohle nicht durch chemische oder thermische Einflüsse geschädigt wird.

Holzschwellen werden mit Holzschutzmitteln aus Teerölen imprägniert, für die zwar inzwischen nach der Chemikalien-Verbotsverordnung (ChemVerbotsVO) § 1 Abschn. 17, Spalte 3, Abs. 1 Obergrenzen für toxische Inhaltsstoffe gelten [119], die jedoch weiterhin eine Gefahr für Umwelt und Gesundheit darstellen. Durch thermische oder mechanische Verfahren besteht die Gefahr, dass diese Imprägnierung ausgeschwemmt oder teilweise verdampft wird und den Schotterkörper belastet bzw. gar ins Grundwasser gelangt. Hinzu kommt, dass durch ein Auswaschen der Imprägnierung die Lebensdauer der Holzschwelle verringert wird. Bei langanhaltendem trockenem Wetter besteht zudem die Gefahr von Schwellenbränden.

Diese Gefahr besteht zumindest theoretisch auch bei Kunststoffschwellen, wobei dort bisher nur wenige Erkenntnisse vorliegen. Ein Alternativverfahren muss den Brandschutzvorgaben genügen oder Rechnung tragen. Die Kunststoffschwelle bietet zusätzlich das Potential einer möglichen chemischen Reaktion mit ggf. eingesetzten Betriebsstoffen.

Beide Bauarten der Stahlschwelle (Trog- und Y-Stahlschwelle) haben besonders in Hinblick auf die Verwendung elektrischer Vegetationskontrollverfahren den Nachteil, dass es zu einem Kurzschluss zwischen den Stahlschwellen und den Applikatoren kommen kann, sollten diese auf der Oberfläche entlanggeführt werden. Hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit der Schwellen ist hier ähnlich wie bei den Betonschwellen darauf zu achten, dass eingesetzte Betriebsstoffe zu keiner schnelleren Alterung des Schwellenmaterials führen bzw. dieses signifikant schwächen.

Schienen und Befestigungselemente

Vegetationsaufwuchs führt bei entsprechender Wuchshöhe und VD zu einem Schmierfilm auf dem Schienenkopf, der die Traktion von Schienenfahrzeugen verringert. Schienenbefestigungen existieren in unterschiedlichen Bauformen und aus unterschiedlichen Materialien. Bei der Befestigung auf Betonschwellen mittels des Oberbaus K oder W (Abbildung 36) kommen diverse Kombinationen zum Einsatz, die hier stellvertretend für alle anderen Schwellenformen gewählt wird. Sie besteht aus:

- elastischer Zwischenlage
- Schienendübel
- Federring (Oberbau K) oder Spannklemme (W)
- Schraube
- Klemmplatte (Oberbau K) / Winkelführungsplatte (Oberbau W)

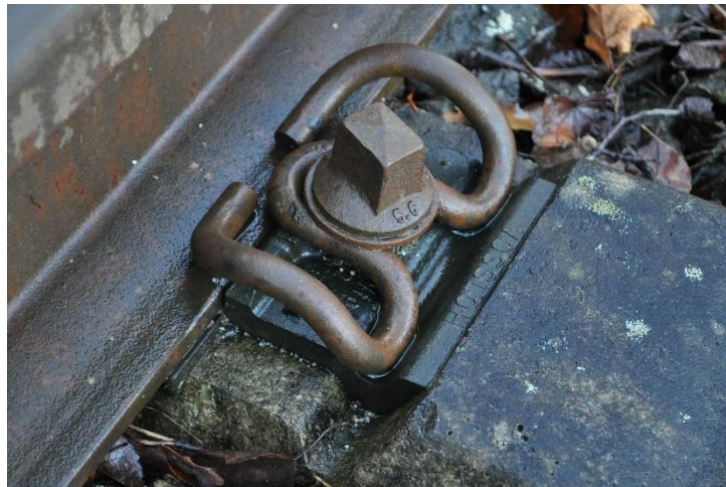


Abbildung 36: Oberbau W.

Kritische Elemente hinsichtlich des verwendeten Materials sind hier vor allem die aus Elastomer bestehende elastische Zwischenlage sowie die aus Kunststoff gefertigten Schwellendübel. Hier muss bei thermischen Verfahren die maximal zulässige Temperatur der elastischen Zwischenlage (zwischen -20 °C und $+70\text{ °C}$) [122] betrachtet werden sowie bei der Ausbringung eines Zusatzstoffes eine frühzeitige Alterung der Werkstoffe bedingt durch eine chemische Reaktion. Hinsichtlich auftretender Kräfte muss sichergestellt werden, dass das Alternativverfahren die Schienenbefestigung nicht löst. Da die Schienenbefestigung ebenfalls aus Metall besteht, ist dies ebenfalls eine Quelle für Kurzschlüsse für elektrische Verfahren.

Weichen

Im Bereich einer Weiche befinden sich im Zwischenraum der Schienen Weichenzungen, Backenschienen sowie Radlenker, die bei Verfahren, welche nah an der Oberfläche eingesetzt werden, als Hindernisse berücksichtigt werden müssen. Bei elektrischen Verfahren können sie zudem Kurzschlüsse hervorrufen. Sowohl zwischen den Weichenzungen als auch im Randbereich, sind weitere mechanische Komponenten, wie der Weichenverschluss, die Schubstange oder die Zungenrollvorrichtung, vorhanden. Diese mechanisch beweglichen Komponenten dürfen nicht in ihrer Funktion eingeschränkt werden, wie beispielsweise durch Blockieren oder den Verlust von Schmierstoffen an den entsprechenden Schmierstellen.

Unabhängig davon, ob eine Weiche elektrisch oder mechanisch verstellt wird, muss das Stellgestänge freigängig sein. Aus diesem Grund ist besonders in diesen Bereichen ein Bewuchs zu verhindern. Werden Weichen von Hand umgelegt, so befindet sich im Randwegbereich ein Stellhebel, der ebenfalls zugänglich sowie für den Triebfahrzeugführer sichtbar sein muss. Werden die Weichen über ein mechanisches Stellwerk gestellt, so sind dort Drahtseilzüge, Umlenkrollen und weitere Komponenten vorhanden. Zwar sind diese häufig im Randwegbereich zu finden, es kommt jedoch auch vor, dass sie in den Bereich der Schotterflanke hineinragen.

Die Problematik der Vegetation im Weichenbereich besteht darin, dass sie dort einerseits besonders sorgfältig entfernt werden sollte, andererseits dort mit vielen der bekannten Alternativverfahren nur schwierig kontrolliert werden kann.

Kanäle/Tröge

Entlang der Bahnstrecke ist eine Vielzahl verschiedener Kabel zur Energie- und Signalübertragung verlegt. Dabei werden die Kabel je nach Einsatzart an unterschiedlichen Stellen im Gleisbereich verlegt, wie entlang des Schienenfußes (z. B. Signal- oder LZB-Kabel) oder in Kabelkanälen entlang des Gleises, um diese besser vor Witterungseinflüssen zu schützen. Die Kanäle sind entweder aufgeständert oder eingegraben im Bereich des Randweges angelegt. Die verwendeten Kabelkanäle bestehen aus Beton, Kunststoff oder Stahlblech. Somit gilt auch hier für das Alternativverfahren, dass dieses die verwendeten Materialien in keiner Weise schädigen darf. Bei den Kabelkanälen aus Stahlblech besteht eine Kurzschlussgefahr bei Verwendung des elektrischen Vegetationskontrollverfahrens.

Kabel

Die elektrischen Einrichtungen entlang der Strecke benötigen bis auf einige Ausnahmen alle ein oder mehrere Anschlusskabel, in denen sowohl die Versorgungsspannung als auch Datensignale übertragen werden. Generell kann nicht präzise vorhergesagt werden, welche Kabel an welchen Stellen des Gleises verlegt sind, da dies besonders bei älteren Strecken nicht immer ausreichend dokumentiert ist.

Grundsätzlich unterliegen Signalkabel der DB AG der Ril 416 und den zugehörigen Lieferbedingungen. Darin festgeschrieben sind neben den elektrischen Eigenschaften relevante Parameter wie die Spannungsfestigkeit und die minimalen und maximalen zulässigen Betriebstemperaturen.

Auch wenn einzelne Hersteller höhere Betriebstemperaturen garantieren, liegt das minimal garantierte Intervall für zulässige Betriebstemperaturen von Kabeln im Bereich von -40 °C bis +60 °C [123–125]. Die niedrigen Temperaturen sind dabei kritischer, da hier der Kunststoff spröder ist [123]. Das gewählte Intervall ist insofern erstaunlich, da unter anderem eigene Versuche zeigten, dass bereits an einem heißen Sommertag auf der Schotteroberfläche Temperaturen nahe der 60 °C erreicht werden können [126, 127]. Hinsichtlich der Spannungsfestigkeit wird die dielektrische Festigkeit zwischen einer einzelnen Ader und der Schirmung des Kabels gemessen. Diese liegt bei neuen Kabeln bei 2 000 V bei Wechselstrom mit 50 Hz über 1 min [124]. Ältere Kabel können teilweise geringere dielektrische Festigkeiten aufweisen.

Die Witterungsfestigkeit einzelner Kabel wird besonders in Hinblick auf die Wasserfestigkeit geprüft. Es wird dabei zwischen Quer- und Längswasserfestigkeit unterschieden. Die Längswasserfestigkeit von Kabeln wurde bisher nach DIN VDE 0472 Teil 811 Prüfverfahren A nachgewiesen, wobei ein 3 m langes Kabelstück über 24 h ohne Wasseraustritt an der offenen Seite einem Wasserdruck von 0,01 MPa standhält. Die Querwasserfestigkeit wird nach DB LH 416.0113 nachgewiesen und ist mittlerweile Stand der Technik. [123]

Generell ist die Querwasserfestigkeit durch die Dampfdiffusionszahl des Isolationswerkstoffes bestimmt. Bei den verbauten Kabeln kommt es somit immer zu einem geringen Feuchtigkeitseintrag, sofern keine dampfdichte Schicht (z. B. aus Aluminium) eingezogen ist. Daher ist zu erwarten, dass eine kurzzeitige Exposition wie sie bei den bekannten Alternativverfahren zur Vegetationskontrolle vorliegt zu keiner erhöhten Feuchtigkeitzzunahme innerhalb des Kabels aufgrund von Querwasser führt. Zusätzlich zeigten Versuche, dass selbst bereits beschädigte Kabel der neuen Generation nur sehr lokal begrenzt Wasser aufnehmen. Die Kabel müssen über die gesamte Lebensdauer von 35 Jahren quer- und längswasserfest sein. [123]

Hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung werden die Kabel primär auf die ertragbaren Längszugkräfte, die beim Verlegen der Kabel auftreten und auf die zulässigen minimalen Biegeradien überprüft [123]. Diese beiden Belastungsarten erscheinen für ein zukünftiges Alternativverfahren eher irrelevant. Die mechanische Belastbarkeit der Außenhülle in Querrichtung wird mit Schlagversuchen nach DIN EN 60811-1-4 überprüft [128]. Die Außenhülle der Kabel besteht im Wesentlichen aus einem der drei Werkstoffe Polyvinylchlorid (PVC), PE oder dem so genannten H-Material, welches eine flammhemmende Mischung verschiedener Kunststoffe ist. [123]

Sicherungstechnik im Gleisbereich

Für alle folgenden Elemente gilt, dass sie nach EN 50125-1 bis -3 auszulegen sind, um den Umweltbedingungen im Gleisbereich in zulässigem Maße zu trotzen. In dieser Normenreihe sind unter anderem zulässige Stoßbelastungen, Belastungen durch Regen und Verschmutzungsgrade, denen die Komponenten standhalten müssen, genannt [125].

Was zunächst für alle Komponenten der Sicherungstechnik gleich gilt ist die EMV. Zu nennen sind hier die Normen DIN EN 50121-1 bis -3, die sich jedoch in der Hauptsache mit dem Bahnfahrzeug befassen, EN 50121-4, die die notwendige EMV von Signal- und Telekommunikationseinrichtungen beschreibt, sowie vom Eisenbahn Bundesamt herausgegebene Regelwerke, wie die Technischen Regelungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit (TR-EMV).

Auch wenn durch Normen und Lieferbestimmungen bereits viele Eigenschaften der Sicherungstechnik definiert sind, so bietet es sich dennoch an die Elemente nochmals einzeln zu betrachten, da hier teilweise aus den Datenblättern einiger Hersteller genauere Eigenschaften ermittelt werden können. Im Folgenden geschieht dies stellvertretend für einzelne Elemente.

Balisen für das European Train Control System (ETCS, dt. europäisches Zugbeeinflussungssystem) müssen nach EU-Anforderungskatalog eine IP-Schutzart von IP67 aufweisen [129]. Somit sind sie laut IP-Kenncode absolut staubdicht und gegen zeitweiliges Untertauchen geschützt, was jedoch keinem Schutz gegen Wasser bei Hochdruck- oder Dampfstrahlreinigung entspricht. Der Schutz gegenüber den Witterungsbedingungen entspricht darüber den in EN 50125-3 geforderten Bedingungen.

PZB-Gleismagnete der Bauart GWT (Abbildung 37) erfüllen die Anforderungen an Schutzart IP66, was eine absolute Staubsichtigkeit sowie einen Schutz gegen starkes Strahlwasser bedeutet. Die Umgebungstemperatur darf im Bereich von -30 °C bis +70 °C liegen. Die Spannungsfestigkeit beträgt

2 000 V und das Gehäuse erträgt eine horizontale Stoßbelastung von 200 g. [130] Gleismagnete sind sehr nah an der außenliegenden Seite der Schiene gelegen und somit im unmittelbar zu behandelnden Bereich gelegen.



Abbildung 37: Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB-Gleismagnet) neben der Schiene.

Ebenfalls nah an der Schiene montiert sind Achszähler oder Einschaltkontakte. Achszähler (z. B. [131, 132]) haben eine Schutzart von IP67 und können in einem Temperaturbereich von -40 °C bis $+70\text{ °C}$ eingesetzt werden. Darüber hinaus entsprechen sie den Normen EN 50124, EN 50125-3, EN 50121-4 und EN 50238-3. [131, 132] Radsensoren (z. B. [133]), die zur achszählgesteuerten Bahnübergangssicherung verwendet werden, haben mindestens die Schutzart IP66 und können in einem Temperaturbereich von -40 °C bis $+85\text{ °C}$ eingesetzt werden. Die Schienenstromfestigkeit beträgt hier 2 kA_{eff} bei Wechselstrom und 10 kA bei Gleichstrom. [133]

2. Liste der nichtchemischen Alternativverfahren

Mechanische Verfahren

Handjäten

Das Jäten von Hand ist ein sehr grundlegendes, nichttechnisches Verfahren, bei dem die Pflanzen abhängig von der Art und dem entsprechenden Wurzelwerk entfernt werden oder zumindest an der Oberfläche abgerissen werden. Aufgrund der Flexibilität und Effizienz des Verfahrens wird es noch immer von vielen Eisenbahngesellschaften in Europa praktiziert. Der Einsatz beschränkt sich dabei jedoch auf das Entfernen von invasiven Arten und auf die Vegetationskontrolle im Randbereich, sofern dieser nicht gemäht werden kann. Außerdem werden schlecht zugängliche Bereiche und Schutzgebiete, in denen ein Einsatz anderer Verfahren nicht zugelassen ist, von Hand behandelt. [24]

Ein Vorteil besteht darin, dass die entfernten Pflanzenteile aus dem Gleisbereich beseitigt werden können und somit kein Pflanzenmaterial in das Schotterbett eingetragen wird. Das Ausreißen der Pflanzen kann das Schotterbett auflockern, allerdings gibt es bisher weder präzise Daten zu diesem Effekt noch einen Vergleich zu der zu erwartenden Schädigung durch Ausreißen und Verbleib der Pflanze im Schotterbett.

Zur Anwendung des Verfahrens werden Arbeitstrupps zum zu behandelnden Abschnitt gebracht. Die Arbeitsgeschwindigkeit ist dabei sehr gering und liegt bei unter 1 km/h [24] bzw. $30 \text{ m}^2/(\text{Arbeitskraft} \times \text{Stunde})$ [10, 22]. Gefahren für die Mitarbeitende bestehen durch die körperliche Belastung [134], die Vegetation selbst und den Verkehr, weshalb Sicherungspersonal für die Arbeiten erforderlich ist. Die Beschreibung des Handjäters ist in der Liste zur Vollständigkeit ergänzt, wird aber im Weiteren nicht zur Auswahl als ein Alternativverfahren hinzugezogen.

Mähen und Mulchen

Hierbei handelt es sich um zwei Verfahren, die die Pflanzen nah an der Oberfläche durch scharfe Klingen (Mähen) oder durch Schlegel (Mulchen) abtrennen. Diese Verfahren werden im Bahnbereich hauptsächlich zur Pflege des Rand- und Böschungsbereichs angewandt. Das Mähen wird im Gleisrost (Bereich A) lediglich auf Rasengleisen bei Stadt- und Straßen großflächig angewandt [135].

Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt beim Zweibegefahrzeug im Schnitt bei 3 bis 5 km/h [136]. Um das Verfahren zu optimieren, wurde es durch manche Anbieter um eine Absaugung ergänzt, die das anfallende Mähgut direkt aufnimmt und in einen mitgeführten Zweibegeanhänger transportiert. Der Energiebedarf inkl. Fahrzeug liegt bei ca. 3 000 MJ/km was unter dem Energiebedarf der thermischen Verfahren liegt [136]. Im Bahnbereich wird meist einmal jährlich der Randbereich gemäht und zurückgeschnitten [24]. Nur in Ausnahmefällen, wie z. B. einer besonders dichten und schnell wachsenden Vegetation, werden Abschnitte mehrmals jährlich gemäht. Eine vollständige Kontrolle der Pflanzen durch Mähen oder Mulchen bedarf einer deutlich regelmäßigeren Anwendung.

Es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen mechanischen Umsetzungen der Verfahren, von der manuellen Anwendung bis zu kleinen selbstfahrenden Geräten, Zweibegefahrzeugen und Mähraupen. Motormanuelle Werkzeuge sind wesentlich in der Durchführung einer flächendeckenden Vegetationskontrolle, sie unterstützen Großgeräte in der Bearbeitung von Ecken und Kanten [63]. Mehrere Eisenbahnunternehmen wie die DB AG, die SBB und die SNCF forschen an der Methode Mähen, besonders an den Begrenzungen und Leistungen eines vollautonomen Mähroboters [7].

Bürsten

Beim Bürsten wird die Vegetation in erster Linie durch rotierende Bürsten oberflächlich geschädigt oder abgetrennt und gelegentlich können schwach verwurzelte Pflanzen aus Fugen ausgerissen werden. Die Bürsten haben meist die Form einer Tellerbürste und bestehen aus Stahldraht oder aus einem abriebfesten Kunststoff. Anwendung findet es vor allem zur Außenbereichspflege im städtischen Raum auf versiegelten Oberflächen, wie Pflaster, Beton oder Asphalt. Vereinzelt werden die Bürsten auch auf erdigen Untergründen eingesetzt und wirken durch das Umgraben der obersten

Erdschicht. Durch den ständigen Kontakt der Borsten mit dem zu behandelnden Untergrund kommt es zu einem Abrieb sowohl an der Bürste als auch am Untergrund selbst.

Im Bahnbereich haben die Schwedischen Eisenbahnen, die SBB sowie die SNCF bereits Erfahrungen mit dem Verfahren zur Vegetationskontrolle gesammelt [10]. So wurden von der schwedischen Eisenbahnaufsicht bereits Versuche im Gleisrost und auf der Schotterflanke vorgenommen, die Geschwindigkeit liegt bei 1 bis 5 km/h und eine Anwendung sollte bis zu viermal im Jahr erfolgen. Problematisch sind hier vor allem die Schädigung freiliegender Komponenten der Sicherungstechnik sowie die Gefahr von Schotterflug [24]. Der Energiebedarf lässt sich bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von ca. 5 km/h, einer Arbeitsbreite von 2,30 m und einem Motorenwirkungsgrad von 40 % auf ca. 210 MJ/ha bei einmaliger Anwendung abschätzen [137].

Dass das Bürstenverfahren jedoch auch erfolgreich im Bahnbereich anwendbar ist, zeigen zwei andere Anwendungen jenseits der Vegetationskontrolle. Zum einen werden Bürsten im Winter zum Freikehren der Streckengleise von Schnee verwendet [138], zum anderen nutzen Schotterplaniermaschinen einen Kehrbesen, um die Schwellenoberseite nach der Bearbeitung des Gleisbettes z. B. durch eine Stopfmaschine auszukehren [139].

Druckwasser

Die Wirkung des Verfahrens beruht allgemein auf der hydromechanischen Kraft des unter Druck stehenden Wassers, das bei Kontakt eine mechanische Schädigung hervorruft. Ursprünglich bekannt ist der Einsatz von Druckwasser aus der Reinigungstechnik. Dort werden seit langer Zeit Hochdruckreiniger genutzt, um hartnäckige Verschmutzungen zu entfernen. Im Bahnbereich wird unter Hochdruck stehendes Wasser unter anderem im Herbst zur Reinigung von Schienenköpfen verwendet [140], jedoch nicht zur Vegetationskontrolle.

In der Landwirtschaft befindet sich das Verfahren zur Vegetationskontrolle bereits im Einsatz. Dabei wird durch den Druck des Wasserstrahls die Vegetation zerschnitten und der Boden mehrere cm tief aufgewühlt, wodurch eine Tiefenwirkung im Wurzelbereich erzielt werden kann. Eine kommerzielle Anwendung in Weinbergen [141] berichtet eine Einsatzgeschwindigkeit zwischen 1,4 und 4 km/h mit 100 MPa Wasserdruck. Der Wasserbedarf beträgt knapp 900 bis 1 300 L/ha, allerdings bezieht sich diese Größe nur auf die Behandlung von Weinstöcken. Die Anwendungsfrequenz liegt bei zwei- bis dreimal in den Monaten Mai bis Juli.

Eine weitere Anwendung des Wasserstrahls ist bei der Behandlung der Herbst-Zeitlose (*Colchicum autumnale*) im Grünland [142]. In diesem Fall handelt es sich um einen Prototyp mit einem Druck von 25 MPa und einer Arbeitsgeschwindigkeit bis zu 3,6 km/h. Durch Bilderkennung werden die Ressourcen optimiert, so liegt der Wasserbedarf unter 1 000 L/ha. Eine durchschnittliche Reduzierung der Pflanzen von 97 % wurde bei der Behandlung der Pflanzen in den frühen Wachstumsphasen (im April) mit einer Wiederholung nach drei Wochen erreicht.

Zu den vorherigen Anwendungen gibt es keine Angabe zum Energiebedarf. Laut der Zusammenfassung von Coleman [64] beträgt der Energiebedarf ca. 15 MJ/ha und der Wasserverbrauch ca. 24 L/ha bei einer gezielten Behandlung von Jungpflanzen (Sämlingen) mit 90 bis 100 % Reduktion der

Pflanzen. Die Strahlleistung und somit die Schneidleistung hängt im Wesentlichen von der Strahlgeschwindigkeit ab. [143]

Maschinelles Jäten

Bei diesem Verfahren werden Pflanzen durch einen Mechanismus maschinell gejätet, bei dem nur die Pflanzen erfasst werden und kein Kontakt zur Bodenoberfläche besteht. Das Funktionsprinzip der Maschine beruht auf mehreren paarweisen angeordneten Rollen, die sich berühren und jeweils gegenläufig rotieren. Durch die Reibung zwischen den sich berührenden Rollen entsteht eine Kraft, die die Pflanzen aus der Erde zieht. [144]

Entwickelt wurde das Verfahren hauptsächlich zur Entfernung von Melde und Gänsefuß im landwirtschaftlichen Bereich. Die Einsatzgeschwindigkeit liegt bei ca. 1 bis 5 km/h [145]. Bisher wird das Verfahren nur in der Landwirtschaft eingesetzt. Eine Umsetzung im urbanen Raum oder gar im Bahnbereich ist bisher nicht bekannt.

Die aktuelle Forschung in der Landwirtschaft unternimmt viele Anstrengungen zur Entwicklung autonomer Jätroboter. Der BoniRob der Firma Bosch verwendet unter anderem einen Rammstab, um einzelne unerwünschte Pflanzen zu zerdrücken [146, 147]. Jedoch ist die Anwendung eines Stempels, der die einzelnen Pflanzen zerdrückt im Schotterbett problematisch, da zum einen der Schotter im Vergleich zum Boden auf einem Feld sehr hart ist und zum anderen nicht zu erwarten ist, dass die Pflanze wirksam geschädigt werden kann.

Thermische Verfahren

Abflammen

Beim Abflammen werden die unerwünschten Pflanzen gezielt mit einer offenen Flamme auf mindestens 55 °C erhitzt, was zum Absterben der behandelten Pflanzenteile und teilweise auch der gesamten Pflanze führen kann [24].

Hauptsächlich eingesetzt wird das Verfahren im Agrarbereich sowie in urbanen Umgebungen. Im Bahnbereich haben bisher lediglich die SBB, die dänischen und die schwedischen Verkehrsbehörden Erfahrungen mit dem Abflammen von unerwünschter Vegetation im Randbereich und im Bereich der Schotterflanke sammeln können [22, 24]. Bei der SBB geschah dies mittels eines Handbrenners. Als Brennstoff wird in den meisten Fällen Propangas bzw. Erdgas verwendet [64, 73, 148]. Die SBB bewertete bereits im Jahr 2001 einen hohen Brennstoffbedarf von 222 g Propan pro Quadratmeter bei einmaliger Anwendung als problematisch [67]. In weiteren Quellen schwankt der Energiebedarf zwischen 1 008 MJ/ha [64] und 3 528 MJ/ha [95] pro Anwendung.

Die Behandlungsdauer und die erreichte Temperatur hängen stark von der Leistung und Geometrie des Abflamngerätes, von der behandelten Pflanzenart, ihrer Toleranz gegenüber Hitze und ihrer Wärmeleitfähigkeit ab. Typische Praxiswerte sind mehrere Sekunden pro 10 cm breiter Pflanze und Arbeitsgeschwindigkeiten von 2 bis 8 km/h [95, 148, 149]. Die Anzahl der nötigen Anwendungen hängt stark von der lokalen Vegetation ab und liegt je nach Dosis bei jährlich sechs bis acht

Anwendungen [150]. Das Abflamverfahren birgt das Risiko einer Entzündung der trockenen Vegetation, trockener Holzschwellen sowie das Schmelzen von Leerrohren und der Isolation von Kabeln, da hier ein direkter Kontakt zur Flamme besteht.

Infrarot

Ähnlich wie beim Abflammen wird auch beim Infrarot-Verfahren die Pflanze durch Erwärmung kurzzeitig auf die pflanzenschädigende Temperatur von über 55 °C erhitzt [65, 66]. Dies geschieht allerdings nicht durch direkten Kontakt mit der Flamme, sondern ausschließlich indirekt durch Wärmestrahlung. Dazu werden Bleche oder Keramikplatten mit Brennern aufgeheizt, die wiederum die Infrarotstrahlung abgeben. Es existieren auch elektrische Infrarotstrahler aus dem Bereich der Lacktrocknung und der Heimanwendung. [10, 74]

Im Bahnbereich wurden ebenfalls Geräte zu Versuchszwecken entwickelt. So wurde in den 90er Jahren das Verfahren Thermische-Infrapuls-Kontrolle (TIK91) entwickelt. Dieses wurde anhand eines Fahrzeugprototyps im realen Gleisbereich über sechs Jahre erprobt. Dabei wurde Propangas verbrannt, um gewellte Mangan-Stahlgitter auf bis zu 800 °C zu erhitzen. Diese Gitter gaben die Wärme als Infrarot-Strahlung an den Untergrund ab. Damit konnten im Schotterbereich Temperaturen von 80 bis 100 °C erreicht werden. Die Arbeitsgeschwindigkeit lag bei 1,5 bis 4,5 km/h. Auch bei diesem Verfahren sind für eine zufriedenstellende Vegetationskontrolle vier bis sechs Anwendungen innerhalb der Vegetationsperiode vonnöten. Der Flüssiggasverbrauch des Versuchszuges lag bei ca. 100 L/km. Zusätzlich wurden knapp 900 L Wasser pro Kilometer und Behandlung benötigt, um die Brandgefahr zu minimieren. [68]

Durch die Erwärmung der Gleisoberfläche besteht die Gefahr, dass Stoffe wie beispielsweise Weichenschmiermittel oder die Imprägnierung von Holzschwellen verdampfen und die Bahnmitarbeitende auf dem Schienenfahrzeug gefährden. Darüber hinaus besteht eine Brandgefahr durch sich entzündende trockene Pflanzenbestandteile, die jedoch aufgrund der abgeschirmten Flamme und der etwas niedrigeren Temperaturen geringer ausfällt als beim Abflammen.

Heißluft

Neben dem direkten Flammenkontakt und der Erwärmung der Pflanzen durch Strahlung kann auch erhitzte Luft zur Vegetationskontrolle eingesetzt werden. Diese wird von einem Gebläse aus der Umgebung angesaugt und zusammen mit Gas einer Brennkammer zugeführt, wo das Gemisch gezündet wird. Das heiße Luft-Abgas-Gemisch wird anschließend durch isolierte Rohrleitungen umgeleitet und direkt auf die zu behandelnden Pflanzen geleitet. Es werden Temperaturen von bis zu 800 °C erreicht [151] und die Pflanzen werden wie bei den vorherigen thermischen Verfahren kurzzeitig über eine Temperatur von 55 °C erhitzt. Das Verfahren findet hauptsächlich Anwendung im kommunalen und urbanen Bereich. Für die Gartenanwendung existieren auch elektrisch beheizte Geräte wohingegen für den städtischen Raum konzipierte Geräte meist mit Gas beheizt werden. Somit ist zumindest in der Theorie eine Anwendung des Verfahrens ohne die Nutzung fossiler Brennstoffe möglich.

Die Tiefenwirkung des Verfahrens ist jedoch aufgrund des niedrigeren Energieübergangskoeffizienten bedingt durch die geringere Temperaturdifferenz an der Oberfläche im Vergleich zu

Strahlungswärme begrenzter als die von anderen thermischen Verfahren [152]. Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt bei maximal 7 km/h [151]. Wie auch bei der Verwendung von Heißdampf stellt die Verwirbelung der erhitzten Luft und die dadurch hervorgerufene Effizienzminderung ein großes Problem des Verfahrens dar. Somit muss der Luftaustritt möglichst nah an der zu behandelnden Pflanze und möglichst ohne Seitenwind erfolgen. Der Energiebedarf beträgt nach [64] 16 884 MJ/ha beim Einsatz auf Gräsern. Die Anwendungsfrequenz liegt abhängig von der Dosis zwischen vier und sechs Anwendungen im Jahr [150]. Da das Verfahren wie auch das Infrarotverfahren nicht mit offener Flamme arbeitet, ist die Brandgefahr geringer als beim Abflammen. Aufgrund der hohen Temperaturen ist jedoch weiterhin eine erhöhte Brandgefahr gegeben.

Heißwasser

Beim Heißwasser-Verfahren wird Wasser mit einer Temperatur nahe dem Siedepunkt auf die Pflanzen ausgebracht und die Pflanze dadurch überhitzt und abgetötet. Es wird auf begrenzten Oberflächen, insbesondere im kommunalen und urbanen Bereich auf Parkplätzen, Gehwegen und anderen Funktionsflächen, eingesetzt und eine Vielzahl von Herstellern haben bereits Geräte in Serienreife für diesen Zweck entwickelt. Im Bahnbereich wird das Verfahren ebenfalls erforscht. Sowohl die SBB, die DB AG, die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) als auch die Trafikverket aus Schweden arbeiten derzeit an einer bahntauglichen Umsetzung des Verfahrens [7, 153].

Die Geräte im Bahnbereich hingegen sind im Falle von ZweigeFahrzeugen dieselgeheizt oder arbeiten im Falle des SBB-Vollbahnfahrzeuges mit vorgeheiztem Wasser, dass elektrisch vorerhitzt wurde [67]. Das Verfahren kann mit bis zu 40 km/h eingesetzt werden, wobei die SBB selbst bereits aus ihren Ergebnissen eine Arbeitsgeschwindigkeit von 20 km/h für eine bessere Wirkung vorschlägt [7, 67]. Zusätzlich existieren zur aktuellen Forschung im Bahnbereich und den kommerziell verfügbaren Geräten weitere Studien aus der Landwirtschaft, in denen das Heißwasserverfahren betrachtet und mit anderen Verfahren verglichen wird [148, 154, 155].

Neben der Wassertemperatur, die beim Auftreffen auf die Pflanze noch über 90 °C liegen sollte [149], sind auch hier die Ausbringungsmenge und die Anwendungsfrequenz für den Erfolg der Vegetationskontrolle relevante Parameter. So variiert die Ausbringungsmenge stark zwischen den einzelnen Verfahren. Der Heißwasserspritzzug der SBB hat einen Wassereinsatz von ca. 10 L/m². Dabei sprüht er nicht kontinuierlich, sondern nur gezielt auf einzelne bewachsene Bereiche. Die SBB geht dabei von einer VD von durchschnittlich 4 % aus [72]. Daraus ergibt sich ein Wasserbedarf von 1 300 L/km bei einmaliger Anwendung, was wiederum bei einer Arbeitsbreite von 4,6 m in 2 826 L/ha umgerechnet werden kann.

Im Vergleich zu den aus der Landwirtschaft stammenden Daten ist dieser Wasserbedarf um nahezu das zehnfache geringer. So reicht der angegebene Wasserbedarf von knapp 20 000 L/ha je Anwendung [156] bis zu 29 000 L/ha bei einmaliger Anwendung [154]. Zu erklären ist diese große Streuung der Daten unter anderem dadurch, dass in der Landwirtschaft eine flächendeckendere Verunkrautung der zu behandelnden Flächen vorhanden ist. Die von der SBB angegebenen 4 % sind zwar nach eigenen Begehungen als im Durchschnitt realistischer Bedeckungsgrad für Bahnstrecken einzustufen, jedoch ist der Bewuchs nicht gleichmäßig auf die Schotteroberfläche verteilt. Stellenweise ist ein

Bedeckungsgrad von nahezu 100 % vorzufinden. Somit ist damit zu rechnen, dass das Verfahren lokal sehr große Mengen an heißem Wasser in sehr kurzer Zeit bereitstellen muss.

Analog zum Wasserbedarf variiert auch die angegebene Anwendungsfrequenz. So werden bei hoher Dosis drei Behandlungen im Jahr genannt [10, 72, 150]. Bei niedrigerer Dosis steigt auch die Anwendungsfrequenz auf fünf bis sechs Behandlungen im Jahr [10, 150, 154].

Es ist anzunehmen, dass eine höhere Ausbringungsmenge an Heißwasser auch zu einer besseren Wirkung der Vegetationskontrolle führt. Allerdings korreliert die Wassermenge mit dem Energiebedarf und eine große ausgebrachte Wassermenge bringt zusätzlich logistische wie ökologische Nachteile mit sich. Betrachtet man die von der SBB angegebene maximale Ausbringungsmenge von 60 L/s [72], würde das Aufheizen eines Volumenstromes von 60 L/s um 80 °C eine Heizleistung von knapp 20 MW benötigen. Diese Leistung ist jedoch technisch schwierig auf einem Fahrzeug zu installieren, weshalb das Mitführen des vorgeheizten Wassers in Kesselwagen nicht nur aus rein ökologischer Sicht durchgeführt wird, sondern auch aus technischer Sicht notwendig ist.

Darüber hinaus zeigt die Beispielrechnung ebenfalls den hohen Energiebedarf des Verfahrens. Hier muss das Optimum zwischen Energie- bzw. Wasserbedarf und Wirkung ermittelt werden. Zusätzlich ist bisher wenig über die tatsächliche Tiefenwirkung des Verfahrens auf Wurzeln und Rhizome im Schotterbett bekannt.

Heißschaum

Das Heißschaumverfahren wurde entwickelt, um die Wirkung des Heißwasserverfahrens zu verbessern bzw. eine vergleichbare Wirkung bei geringerem Ressourceneinsatz zu ermöglichen. Dazu wird wie auch beim Heißwasserverfahren heißes Wasser nahe dem Siedepunkt auf die zu behandelnde Oberfläche gegeben. Gleichzeitig wird eine Schicht aus Schaum auf die Oberfläche aufgegeben, die die Oberfläche isolieren soll, sodass das heiße Wasser nicht durch Verdunstung, sondern nur durch Wärmeübergang an das darunterliegende Material und die Pflanzen abkühlt. Das dazu verwendete Schaummittel besteht meist aus Zuckertensiden und ist somit biologisch abbaubar. [155, 157]

Im Bahnbereich ist das Heißschaumverfahren noch in der Erprobungsphase. So testete die Rete Ferroviaria Italiana 2019 das Verfahren auf einem ungenutzten Areal im Randbereich. Der Test erfolgte manuell mit einem dafür geeigneten Gerät. Die Tests ergaben, dass eine Frequenz von fünf bis sechs Anwendungen im Jahr notwendig sein werden [7]. Andere Quellen geben eine Anzahl von drei Anwendungen im Jahr [149] bis hin zu mehr als acht Anwendungen [75] an. Bezüglich der Behandlungsgeschwindigkeit existieren bisher nur Daten aus der Anwendung im städtischen Bereich. Dort liegt sie bei 0,1 km/h [10] bis 1,35 km/h [155]. Dies ist jedoch in Anbetracht dessen, dass es sich hierbei ausschließlich um handgetriebene Geräte handelt.

Zwar wurde das Heißschaumverfahren zur Effizienzsteigerung des Heißwasserverfahrens entwickelt, jedoch existieren wenige miteinander vergleichbare Studien, aus denen sich eine eindeutige Effizienzsteigerung herauslesen lässt. Einzelne Studien geben sogar einen höheren Wasser- und Energiebedarf an, als es beim Heißwasserverfahren der Fall ist. So bedarf es einer Energie von 8 215 MJ/ha

[64] bis 22 884 MJ/ha [75] für eine einmalige Anwendung. Der Wasserbedarf liegt bei 1 L/m² [64] bis zu 6,67 L/m² [75].

Die in der Kommunaltechnik eingesetzten Schaummittel bilden einen recht dünnflüssigen und leichten Schaum, der in der Hauptsache der Abdeckung von Heißwasser auf harten, begrenzt versickerungsfähigen Flächen dient. Beim Einsatz auf einer Oberfläche aus grobem Schotter sinkt er ohne gute Abdeckung und Effekt ein und ändert wenig an der Wirkung des heißen Wassers. Für die Anwendung des Verfahrens auf solchen Flächen bietet es sich an, ein alternatives Schaummittel zu entwickeln, welches einen schwereren und stabileren Schaum bildet, der sich gut auf einer Schotteroberfläche hält. Untersuchungen zu verschiedenen biologisch abbaubaren Schaummitteln zeigten jedoch, dass gerade für hohe Temperaturen eine Schaumbildung schwer zu bewerkstelligen ist [155].

Dampf

Beim Dampfverfahren kann es zwischen dem Heiß- und dem Nassdampfverfahren unterschieden werden. Beim Heißdampfverfahren wird das Wasser so weit erhitzt, dass aus der Maschine ungesättigter Dampf mit über 100 °C austritt. Beim Nassdampfverfahren tritt ein Wasser-Dampfgemisch mit ca. 100 °C aus. Die Abgrenzung des Nassdampfverfahrens zum Heißwasserverfahren ist oftmals schwierig, da bereits viele Heißwassergeräte einen gewissen Anteil des Wassers verdampfen (interne Temperaturen der Geräte können bei Überdruck bis zu 150 °C erreichen) [155]. Somit werden in diesem Abschnitt nur Systeme behandelt, die explizit dazu entwickelt wurden, ungesättigten Dampf zur Vegetationskontrolle zu erzeugen und zu verwenden.

Zunächst muss festgehalten werden, dass die Verdampfung von Wasser eine deutliche Steigerung des zur Temperaturerhöhung benötigten Energiebedarfs darstellt. So muss die Verdampfungsenthalpie aufgebracht werden, um die Wassermoleküle in den dampfförmigen Zustand übergehen zu lassen. Um den Energiebedarf zu bestimmen, muss zunächst die Art der Applikation genauer bestimmt werden. Anwendungen aus der Landwirtschaft wie die Bodendämpfung benötigen weitaus mehr Energie als das bloße Ausbringen von Dampf auf die Oberfläche. So liegt der Energiebedarf² zwischen 24 290 und 173 500 MJ/ha [10].

Im Gegensatz zu Wasser besitzt Dampf jedoch einen höheren Wärmeübergangskoeffizienten³ und somit ein höheres Potential Wärme an die Pflanzen abzugeben. Allerdings ist Dampf flüchtiger als Heißwasser und somit steigen ebenfalls die Energieverluste durch Abdrift. Darüber hinaus ist die Tiefenwirkung des Dampfverfahrens geringer als die des Heißwasserverfahrens [152]. Abhängig von der Dosis und der Vegetation werden in der Literatur Anwendungsfrequenzen von zwei [150] bis zehn [149] jährlichen Anwendungen genannt. Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt bei 0,25 km/h [65] bis 5 km/h [10].

² Volumenbezogener Heizwert Diesel ca. 34,7 MJ/l

³ Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{Dampf}}=10\,000\text{--}28\,000\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; $\alpha_{\text{Wasser}}=500\text{--}5\,000\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [134].

Frosten

Die Wirksamkeit beruht auf einem sehr schnellen und jahreszeitlich untypischen Abkühlen der Pflanzen, sodass das in den Pflanzenzellen vorhandene Wasser friert. Die sich bildenden Eiskristalle zerstören die Zellwände und die Pflanzen sterben ab. Gleichzeitig kann das starke Abkühlen aber auch zu einer Stratifikation von Samen führen und diese zur Keimung anregen [158]. Das Bereitstellen von sehr niedrigen Temperaturen kann durch verschiedene Ansätze erzeugt werden. So können zum Beispiel sehr kalte Betriebsstoffe wie Trockeneis (CO_2) oder flüssiger Stickstoff auf die Vegetation ausgebracht werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Erzeugung von sehr kalter Luft durch Kältemaschinen oder die Kühlung durch den Kontakt mit einem stark heruntergekühlten Körper.

Das Frosten gehört zu den Verfahren, die in vielen bisherigen Studien eher unterrepräsentiert waren. Meist wurde darauf verwiesen, dass bisher keine zufriedenstellende Datenlage vorhanden ist und das Verfahren im Vergleich zu anderen Verfahren nicht bewertet wurde. Es existieren jedoch Studien, die sich mit der Vegetationskontrolle durch tiefe Temperaturen befassen. Diese Studien befassen sich ausschließlich mit der Ausbringung von sehr kalten Betriebsstoffen, da diese ohne großen Aufwand eine sehr niedrige Temperatur in kurzer Zeit erzielen können [64, 65]. Trockeneis sublimiert bei einer Temperatur von $-78,4\text{ }^\circ\text{C}$, flüssiger Stickstoff verdampft bei $-196\text{ }^\circ\text{C}$.

Bei der Vegetationskontrolle nicht-aquatischer Pflanzen wird der Effekt als mit dem Abflammen vergleichbar beschrieben. Allerdings ist der Energiebedarf mit $6\,000\text{ MJ/ha}$ (CO_2) bzw. $12\,000\text{ MJ/ha}$ (N_2) je Anwendung im Vergleich höher [65]. Bei CO_2 kommt es zusätzlich zu klimaschädlichen Emissionen aus dem Medium selbst.

Im Bahnbereich wird aktuell an der Schienenkopfreinigung durch Trockeneisstrahlung geforscht. Dieses Verfahren stammt aus der Reinigungstechnik und wird bisher vor allem zur Reinigung und Entlackung verwendet. Dabei werden Pellets aus Trockeneis mit hohem Druck auf eine Oberfläche geschossen. Der Reinigungseffekt ergibt sich aus einer Kombination der niedrigen Temperatur, die zu einem thermischen Schock und dadurch zur Rissbildung bzw. Schwächung des zu entfernenden Materials führt, der plötzlichen Expansion des sublimierten Gases und der Reibung an der zu reinigenden Oberfläche, die durch die kinetische Energie der Pellets erzeugt wird. [159]

Sonstige Verfahren

Elektrischer Strom

Für den Einsatz von Strom zur Vegetationskontrolle im Schienenbereich wurde schon im 19. Jahrhundert erstmalig ein Patent vergeben [160]. In den folgenden Jahrzehnten kam es immer wieder zu Einsatzversuchen von Strom gegen Pflanzen, insbesondere im landwirtschaftlichen Bereich. Dabei wurde in vielen Fällen entweder sehr hohe Spannungen (15 kV) bei begrenzter Leistung, z. B. zur Beseitigung von Ausfallmais, eingesetzt oder durch den Einsatz hoher Frequenzen die Pflanzen thermisch in Form von Widerstandserhitzung abgetötet [161]. Im Bereich invasiver Pflanzen an Straßenrändern wurde elektrischer Strom ebenfalls erfolgreich gegen invasive Pflanzenarten, wie

japanischen Knöterich in einem Projekt des CEDR (Conference of European Directors of Road), eingesetzt [38].

Zum Einsatz des elektrischen Stroms werden verschiedene Techniken angewendet. Diese übertragen Gleichspannungen im Bereich von 3 000 bis 7 000 V mit großen, flexiblen Applikatoren auf die Pflanzen [162] oder setzen auf thermische Erwärmung der Pflanzen durch den Einsatz von Wechselstrom [163]. Weiterführende Technologien verringern den Übergangswiderstand zwischen Applikatoren und Pflanzen mit Leitflüssigkeiten und können damit die Wirkungseffizienz und die eingesetzten Spannungen bei niedrigerem Energieverbrauch erhöhen [164].

Die elektrophysikalischen Verfahren mit Gleichstrom arbeiten mit Energiemengen, die z. B. bei der Sikkation von Kartoffeln gezeigt haben, dass sie bei weitem nicht zu einer relevanten Erwärmung der Pflanzen ausreichen. Dementsprechend wird von einer systemischen Zerstörung der Wasserleitbündel und damit der Wasser- und Nährstoffversorgung der stromleitenden Pflanzenteile ausgegangen. Je nach Anordnung der Applikatoren können auch Wurzeln systemisch geschädigt werden [162, 165], was ein besonderer Vorteil für die Wirksamkeit im Schotterbett ist, da hier kein Eingriff im Boden möglich ist.

Bei der Deutschen Bahn wurden schon Unimog-gestützte Systeme mit Gleichstrom getestet. Diese haben sich nach Bahnangaben als effektiv erwiesen und bei den Vorstudien auch keine relevanten Probleme im Bereich der EMV hervorgerufen. Jedoch soll die Verträglichkeit auch mit verschiedenen Signalsystemen der Bahn weiter geprüft werden. Als Nachteil des Verfahrens wird die geringe Leitfähigkeit des Schotters berichtet. [166]

Mikrowellen

Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von ca. 300 MHz bis 300 GHz, was einer Wellenlänge von 1 mm bis 1 m entspricht [167]. Haben diese Wellen eine Wellenlänge von 12,25 cm, was einer Frequenz von 2,45 GHz entspricht, regen sie freie Wassermoleküle zur Schwingung an. Diese erwärmen sich in Folge der Schwingung, wodurch gezielt wasserhaltige Objekte erwärmt werden können. Dabei werden die zu behandelnden Pflanzen gerichteter Mikrowellenstrahlung ausgesetzt, die diese bis zu einer schädlichen Temperatur erwärmt und somit schädigt.

Dabei lässt sich das Verfahren auch auf größere Pflanzen anwenden [167, 168]. Die benötigte Energie hängt jedoch stark von der Art der Pflanze ab. So benötigen Gräser eine höhere Dosis als breitblättrige Pflanzen [169]. Eine Zerstörung von unterirdisch liegenden Pflanzenteilen ist nicht möglich, da die Strahlung durch den Boden bzw. das Schotterbett abgeschirmt wird und nicht tiefer eindringen kann [65].

Da die Methode nur oberflächlich wirkt und dies aktuell sehr begrenzt ist [167], liegt die Anwendungsfrequenz bei ca. acht Behandlungen im Jahr. Bisher ist die Technologie noch nicht serienreif und lediglich in kleineren Labor- und Feldversuchen erprobt worden. Die maximale Geschwindigkeit bekannter Prototypen beläuft sich auf ca. 0,72 km/h [64]. Der Energiebedarf des Verfahrens liegt je nach Quelle zwischen 6 000 MJ/ha und 75 000 MJ/ha [64, 65, 170, 171]. Sicherheitstechnisch muss

bei der Verwendung von Mikrowellen für eine Abschirmung der austretenden und reflektierten Strahlung gesorgt werden, da sie eine Gesundheitsgefahr darstellen.

Mikrowellen haben die Eigenschaft, dass sie durch das elektrische Wechselfeld auf der Oberfläche von metallischen Gegenständen einen elektrischen Stromfluss erzeugen. Ist die Spannung hoch genug, entlädt sich diese in Form eines Lichtbogens. Es kommt zur Funkenbildung, wodurch Brandgefahr besteht.

UV-C

Das Sonnenlicht ist die natürliche Quelle von UV-Strahlung, welches von den Pflanzen für die Photosynthese genutzt wird. Dabei ist die UV-Strahlung spezifisch der Wellenlänge in drei Bereiche eingeteilt: UV-A (320 bis 400 nm), UV-B (280 bis 320 nm) und UV-C (200 bis 280 nm) [172]. Durch die Absorption der Atmosphäre dringt auf die Erde nur UV-A-Strahlung und in geringeren Mengen UV-B-Strahlung ein. Die UV-C-Strahlung kommt natürlicherweise daher nicht auf der Erdoberfläche vor [173]. Jedoch kann UV-C-Strahlung durch UV-Niederdruck- oder UV-Mitteldruck-Strahler künstlich erzeugt werden.

Durch die kurze, energiereiche Wellenlänge im Bereich von 254 nm kann mit UV-C eine letale Wirkung auf Mikroorganismen erzielt werden. Damit können z. B. Schäden an der Desoxyribonukleinsäure von Mikroorganismen erreicht werden, wodurch die Zellfunktionen und die Zellteilung bei der Vermehrung gestört werden und eine Ausbreitung der Mikroorganismen verhindert werden kann [174]. Dies kommt unter anderem als Alternative zur Fungizidbehandlung im Weinbau zum Einsatz [175]. Auch die Wirkung von UV-C auf Pflanzen wurde bereits untersucht, hierbei konnte eine erhöhte Abwehrkraft der Pflanze erzielt werden [176] oder eine Blühinduktion und Verzweigung von Zierpflanzen erreicht werden [177].

Technisch wird UV-C-Strahlung bereits in der Landwirtschaft zu Versuchszwecken eingesetzt. Hierzu wurde von der Hochschule Geisenheim ein traktorgebundener Prototyp entwickelt, mit dem Versuche im Weinbau durchgeführt wurden [175].

Ebenso gibt es weitere Anwendungen in der Landwirtschaft. Sie benötigen rund sieben- bis zehnjährliche Behandlungen bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von unter 1 km/h für eine überhaupt hinreichende Vegetationskontrolle. Der Energiebedarf beläuft sich bei einer Anwendung auf einer Oberfläche mit niedriger dünner Vegetationsdecke auf knapp 360 MJ/ha für eine einmalige Anwendung. Bei dichter Vegetation liegt der Energiebedarf bei 1 080 MJ/ha bei einmaliger Anwendung [178]. Eine weitere Studie gibt bei einer Reduktion des Frischgewichtes um 95 % einen Energiebedarf von 10 000 MJ/ha pro Anwendung an [65]. Abhängig vom Leuchtmittel kann es bei der Verwendung von UV-C zur Bildung von Ozon kommen. Somit kann eine Ozonbildung durch Auswahl der entsprechenden Lampen verhindert werden.

Laser

Elektromagnetische Strahlung eines anderen Wellenlängenbereiches, hier in Form von Licht, kann ebenfalls zur Vegetationskontrolle genutzt werden. Dabei existieren zwei Verfahrensprinzipien, die beide ein thermisches Verfahren darstellen.

Das erste Prinzip beruht darauf, mit einem Laser gezielt das Wachstumszentrum der Pflanze zu überhitzen und diese somit abzutöten. Durch das Aufheizen von lediglich dem Wachstumszentrum kann der Energiebedarf im Vergleich zu anderen thermischen Verfahren minimiert werden, da andernfalls die gesamte Pflanze aufgeheizt werden muss, um zu einer Schädigung und dem daraus folgenden Absterben zu führen. Die Methode hängt wesentlich von der verwendeten Wellenlänge, der Belichtungszeit, der Leistung des Lasers und der Größe des Lichtpunktes ab. Darüber hinaus ist die Wirkung sehr von der zu behandelnden Pflanzenspezies abhängig. Als weitere Ergebnisse konnte abgeleitet werden, dass eine genaue Fokussierung der Meristeme (Wachstumsbereich) zwingend erforderlich ist. [179]

Der von der Firma Carbon Robotics entwickelte autonome Feldroboter nutzt eine sehr ähnliche Technologie. Dort werden die Pflanzen mittels eines KI-Algorithmus erkannt und im Anschluss gezielt von einem Laser verbrannt. Er hat nach Herstellerangaben eine Flächenleistung von ca. 15 bis 20 ha/Tag und eine entsprechende maximale Fahrgeschwindigkeit von ca. 5 mph (ca. 8 km/h). [180] Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt jedoch im Schnitt niedriger bei ca. 3 bis 4 km/h. Der Energiebedarf des Verfahrens ist mit 249 MJ/ha [64] bis 564 MJ/ha [181] relativ gesehen gering, jedoch ist wahrscheinlich, dass er für reale gemischte Vegetation auf Bahngleisen höher liegen wird. Es wurde festgestellt, dass sich der Energiebedarf auf ca. 20 % des Bedarfs zum Abflammen der Pflanzen beläuft [182]. Dies entspräche nach den zuvor zum Abflammen festgestellten Werten einem Energiebedarf von 216 bis 706 MJ/ha. Theoretisch besteht durch die Überhitzung des Meristems an trockenen Tagen eine Brandgefahr.

Das zweite Prinzip ist das Schneiden mittels eines Lasers. Dabei überhitzt der Laser nicht gezielt das Wachstumszentrum, sondern schneidet die Pflanzen an der Oberfläche ab. Dabei ist ein Abschneiden möglichst direkt an der Oberfläche wünschenswert [183]. Hier ist die Datenlage deutlich geringer, was die Vegetationskontrolle betrifft. Das Verfahren wurde bisher hauptsächlich in Laborversuchen und kleinen Feldversuchen getestet. Dort lag der Energiebedarf bei 314 MJ/ha [64] bis 2 955 MJ/ha [98] je Anwendung. Da es sich um ein schneidendes Verfahren handelt, welches vergleichbar mit dem Mähen nur die an der Oberfläche zugänglichen Pflanzenteile entfernt, muss auch hier von einer Anwendungsfrequenz von ca. fünf bis acht Anwendungen im Jahr abhängig von der vorhandenen Vegetation und dem gewünschten Maß an Vegetationskontrolle ausgegangen werden. Beide Verfahren sind im Bahnbereich bisher kaum erforscht. Bisherige Studien verwiesen immer wieder auf die nicht ausreichende Datenlage oder behandeln dieses Thema schlicht nicht weiter [7, 10, 24].

Auch wenn das Laserschneiden selbst im landwirtschaftlichen Bereich kaum erforscht ist, so ist zumindest die industrielle Nutzung des Verfahrens zum Zuschneiden von unterschiedlichen Werkstoffen vielversprechend. Dies zeigt auch, dass die Sicherheit der Infrastruktur gründlich bewertet werden muss. Unabhängig von der Art des Laserverfahrens (Überhitzen oder Schneiden) muss in hohem

Maße auf die Sicherheit des Personals sowie Dritter geachtet werden. Somit bedarf ein solches Verfahren in jedem Fall einer zuverlässigen Abschirmung, die austretende und reflektierte Laserstrahlen zurückhält.

3. Studien zur Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen

Über die Jahre wurden unterschiedliche Studien zu Verfahren zur Vegetationskontrolle durchgeführt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verschiedenen Studien und welche Verfahren betrachtet bzw. bewertet wurden.

Studie	IZT 1995 [68]	SBB 2001 Vegetationskontrolle [22]	UIC 2003 [24]	Tests ÖBB 2017 [69]	SBB Workshop 2018 [70]	Herbie 12/2018 [10]	Bundestagsanfrage 2019 [184]	AGES Glyphosat-Alternativen Juni 2019 [71]	SBB 2020 Heißwasser [72]
Chemisch Standard (2)									
konv. Blatt- und Bodenherbizide kleines Gerät (3)		0,25 Fr/m	gelistet			6.4		gelistet	
konv. Blatt- und Bodenherbizide Rucksack		0,20 Fr/m	gelistet			7.6		gelistet	
konv. Blatt- und Bodenherbizide Zweifahrzeug			gelistet			8.6		gelistet	
konv. Blatt- und Bodenherbizide Zug	effektiv, schnell, preiswerter		gelistet			9.6		gelistet	
konv. Blattherbizide Zug			gelistet				genehmigt	gelistet	Referenzverfahren
konv. Blattherbizid Stoffrolle			gelistet			3.4		gelistet	
konv. Blattherbizid Bürste (ME)			gelistet					gelistet	
Chemische Herbizide Neu									
Pelargonsäure kleines Gerät						6.0	nicht zugelassen	gelistet	
Pelargonsäure Zweifahrzeug/Zug									

Studie	IZT 1995 [68]	SBB 2001 Vegetationskontrolle [22]	UIC 2003 [24]	Tests ÖBB 2017 [69]	SBB Workshop 2018 [70]	Herbie 12/2018 [10]	Bundestagsanfrage 2019 [184]	AGES Glyphosat-Alternativen Juni 2019 [71]	SBB 2020 Heißwasser [72]
Thermisch									
Mikrowellen	nicht zufriedenstellend		nicht zufriedenstellend		weiterverfolgt	3.4			
Abflammen mit kleinem Gerät		nicht bewertet	gelistet		ausgeschlossen	3.6		gelistet	
Infrarotstrahlung mit Zug	langsam, teuer	nicht bewertet	gelistet		weiterverfolgt	3.2			
Nassdampf mit kleinem Gerät		geplant	gelistet	nicht ausreichend getestet, energieintensiv	ausgeschlossen	4.2	nicht zugelassen	gelistet	
Heißwasser mit kleinem Gerät			gelistet	nicht ausreichend getestet, energieintensiv		4.6	nicht zugelassen	gelistet	
Heißwasser Zug			gelistet		weiterverfolgt		nicht zugelassen	gelistet	Erprobt, erfolgversprechend
Heißluft mit kleinem Gerät			nicht zufriedenstellend			3.8		gelistet	
Einfrieren (Stickstoff)	nicht zufriedenstellend		nicht zufriedenstellend		neu aufgenommen	zu wenig Daten			
Heißschaum			nicht bewertet			zu wenig Daten		gelistet	
Laser (schneiden)	nicht zufriedenstellend		nicht zufriedenstellend		weiterverfolgt	zu wenig Daten			
Laser (überhitzen)									

Studie	IZT 1995 [68]	SBB 2001 Vegetationskontrolle [22]	UIC 2003 [24]	Tests ÖBB 2017 [69]	SBB Workshop 2018 [70]	Herbie 12/2018 [10]	Bundestagsanfrage 2019 [184]	AGES Glyphosat-Alternativen Juni 2019 [71]	SBB 2020 Heißwasser [72]
Strahlung									
UVC			nicht zufriedenstellend	nicht ausreichend getestet, energieintensiv	weiterverfolgt	zu wenig Daten	nicht zugelassen		
Elektrisch									
elektrisch mit kleinem Gerät			nicht zufriedenstellend		weiterverfolgt	5	nicht zugelassen	gelistet	
elektrisch mit Zug								gelistet	
Mechanisch									
kleines Gerät	Nicht zufriedenstellend		gelistet			3.0			
Handjäten		4-5 Fr/m	gelistet	getestet		3.0		gelistet	
Bürsten (mit kleinem Gerät) **			gelistet		weiterverfolgt	3.0		gelistet	
Mähen		Übergang	gelistet		weiterverfolgt	unbewertet (nicht geeignet für Gleisbett)		gelistet	
Mulchen		Übergang	gelistet		weiterverfolgt	unbewertet (nicht geeignet für Gleisbett)			
Epilieren					neu aufgenommen				
Absaugen		4-5 Fr/m							
Druckwasser									

4. Datenlage der Alternativverfahren und ergänzende Ergebnisse projekteigener Versuche

Die Entwicklung von Alternativverfahren im Eisenbahnbereich wurde bereits in einigen Forschungsprojekten und Literaturstudien untersucht. Es zeigte sich jedoch, dass nicht für alle Verfahren gleichermaßen alle nötigen Informationen für eine ausreichend genaue Bewertung zur Verfügung standen. Auch bereits getestete Verfahren, wie z. B. die Anwendung von Heißwasser, zeigten hohe Spannbreiten bei der Einsatzmenge und fehlende Informationen für die Tiefenwirkung. In diesem Projekt wurden daher orientierende Versuche durchgeführt, um die Bewertung und sichere Auswahl der geeignetsten Alternativverfahren zu ermöglichen. Die hier aufgeführten Informationslücken (Tabelle 27 und Tabelle 28) dienten als Grundlage für die Auswahl der durchgeführten Screening-Versuche.

Tabelle 27: Informationsbedarf und Begründungen für Versuche mit Versuchsüberblick – Teil I.

VERFAHREN	ZUSÄTZLICHER INFORMATIONSBEDARF ZUR MODELLBILDUNG UND ERSTBEWERTUNG	DURCHGEFÜHRTE SCREENING- UND LIMIT-VERSUCHE
HEIßWASSER	Datenlage inkonsistent zur Erstbewertung keine differenzierte Darstellung der Wirksamkeit auf unterschiedliche Pflanzenteile hohe Spannweiten bei der Einsatzmenge von Wasser und beim Energieverbrauch von Praktikern wiederholt geäußerte Zweifel am schadensfreien Verbleib des Wassers	Screening-Versuche zur Ermittlung der Aufwandmenge und Temperaturverteilung im Schotter wurden in Schottertürmen durchgeführt Freilandversuche wurden zur Wirkung verschiedener Aufwandmengen auf Wurzel und Spross bei gleistypischen Pflanzen durchgeführt zusätzlich wurden Versuche zur Wasserhaltekapazität von Schotter und Splitt durchgeführt
DAMPF	Datenlage ausreichend zur Erstbewertung	keine Versuche
HEIßSCHAUM	Datenlage nicht in allen Bereichen ausreichend und inkonsistent zur Erstbewertung hohe Spannweiten bei der Einsatzmenge von Wasser und beim Energieverbrauch	Screening-Versuche in Schottertürmen zur Aufwandmenge und Temperaturverteilung im Schotter
INFRA-ROT	relativ alte Datenlage aber ausreichend zur Erstbewertung Effizienz des elektrischen Infrarotstrahlers im Vergleich zum Gasheizstrahler	Screening-Versuche zur nötigen Behandlungsdauer, Wirksamkeit und des resultierenden Energiebedarfs mit modernem Elektrostrahler auf Pflanzen und Modellinfrastruktur

VERFAHREN	ZUSÄTZLICHER INFORMATIONSBEDARF ZUR MODELLBILDUNG UND ERSTBEWERTUNG	DURCHGEFÜHRTE SCREENING- UND LIMIT-VERSUCHE
ABFLAMMEN	Datenlage gut zur Erstbewertung	keine Versuche
HEIßLUFT	Datenlage gut zur Erstbewertung	keine Versuche
FROSTEN	Datenlage nicht ausreichend zur Erstbewertung Verfahren mehrfach ohne Einsatzparameter als Option in Veröffentlichungen benannt	Screening-Versuche in Schottertürmen zur Aufwandmenge und Temperaturverteilung im Schotter, Freilandversuche zur Wirkung verschiedener Aufwandmengen auf Wurzel und Spross bei gleistypischen Pflanzen

Tabelle 28: Informationsbedarf und Begründungen für Versuche mit Versuchsüberblick – Teil II.

VERFAHREN	ZUSÄTZLICHER INFORMATIONSBEDARF ZUR ERSTBEWERTUNG	DURCHGEFÜHRTE SCREENING- UND LIMIT-VERSUCHE
MIKROWELLEN	Datenlage ausreichend zur Erstbewertung Energiedaten und Eindringtiefe für Schotter nicht beschrieben	keine Versuche, da Anlagen mit offenen Mikrowellenquellen ein hohes Anwenderisiko haben und nicht kommerziell verfügbar sind
LASER (ÜBERHITZEN)	Datenlage gut zur Erstbewertung aktuelle Angaben aus Agrarversuchen übertragbar, aber Verfahren sehr langsam	keine Versuche. Zukünftige Potentialermittlung bei hohen Geschwindigkeiten erfordert hohen Aufwand an Lasern, Sicherheitstechnik und Steuerung. Erkenntnisgewinn fraglich
LASER (SCHNEIDEN)	Datenlage ausreichend zur Erstbewertung	keine Versuche. Versuche zu hohen Geschwindigkeiten erfordern hohen Aufwand an Lasern, Sicherheitstechnik und Steuerung. Erkenntnisgewinn fraglich
UV-C	Datenlage inkonsistent und nicht ausreichend zur Erstbewertung Geräte und Patente vorhanden, aber Parameter und Energiedaten widersprüchlich	Screening-Versuch in einem Teststand mit feldtauglichen Leuchtmitteln mit unterschiedlichen Behandlungszeiten Messung der mittelfristigen Wirkung auf unterschiedliche Pflanzen und Kunststoffkomponenten
STROM	Machbarkeit, Wirksamkeit und Infrastrukturverträglichkeit abschätzbar	keine Versuche. Machbarkeit durch Einsatz des Verfahrens seitens der DB AG eingeschätzt
BÜRSTEN	Datenlage ausreichend zur Erstbewertung	keine Versuche

VERFAHREN	ZUSÄTZLICHER INFORMATIONSBEDARF ZUR ERSTBEWERTUNG	DURCHGEFÜHRTE SCREENING- UND LIMIT-VERSUCHE
HANDJÄTEN	Datenlage gut zur Erstbewertung Daten zur Nutzung des Verfahrens als Referenzmethode für nichtchemische Verfahren für regionale Versuchsflächen	Freilandversuche zum Wuchs- und Wiederaufwuchsverhalten
MJ	Datenlage gut für größere Pflanzen in der Landwirtschaft zur Entfernung ohne Bodeneingriff	keine Versuche. Einschätzung der Wirksamkeit des Verfahrens anhand des Handjäätens
MÄHEN	Datenlage aus der Landwirtschaft gut, aber keine definierten Daten für gleistypische Pflanzen bekannt	Freilandversuche mit Abschneiden von grasigen und krautigen Pflanzen im Gleis
DRUCKWASSER	Datenlage ausreichend zur Erstbewertung	keine Versuche
ABSAUGEN	Datenlage befriedigend zur Erstbewertung, da auch schienengebundene Großgeräte bekannt langfristige Versuche zur Humusreduktion fehlen	keine Versuche, da Humusreduktionsversuche mehrere Jahre benötigen

Bei den Screening-Versuchen wurden möglichst einfache und aussagekräftige Versuchsanordnungen genutzt und die Versuche mit klaren Leitlinien für eine zielgerichtete Aussageermittlung geplant. Die Versuche wurden ohne Wiederholungen und statistischer Auswertung durchgeführt und dienten lediglich der Orientierung. Generell ist zu unterscheiden, dass einige Versuche je nach Fragestellung im Labor oder im Freiland durchgeführt wurden.

Unterschied Laborversuche und Freilandversuche

In dem Projekt wurden für einzelne Verfahren Versuche geplant, die zum einen im Labor mit Topfpflanzen durchgeführt wurden, wie das Verfahren UV-C, Heißwasser und Infrarot, und zum anderen Freilandversuche auf den ausgewählten Gleisabschnitten für die Verfahren Frosten mit Trockeneis und Heißwasser.

Zu erwähnen ist, dass sich die Versuche im Labor zu den Versuchen im Gleis in einigen Merkmalen unterschieden. Die natürlichen Bedingungen im Freiland wurden daher funktionell klassifiziert und bestmöglich in Laborversuchen nachgestellt. Dies geschah z. B. in Form von Pflanzen, die unter natürlichen Bedingungen im Freiland oder im Gleis gewachsen sind, durch den Einsatz von realem Schotter oder Feinmaterial und z. B. durch nachgestellten Fahrtwind. Dadurch entstanden möglichst realistische Bedingungen und eine Vergleichbarkeit zu Freilandversuchen bei gleichzeitig besserer Kontrolle und Messbarkeit von Versuchsparametern.

Die Freilandversuche können sich hingegen untereinander durch diverse Einflussfaktoren, wie Jahreszeiten oder Wetterschwankungen durch Regen, Wind, Sonne und Temperatur, unterscheiden. Dadurch entsteht eine Variabilität, die die Vergleichbarkeit allgemein verändern kann, dafür aber grundsätzlich realistische Wachstumsbedingungen bietet. Daher wurde bei den Freilandversuchen im Gleis darauf geachtet, dass das Wetter bei der Behandlung möglichst ähnlich war. Insgesamt können die Freilandversuche jedoch nur eine Stichprobe aus begrenzt optimalen Behandlungsbedingungen vermitteln. Zeigten Verfahren hier große Schwächen, haben sie unter „Worst Case“-Bedingungen keine relevante Effizienz.

Versuchspflanzen

Bei der Auswahl der Versuchspflanzen für die Laborversuche wurde eine große Zahl von unterschiedlichen Pflanzen ausgewählt, die der bahntypischen Vegetation entsprachen. Die Pflanzen wurden in einer Variante aus Samen im Gewächshaus angezogen und sind dort bis zum Versuchszeitpunkt gewachsen.

In einer weiteren Variante wurden die spezifischen Pflanzen im Gewächshaus angezogen, aber zur weiteren Entwicklung außerhalb des Gewächshauses gehalten, damit diese Pflanzen der natürlichen UV-Strahlung und dem Wetter ausgesetzt waren. Dies führte zu einer realistischen Pflanzenstruktur hinsichtlich Lichtempfindlichkeit und Robustheit. Eine letzte Variante bestand aus Pflanzen, die direkt aus dem Gleisbereich entnommen wurden und in diesem spezifischen Lebensraum die für diesen Zweck natürlichste Entwicklung erhalten haben.

Nutzung von Infrastrukturkomponenten

Neben dem Effekt der Verfahren auf Pflanzen wurde auch der Einfluss von Infrarot, UV-C und Frosten auf manche baulichen Komponenten des Gleisbereichs getestet, wie Kabel und Leerrohre aus PE- und PP-Polymer. Die Datenblätter der Bauteile liefern zu der Verträglichkeit gegenüber z. B. UV-C keine Daten, da die Anforderungen auf natürliche Umweltbedingungen ausgelegt sind, aber nicht gegenüber spezifischen Anforderungen wie UV-C oder hohen Strahlungswärmen für einen kurzen Zeitraum.

Ermittlung des thermischen Verhaltens von Medien im Schotterbett

Bislang enthält die Literatur keine Informationen über eine physikalische Untersuchung der Tiefenwirkung thermischer Alternativverfahren im Schotter, aus denen sich angemessene Einwirkmodelle für Pflanzen, Tiere und Infrastruktur erstellen lassen. Daher erfolgte diese Betrachtung in einem ersten Orientierungsversuch für das Verfahren Heißwasser und Frosten. Für diese Art des Versuches wurde eine Simulationsanlage mit variablen Schichtdicken, Materialarten und Temperaturmessung in unterschiedlichen Tiefen entwickelt. Bei dieser Versuchsform wurden die thermischen Verfahren auf die Temperaturverteilung der eingebrachten Medien im Schotter getestet. Ziel war es eine Korrelation zwischen der Menge des eingesetzten Mediums und der Temperatur für eine bestimmte Zeit in verschiedenen Tiefen des Schotterbettes zu ermitteln.

Für diesen Versuch wurden handelsübliche Euro-Gitterboxen (40 x 30 x 12 cm) mit Gleisschotter befüllt und bis zu einer Schichtdicke von 40 cm gestapelt (Abbildung 38). Im Abstand von 10 cm wurden beginnend von der Schotteroberfläche bis zum Boden Thermometer mittig in der Schotterkiste platziert, die den Temperaturverlauf darstellen sollten. Unter den Schotterkisten stand eine leere, geschlossene Kiste, die das durchgeflossene Wasser auffing und in der die Restwärme und Menge bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse ermöglichen eine Aussage, ob mit der Methode überhaupt eine Tiefenwirkung auf Pflanzen erzielt werden kann und entsprechend bei welcher Aufwandmenge welche Temperaturen erreicht werden können.



Abbildung 38: Versuchsaufbau Temperaturmessung in verschiedenen Schotterstichten.

Heißwasser – Laborversuch

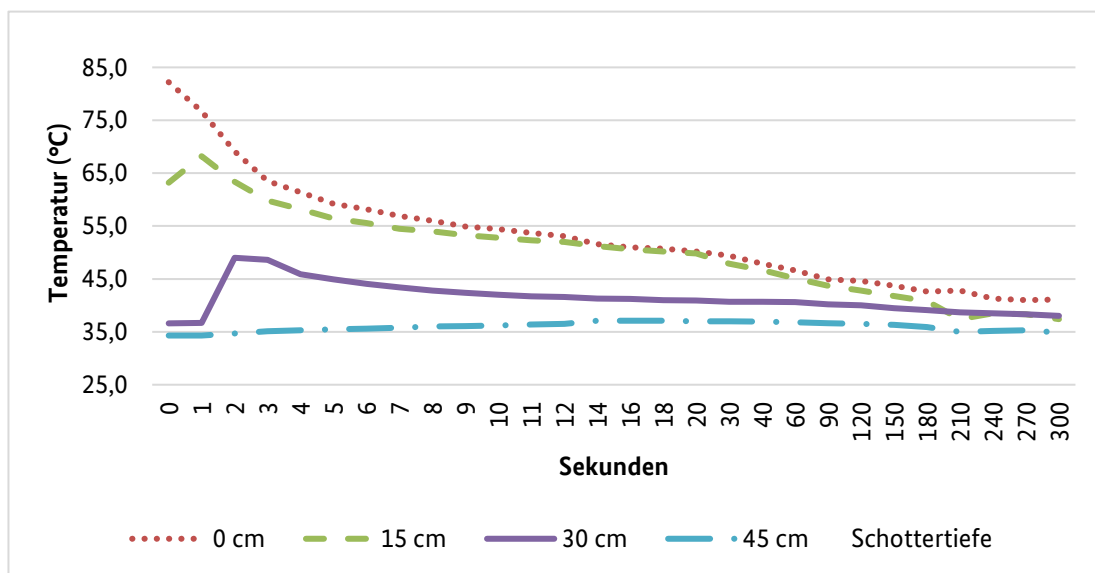
Bei der Anwendung von Heißwasser zur Vegetationskontrolle gab es einerseits hohe Spannbreiten der Wasseraufwandmenge ($< 5 \text{ L/m}^2$ [166] bis 10 L/m^2 [72]) und andererseits keine Informationen zur Tiefenwirkung bei den entsprechenden Wassermengen. Bei den im Projekt durchgeführten Screening-Versuchen wurden daher Wassermengen von 5, 10 und 20 L/m^2 in unterschiedlichen Ausbringungsformen (tröpfchen- und schwallartig) angewendet. Das heiße Wasser wurde bei ca. 95°C aus 20 cm Höhe auf den Schotter des Versuchsaufbaus aufgebracht. Ziel war es, eine Temperatur von bis zu 55°C in 15 cm Tiefe zu erreichen, da nur dann von einer ausreichenden Erwärmung und damit schädigenden Wirkung auf Pflanzenteile ausgegangen werden kann [65, 66].

In den tabellarisch aufgelisteten Ergebnissen (Tabelle 29) ist zu erkennen, dass eine Applikation von umgerechnet 5 L/m^2 (Versuch 1) nur einem Temperaturanstieg bis ca. 47°C in den ersten Sekunden in 15 cm Tiefe erzielen konnte. Da die absolut notwendige Temperatur von 55°C an der Oberfläche nur sehr kurzzeitig überschritten wurde (60°C für wenige Sekunden), wurde dieser Test als Limit-Test für die biologische Wirkungslosigkeit derartig niedriger Wasserdosierungen gesehen und von Wiederholungen abgesehen.

Tabelle 29: Versuchsplan und Versuchsergebnisse Heißwasser.

VERSUCH	AUFWANDMENGE [L/M ²]	AUSBRINGUNGSFORM	MAXIMALE TEMPERATUR (°C) IN 15 CM TIEFE (BEWERTUNG)
1	5	Schwall	47 (unwirksam)
2	10	Schwall	68 (wirksam)
3	10	Schwall – Split (2 x 5 L)	67 (wirksam)
4	20	Schwall – Split (2 x 10 L)	63 (wirksam)
5	10	Brause	46 (unwirksam)
6	20	Brause	38 (unwirksam)

Erst ab einer Menge von 10 L/m² und einer schwallartigen Ausbringung konnte eine ausreichende Erwärmung in 15 cm Tiefe erreicht werden (Abbildung 39). Das Maximum an der Oberfläche lag bei 82 °C und auch in 15 cm Tiefe stieg die Temperatur für einige Sekunden über 55 °C. In den tieferen Schichten konnte bei dieser Aufwandmenge erneut keine ausreichend hohe Temperatur erzeugt werden. Ein sehr ähnlicher Temperaturverlauf wurde auch bei der gesplitteten Applikation von 10 L/m² in zwei Schwallen zu 5 L/m² erreicht (Tabelle 29, Versuch 3). Die Verdopplung der Aufwandmenge auf 20 L/m² erzielte keine wesentliche Steigerung der Temperatur. Unterhalb der Aufwandmenge von 10 L/m² oder bei einer feineren Verteilung konnte keine ausreichende Temperatur erreicht werden, somit ist nur mit einer Wirksamkeit auf Pflanzenteile an der Oberfläche zu rechnen.

Abbildung 39: Temperaturkurve 10 L/m² Heißwasser.

Lediglich eine Gesamtmenge von umgerechnet 10 und 20 L/m² heißem Wasser konnte bei schwallartiger Dosierung eine Temperatur von über 55 °C in 15 cm Tiefe erzeugen. Dies macht eine Einwirkung auf Pflanzenteile im unverfüllten Schotterbett plausibel, wenn ausreichend hohe kleinräumige Dosierungen im Bereich von umgerechnet 10 L/m² und mehr direkt auf die Pflanzen gewählt werden.

Bei niedrigeren Aufwandmengen ist nur mit einer oberflächlichen Wirkung zu rechnen. Zu beachten ist, dass die Aufbringung unter idealen Bedingungen erfolgte. Schon die etwas feinere Zerteilung der Wassermenge mit einer Brause als einfache Fahrtwindsimulation erreichte selbst bei umgerechnet 20 L/m^2 keine wirksame Temperatur im Untergrund. Dementsprechend ist eine Menge von umgerechnet 5 L/m^2 generell zu gering, um eine Tiefenwirkung erzielen zu können. Aus den Einzelversuchen wird deutlich, dass nur mit der ausreichend hohen und konzentrierten Applikation von heißem Wasser eine Wirksamkeit in den ersten Zentimetern des Schotters erzeugt werden kann.

Effektive Wirkwerte im Bereich von $< 5 \text{ L/m}^2$ [166] sind möglicherweise auf größere Flächen gemittelte Werte oder gelten nur für Pflanzen mit sehr oberflächennahen Wurzeln. Ab 10 L/m^2 erscheint eine Wirkung auch auf tieferliegende Wurzeln plausibel [72]. Die schnelle Abkühlung ist angesichts der Wärmekapazität von Steinen und der zusätzlichen hohen Verdunstung bei Wasser nahe am Siedepunkt physikalisch plausibel. Sie lässt auch erwarten, dass im Schotterbett versteckte Tiere schon ab wenigen cm Tiefe eine gute Überlebenschance haben und ggf. bei Kontakt mit dem ersten, kühleren Wasser weiter fliehen könnten.

Heißwasser – Freilandversuch

Bei dem Screening-Versuch im Gleis wurden an dem Versuchsstandort Linnich Schwellenfächer mit möglichst gleichmäßigem Bewuchs ausgewählt, die sich für Wiederholungen und Variationen der Behandlungen eigneten. Aufgrund von generell inhomogenen Pflanzenbeständen wurden teilweise auch nur Teilbereiche eines Schwellenfachs behandelt und die jeweilige Größe vermessen. Zur Vergleichbarkeit wurden die Mengen des eingesetzten Mediums auf einen Quadratmeter normiert (Aufwandmenge/ m^2 behandelte Fläche ohne Schwelle).

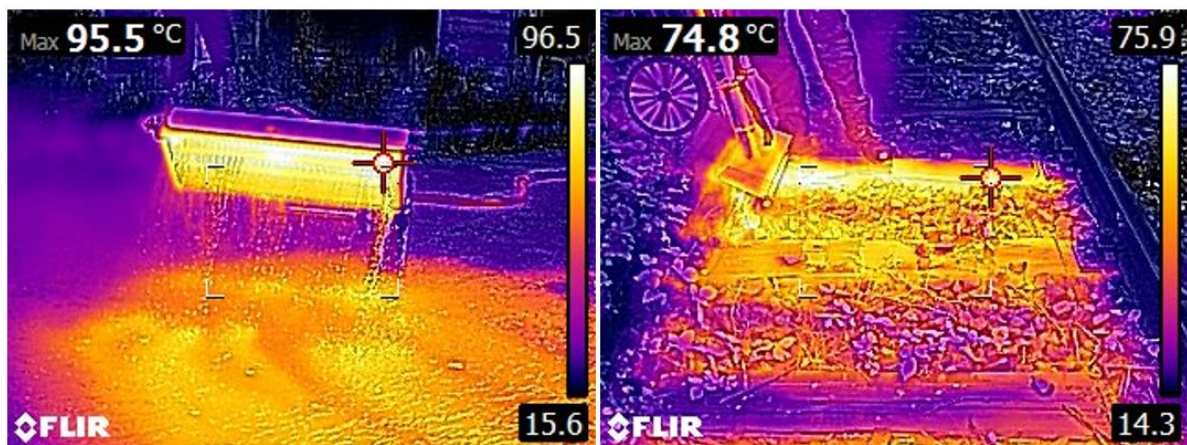


Abbildung 40: Links: Austrittstemperatur am Applikator. Rechts: Oberflächentemperatur nach Applikation.

Der Versuch wurde bei einer Umgebungstemperatur von 15 °C an einem trockenen Tag Anfang Juli durchgeführt. Die Wassermengen lagen bei 10 L/m^2 und 20 L/m^2 , in manchen Wiederholungen wurden die Pflanzen abgeschnitten und dann mit heißem Wasser behandelt. Das Wasser hatte bei Austritt aus dem Applikator eine Temperatur von durchschnittlich 90 °C . Bei einer gleichmäßigen Verteilung des heißen Wassers wurde an der Oberfläche eine Temperatur von durchschnittlich 75 °C

nach der direkten Applikation gemessen (Abbildung 40). Die Entwicklung des Zustands der Pflanzen wurde nach Versuchsende während einer zweimonatigen Bonitur verfolgt. Während des Zeitraums ließ sich nach etwa der Hälfte der bonitierten Zeit eine Regeneration einiger Versuchspflanzen feststellen, wodurch der Endpunkt der Bonitur festgelegt wurde (Tabelle 30).

Zusammenfassend lässt sich durch die Ergebnisse des Heißwasserversuchs erkennen, dass mit Heißwasser die Vegetation im Gleis teilweise kontrolliert werden kann, jedoch nur bei hohen Dosierungen und oft für begrenzte Zeit. Eine begrenzte Wirksamkeit ist erkennbar bei flächiger Applikation im Randbereich, bei wuchsstarken Pflanzen wie Gräsern und auch bei Pflanzen mit Ausläufern wie bei dem Ackerschachtelhalm oder bei Brombeeren. Das Abschneiden von Pflanzen erzielte vor allem bei ausläuferbildenden Pflanzen wie Brombeeren eine höhere Wirkung im Vergleich zu unbehandelten Pflanzen. Außerdem wurde deutlich, dass eine Menge von 10 L/m² für eine effektive Wirkung nötig war. Der Einsatz von 20 L/m² zeigte im Vergleich zu 10 L/m² keine besseren Ergebnisse. Eine punktuelle Applikation des heißen Wassers konnte bei verholzten Pflanzen einen deutlichen Effekt erzielen. Jedoch besteht hierbei das Problem, dass der Stamm und das Astwerk der Pflanzen auch nach einer effektiven Behandlung im Gleis verbleiben.

Tabelle 30: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – Heißwasser.

WISSENSCHAFTLICHER NAME	DEUTSCHER NAME	EFFEKT KONTROLLE	NACH 41 TAGEN	
			10 L/m ²	20 L/m ²
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe	WW	WWS	WWS
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe (+ Schnitt)	WW	WA	WA
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn	WW	KWA	
<i>Beutla pubescens</i>	Moor-Birke	WW	KWA	
<i>Epilobium hirsutum</i>	Zottiges Weidenröschen	WW	WAG	KWA
<i>Equisetum arvense</i>	Ackerschachtelhalm	WW	WAG	WAG
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechtskraut	WW	WAG	KWA
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechtskraut (+ Schnitt)	WW	KWA	KWA
<i>Quercus rubra</i>	Roteiche	WW	WA	WWS
<i>Rubus fruticosus</i>	Brombeere	WW	WWS	WWS
<i>Rubus fruticosus</i>	Brombeere (+ Schnitt)	WW	WA	WA

WW: Weiterwuchs, WWS: Weiterwuchs mit Schäden, WA: Wiederaufwuchs, WAG: Wiederaufwuchs gering, KWA: kein WA

Heißschaum

Das Verfahren Heißschaum wurde als Ergänzung zur Anwendung von Heißwasser betrachtet, da die isolierende Wirkung des Schaums eine längere Temperatureinwirkung annehmen ließ. Der verwendete Schaum bestand dabei aus einem biologisch abbaubaren Zuckertensid, das mit Hilfe eines zur kommunalen Vegetationskontrolle verwendeten Heißschaumgeräts der RWTH Aachen ausgebracht wurde. Die Versuche zur Ermittlung der Temperaturverteilung in der Tiefe wurde ebenfalls in dem zuvor beschriebenen Versuchsstand durchgeführt.

Es konnten allgemein ähnliche Temperaturen wie bei der Anwendung des Heißwassers gemessen werden. Jedoch zeigte sich, dass der erzeugte grobporige und dünne Schaum nicht für die Anwendung auf einer unebenen Oberfläche wie Gleisschotter geeignet war und daher schnell zerfallen ist. Aufgrund der dadurch fehlenden isolierenden Schaumdecke konnten keine weiteren Ergebnisse erzeugt werden. Ein für den Gleisbereich geeignetes Schaummittel müsste deutlich dicker und stabiler sein, ähnlich wie Löschschaum.

Screening-Versuch zum Verbleib von Wasser

Bei mehreren Vegetationskontrollverfahren wird Wasser eingesetzt. Beim Einsatz von Wasser als Trägermedium für Wärme wird eine Applikationsmenge von wenigen Litern [166] bis zu 10 L/m² bei einer VD von 4 % [72] als wirksame Dosis erachtet. Aufgrund dieser Aufwandmengen entstand bei verschiedenen Akteuren die Befürchtung, dass sich derartige Wassermengen ungünstig auf das Gleisbett auswirken können, da dies eine höhere Wassermenge pro Zeit sei, als es im Falle eines Starkregenereignisses zu erwarten wäre [166, 185]. Vor diesem Hintergrund wurden deshalb im Projekt orientierende Versuche zur Wasserhaltekapazität (WHK) durchgeführt. Mit Hilfe der bereits beschriebenen Schotterkisten wurde ein entsprechender Versuchsaufbau erstellt und verschiedene Varianten einer Zusammensetzung des Gleisbettes, Randwegs und der Planumsschutzschicht dargestellt. Um realitätsnahe Daten ähnlich dem Heißwassereinsatz zu erhalten, wurden folgende Szenarien als „Worst Case“-Versuch auf ihre WHK bei der impulsartigen Beaufschlagung mit umgerechnet 4 x 10 L Wasser geprüft:

- Gleisschotter (Schichtdicke 20 cm)
- Schotter mit Splitt in Zwischenräumen (Massenanteil Split 8 % w/w) (Schichtdicke 20 cm)
- Schotter mit Siebrückstand (SR) aus Gleisbettreinigung (Massenanteil SR: 15 % w/w) (Schichtdicke 20 cm)
- Splitt (Randweg): (Schichtdicke 20 cm)
- Sand-Kies-Gemisch ähnlich Unterbau Schotterbett

Es wird davon ausgegangen, dass ein durchschnittliches Schotterbett mindestens 40 cm stark ist, dementsprechend rechnerisch doppelt so dick wie die im Versuch genutzte Modellvorrichtung. Aufgrund dessen ist auch die WHK bei allen Versuchsteilen mit Schotter zu verdoppeln. Bei Splitt für den Randweg werden 20 cm Schichtdicke als „Worst Case“ eingesetzt. In vielen Fällen wird die WHK sogar noch höher sein, da der Splitt zusätzlich mit Feinmaterial teilverfüllt und die Schicht dünner sein kann (8 cm [54]).

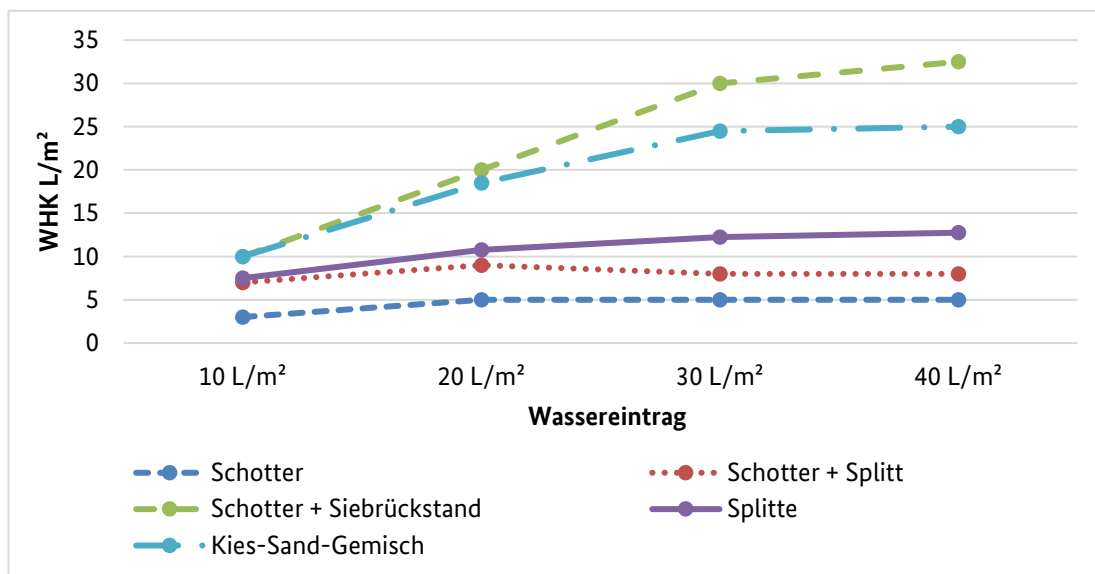


Abbildung 41: Messergebnisse WHK mit umgerechneten Schichtdicken (40 cm) bei allen Schotterversuchen.

Zur Messung stabiler Werte wurde zwischen den Beaufschlagungen jeweils 5 Minuten Abtropfzeit abgewartet. Wichtig ist es zu unterscheiden, dass es sich bei der Beaufschlagung mit Wasser um eine Dosis handelt und somit ein einmaliges Volumen appliziert wird. Hingegen wird bei Regen von einer Rate ausgegangen, bei der über einen längeren Zeitraum, z. B. $60 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, eingetragen werden. Es ist dementsprechend nicht sinnvoll Regenmengen und Wassereintrag durch die Vegetationskontrolle zu vergleichen.

Von Abbildung 41 und Tabelle 31 kann abgeleitet werden, dass schon eine unverfüllte Schotter-schicht von 40 cm Dicke eine WHK von $3 \text{ L}/\text{m}^2$ für die ersten $10 \text{ L}/\text{m}^2$ Wasserbeaufschlagung besitzt. Schon bei der Verfüllung der Hohlräume mit Splitt (8 % w/w, hier zur Darstellung von groben Absplitterungen von Schotter) steigt die WHK auf etwa $7 \text{ L}/\text{m}^2$ bei umgerechnet 40 cm Schichtdicke. Bei Auffüllung der Zwischenräume mit Siebrückstand tritt weder bei $10 \text{ L}/\text{m}^2$ noch bei $20 \text{ L}/\text{m}^2$ Wasser nach unten aus.

Zu diesen Wasserhaltekapazitäten kommt potenziell noch die WHK der behandelten Pflanze hinzu. Bei Screening-Versuchen wurden Horstgräser untersucht, die fast erdfrei im Schotterbett mit dichtem Wurzelwerk zwischen dem Schotter wachsen können. Bei einem Wurzelballen von ca. 1 L Volumen wurde eine Wasserhaltekapazität von $0,1 \text{ L}$ pro Pflanze (ca. $20 \times 20 \text{ cm}$ Grundfläche) oder ca. $2,5 \text{ L}/\text{m}^2$ ermittelt, wenn von oben Wasser im Schwall aufgebracht wird.

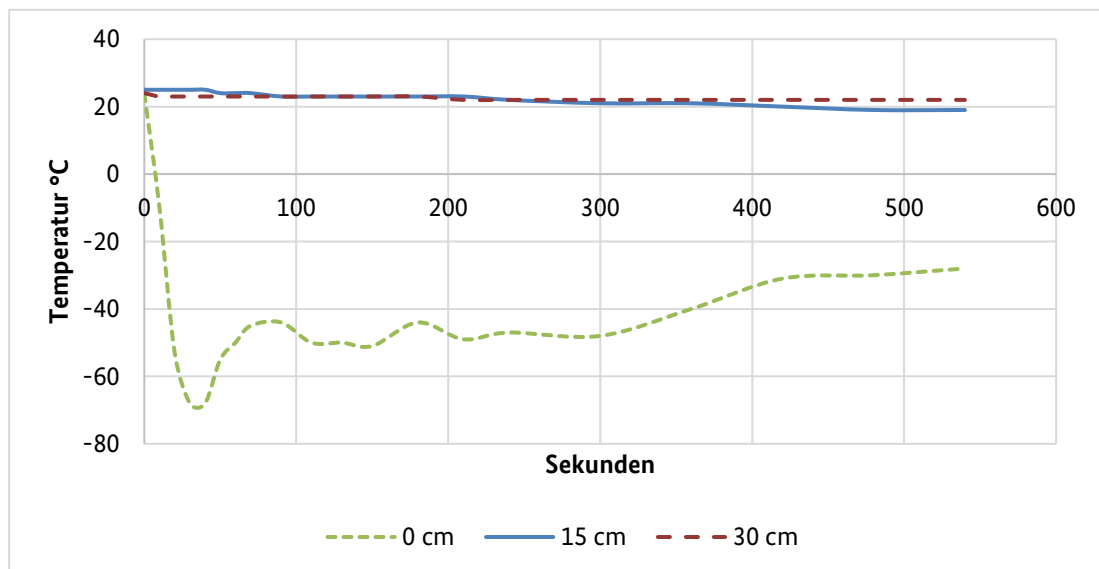
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Schotterschichten mit Pflanzenbewuchs, insbesondere bei Teilverfüllung mit Feinmaterial (Siebrückstand) oder Absplitterungen, eine WHK von deutlich über $10 \text{ L}/\text{m}^2$ haben können, sodass eine Ausschwemmung von Material nicht zu erwarten ist. Bei der für die Vegetationskontrolle realistischen Annahme, dass eine Menge von umgerechnet $10 \text{ L}/\text{m}^2$ nur auf einer kleineren Fläche geschlossen ausgebracht wird (z. B. $0,5 \text{ m}^2$), kann davon ausgegangen werden, dass die Flüssigkeit nicht im erheblichen Maße bis zur Planumsschutzschicht vordringt.

Tabelle 31: WHK auf 40 cm Schichtdicke berechnet beim Einsatz unterschiedlicher Wasserdosierungen.

Dosis	Schotter [L]	Schotter + Splitt [L]	Schotter + Siebrückstand [L]	Splitt [L]	Kies-Sand-Gemisch [L]
10 L/m ²	3	7	> 10	7,5	10
20 L/m ²	5	9	> 20	10,75	18,5
30 L/m ²	5	8	> 30	12,25	24,5
40 L/m ²	5	8	32,5	12,75	25

Frosten – Laborversuch

Bei dem Verfahren Frosten gab es die Annahme, dass sich das schwere kalte Gas im Schotter verteilt, die Kälte in die Tiefe wandert und dort Pflanzenteile absterben lässt [186]. Die Versuche für dieses Verfahren wurden hauptsächlich aufgrund der fehlenden Informationen zur benötigten Aufwandmenge, der Kälteverteilung (Tiefenwirkung) und der generellen Wirksamkeit zur Vegetationskontrolle angesetzt. Die Ergebnisse zeigten, dass bei einer gleichmäßigen Verteilung der hohen Aufwandmenge von 5 kg/m² keine Abkühlung im Schotter erreicht werden konnte. Lediglich an der Oberfläche wurde die spezifische Temperatur des Trockeneis von -78 °C für einen Zeitraum von bis zu 10 Minuten erreicht (Abbildung 42). Aufgrund der fehlenden Abkühlung im Schotterbett wurde auf weitere reproduzierende Versuche verzichtet.

Abbildung 42: Temperaturkurve 5 kg/m² Trockeneis.

Frosten – Freilandversuch

Bei den Screening-Versuchen im Gleis wurden an den Versuchsstandorten Linnich Schwellenfächer mit möglichst gleichmäßigem Bewuchs ausgewählt, die sich für Wiederholungen und Variationen

der Behandlungen eigneten. Aufgrund von generell inhomogenen Pflanzenbeständen wurden teilweise auch nur Teilbereiche eines Schwellenfachs behandelt und die jeweilige Größe vermessen. Zur Vergleichbarkeit wurden die Mengen des eingesetzten Mediums auf einen Quadratmeter normiert (Aufwandmenge/m² behandelte Fläche ohne Schwelle). Das Trockeneis wurde in Form von 6 mm großen Pellets verwendet und hatte die charakteristische Temperatur von -78,5 °C. Die Versuche wurden Mitte Juli bei einer Umgebungstemperatur von 17 °C im Gleis durchgeführt und eine Auswahl verschiedener Pflanzen gewählt (Tabelle 32).

Es wurden 2,5, 5 und 10 kg/m² des Mediums auf verschiedene Pflanzenarten ausgebracht und es zeigte sich, dass bei 2,5 kg/m² nur eine Wirksamkeit bei Ackerschachtelhalm (*Equisetum arvense*) und Ruprechtskraut (*Geranium robertianum*) hatte. Ab 5 kg/m² zeigte sich ein Effekt auf viele krautige Pflanzen und ab 10 kg/m² konnte eine Wirksamkeit bei der Mehrheit der Testvegetation ermittelt werden. Lediglich Gräser und ausläuferbildende Pflanzen wie Brombeeren konnten auch bei dieser Aufwandmenge nicht kontrolliert werden.

Tabelle 32: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – Frosten.

WISSENSCHAFTLICHER NAME	DEUTSCHER NAME	EFFEKT NACH 38 TAGEN		
		2,5 kg/m ²	5 kg/m ²	10 kg/m ²
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe	WW	WA	WA
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn		KWA	
<i>Beutla pubescens</i>	Moor-Birke			KWA
<i>Epilobium hirsutum</i>	Zottiges Weidenröschen	WWS		
<i>Equisetum arvense</i>	Ackerschachtelhalm	WAG	WAG	KWA
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechtskraut	WA	WAG	KWA
<i>Rubus fruticosus</i>	Brombeere (+ Schnitt)	WW	WW	WWS

UV-C – Laborversuch

Der Versuch mit UV-C diente der grundlegenden Einschätzung und Bewertung des Verfahrens, da nur eine geringe und inkonsistente Literatur als Datengrundlage zur Wirksamkeit vorhanden war. Die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit der Hochschule Geisenheim University und der dort vorhandenen Bestrahlungsanlage mit definierten Lichtquellen durchgeführt.

Die Versuchspflanzen bestanden aus 40 verschiedenen Pflanzentypen, die ein breites Arten- und Größenspektrum darstellten, wodurch die Wirksamkeit von UV-C an verschiedensten Pflanzentypen in unterschiedlichen Entwicklungsstadien ermittelt werden konnte. Die Pflanzentypen unterschieden sich in grasartige/monokotyle und krautige/dikotyle Pflanzen und der Herkunft in Form von angezogenen Pflanzen im Gewächshaus und Freiland sowie im Gleis frei gewachsenen Pflanzen. Bei der Versuchsdurchführung wurde ein UV-C-Modul bestehend aus zehn Niederdruckstrahlern mit einer Nennleistung von 110 W/m² je Einzelstrahler bei 254 nm Wellenlänge verwendet. Die

Strahlung wurde dabei mit einem Abstand von 300 mm von oben auf die Pflanzen gerichtet, um das Vorgehen ähnlich wie im Gleis nachzustellen. Während der Bestrahlung wurde zudem ein Ventilator eingeschaltet, der eine Luftgeschwindigkeit von etwa 4 m/s (14 km/h) erzeugte und damit eine leichte Bewegung der Blätter gegeben war, um einerseits eine permanente Abschattung durch die oberen Blätter zu verringern und um andererseits eine möglichst realistische und dynamische Freilandsituation zu erzeugen.

Der Versuch wurde mit sechs Dosis-Varianten (inkl. Kontrolle) durchgeführt, dabei nahmen die Beleuchtungsdauer und damit die eingebrachte Energiemenge immer um den Faktor 3 zu. Die erste Variante ist die Kontrolle, bei der die Pflanzen keiner UV-C-Strahlung ausgesetzt waren. Aufsteigend bis zur Variante 6, erreichte die Dauer der Behandlung 508 s mit einer entsprechenden Anschlussleistung von 1 700 kWh/ha (Tabelle 33). Eine derartige Maximalbestrahlung würde bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h eine Anschlussleistung des Bestrahlungssystems von 10 MW erfordern, was der Leistung eines zwölfteiligen ICE4 entspräche [187]. Dies bräuhete eine Beleuchtungslänge des Zuges von 2 800 m. Dies stellt deshalb eine aktuell technisch nicht angemessen umsetzbare Überdosis dar.

Tabelle 33: Versuchsübersicht – UV-C.

DOSIS-VARIANTE	1	2	3	4	5	6
ENERGIEDOSIS* [KWH/HA]	0	20	60	190	560	1700
ZEIT [S]	0	6	19	56	169	508

* Berechnet auf Basis der Anschlussleistung der Leuchten.

Die Entwicklung des Zustands der Pflanzen wurde nach Versuchsende während einer dreiwöchigen Bonitur verfolgt. Dabei wurden die Veränderungen der Pflanzen so lange ermittelt, bis bei den Pflanzen keine Verschlechterung des Zustands erkennbar war oder die Pflanzen begannen sich zu regenerieren. In der Tabelle wurden daher die Tage ab der Behandlung bis zur Stagnation oder Regeneration der Pflanzen aufgeführt. Von einer klassifizierenden Bonitur wurde abgesehen, da die meisten Pflanzen gar nicht oder in unwesentlichem Maße auch auf die sehr hohen Bestrahlungsdosierungen reagierten.

Tabelle 34: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – UV-C – Teil I.

WISSENSCHAFTLICHER NAME	DEUTSCHER NAME	WUCHSORT	LETZTER EFFEKT AN TAG X NACH BEHANDLUNG – PFLANZEN AUS:		
			GH	FL	GL
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Gewöhnlicher Glatthafer	GH, FL	13	13	
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe	GH, FL, GL	13	0	8
<i>Cyperus zumula</i>	Katzengras	GH	13		

WISSENSCHAFTLICHER NAME	DEUTSCHER NAME	WUCHSORT	LETZTER EFFEKT AN TAG X NACH BEHANDLUNG – PFLANZEN AUS:	
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras	GH, FL	13	2
<i>Elymus repens</i>	Gemeine Quecke	GH, FL	2	8
<i>Festuca ovina</i>	Schaf-Schwingel	GH, FL	13	8
<i>Vulpia myuros</i>	Mäuseschwanz-Feder-schwingel	GL		2
<i>Arabidopsis thaliana</i>	Acker-Schmalwand	GH	13	
<i>Cardamine hirsuta</i>	Behaartes Schaumkraut	GL		2

Herkunft der Pflanzen eingeteilt in Gewächshaus (GH), Freiland (FL) und Gleisbereich (GL).

Durch die Auswertung der gesamten Pflanzen (Tabelle 34 und Tabelle 35), die für den Versuch verwendet wurden, ist klar erkennbar, dass die Methode UV-C zur Vegetationskontrolle nicht hinreichend wirkte. Generell zeigten nur die im Gewächshaus ohne natürliche UV-Vorhärtung gewachsenen Kulturarten, wie Salat und Kresse, am Testende nach 19 Tagen negative Effekte der UV-C-Be-strahlung. Alle anderen Pflanzen, insbesondere die gleistypischen Pflanzenarten und solche aus Frei-landaufzucht, reagierten selbst auf die hohen Dosierungen gar nicht oder regenerierten sich inner-halb des Beobachtungszeitraumes so weit, dass kein langfristiger Einfluss auf die Vegetation zu er-warten war. Alle eingesetzten Pflanzen mit einem Alter zwischen ein und sechs Monaten stellten potenziell typische Aufwuchsstadien für eine Behandlung dar. Am Beispiel von *Geranium roberti-anum* (Ruprechtskraut) zeigt sich, dass sogar die jüngeren Pflanzen schneller wiederaustrieben als die älteren Pflanzen, nachdem die ursprünglichen Blätter durch das UV-Strahlung abstarben.

Tabelle 35: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – UV-C – Teil II.

WISSENSCHAFTLICHER NAME	DEUTSCHER NAME	WUCH-SORT	LETZTER EFFEKT AN TAG X NACH BEHANDLUNG – PFLANZEN AUS:		
<i>Epilobium hirsutum</i>	Zottiges Weidenröschen	GL			8
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechtskraut	GH, FL, GL	13	13	13
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechtskraut (jung)	GL			5
<i>Melilotus officinalis</i>	Gelber Steinklee	GH, FL	8	5	
<i>Oenothera biennis</i>	Gemeine Nachtkerze	GH	8		
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich	GH, FL, GL	8	13	5
<i>Taraxacum officinale</i>	Löwenzahn	GH, FL, GL	8	8	8
<i>Veronica persica</i>	Persischer Ehrenpreis	GL			8
<i>Vicia villosa</i>	Zottige Wicken	GL			8

WISSENSCHAFTLICHER NAME	DEUTSCHER NAME	WUCH-SORT	LETZTER EFFEKT AN TAG X NACH BEHANDLUNG – PFLANZEN AUS:
<i>Apium graveolens</i>	Sellerie	GH	13
<i>Brassica oleracea</i> convar. Capitata var. Alba	Weißkohl	GH	13
<i>Brassica oleracea</i> convar. capitata var. rubra	Rotkohl	GH	13
<i>Brassica oleracea</i> convar. capitata var. sabauda	Wirsing	GH	13
<i>Brassica oleracea</i> var. gongylodes	Kohlrabi weiß	GH	13
<i>Cichorium endivia</i>	Endivie	GH	13
<i>Lactuca sativa</i> var. capitata	Kopfsalat	GH	19
<i>Lactuca sativa</i> var. capitata nidus tenerimma	Eisbergsalat	GH	19
<i>Lepidium sativum</i>	Kresse	GH	19
keine Artzuordnung	Moos	GL	0

Zusätzlich zu den Versuchen mit Pflanzen wurde ein 28 mm Leerrohr der Eisenbahninfrastruktur und verschiedene Signal- und Stromkabel dauerhaft während der Durchläufe in der Versuchsvorrichtung angebracht und der Bestrahlung mit UV-C ausgesetzt. Damit traf eine enorm hohe Dosis der UV-C-Strahlung auf die Komponenten. Nach der visuellen Betrachtung zeigten sich oberflächliche Versprödungen an dem Leerrohr. Die Signal- und Stromkabel wiesen keine visuell sichtbaren Veränderungen auf. Der Limitversuch konnte hier jedoch keine abschließenden Aussagen über die Stabilität machen.

Infrarot – Laborversuch

Die Untersuchungen der Wirksamkeit von Infrarot zur Vegetationskontrolle wurden mit Teilgruppen aus 26 unterschiedlichen Pflanzentypen, zusammengesetzt aus 17 Pflanzenarten mit unterschiedlichen Aufzuchtbedingungen durchgeführt. Die Pflanzen stellen einerseits typische Pflanzen aus dem Gleisbereich dar, bilden aber auch mit den Kulturpflanzen ein sehr hohes Empfindlichkeitsspektrum und unterschiedliche Blattdicken und Blattfarben ab. Dadurch entsteht eine breitgefächerte physikalisch-biologische Gesamtübersicht der Wirkung auf Pflanzen.

Tabelle 36: Versuchsübersicht Infrarot.

DOSIS-VARIANTE	1	2	3	4	5
ENERGIEDOSIS* [KWH/HA]	10000	7500	5000	2500	0
ZEIT [MINUTEN]	10	7,5	5	2,5	0

Tabelle 37: Liste der Versuchspflanzen und Versuchsergebnisse – Infrarot.

WISSENSCHAFTLI- CHER NAME	DEUTSCHER NAME	WUCHSORT*	LETZTER EFFEKT AN TAG X NACH BEHANDLUNG – PFLANZEN AUS:		
			GH	FL	GL
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe	FL, GL		WW	WW
<i>Cyperus zumula</i>	Katzengras	GH	WWS		
<i>Dactylis glomerata</i>	Wiesen-Knäuelgras	FL		WW	
<i>Festuca ovina</i>	Schaf-Schwingel	FL		WW	
<i>Vulpia myuros</i>	Mäuseschwanz-Feder- schwingel	GL			WW
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechtskraut	GH, FL	WWS	WWS/V	
<i>Melilotus officinalis</i>	Gelber Steinklee	FL		WWS/V	
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich	GH	WWS		
<i>Taraxacum officinale</i>	Löwenzahn	GH, FL	WWS	WWS	
Keine Artzuordnung	Moos	GL			WW

Herkunft der Pflanzen eingeteilt in: Gewächshaus (GH), Freiland (FL), Gleisbereich (GL)

WW: Weiterwuchs, WWS: Weiterwuchs mit Schäden, WA: Wiederaufwuchs, WAG: Wiederaufwuchs gering, V: vertrocknet

Zur Erzeugung der Infrarotstrahlung wurde ein Halogen-Heizstrahler mit einer Nennleistung von 6 kW/m² und für die Wassererwärmung optimierter IR-Wellenlänge verwendet. Bei der Versuchsdurchführung wurden die Pflanzen im Abstand von 20 cm von der Wärmequelle aufgestellt. Für die Versuchsreihe wurde eine Behandlungsdauer in vier gleichmäßige Energiedosierungen eingesetzt. Variante 5 ist hierbei die Kontrolle, die keiner IR-strahlung ausgesetzt war (Tabelle 36). Die Entwicklung des Zustands der Pflanzen wurde nach Versuchsende während einer dreiwöchigen Bonitur verfolgt. Da es bei der Vegetationskontrolle um die längerfristigen Effekte geht, wurden in der Ergebnistabelle nur die Effektdaten von Tag 19 gezeigt.

Tabelle 38: Versuchsübersicht und Versuchsergebnisse Infrarot + Rückschnitt – Effekte bis Tag 19.

VARIANTE NR.		7 + SCHNITT	8	9 + SCHNITT	10	11	12 + SCHNITT
ENERGIEDOSIS [KWH/HA] *		10 000	10 000	5 000	5 000	0	0
ZEIT [MINUTEN]		10	10	5	5	0	0
DEUTSCHER NAME	Wuchs- ort	Effekte 19 Tage nach Behandlung					
GELBER STEINKLEE	GH	V	V	V	WAG	WW	WA
RUPRECHTSKRAUT (JUNG)	GL	V	V	V	V	WW	WA
LÖWENZAHN	GL	WA	WWS	WA	WWS	WW	WA
GEM. NACHTKERZE	GH	V	WW	WA	WW	WW	WA
SPITZWEGERICH	GL	V	WWS	WA	WWS	WW	WA
ZOTTIGES WEIDEN- RÖSCHEN	GL	V	WWS	V	WWS	WW	WA
ARABIDOPSIS THALIANA	GH	V	V	V	V	WW	WA
ROTKOHL, JÜNGER	GH	V	V	V	V	WW	WA
ROTKOHL, ÄLTER	GH	V	WW	V	WW	WW	WA
LOLLO ROT	GH	V	V	V	WW	WW	WA
SELLERIE	GH	V	V	WA	WWS	WW	WA
ENDIVIE	GH	V	WWS	V	WWS	WW	WA
KATZENGRAS	GH	WAG	WWS	WAG	WWS	WW	WA
WIESEN-KNÄUELGRAS	GH	WA	WW	WA	WW	WW	WA
SCHAF-SCHWINGEL	GH	WAG	WW	WAG	WW	WW	WA
GEWÖHNLICHER GLATT- HAFER	FL	WAG	WW	WAG	WW	WW	WA

Herkunft der Pflanzen eingeteilt in: Gewächshaus (GH), Freiland (FL), Gleisbereich (GL)

WW: Weiterwuchs, WWS: Weiterwuchs mit Schäden, WA: Wiederaufwuchs, WAG: Wiederaufwuchs gering, V: vertrocknet

Wie in der Tabelle 37 gezeigt wird, wiesen krautige Pflanzen wie Ruprechtskraut und Steinklee bei einer mittleren Behandlungsdauer (5 Minuten) eine erhebliche Schädigung der zarten Pflanzenteile auf und es wurde kein Weiterwuchs verzeichnet. Hingegen zeigten krautig-rosettenartig wachsende Pflanzen, wie Löwenzahl, Spitzwegerich und Gräser, hauptsächlich an den am stärksten der IR-Strahlung exponierten Pflanzenteilen vertrocknete Stellen als Reaktion der Behandlung. Doch durch die starke Strahlungsabschattung der entscheidenden Wachstumspunkte durch die oberen Blätter konnte keine längerfristig pflanzenschädigende Temperatur erzielt werden (Weiterwuchs WW).

Größere Pflanzen, wie Gräser oder rosettenartige Pflanzen, zeigten eine starke Strahlungsabschattung der entscheidenden Wachstumspunkte durch die oberen Blätter. Bedingt durch den schattierenden Effekt konnte keine längerfristig pflanzenschädigende Temperatur erzielt werden. Um die Beschattungseffekte zu vermeiden und zu prüfen, ob ein Kombinationsverfahren aus Mähen und Infrarotstrahlung effektiver ist, wurden bei zwei Strahlungsdosierungen (5 000 und 10 000 kWh/ha) je zwei Varianten (abgeschnitten, unverändert) behandelt. Zudem wurden jeweils zwei unbehandelte Kontrollen mitgeführt, bei denen eine Kontrolle unbehandelt blieb und die andere Kontrolle auf derselben Höhe abgeschnitten wurde wie die Pflanzen in den Varianten 1 und 3 (Tabelle 38).

Daraus resultierte, dass Gräser nach dem Abschneiden stärker durch IR-Strahlung geschädigt wurden als normal aufgewachsene Gräser. Bei den krautigen Pflanzen vertrockneten 11 von 12 Pflanzenarten bei hoher Dosierung (10 Minuten bei 10 000 kWh/ha) und 8 von 12 bei halber Dosierung (5 Minuten bei 5 000 kWh/ha) in abgeschnittenem Zustand. Nur Löwenzahl als Pflanze mit starker Pfahlwurzel überlebte in allen Fällen. Somit lässt sich sagen, dass der Effekt von Infrarotbestrahlung bei einem dichten Pflanzenbestand oder mehreren Blattebenen oder Gräsern generell durch Abschirmung der Strahlung sehr stark abnimmt. Eine Kombination von Mähen der Pflanzen und einer anschließenden Behandlung mit IR-Strahlung erhöht die Wirksamkeit des Verfahrens, insbesondere für krautige Pflanzen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Gräser nach dem Abschneiden stärker durch IR-Strahlung geschädigt wurden als normal aufgewachsene Gräser. Bei den krautigen Pflanzen vertrockneten 11 von 12 Pflanzenarten (bei hoher Dosierung) und 8 von 12 bei halber Dosierung in abgeschnittenem Zustand. Nur Löwenzahl als Pflanze mit starker Pfahlwurzel überlebte in allen Fällen.

Wirkung Infrarot auf Infrastrukturkomponenten

Neben den Wirkungsversuchen auf Pflanzen wurde auch die Einwirkung der Hitze auf nichtpflanzliche Oberflächen zur genaueren Analyse der Erwärmung von technischen Komponenten durchgeführt. Dabei wurde ein 28 mm Leerrohr der Eisenbahninfrastruktur, ein doppelt geschirmtes Signal- und Stromkabel und zum Vergleich eine krautige Pflanze, ein lebendes Gras und ein trockenes Gras bestrahlt und die exponierten Bereiche mit einer IR-Kamera vermessen.

In der Abbildung 43 ist zu erkennen, dass sich anfänglich das trockene Gras am schnellsten erwärmte und ebenso das Leerrohr eine Temperatur von 60 °C schon nach 1 Minute erreichte. Hingegen konnte bei den lebenden Pflanzen nach 1 Minute erst eine Temperatur von maximal 45 °C gemessen werden. Die direkt der Strahlung ausgesetzten pflanzlichen Materialien erreichten allgemein nach 2,5 Minuten eine Temperatur von 80 °C. Während sich die Werte der vormals lebenden Pflanzenteile auf diesem Niveau stabilisierten, stieg die Temperatur des trockenen Grases weiter an und stabilisierte sich nach 3,5 Minuten im Bereich von 100 °C. Die Erwärmungskurve des hohlen dünnwandigen Leerrohres flachte nach 3 Minuten auf 120 °C ab und stieg anschließend nur noch langsam auf 140 °C nach 6,5 Minuten. Das doppelt geschirmte massive Signal- und Stromkabel erwärmte sich langsam, aber kontinuierlich und stabilisiert sich nach 3 Minuten im Bereich zwischen 80 und 100 °C. Schwankungen der Messungen können durch Reflexionen bedingt sein.

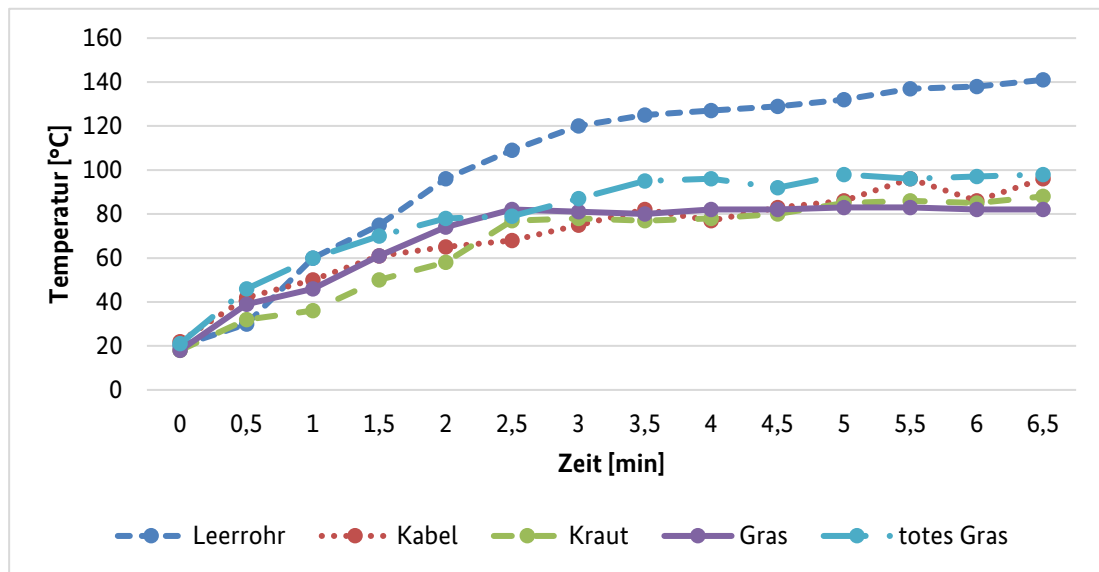


Abbildung 43: Erwärmungskurven verschiedener Oberflächen.

Während die Pflanzen nur oberflächlich vertrocknet waren, zeigte das Leerrohr starke Verformungen durch erweichte Bereiche. Dies entspricht den Literaturangaben, die die obere Gebrauchstemperatur mit ca. 135 °C angeben [188], welche hier überschritten wurde. Das Kabel mit einer Oberfläche aus Polyethylen [189] zeigte keine Veränderung. Die Ergebnisse zeigen, dass Leerrohre deutlich empfindlicher sind als Pflanzen, da sie die Wärme komplett aufnehmen. Das Kabel heizte sich ähnlich wie die Pflanzen auf, weil es eine höhere Wärmekapazität hat und die Metallabschirmungen zu einer weiteren Ableitung der Wärme aus dem bestrahlten Bereich führten.

Dagegen ließ sich bei den Pflanzen erkennen, dass durch Wärmereflektion und Verdunstung sich die Blattoberfläche stabilisierte und damit so das Überleben zeitweise gesichert werden konnte. Erst wenn diese Verdunstung nicht mehr aufrechterhalten werden kann, erwärmen sich die Pflanzen auf Temperaturbereiche über 50 °C, in denen die bestrahlten Pflanzenteile absterben. Da diese jedoch die tieferliegenden Blätter und Wachstumszentren abschirmen, bedeutet dies noch nicht das Absterben der Gesamtpflanze.

Jäten und Mähen – Freilandversuch

Im Rahmen des Projekts wurde auf den VS eine monatliche Behandlung ausgewählter Stellen mit dem vereinfachten Mechanismus Jäten = Ausreißen und Mähen = Abschneiden über einen Zeitraum von drei Jahren erprobt. Diese Versuche dienten übergeordnet dazu, das Wachstum der behandelten Pflanzen nach der Behandlung eines solchen Wirkprinzips beurteilen zu können, wie es auch bei einigen Verfahren (Jäten: MJ, Handjäten und Mähen: Mulchen, Druckwasser) auftritt. Die Behandlungen wurden an den Versuchsstandorten an insgesamt sechs verschiedene Stellen im Gleis durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass in dem jeweiligen Schwellenfach der Bewuchs gleichmäßig verteilt war. Jedes Schwellenfach wurde dann halbiert und eine Hälfte für das „Ausreißen“, die andere Hälfte für das „Abschneiden“ und das danebenliegende Schwellenfach als Kontrolle gewählt.

Exemplarisch kann das Ergebnis aus diesem Versuch in den Abbildung 44 und Abbildung 45 nachverfolgt werden. Die Dokumentation bezieht sich auf insgesamt drei Jahre. Die blaue Kurve zeigt das Frischgewicht der abgeschnittenen Pflanzen und die rote gestrichelte Kurve stellt das Frischgewicht der ausgerissenen Pflanzen dar. Begonnen wurde mit den Versuchen zum Start der Vegetationsperiode im Mai 2021, als die Vegetation bereits gut ausgebildet war.

Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse mit der Grassorte Aufrechte Trespe (*Bromus erectus*). Es ist zu verzeichnen, dass zum Versuchsstart im Mai 2021 vor allem beim Ausreißen ein dichter Pflanzenbestand vollständig entnommen wurde und daher der Ausschlag entstand. Nach der starken Reduktion der Pflanzen durch das Ausreißen war der Wiederaufwuchs in der restlichen Vegetationsperiode nur noch gering. Ein ähnliches Bild zeigte sich in der Vegetationsperiode 2022. Hingegen ist der Start der Vegetationsperiode im Jahr 2023 durch das warme und nasse Wetter deutlich stärker ausgefallen. Beim Mähen wurde zu Beginn und in den folgenden Behandlungen nur das Pflanzenmaterial 10 cm oberhalb des Schotters entnommen. Somit blieb die Grundstruktur der Pflanze bestehen und es ist zu erkennen, dass dadurch der Aufwuchs zum Sommer hin noch einmal anstieg und tendenziell mehr war als bei den entfernten Pflanzen. Ähnlich verlief das Wachstum auch im Jahr 2022 und stärker ausgeprägt auch im Jahr 2023. Der Beginn der Vegetationsperiode war frühestens ab April durch eine Wachstumszunahme zu erkennen. Zum Ende der Vegetationsperiode ab November war bei beiden Varianten in jedem Jahr kein Zuwachs mehr zu verzeichnen.

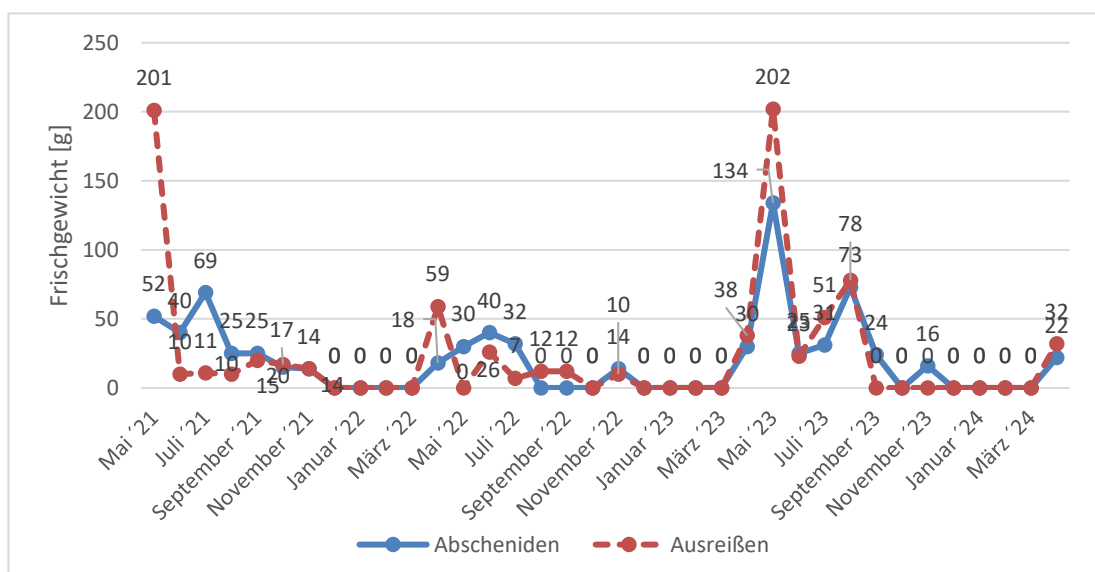


Abbildung 44: Schwellenfach bewachsen mit Aufrechte Trespe (*Bromus erectus*). Gesamtsumme des Frischgewichts nach dem Abschneiden: 729 g, nach dem Ausreißen: 833 g.

Ein Beispiel für eine typische krautige Gleispflanze ist das Ruprechtskraut (Abbildung 45). Hier ist ein deutlicher Unterschied im Vergleich des Wachstums zum vorherigen Beispiel zu erkennen. Insgesamt war der Bewuchs deutlich geringer und spricht deutlich stärker auf eine Behandlung an. Es ist zu sehen, dass zu Beginn der Behandlung im Frühjahr 2021 die ausgerissenen Pflanzen nach der ersten Behandlung nicht erneut aufgewachsen sind, die abgeschnittenen Pflanzen jedoch gleichmäßig wieder nachgewachsen sind. Im gesamten Jahr 2022 wuchs das Ruprechtskraut nicht wieder auf, was

5. Punkteverteilung für die Bewertung und Auswahl der geeignetsten Verfahren

Die nachfolgende Liste der Anforderungen wurde genutzt, um die geeignetsten Verfahren für die nichtchemische Vegetationskontrolle auszuwählen. Für alle Kriterien werden Quellen und Ableitungen zugrunde gelegt, die von einer normalen Bodenoberfläche ohne Schotter ausgehen, z. B. landwirtschaftliche oder urbane Anwendungen. Bei Anforderungen, bei denen sich besondere Potentiale oder Potentialeinschränkungen durch Schotterschichten ergeben, wird dies besonders erwähnt.

Anforderung	Hohe Wirksamkeit gegenüber Spross/Blätter an der Oberfläche (TEIL I)	Nr. Fu01
Bewertungskriterium	Allgemeines Wirkungspotential des Verfahrens gegenüber oberirdischen Pflanzenteilen.	
Spezifizierung	Es geht allgemein um jegliche Pflanzentypen, egal ob ein- oder mehrjährig, wobei schwerpunktmäßig Pflanzen im Fokus stehen, die nach Entfernen der oberirdischen Pflanzenteile nicht mehr austreiben. Die Potentialbewertung bezieht sich immer auf die einmalige Behandlung der Pflanzen und nicht auf die Möglichkeit des Wiederaufwuchses.	
Punkteverteilung	Aufwuchs stirbt ab – 1 P Aufwuchs größtenteils abgestorben oder zerstört – 0,75 P Aufwuchs im Wachstum zurück – 0,5 P Aufwuchs kaum verändert – 0,25 P Aufwuchs unverändert – 0 P	
Erläuterung	Benchmark: Vollständiges Absterben des Aufwuchses wird gewünscht (1 P). Aufwuchs stirbt ab oder ist zerstört: Im Regelfall (> 95 %) ist oberirdisch kein wuchsfähiges Pflanzenteil mehr sichtbar. Abgetrennte Pflanzenteile sind noch wachstumsrelevant, wenn sie vor Ort oder nach Verfrachtung wieder anwachsen können. Eine derartige Pflanze gilt nicht als zerstört. Aufwuchs größtenteils abgestorben: Kleine oberirdische Pflanzenteile können regelmäßig und methodenbedingt in lebensfähigem Zustand übrigbleiben. Aufwuchs im Wachstum zurück: Die Methode lässt die Pflanzenteile bestehen, verzögert jedoch das weitere Wachstum um eine Woche oder mehr, wobei einzelne Pflanzenteile durchaus verfrüht absterben können. Aufwuchs kaum verändert: Die Methode hat auf den Aufwuchs nur einen geringen Einfluss, der nach der Behandlung nach kurzer Zeit nicht mehr erkennbar ist.	

Anforderung	Hohe Wirksamkeit gegenüber Spross/Blätter an der Oberfläche (TEIL II)	Nr. Fu01
Erläuterung	Aufwuchs unverändert: Die Methode hat auf die Mehrzahl der Pflanzen keinen relevanten Einfluss, der über leichte Beschädigungen hinausgeht.	
Begriffsdefinitionen	Wirkungspotential: erwünschte Wirkung beim Einsatz der im Rahmen der Literatur, eigenen Untersuchungen oder aufgrund von praktischen Erwägungen als sinnvoll betrachtet keine Festlegung auf einzelne Anwendungstechnik, sondern generelle Potentialerfassung Oberirdische Pflanzenteile: Berücksichtigt werden Spross und Blätter von ein- und mehrjährigen Pflanzen sowohl von Gräsern und zweikeimblättrigen Pflanzen als auch von ähnlich wachsenden Pflanzen, wie Schachtelhalm. Nicht berücksichtigt werden Bäume und sehr stark verholzte andere Pflanzenarten. Aufwuchs: Aufwuchs bedeutet in diesem Zusammenhang die Gesamtheit von Spross und Blatt, das durch das Verfahren beeinträchtigt wird und damit auch eine Aussage über die Gesamtbeeinträchtigung des oberirdischen Pflanzenwachstums macht. Größe der Pflanzen: Die Größe der Pflanzen wird hier nicht spezifiziert, sondern richtet sich nach dem jeweiligen bestimmungsgemäßen Einsatzbereich des jeweiligen Verfahrens. Schwierigkeitsgrad der Behandlung: Da es immer Pflanzen gibt, die sich mit einer Methode unterschiedlich schwierig behandeln lassen, wird hier von einem bestimmungsgemäßen mittleren Schwierigkeitsgrad ausgegangen.	
Anforderung	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens auch auf eine größere Wuchshöhe der Pflanzen (TEIL I)	Nr. Fu02
Bewertungskriterium	Allgemeines Wirkungspotential des Verfahrens auf den Spross in Abhängigkeit von der Größe/Wuchshöhe/des Entwicklungsstadiums der Pflanze.	
Spezifizierung	Es geht allgemein um jegliche Pflanzentypen, außer verholzten Pflanzen, also auch um die Jungstadien verholzender Pflanzen, egal ob ein- oder mehrjährig. Die Potentialbewertung bezieht sich immer auf die einmalige Behandlung der Pflanzen und nicht auf die Möglichkeit des Wiederaufwuchses.	

Anforderung	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens auch auf eine größere Wuchshöhe der Pflanzen (TEIL I)	Nr. Fu02
Punkteverteilung	Methoden, die nur größere aber keine kleinen Pflanzen erfassen können, werden hier nicht mit Punktabzügen belegt, da die kleineren Pflanzen bei der späteren Behandlung entweder auch groß genug sein werden oder nie ein kritisches Maß erreichen. Methoden, die kleine Pflanzen nicht erreichen, bekommen ggf. Abzüge bei der notwendigen Häufigkeit der Behandlung, wenn diese ganzjährig aufwachsen. Angegebener Wert ist generalisierter Schätzwert für Maximalgröße die gut bekämpfbar sein dürften. Verholzte Pflanzen sind hier ausgenommen. Benchmark: Zerstörung von Pflanzen auch noch über 12-Blattstadium möglich: Wirksam bis: ca. 12 Blattstadium/ 3 Seitensprosse/3 Halme (> BBCH 24) – 1 P bis ca. 12 Blattstadium/ 3 Seitensprosse/3 Halme (- BBCH 24) – 0,75 P bis 8 Blattstadium (- BBCH 18) – 0,5 P 0–4 Blattstadium inkl. Keimblätter (- BBCH 12) – 0,25 P nicht wirksam – 0 P	
Erläuterung	Benchmark: Pflanzen, die größer sind als das 12-Blattstadium, sind in vielen Fällen im Eisenbahnbereich wegen der Akkumulation von Biomasse, der Gefahren für Fahrzeugsysteme und den Menschen (Stolpergefahren) unerwünscht. Pflanze > ca. 12 Blattstadium/ 3 Seitensprosse/3 Halme (> BBCH 24) zerstört: Pflanzen sind meist mehrere Monate alt und können auch schon sehr buschig, ausgewachsen und verholzt sein. Die Größe der Pflanze richtet sich nach der Art. bis ca. 12 Blattstadium/ 3 Seitensprosse/3 Halme (- BBCH 24) zerstört: Pflanzen beginnen nach der ersten Wachstumsphase mit dem Hauptwachstum und sind noch nicht verholzt. Größe generell im Bereich unter 20–30 cm. bis 8 Blattstadium (- BBCH 18) zerstört: Frühe Wachstumsstadien zumeist im Bereich < 10 cm. 0–4 Blattstadium inkl. Keimblätter (- BBCH 12) zerstört: Jungpflanze, frisch gekeimt bis beginnendes Wachstum.	

Anforderung	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens auch auf eine größere Wuchshöhe der Pflanzen (TEIL II)	Nr. Fu02
Begriffsdefinitionen	Blattstadien: Blattstadien geben einen Hinweis auf die Größe und beziehen sich hier auf krautige Pflanzen (Blätter und Seitensprosse) bzw. auf Gräser (Blätter und Stängel). Blattquirle (z. B. bei Schachtelhalmen) werden wie Blätter behandelt. Der Bezug auf das Entwicklungsstadium ist nötig, da ältere Pflanzen auch bei geringer Größe zunehmend verholzen und für einige Verfahren schwerer bekämpfbar werden. BBCH: das BBCH-System ist eine Verallgemeinerung der Entwicklungsstadien für Pflanzen, wobei hier sowohl Gräser als auch krautige (zweikeimblättrige) bzw. andere Pflanzen in ein Schema zusammengefasst werden. Seitensprosse: Krautige Pflanzen bilden ab einem gewissen Alter in der Regel weitere Seitensprosse direkt ab Bodenoberfläche oder seitlich am Hauptspross. Halme: Gräser bilden nach den direkt aus dem Boden kommenden Blättern Halme aus, an denen dann später oben die Ähren mit den Samen sitzen. Blätter/Keimblätter: Bei zweikeimblättrigen Pflanzen unterscheidet man zwischen Keimblättern (die beiden ersten sichtbaren Blätter) und den weiteren „echten“ Blättern. Im Kontext dieser Klassifizierung werden alle Blätter gezählt. Pflanze zerstört: Abgetrennte Pflanzenteile sind noch wachstumsrelevant oder sogar gefährlich, wenn sie vor Ort oder nach Verfrachtung wieder anwachsen können. Eine derartige Pflanze gilt nicht als zerstört.	
Anforderung	Effektives Abtöten der oberirdischen Pflanzenteile durch wiederholte Behandlung, um Rhizome und Wurzeln zu Schwächen (TEIL I)	Nr. Fu03
Bewertungskriterium	Allgemeines Wirkungspotential des Verfahrens gegenüber den oberirdischen Pflanzenteilen mehrjähriger Pflanzen, um durch wiederholtes Abtöten Rhizome und Wurzeln zu schwächen bzw. auszuhungern.	
Spezifizierung	Da die Schotterabdeckung generell auch das obere Sprossende schützt, muss davon ausgegangen werden, dass das Wirksamkeitspotential insbesondere bei nichtsystemischen Verfahren mit Schotter erheblich verringert sein kann. Dies gilt, insbesondere wenn der Schotter kaum mit Substrat verfüllt ist.	

Punkteverteilung	Benchmark: Die gewünschte maximale Wirkung wird erreicht, wenn der Spross so weit in die oberste Bodenschicht hinein zerstört wird, dass er nur unter Rückgriff auf unterirdische Energiereserven wieder austreiben kann: Spross und oberer Wurzelbereich werden min. 5 cm **in den Boden hinein zerstört – 1 P Spross wird oberirdisch zerstört – 0,5 P Spross wird nur so weit zerstört, dass sofort wieder Blätter austreiben und Licht bekommen können – 0 P ** In einzelnen Fällen kann bei kleinen Pflanzen eine Tiefe von 2 cm ausreichen, bei sehr großen, wuchsstarken Pflanzen sind eher 10 cm nötig.
Erläuterung	Spross und oberer Wurzelbereich werden min. 5 cm **in den Boden hinein zerstört: Im Regelfall (> 95 %) ist oberirdisch kein wuchsfähiges Pflanzenteil mehr sichtbar und die Sprosse sind so tief in den Boden hinein abgetötet (2–10 cm), dass die Pflanze erhebliche Energie aus den unterirdischen Speicherorganen aufbringen muss, um wieder austreiben zu können. Damit kann die Gesamtpflanzenpopulation eingedämmt werden und die weitere Verbreitung minimiert werden. Spross wird oberirdisch zerstört: Im Regelfall (> 95 %) ist oberirdisch kein wuchsfähiges Pflanzenteil mehr sichtbar. Da jedoch keinerlei unterirdische Wirkung besteht und auch die oberflächennahen Wachstumszentren nicht in großem Maßstab geschädigt werden, wird das Wachstum der Pflanzen nur verzögert und es findet keine umfassende Kontrolle oder Eindämmung statt. Spross wird nur so weit zerstört, dass sofort wieder Blätter austreiben und Licht bekommen können: Die verbliebenen Sprossreste sind ausreichend für ein weiteres Wachstum oder Wiederaustrieb. Je nach Jahreszeit der Behandlung wird in vielen Fällen eine Weiterverbreitung durch Samen gesichert oder eine weitere Energiesammlung in Speicherorganen nur verzögert. In einigen Fällen kann diese Art der Behandlung sogar zu einem verstärkten Wiederaustrieb führen (auch aus dem Rhizom oder den Wurzeln), der dieser Pflanze einen Vorteil gegenüber Pflanzen verschafft, die empfindlicher auf die Maßnahmen reagieren. Besonders genannt sei hier die Förderung von Gräsern gegenüber krautigen Pflanzen.
Begriffsdefinitionen	Rhizom: Wurzelähnliche unterirdische Speicherorgane, die über eigene Knospen für Wurzeln und Sprosse verfügen und deshalb auch wieder austreiben können, wenn alle oberirdischen Pflanzenteile abgetötet oder abgetrennt wurden.

Anforderung	Hohe Wirksamkeit gegenüber verholzten Pflanzenteilen an der Oberfläche	Nr. Fu04
Bewertungskriterium	Allgemeines Wirkungspotential des Verfahrens gegenüber verholzten oberirdischen Pflanzenteilen.	
Punkteverteilung	Benchmark: Vollständige Wirkung durch umfassendes Absterben: verholzte oberirdische Pflanzenteile sterben ab – 1 P verholzte oberirdische Pflanzenteile größtenteils abgestorben – 0,75 P Pflanze im Wachstum zurück – 0,5 P verholzte oberirdische Pflanze kaum verändert – 0,25 P (Nur Blätter sterben ab) verholzte oberirdische Pflanze unverändert – 0 P (Lediglich einzelne Blätter sterben ab)	
Begriffsdefinitionen	Verholzte oberirdische Pflanzenteile: Berücksichtigt werden Spross und Blätter von mehrjährigen Pflanzen, insbesondere Gehölzen und Bäumen, die schon frühzeitig und systematisch einen Spross mit hohem Holzanteil bilden und über eine rindenartige Umhüllung verfügen. Explizit nicht gemeint sind Pflanzen, die gegen Ende ihre Wachstumsphase in einer Saison verholzen oder deren Stängel graduell verholzend sind (Melde, Brombeere außen noch grün im ersten Jahr). Abgetrennte Pflanzenteile: Abgetrennte Pflanzenteile sind noch wachstumsrelevant oder sogar gefährlich, wenn sie vor Ort oder nach Verfrachtung wieder anwachsen können Aufwuchs: Aufwuchs bedeutet in diesem Zusammenhang die Gesamtheit von Spross und Blatt, die durch das Verfahren beeinträchtigt wird und damit auch eine Aussage über die Gesamtbeeinträchtigung des oberirdischen Pflanzenwachstums macht. Größe der Pflanzen: Die Größe der Pflanzen wird hier nicht spezifiziert, sondern richtet sich nach dem jeweiligen bestimmungsgemäßen Einsatzbereich des jeweiligen Verfahrens. Da es sich um mehrjährige Pflanzen handelt, wird der ein-/zweijährige Aufwuchs aus Samen oder Wurzel bewertet, der mindestens einmal im vorherigen Jahr behandelt wurde. Mehrjährige Bäume, die im Normalfall nur mit schweren Mulchern oder Kettensägen entfernt werden können, sind hier nicht berücksichtigt. Schwierigkeitsgrad der Behandlung: Da es immer Pflanzen gibt, die sich mit einer Methode unterschiedlich schwierig behandeln lassen, wird hier von einem bestimmungsgemäßen mittleren Schwierigkeitsgrad ausgegangen.	

Anforderung	Wirksamkeit gegenüber Wurzeln und Rhizomen	Nr. Fu05
Bewertungskriterium	Direktes Wirkungspotential des Verfahrens gegenüber den unterirdischen Pflanzenteilen mehrjähriger Pflanzen, wobei deren Rhizome und Wurzeln direkt geschädigt bis zerstört werden.	
Spezifizierung	Da die Schotterabdeckung generell Wurzeln und Rhizome schützt, muss davon ausgegangen werden, dass das Wirksamkeitspotential erheblich verringert sein kann. Dies gilt, insbesondere wenn der Schotter kaum mit Substrat verfüllt ist.	
Punkteverteilung	Benchmark: Die gewünschte Wirkung wird erreicht, wenn Wurzeln und Rhizome in die oberste Bodenschicht hinein zerstört werden, dass sie komplett absterben oder nur Reststücke durch letzte Energiereserven wieder austreiben können: • direkt wirksam gegen Wurzel und Rhizome* – 1 P • wirksam gegen Wurzeln und flache ** Rhizome – 0,75 P • wirksam gegen Wurzeln mit großem Aufwand – 0,5 P • begrenzte Wirksamkeit gegen (flache, junge) Wurzeln – 0,25 P • keine Wirksamkeit gegen Wurzeln oder Rhizome – 0 P ** In einzelnen Fällen kann bei kleinen Pflanzen eine Tiefe von 2 cm ausreichen, bei sehr großen, wuchsstarken Pflanzen sind eher 10 cm nötig.	
Erläuterung	Direkt wirksam gegen Wurzeln und Rhizome: Im Regelfall (> 95 %) ist oberirdisch kein wuchsfähiges Pflanzenteil mehr sichtbar und die Rhizome + Wurzeln sind tief in den Boden hinein abgetötet (2–10 cm), sodass Reste gar nicht mehr oder nur mit hohem Aufwand wieder austreiben können. Direkt bedeutet, eine Zerstörung während oder in kausaler Folge nach der Behandlung. Wirksam gegen Wurzeln und flache ** Rhizome: Das Verfahren dringt mit seiner Wirkung ca. 2 cm bis maximal 5 cm in den Boden ein. Dies kann kleine Pflanzen und Wurzeln/Rhizome, die sich z. B. in flachen Erdschichten auf Schotter oder in Spalten befinden, schon ausreichend schädigen, sodass sie absterben. Wirksam gegen Wurzeln mit großem Aufwand: Bei vielen Verfahren kann der Effekt auf Wurzeln durch sehr hohe Dosierung bzw. Energieeinsatz erreicht werden. Dies ist ein Hinweis auf generelle Wirksamkeit, aber kann im Routinefall nicht umfassend genutzt werden. Begrenzte Wirksamkeit gegen (flache, junge) Wurzeln: Nur in einigen Fällen (< 50 %) werden zumindest leicht erreichbare Wurzeln direkt geschädigt. Keine Wirksamkeit gegen Wurzeln oder Rhizome: Es gibt keine direkte unterirdische Wirkung des Verfahrens.	
Begriffsdefinitionen	Rhizom: Wurzelähnliche unterirdische Speicherorgane, die über eigenen Knospen für Wurzeln und Sprosse verfügen und deshalb auch wieder austreiben können, wenn alle oberirdischen Pflanzenteile abgetötet oder abgetrennt wurden.	

Anforderung	Hohe Wirksamkeit gegenüber Samen	Nr. Fu06
Bewertungskriterium	Allgemeines Wirkungspotential des Verfahrens gegenüber Samen.	
Spezifizierung	Da die Samen in den Schotter im Gegensatz zu Erde einfach hineinrieseln können und dadurch zusätzlich geschützt werden, ist generell von einem niedrigeren Wirkungspotential unter Schotter auszugehen, sofern dieser nicht weitgehend mit erdähnlichem Substrat verfüllt ist.	
Punkteverteilung	Samen mit geringer Überdeckung durch Substrat oder Schotter werden abgetötet – 1 P auf dem Boden aufliegende Samen im Schotter oder auf glatten Oberflächen werden zumindest teilweise abgetötet – 0,5 P Samen werden nicht abgetötet – 0 P Benchmark: Eine Abtötung von Samen bzw. deren irreversible Hemmung kurz nach der Keimung ist das Ziel.	
Erläuterung	Samen mit geringer Überdeckung durch Substrat oder Schotter werden abgetötet: Umfassende Kontrolle auch älterer Samen im Ruhezustand oder sofort nach der Keimung. Auf dem Boden aufliegende Samen werden teilweise abgetötet: Da die Anforderung hoch ist, werden auch Punkte für Teilerfolge vergeben. Derartige Teilerfolge können beispielsweise sein, dass Pflanzen zur falschen Jahreszeit zur Keimung angeregt werden und nicht mehr reproduzieren können. Samen werden nicht abgetötet: Samen werden in keiner Weise erreicht. Durch die Aussamung von Pflanzen im Gleisbereich werden Samen durch Wind und Wirbelschleppen der Züge ins Gleisbett getragen und fallen in Zwischenräume des Schotters. Es ist eine allgemeine Potentialbewertung von Verfahren unter optimalen Voraussetzungen (Samen liegen meist gut zugänglich auf der Oberfläche oder nahe darunter), um Maximalpotentiale und Limitierungen zu erfassen.	
Begriffsdefinitionen	Samen: Samen, Früchte und andere Samenähnliche Reproduktionsorgane (Knollen, Knöllchen etc.), die eine Überdauerungsform darstellen. Substrat: Feinmaterial zwischen den Schottersteinen oder auf dem Randweg, welches Pflanzen Halt und zumindest in begrenztem Maße Feuchtigkeit bereitstellen kann.	

Anforderung	Hohe Wirksamkeit des Verfahrens unabhängig von Wetterlagen und Jahreszeiten Nr. Fu07
Bewertungskriterium	Allgemeines Wirkungspotential des Verfahrens in Abhängigkeit von Wetter und Jahreszeiten.
Spezifizierung	Beschränkung der Wirksamkeit durch folgende Bedingungen: Regen vorher, erheblichen Regen (während), Regen (> 30 min danach) Kälte mangelnden Sonnenschein bei/direkt nach Applikation starke Trockenheit hohe Temperaturen bei der Behandlung starker Wind *Tageszeiten werden nicht berücksichtigt, da Vegetationskontrolle meistens nachts durchgeführt wird bzw. durch lange Behandlungsstrecken pro Tag keine tageszeitliche Optimierung möglich ist.
Punkteverteilung	Benchmark: Da wenige Fahrzeuge mit hoher Auslastung über große Strecken und starker Vorplanung arbeiten, soll eine Behandlung möglichst unabhängig vom Wetter möglich sein: alle Bedingungen egal = keine Abhängigkeit – 1 P 1–2 Bedingungen als Problem = begrenzte Wetterabhängigkeit – 0,75 P 3 Bedingungen als Problem = mittlere Wetterabhängigkeit – 0,5 P 4–5 Bedingungen als Problem = schwierige Bedingungen – 0,25 P
Erläuterung	Die oben spezifizierten Wetterbedingungen können einzeln oder gemeinsam auftreten. Je mehr Bedingungen ein Problem darstellen, desto geringer ist die durchschnittliche Effizienz und Einsetzbarkeit der Methode. Durch die Wetterbedingungen kann das Wirkprinzip die Pflanze nicht oder nur sehr abgeschwächt erreichen oder es kann Effekte im Nachhinein dämpfen.
Begriffsdefinitionen	Regen: Blätter danach tropfnass und Boden mehrerer mm tief angefeuchtet. Kälte: Temperaturen unter 10–15 °C (unbeschattet) über einen Zeitraum von mehr als 48 h der ggf. durch kurze wärmere Perioden unterbrochen sein kann. mangelnder Sonnenschein: weniger als 2 h Sonne pro 24 h über mehrere Tage. starke Trockenheit: Wasserstress für die Pflanzen, damit Zusammenrollen oder Ausstreckung von Pflanzenteilen. Trockene Luft ohne Taubildung. hohe Temperaturen: Temperaturen über ca. 25 °C mit Spitzen über 30 °C über längere Zeiträume. starker Wind: Windgeschwindigkeiten über ca. 20 km/h in Bodennähe

Anforderung	Hohe Arbeitsgeschwindigkeit	Nr. Fu08
Bewertungskriterium	Potential für spezifische Arbeitsgeschwindigkeiten.	
Spezifizierung	Besondere Einsatzbedingungen, wie z. B. die VD, werden nicht beachtet. Eine Vervielfachung der Leistung und damit höheren Geschwindigkeiten der Behandlungseinrichtungen werden nicht angenommen. Als Randbedingungen der Bewertung bleiben neben dem technischen Wunsch nach einer hohen Flächen-/Kilometerleistung auch technische Besonderheiten des Bahnbetriebes im Blick. So sind Geschwindigkeiten größer als 20 km/h nötig, um die Sperrung des Gleises zu verhindern und die Behandlung in offenem Zeitslot einreihen zu können. Trotzdem ist Geschwindigkeit kein Ausschlusskriterium, da gerade in Bahnhöfen und beim Einsatz von kleineren Fahrzeugen mit begrenzter Leistung auch heute teilweise mit Geschwindigkeiten deutlich unter 20 km/h gearbeitet wird. Es wird letztlich immer um eine pragmatische Optimierung von Aufwand und Nutzen gepaart mit technischer Machbarkeit gehen.	
Punkteverteilung	Benchmark: Im Routineeinsatz erreichbare Geschwindigkeit V: $V \geq 20 \text{ km/h} - 1 \text{ P}$ $20 \text{ km/h} > V \geq 10 \text{ km/h} - 0,75 \text{ P}$ $10 \text{ km/h} > V \geq 5 \text{ km/h} - 0,5 \text{ P}$ $5 \text{ km/h} > V \geq 2 \text{ km/h} - 0,25 \text{ P}$ $V < 2 \text{ km/h} - 0 \text{ P}$	
Erläuterung	Geschwindigkeiten oberhalb von 20 km/h werden nicht mehr weiter differenziert, da ab dieser Schwelle die Strecken nicht mehr gesperrt werden müssen. Technologien können teilweise durch eine Vervielfachung der Behandlungseinheiten auch schneller gemacht werden. Eine starke Differenzierung unterhalb von 20 km/h ist in annähernd logarithmischer Abstufung sinnvoll, da einige Verfahren sehr geschwindigkeitsabhängig sind.	
Begriffsdefinitionen	Routineeinsatz: Anspruchsvoller, aber technisch und logistisch gut handhabbarer Geräte- oder Personeneinsatz im Dauerbetrieb bei realistischen Umgebungsbedingungen, z. B. hinsichtlich der Pflanzendichte im Gleis.	

Anforderung	Niedrige Anwendungsfrequenzen	Nr. Ko01
Bewertungskriterium	Potential für spezifische Anwendungsfrequenzen.	
Spezifizierung	Die behandelte Pflanze stirbt ab/wächst für einen bestimmten Zeitraum nicht mehr auf. Es wird vereinfachend von einer Vegetationsperiode von acht Monaten ausgegangen. Eine Mischpopulation von größeren und kleineren, ein- und mehrjährigen Pflanzen mit begrenztem Grasanteil und ohne stark verholzte Pflanzen wird berücksichtigt. In Anbetracht der großen Heterogenität der Wetterbedingungen wird davon ausgegangen, dass es sich um eine Vegetationsperiode handelt, die weder durch langanhaltende Kälte noch durch große Hitze/Trockenheit erheblich gehemmt ist. In solchen Jahren verringern sich die Anwendungsfrequenzen automatisch.	
	Die Abschätzung beinhaltet die oft nur begrenzt vorhandene Samenbank und die Sicherstellung einer Vermeidung von keimungsanregender Bodenbewegung. Berücksichtigt wird auch, dass sich in einer derartigen Umgebung nur eine begrenzte Zahl von Pflanzen ausbreiten kann und ein kontinuierliches Einwachsen von der Seite und von unten möglich ist. Im Modell wird von einem einigermaßen gepflegten Gleisbett ausgegangen, welches nur geringfügig mit Feinmaterial verfüllt ist. Es wird auch berücksichtigt, dass viele Pflanzenarten nur im Frühjahr und/oder Herbst bevorzugt keimen und sich jahreszeitlich definiert reproduzieren.	
Punkteverteilung	Vegetation wächst für einen bestimmten Zeitraum nicht mehr über das gesetzte Ziel auf (integrierter Ansatz): für 8–10 Monate (1 Beh./Jahr) – 1 P für 4–7 Monate (1–2 Beh./Jahr) – 0,75 P für 2–3 Monate (3–4 Beh./Jahr) – 0,5 P für 1–2 Monate (5–8 Beh./Jahr) – 0,25 P für ≤ 1 Monat (mehr als 8 Beh./Jahr) – 0 P	
Erläuterung	Die Vegetationsperiode, in der sich eine Behandlung lohnt (Pflanzenwachstum in erheblichem Maße) wird von April bis November angesetzt. Dieser Zeitraum berücksichtigt die klimawandelbedingte Erwärmung.	
Begriffsdefinitionen	Integrierter Ansatz der Vegetationskontrolle: Eine komplette Eliminierung jeglicher Unkrautbelastung ist nicht erreichbar. Deshalb wird ein gewisser Aufwuchs toleriert. Ein wichtiges Ziel bei der Bewertung ist die Minimierung der Samenbildung, der Ausweitung von unterirdischen Rhizomen bzw. der Ablegerbildung durch oberirdische Ausläufer (Kontrolle/Erhalt des Status Quo als Ziel.)	

Anforderung	Geringer Energiebedarf bei der Herstellung der Betriebsmittel und Ausbringung pro Jahr (TEIL I) Nr. Ko02
Bewertungskriterium	Potential für den Energiebedarf bei der Herstellung der Betriebsmittel und Ausbringung pro Jahr.
Spezifizierung	Berücksichtigung der für das Verfahren benötigten Energie ohne die Berücksichtigung von Transport und Herstellung der Geräte. Vergleich zum Chemischen Pflanzenschutz: Herstellung: Durchschnittlich 205,1 MJ/kg (ca. 4 kg/km) ca. 945,6 MJ/km oder 2 127,6 MJ/ha [68] Ausbringung (Glyphosat): 20,43 MJ/km [Berechnet mit 0,5 L/km [68] und 90 % Brennwert]; 37 bis 145 MJ/ha [64]. Zweiwege: Pumpe elektrisch 12 kWh = 43,2 MJ [190] Zur Umrechnung von ha in km wird von einer Ausbringbreite von 4,5 m ausgegangen. Ausbringung und Herstellung für Glyphosat (zweimalige Anwendung pro Jahr, ohne Bodenherbizid) $(2 \cdot 127,6 + 145 \cdot 2) \text{ MJ/ha} = 4 \cdot 545,2 \text{ MJ/ha}$ Wird hier noch jeweils ein Bodenherbizid zugesetzt, wird abgeschätzt, dass der Energiebedarf rechnerisch auf über 5 000 MJ/ha steigt. Beim chemischen Pflanzenschutz mit 2 x jährlichem Einsatz wird der Gesamtenergiebedarf als akzeptabel betrachtet. Verfahren, die ein Vielfaches an Energie benötigen, insbesondere wenn diese nicht durch regenerative Träger bereitgestellt werden kann, müssen derartige Nachteile wenn möglich in anderen Systemeigenschaften überkompensieren. Der Verbrauch pro Jahr gerechnet und der Einzelverbrauch pro Überfahrt multipliziert sich jeweils mit der minimalen und maximal anzunehmenden Behandlungszahl. In sehr vielen Fällen ist aus der Literatur nicht erkennbar, wie hoch die Pflanzendichte im bearbeiteten Bereich war und ob die Geräte im flächigen Dauerbetrieb oder manuell/sensorgesteuert eingesetzt wurden. So können Angaben für einen vollflächigen Bewuchs (100 %-Behandlung) um den Faktor 20 höher liegen als Werte, bei denen gezielt Flächen behandelt werden, was oft mit behandelten Flächenanteilen im Bereich von 5 % der Gesamtfläche einhergeht. Wo möglich wurden die Daten auf die zu erwartende Einsatzhäufigkeit umgerechnet und damit Angaben pro Jahr ermittelt.

Anforderung	Geringer Energiebedarf bei der Herstellung der Betriebsmittel und Ausbringung pro Jahr (TEIL II)	Nr. Ko02
Punkteverteilung	Benchmark: Der Energiebedarf pro Jahr (mehrfacher Einsatz): $< 360 \text{ MJ/ha} - 1 \text{ P}$ $358 < x \leq 4\,221 \text{ MJ/ha} - 0,75 \text{ P}$ $4\,221 \text{ MJ/ha} < x \leq 17\,950 \text{ MJ/ha} - 0,25 \text{ P}$ $17\,950 \text{ MJ/ha} < x - 0 \text{ P}$ (Verbrauch pro Jahr gerechnet)	
Erläuterung	Skala wurde anhand der sich aus allen verfügbaren Daten ergebenden Perzentilen gebildet und stellen jeweils die Quartilgrenzen dar (25 %-, 50 %-, 75 %-Grenze).	
Begriffsdefinitionen	Energiebedarf: Der Energiebedarf pro Jahr (mehrfacher Einsatz) berechnet als Energiebedarf, der bei der Herstellung oder Mitführung anfällt. Eine Umrechnung in Primärenergiebedarf ist nicht direkt möglich, da die Quellenlage begrenzt ist. Primärenergiebedarf: Benötigte Energie ab primär bilanzierter Quelle unter Berücksichtigung aller Umwandlungsverluste.	

Anforderung	Geringer Verbrauch von Betriebsmitteln (Wasser etc.)	Nr. Ko03
Bewertungskriterium	Allgemeines Potential für Verbrauch von Betriebsmitteln.	
Spezifizierung	Gewichtsbedarf in kg/ha bzw. L/ha für einmalige Anwendung zur Abschätzung der nötigen Kapazität auf dem Fahrzeug. Emissionsaspekte sind in den späteren Kriterien berücksichtigt. Gewicht kann für Unimog und Häufigkeit des Nachladens (Logistik) eine Rolle spielen. *Gewichte von Energieumwandlungseinheiten (Generatoren etc.) werden nicht einbezogen.	
Punkteverteilung	Benchmark: Verbrauch auf Gewichtsbasis kg/ha bei vollständiger Behandlung der Fläche für einmalige Anwendung: $< 100 \text{ kg/ha} - 1 \text{ P}$ $100-2\,000 \text{ kg/ha} - 0,75 \text{ P}$ $2\,000-4\,500 \text{ kg/ha} - 0,5 \text{ P}$ $4\,500-9\,000 \text{ kg/ha} - 0,25 \text{ P}$ $9\,000 \text{ kg/ha} - 0 \text{ P}$ Die Abstufung entspricht Quartilen der vorhandenen Daten oder daraus berechneten Abschätzungen.	

Anforderung	Geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit	Nr. PI01
Bewertungskriterium	Gefahrenpotentiale der Verfahren, die zu erhöhtem Genehmigungsbedarf führen können.	
Spezifizierung	Die Anzahl und Komplexität von einmaligen oder regelmäßig auftretenden Genehmigungen gibt Auskunft über Gefahrenpotentiale und erhöhten organisatorischen oder technischen Sicherheitsbedarf der Technologien. Zeit der Zulassung des Verfahrens durch Art und Anzahl der Genehmigungen: umweltrelevant: Umweltschaden von Arten und natürlichen Lebensräumen, Gewässer, Boden inkl. Mikroorganismen technikrelevant: Genehmigung des einzusetzenden Bauteils und Kompatibilität mit Technik im Gleis außergewöhnliche Transporte: übergroß (größer als Lichtraumprofil), schwer oder mit Besonderheiten (z. B. Baumaschinen mit Geschwindigkeitseinschränkungen) [DB-Richtlinie 810.0501] Gefahrguttransport: Stoff gehört zu einer der neun Gefahrgutklassen Bei Verfahren, bei denen sich besondere Potentiale oder Potentialeinschränkungen durch den Einsatzbereich Eisenbahn ergeben, wird dies besonders erwähnt.	
Punkteverteilung	Einordnung des Aufwandes der vier einzelnen Genehmigungskategorien: kein/niedrig: 1 mittel: 0,5 hoch: 0 Bewertung des gesamten Grades der Genehmigungspflichtigkeit anhand der Summe der Punkte aus den vier Kategorien. Summe aller Punkte: 3,5–4: kein/geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit – 1 P 2–3: mittlerer Grad der Genehmigungspflichtigkeit – 0,5 P 0–1,5: hoher Grad der Genehmigungspflichtigkeit – 0 P	

Anforderung	Hoher Reifegrad der Technologie für Großgeräte im Einsatzprofil Nr. PI02 Bahn zum Zeitpunkt der Technologieauswahl
Bewertungskriterium	Reifegrad der Technologie für Bahn und Versuchsbetrieb.
Spezifizierung	Einerseits ist ein hoher Reifegrad für eine aussagekräftige Erprobung einer Technologie nötig. Andererseits sind gerade bei neuen, noch unreifen Methoden durch das Projekt Innovationsschübe zu erwarten, die Lösungen für seit langem offenem Fragen bringen können. Es soll bewertet werden, ob eine Technologie aktuell im Bahnbereich erwartbar eingesetzt werden kann (hoch, gut) ob die Technologie generell in ihrer Funktionalität für die Bahn gut bewertbar ist (hoch, gut, begrenzt) ob ein Einsatz auf dem Trägersystem des Forschungsprojektes praxisnah im Projektzeitraum möglich und sinnvoll erscheint (hoch, wenn als Teil eines Kombinationssystems weiter zu erproben), gut, begrenzt) ob es sinnvoll ist, grundlegende Versuche zur Prüfung einer Technologie im Hinblick auf ihre zukünftigen Potentiale im Rahmen des Projektes an Teilaspekten durchzuführen
Punkteverteilung	hoch: Großgeräte im Bahn- oder Urbanbereich = 1 P gut: In der Landwirtschaft Großgerät oder im Bahn-/Urbanbereich Kleingeräte = 0,75 P begrenzt: kleinere Geräte in anderen Bereichen oder Anpassungsbedarf = 0,5 P gering: Prinzipien und Laborversuche Machbarkeit nahegelegt = 0,25 P zukunfts offen: physikalisches Prinzip bekannt = 0 P
Erläuterung	Benchmark: innovative Methoden mit erwartbarer Reife gesucht: hoch: Technologie im Bahnbereich oder im urbanen Bereich (mit hoher Übertragbarkeit) in Großgeräten eingesetzt = 1 P gut: Technologie in der Landwirtschaft großtechnisch eingesetzt oder im Bahn-/Urban-Bereich in kleineren Geräten eingesetzt/erprobt = 0,75 P begrenzt: kleinere Geräte z. T. aus ganz anderen Einsatzbereichen vorhanden oder technischer Anpassungsbedarf bei Großgeräten aus anderen Bereichen zu erwarten = 0,5 P gering: prinzipielle physikalische Prinzipien und Laborversuche legen Machbarkeit nahe, aber keine Geräte mit annähernden Einsatzprofilen kurzfristig aus anderen Bereichen verfügbar, wichtige Kernmodule offen = 0,25 P zukunfts offen: nur machbar erscheinendes physikalisches Prinzip bekannt = 0 P

Anforderung	Keine Geräuschentwicklung/Schallemissionen, die über die erlaubten Emissionen von dort zugelassenen Eisenbahnfahrzeugen wesentlich hinausgehen	Nr. SI01
Bewertungskriterium	Geräuschentwicklung/Schallemissionen über den Normalbetrieb hinausgehend	
Spezifizierung	Vergleichswerte relativ zum normalen Eisenbahnbetrieb: Mittelungspegel/Maximalpegel dB jeweils bei 25 m Abstand Nahverkehrszüge (65–150 km/h): 71–78 / 87–92 Güterzüge (80 km/h): 80–85 / 87–92 Schnell-Personenzüge (bis 250 km/h): 79–81 / 91–96	
	Da Schallemissionen sehr stark umgebungsabhängig und tageszeitabhängig sind, werden hier nur Emissionswerte der Fahrzeugmodule berücksichtigt. Es wird bewertet, ob die Behandlung deutlich lauter als das eigentliche Zugfahrzeug oder vergleichbar mit dem Lärmpegel unter normalen Betriebszuständen von Zügen auf ähnlichen Strecken ist. Arbeitsschutzgrenzwerte spielen keine Rolle, da die Mitarbeitende sich im Regelfall in einer entsprechend schallgeschützten Kabine befinden bzw. durch persönliche Schutzausrüstung gesichert sind. Da es sich nicht um handgeführte Geräte handelt, gibt es in den Szenarien keine Mitarbeitende, die im Gleis neben den Geräten laufen. Zu beachten ist weiterhin, dass die Fahrzeuge im Vergleich zum Regelbetrieb selten unterwegs sind (1–8 x pro Jahr). Zu beachten ist jedoch auch, dass die Fahrzeuge tendenziell langsamer fahren als Normalzüge und auch nachts unterwegs sind.	
Punkteverteilung	Benchmark: Verfahren deutlich leiser als vorbeifahrende moderne Güterzüge. Abgeschätztes Eigengeräusch/Mittelungspegel des Verfahrens bei 25 m Abstand leise: deutlich unter Nahverkehrszug (< 70 dB) – 1 P mittel: im Bereich Nahverkehrszug (70–97 dB) – 0,5 P laut: im Bereich moderner Güterzüge (80–85 dB) – 0 P	
Erläuterung	Da es für Lärm eine große Zahl verschiedenster Bemessungsgrößen gibt, soll sich hier nur grob auf Vergleichszüge bezogen werden.	
Begriffsdefinitionen	Mittelungspegel: Über die Zeit der Einwirkung gemittelter Schallpegel. Maximalpegel: Höchster erreichter Wert während der Schalleinwirkung.	

Anforderung	Minimierung des Risikopotentials für den Mensch durch die angewendeten oder bei der Anwendung direkt und indirekt freigesetzten Stoffe (TEIL I) NR. SI02
Bewertungskriterium	Gefahrenpotential der bei der Anwendung eingesetzten oder bei der Anwendung direkt freigesetzten Stoffe für Anwender und Bystander.
Spezifizierung	Als Zulassung für die Nutzung eines Verfahrens müssen die aus den Gefahren der Stoffe resultierenden Risiken immer durch geeignete Maßnahmen auf ein vertretbares Maß reduziert werden. Im Kontext des Projektes wird aber das härtere Kriterium des Gefahrenpotentials genutzt, um gemäß dem Vorsorgeprinzip die Nutzung gefährlicher Stoffe zu vermeiden. Besondere stoffliche Gefahrenpotentiale. Wirkungspfade: Einatmen/Schleimhautkontakt, Hautkontakt Wirkungstypen: reizende Stoffe (z. B. Kresole, Phenole aus Teeröl) krebserregende, toxische, teratogene oder mutagen Stoffe (PAK und Abbauprodukte aus Teeröl, Schmierstoffe) toxische Stäube (Schwermetallaufnahme aus Metallabrieben, Bodenpartikeln, Mikroplastik) Erstickungsgefahr Verbrühungsgefahr
	Das hohe Schutzniveau sowohl für das Betriebspersonal als auch für Dritte (Bystander) ist in allen Fällen gesetzlich einzuhalten und wenn möglich besonders für zukunftsfähige Technologien deutlich zu überbieten. Deshalb ist es trotzdem eine Frage der Effizienz, mit welchem Aufwand sich dieses Schutzniveau erreichen lässt. Besonders effektiv ist es dabei, von vorneherein keine Stoffe einzusetzen, die zu stofflichen Gefahren führen können. Dieses wirkt sich auch auf die Akzeptanz der Technik und deren einfache Einsatzfähigkeit in einem möglichst breiten Bereich aus.
Punkteverteilung	Gefahrenpotential: kein – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,25 P hoch – 0 P

Anforderung	Minimierung des Risikopotentials für den Mensch durch die angewendeten oder bei der Anwendung direkt und indirekt freigesetzten Stoffe (TEIL II)	Nr. SI02
Erläuterung	Benchmark: Vermeidung des Einsatzes von Stoffen mit Gefahrenpotential: Kein: kein relevantes Gefahrenpotential, da keine oder lediglich harmlose Stoffe. Gering: Gefahrenpotential der Stoffe gering oder einfach mit Standardvorkehrungen begrenzbare. Mittel: Gefahrenpotential der Stoffe erheblich aber auch mit erheblichem technischem Aufwand begrenzbare, aber wegen unerwünschter Eigenschaft (Vorsorgeprinzip) auf 0,25 gesetzt. Hoch: Stoffe mit hohem Gefahrenpotential, das nur schwer begrenzbare ist.	
Begriffsdefinitionen	Teratogen: Schädigt ungeborenes Leben durch Missbildungen. Mutagen: Führt in spezifischen Tests zur Mutation von Zellen/Bakterien als Hinweis auf krebserregende Eigenschaften	
Anforderung	Geringer Aufwand der Schutzmaßnahmen für das Betriebspersonal sowie für Dritte zum Schutz von Risiken durch besondere nichtstoffliche Gefahren (TEIL I)	Nr. SI03
Bewertungskriterium	Aufwand der Schutzmaßnahmen des Betriebspersonals sowie von Dritten von besonderen Risiken durch nichtstoffliche Gefahren.	
Spezifizierung	Geringer Aufwand für Schutzmaßnahmen. Nichtstoffliche Sondergefahren: elektromagnetische Felder und Stromschlag Verbrennung und Verbrühungen körperliche mechanische Verletzung (Quetschungen, Stöße, Schläge, Schnitte) Wärme- und Laserstrahlung (bzw. UV-C) *Bei den hier bewerteten Risiken geht es immer um Unfallrisiken, Gesundheitsrisiken wegen Lärm und Toxizität hier ausgenommen	

Anforderung	Geringer Aufwand der Schutzmaßnahmen für das Betriebspersonal sowie für Dritte zum Schutz von Risiken durch besondere nichtstoffliche Gefahren (TEIL II) Nr. SI03
	Das hohe Schutzniveau sowohl für das Betriebspersonal als auch für Dritte ist in allen Fällen gesetzlich einzuhalten und wenn möglich für zukunftsfähige Technologien deutlich zu überbieten. Deshalb ist es trotzdem eine Frage der Effizienz, mit welchem Aufwand sich dieses Schutzniveau erreichen lässt. Diese wirkt sich auch auf die Akzeptanz der Technik und deren einfache Einsatzfähigkeit in einem möglichst breiten Bereich aus.
Punkteverteilung	Aufwand zur Erreichung eines angemessenen Schutzniveaus: gering – 1 P mittel – 0,75 P hoch – 0,25 P sehr hoch / unklar – 0 P
Erläuterung	Benchmark: Verfahren, die keine relevanten Gefahren haben, die dementsprechend auch nicht besonders durch Schutzmaßnahmen minimiert werden müssen: Aufwand zur Erreichung eines angemessenen Schutzniveaus: gering: Gefahren einfach mit Standardvorkehrungen begrenzbare mittel: Gefahrenbegrenzung erfordert erheblichen technischen Aufwand, der aber im normalen technischen Bereich liegt hoch: Hohe Gefahrenlage, die aber durch entsprechendes technisches Design und Maßnahmen gut begrenzbare ist sehr hoch / unklar: hohe Gefahrenlage erfordert hohen Sicherungsaufwand, dessen Technik nicht in allen Bestandteilen klärbar ist und noch ungeklärte Restrisiken enthält Die nachfolgende Beschreibung des Aufwandes beschreibt generelle Aufwandsabschätzungen, die zur Minimierung von Verletzungsrisiken für offene Geräte im Bahnbereich durchgeführt werden müssen: elektromagnetische Felder kHz-Bereich (mittel) Stromschlag (hoch) Verbrennungen (gering) mechanische Verletzung (Quetschungen, Stöße, Schläge, Schnitte) (gering bis mittel) Wärmestrahlung (gering) UV-C, Laserstrahlung (mittel bis hoch, je nach Intensität und Richtung) Mikrowellen (hoch bis sehr hoch / unklar)
Begriffsdefinitionen	Besondere nichtstoffliche Gefahren: Gefahren, die über die allgemeinen Arbeitsrisiken (aufrechter Gang, Kleinverletzungen, Stoßen durch mangelnde Aufmerksamkeit) hinausgehen und spezifisch mit den einzelnen Verfahren und deren Einsatz im Eisenbahnbereich verknüpft sind.

Anforderung	Bevorzugter Einsatz von nicht umweltrelevanten oder leicht biologisch abbaubaren Betriebsstoffen zur Minimierung von unerwünschten Umweltwirkungen (TEIL I)	Nr. UM01
Bewertungskriterium	Risikopotentiale und Toxizität der bei der Anwendung außerhalb der Energiebereitstellung eingesetzten Betriebsstoffe oder direkt freigesetzten Substanzen für die Umwelt.	
Spezifizierung	Als Zulassung für die Nutzung eines Verfahrens müssen die aus den Gefahren der Stoffe resultierenden Risiken immer durch geeignete Maßnahmen auf ein vertretbares Maß reduziert werden. Im Kontext des Projektes wird aber das härtere Kriterium des Gefahrenpotentials der Stoffe genutzt, um gemäß dem Vorsorgeprinzip die Nutzung für die Umwelt gefährlicher Stoffe zu vermeiden. Das hohe Schutzniveau der Umwelt in Form von Emissionsgrenzwerten ist in allen Fällen gesetzlich einzuhalten und wenn möglich besonders für zukunftsfähige Technologien deutlich zu überbieten. Deshalb ist es trotzdem eine Frage der Effizienz, mit welchem Aufwand sich dieses Schutzniveau erreichen lässt. Besonders effektiv ist es dabei, von vorneherein keine Stoffe oder Verfahren einzusetzen, die zu stofflichen Gefahren führen können. Dies wirkt sich auch auf die Akzeptanz der Technik und deren einfache Einsatzfähigkeit in einem möglichst breiten Bereich aus. Besondere stofflichen Gefahrenpotentiale von Betriebsstoffen und bei der Behandlung direkt entstehender Nebenprodukte/Umwandlungsprodukte für die Umwelt akute Toxizität der Betriebsstoffe während der Behandlung chronische Toxizität / Anreicherung schwer abbaubarer oder nicht abbaubarer Stoffe (z. B. Schwermetalle, Stäube) Temperatur der Betriebsstoffe/Medien kann zur Neubildung von Stoffen führen erstickende Gase Gefahren für Umweltkompartimente (Klima und Ozonschicht, Boden, Wasser), die nicht durch Energiebereitstellung bedingt sind. Bei der Bewertung wird vom Regelbetrieb, nicht von Unfällen ausgegangen.	
Punkteverteilung	Gefahrenpotential: kein – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P	

Anforderung	Bevorzugter Einsatz von nicht umweltrelevanten oder leicht biologisch abbaubaren Betriebsstoffen zur Minimierung von unerwünschten Umweltwirkungen (TEIL II)	Nr. UM01
Erläuterung	Benchmark: Vermeidung des Einsatzes von Stoffen mit Gefahrenpotential für die Umwelt: kein: kein relevantes Gefahrenpotential, da keine oder nur für die Umwelt unbedenkliche Stoffe (z. B. Wasser) gering: Gefahrenpotential der Stoffe gering (da keine oder in den eingesetzten Mengen für die Umwelt unbedenkliche Stoffe (z. B. in analoger Dosis und bei analogem Wirkungsprofil auch im Biolandbau einsetzbar oder leicht biologisch abbaubar)) oder mit Standardvorkehrungen begrenztbar mittel: Gefahrenpotential der Stoffe erheblich, aber mit erheblichem technischem Aufwand begrenztbar hoch: Stoffe mit hohem Gefahrenpotential, das nur schwer oder nicht begrenztbar ist	

Anforderung	Minimierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächengewässer (TEIL I)	Nr. UM02
Bewertungskriterium	Risikopotentiale für die Umwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen in Grundwasser und Oberflächengewässer.	
Spezifizierung	Besondere Gefahren für Grundwasser und Oberflächengewässer durch die einzelnen Verfahren sind in folgenden Bereichen denkbar und müssen bewertet werden: Stoffeintrag mit Regenaustrag Stoffeintrag mit Betriebsstoffaustrag Mobilisierung von Schadstoffen Remobilisierung von Schadstoffen Eintrag von Pflanzenteilen (Invasive Pflanzen) Nährstoffe	
	Das hohe Schutzniveau der Gewässer in Form von Immissionsgrenzwerten ist in allen Fällen gesetzlich einzuhalten und wenn möglich besonders für zukunftsfähige Technologien deutlich zu überbieten. Deshalb ist es trotzdem eine Frage der Vorsorge und des Besorgnisgrundsatzes, mit welchem Verfahren und Aufwand sich dieses Schutzniveau sicher erreichen lässt. Besonders effektiv ist es dabei, von vorneherein möglichen Gefahren zu identifizieren und keine Stoffe oder Verfahren einzusetzen, die zu relevanten Gefahren für das Grundwasser führen können.	

Anforderung	Minimierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächen- gewässer (TEIL II)	Nr. UM02
	Besondere Gefahren für Grundwasser und Oberflächengewässer durch die einzelnen Verfahren sind in folgenden Bereichen denkbar und müssen bewertet werden: Stoffeintrag mit Regenaustrag: Eintrag von Betriebsstoffen oder Verfahrensreststoffen mit Umweltrelevanz durch Austrag mit Regen Stoffeintrag mit Betriebsstoffaustrag: Eintrag von Betriebsstoffen, Verfahrensreststoffen mit Umweltrelevanz durch Austrag mit Wasser aus der Behandlungsphase (gelöst oder an Erosionsprodukte gebunden) Mobilisierung von Schadstoffen aus Schwellen durch Betriebsstoffe, die dann mit Regen oder Betriebswasser eingetragen werden (PAK, Teerölbestandteile) Remobilisierung von Schadstoffen auf dem Boden, Schotter oder Schotterfüllmaterial durch Betriebsstoffe (chemisch und physikalisch), die dann mit Regen oder Betriebswasser eingetragen werden (PAK, Pflanzenschutzmittel, Schwermetalle, Abrieb (Metall, Kunststoff), Kohlenwasserstoffe)) Pflanzenteile: Eintrag von reproduktionsfähigen Samen und Pflanzenteilen in Oberflächengewässer (invasive Pflanzen) Eintrag von Nährstoffen in Grundwasser und Gewässer Grundsätzlich ist zu beachten, dass wachsende Pflanzen und auch wasserlösliche Huminstoffe und Biomasseabbauprodukte ein Potential zur Mobilisierung von Schadstoffen aus Schotter und Boden haben. Bei der Bewertung wird vom Regelbetrieb, nicht von Unfällen ausgegangen.	
Punkteverteilung	Gefahrenpotential: kein – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P	

Erläuterung	Benchmark: Vermeidung des Einsatzes von Verfahren mit direktem oder indirekt wirkendem relevanten Gefahrenpotential für die Umwelt: kein: kein relevantes Gefahrenpotential, da keine oder nur für die Umwelt unbedenkliche Stoffe (z. B. Wasser) eingesetzt werden und keine relevanten Mobilisierungswege erkennbar sind gering: Gefahrenpotential durch Betriebsstoffe, Mobilisierungseffekte gering, da keine oder in den eingesetzten Mengen für die Umwelt unbedenkliche Stoffe mit geringer Mobilisierungsleistung verwendet werden oder der Aus- trag mit Standardvorkehrungen begrenztbar ist mittel: Gefahrenpotential der Stoffe und des Mobilisierungspotentials erheblich, aber auch mit erheblichem technischem Aufwand begrenztbar hoch: Stoffe mit hohem Gefahrenpotential, das nur schwer oder nicht begrenztbar ist
-------------	--

Anforderung	Minimierung der Emissionen in den Boden (TEIL I)	Nr. UM03
Bewertungskriterium	Risikopotentiale für die Umwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen in den Boden unterhalb oder angrenzend an die Bahnstrecke.	
Spezifizierung	Besondere Gefahren für den Boden Stoffeintrag: Betriebsstoffe oder Verfahrensreststoffe Remobilisierung von Schadstoffen Eintrag von Nährstoffen Einfluss auf Mikroorganismen	
	Das hohe Schutzniveau des Bodens in Form von Immissionsgrenzwerten und der Minimierung von schädlichen Einträgen ist gesetzlich einzuhalten und wenn möglich besonders für zukunftsfähige Technologien deutlich zu überbieten. Da es sich im Bahnbereich jedoch um einen technisch überformten Boden handelt, bei dem aus technischen Gründen eine hohe Schadstoffbelastung und ein hoher Schadstoffeintrag akzeptiert wird, spielt hier weniger die Funktion als Lebensraum, sondern mehr die Funktion als Speicher für Schadstoffe und deren Rückhaltung und ggf. Abbau eine Rolle. Deshalb sollten von vorneherein mögliche Gefahren identifiziert werden und keine Stoffe oder Verfahren eingesetzt werden, die zu relevanten Gefahren für die Speicherfähigkeit und die Abbauleistung führen können. Gleichwohl ist es aber nötig, die Größe der Risiken durch Immissionen realistisch einzuschätzen, damit keine Fehlsteuerungen durch Vermeidung vermeintlicher Gefahren und Überkompensation entstehen. Besondere Gefahren für den Boden unter und neben Eisenbahnlinien durch die einzelnen Verfahren sind in folgenden Bereichen denkbar und müssen bewertet werden: Stoffeintrag: Eintrag von Betriebsstoffen oder Verfahrensreststoffen mit Umweltrelevanz in den Boden, die ihre Wirkung nicht durch leichte Abbaubarkeit oder hohe Adsorption verlieren. Tendenz zur Neubildung von Altlasten oder deren Toxifizierung Remobilisierung von Schadstoffen auf dem Schotter (+ Füllmaterial) und Holzschwellen durch Betriebsstoffe, die dann mit Regen oder Betriebswasser in tiefere Bodenschichten verlagert oder durch Erosion seitlich in andere Bodenbereiche ausgetragen werden. Besonders zu berücksichtigende Schadstoffe bei der Mobilisierung im Boden und Schotter sind PAK, Pflanzenschutzmittel, Schwermetalle, Abrieb, Kohlenwasserstoffe Eintrag von Nährstoffen in den Boden inkl. Humusbildung Einfluss auf Mikroorganismen: relevante Veränderung der Zusammensetzung der Mikroorganismen im Boden	

Anforderung	Minimierung der Emissionen in den Boden (TEIL II)	Nr. UM03
	Grundsätzlich bei der Bewertung ist zu beachten, dass wachsende Pflanzen und auch wasserlösliche Huminstoffe und Biomasseabbauprodukte ein Potential zur Mobilisierung von Schadstoffen aus Schotter und Boden haben. Zu berücksichtigen ist aber auch, dass Humus und organisches Material eine hohe Absorptionskraft haben und die erhöhte mikrobielle Aktivität in der Nähe von Pflanzen auch zu einem Schadstoffabbau führen kann. Weiterhin ist zu beachten, dass es sich hier um keinen natürlichen Boden handelt, sondern in vielen Fällen um ein technisch beeinflusstes Substrat, welches keine primäre Lebensraumfunktion für Organismen hat. Wichtig ist auch, dass der Hauptschadstoffeintrag in den Boden im Gleisbereich durch Betriebsmittel und Abfälle (Fäkalien, mittlerweile stark begrenzt) der Bahn, Abrieb von Schienen und Oberleitungen und insbesondere die Freisetzung von PAK und anderen Imprägnierungsbestandteilen aus Holzschwellen besteht.	
Punkteverteilung	Gefahrenpotential: kein – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P	
Erläuterung	Benchmark: Vermeidung des Einsatzes von Verfahren mit direktem oder indirekt wirkendem relevanten Gefahrenpotential für die Umwelt: Kein: kein relevantes Gefahrenpotential, da keine oder nur für die Umwelt unbedenkliche Stoffe (z. B. Wasser) eingesetzt werden und keine relevanten Mobilisierungswege erkennbar sind. Gering: Gefahrenpotential durch Betriebsstoffe, Mobilisierungseffekte gering, da keine oder in den eingesetzten Mengen für die Umwelt unbedenkliche Stoffe mit geringer Mobilisierungsleistung verwendet werden oder der Austrag mit Standardvorkehrungen begrenzt ist. Mittel: Gefahrenpotential der Stoffe und des Mobilisierungspotentials erheblich aber auch mit erheblichem technischem Aufwand begrenzt. Hoch: Stoffe mit hohem Gefahrenpotential, das nur schwer oder nicht begrenzt ist.	

Anforderung	Minimierung der Emissionen in die Luft (TEIL I)	Nr. UM04
Bewertungskriterium	Risikopotentiale für die Umwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen in die Luft.	
Spezifizierung	Besondere Gefahren für die Luft und Atmosphäre/Klima durch die einzelnen Verfahren sind in folgenden Bereichen denkbar und müssen bewertet werden: Verfahrensreststoffe (z. B. Abriebstäube) mit Umweltrelevanz in die Luft, die ihre Wirkung nicht durch leichte Abbaubarkeit verlieren verfahrensbedingte thermische oder mechanische Freisetzung von Schadstoffen in Staub- oder Gasform aus den behandelten Bereichen, insbesondere aus Holzschwellen und Schotter besonders zu berücksichtigende Schadstoffe bei der Mobilisierung im Boden und Schotter sind PAK, Pflanzenschutzmittel, Kohlenwasserstoffe *Keine Berücksichtigung des Fahrzeugantriebes *Keine Berücksichtigung des Energieanteils (da bereits in Ko 02 enthalten) Bei der Bewertung wird vom Regelbetrieb, nicht von Unfällen ausgegangen. Regelbetrieb bedeutet weiterhin, dass viele alternative Behandlungsmethoden vorzugsweise dort eingesetzt werden, wo sich Pflanzen befinden, und kein flächendeckender Einsatz erfolgt.	
	Das hohe Schutzniveau der Atmosphäre in Form von Emissionsgrenzwerten ist in allen Fällen gesetzlich einzuhalten und wenn möglich besonders für zukunftsfähige Technologien deutlich zu überbieten. Besonders effektiv ist es dabei, von vornherein möglichen Gefahren zu identifizieren und keine Stoffe oder Verfahren einzusetzen, die zu relevanten Gefahren für die Luft führen können. Gleichwohl ist es aber nötig, die Größe der Risiken realistisch einzuschätzen, damit keine Fehlsteuerungen durch Vermeidung vermeintlicher Gefahren und Überkompensation entstehen.	
Punkteverteilung	Gefahrenpotential für Luftverunreinigung: heftig – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P	
Erläuterung	Benchmark: Vermeidung des Einsatzes von Verfahren mit direktem oder indirekt wirkendem relevanten Gefahrenpotential für die Umwelt Kein: kein relevantes Gefahrenpotential, da keine oder nur für die Luft unbedenkliche Stoffe (z. B. Wasser) eingesetzt werden und keine relevanten Mobilisierungswege erkennbar sind.	

Anforderung	Minimierung der Emissionen in die Luft (TEIL II)	Nr. UM04
Erläuterung	Gering: Gefahrenpotential durch Betriebsstoffe, Nebenprodukte und Mobilisierungseffekte gering, da keine oder in den eingesetzten Mengen für die Umwelt unbedenkliche Stoffe mit geringer Mobilisierungsleistung verwendet werden oder der Austrag einfach mit Standardvorkehrungen begrenztbar ist. Mittel: Gefahrenpotential der Stoffe und des Mobilisierungspotentials erheblich und nur mit erheblichem technischem Aufwand begrenztbar. Hoch: Stoffe mit hohem Gefahrenpotential, das nur schwer oder nicht begrenztbar ist.	
Begriffsdefinitionen	Wasserdampfdestillation: Erleichterte Verflüchtigung von Stoffen, wenn sie gemeinsam mit Wasser erwärmt werden PAK: Teerbestandteile, toxisch bis krebserregend Phenole/Kresole: Teerölbestandteile mit bakterizider/fungizider Wirkung Pflanzenschutzmittel: Stoffe zur Vegetationskontrolle mit toxischer Wirkung Kohlenwasserstoffe: Hauptsächlich Schmierstoffe aus Bahnbetrieb	

Anforderung	Minimierung spezifischer Risikopotentiale für die Tierwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen oder Nebenwirkungen der Verfahren (stofflich, nicht stofflich) (TEIL I) Nr. UM05
Bewertungskriterium	Spezifische akute Risikopotentiale für die Tierwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen oder Nebenwirkungen der Verfahren (stofflich, nicht stofflich)
Spezifizierung	Potential für Gefahren und Überlebenschance für Tiere auf Oberfläche in Schotteroberfläche oberste 5–10 cm Durch Flucht Durch Verstecken Verfahrensseitig gehen die Eindringtiefe der Wirkung und die wahrscheinliche Gerätegeschwindigkeit ein.
	Hier geht es um stoffliche und nichtstoffliche Wirkungen, welche die Verfahren direkt oder kurz nach der Behandlung akut auf die Tiere im behandelten Bereich haben. Dies ist abzugrenzen von Wirkungen, die über die Umweltkompartimente Luft, Wasser oder Boden, z. B. durch Schadstoffaufnahme, vermittelt auftreten. Da es über die Tierarten im Gleisbett nur begrenzte Informationen gibt, werden spezifische Verhaltensweisen und Reaktionen der Tiere als abstrahierbare Modelle angenommen. Fluchtreaktion: fliehen über die Oberfläche aus dem Gleisbettbereich bleiben auf Oberfläche frei sitzen verstecken sich unter Pflanzen verstecken sich in obersten 0–5 cm des Gleisschotter verstecken sich tiefer als 5 cm im Gleisschotter fliegen weg Offen ist die Frage, unter welchen Bedingungen Tiere fliehen, wenn sie dauerhaft auf/an befahrenen Gleisen leben

Anforderung	Minimierung spezifischer Risikopotentiale für die Tierwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen oder Nebenwirkungen der Verfahren (stofflich, nicht stofflich) (TEIL II) Nr. UM05
	Aufenthaltort der Tiere oder auch Jungtiere/Eier bei Behandlungsüberfahrt (Gleisbett, Schotterflanke, Randweg) auf der freien Oberfläche unter Pflanzen oberste 5 cm Schotter tiefer im Schotter als 5 cm vergraben im Randweg, in Gängen oder Nestern Tierarten die modellhaft im Blick sind. Häufig benannte Tierarten, die modellhaft für die jeweiligen Tiergruppen ausgewählt wurden werden: Säugetiere (Haselmaus, Maus) Reptilien (Eidechsen, Schlingnatter) Amphibien (Frösche, Kröten) Eidechseneier Bewertungsgeschwindigkeiten der Tiere: langsam: 0,001–1 km/h mittel: 1–10 km/h schnell: > 10 km/h (Kurzdistanz) Kröten sterben bei Überfahrten von Autos mit einer Geschwindigkeit von über 30 km/h regelmäßig an den entstehenden Druckschwankungen [191]. Zur Bewertung werden Tiermodelle mit verschiedenen Verhaltensweisen belegt. Eidechse: Versteckt sich schnell bei Annäherung des Fahrzeuges in 5–10 cm Tiefe im Schotterbett oder flieht in den Randweg [54]. Schlingnatter: Lebt primär versteckt und bleibt bei Annäherung in Ruhestellung [41]. Haselmaus⁴: Flucht bei Annäherung [193]. Kröte: Bleibt nach erstem Sprung auf Schotteroberfläche sitzen, duckt sich oder sucht Schutz in Schotterzwischenräumen, da langsam [41].

⁴ Der Lebensraum der Haselmaus befindet sich im Waldbereich mit Totholz [45–47] sowie in Baumkronen und Sträuchern [48, 49]. Daher ist ein Antreffen im Schotterbett außerhalb des Winterschlafs als unwahrscheinlich angenommen. Während des Winterschlafs ist das Schotterbett ein mögliches Winterquartier [192], jedoch liegt der Winterschlaf außerhalb der Vegetationsperiode und somit der Vegetationskontrolle. Flucht aus dem Nest geschieht bei Annäherung von Menschen [193], daher wird die Annahme getroffen, dass auch eine Flucht bei herannahenden Fahrzeugen erfolgt.

Anforderung	Minimierung spezifischer Risikopotentiale für die Tierwelt durch direkt oder indirekt verursachte Emissionen oder Nebenwirkungen der Verfahren (stofflich, nicht stofflich) (TEIL III)	Nr. UM05
	Eidechse: Liegen in mindestens 10 cm Tiefe im grabfähigen Randweg [54] Flucht: Wenn der Effekt sich langsam nähert, haben Tiere noch eine weitere Fluchtchance ggf. nach unten. Für die verschiedenen Geräte werden übliche bis zukünftig zu erwartende Geschwindigkeiten angenommen. Zur Vereinfachung wird hier nur zwischen $V \geq 20 \text{ km/h}$ $20 > V \geq 10 \text{ km/h}$ $10 > V \geq 5 \text{ km/h}$ $5 > V \geq 2 \text{ km/h}$ $V < 2 \text{ km/h}$ unterschieden. In der Tabelle wird nur abgeschätzter „Best Case“ dargestellt, d. h. ein Großteil der Tiere überlebt	
Punkteverteilung	Schadensrisiko: gering (4,5–5 Punkte) – 1 P mittel (3,5–4,25 Punkte) – 0,5 P hoch (< 3,5 Punkte) – 0 P	
Erläuterung	Für jedes einzelne Szenario: überlebt immer unabhängig von Fahrgeschwindigkeit – 1 P überlebt meist oder bei fast allen Geschwindigkeiten – 0,75 P überlebt bis 50 % der Fahrgeschwindigkeit oder kann ausreichend fliehen – 0,5 P überlebt nur bei langsamer Geschwindigkeit oder selten – 0,25 P überlebt nie – 0 P Flächige Applikation wird angenommen, solange die sehr spezifisch lokale Applikation nicht systemimmanent ist (Laser). Immer Treffer, da es nur um Tödlichkeit bei aktivem Kontakt geht.	

Anforderung	Hohes Umstellungspotential auf regenerative Energieträger (Teil I)	Nr. UM06
Bewertungskriterium	Umstellungspotential auf regenerative Energieträger.	
Spezifizierung	Einfachheit des Einsatzes von regenerativen Energieträgern. Hier wird bewertet, ob ein Vegetationskontrollverfahren mit niedrigem oder hohem Aufwand auf einen regenerativen Energieträger umgestellt werden kann. Veränderungen am Gerät nötig Nutzung von Bahnstrom (kontinuierliche Umstellung entsprechend dem Mix des Bahnstroms) Änderungsnotwendigkeiten Anpassung an der autonomen Energiebereitstellungseinheit auf dem Fahrzeug nötig, Änderungsnotwendigkeiten erwartete Verfügbarkeit der regenerativen Energieträger in naher Zukunft (bis 2030)	
	Damit die Energieversorgung der Kontrollmethode in Zukunft nachhaltig gestaltet werden kann, ist es sinnvoll, deren Kompatibilität mit der Nutzung regenerativer Quellen zu prüfen.	
Punkteverteilung	Umstellungspotential auf regenerative Energien: Hoch: 1 P: keine Verfahrensänderung; nur andere Stromquelle; Umwandlungsschritte 0–1. Mittel: 0,75 P: geringe Verfahrensänderung; nur andere Energiequelle, erhebliche Veränderungen an der Energiebereitstellungsinfrastruktur (z. B. eigene große Heißwasserspeicher); Umwandlungsschritte 0–2. Gering: 0,25 P: hohe Verfahrensänderung besonders, wenn System nicht auf Strom ausgelegt (z. B. vorheriger Einsatz Gasbrenner, dann Elektrostrahler); zusätzliche Energieumwandlung auf Zug (z. B. Brennstoffzelle nötig); Umwandlungsschritte 2–4. Kein: 0 P: Verfahren muss grundlegend verändert werden, um regenerative Energiebereitstellung sinnvoll nutzen zu können, zusätzlich ist Aufwand für Herstellung sehr hoch. Positiv, wenn Option sinnvoll, den selbst erzeugten Strom im mobilen BHKW mit KWK zu erzeugen und Abwärme zu verwenden.	

Anforderung	Hohes Umstellungspotential auf regenerative Energieträger (Teil II)	Nr. UM06
Begriffsdefinitionen	Regenerative Energieträger: (Umwandlungsschritte Ux). Strom: Direkt aus Wind- oder Solarenergie ohne Umwandlung (U0) (Bahnstrom) oder mit Umwandlung vor Ort über Brennstoffzellen (+ U1), die es bald auch leistungsstark für Lokomotiven geben wird. Bahnstrom: Systeme können Strom direkt aus der Oberleitung entnehmen. Bioethanol: Aus Zucker/Stärke vergoren (Mais, Rübe, Zuckerrohr) (U2). Biodiesel: Rapsöl oder ähnliches verestert (U2) Methanol (P2L) Power to Liquid (U2 Strom in Wasserstoff in Methanol). Biogas: Biogasanlagen mit Mais oder Reststoffen (nur Reststoffe sinnvoll) Methan (P2G) Power to gas (U2). Wasserstoff (P2G): Elektrolyse aus regenerativem Strom (grüner Wasserstoff (U1)). Heißwasser: Thermisch aus Solaranlage (U0) oder mit Überschussstrom hergestellt (U1) und bis zur Umfüllung in Wagen gelagert. Bevorzugte Energieträger: In einigen Fällen können die Geräte mit unterschiedlichen regenerativen Energieträgern betrieben werden. In solchen Fällen wird der Energieträger favorisiert, der mit einfachen Mitteln, möglichst schon vorhandener Technik und wenig Umwandlungsverlusten eingesetzt werden kann. Jahreszeitlicher Vorteilsfaktor bei regenerativer Energie: Eine grundsätzliche Herausforderung bei regenerativen Energieträgern ist deren Speicherung. Aus diesem Grund sind regenerative Energieträger besonders attraktiv, die in hohem Maße im Zeitraum zwischen Mai und Oktober, also der Hauptbehandlungszeit anfallen, und deshalb nur kurzfristig, teilweise oder gar nicht gespeichert werden müssen. Regeneratives Energiepotential: Generell ist ein niedriger Energiebedarf immer umweltschonend. Es kann jedoch sein, dass es bei einigen Verfahren einfacher ist, diese auf der Basis regenerativer Energieträger (primär wind- oder sonnenbasiert oder daraus mit geringem Verlust ableitbare Energieträger) zu betreiben als bei anderen. Bei abschätzbaren Werten wird dieser Wert in der Tabelle als zusätzlicher Wert gelistet und inhaltlich beschrieben, im aktuellen Rahmen und in dieser Spalte aber noch nicht in die Bewertung miteinbezogen.	

6. Ergebnisse der Bewertung

Fu01 (Teil I)			
Anforderung	Wirksamkeit gegenüber Spross/Blätter an der Oberfläche	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Verteilung der Punkte	Aufwuchs stirbt ab – 1 P Aufwuchs größtenteils abgestorben – 0,75 P Aufwuchs im Wachstum zurück – 0,5 P Aufwuchs kaum verändert – 0,25 P Aufwuchs unverändert – 0 P		
Heißwasser	Schachtelhalme schwierig zu bekämpfen [24]; Aufwuchs im Wachstum zurück, Löwenzahn nur alle 3 Woche bekämpfbar [156]	0,75	0,5
Dampf	Unkräuter, insbesondere mehrjährige Arten, regenerierten sich und machten wiederholte Expositionen erforderlich [65]	0,5	0,5
Heißschaum	Taraxacum officinale (Löwenzahn), Festuca arundinacea (Gras), Plantago lanceolata in größtenteils abgestorben [75]	1	0,75
Infrarot	erfüllt: bei Pflanzen mit ungeschütztem Vegetationspunkt und dünnen Blättern; teilweise erfüllt: bei Pflanzen mit geschützten Vegetationspunkten und hitzetoleranteren Blättern (Wiederaustrieb nach nur einer Applikation wahrscheinlich); nicht erfüllt: bei mehrjährigen Pflanzen mit hoher Wurzelmasse (z. B. Gräser) [95] Latente Knospen oder kleine bodennahe Arten werden nicht erfasst, wenn sie gut geschützt sind [68]	0,5	0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	erfüllt: bei Pflanzen mit ungeschütztem Vegetationspunkt und dünnen Blättern; teilweise erfüllt: bei Pflanzen mit geschützten Vegetationspunkten und hitzetoleranteren Blättern (Wiederaustrieb nach nur einer Applikation wahrscheinlich); nicht erfüllt: bei mehrjährigen Pflanzen mit hoher Wurzelmasse (z. B. Gräser) [95]	0,5	0,5
Heißluft	erfüllt: bei Pflanzen mit ungeschütztem Vegetationspunkt und dünnen Blättern; teilweise erfüllt: bei Pflanzen mit geschützten Vegetationspunkten und hitzetoleranteren Blättern (Wiederaustrieb nach nur einer Applikation wahrscheinlich); nicht erfüllt: bei mehrjährigen Pflanzen mit hoher Wurzelmasse (z. B. Gräser) [95]	0,5	0,5
Frost	vergleichbar zum Abflammen [65]	0,5	0,5

Fu01 (Teil I)			
Mikrowellen	teilweise erfüllt, bisher wenige Pflanzenarten getestet, Gräser benötigen höhere Dosis als breitblättrige Pflanzen [169], bei entsprechend langer Einwirkzeit für bestimmte Pflanzen erfüllt [194]	0,5	0,25
Fu01 (Teil II)			
Anforderung	Wirksamkeit gegenüber Spross/Blätter an der Oberfläche	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Verteilung der Punkte	Aufwuchs stirbt ab – 1 P Aufwuchs größtenteils abgestorben – 0,75 P Aufwuchs im Wachstum zurück – 0,5 P Aufwuchs kaum verändert – 0,25 P Aufwuchs unverändert – 0 P		
Laser (überhitzen)	erfüllt, wenn das Meristem genau getroffen wird, ansonsten hat die punktuelle Wirkung des Lasers auf anderen Pflanzenteilen kein Effekt [179] Gräser sind zudem kaum zu kontrollieren, da das Meristem horstartig wächst und geschützt nah am Boden oder unter der Erde liegt	0,5	0,25
Laser (schneiden)	[98, 183] Gräser sterben durchs Abschneiden nicht ab	0,75	0,5
UV-C	erfüllt: bei sehr hoher Dosis > 1440 mW/cm ² (> 560 kWh/ha) [Versuch HGU] Der Großteil zeigte: Aufwuchs kaum verändert	0,25	0,25
Strom	weniger effizient bei dichter Vegetation, Pflanzen nicht immer im Kontakt mit den Elektroden. Höchste Effizienz bei ähnlicher Pflanzengröße [65]	1	0,75
Bürsten	Aufwuchs im Wachstum zurück [p. T.] auf harten Böden wird nur oberflächlich abgetrennt (Vergleich zum Schotter) [65]	0,5	0,5
Handjäten	Aufwuchs größtenteils Abgestorben [p. T.], wirksam gegenüber einer Vielzahl von Pflanzen [195](Versuche/Beobachtungen: Brombeere oder Ackerschachtelhalm lassen sich durch Handjäten nicht dauerhaft entfernen)	1	0,5

Fu01 (Teil II)			
MJ	eigene Versuche zeigen, dass ein mechanisches Ausreißen der Pflanzen in jedem Fall schlechter funktionieren wird als manuelles Jäten von Hand, da nicht auf die einzelnen spezifischen Eigenschaften der einzelnen Pflanzen eingegangen werden kann	0,75	0,25
Mähen	Pflanze knapp über der Oberfläche abgeschnitten [196], Aufwuchs im Wachstum zurück	0,5	0,5
Druckwasser	etwas besser als Mähen, da etwas tiefer abgeschnitten wird (direkt an der Oberfläche) (Siehe Video – Grasskiller [141])	0,75	0,5
Absaugen	nicht erfüllt, wenn überhaupt können kleine Keimlinge oder zarte Pflanzenteile durch den Sog abgerissen werden	0	0
Fu02 (Teil I)			
Anforderung	Wirksamkeit des Verfahrens durch Wuchshöhe der Pflanzen, Effekt auf den Spross	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	angegebener Wert ist Schätzwert für Maximalgröße die gut bekämpfbar sein dürften *Verholzte Pflanzen sind hier ausgeschlossen.		
Verteilung der Punkte	Verallgemeinert wirksam bis: > 12-Blattstadium – 1 P bis 12-Blattstadium – 0,75 P bis 8-Blattstadium – 0,5 P 0–4-Blattstadium – 0,25 P nicht wirksam – 0 P		
Heißwasser	bis 8-Blattstadium [154] erfüllt auf kleine Pflanzen [166]; 39 Tage alte Pflanzen empfindlicher als 81 Tage alte Pflanzen [156]	0,5	0,25
Dampf	Keimling: erfüllt bei <i>Amaranthus retroflexus</i> und <i>Chenopodium album</i> , fast kein Effekt bei <i>Bromus tectorum</i> . 4–6 Blätter: Erfüllt bei <i>Chenopodium album</i> , mittel Effekt bei <i>Amaranthus retroflexus</i> , keine Auswirkung auf <i>Bromus tectorum</i> . Anthesis: niedriger Effekt [96]	0,5	0,5

Fu02 (Teil I)			
Heißschaum	Best Case: Wirksamkeit bis 12-Blattstadium bei Gräsern [75] Worst Case Eigene Versuche zeigten ein ähnliches Ergebnis wie das Heißwasserverfahren. Daher ebenfalls erwartbar, dass Pflanzen bis zum 8-Blattstadium kontrolliert werden können.	0,75	0,5
Infrarot	bis 8-Blattstadium [148]	0,5	0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	bis 12-Blattstadium [95]	0,75	0,75
Heißluft	Wirksamkeit vergleichbar mit Heißwasser und Dampf [73]	0,5	0,5
Frosten	Bis 12-Blattstadium [eigener Versuch] Ergebnisse aus kleinem Versuch -> Größere Pflanzen nicht gänzlich kaputt (Wirkt nicht auf alle Pflanzen)	0,75	0,5
Mikrowellen	bis 12-Blattstadium [167], (Wuchshöhe bis 15 cm [168])	0,5	0
Laser (überhitzen)	0–4-Blattstadium das Meristem muss für den Laser sichtbar sein und nicht durch Blätter verdeckt sein. Daher hat der Laser bei Pflanze > 4-Blattstadium keinen Effekt mehr. [182]	0,25	0,25
Laser (schneiden)	Technische Abschätzung: 8-Blatt	0,5	0,5
UV-C	0–4-Blattstadium [Versuch HGU]	0,25	0,25
Fu02 (Teil II)			
Anforderung	Wirksamkeit des Verfahrens durch Wuchshöhe der Pflanzen, Effekt auf den Spross	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	angegebener Wert ist Schätzwert für Maximalgröße die gut bekämpfbar sein dürften *Verholzte Pflanzen sind hier ausgeschlossen		
Verteilung der Punkte	Verallgemeinert wirksam bis: > 12-Blattstadium – 1 P bis 12-Blattstadium – 0,75 P bis 8-Blattstadium – 0,5 P 0–4-Blattstadium – 0,25 P nicht wirksam – 0 P		

Fu02 (Teil II)			
Strom	bis 12-Blattstadium; ineffizient bei kleinen Pflanzen [65], <i>Cerastium holcsteoides</i> bis 5 cm hoch mit 135 mJ zerstört [197] <i>Rumex Japonicus</i> 50 cm hoch mit 2 J zerstört [197]	1	0,75
Bürsten	bis 12-Blattstadium – Trivial [137]	0,75	0,75
Handjäten	> 12-Blattstadium (trivial, da beliebig große Pflanzen entfernt werden können)	1	1
MJ	> 12-Blattstadium (Wirksamkeit tritt erst bei größeren Pflanzen auf, da kleine Pflanzen nicht gut erreicht werden können)	1	1
Mähen	> 12-Blattstadium (trivial, da beliebig große Pflanzen entfernt werden können)	1	1
Druckwasser	> 12-Blattstadium [141]	1	1
Absaugen	kein Effekt, da Pflanzen festgewachsen sind	0	0
Fu03 (Teil I)			
Anforderung	effektives Abtöten der oberirdischen Pflanzenteile durch wiederholte Behandlung, um Rhizome und Wurzeln zu Schwächen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Verteilung der Punkte	erfüllt: Spross und oberer Wurzelbereich werden min 5 cm in den Boden hinein zerstört – 1 P mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört – 0,5 P nicht erfüllt: Spross wird so zerstört, dass sofort wieder Blätter austreiben und Licht bekommen können – 0 P		
Heißwasser	erfüllt: Spross wird min. 5–10 cm in den Boden hinein zerstört [152]	1	0,5
Dampf	erfüllt: Spross wird min. 5–10 cm in den Boden hinein zerstört [149]	1	1
Fu03 (Teil II)			
Anforderung	effektives Abtöten der oberirdischen Pflanzenteile durch wiederholte Behandlung, um Rhizome und Wurzeln zu Schwächen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Heißschaum	erfüllt: Spross wird min. 5–10 cm in den Boden hinein zerstört (Aussage: ein- und mehrjährige Pflanzen können mit den Verfahren behandelt werden) [155, 157]	1	1

Infrarot	mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [68]	0,5	0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [95]	0,5	0,5
Heißluft	mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört (Abschätzung nach [151])	0,5	0,5
Frost	mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [Eigene Versuche]	0,5	0,5
Mikrowellen	mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [167]	0,5	0,5
Laser (überhitzen)	mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [179, 182]	0,5	0,5
Laser (schneiden)	mittel erfüllt: nach oberem Kriterium, kann der Spross oberirdisch zerstört werden	0,5	0,5
UV-C	nicht erfüllt: Spross wird nicht vollständig zerstört und neue Blätter treiben aus [Versuch HGU]	0	0
Strom	erfüllt: Spross wird min. 5–10 cm in den Boden hinein zerstört [198]	1	1
Bürsten	bestenfalls mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [65], ansonsten nicht erfüllt, Spross wird nicht soweit zerstört [p. T.],	0,5	0
Handjäten	erfüllt: Spross wird min. 5–10 cm in den Boden hinein zerstört [p. T.].	1	1
MJ	„Best Case“ erfüllt: Spross wird min. 5–10 cm in den Boden hinein zerstört [p. T.]; „Worst Case“: mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [p. T.]	1	0,5
Mähen	mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört [p. T.]	0,5	0,5
Druckwasser	„Best Case“: erfüllt: Spross und oberer Wurzelbereich werden min 5 cm in den Boden hinein zerstört „Worst Case“: mittel erfüllt: Spross wird oberirdisch zerstört (Grasskiller Caffini [141])	1	0,5
Absaugen	nicht erfüllt, Spross wird nicht so weit zerstört, dass sofort wieder Blätter austreiben und Licht bekommen können [p. T.]	0	0

Fu04 (Teil I)			
Anforderung	Wirksamkeit gegenüber verholzten Pflanzenteilen an der Oberfläche	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Verteilung der Punkte	Verholzte Pflanzenteile an der Oberfläche sterben ab – 1 P größtenteils abgestorben – 0,75 P im Wachstum zurück – 0,25 P (Nur Blätter sterben ab) kaum verändert – 0 P (Lediglich einzelne Blätter sterben ab)		
Heißwasser	erfüllt (bei hoher Aufwandmenge) [eigene Versuche]; Holzpflanzen wie Japanische Staudenknöterich benötigen einige Behandlungen, um es von seinen Wurzeln zu zerstören, zusammen mit wenig Handschneiden oder Ausgraben [199]; Schwierig zu behandeln [24].	0,25	0
Dampf	kaum verändert (Lediglich einzelne Blätter sterben ab)	0	0
Heißschaum	Wenig bis nicht erfüllt (Methode wird zum Schutz von verholzten Pflanzen verwendet) [155]	0,25	0
Infrarot	nicht erfüllt, Vorbehandlung (Schneiden) notwendig z. B. bei Brombeersträucher [68]	0	0
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt)	im Wachstum zurück, da nur kurzfristiger Kontakt mit Flamme die Blätter zerstört. [p. T.]	0,25	0
Heißluft	Im Wachstum zurück, da mit endlichem Energieaufwand nur die Blätter für kurze Zeit absterben. Somit wird die Pflanze im Wachstum kurzzeitig gehemmt. [151]	0,25	0
Frost	Absehbar, dass nur einzelne Arten durch Trockeneis beschädigen werden. Kein generell guter Effekt: Acer pseudoplatanus (2 cm – 4 Laubblätter), Birke (38 cm) im Wachstum zurück 0,25 P [eigener Versuch]	0,25	0
Mikrowellen	nicht erfüllt; wenn bereits Gräser eine hohe Dosis benötigen, sind verholzte Pflanzen nicht zu bekämpfen, [Auf Basis von [169] angenommen]	0	0
Laser (überhitzen)	nicht erfüllt, verholzende Pflanzen haben keinen oberflächlich liegenden Vegetationspunkt, sondern treiben aus den tiefreichenden Wurzeln wieder aus [eigene Annahme]; Überhitzen einzelner Blätter ist nicht technisch sinnvoll	0	0
Laser (schneiden)	im Wachstum zurück [65] Laserschneiden von verholzten Pflanzenteilen erscheint fraglich.	0,25	0

UV-C	nicht erfüllt [Versuch HGU], Versuch hatte keinen Effekt bei nicht verholzten Pflanzen -> Daher bei verholzten Pflanzen ebenfalls nicht zu erwarten	0	0
Fu04 (Teil II)			
Anforderung	Wirksamkeit gegenüber verholzten Pflanzenteilen an der Oberfläche	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Verteilung der Punkte	Verholzte Pflanzenteile an der Oberfläche sterben ab – 1 P größtenteils abgestorben – 0,75 P im Wachstum zurück – 0,25 P (Nur Blätter sterben ab) kaum verändert – 0 P (Lediglich einzelne Blätter sterben ab)		
Strom	kaum verändert – keine Stromleitung aufgrund hohen Widerstands	0	0
Bürsten	im Wachstum zurück – Blätter können entfernt werden	0,25	0,25
Handjäten	Pflanze kann größtenteils entfernt werden. Stumpf oder Reste verbleiben jedoch je nach Pflanze im Schotter	0,75	0,75
MJ	analog Handjäten	0,75	0,25
Mähen	größtenteils abgestorben, Stumpf und Wurzeln verbleiben im Gleis [196]	0,75	0,75
Druckwasser	erfüllt, wenn der Druck hoch genug ist	0,75	0,5
Absaugen	nicht erfüllt: Pflanzen können nicht abgesaugt werden, ohne den Schotter ebenfalls abzusaugen.	0	0

Fu05 (Teil I)			
Anforderung	Wirksamkeit gegenüber Wurzeln und Rhizomen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Verteilung der Punkte	erfüllt: Wirksam gegen Wurzeln und Rhizome – 1 P oft erfüllt: Wirksam gegen Wurzeln und flache Rhizome – 0,75 P mittel erfüllt: Wirksam mit großem Aufwand – 0,5 P begrenzte Wirksamkeit – 0,25 P nicht erfüllt: keine Wirksamkeit – 0 P		

Heißwasser	erfüllt (bei hoher Aufwandmenge) [eigene Versuche]; Heißwasser auf 98 °C mit bestimmtem Applikator kann auf Wurzeln wirken Behauptung muss im Gleisbereich getestet werden [199]; Schwierig zu behandeln [24]; nicht erfüllt [65]	0,5	0,5
Dampf	nicht erfüllt [10]; schwach [149]	0	0
Heißschaum	nicht erfüllt [10]; evtl. gegen Rhizomen, weniger gegen Wurzeln [199]; nicht erfüllt [Ableitung aus Temperaturversuche]; begrenzte Wirksamkeit: Wirkung ca. 2–3 cm in den Boden [71, S. 197])	0,25	0
Fu05 (Teil II)			
Anforderung	Wirksamkeit gegenüber Wurzeln und Rhizomen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Bewertung anhand einer Bodenoberfläche ohne Schotter		
Verteilung der Punkte	erfüllt: Wirksam gegen Wurzeln und Rhizome – 1 P oft erfüllt: Wirksam gegen Wurzeln und flache Rhizome – 0,75 P mittel erfüllt: Wirksam mit großem Aufwand – 0,5 P begrenzte Wirksamkeit auf (flache, junge) Wurzeln – 0,25 P nicht erfüllt: keine Wirksamkeit – 0 P		
Infrarot	nicht erfüllt, Wurzeln und im Boden befindliche Fortpflanzungsorgane können durch die Behandlung sogar stimuliert werden, da sie in eine Stresssituation gelangen, die dazu führt, dass sie rasch neu austreiben und nachwachsen, weshalb mehrere Behandlungen im Jahr erforderlich sind [68]	0	0
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	nicht erfüllt: keine Wirksamkeit [152]	0	0
Heißluft	nicht erfüllt: keine Wirksamkeit [152]	0	0
Frosten	nicht erfüllt: Versuch in Schotterkisten zeigte, dass keine Tiefenwirkung erzielt werden kann	0	0
Mikrowellen	begrenzte Wirksamkeit auf (flache, junge) Wurzeln: je feuchter, desto geringer die Eindringtiefe (Absorption) [169]; nicht erfüllt: Strahlung kann nicht in Boden eindringen [65]	0,25	0

Laser (überhitzen)	bei außermittiger Behandlung wird zwar der Wurzelbereich erwärmt, jedoch keine letale Dosis erreicht [182]; Laserstahlung kann nicht in die Erde eindringen	0	0
Laser (schneiden)	Laserstahlung kann nicht in die Erde eindringen	0	0
UV-C	nicht erfüllt [eigener Versuch]: Strahlung kann nicht in Erde eindringen und direkt auf Wurzeln und Rhizome wirken	0	0
Strom	oft erfüllt: Strom fließt durch die Wurzelsystem und wird in den Boden abgeleitet [65]; die Funkenentladung findet auch zwischen Wurzeln und Erde statt [197]	0,75	0,75
Bürsten	Begrenzt wirksam da Bürste in die obersten 1–2 cm eindringt und bestimmte Pflanzen mit Wurzeln ausreißen kann	0,25	0
Handjäten	Mittel erfüllt: Wurzeln können nur bis zu einer gewissen Tiefe ausgerissen werden. Stark abhängig von der Pflanzenart	0,5	0
MJ	mittel: Analog zum Handjäten	0,5	0
Mähen	nicht erfüllt: keine Wirksamkeit	0	0
Druckwasser	begrenzt: Reichweite bis auf 50 mm in der Tiefe [141]	0,25	0
Absaugen	nicht erfüllt: keine Wirksamkeit gegen Wurzeln oder Rhizome	0	0
FU06			
Anforderung	Wirksamkeit gegenüber Samen	Best Case	Worst Case
Verteilung der Punkte	erfüllt: Samen werden abgetötet – 1 P teilweise erfüllt: auf dem Boden aufliegende Samen werden zumindest teilweise abgetötet – 0,5 P nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet – 0 P		
Heißwasser	teilweise erfüllt, auf dem Boden aufliegende Samen werden zumindest teilweise abgetötet [200]	0,5	0
Dampf	erfüllt für überhitzten Dampf, Samenschale und andere Beläge wurden gefunden [65]; an der Oberfläche behandelte Samen keimen meist nicht mehr auf [74] nicht erfüllt, Dampf stimuliert Keimung [143]	0,5	0
Heißschaum	teilweise erfüllt, auf dem Boden aufliegende Samen werden zumindest teilweise abgetötet [68, 74]	0,5	0
Infrarot	nicht erfüllt [68]	0	0
Abflammen	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet / Hitze stimuliert Samen zur Keimung [157]	0	0

Heißluft	Oben aufliegende Samen werden keimunfähig gemacht [151]	0,5	0
Frosten	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet / regt ggf. zur Keimung an (Stratifikation [158])	0	0
Mikrowellen	teilweise erfüllt: im Labor nachgewiesen [65] hoher Energiebedarf, aber möglich [194]	0,5	0
Laser (überhitzen)	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet, einzelne Samen können nicht behandelt werden	0	0
Laser (schneiden)	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet, einzelne Samen können nicht behandelt werden	0	0
UV-C	nicht erfüllt, [Versuch HGU] UV-C wird zur Sterilisation von Saatgut verwendet [201]	0	0
Strom	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet, da keine elektrische Leitfähigkeit [p. T.]	0	0
Bürsten	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet [p. T.]	0	0
Handjäten	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet, keine Wirkungen auf Samen und Sämlinge (können nicht vom Personal entfernt werden, da unterirdisch) [195]	0	0
MJ	nicht erfüllt: Samen werden nicht abgetötet [p. T.]	0	0
Mähen	nicht erfüllt, Samen werden nicht abgetötet [p. T.]	0	0
Druckwasser	nicht erfüllt, Samen werden nicht abgetötet [p. T.]	0	0
Absaugen	teilweise erfüllt, Samen an Pflanzen können abgesaugt werden	0,5	0,5
Fu07 (Teil I)			
Anforderung	Wirksamkeit des Verfahrens unabhängig von Wetterlagen, Jahreszeiten	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Beschränkung der Wirksamkeit durch: 1. Regen vorher 2. erheblicher Regen (während) 3. Regen (> 30 min danach) 4. Kälte 5. mangelnden Sonnenschein bei / direkt nach Applikation 6. starke Trockenheit 7. hohe Temperaturen bei der Behandlung 8. starker Wind *Tageszeiten wird nicht berücksichtigt da Vegetationskontrolle meistens nachts durchgeführt wird		

Verteilung der Punkte	alle Bedingungen egal = keine Abhängigkeit – 1 P 1–2 Bedingungen als Problem = begrenzte Wetterabhängigkeit – 0,75 P 3 Bedingungen als Problem = mittlere Wetterabhängigkeit – 0,5 P 4–5 Bedingungen als Problem = schwierige Bedingungen 0,25 P		
Heißwasser	1–2 Bedingungen als Problem = begrenzte Wetterabhängigkeit höhere Wirksamkeit bei sonnigem, warmem und trockenem Wetter. Bei Regenwetter wird eine langsamere Anwendungsgeschwindigkeit empfohlen [195] (Bed. 1,2,4)	0,5	0,5
Dampf	4 Bedingungen als Problem mittlere Wetterabhängigkeit (Bed.: 1,2,4,8) [65]	0,25	0,25
Heißschaum	1–2 Bedingungen als Problem = begrenzte Wetterabhängigkeit (Bed. 1,2,4,8)	0,25	0,25
Infrarot	3 Bedingungen als Problem mittlere Wetterabhängigkeit trockene Pflanzenoberfläche [65], aber Verbot bei extremer Trockenheit [68]	0,5	0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	4 Bedingungen: Bedingungen 1, 2, 3, 4 trockene Pflanzenoberfläche. [65], aber Verbot bei extremer Trockenheit [202]	0,25	0,25
Heißluft	mittel erfüllt, trockene Pflanzenoberfläche [65] 3 Bedingungen (1, 2, 3)	0,5	0,5
Frost	4 Bedingungen als Problem – schwierige Bedingungen 0,5 P (Bed.: 1,2,7,8)	0,25	0,25
Mikrowellen	1–2 Bedingungen: Einsetzbarkeit wirksam, wenn Pflanzen und Samen feucht und Boden trocken[65]; keine Wettereinschränkungen[203]; Bodenfeuchtigkeit entscheidet über die Eindringtiefe [169]	0,75	0,75
Laser (überhitzen)	3 Bedingungen als Problem = mittlere Wetterabhängigkeit (Bed.: 1,2,8)	0,5	0,5
Fu07 (Teil II)			
Anforderung	Wirksamkeit des Verfahrens unabhängig von Wetterlagen, Jahreszeiten	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Beschränkung der Wirksamkeit durch:		

	1. Regen vorher 2. erheblicher Regen (während) 3. Regen (> 30 min danach) 4. Kälte 5. mangelnden Sonnenschein bei / direkt nach Applikation 6. starke Trockenheit 7. hohe Temperaturen bei der Behandlung 8. starker Wind *Tageszeiten wird nicht berücksichtigt da Vegetationskontrolle meistens nachts durchgeführt wird		
Verteilung der Punkte	alle Bedingungen egal = keine Abhängigkeit – 1 P 1–2 Bedingungen als Problem = begrenzte Wetterabhängigkeit – 0,75 P 3 Bedingungen als Problem = mittlere Wetterabhängigkeit – 0,5 P 4–5 Bedingungen als Problem = schwierige Bedingungen 0,25 P		
Laser (schneiden)	nicht wetterabhängig, da Energie so hoch, dass vorhandenes Wasser keinen negativen Einfluss auf Effekt hat	1	1
UV-C	„Best Case“: Bed. 1,2; „Worst Case“-Bed. 1,2,4,8 (sofern das Verfahren tatsächlich thermisch ist)	0,75	0,25
Strom	1–2 Bedingungen als Problem = begrenzte Wetterabhängigkeit: höhere Wirksamkeit beim trockenen Boden [Crop.zone]	0,75	0,75
Bürsten	erfüllt: keine Abhängigkeit [p. T.]	1	1
Handjäten	„Best Case“: Kein Effekt, jedoch weniger effektiv, nicht wetter-, aber jahreszeitabhängig [195] „Worst Case“: 2,3	1	0,5
MJ	erfüllt: keine Abhängigkeit [p. T.]	1	1
Mähen	erfüllt: keine Abhängigkeit [p. T.]	1	1
Druckwasser	erfüllt: keine Abhängigkeit [p. T.]	1	1
Absaugen	1–2 Bedingungen (Regen vorher, Regen während)	0,75	0,75
Fu08			
Anforderung	hohe Arbeitsgeschwindigkeit	Best Case	Worst Case

Verteilung der Punkte	$V \geq 20 \text{ km/h} - 1 \text{ P}$ $20 > V \geq 10 \text{ km/h} - 0,75 \text{ P}$ $10 > V \geq 5 \text{ km/h} - 0,5 \text{ P}$ $5 > V \geq 2 \text{ km/h} - 0,25 \text{ P}$ $V < 2 \text{ km/h} - 0 \text{ P}$		
Heißwasser	erfüllt, bis rund 40 km/h [72]; 3–6 km/h [195]; 3–5 km/h [199]; 2 km/h [156]; 1–8,3 km/h [154]	1	0,25
Dampf	1–5 km/h [10]; 0,25 km/h [65]; 3 km/h [96]; 0,007 ha/h [149]	0,25	0
Heißschaum	100 m/h = 0,1 km/h [10]; 0,07 ha/h [149]; 0,7–1,35 km/h [155] * Annahme: Ausbringung ist analog zu Heißwasser möglich, jedoch bisher kein System mit ausreichender Geschwindigkeit bekannt	1	0
Infrarot	1,5–4,5 km/h [68]	0,25	0
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	2–6 km/h [148]; 2 km/h [202]; 2,6–7,9 km/h [65]	0,5	0,25
Heißluft	$V < 5 \text{ km/h}$	0,25	0,25
Frostsen	Ausbringung von Kalk in der Landwirtschaft mit 15–18 km/h möglich [204]	0,75	0,75
Mikrowellen	ca. 0,72 km/h [203]	0	0
Laser (überhitzen)	Autonomer Feldroboter bis 8 km/h [180]	0,5	0
Laser (schneiden)	Annahme: potenziell besser, als Laser überhitzen durch geringere Präzision, jedoch weiterhin unter 10 km/h	0,5	0,25
UV-C	$< 5 \text{ km/h}$ [175]; 3–7 km/h (0,8 ha/h) [178]	0,25	0
Strom	5–10 km/h [10] 3–12 km/h [crop.zone]	0,75	0,25
Bürsten	1–5 km/h [10]	0,25	0
Handjäten	nicht erfüllt, 30 m ² /Arbeitskraft*Stunde [10, 22], unter 1 km/h [24]	0	0
MJ	2–6 ha/h ca. 2,3–7 km/h [145]	0,5	0,25
Mähen	3–5 km/h [136]	0,5	0,25

Druckwasser	1,4–4 km/h [141]	0,25	0
Absaugen	3–5 km/h Absaugung bei gleichzeitigem Mähen [136]; Saugzug 4–10 km/h [205]	0,5	0,25
Ko01 (Teil I)			
Anforderung	geringe Anwendungsfrequenz	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	behandelte Pflanze stirbt ab / wächst für einen bestimmten Zeitraum nicht mehr auf. Es wird vereinfachend von einer Vegetationsperiode von 8 Monaten ausgegangen. Eine Mischpopulation von größeren und kleineren, ein- und mehrjährigen Pflanzen mit begrenzten Grasanteil und ohne stark verholzte Pflanze werden berücksichtigt Glyphosat: 1–2-mal jährlich [10]; 2–3-mal jährlich [150]		
Verteilung der Punkte	Vegetation wächst für bestimmten Zeitraum nicht mehr auf: für 8–10 Monate (1 Beh./Jahr) – 1 P für 4–7 Monate (1–2 Beh./Jahr) – 0,75 P für 2–3 Monate (3–4 Beh./Jahr) – 0,5 P für 1–2 Monate (5–8 Beh./Jahr) – 0,25 P für ≤ 1 Monat (mehr als 8 Beh./Jahr) – 0 P		
Heißwasser	hohe Dosis 3 Beh./Jahr; niedrige Dosis 5 Beh./Jahr [150]; 3–5-mal jährlich [10]; 4-mal jährlich [166]; Anwendungsfrequenz höher im ersten Jahr [199]; 3-mal jährlich [72]; alle 3 Wochen um kleine Pflanze zu behandeln [156]; 6-mal jährlich [154]	0,5	0,25
Dampf	hohe Dosis 4 Beh./Jahr; niedrige Dosis 6 Beh./Jahr [150] 2–5-mal jährlich [10]; 10-mal jährlich [149]	0,5	0,25
Heißschaum	bis zu 7–8-mal jährlich [10]; wieder Aufwachsen nach 3–30 Tage [75] 3-mal jährlich [149]	0,5	0
Infrarot	4–6-mal jährlich [68]	0,5	0,25
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	hohe Dosis 4 Beh./Jahr niedrige Dosis 6 Beh./Jahr [150]	0,5	0,25
Heißluft	hohe Dosis 4 Beh./Jahr niedrige Dosis 6 Beh./Jahr [150]	0,5	0,25

Frost	„Worst Case“: Ableitung aus Versuchen 5–8 Behandlungen/Jahr „Best Case“: 4 Anwendungen pro Jahr (Gräser wachsen nach ca. 2 Monaten wieder auf).	0,5	0,25
Mikrowellen	Methode wirkt nur oberflächlich. Keine Literatur zur Langzeitwirkung vorhanden. „Best Case“: kurzzeitige Wirkung schwächt Pflanze [167]. Daher monatliche Behandlung während Vegetationsperiode (ca. 8 Beh.)	0,25	0
Laser (überhitzen)	Agrarroboter: fahren kontinuierlich [180] (> 8 Behandlungen)	0	0
Laser (schneiden)	Pflanze muss sehr dicht an der Oberfläche abgetrennt werden [98, 183]. Daher oberflächlich wirkendes Verfahren (5–8 Beh.)	0,25	0,25

Ko01 (Teil II)			
Anforderung	geringe Anwendungsfrequenz	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	behandelte Pflanze stirbt ab / wächst für einen bestimmten Zeitraum nicht mehr auf. Es wird vereinfachend von einer Vegetationsperiode von 8 Monaten ausgegangen. Eine Mischpopulation von größeren und kleineren, ein- und mehrjährigen Pflanzen mit begrenzten Grasanteil und ohne stark verholzte Pflanze werden berücksichtigt Glyphosat: 1–2-mal jährlich [10]; 2–3-mal jährlich [172]		
Verteilung der Punkte	Vegetation wächst für einen bestimmten Zeitraum nicht mehr auf: für 8–10 Monate (1 Beh./Jahr) – 1 P für 4–7 Monate (1–2 Beh./Jahr) – 0,75 P für 2–3 Monate (3–4 Beh./Jahr) – 0,5 P für 1–2 Monate (5–8 Beh./Jahr) – 0,25 P für ≤ 1 Monat (mehr als 8 Beh./Jahr) – 0 P		
UV-C	7–8 Beh./Jahr: monatliche Anwendung während der Wachstumsperiode [Eigene Versuch]; 7–10 Beh./Jahr [178]	0,25	0
Strom	1–3-mal jährlich [10] 2–3-mal jährlich [crop.zone]	0,75	0,5
Bürsten	bis 4-mal jährlich [10]	0,5	0,5

Handjäten	2–3-mal [eigene Versuche] auch große Pflanzen noch beseitigen. Wirkung recht unterschiedlich, beim Schachtelhalm hält sie nicht lange an [22], 1–4-mal jährlich [24]	0,75	0,5
MJ	„Best Case“: häufiger als Handjäten (ca. 3–4 Beh.), da nicht sichergestellt werden kann, dass ein automatischer Apparat alle Pflanzen entfernen kann „Worst Case“: Analogie zu Mähen. Die Pflanzen werden nur oberflächlich entfernt (5–8 Beh.)	0,5	0,25
Mähen	die Pflanzen werden nur oberflächlich entfernt (5–8 Beh.)	0,25	0,25
Druckwasser	für Weinberge 2–3-mal, dort wird aber auch nur von Mai bis Juli freigehalten = ca. 5–8 [141]	0,25	0,25
Absaugen	keine sinnvolle Einzelmethode und ist nur als Kombination gedacht	0	0

Ko02 (Teil I)			
Anforderung	geringer Energiebedarf für das Verfahren bei benötigter Anwendungsfrequenz pro Jahr	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Berücksichtigung der für das Verfahren benötigten Energie ohne die Berücksichtigung von Transport und Herstellung. Verbrauch pro Jahr gerechnet		
Verteilung der Punkte	$< 360 \text{ MJ/ha} - 1 \text{ P}$ $358 < x \leq 4\,221 \text{ MJ/ha} - 0,75 \text{ P}$ $4\,221 \text{ MJ/ha} < x \leq 17\,950 \text{ MJ/ha} - 0,25 \text{ P}$ $17\,950 \text{ MJ/ha} < x - 0 \text{ P}$ Skala wurde anhand der sich aus den verfügbaren Daten ergebenden Perzentilen gebildet		
Heißwasser	1. $184 \text{ kWh/km (bei 4 \% VD) [72]} = 662,4 \text{ MJ/km} \times 3 = \text{ca. } 2\,000 \text{ MJ/km jährlich (mit 4,6 m Breite)} = 4\,348 \text{ MJ/ha}$ 2. $3\,278 \text{ KJ/m}^2 [156] = 32\,780 \text{ MJ/ha (4 Anw. auf Pflaster)}$ 3. $12\,900 \text{ MJ/ha (Schotterfläche mit 30–40 \% VD) [154]} \times 6 \text{ Anwendungen} = 77\,400 \text{ MJ/ha}$ „Best Case“: $4\,348 \text{ MJ/ha}$ „Worst Case“: $77\,400 \text{ MJ/ha}$	0,75	0

Dampf	1. 7 100 MJ/ha [96] x 3 Anwendungen = 21 295 MJ/ha 2. 21 608 MJ/ha jährlich [65] (Landwirtschaft) „Best Case“: 21 295 MJ/ha „Worst Case“: 21 608 MJ/ha	0	0
Heißschaum	8 215 MJ/ha – Gräser [64], Heißschaum < Heißwasser oder Dampf [10], min. 22 884 MJ/ha [75] x 7 = 160 187 MJ/ha jährlich „Best Case“: 8 215 MJ/ha „Worst Case“: 160 187 MJ/ha	0,25	0
Infrarot	2 000–4 000 MJ/ha [64] x 8 = 8 000–24 000 MJ/ha, 26 700,65 MJ/ha (pro Jahr) [68]; „Best Case“: 8 000 MJ/ha „Worst Case“: 26 701 MJ/ha	0,25	0
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	1 008–9 173 MJ/ha [64], 1 008 [95] x 6 = 6 048 MJ/ha, 3 528 MJ/ha [95] x 4 = 14 112 MJ/ha, 36 236,6 MJ/ha jährlich [berechnet [154]] „Best Case“: 6 048 MJ/ha „Worst Case“: 36 236,6 MJ/ha MJ/ha	0,25	0
Heißluft	16 884 MJ/ha – Gräser [64]	0,25	0
Frosten	6 000 MJ/ha (N ₂) – 12 000 MJ/ha (CO ₂) Gräser [64] „Best Case“: 6 000 MJ/ha „Worst Case“: 12 000 MJ/ha	0,25	0,25
Mikrowellen	9 000–75 000 MJ/ha (Gräser) [64], 10 000–34 000 MJ/ha [65] 6 000–37 000 MJ/ha [170], min. 18 300 MJ/ha nötig [171] „Best Case“: 6 000 MJ/ha (Quelle mit gemischter Vegetation) „Worst Case“: 75 000 MJ/ha	0,25	0

Ko02 (Teil II)

Anforderung	geringer Energiebedarf für das Verfahren bei benötigter Anwendungsfrequenz pro Jahr	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Berücksichtigung der für das Verfahren benötigten Energie ohne die Berücksichtigung von Transport und Herstellung		

Verteilung der Punkte	< 360 MJ/ha – 1 P 358 < x ≤ 4 221 MJ/ha – 0,75 P 4 221 MJ/ha < x ≤ 17 950 MJ/ha – 0,25 P 17 950 MJ/ha < x – 0 P (Verbrauch pro Jahr gerechnet) Skala wurde anhand der sich aus den verfügbaren Daten ergebenden Perzentilen gebildet		
Laser (überhitzen)	15–249 MJ/ha [64] x 8 = 120 MJ/ha, 564 MJ/ha [181] x 8 = 4 512 MJ/ha „Best Case“: 120 MJ/ha „Worst Case“: 4 512 MJ/ha	1	0,25
Laser (schneiden)	5–125 J per Pflanze, 18–314 MJ/ha [64] x 5 = 90 MJ/ha 2 955 MJ/ha (100 % VD bei Zuckerrüben – Laser schneidet kontinuierlich) [98] x 8 = 23 640 MJ/ha „Best Case“: 90 MJ/ha (Vegetation ist in jedem Fall gemischt) „Worst Case“: 23 640 MJ/ha	1	0
UV-C	5 400 MJ/ha [eigener Versuch]; 100 kWh/ha [178] = 360 MJ/ha x 7 = 2 520 MJ/ha jährlich [Berechnet bei lockerer Vegetation], 300 kWh/ha [178] = 1 080 MJ/ha x 7 = 7 560 MJ/ha jährlich [Berechnet bei starker Vegetation], 11 100 MJ/ha (gemischte Vegetation, Reduktion des "Frischgewichtes?" um 95 %) [65] „Best Case“: 2 520 MJ/ha „Worst Case“: 11 100 MJ/ha	0,75	0,25
Strom	418–16 500 MJ/ha für 5–200 Kräuter/m; [65]; (Thermisches Verfahren), 30 kWh/ha = 108 MJ/ha x 3 = 324 MJ/ha jährlich [crop.zone], 100 kWh/ha = 360 MJ/ha x 3 = 1 080 MJ/ha jährlich [crop.zone] „Best Case“: 324 MJ/ha „Worst Case“: 16 500 MJ/ha	1	0,25
Bürsten	210,09 MJ/ha [137] „Best Case“: 210 MJ/ha einmalig „Worst Case“: 840 MJ/ha (viermalig)	1	0,75
Handjäten	zu vernachlässigen	1	1
MJ	12 MJ/ha [64] x 5 = 60 MJ/ha, 26 MJ/ha [64] x 8 = 96 MJ/ha	1	1
Druckwasser	15 MJ/ha [64] x 2–3 = 30–45 MJ/ha jährl.	1	1

Absaugen	keine genaue Angabe für Energiebedarf, Fahrzeug 600 PS unter dieser Annahme mit [205] und eigenen Annahmen 1059 MJ/ha (einmalig)	0,75	0,75
Ko03 (Teil I)			
Anforderung	geringer Verbrauch von Betriebsmitteln (Wasser etc.)	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Gewichtsbedarf in kg/ha bzw. L/ha für einmalige Anwendung zur Abschätzung der nötigen Kapazität auf dem Fahrzeug.		
Verteilung der Punkte	Vergleich Verbrauch auf Gewichtsbasis kg/ha bei vollständiger Behandlung der Fläche für einmalige Anwendung < 100 kg/ha – 1 P 100–2 000 kg/ha – 0,75 P 2 000–4 500 kg/ha – 0,5 P 4 500–9 000 kg/ha – 0,25 P > 9 000 kg/ha – 0 P		
Heißwasser	10 000–24 000 L/ha Wasser [64]; abhängig von Pflanzengröße – 600 L/Stunde [10]; 0,1–4,5 L/m ² [24], Wasser 1 300 L/km jährlich (4 % Vegetation, 4,6 m Breite) = 2 826 L/ha [72], Wasser 80 000 L/ha für 4 Anwendungen, somit 20 000 L/ha je Anwendung [156], Wasser 29 000 L/ha [154] „Best Case“: 2 826 L/ha „Worst Case“: 29 000 L/ha	0,5	0
Dampf	Wasser 3 200 L/ha [96], Wasser 8 000 L/ha [65]	0,5	0
Heißschaum	Schaummittel, 10 000 L/ha Wasser [64], Wassermenge 6,67 L/m ² 96 % Wasser, 4 % Schaummittel; Wasser: 66 700 L/ha, Schaummittel: 2 668 L/ha	0	0
Infrarot	Wasser: 900 l/km (Breite 2,27 m) = 2 043 L/ha [68]	0,5	0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	keine zusätzlichen Betriebsmittel berichtet [95, 154]; Annahme: Eine Mindestmenge an Löschwasser muss bereitgestellt werden. Analog zu Infrarot 2 043 L/ha	1	0,5
Heißluft	keine Betriebsmittel. Auch hier Löschwasser (ebenfalls 2043 L/ha) „Best Case“: Kein Löschwasser „Worst Case“: Viel Löschwasser – 2 043 L/ha	1	0,5

Frosten	Versuche Trockeneis: 10 kg/m ² (mit VD von 30 %): 30 000 kg/ha. (VD 5 %): 5 000 kg/ha flüssiger Stickstoff 14 600 L/ha [64] = 11 782 kg/ha	0	0
Mikrowellen	„Best Case“: kein Löschwasser „Worst Case“: max. 500 L/ha	1	0,75
Laser (überhitzen)	Löschwasser für Notfall: Annahme: max. 300 L/ha	1	0,75
Laser (schneiden)	Löschwasser für Notfall: Annahme: max. 300 L/ha	1	0,75
UV-C	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
Strom	Flüssigkeit 300 L/ha = 300 kg/ha	0,75	0,75
Bürsten	Kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
Ko03 (Teil II)			
Anforderung	Geringer Verbrauch von Betriebsmitteln (Wasser etc.)	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Gewichtsbedarf in kg/ha bzw. L/ha für einmalige Anwendung zur Abschätzung der nötigen Kapazität auf dem Fahrzeug. Emissionsaspekte sind in den späteren Kriterien berücksichtigt.		
Verteilung der Punkte	Vergleich Verbrauch auf Gewichtsbasis kg/ha bei vollständiger Behandlung der Fläche für einmalige Anwendung < 100 kg/ha – 1 P 100–2 000 kg/ha – 0,75 P 200–4 500 kg/ha – 0,5 P 4 500–9 000 kg/ha – 0,25 P > 9 000 kg/ha – 0 P		
Handjäten	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
MJ	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
Mähen	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
Druckwasser	Wasser 900–1 300 L/ha [206]	0,75	0,75
Absaugen	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
PL01 (Teil I)			
Anforderung	geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit	Best Case	Worst Case

Spezifizierung	Zeit der Zulassung des Verfahrens zu bekommen laut Art und Anzahl der Genehmigungen: 1 umweltrelevant: Umweltschaden von Arten und natürlichen Lebensräumen, Gewässer und Boden 2 technikrelevant: Genehmigung des einzusetzenden Bauteils und Kompatibilität mit Technik im Gleis 3 außergewöhnliche Transporte: übergroß, schwer oder mit Besonderheiten (z. B. Geschwindigkeitseinschränkungen) 4 Gefahrguttransport: Stoff gehört einer der 9 Gefahrgutklassen		
Verteilung der Punkte	Einordnung des Aufwandes der 4 Genehmigungskategorien: kein/niedrig: 1 P mittel: 0,5 P hoch: 0 P Bewertung des gesamten Grades der Genehmigungspflichtigkeit anhand der Summe der Punkte aus den 4 Kategorien Summe aller Punkte: 3,5–4: kein/geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit – 1 P 2–3: mittlerer Grad der Genehmigungspflichtigkeit – 0,5 P 0–1,5: hoher Grad der Genehmigungspflichtigkeit – 0 P		
Heißwasser	zu 1: umweltrelevant: Eidechse und Tiere im Gleis; 1 hoch, 2 mittel, 3 niedrig, 4 niedrig. Summe = 2,5	0,5	0,5
Dampf	außergewöhnlicher Transport: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten; zu 1: umweltrelevant: Eidechse und Tiere im Gleis; zu 2: Temperatur höher als bei Heißwasser; zu 3: Dampf sollte nah an der Schotteroberfläche austreten; 1 hoch, 2 hoch, 3 hoch, 4 niedrig. Summe = 1	0	0
Heißschaum	zu 1: umweltrelevant: Genehmigung in WSG/NSG (Schaummittel) + Eidechse und Tiere im Gleis; 1 hoch, 2 mittel, 3 niedrig, 4 niedrig. Summe = 2,5	0,5	0,5

Infrarot	zu 1: umweltrelevant: Verbot in Waldnähe wegen Brandgefahr [68]; zu 2: Sicherstellung der thermischen Beständigkeit der Komponenten ist nicht gewährleistet; zu 3: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten; 1 hoch, 2 hoch, 3 hoch, 4 mittel (bei Gasbetrieb) Summe = 0,5 (1 wenn elektrisch)		
Pl01 (Teil II)			
Anforderung	geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit	Best Case	Worst Case
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	in Analogie zur Infrarot: umweltrelevant: Verbot in Waldnähe wegen Brandgefahr [68]; zu 2: Sicherstellung der thermischen Beständigkeit der Komponenten ist nicht gewährleistet; zu 3: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten; 1 hoch, 2 hoch, 3 hoch, 4 mittel (bei Gasbetrieb) Summe = 0,5	0	0
Heißluft	umweltrelevant: Brandgefahr analog zu Infrarot; zu 2: Sicherstellung der thermischen Beständigkeit der Komponenten ist nicht gewährleistet; zu 3: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten; 1 hoch, 2 hoch, 3 hoch, 4 mittel (bei Gasbetrieb) Summe = 0,5 (1 wenn elektrisch)	0	0
Frosten	Trockeneis: zu 1: umweltrelevant: Einbringung von CO ₂ , Fauna: kaum Tiefenwirkung; 1 mittel, 2 niedrig, 3 niedrig, 4 niedrig Summe = 3,5	1	1
Mikrowellen	Außergewöhnlicher Transport: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten; zu 1: Hohe Auswirkung auf Fauna; zu 2: Metallteile und EMV; zu 3: Methode muss nah an der Oberfläche positioniert werden 1 hoch; 2 hoch; 3 hoch; 4 niedrig Summe = 1	0	0

Pl01 (Teil II)			
Laser (überhitzen)	zu 1: Brandgefahr geringer als z. B. bei Infrarot, da deutlich präziseres Verfahren; zu 2: Gewährleistung der Lasersicherheit; Schutz der externen Komponenten: Methode bedarf einer sehr genauen Pflanzenerkennung. Somit muss eine genauso gute Erkennung der Komponenten vorgesehen sein; zu 3: Lichtraumprofil wird nicht überschritten, jedoch muss eine Abschattung gewährleistet werden; 1 mittel, 2 hoch, 3 mittel, 4 niedrig. Summe = 2	0,5	0,5
Laser (schneiden)	zu 1: Brandgefahr vergleichbar mit Infrarot, da Pflanzen thermisch geschnitten werden; zu 2: Gewährleistung der Lasersicherheit; Schutz der externen Komponenten: Methode bedarf einer sehr genauen Erkennung der Komponenten; zu 3: Lichtraumprofil wird nicht überschritten, jedoch muss eine Abschattung gewährleistet werden; 1 hoch, 2 hoch, 3 mittel, 4 niedrig Summe = 1,5	0	0
Pl01 (Teil III)			
Anforderung	geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit	Best Case	Worst Case
UV-C	zu 1: Rein theoretisch spontane Mutation von Organismen denkbar; zu 2: Bei nötiger Dosis kein Wissen über Beständigkeit der Komponenten, da bisher kein Zulassungskriterium + Versuch mit Hüllrohr; zu 3: Außergewöhnlicher Transport: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten; zu 3: Methode muss sehr nah an der Schotteroberfläche eingesetzt werden + Abschattung muss sichergestellt werden; 1 mittel, 2 mittel, 3 hoch, 4 niedrig Summe = 2	0,5	0,5

Pl01 (Teil II)			
Strom	zu 1: Bei Berührung schädlich für Fauna + Brandgefahr bei Funkenflug; zu 2: EMV und Technikverträglichkeit; zu 3: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten + Nachweis, ob flexibler Applikator mechanische Schädigung bei Überfahrt; 1 mittel, 2 hoch, 3 mittel, 4 niedrig Summe = 2	0,5	0,5
Bürsten	zu 1: Abriebe zu berücksichtigen; zu 2: mechanische Schädigung bei Kontakt mit Komponenten; zu 3: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten + Nachweis, ob flexibler Applikator mechanische Schädigung bei Überfahrt; 1 niedrig, 2 mittel, 3 mittel, 4 niedrig Summe = 3	0,5	0,5
Handjäten	zu 3: Streckenabhängig kann der Genehmigungsaufwand sehr hoch ausfallen (Nebenbahnen -> Strecke muss nicht zwingend gesperrt werden, Hauptbahnen -> Strecke muss gesperrt werden); 1 niedrig, 2 niedrig, 3 hoch, 4 niedrig Summe = 3	0,5	0,5
MJ	zu 1: Abriebe zu berücksichtigen; zu 2: mechanische Schädigung bei Kontakt mit Komponenten; zu 3: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten + Nachweis, ob flexibler Applikator mechanische Schädigung bei Überfahrt; 1 niedrig, 2 mittel, 3 mittel, 4 niedrig Summe = 3	0,5	0,5
Mähen	zu 1: Abriebe zu berücksichtigen; zu 2: mechanische Schädigung bei Kontakt mit Komponenten, Schotterflug; zu 3: Wenn Anwendung der Technik sehr nah am Boden -> hoch, sonst niedrig, wenn Mindestabstand eingehalten wird; 1 niedrig, 2 mittel, 3 hoch, 4 niedrig Summe = 2,5	0,5	0,5
Pl01 (Teil IV)			
Anforderung	geringer Grad der Genehmigungspflichtigkeit	Best Case	Worst Case

Pl01 (Teil II)			
Druckwasser	zu 2: mechanische Schädigung bei Kontakt mit Komponenten, Wasserfestigkeit (jedoch gezielte Steuerung); zu 3: Caffini sehr nah an der Oberfläche, jedoch Düsen am Fahrzeug denkbar; 1 niedrig, 2 mittel, 3 mittel, 4 niedrig Summe = 3	0,5	0,5
Absaugen	zu 1: niedrig, da Lärm Fauna aufschreckt, außergewöhnlicher Transport: Anwendung der Technik sehr nah am Boden, Lichtraumprofil wird überschritten; 1 niedrig, 2 niedrig, 3 mittel, 4 niedrig Summe = 3,5	1	1
Pl02 (Teil I)			
Anforderung	hoher Reifegrad der Technologie für Großgeräte im Einsatzprofil Bahn zum Zeitpunkt der Technologieauswahl	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Erläuterung: Es soll bewertet werden, 1. ob eine Technologie aktuell im Bahnbereich erwartbar eingesetzt werden kann (hoch, gut) 2. ob die Technologie generell in ihrer Funktionalität für die Bahn gut bewertbar ist (hoch, gut, begrenzt) 3. ob ein Einsatz auf dem Trägersystem des Forschungsprojektes praxisnah im Projektzeitraum möglich und sinnvoll erscheint (hoch (wenn als Teil eines Kombinationssystems weiter zu erproben), gut , begrenzt) 4. ob es sinnvoll ist, grundlegende Versuche zur Prüfung einer Technologie in Hinblick auf ihre zukünftigen Potentiale im Rahmen des Projektes an Teilaspekten durchzuführen		

Verteilung der Punkte	hoch: Technologie im Bahnbereich oder im urbanen Bereich (mit hoher Übertragbarkeit) in Großgeräten eingesetzt = 1 P gut: Technologie in Landwirtschaft großtechnisch eingesetzt oder im Bahn-/Urban-Bereich in kleineren Geräten eingesetzt/erprobt = 0,75 P begrenzt: kleinere Geräte z. T. aus ganz anderen Einsatzbereichen vorhanden oder technischer Anpassungsbedarf bei Großgeräten aus anderen Bereichen zu erwarten = 0,5 P gering: prinzipielle physikalische Prinzipien und Laborversuche legen Machbarkeit nahe, aber keine Geräte mit annähernden Einsatzprofilen kurzfristig aus anderen Bereichen verfügbar, wichtige Kernmodule offen = 0,25 P zukunfts offen: nur machbar erscheinendes physikalisches Prinzip bekannt – 0 P
-----------------------	---

PI02 (Teil II)			
Anforderung	hoher Reifegrad der Technologie für Großgeräte im Einsatzprofil Bahn zum Zeitpunkt der Technologieauswahl	Best Case	Worst Case
Heißwasser	hoch: Bahnbereich [72] und urbaner Raum [152, 199]	1	1
Dampf	Landwirtschaft [64]	0,75	0,75
Heißschaum	Landwirtschaft [64]; nur aus LW und anderen Bereichen [149]	0,75	0,75
Infrarot	Bahnbereich [68]	1	1
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	Landwirtschaft [64], Schweiz auch im Bahnbereich von Hand [22]	0,75	0,75
Heißluft	Zacho Heißluftgerät (Urbaner Raum) [151]	0,75	0,75
Frostsen	begrenzte Datenlage [64] und eigene Versuche	0,25	0,25
Mikrowellen	begrenzte Datenlage [64], bisher nur kleine Prototypen [167, 170]	0,25	0,25
Laser (überhitzen)	selbstfahrendes Fahrzeug [180]	0,5	0,5
Laser (schneiden)	begrenzte Datenlage [64, 143, 183]	0,25	0,25
UV-C	begrenzte Datenlage [64], eigene Versuche, Landwirtschaft [178], [175]	0,75	0,5
Strom	Landwirtschaft und Prototyp im Bahnbereich [93, 198]	0,75	0,75

Bürsten	Versuche im Gleis [10], urbaner Raum [137]	0,75	0,75
Handjäten	Mensch kann als "Kleingerät" gesehen werden. Das Verfahren ist nicht weiter skalierbar	0,5	0,5
MJ	Landwirtschaft [145], im Bahnbereich begrenzte Datenlage: am Randweg im Bahnbereich, aber nur Kleingerät [10]	0,75	0,5
Mähen	Landwirtschaft und urbaner Bereich; Randweg am Gleis [196]	0,75	0,75
Druckwasser	Landwirtschaft [141]	0,75	0,75
Absaugen	Randweg am Gleis (in Kombination mit Mähen) [196] Saugzug [205]	1	1

Si01 (Teil I)			
Anforderung	keine Geräuscentwicklung/Schallemissionen über die erlaubten Emissionen von dort zugelassenen Eisenbahnfahrzeugen wesentlich hinausgehen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Mittelungspegel/Maximalpegel dB jeweils bei 25 m Abstand Nahverkehrszüge (65–150 km/h): 71–78 / 87–92 Güterzüge (80 km/h): 80–85 / 87–92 Schnell-Personenzüge (bis 250 km/h): 79–81 / 91–96 (Werte aus [91])		
Verteilung der Punkte	Einteilung nach [91] leise: deutlich unter Nahverkehrszug (< 70 dB) – 1 P mittel: im Bereich Nahverkehrszug (70–79 dB) – 0,5 P laut: im Bereich moderner Güterzüge (80–85 dB) – 0 P		
Heißwasser	potenzielle Lärmquellen: - Generator/Heizbrenner - Pumpen - Düsen (Austritt des Wassers) erfüllt, geringe Schallemissionen, da kein Hochdruck [p. T.]	1	1
Dampf	potenzielle Lärmquellen: - Generator/Heizbrenner - Pumpe/Kompressor - Dampfdüsen Dampfaustritt aus Düsen ist generell lauter als Wasseraustritt - mittel	0,5	0,5

Heißschaum	analog zu Heißwasser, EX, 8 h < 68 dB [68] – leise	1	1
Infrarot	potenzielle Lärmquellen: - Gasflammen aus Gasdüsen in Brennraum indirekte Gasbrenner sind durch Abschirmung schallgedämmt, nicht erkennbar [68] – leise	1	1
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	potenzielle Lärmquellen: - öleistungsstarke Gasflammen aus Brennerdüsen im Freien offenes Verfahren – mittel	0,5	0,5
Heißluft	potenzielle Lärmquellen: - Gebläse - Luftaustritt - (Brenner) „Best Case“: leise (durch Schalldämpfer und Dämmung mach- bar) „Worst Case“: mittel	1	0,5
Frost	potenzielle Lärmquelle: mechanische Streuvorrichtung sollte unter 70 dB liegen – leise	1	1
Si01 (Teil II)			
Anforderung	keine Geräuschentwicklung/Schallemissionen über die er- laubten Emissionen von dort zugelassenen Eisenbahnfahrzeu- gen wesentlich hinausgehen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Mittelungspegel/Maximalpegel dB jeweils bei 25 m Abstand Nahverkehrszüge (65–150 km/h): 71–78 / 87–92 Güterzüge (80 km/h): 80–85 / 87–92 Schnell-Personenzüge (bis 250 km/h): 79–81 / 91–96 (Werte aus [91])		
Verteilung der Punkte	Einteilung nach [91] leise: deutlich unter Nahverkehrszug (< 70 dB) – 1 P mittel: Im Bereich Nahverkehrszug (70–79 dB) – 0,5 P laut: im Bereich moderner Güterzüge (80–85 dB) – 0 P		
Mikrowellen	potenzielle Lärmquellen: - Generator Lautstärke gut gedämmt Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Applikationseinheit keine Eigengeräusche – leise	1	1

Laser (überhitzen)	potenzielle Lärmquellen: - Generator Lautstärke gut gedämmter Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Applikationseinheit keine Eigengeräusche – leise	1	1
Laser (schneiden)	potenzielle Lärmquellen: - Generator Lautstärke gut gedämmter Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Applikationseinheit keine Eigengeräusche – leise	1	1
UV-C	potenzielle Lärmquellen: - Generator Lautstärke gut gedämmter Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Applikationseinheit keine Eigengeräusche – leise	1	1
Strom	potenzielle Lärmquellen: - Generator - Applikatoren Lautstärke gut gedämmter Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Applikationseinheit wenig Eigengeräusche (Schleifen) – leise	1	1
Bürsten	potenzielle Lärmquellen: - Generator - Bürsten - Steinschlagschutz Lautstärke gut gedämmter Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Bürsten (mit Abschirmung) Eigengeräusche „Best Case“: leise „Worst Case“: mittel	1	0,5
Si01 (Teil III)			
Anforderung	keine Geräuschentwicklung/Schallemissionen über die erlaubten Emissionen von dort zugelassenen Eisenbahnfahrzeugen wesentlich hinausgehen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Mittelungspegel/Maximalpegel dB jeweils bei 25 m Abstand Nahverkehrszüge (65–150 km/h): 71–78 / 87–92 Güterzüge (80 km/h): 80–85 / 87–92 Schnell-Personenzüge (bis 250 km/h): 79–81 / 91–96 (Werte aus [91])		

Verteilung der Punkte	Einteilung nach [91]		
	leise: deutlich unter Nahverkehrszug (< 70 dB) – 1 P mittel: im Bereich Nahverkehrszug (70–79 dB) – 0,5 P laut: im Bereich moderner Güterzüge (80–85 dB) – 0 P		
Handjäten	potenzielle Lärmquellen: - Signalthorn (muss über der Lautstärke der Baumaschinen und Schienenfahrzeuge liegen muss) darüber hinaus ist das Personal dem Lärm der fahrenden Züge ausgesetzt – laut	0	0
MJ	potenzielle Lärmquellen: - Generator - Jätvorrichtung - Steinschlagschutz Lautstärke gut gedämmter Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Eigengeräusche „Best Case“: leise, „Worst Case“: mittel	1	0,5
Mähen	potenzielle Lärmquellen: - Mähbalken, Mechanischen Antrieb, Generator/Motor Lautstärke gut gedämmter Generatoren 65 dB (bei 7 m) gut machbar, Lautstärke eine Mähbalkens nicht bekannt. Elektrische Heckenschere bei 71 dB [207]. Mähbalken mit Elektro- oder Hydraulikmotor eher etwas lauter „Best Case“: mittel „Worst Case“: laut	0,5	0
Druckwasser	potenzielle Lärmquellen: - Generator - Pumpe - Wasserdüsen Düsenabhängig ggf. mit Lärmschutz in Düsennähe „Best Case“: leise, „Worst Case“: mittel	1	0,5
Absaugen	potenzielle Lärmquellen: - Generator - Saug- und Blaseinheit Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen müssen Gehörschutz tragen. Daraus folgt, dass Lärm in der Nähe des Fahrzeugs > 80 dB [136]	0	0

SiO ₂ (Teil I)			
Anforderung	Minimierung des Risikopotentials für den Mensch durch die angewendeten oder bei der Anwendung direkt und indirekt freigesetzten Stoffe	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Einatmen/Schleimhautkontakt/Hautkontakt: - reizende Stoffe (z. B. Kresole, Phenole aus Teeröl) - krebserregende, toxische, teratogene, mutagen Stoffe (PAK und Abbauprodukte aus Teeröl, Schmierstoffe) - toxische Stäube (Schwermetallaufnahme aus Metallabrieb, Bodenpartikeln, Mikroplastik) Erstickungsgefahr Verbrühungsgefahr		
Verteilung der Punkte	keines (da kein Stoff) – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,25 P hoch – 0 P		
Heißwasser	Dämpfe aus imprägnierten Holzschwellen (PAK), Verbrühungsgefahr – gering	0,75	0,75
Dampf	Dämpfe aus imprägnierten Holzschwellen (reizend, krebserregend), (Dampf hat höhere Temperatur, somit erwartbar höhere Ausgasungen), Verbrühungsgefahr – „Worst Case“: mittel; „Best Case“: gering	0,75	0,25
Heißschaum	Dämpfe aus imprägnierten Holzschwellen (reizend, krebserregend), Verbrühungsgefahr – gering	0,75	0,75
Infrarot	Dämpfe und Abgase (reizend, krebserregend), das Personal trägt zeitweilig einen Mund- und Augenschutz. [68] Wenn elektrisch, dann dennoch Verdampfungseffekte bei PAKs – „Worst Case“: mittel; „Best Case“: gering	0,75	0,25
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	Dämpfe und Abgase (reizend, krebserregend), das Personal trägt zeitweilig einen Mund- und Augenschutz. Verbrennungsgefahr (Heiße Gase), Schadstoffgehalt der Gase (CO, NO _x , Kohlenwasserstoffe) „Best Case“: mittel, „Worst Case“: hoch	0,25	0
Heißluft	Dämpfe und Abgase (reizend, krebserregend), das Personal trägt zeitweilig einen Mund- und Augenschutz. [68] Wenn elektrisch, dann dennoch Verdampfungseffekte bei Teerölbestandteilen – „Worst Case“: mittel; „Best Case“: gering	0,75	0,25

Frosten	Erstickungsgefahr durch CO ₂ – gering	0,75	0,75
Mikrowellen	da nur Wassermoleküle angeregt werden analog zu Dampf: Dämpfe aus imprägnierten Holzschwellen (reizend, krebserregend) – „Worst Case“: mittel; „Best Case“: gering	0,75	0,25
Laser (überhitzen)	da präziser Einsatz auf Pflanzen (sehr lokale Erwärmung) – keines	1	1
Si02 (Teil II)			
Anforderung	Minimierung des Risikopotentials für den Mensch durch die angewendeten oder bei der Anwendung direkt und indirekt freigesetzten Stoffe	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Einatmen/Schleimhautkontakt/Hautkontakt: - reizende Stoffe (z. B. Kresole, Phenole aus Teeröl) - krebserregende, toxische, teratogene, mutagen Stoffe (PAK und Abbauprodukte aus Teeröl, Schmierstoffe) - toxische Stäube (Schwermetallaufnahme aus Metallabrie- ben, Bodenpartikeln, Mikroplastik) Erstickungsgefahr Verbrühungsgefahr		
Verteilung der Punkte	keines (da kein Stoff) – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,25 P hoch – 0 P		
Laser (schneiden)	da präziser Einsatz auf Pflanzen (sehr lokale Erwärmung) – keines	1	1
UV-C	bei richtigem Leuchtmittel keine Ozon-Emissionen	1	1
Strom	Metallabrieb der Applikatoren Kontaktflüssigkeit – gering	0,75	0,75
Bürsten	Metall- oder Kunststoffabrieb der Bürsten; aufgewirbelte Stäube – gering	0,75	0,75
Handjäten	Mensch ist beim Handjäten nah an der Schotteroberfläche den dort möglicherweise vorhandenen Schadstoffen ausgesetzt (z. B. durch Hautkontakt mit Holzschwellen, Schotter, Feinmaterial, Pflanzen) – „Best Case“: gering, „Worst Case“: mittel	0,75	0,25
MJ	Metall- oder Kunststoffabrieb der Jätvorrichtung; aufgewirbelte Stäube – gering	0,75	0,75

Mähen	Metall- oder Kunststoffabrieb der Mähvorrichtung – gering	0,75	0,75
Druckwasser	Aerosolbildung von Stoffen auf Oberflächen – gering	0,75	0,75
Absaugen	keines	1	1

Si03 (Teil I)			
Anforderung	einfacher Schutz des Betriebspersonals sowie von Dritten vor nicht stofflichen Gefahren (Lärmschutz ausgenommen)	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	geringer Aufwand für Schutzmaßnahmen Sondergefahren: elektromagnetische Felder und Stromschlag, Verbrennung, körperliche Verletzung (Quetschungen, Stößen, Schlägen, Schnitten), Wärme- und Laserstrahlung (bzw. UV-C) *bei den hier bewerteten Risiken geht es um Unfallrisiken, Gesundheitsrisiken wegen Lärm und Toxizität hier ausgenommen		
Verteilung der Punkte	Aufwand, um ein angemessenes Schutzniveau zu erreichen: minimal/gering – 1 P mittel – 0,75 P hoch – 0,25 P sehr hoch/unklar – 0 P		
Heißwasser	Verbrennung an heißen Teilen (z. B. Rohre) – gering	1	1
Dampf	Verbrennung an heißen Teilen (z. B. Rohre) – gering	1	1
Heißschaum	Verbrennung an heißen Teilen (z. B. Rohre) – gering	1	1
Infrarot	Wärmestrahlung, Verbrennung an heißen Teilen – gering	1	1
Abflammen	Wärmestrahlung, Verbrennung an heißen Teilen – gering	1	1
Heißluft	Wärmestrahlung, Verbrennung an heißen Teilen – gering	1	1
Frosten	mechanische Förderung, Kälteisolation muss vorgesehen werden – gering	1	1
Mikrowellen	Mikrowellenstrahlung hoher Leistung (offenes System muss abgeschirmt werden) – unklar	0	0
Laser (überhitzen)	Verbrennungsgefahr, Gefahr für die Augen (Anforderungen an Abschirmung sehr hoch. Bei Feldrobotern Annäherungssicherung und Abschirmung) – hoch	0,25	0,25
Laser (schneiden)	Verbrennungsgefahr, Gefahr für die Augen (Anforderungen an Abschirmung sehr hoch. Bei Feldrobotern Annäherungssicherung und Abschirmung) – hoch	0,25	0,25

UV-C	Verbrennungsgefahr, Gefahr für die Augen (hohe benötigte Leistungen) – hoch	0,25	0,25
Strom	Stromschlag, EMV (Mensch, Schrittmacher) – mittel	0,75	0,75
Bürsten	Schotterflug (rotierende Teile – Abschirmung erforderlich) – mittel	0,75	0,75
Handjäten	viele Menschen im Gleis bei laufendem Betrieb (Sicherungs-personal erforderlich), Stolpergefahr, Verletzungsgefahr (z. B. Schnitte), langfristige körperliche Belastung (z. B. Rückenschmerzen) – hoch	0,25	0,25
Si03 (Teil II)			
Anforderung	einfacher Schutz des Betriebspersonals sowie von Dritten vor nicht stofflichen Gefahren (Lärmschutz ausgenommen)	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	geringer Aufwand für Schutzmaßnahmen Sondergefahren: elektromagnetische Felder und Stromschlag, Verbrennung, körperliche Verletzung (Quetschungen, Stößen, Schlägen, Schnitten), Wärme- und Laserstrahlung (bzw. UV-C) *bei den hier bewerteten Risiken geht es um Unfallrisiken, Gesundheitsrisiken wegen Lärm und Toxizität hier ausgenommen		
Verteilung der Punkte	Aufwand, um ein angemessenes Schutzniveau zu erreichen: minimal/gering – 1 P mittel – 0,75 P hoch – 0,25 P sehr hoch/unklar – 0 P		
MJ	Schotterflug (falls rotierende Teile vorhanden sind – Abschirmung erforderlich) – mittel	0,75	0,75
Mähen	Schotterflug (falls rotierende Teile vorhanden sind – Abschirmung erforderlich) – mittel	0,75	0,75
Druckwasser	Wasserstrahl kann austreten (hoher Druck – Abschirmung erforderlich) – mittel	0,75	0,75
Absaugen	Abluftfilterung – minimal/gering	1	1

Um01			
Anforderung	bevorzugter Einsatz von nicht umweltrelevanten oder leicht biologisch abbaubaren Betriebsstoffen zur Minimierung von unerwünschten Umweltwirkungen	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	reine Emission: akute Toxizität, chronische Toxizität / Anreicherung, erstickende Gase, Gefahren für Umweltkompartimente		
Verteilung der Punkte	kein Stoff vorhanden – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P		
Heißwasser	vorhandener Betriebsstoff (Wasser) ist unkritisch – gering	0,75	0,75
Dampf	vorhandener Betriebsstoff (Wasser) ist unkritisch – gering	0,75	0,75
Heißschaum	Wasser – gering, Schaummittel (leicht biologisch abbaubar) – gering	0,75	0,75
Infrarot	stellenweise Ausbringung von Löschwasser – gering	0,75	0,75
Abflammen	Betriebsstoff: Gas (wird als Energieträger angenommen) ist brennbar und kann Schadstoffe freisetzen – hoch stellenweise Ausbringung von Löschwasser ist unkritisch	0	0
Heißluft	vorhandene Betriebsstoffe (Luft und Löschwasser) sind unkritisch – gering	0,75	0,75
Frosten	bei Trockeneis: Betriebsstoff ist ein Treibhausgas und hat erstickende Wirkung – hoch	0	0
Mikrowellen	stellenweise Ausbringung von Löschwasser – gering	0,75	0,75
Laser (überhitzen)	stellenweise Ausbringung von Löschwasser – gering	0,75	0,75
Laser (schneiden)	stellenweise Ausbringung von Löschwasser – gering	0,75	0,75
UV-C	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
Strom	Betriebsstoff: Kontaktmittel (ist leicht biologisch abbaubar bzw. mineralisches Salz) – gering	0,75	0,75
Bürsten	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
Handjäten	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1
MJ	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1

Mähen	Balkenmäher werden geschmiert – daher geringer Schmierstoffeintrag möglich – gering	0,75	0,75
Druckwasser	vorhandener Betriebsstoff (Wasser) ist unkritisch – gering	0,75	0,75
Absaugen	kein Betriebsstoff vorhanden	1	1

Um02 (Teil I)			
Anforderung	Minimierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächengewässer	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	mögliche indirekte Freisetzung/Mobilisierung von Stoffen aus dem Gleisbett. Beschreibung der potenziellen Risiken, die ggf. näher geprüft werden müssen. Gefahrenpotential: Stoffeintrag mit Regenauswurf, Stoffeintrag mit Betriebsstoffauswurf, Mobilisierung von Schadstoffen, Remobilisierung von Schadstoffen, Pflanzenteile (invasive Pflanzen), Nährstoffen		
Verteilung der Punkte	Gefahrenpotential keine stofflichen Emissionen – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P		
Heißwasser	gering: Heißwasser kann an Oberfläche schadstoffhaltiges Material (Mobilisierung, Remobilisierung) anlösen, kühlt aber so schnell ab, dass eine tiefere Mobilisierung nicht zu erwarten ist.	0,75	0,75
Dampf	„Best Case“: gering / „Worst Case“: mittel – Heißdampf kann an Oberfläche schadstoffhaltiges Material (Mobilisierung, Remobilisierung) anlösen/extrahieren (Wasserdampfdestillation), kühlt aber wegen geringerer Wärmekapazität trotz hoher Temperatur so schnell ab, dass eine tiefere Mobilisierung/Remobilisierung wasserverfrachtbarer Schadstoffe nicht zu erwarten ist	0,75	0,75
Heißschaum	gering: Heißwasser kann an Oberfläche schadstoffhaltiges Material (Mobilisierung, Remobilisierung) anlösen, kühlt aber so schnell ab, dass eine tiefere Mobilisierung nicht zu erwarten ist (Annahme: Schaummittel ist leicht biologisch abbaubar)	0,75	0,75

Infrarot	heiße IR-Strahlung mit biologischen Effekten auf Pflanzen kann wasserfreies Material erheblich erwärmen und damit an Oberfläche schadstoffhaltiges Material (Mobilisierung, Remobilisierung) zur Verdampfung / zum Austritt aus Holz bzw. dem Schotter bringen. Es kühlt aber wegen Abschattung/Isolation trotz hoher Temperatur so schnell ab, dass eine tiefere Mobilisierung/Remobilisierung wasserverfrachtbarer Schadstoffe nicht zu erwarten ist. Löschwasser wird stellenweise ausgebracht und kann Brandrückstände verlagern. insgesamt: mittel	0,5	0,5
----------	--	-----	-----

Um02 (Teil II)			
Anforderung	Minimierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächengewässer	Best Case	Worst Case
Verteilung der Punkte	Gefahrenpotential keine stofflichen Emissionen – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P		
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	Abflammen mit biologischen Effekten auf Pflanzen kann wasserfreies Material erwärmen und damit an Oberfläche schadstoffhaltiges Material zur Verdampfung/ zum Austritt aus Holz bringen. Organische Stoffe werden dann aber bevorzugt mitverbrannt oder mit dem Abgas abgeführt, sodass eine tiefere Mobilisierung/Remobilisierung wasserverfrachtbarer Schadstoffe nicht zu erwarten ist. Löschwasser wird stellenweise ausgebracht und wäscht Brandrückstände direkt aus – mittel	0,5	0,5
Heißluft	Heißluft mit biologischen Effekten auf Pflanzen kann wasserfreies Material erheblich erwärmen und damit an Oberfläche schadstoffhaltiges Material (Mobilisierung, Remobilisierung) zur Verdampfung/ zum Austritt aus Holz bringen. Organische Stoffe werden dann aber bevorzugt mit dem Abgas abgeführt. Aufgrund der geringen Wärmekapazität ist das eine tiefere Mobilisierung Remobilisierung wasserverfrachtbarer Schadstoffe nicht zu erwarten ist – gering	0,75	0,75

Frosten	Die Medien flüssiger Stickstoff oder CO ₂ werden auch Wasser in Materialien nur maximal oberflächlich gefrieren, sodass keine relevante Freisetzung über den üblichen Frost/Tau-Zyklen hinaus zu erwarten ist. (keine stofflichen Emissionen ins Gewässer, da Gas)	1	1
Mikrowellen	oberflächliche Überhitzungen von Wasseranteilen gerade in Holz können zu Erwärmung und Austritt auch von Schadstoffen aus Holz oder sehr wasserhaltigen Gesteinsoberflächen führen. Der Effekt wird sehr von der Behandlungsintensität abhängen. Da diese normalerweise auf Pflanzenbereiche begrenzt ist ein tieferes und großflächiges Eindringen nicht zu erwarten – gering	0,75	0,75
Laser (überhitzen)	keine direkten Betriebsstoffe, jedoch lokal Löschwasser, somit stellenweise Auswaschen von Schadstoffen. Emission durch Überhitzung gering, da lokal sehr begrenzt – gering	0,75	0,75
Laser (schneiden)	keine direkten Betriebsstoffe, jedoch lokal Löschwasser, somit stellenweise Auswaschen von Schadstoffen. Emission durch Überhitzung (Schneiden) gering, da lokal sehr begrenzt – gering	0,75	0,75
Um02 (Teil III)			
Anforderung	Minimierung der Emissionen ins Grundwasser und Oberflächengewässer	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	mögliche indirekte Freisetzung/Mobilisierung von Stoffen aus dem Gleisbett. Beschreibung der potenziellen Risiken, die ggf. näher geprüft werden müssen. Gefahrenpotential: Stoffeintrag mit Regenauswurf, Stoffeintrag mit Betriebsstoffauswurf, Mobilisierung von Schadstoffen, Remobilisierung von Schadstoffen, Pflanzenteile (invasive Pflanzen), Nährstoffen		
Verteilung der Punkte	Gefahrenpotential keine stofflichen Emissionen – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P		
UV-C	photolytischer Abbau von organischem Material (Teerölbestandteile, Schmierstoffe) kann an Oberflächen entstehen und Schadstoffe werden mobilisiert (da besser wasserlöslich) [208, 209]	0,75	0,5

Strom	Schwermetallaktivierung ist nicht zu erwarten, da Hilfsstoffe (Kontaktflüssigkeit) nicht wassergefährdend, leicht biologisch abbaubar und nicht komplexierend sind. Geringer Stoffaus- trag, somit Auswaschungen zu vernachlässigen maximal 500 L/ha (crop.zone) Löschwasser optionale, jedoch Funkenflug durch Kontakt- flüssigkeit bereits minimiert	0,75	0,75
Bürsten	kein Einsatz von flüssigen Stoffen, jedoch geringe Ablösung und Verlagerung von Partikeln von Schwellen und Schotter, auch Bürstenabrieb (Metall, Mikroplastik)	1	0,75
Handjäten	erfüllt: kein Effekt auf Gewässer [195]	1	1
MJ	kein Einsatz von flüssigen Stoffen, jedoch geringe Ablösung und Verlagerung von Partikeln von Schwellen und Schotter, auch Abrieb am Applikator (z. B. Greifer, Rolle etc.) (Metall, Mikroplastik)	1	0,75
Mähen	bei bestimmten Mähern (z. B. Balkenmäher) geringer Einsatz von Schmierstoffen	1	0,75
Druckwasser	gering: bei gezieltem Einsatz lokale Ablösung/Verlagerung von Schadstoffen	0,75	0,75
Absaugen	keine stofflichen Emissionen	1	1
Um03 (Teil I)			
Anforderung	Minimierung der Emissionen in den Boden	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	besondere Gefahren für den Boden •Stoffeintrag: Betriebsstoffe oder Verfahrensreststoffe •Remobilisierung von Schadstoffen •Eintrag von Nährstoffen •Einfluss auf Mikroorganismen		

Verteilung der Punkte	Gefahrenpotential		
	kein – 1 P		
	gering – 0,75 P		
	mittel – 0,5 P		
	hoch – 0 P		
Heißwasser	gering: Heißwasser kann an Oberfläche schadstoffhaltiges Material (Mobilisierung, Remobilisierung) anlösen, kühlt aber so schnell ab, dass eine tiefere Mobilisierung nicht zu erwarten ist.	0,75	0,75
Dampf	„Best Case“: gering / „Worst Case“: mittel – Heißdampf kann an Oberfläche schadstoffhaltiges Material (Mobilisierung, Remobilisierung) anlösen/extrahieren (Wasserdampfdestillation), kühlt aber wegen geringerer Wärmekapazität trotz hoher Temperatur so schnell ab, dass eine tiefere Mobilisierung/Remobilisierung nicht zu erwarten ist.	0,75	0,5
Heißschaum	gering: Schaummittel sehr gut biologisch abbaubar, Schadstoffmobilisierung unwahrscheinlich bei den eingesetzten Mengen, keine Metallkomplexierung / analog zu Heißwasser Abbaubarkeit des Schaummittels	0,75	0,75
Infrarot	Verunreinigungen des Schotters, wie z. B. Schmieröle und Fette, können kurzzeitig verflüssigt freigesetzt werden und dringen so in den Oberbau ein. Die Erwärmung geht nicht tief in Schwellen oder Schotter hinein „Best Case“: gering „Worst Case“: mittel	0,75	0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	Erwärmung wird nicht tief in Schwellen oder Schotter hineingehen, ist jedoch höher als bei Infrarot. Flammen könnten Substanzen an Oberfläche mobilisieren. Verunreinigungen des Schotters, wie z. B. Schmieröle und Fette, können kurzzeitig verflüssigt freigesetzt werden und dringen so in den Oberbau ein – mittel	0,5	0,5
Heißluft	Verunreinigungen des Schotters, wie z. B. Schmieröle und Fette, können kurzzeitig verflüssigt freigesetzt werden und dringen so in den Oberbau ein. Die Erwärmung geht nicht tief in Schwellen oder Schotter hinein „Best Case“: gering „Worst Case“: mittel	0,75	0,5

Um03 (Teil II)			
Anforderung	Minimierung der Emissionen in den Boden	Best Case	Worst Case
Verteilung der Punkte	Gefahrenpotential kein – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P		
Frosten	kein Gefahrenpotential, da Stoff sublimiert	1	1
Mikrowellen	gering: Wasserüberhitzungen könnten an den Oberflächen entstehen und Schadstoffe mobilisieren, die nur leicht verlagert werden	0,75	0,75
Laser (überhitzen)	kein Risikopotential, da nur sehr lokale gezielte Pflanzenerwärmung	1	1
Laser (schneiden)	kein Risikopotential, da nur sehr lokale gezielte Pflanzenerwärmung	1	1
UV-C	gering: photolytischer Abbau zu besser löslichem organischem Material kann an Oberflächen stattfinden. Schadstoffe werden aber nur sehr oberflächlich mobilisiert im Vergleich zu dauerhafter Sonneneinstrahlung, dadurch entstandene begrenzt wasserlösliche Produkte, können biologisch abgebaut werden	0,75	0,75
Strom	gering: Leitfähigkeitshilfsstoffe gut biologisch abbaubar, nicht komplexierend und bodenneutral, Schwermetallaktivierung nicht zu erwarten, keine relevante Löslichkeitsverbesserung für organische Schadstoffe, Abriebstäube sind beim Metalla-pplikatoren marginal gegenüber sonstigem Metallabrieb	0,75	0,75
Bürsten	gering: geringe Ablösung von Partikeln von Schwellen und Schotter, auch Bürstenabrieb (Metallabrieb, Mikroplastik), wenn Staubbelastung, dann nur geringe Verlagerung im Gleisbett durch entsprechende Schutzmaßnahmen	0,75	0,75
Handjäten	erfüllt: kein Effekt auf Boden [24]	1	1
MJ	geringe Ablösung und Verlagerung von Partikeln von Schwellen und Schotter, auch Abrieb am Applikator (z. B. Greifer, Rolle etc.) (Metall, Mikroplastik)	1	0,75
Mähen	bei bestimmten Mähern (z. B. Balkenmäher) geringer Einsatz von Schmierstoffen	1	0,75

Druckwasser	gering: Bei gezieltem Einsatz lokale Ablösung/Verlagerung von Schadstoffen	0,75	0,75
Absaugen	kein: lose Bestandteile werden herausgenommen und entsorgt	1	1
Um04 (Teil I)			
Anforderung	Minimierung der Emissionen in die Luft	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	- relevanter Eintrag von Betriebsstoffen oder Verfahrensreststoffen (z. B. Abriebstäube) mit Umweltrelevanz in die Luft - verfahrensbedingte thermische oder mechanische Freisetzung von Schadstoffen in Staub- oder Gasform aus den behandelten Bereichen, insbesondere aus Holzschwellen und Schotter - Schadstoffe bei der Mobilisierung im Boden und Schotter sind PAK, Pflanzenschutzmittel, Kohlenwasserstoffe *keine Berücksichtigung des Fahrzeugantriebes und des Energieanteils (da bereits in Ko 02 enthalten)		
Verteilung der Punkte	Potential zur Luftverunreinigung: kein – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P		
Heißwasser	geringes Potential zur Luftverunreinigung, da Wasserbindung freigesetzter Schadstoffe	0,75	0,75
Dampf	gering: Dampf kann Temperaturen bis ca. 130 °C auf die Oberflächen bringen und mittels Wasserdampfdestillation organische Schadstoffe aus Schwellen und Schotter freisetzen, die dann zu Aerosolen kondensieren. Begrenzbar durch Kondensationsflächen/Dampfabscheider	0,75	0,5
Heißschaum	geringes Potential zur Luftverunreinigung, da Wasserbindung freigesetzter Schadstoffe und Schaumabdeckung „Best Case“: 1 (Schaumabdeckung) „Worst Case“: 0,75	1	0,75

Um04 (Teil I)			
Infrarot		Dämpfe verdampfender organischer Substanzen können entstehen, die PAK und Formaldehyd enthalten können (Holzschwellen) [68] „Worst Case“: mittel für den Fall starker Erwärmung relativ neuer Holzschwellen mit erheblicher Restfeuchte (Wasserdampfdestillation) „Best Case.“ gering – keine Holzschwellen und nur Verdampfen von Rückständen aus dem Gleis	0,75 0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)		Flamme ist nicht gut kontrollierbar, da sie auf kühle, feuchte und ggf. stark schadstoffhaltige Oberflächen auftrifft. Emission von Stickoxiden, Feinpartikeln und un-/teilverbrannten Teer-/ Schmierölbestandteilen von verdampfter Holzkonservierung (Phenole, PAK, Ruß) kann erheblich sein, aber bei geringer Häufigkeit	0,5 0
Um04 (Teil II)			
Anforderung		Minimierung der Emissionen in die Luft	Best Worst Case Case
Verteilung der Punkte		Potential zur Luftverunreinigung: kein – 1 P gering – 0,75 P mittel – 0,5 P hoch – 0 P	
Heißluft		verdampfen von an der Oberfläche gebundenen Stoffen (PAK, Phenole, Kohlenwasserstoffe), nach [210] Gesamtmenge aber begrenzt. Zusätzlich Aufwirbeln von Stäuben	0,75 0,5
Frosten		keine Schadstoffe, aber sehr große Mengen klimaschädliches CO ₂ , das als Betriebsstoff nicht ersetzbar oder auffangbar ist. Hohe Emission mit hohem Gefahrenpotential für Klima – hoch	0 0
Mikrowellen		gering: geringe Mengen verdampfender organischer Substanz durch Wassererwärmung in oberster Schwellen- und Gesteinsschicht	0,75 0,75
Laser (überhitzen)		kein: geringe Mengen verdampfender organischer Substanz möglich, wegen sehr lokaler Anwendung vernachlässigbar	1 1

Laser (schneiden)	kein: geringe Mengen verdampfender organischer Substanz möglich wegen sehr lokaler Anwendung aber vernachlässigbar	1	1
UV-C	Leuchtmittel mit Normalglas geben gezielt kein Ozon ab	1	1
Strom	niedrig: geringe Mengen verdampfender organischer Substanz durch Abreißlichtbögen, Abrieb von Applikatorelektroden oder lokale Erwärmung von Pflanzenmaterial	0,75	0,75
Bürsten	Ablösen und Aufwirbeln von Partikeln von Schwellen und Schotter, auch Bürstenabrieb (Mikroplastik, Metallstaub) „Best Case“: gering „Worst Case“: mittel (abhängig von Verschmutzungsgrad)	0,75	0,5
Handjäten	erfüllt: kein erklärliches Potential zur Luftverunreinigung	1	1
MJ	generell kein erklärliches Potential zur Luftverunreinigung, aber je nach Wirkprinzip und Fähigkeit Wurzeln herauszuziehen Staubgefahr durch belastetes Feinmaterial	1	0,75
Mähen	erfüllt: kein erklärliches Potential zur Luftverunreinigung (langsamdrehende Systeme / Balkenmäher)	1	1
Druckwasser	erfüllt: kein erklärliches Potential zur Luftverunreinigung da Wasserbindung	1	1
Absaugen	gering: geringe Mengen staubender organischer Substanz bei guten Filtern	0,75	0,75

Um05			
Anforderung	Minimierung des Risikopotentials für die im Gleis und Randbereich lebende Fauna	Best Case	Worst Case
Spezifizierung	Berücksichtigung von bekannter und schützenswerter Fauna (z. B. Zauneidechse, Haselmaus, Kröten). Grundfrage: Was passiert, wenn sich diese Tiere auf/im Schotter verstecken und von einem Medium getroffen werden (Einbeziehung der Eindringtiefe)? Annahmen auf Basis des in [41, 44, 54, 193] beschriebenen Tierverhaltens und der physikalischen Auswirkungen der Alternativverfahren zur Vegetationskontrolle		
Verteilung der Punkte	niedrig = 1 P mittel = 0,5 P hoch = 0 P		

Heißwasser	Schäden an Kröten	0	0
Dampf	leichtere Schäden an Kröten	0,5	0,5
Heißschaum	leichtere Schäden an Kröten	0,5	0,5
Infrarot	leichtere Schäden an Kröten	0,5	0,5
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	leichtere Schäden an Maus und Kröten	0,5	0,5
Heißluft	leichtere Schäden an Maus und Kröten	0,5	0,5
Frost	leichtere Schäden an Kröten	0,5	0,5
Mikrowellen	starke Schäden Maus, Eidechse, Schlingnatter und Kröte	0	0
Laser (überhit- zen)	kleine Schäden an Kröte	1	1
Laser (schneiden)	kleine Schäden an Maus und Kröte	1	1
UV-C	kleinere Schäden an Kröte	1	1
Strom	Schäden an Maus, Eidechse, Schlingnatter, Kröte bei hoher Ge- schwindigkeit.	0,5	0,5
Bürsten	geringe Schäden an Kröte.	1	1
Handjäten	keine Schäden, Tiere fliehen oder es wird sehr gezielt gearbei- tet.	1	1
MJ	keine Schäden, Tiere fliehen und/oder es wird sehr gezielt ge- arbeitet.	1	1
Mähen	Schäden an Kröte bei hoher Geschwindigkeit.	0,5	0,5
Druckwasser	bei Kröte Schäden bei hoher Geschwindigkeit.	0,5	0,5
Absaugen	Schäden an Kröte bei mittlerer Geschwindigkeit 0,5 (Saugzug)	0,5	0,5

Um06 (Teil I)

Anforderung	hohes Umstellungspotential auf regenerative Energieträger	Best Case	Worst Case
-------------	---	--------------	---------------

Spezifizierung	Einfachheit des Einsatzes von regenerativen Energieträgern. Hier wird bewertet, ob ein Vegetationskontrollverfahren mit niedrigem oder hohem Aufwand auf einen regenerativen Energieträger umgestellt werden kann; 1. Veränderungen am Gerät nötig 2. Nutzung von Bahnstrom (kontinuierliche Umstellung entsprechend dem Mix des Bahnstroms) Änderungsnotwendigkeiten 3. Anpassung an der autonomen Energiebereitstellungseinheit auf dem Fahrzeug nötig, Änderungsnotwendigkeiten 4. erwartete Verfügbarkeit der regenerativen Energieträger in naher Zukunft (bis 2030)		
Verteilung der Punkte	Zusammenfassung aus den Kriterien Umstellungspotential auf regenerative Energien sehr hoch: 1 P: keine Verfahrensänderung; nur andere Stromquelle Umwandlungsschritte 0–1 hoch: 0,75 P: geringe Verfahrensänderung; nur andere Energiequelle Umwandlungsschritte 0–2, erhebliche Veränderungen an der Energiebereitstellungsinfrastruktur mittel 0,5 P: mittlere Verfahrensänderung; das Verfahren ist auf Strom ausgelegt, jedoch muss das System ausgelegt sein. Ebenfalls erhebliche Veränderungen an der Energiebereitstellungsinfrastruktur gering: 0,25 P: hohe Verfahrensänderung, besonders wenn System nicht auf Strom ausgelegt, Umwandlungsschritte 2–4 kein: 0 P: Verfahren muss grundlegend verändert werden, um regenerative Energiebereitstellung sinnvoll nutzen zu können, zusätzlich ist Aufwand für Herstellung sehr hoch positiv, wenn Option sinnvoll, den selbst erzeugten Strom im mobilen BHKW mit KWK zu erzeugen und Abwärme zu verwenden)		
Heißwasser	hohes Potential, da schon gezeigt (SBB), dass regenerativ mit grünem Bahnstrom machbar und noch besser, wenn Heißwasser vorab ggf. solar vorgewärmt wird. Heißwasserbereitstellung aus BHKW möglich Infrastruktur zum Vorheizen muss geschaffen werden	0,75	0,75
Dampf	mittleres Potential, da schon gezeigt (SBB), dass regenerativ mit grünem Bahnstrom Heißwasser machbar und noch besser, wenn Heißwasser vorab ggf. solar vorgewärmt wird. Dampferzeugung aus Heißwasserbereitstellung aus BHKW möglich aber nicht erprobt oder geplant bisher Infrastruktur zum Vorheizen muss geschaffen werden. Dampferzeugung auf dem Fahrzeug aufwändig	0,5	0,5

Um06 (Teil II)			
Anforderung	hohes Umstellungspotential auf regenerative Energieträger	Best Case	Worst Case
Heißschaum	hohes Potential, da schon gezeigt (SBB), dass regenerativ mit grünem Bahnstrom machbar und noch besser, wenn Heißwasser vorab ggf. solar vorgewärmt wird. Heißwasserbereitstellung aus BHKW möglich. Anlage noch effizienter, da geringerer Heißwasserverbrauch erwartet Infrastruktur zum Vorheizen muss geschaffen werden	0,75	0,75
Infrarot	Umstellung auf Heizstrahler möglich bei Konzeption des Gerätes über Elektrostrahler (hohe Verfahrensänderung), dann aber Bahnstrom oder BHKW möglich	0,25	0,25
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	Umstellung auf Wasserstoff sehr aufwändig wegen Wasserstoffdrucktransport und Wasserstoffgas zum Abflammen wahrscheinlich zu heiß, P2G Gase haben hohe Umwandlungsverluste	0	0
Heißluft	Umstellung auf Wasserstoff sehr aufwändig wegen Wasserstoffdrucktransport, Lufterwärmung mit Wasserstoffflammen aber gut steuerbar Lufterhitzung einfach mit Strom möglich	0,5	0,5
Frosten	CO ₂ aus Luft oder aus Kraftwerksabgasen/Stahlhütten zu gewinnen, um es dann nach Nutzung als Kälteüberträger in die Luft zu entlassen, erscheint in Anbetracht des hohen Energieaufwandes und der finalen Emission nicht regenerativ machbar	0	0
Mikrowellen	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
Laser (überhitzen)	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
Laser (schneiden)	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
UV-C	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
Strom	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
Bürsten	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
Handjäten	Transport der Menschen zum Arbeitsplatz mit regenerativen Energien möglich	1	1
MJ	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
Mähen	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
Druckwasser	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1

Absaugen	Nutzung Bahnstrom und BHKW-Strom problemlos möglich	1	1
----------	---	---	---

7. Anforderungen an den Versuchsträger

Technische Anforderungen

Zunächst sind grundlegende Anforderungen an den Versuchsträger zu nennen, die einen Betrieb im Gleisbereich ermöglichen. Zu diesen zählen:

- Antreiben und Bremsen des Versuchsträgers auf dem Gleis
- Aufnehmen der Aggregate zur Energiebereitstellung, Medienversorgung und der Steuerungsmodule für Straßentransport und Schienenverkehr
- Träger der Ausbringungsmodule für die widerstandssenkende Leitflüssigkeit
- Bereitstellen einer Plattform für Kameras und ggf. Sensorik zur Versuchsdatenerfassung
- gute Sicht auf die Strecke für den Triebfahrzeugführenden
- Beförderung der Gerätebediener

Die Anforderungen zur Sicherheit an das Fahrzeug wie sichere Spurführung, sicheres Antreiben und Abbremsen, gute Sicht für Triebfahrzeugführende sind bereits erfüllt, da es sich um ein zugelassenes Zweibegefahrzeug handelt. So kann der Fokus auf die Anforderungen gelegt werden, die sich aus dem Umbau zum Zugfahrzeug für die Vegetationskontrolle ergeben.

Für einen Versuchsträger, der eine Untersuchung der drei ausgewählten Verfahren ermöglichen soll, gelten allgemeine technische Anforderungen, wie sie für alle Eisenbahnfahrzeuge gelten. So gelten folgende Randbedingungen:

- der Versuchsträger hält die gültige Fahrzeugbegrenzungslinie ein
- der Versuchsträger hält die auf den ausgewählten VS zulässige Achslast ein
- vorhandene Infrastruktur, Leit- und Sicherungstechnik wird nicht geschädigt
- das Versuchsfahrzeug besitzt eine Zulassung/Betriebserlaubnis für die ausgewählten VS

Zusätzlich ergeben sich aus dem gewählten Einsatzszenario für den Versuchsbetrieb weitere Anforderungen an den Versuchsträger:

- der Versuchsträger führt für den Versuchsbetrieb ausreichende Reserven an Betriebsstoffen mit
- die Applikationsmodule werden während des Versuchs in Gleisquerrichtung geführt (durch Spurführung quasi sichergestellt)
- die Applikationsmodule, die außerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie genutzt werden, können bei Bedarf in eine Position innerhalb der Fahrzeugbegrenzungslinie gebracht werden
- Erprobung möglichst aller Verfahren in den Bereichen A und B
- die für die Versuchsdurchführung benötigte Energie kann auf dem Fahrzeug erzeugt werden
- es kann mindestens die maximale für die Verfahren ermittelte Geschwindigkeit erreicht werden

Auch die Sicherheit während des Betriebs der Verfahren muss bedacht werden. So muss beim Versuchsbetrieb der Verfahren die Sicherheit des Personals gewährleistet werden. Es gilt die folgenden Gefahren zu minimieren bzw. zu vermeiden:

- Vermeidung von Stromschlägen durch direkten Kontakt mit den Verfahren, der Energieerzeugung oder Ladungsträgern
- schnelle Notabschaltung der einzelnen Verfahren möglich
- Schutz vor Spritzwasser
- Schutz vor Schotterflug, umherfliegendem Pflanzenmaterial
- Sicherung des Düsenkopfes des Druckwasserverfahrens beim Versagen der Düsenhalterung

Versuchslogistische Anforderungen an das System

Neben der Versuchsdurchführung muss bei der Konzeptionierung und Konstruktion des Trägers auch die Logistik des Trägers bedacht werden. So soll dieser z. B. möglichst einfach zu den einzelnen Versuchsstandorten transportiert werden können und einfach manövrierbar sein. Dazu wurden die folgenden Anforderungen formuliert:

- Der Versuchsträger kann auf der Straße fahren bzw. dort transportiert werden und hält die dort zulässigen Achslasten für den Transport auf einem geeigneten Straßenfahrzeug (z. B. LKW) ein.
- Der Versuchsträger kann eigenständig oder mit Hilfe eines Gabelstaplers bzw. eines Hubkrans auf das Transportfahrzeug geladen werden und auf den VS eingegleitet werden.
- Nicht selbstfahrende Teile des Versuchsträger halten in Längs- oder Querrichtung die übliche maximale Breite für die Ladung auf Straßenfahrzeugen (z. B. LKW) von 2 400 mm (vgl. 2 x Europalette) ein.
- Über die übliche maximalen Ladungsbreite von 2 400 mm hinausragende Anbauten können eingeklappt oder einfach demontiert werden.

Anforderungen an das Trägermodul

Zusammengefasst lauten die Grundanforderungen an das Trägermodul:

- Einhalten der maximal zulässigen Maße der Fahrzeugbegrenzungslinie
- Gewährleistung einer sicheren Spurführung entlang des Gleises
- Einhalten des Zielgewichtes von ca. 2 000 kg
- der Träger bietet Platz für die drei ausgewählten Verfahren
- das Ein- und Ausgleisen ist an Stellen möglich, an denen auch das Zugfahrzeug eingleisen kann

Neben diesen Anforderungen gibt es weitere Funktionen, die das Trägermodul erfüllen muss, um die daran befestigten Applikationsmodule erfolgreich einzusetzen. So sollen die Applikationsmodule für das El und das MJ aus der Fahrzeugbegrenzungslinie heraus nach unten abgesenkt werden können,

um einen Kontakt mit der zu behandelnden Vegetation herzustellen. Gleichzeitig muss ein Anheben möglich sein, um eine Schädigung der Infrastruktur und der Applikationsmodule zu vermeiden.

Um die Applikationsmodule zu heben und abzusenken, müssen diese innerhalb des Trägermoduls geführt werden. So wird ein präzises Arbeiten gewährleistet und eine Schädigung der Infrastruktur oder des Trägermoduls vermieden. Das Trägermodul muss außerdem einen Einleitungspunkt für die Zug- und Druckkräfte, die durch den Antrieb des Zugfahrzeuges entstehen, aufweisen. Weiterhin werden flexible Leitungen für Energie und Betriebsstoffe zwischen Zugfahrzeug und Trägermodul gebraucht.

Funktionen, die das Trägermodul erfüllen muss:

- Heben und Senken der Applikationsmodule
- Führung der Applikationsmodule (durch Spurführung quasi sichergestellt)
- Aufnehmen von auf die Applikationsmodule wirkenden Kräfte in Längs- und Querrichtung sowie in vertikaler Richtung
- Aufnahme der Zug-Druckkräfte des Zugfahrzeuges (Koppelstange)
- Leiten von Energie und Betriebsstoffen
- Aufnehmen des Auslegers

8. Erstbetrachtung der potenziellen Risiken für besonders geschützte Tiere im Gleisbereich

Entsprechend der Darstellung der häufig vertretenen Tierarten im Gleisbereich Tabelle 39 wird davon ausgegangen, dass sich die Eidechsen wie folgt verhalten:

- Bei Annäherung des Fahrzeugs mit Geschwindigkeiten unter 40 km/h, im Normalfall unter 20 km/h, haben die Tiere tagsüber die gute Chance zu großen Teilen aus dem Gleisbett in den Randbereich zu fliehen.
- Eine Minderheit der Tiere, besonders die kleineren, werden in das Schotterbett hineinkriechen und sich dort verstecken.
- Die Flucht wird durch ungewöhnliche Geräusche, welche von den verschiedenen Verfahren ausgehen, zusätzlich unterstützt. Wenn es sich als sinnvoll herausstellt, ist es einfach, auch technisch leisen Verfahren entsprechende Geräusche und Lichtsignale hinzuzufügen.

Dieses Modellverhaltensmuster wird in der Tabelle 39 mit den Wirkmechanismen der Verfahren kombiniert.

Bewertungsbasis zur Ermittlung risikorelevanter Verfahren und Ergebnisse

Ein begrenztes Risiko (E1) ist anzunehmen, wenn das Verfahren sich schnell bewegt (TH) und so schnell wirkt (WH), dass die Tiere dem nicht weiter ausweichen können. Zusätzlich muss der Effekt in den Schotter (und die Pflanzen) hineinwirken (O+S) und Tiere müssen sich direkt im Bereich der Pflanzen verstecken, bei denen die Kontrollmethoden durch die Sensorik aktiv sind (PSI) oder nur dort wirksam sind (PSO). Derartige Eigenschaftskombinationen wurden gefunden bei Heißwasser, Dampf, Abflammen, (Mikrowellen), Strom und Druckwasser. Ob sich jedoch Eidechsen bei drohender Gefahr nahe an oder in Pflanzen verstecken, ist offen und müsste in einem umfassenden Monitoring geklärt werden. Hier wird ein klarer Monitoringauftrag an zukünftige Studien gestellt. Würde sich herausstellen, dass die Eidechsen, die sich gerade auf dem Gleisbett in der Sonne und nicht im Bewuchsbereich aufhalten, auch nicht verstärkt in solche Bereiche hineinflüchten, dann würde auch dieses artenschutzfachliche Risiko wegfallen.

Hohe Risiken (E2), insbesondere für Jungtiere, die sich nicht rechtzeitig tief verkriechen, wären zu vermuten, wenn schnelle Verfahren flächendeckend ohne Sensorik angewandt werden und bis in den Boden hineinwirken (O+S). Derartige Eigenschaftskombinationen wurden nicht gefunden.

Tabelle 39: Modellverhaltensmuster der Tierarten in Kombination mit den Wirkmechanismen der Verfahren.

Verfahren	Mögliche Wirkungen auf die Tiere	Wirksamer Eingriffsbereich	Geschwindigkeit (T): Hoch (TH), Niedrig (TN) (< 10 km/h) Wirkgeschwindigkeit (W): Hoch (WH), Niedrig (WN)	Gefährdungspotential: E0: kein Risiko E1: begrenztes Risiko, E2: flächendeckendes Risiko
Heißwasser	verbrühen	O(+S), PSI, KBI	TH+WH	E1
Dampf	verbrühen	O ¹ , PSI, KBI	TH+WN	E1
Heißschaum	verbrühen	O+S, PSI, KBI	TH+WN	E0
Infrarot	überhitzen	O, (PSI), KBI	TN+WN	E0
Abflammen (kurzzeitiger Kontakt mit Flamme)	überhitzen	O+S, PSI, KBI	TH/TN+WH	E1
Frosten	verköhlen	O, PSI, KBI	TN+WN	E0
Mikrowellen	überhitzen	O+S, PSI, KBI	TN/TH+WH	E0/E1
Heißluft	überhitzen	O+S, PSI, KBI	TN+WH	E0
Laser (überhitzen)	überhitzen	O, PSI, KBI	TN+WH	E0
Laser (schneiden)	mechanisch zerstören	O, PSI, KBI	TN+WH	E0
UV-C	überhitzen, Zellzerstörung	O, (PSO), KBI	TN+WN	E0
Strom	Organschädigung durch Strom	O+S, SB, PSO, KBO*	TH+WH	E1
Bürsten	mechanisch zerstören	O, PSO, KBO	TN+WH	E0
Handjäten	mechanisch zerstören	O, SB, PSI, KBI	TN+WN	E0
MJ	mechanisch zerstören	O, SB, (PSI/PSO), KBI/KBO	TN+WN	E0

Verfahren	Mögliche Wirkungen auf die Tiere	Wirksamer Eingriffsbereich	Geschwindigkeit (T): Hoch (TH), Niedrig (TN) (< 10 km/h) Wirkgeschwindigkeit (W): Hoch (WH), Niedrig (WN)	Gefährdungspotential: E0: kein Risiko E1: begrenztes Risiko, E2: flächendeckendes Risiko
Mähen+	mechanisch zerstören, entfernen	O+S, KBI, KS	TN+WH	E0
Druckwasser	mechanisch zerstören	O, PSI, KBI	TH+WH	E1
Absaugen	mechanisch zerstören, entfernen	O+S, KS	TN +WN	E0

Eingriffsbereich:

- Oberfläche (O)
- Oberfläche und begrenzt in den Schotter hinein (O+S), ggf. auch nur beim Absaugen von Material systemisch nach Berühren (SB)
- Pflanzensensorik: immer (PSI), optional (PSO), kein Sensor, läuft dauerhaft KS
- mechanische Schädigung
- keine Bodenberührung, immer min. 5–10 cm über Boden (KBI)
- Anheben keine Bodenberührung, wenn abgeschaltet als Option (KBO)

Literatur:¹ [41]

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Geschützte Eidechsenarten gehören auch nach der hier eingesetzten Klassifizierungsmethodik zu den prioritär gefährdeten streng geschützten Arten bei der Vegetationskontrolle. Die Vegetationskontrolle im Gleis ist jedoch absolut notwendig und auch rechtlich geboten. Die nichtchemischen Vegetationskontrollverfahren lassen sich methodisch nach potenziellen Risiken durch Eigenschaftskombinationen gliedern. Derartige Eigenschaftskombinationen wurden gefunden bei Heißwasser, Dampf, Abflammen, (Mikrowellen), Strom und Druckwasser. Sie kommen jedoch aufgrund der lokalen Aktivierung der Verfahren nur dann zum Tragen, wenn sich Eidechsen bei drohender Gefahr nahe an oder in Pflanzen verstecken.

Ob dies wahrscheinlich oder wirklich der Fall ist, ist vollständig offen, da es keine empirischen Beobachtungen zur Flucht in Pflanzen, sondern nur zur Flucht aus dem Gleisbett und in den Schotter hineingibt. Real erhöhte Risiken sind dementsprechend aktuell für kein Verfahren definiert absehbar, können aber durch größere spezialisierte Monitoringbegleitstudien zu Versuchsvorhaben und Praxistests weiter ausgeschlossen werden. Gleichzeitig sollte dabei verstärkt auch auf die systematische Erforschung von Signalkombinationen Wert gelegt werden, die bei geschützten Eidechsen ein

frühzeitiges Fluchtverhalten auslösen. Eine Umstellung auf schotterfreie oder schotterarme Gleisverlegung oder auch die Nutzung von flachliegenden Geovliesen auf Randwegen stellt aus Artenschutzsicht bei der Erstbetrachtung keinen Vorteil dar.

9. Steckbriefe und Artenliste der Versuchsstrecken

Tabelle 40: Einteilung und Erklärung der Parameter zur Kategorisierung des Gleiszustands.

Parameter	Einteilung		
Feinanteil	niedrig (-)	mittel (+/-)	hoch (+)
Vegetationsart	Gräser/ krautige Vegetation (einjährig 1, ausdauernd A)	Holzgewächse (H)	ausläuferbildend (a) rhizombildend (r)
VD	gering (Großteil des Schotters erkennbar)	mittel (Hälfte des Schotters erkennbar)	hoch (kaum Schotter erkennbar)
Wuchshöhe	unterhalb Schienenoberkante (uS)	oberhalb Schienenoberkante (oS)	
Umliegende Vegetation	Wald, Feld, Wiese, Gewässer etc.		
Beschattung	S	tS	kS
Bisherige Vegetationskontrolle	keine	chemisch	mechanisch
Nutzung	stillgelegt	Abstellgleis	reguläre Fahrten

Die Steckbriefe zeigen zusammengefasst die Eigenschaften des gesamten Versuchsstandorts und nicht für einzelne Streckenabschnitte mit teilflächenspezifischen Unterschieden. Dadurch ergibt sich eine grobe Übersicht, was für Merkmale der Standort allgemein aufweist.

Tabelle 41: Steckbriefe der VS und BS.

Parameter	VS Vetschau	VS Bergheim	BS Linnich	BS Aachen	BS Puffendorf
Feinanteil	+/- +	- +/- +	+/-	-	- +
Vegetationsart	A, 1, H, a	A, 1, H, a, r	A, 1, H, a, r	A, 1, H, a	A, 1, a, r
VD	gering, mittel, hoch	gering, mittel, hoch	gering, mittel, hoch	gering	gering, mittel, hoch
Wuchshöhe	uS, oS	uS, oS	uS, oS	uS	uS, oS

Parameter	VS Vetschau	VS Bergheim	BS Linnich	BS Aachen	BS Puffendorf
umliegende Vegetation	Wald, Feld	Bäume, Büsche	Feld, Bäume, Büsche	Wiese, Bäume	Feld, Bäume
Beschattung	tS, kS	S, tS	S, tS	S	S
Schwellenart	Beton	Beton, Holz, Stahl	Beton, Holz, Stahl	Holz	Holz
bisherige Vegetationskontrolle	mechanisch	bis 2022 chemisch, jetzt mechanisch	mechanisch	mechanisch	keine
Nutzung	2–3 x pro Woche	Abstellgleis, Rangierfahrten	Abstellgleis (vorne), stillgelegt (hinten)	Anschlussgleis, Rangierfahrten	Stillgelegt
Elektrifizierung	nein	nein	nein	nein	nein
letzte Instandhaltung	nicht bekannt	nicht bekannt	nicht bekannt	1999	1999
Inbetriebnahme	1925	1955	1911	1966	1912

Tabelle 42: Erfasste Arten der BS und VS und den Wuchsorten Gleisrost/Schotterflanke (GL) und Randweg (RW).

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsort	VS Niederaußem	VS Vetschau	BS Aachen	BS Linnich	BS Puffendorf
<i>Acer campestre</i>	Feld-Ahorn	RW, GL	X	X	X		
<i>Acer platanoides</i>	Spitz-Ahorn	RW, GL	X				
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg Ahorn	RW, GL	X	X	X	X	X
<i>Achillea millefolium</i>	Gewöhnliche Schafgarbe	RW, GL	X		X	X	X
<i>Aegopodium podagraria</i>	Giersch	RW		X	X		
<i>Agrimonia eupatoria</i>	Gewöhnlicher Odermennig	RW					X
<i>Agrostis capillaris</i>	Rotes Straußgras	RW				X	
<i>Ajuga reptans</i>	Kriechender Günsel	RW	X				
<i>Alliaria petiolata</i>	Knoblauchrauke	RW, GL	X				
<i>Allium ursinum</i>	Bärlauch	RW	X				
<i>Anagallis arvensis</i>	Acker-Gauchheil	RW			X		
<i>Anthriscus sylvestris</i>	Wiesen-Kerbel	GL		X		X	X
<i>Anthyllus vulneraria</i>	Echter Wundklee	RW, GL	X				
<i>Arabidopsis thaliana</i>	Acker-Schmalwand	GL			X		
<i>Arrhenaterum elatius</i>	Gewöhnlicher Glatthafer	RW, GL	X				
<i>Artemisia vulgaris</i>	Gewöhnliche Beifuß	GL	X				X
<i>Arum maculatum</i>	Gefleckter Aronstab	RW		X			
<i>Bellis perennis</i>	Gänseblümchen	RW			X		
<i>Betula pendula</i>	Weiß-Birke	RW, GL	X		X	X	
<i>Brachythecium rutabulum</i>	Gemeines Kurzbüchsenmoos	GL			X	X	X
<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe	RW, GL	X		X	X	X
<i>Bromus hordeaceus</i>	Weiche Trespe	GL		X			X
<i>Bromus sterilis</i>	Taube Trespe	RW, GL	X	X	X	X	X
<i>Buddleja davidii</i>	Schmetterlingsflieder	RW, GL	X		X		
<i>Buglossoides arvensis</i>	Acker-Steinsame	GL	X				
<i>Calamagrostis epigejos</i>	Land Reitgras	RW	X		X	X	

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsort	VS Niederaußem	VS Vetschau	BS Aachen	BS Linnich	BS Puffendorf
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	Gewöhnliches Hirtentäschel	RW		X	X	X	
<i>Cardamine hirsuta</i>	Garten Schaumkraut	RW, GL			X	X	X
<i>Carex pendula</i>	Hänge-Segge	RW, GL		X			
<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	GL	X	X	X	X	
<i>Castanea sativa</i>	Edelkastanie	RW, GL		X			
<i>Cerastium fontanum</i>	Quellen-Hornkraut	GL		X			
<i>Cerastium glomeratum</i>	Knäuel Hornkraut	RW	X		X	X	X
<i>Chaenorhinum minus</i>	Kleines Leinkraut	GL			X	X	
<i>Chelidonium majus</i>	Schöllkraut	GL				X	
<i>Chenopodium album</i>	Weißer Gänsefuß	RW, GL			X		X
<i>Circaea lutetiana</i>	Großes Hexenkraut	RW		X			
<i>Cirsium arvense</i>	Acker-Kratzdistel	RW, GL			X	X	X
<i>Cirsium vulgare</i>	Gewöhnliche Kratzdistel	RW, GL	X		X	X	X
<i>Clematis vitalba</i>	Waldrebe	GL			X	X	
<i>Convolvulus arvensis</i>	Ackerwinde	GL			X	X	X
<i>Conyza canadensis</i>	Kanadisches Berufkraut	GL			X	X	X
<i>Cornus sanguinea</i>	Roter Hartriegel	GL	X			X	X
<i>Crepis capillaris</i>	Kleinköpfiger Pippau	RW, GL			X	X	
<i>Datura stramonium</i>	Gemeiner Stechapfel	RW					X
<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre	RW, GL	X		X	X	X
<i>Digitaria ischaemum</i>	Faden-Fingerhirse	GL			X		
<i>Draba verna</i>	Frühlings Hungerblümchen	GL			X		
<i>Dryopteris filix-mas</i>	Echter Wurmfarne	RW		X			
<i>Echinochloa crus-galli</i>	Gewöhnliche Hühnerhirse	GL					X
<i>Epilobium angustifolium</i>	Schmalblättriges Weidenröschen	GL					X
<i>Epilobium ciliatum</i>	Drüsiges Weidenröschen	RW, GL	X		X	X	X
<i>Epilobium parviflorum</i>	Kleinblütiges Weidenröschen	RW, GL	X		X	X	X
<i>Equisetum arvense</i>	Ackerschachtelhalm	RW, GL	X			X	X

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsort	VS Niederaußem	VS Vetschau	BS Aachen	BS Linnich	BS Puffendorf
<i>Erigeron annuus</i>	Einjähriger Feinstrahl	RW			X	X	
<i>Euonymus europaeus</i>	Gewöhnlicher Spindelstrauch	RW		X			
<i>Eupatorium cannabinum</i>	Gewöhnlicher Wasserdost	GL				X	
<i>Euphorbia helioscopia</i>	Sonnenwend Wolfsmilch	RW			X		
<i>Euphorbia lathyris</i>	Kreuzblättrige Wolfsmilch	RW			X		
<i>Fallopia convolvulus</i>	Windenknöterich	GL					X
<i>Ficaria verna</i>	Scharbockskraut	GL		X			X
<i>Fragaria vesca</i>	Wald-Erdbeere	RW, GL	X				
<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	RW, GL		X			
<i>Galeobdolon luteum</i>	Gewöhnliche Goldnessel	RW		X			
<i>Galeopsis pubescens</i>	Weichhaariger Hohlzahn	RW		X			
<i>Galeopsis tetrahit</i>	Gemeiner Hohlzahn	GL					X
<i>Galinsoga parviflora</i>	Kleinblütiges Knopfkraut	RW			X	X	
<i>Galium aparine</i>	Kletten-Labkraut	GL		X	X	X	X
<i>Geranium dissectum</i>	Schlitzblättriger Storchschnabel	RW, GL	X		X		X
<i>Geranium purpureum</i>	Purpur-Storchschnabel	RW, GL	X		X	X	
<i>Geranium pyrenaicum</i>	Pyrenäen Storchschnabel	RW, GL	X		X	X	X
<i>Geranium robertianum</i>	Ruprechtskraut	GL	X	X	X	X	
<i>Geum urbanum</i>	Echte Nelkenwurz	RW		X			
<i>Glechoma hederacea</i>	Gundermann	RW		X	X	X	X
<i>Hedera helix</i>	Gemeiner Efeu	RW		X	X	X	
<i>Heracleum mantegazzianum</i>	Riesen-Bärenklau	RW		X			
<i>Heracleum sphondylium</i>	Wiesen-Bärenklau	RW		X			X
<i>Hieracium pilosella</i>	Langhaariges Habichtskraut	RW				X	
<i>Hippophae rhamnoides</i>	Sanddorn	RW	X				
<i>Holcus lanatus</i>	Wolliges Honiggras	GL	X	X			X
<i>Hordeum murinum</i>	Mäusegerste	RW				X	
<i>Hypericum perforatum</i>	Echtes Johanniskraut	RW, GL	X		X	X	X

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsort	VS Niederaußem	VS Vetschau	BS Aachen	BS Linnich	BS Puffendorf
<i>Hypnum cupressiforme</i>	Zypressen-Schlafmoos	GL		X			
<i>Hypochaeris radicata</i>	Gewöhnliches Ferkelkraut	RW, GL	X		X	X	X
<i>Juglans regia</i>	Echte Walnuss	RW					X
<i>Lactuca serriola</i>	Stachel Lattich	RW, GL	X		X	X	X
<i>Lamium album</i>	Weißes Taubnessel	RW		X		X	X
<i>Lamium purpureum</i>	Rote Taubnessel	RW, GL				X	X
<i>Lapsana communis</i>	Gemeiner Rainkohl	RW, GL		X	X	X	X
<i>Linaria vulgaris</i>	Echtes Leinkraut	RW, GL	X		X	X	
<i>Lolium perenne</i>	Deutsches Weidelgras	RW				X	X
<i>Lotus pedunculatus</i>	Sumpf-Hornklee	RW, GL	X				
<i>Luzula multiflora</i>	Vielblütige Hainsimse	GL	X				
<i>Matricaria chamomilla</i>	Echte Kamille	GL				X	X
<i>Mercurialis annua</i>	Einjährige Bingelkraut	RW			X		X
<i>Milium effusum</i>	Wald-Flattergras	RW		X			
<i>Myosotis arvensis</i>	Acker-Vergissmeinnicht	RW		X			
<i>Myosotis sylvatica</i>	Vergissmeinnicht	RW	X	X	X	X	
<i>Oenothera biennis</i>	Gemeine Nachtkerze	GL	X			X	
<i>Papaver rhoeas</i>	Klatschmohn	RW			X	X	X
<i>Pilosella piloselloides</i>	Florentiner Habichtskraut	RW, GL	X		X	X	
<i>Pinus sylvestris</i>	Wald- Kiefer	RW	X				
<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich	GL	X		X	X	X
<i>Plantago major</i>	Breit-Wegerich	GL			X	X	X
<i>Pleurozium schreberi</i>	Rotstängelmoos	RW, GL			X	X	X
<i>Poa annua</i>	Einjähriges Rispengras	GL			X	X	X
<i>Poa pratensis</i>	Wiesen-Rispengras	RW, GL		X			
<i>Polygonum aviculare agg.</i>	Vogel-Knöterich	GL			X	X	
<i>Polytrichum commune</i>	Goldenes Frauenhaarmoos	RW	X		X	X	
<i>Potentilla argentea</i>	Silber-Fingerkraut	GL	X				

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsort	VS Niederaußem	VS Vetschau	BS Aachen	BS Linnich	BS Puffendorf
<i>Potentilla recta</i>	Hohes Fingerkraut	RW	X				
<i>Potentilla reptans</i>	Kriechendes Fingerkraut	GL				X	
<i>Prunella vulgaris</i>	Kleine Braunelle	RW	X		X		
<i>Prunus padus</i>	Gewöhnliche Traubenkirsche	RW		X			
<i>Prunus spinosa</i>	Schlehndorn	RW		X			
<i>Quercus robur</i>	Stiel-Eiche	RW		X		X	X
<i>Ranunculus repens</i>	Kriechender Hahnenfuß	RW			X		
<i>Reseda luteola</i>	Färber Wau	RW			X	X	
<i>Rosa canina</i>	Hundsrose	GL	X			X	
<i>Rubus caesius</i>	Kratzbeere	GL		X			
<i>Rubus fruticosus agg.</i>	Brombeeren	RW, GL	X	X	X	X	X
<i>Rumex obtusifolius</i>	Stumpfbältriger Ampfer	RW, GL	X		X	X	X
<i>Salix caprea</i>	Sal-Weide	RW	X			X	
<i>Sambucus nigra</i>	Schwarzer Holunder	RW	X	X	X	X	
<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf	RW, GL	X				
<i>Sedum acre</i>	Scharfer Mauerpfeffer	RW, GL			X	X	
<i>Senecio inaequidens</i>	Schmalblättriges Greiskraut	GL	X		X	X	X
<i>Senecio jacobaea</i>	Jakobs-Greiskraut	GL			X	X	X
<i>Senecio sylvaticus</i>	Wald-Greiskraut	GL					X
<i>Senecio vulgaris</i>	Gewöhnliches Greiskraut	GL	X		X	X	X
<i>Setaria viridis</i>	Grüne Borstenhirse	RW, GL			X	X	
<i>Sherardia arvensis</i>	Ackerröte	GL	X		X		X
<i>Silene coronaria</i>	Kronen-Lichtnelke	RW				X	
<i>Silene dioica</i>	Rote Lichtnelke	RW		X			
<i>Solanum nigrum</i>	Schwarzer Nachtschatten	RW			X	X	X
<i>Sonchus asper</i>	Raue Gänse-distel	RW, GL			X	X	X
<i>Sonchus olearaceus</i>	Kohl-Gänse-distel	RW, GL			X	X	X
<i>Spartium junceum</i>	Binsenginster	RW	X				

Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Wuchsort	VS Niederaußem	VS Vetschau	BS Aachen	BS Linnich	BS Puffendorf
<i>Stellaria media</i>	Gewöhnliche Vogelmiere	RW, GL			X	X	X
<i>Symphytum officinale</i>	Echter Beinwell	RW					X
<i>Tanacetum vulgare</i>	Gemeiner Rainfarn	RW	X			X	
<i>Taraxacum kok-saghyz</i>	Russischer Löwenzahn	GL	X				
<i>Taraxacum sect. Taraxacum</i>	Gewöhnlicher Löwenzahn	RW, GL	X	X	X	X	X
<i>Tragopogon pratensis</i>	Wiesen-Bocksbart	RW			X		
<i>Trifolium arvense</i>	Hasen-Klee	RW			X	X	X
<i>Trifolium dubium</i>	Faden-Klee	RW	X		X	X	
<i>Trifolium pratense</i>	Wiesen-Klee	RW				X	
<i>Trifolium repens</i>	Weißklee	RW	X		X		
<i>Ulmus cf. minor</i>	Feld-Ulme	GL			X		
<i>Urtica dioica</i>	Große Brennnessel	RW, GL		X	X	X	X
<i>Valerianella locusta</i>	Gewöhnlicher Feldsalat	GL	X	X		X	
<i>Verbascum nigrum</i>	Schwarze Königskerze	GL	X			X	X
<i>Verbascum thapsus</i>	Kleinblütige Königskerze	RW, GL	X		X	X	X
<i>Verbena officinalis</i>	Echtes Eisenkraut	RW			X		
<i>Veronica arvensis</i>	Feld-Ehrenpreis	GL	X		X		
<i>Veronica hederifolia</i>	Efeu-Ehrenpreis	GL		X			
<i>Veronica persica</i>	Persischer Ehrenpreis	GL	X		X	X	X
<i>Vicia sativa</i>	Futterwicke	RW, GL		X			
<i>Vicia sepium</i>	Zaun Wicke	RW	X			X	
<i>Vicia sylvatica</i>	Wald Wicke	RW		X			
<i>Vicia villosa</i>	Zottige Wicke	RW, GL	X		X	X	X