

Maßnahmen zur Klimaanpassung an Schienenverkehrsstrecken

Mit dem Klimawandel steigt die Wahrscheinlichkeit von Extremwetterereignissen. Stürme, Starkregen oder Hitze können Schienenverkehrsstrecken aufgrund ihrer wetterexponierten Lage auf verschiedene Arten beschädigen und somit den Betrieb nachteilig beeinflussen. Zur Sicherstellung einer auch in Zukunft zuverlässigen Schieneninfrastruktur sind Anpassungsmaßnahmen an Extremwetterereignisse zwingend notwendig.



1. Motivation

Der Klimawandel steht seit vielen Jahren im Mittelpunkt weltweiter politischer und gesellschaftlicher Diskussionen. Neben klimawandelbedingten Folgen wie dem Gletscherschwund, dem Anstieg des Meeresspiegels oder der Veränderung des Ökosystems steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Naturkatastrophen in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen. Unter anderem gilt der Transportsektor als äußerst vulnerabel gegenüber Extremwetterereignissen, da die notwendige Infrastruktur zur Durchführung von Personen- und Güterverkehr durchgehend dem Wetter ausgesetzt ist. Aufgrund der geringeren Flexibilität des Systems „Bahn“ im Vergleich zu anderen Transportmitteln stellen Betriebsstörungen und Unterbrechungen eine große Herausforderung für die Sicherheit und Transportlogistik dar. Im Hinblick auf die Zunahme von Extremwetterereignissen ist es deshalb notwendig, die Schienenverkehrsstrecken gegen die negativen Auswirkungen der verschiedenen Wetterextreme zu schützen. Dass diese

Extremwetterereignisse können Schienenverkehrsstrecken aufgrund ihrer wetterexponierten Lage auf verschiedene Arten beschädigen.



bereits gegenwärtig eine große Gefahr für das Schienennetz darstellen, zeigte die Flutkatastrophe im Juli 2021. Die Wassermassen verursachten innerhalb kürzester Zeit etliche Hang- und Dammrutsche sowie Gleisunter- und -überspülungen und beschädigten die Infrastruktur in großem Umfang. Die Deutsche Bahn schätzte den entstandenen Schaden auf rund 1,3 Mrd. € [1].

2. Der Klimawandel

Seit der Industrialisierung nimmt die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre durch die Nutzung fossiler Brennstoffe stetig zu. Der dadurch verstärkte Treibhauseffekt ist der Hauptverursacher des heutigen anthropogenen Klimawandels und sorgt für eine kontinuierliche Erderwärmung. Infolgedessen schmilzt das weltweite Eis und der Meeresspiegel steigt an. Eine weitere, besonders in den letzten Jahren zu beobachtende Folge ist die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen, wie z.B. Dürren, Stürmen oder Überschwemmungen. Extreme Niederschlagsereignisse stehen nachgewiesenermaßen im direkten Zusammenhang mit der globalen Temperaturzunahme. Trotzdem können auch Dürren aufgrund von veränderten Niederschlagsmustern oder einer schnelleren Verdunstung der Bodenfeuchte weiterhin zunehmen. Auch Stürme und Sturmfluten werden in Zukunft häufiger und intensiver erwartet. Zudem kommt es durch die Erderwärmung und die dadurch ausgelöste Verlängerung der Vegetationsperiode zu Veränderungen in der Tier- und Pflanzenwelt [2].



Alexandra Benz, B. Sc.

Wissenschaftliche Hilfskraft am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen (VIA), Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft
benz@via.rwth-aachen.de



Nadine Friesen, M. Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen (VIA), Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft
friesen@via.rwth-aachen.de



Dr.-Ing. Andreas Pfeifer

Oberingenieur am Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen (VIA), Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft
pfeifer@via.rwth-aachen.de

3. Auswirkungen verschiedener Wetterextreme und entsprechende Gegenmaßnahmen

Die zuvor genannten Extremwetterereignisse können Schienenverkehrsstrecken auf unterschiedlichste Weise beschädigen und somit den Betrieb einschränken oder gänzlich zum Erliegen bringen. Was die genauen Folgen der jeweiligen Extreme sind und welche Anpassungsmaßnahmen dagegen angewendet werden können, wird in diesem Abschnitt untersucht. Der Fokus liegt dabei auf dem

Tabelle 1: Übersicht möglicher Maßnahmen gegen die Auswirkungen potenzieller Extremwetterereignisse auf Schienenverkehrsstrecken
Quelle: Eigene Darstellung

| Extremwetterereignis | Gegenmaßnahme | Wirkung | präventiv / reaktiv | |
|---|--|--|--|-----------|
|  Hitze | Weißer Schienen | Reduzierung der Schienentemperatur | präventiv | |
| | Rail Temperature Control System | Reduzierung der Schienentemperatur | präventiv | |
| | Veränderung der Neutralisierungstemperatur | Erhöhung des Widerstands der Schienen gegen Hitze | präventiv | |
| | Geschwindigkeitsbegrenzungen | Minimierung des Entgleisungsrisikos bei Gleisverwerfungen | präventiv / reaktiv | |
| | Kühlung der Schienen mit Wasser | Reduzierung der Schienentemperatur | präventiv / reaktiv | |
| | Schotterverklebung | Erhöhung des Querverschiebewiderstands | präventiv | |
| | Feste Fahrbahn | Erhöhung des Querverschiebewiderstands | präventiv | |
| | Kontinuierlich eingegossene Schiene | Erhöhung des Querverschiebewiderstands | präventiv | |
| | Einschränkung der Instandhaltungsarbeitstage | Minimierung des Gleisverwerfungsrisikos | präventiv / reaktiv | |
| | Höhere Betonfestigkeitsklasse | geringere Verformungen der Betonschwellen | präventiv | |
| | Mikrolegierter Schienenstahl | höhere Verschleißfestigkeit | präventiv | |
| | Nachspannung der Oberleitung | kein Durchhang der Oberleitung | präventiv / reaktiv | |
| | Automatisches Federnachspannsystem | kein weggespülter Schotter | präventiv | |
| | Regelmäßiges Vegetationsmanagement | Minderung des Böschungsbrandrisikos | präventiv | |
| |  Starkregen | Entwässerungssysteme vergrößern | Schutz vor Überschwemmung | präventiv |
| Regelmäßige Instandhaltungsarbeiten | | Wiederherstellung der Abflusskapazität von Entwässerungssystemen | präventiv | |
| Aufblasbare Dämme | | Schutz vor Überschwemmung | reaktiv | |
| Tunnel Plug | | Schutz vor Überschwemmung in Tunneln | präventiv / reaktiv | |
| Pumpsysteme | | Schutz vor Überschwemmung | präventiv / reaktiv | |
| Schotterverklebung | | kein weggespülter Schotter | präventiv | |
| Hanggefälle reduzieren | | geringeres Erdbebenrisiko | präventiv | |
| Schutznetze | | Schutz vor Erdbeben, Steinschlag, Murenabgängen | präventiv | |
| Gräser auf Böschungen aussäen | | Stabilisierung des Bodens | präventiv | |
| Schutzwälder | | Schutz vor Erdbeben, Steinschlag, Murenabgängen | präventiv | |
|  Sturm | | Regelmäßiges Vegetationsmanagement | Identifizierung sturmwurfgefährdeter Bäume | präventiv |
| | | Stabilere Oberleitungsmaste | höherer Widerstand gegen Wind | präventiv |
| | Windschutzwand | Schutz der Oberleitung vor Wind | präventiv | |
| | Verstärkte Verbindungselemente | größere Windresistenz des Oberleitungsequipments | präventiv | |
|  Meeresspiegelanstieg | Verstärkte Ufermauern | Schutz vor Meeresspiegelanstieg & Sturmfluten | präventiv | |
| | Buhnen | Schutz vor Strand- & Küstenversetzung | präventiv | |
| | Wellenbrecher / Steinverkleidung | Schutz vor Küstenerosion & Sturmflutschäden | präventiv | |
| | Strandentwässerung / Drahtgeflechteelemente (Gabionen) / Strandaufschüttung | Schutz vor Stranderosion | präventiv | |
| | Damm um Tunneleingang | Schutz vor Meeresspiegelanstieg & Sturmfluten | präventiv | |
| | Trassenverlegung | Alternativstrecke im Landesinneren | präventiv | |
| | Rubbercoat® Schienenbeschichtung | Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit | präventiv | |
| | Zincco®-Schiene | Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit | präventiv | |
| | Mikrolegierter Schienenstahl | Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit | präventiv | |
|  Veränderte Vegetation | Hochdruckreinigen der Schiene & Auftragen eines Sand-Stahl-Gels | Blätterentfernung & Erhöhung der Haftreibung | reaktiv (präventiv) | |
| | LaserTrain | Entfernung des Schmierfilms von Blättern auf der Schiene | reaktiv (präventiv) | |
| | Regelmäßiges Vegetationsmanagement | geringere Sichtbehinderung & Schotterbettverschmutzung; weniger Laub | präventiv | |
| | Feste Fahrbahn | keine Schotterbettverschmutzung | präventiv | |

Ober- und Unterbau sowie den Auswirkungen, die aufgrund des Klimawandels verstärkt für mitteleuropäische Strecken zu erwarten sind. Eine Übersicht der im Folgenden vorgestellten Gegenmaßnahmen inkl. weiterer Anpassungsmöglichkeiten ist in Tabelle 1 dargestellt.

3.1. Hitze

Die wohl am meisten mit Hitze assoziierte Auswirkung auf das Schienennetz ist die Gleisverwerfung. Dabei handelt es sich um eine irreversible seitliche Ausknickung

des Gleisrostes, die durch sehr hohe Schienentemperaturen in Verbindung mit einer verhinderten Längsausdehnung ausgelöst wird (Bild 1). Langanhaltende Hitzewellen sorgen ebenso dafür, dass Boden und Pflanzen austrocknen. Infolgedessen erhöht sich die Gefahr von Bränden in Gleisnähe. Auch Oberleitungen sind durch Hitze betroffen, da hohe Temperaturen im Extremfall dazu führen können, dass der Bewegungsspielraum der Spanngewichte nicht mehr ausreicht, diese auf den Boden aufsetzen und den Fahrdraht nicht weiter straffen [3].

Zur Vermeidung von Entgleisungen, Streckensperrungen oder Problemen bei der Stromversorgung können verschiedene Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Eine Möglichkeit zur Steigerung des Hitzewiderstands von Schienen ist die Erhöhung der Neutralisierungstemperatur (NT). Diese entspricht der Temperatur, bei der sich die Schiene in einem spannungsfreien Zustand befindet. Um den Wert der NT erstreckt sich ein Temperaturbereich, in dem die Schiene in der Lage ist, die bei Hitze oder Kälte auftretenden Kräfte ohne Schaden aufzunehmen. Wird die NT erhöht, verschiebt sich dieser Bereich nach oben, sodass die Schiene höhere Temperaturen aushalten kann (Bild 2) [4]. Bei Streckenabschnitten, die als besonders gefährdet gegenüber Gleisverwerfungen gelten, aber bei denen die NT aufgrund des steigenden Schienenbruchrisikos bei Kälte nicht weiter erhöht werden kann, bietet es sich an, weitere Maßnahmen wie weiß angestrichene Schienen oder das zurzeit beforschte Rail Temperature Control System zu verwenden. Dieses ist in der Lage, die Schienentemperatur um bis zu 7°C bzw. 11°C zu senken [5, 6].

Auch ein anderes Oberbausystem wie die Feste Fahrbahn stellt aufgrund des höheren Gleisquerverschiebewiderstands eine äußerst wirksame Maßnahme gegen Gleisverwerfungen dar. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Herstellungskosten einer Festen Fahrbahn deutlich höher ausfallen als die eines Schotteroberbaus [7]. Alternativ kann eine Schotterverklebung in Betracht gezogen werden, die den Querverschiebewiderstand einer bestehenden Strecke ebenfalls erhöht [8].

Durchhängende Oberleitungen können vermieden werden, indem Spanngewichte regelmäßig nachgespannt oder automatische Federnachspannsysteme eingesetzt werden, welche flexibler auf große Temperaturunterschiede reagieren und keine Gewichte mehr benötigen [9].

3.2. Starkregen

Starke Niederschlagsereignisse können zu Überschwemmungen führen, die den Ober- und Unterbau der Schieneninfrastruktur beschädigen. Die Größe des Entwässerungssystems spielt dabei eine maßgebende Rolle. Ist dieses während eines extremen Starkregens nicht mehr in der Lage, das Oberflächen- und Schichtenwasser abzuführen, kann sich Wasser auf dem Oberbau ansammeln und der Boden durchfeuchtet werden, was für eine Ver-

ringerung der Tragfähigkeit und Stabilität des Bahnkörpers sorgt. Neben Hochwasser kann ein Starkregenereignis auch Auslöser eines Erdbebens sein, der ganze Gleisabschnitte mit sich reißen kann und lange Sperrungen zur Folge hat [10, 11].

Überlasteten Entwässerungssystemen kann durch eine ausreichende Dimensionierung vorgebeugt werden. Untersuchungen des Eisenbahn-Bundesamtes zeigten jedoch, dass viele Entwässerungssysteme in der Theorie auch für ein Starkregenereignis hinreichend bemessen sind. In der Realität sorgen stattdessen Verunreinigungen und starker Bewuchs häufig zu einer signifikanten Reduzierung der Abflusskapazität. Regelmäßige Instandhaltungsarbeiten zur Reinigung von Bahngräben und Tiefenentwässerungen stellen folglich eine simple und kostengünstige Lösung gegen dieses Problem dar [12].

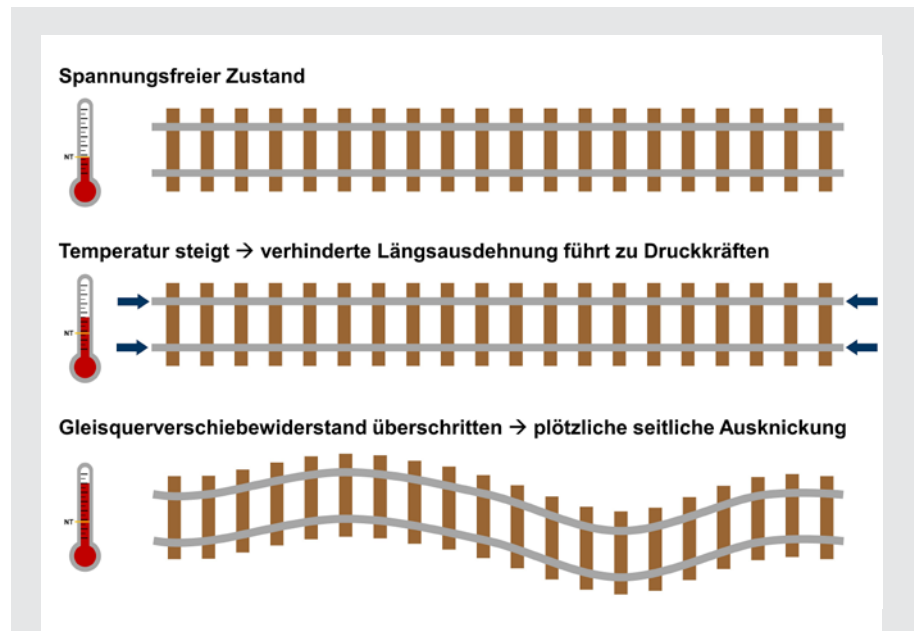
Ferner besteht die Möglichkeit, Schienenverkehrsstrecken mithilfe mobiler Schutzsysteme zu schützen. Kurz vor oder während eines Hochwassers können aus einem synthetischen Gewebe bestehende Dämme aufgeblasen bzw. mit Wasser gefüllt und so platziert werden, dass sie das Wasser von der Bahnstrecke weglenken [13]. Für Eisenbahntunnel existiert mit dem sogenannten Tunnel Plug ein ähnliches System. Während einer Überschwemmung aktiviert sich ein Luftaufblssystem, entfaltet ein Luftkissen und setzt dieses unter Druck, sodass der Tunnel temporär vor Schäden geschützt ist [14].

Bei der Neugestaltung von Hängen und Böschungen in Gleisnähe führt eine Reduzierung ihres Gefälles dazu, dass die Wahrscheinlichkeit für Erdbeben sinkt. Ist dies aus Platz- oder Kostengründen nicht möglich, stellen Schutznetze oder -wände eine geeignete Alternative dar [11].

3.3. Sturm

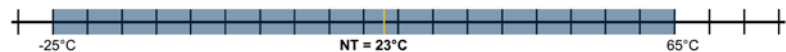
Entlang von Bahnstrecken befinden sich häufig große Bäume, die je nach Topografie von starken Windböen erfasst werden. Dadurch können Äste oder sogar ganze Bäume auf die Gleise fallen und die Strecke blockieren. Bei der Kollision mit einem solchen Hindernis läuft der Zug Gefahr zu entgleisen. Auf elektrifizierten Strecken können umfallende Bäume zusätzlich die Oberleitung zerstören [3].

Stetiges Vegetationsmanagement entlang der Bahnstrecken ist ein wirksames Instrument, um das Risiko umfallender Bäume zu reduzieren. In Deutschland wird der



1: Schematische Darstellung des Entstehungsprozesses einer Gleisverwerfung durch Hitze
Quelle: Eigene Darstellung

Bereich um die Neutralisierungstemperatur, in dem die Schiene in der Lage ist, die bei Hitze oder Kälte auftretenden Kräfte ohne Schaden aufzunehmen



Erhöhung der Neutralisierungstemperatur verschiebt den nutzbaren Temperaturbereich, vergrößert ihn aber nicht



Erhöhung des Schienenbruchrisikos bei Kälte

Reduzierung des Gleisverwerfungsrisikos bei Hitze

2: Auswirkung verschiedener Neutralisierungstemperaturen
Quelle: Eigene Darstellung

sicherheitsrelevante Bereich rund um die Strecke in eine Rückschnitts- und Stabilisierungszone unterteilt. In der Rückschnittszone wird die Vegetation mithilfe von mechanischen, chemischen oder thermischen Verfahren vollständig entfernt. Die Vegetation der Stabilisierungszone wird jährlich inspiziert, um potenziell gefährliche Bäume auszumachen, zu schneiden oder zu fällen [15]. Da sich allerdings ein Großteil des Baumbestands entlang der Bahnstrecken auf privaten Grundstücken befindet, kann die Vegetationskontrolle vielerorts nicht vorgenommen werden. Aus diesem Grund wurde Anfang 2021 eine Änderung des Allgemeinen Eisenbahngesetzes beschlossen. Der neu ergänzte § 24a erlaubt den Eisenbahninfrastrukturunternehmen das Betreten privater Grundstücke, sofern dies dem

Besitzer 14 Tage vorher angekündigt wurde. Überdies ist der Besitzer nach § 24 AEG dazu verpflichtet, einen 50 m breiten Streifen entlang der Bahnstrecke vor Gefahren durch umsturzgefährdete Bäume, herausbrechende Äste etc. zu schützen [16].

3.4. Meeresspiegelanstieg

Der Meeresspiegelanstieg betrifft küstennahe Eisenbahninfrastrukturen sowie Schienenverkehrsstrecken in der Nähe von Flussmündungen. Diese können je nach ihrer Höhenlage bei einem Meeresspiegelanstieg dauerhaft überflutet werden. Unter Umständen führen auch Sturmfluten und extreme seeseitige Sturmböen zu Überschwemmungen und richten erheblichen Schaden an. Salznebel ist ein weiteres



3: Geplante, verbesserte Ufermauer im Bahnhofsbereich von Dawlish zum Schutz der küstennahen Eisenbahninfrastruktur vor dem Meeresspiegelanstieg und extremen Sturmfluten

Quelle: Network Rail 2020



4: „Leaf Buster“ Spezialzug zur Entfernung des Blätter-Schmierfilms mithilfe eines Hochdruckwasserstrahls (A) und zum anschließenden Auftragen eines Gels aus Sand- und Stahlkörnern zur Erhöhung der Haftreibung (B)

Quelle: Network Rail 2015

Phänomen, das negative Auswirkungen auf Schienenverkehrsstrecken hat. Das Salzwasser beschleunigt die Korrosion von Schienen sowie Betonschwellen und verringert dadurch deren Lebensdauer [3, 17].

Die Verbesserung des Küstenschutzes stellt eine mögliche Maßnahme gegen die Auswirkungen des Meeresspiegelanstiegs dar. In Dawlish wurde bspw. als Reaktion auf eine verheerende Sturmflut eine neue Ufermauer gebaut. Diese ist deutlich höher als das bisherige Bauwerk und an ihrer Oberkante in Richtung Meer gekrümmt, sodass die Wellen abgelenkt werden und das Überlaufen des Wassers verhindert wird (Bild 3) [18].

Dynamische Küstenprozesse wie Erosion können ebenfalls durch den Bau von Buhnen, Wellenbrechern in der Brandungszone sowie Steinverkleidungen an der Küste abgeschwächt werden [19]. Sollte auch

eine Kombination aus mehreren Maßnahmen keinen ausreichenden Schutz bieten, muss eine Trassenverlegung in Betracht gezogen werden, um die Schieneninfrastruktur langfristig vor den Folgen des Meeresspiegelanstiegs zu schützen.

Die durch das Salzwasser beschleunigte Korrosion der Gleise kann durch die Verwendung von beschichteten Schienen oder neuer Schienenstähle verringert werden, die in einer hoch korrosiven Umgebung eine höhere Lebensdauer als normale Schienen aufweisen [20].

3.5. Veränderung der Vegetation

Eine verlängerte Vegetationsperiode erhöht bei Laubbäumen die Dauer und Intensität des Laubfalls. Blätter, die auf Schienen liegen bleiben und von Zügen überfahren werden, verringern die Haftreibung, so-

dass Züge längere Beschleunigungs- und Bremswege benötigen. Des Weiteren verschmutzen die Blätter das Schotterbett, wodurch die Entwässerung behindert wird. Ferner bieten belaubte Bäume dem Wind größere Angriffsflächen, weshalb sie anfälliger für Sturmwurf werden. Ein schnelleres Wachstum der Vegetation kann an Bahnstrecken auch dazu führen, dass Signale verdeckt werden, Bäume und Pflanzen in das Lichtprofil hineinragen und die Oberleitung beschädigt wird [3, 7].

Die Entfernung von Laub wird in vielen Ländern mithilfe von Spezialzügen, die die Blätter mit einem Hochdruckwasserstrahl von den Schienen beseitigen, vorgenommen. In Großbritannien wird zusätzlich ein Gel aus Sand- und Stahlkörnern auf die Schienenköpfe aufgetragen, um die Haftreibung zu erhöhen (Bild 4) [21]. Da dieses Verfahren allerdings den Transport von großen Mengen an Wasser und Sand erfordert, wurde als Alternative der Einsatz von Lasertechnik getestet. Der 2016 entwickelte „LaserTrain“ entfernt den rutschigen Schmierfilm mithilfe hochintensiver Laserpulse und reduziert die Rutschgefahr von Zügen in den ersten 12 Stunden nach einer Reinigung um über 90 % [22].

Regelmäßiges Vegetationsmanagement entlang der Bahnstrecken wirkt neben dem erhöhten Sturmwurfisiko auch der Schotterbettverschmutzung sowie der potenziellen Sichtbehinderung entgegen. Eine zusätzliche Verringerung des Laubfalls kann erzielt werden, indem bestimmte Baumarten entlang der Strecken entfernt werden [23]. Eine alternative Oberbauform wie die der Festen Fahrbahn eignet sich ebenfalls, um das Problem der Schotterbettverschmutzung zu lösen, da zur Fixierung der Schwellen bzw. Schienen Beton oder Asphalt anstelle von Schotter verwendet wird [7].

4. Fazit und Ausblick

Extremwetterereignisse können Schienenverkehrsstrecken aufgrund ihrer wetterexponierten Lage auf verschiedene Arten beschädigen. Dadurch ausgelöste Folgen wie Entgleisungen und Streckensperrungen verursachen nicht nur materielle und finanzielle Schäden, sondern stellen auch ein hohes Sicherheitsrisiko für das Personal und die Reisenden dar.

Als Reaktion auf bestimmte Witterungssituationen werden in vielen Ländern Geschwindigkeitsbegrenzungen angeordnet, die jedoch hohe Verspätungen verur-

sachen und angesichts der Zunahme an Wetterextremen nicht wirtschaftlich sind [24]. Alternative Gegenmaßnahmen, die dauerhaft vor den Auswirkungen potenzieller Extremwetterereignisse schützen, sind in jedem Fall zu favorisieren. Des Weiteren sind präventive Gegenmaßnahmen den reaktiven vorzuziehen, da dadurch Unterbrechungen, Sicherheitsrisiken und kostenintensive Reparaturen im Vorhinein vermieden werden. Dennoch können einige reaktive Maßnahmen wie aufblasbare Dämme sinnvolle Ergänzungen sein, um Risiken zusätzlich zu mindern. Zudem hat sich gezeigt, dass regelmäßige und gründlich durchgeführte Instandhaltungsarbeiten entlang der Schienenverkehrsstrecken eine wirkungsvolle und kostengünstige Maßnahme sind, um Schäden an diesen zu vermeiden. Unter Berücksichtigung der Zunahme an Extremwetterereignissen ist eine Verkürzung der Instandhaltungsintervalle empfehlenswert.

Oftmals lässt sich keine pauschale Aussage darüber treffen, welche der verfügbaren Gegenmaßnahmen am besten geeignet ist. Der Einsatz ist stark vom Standort, den verfügbaren Finanzmitteln und den Klimaprognosen für die entsprechende Region abhängig. Um die Durchführung von Anpassungsmaßnahmen effizient zu gestalten, ist die Entwicklung von Priorisierungsstrategien angebracht. Auf Grundlage von extremwetterspezifischen Risikokarten können Streckenabschnitte identifiziert werden, die besonders vulnerabel gegenüber den Auswirkungen der Wetterextreme sind und wo folglich akuter Handlungsbedarf besteht. Monitoring-Systeme eignen sich ebenfalls, um gefährdete Streckenabschnitte ausfindig zu machen.

Zusammenfassend bestehen bereits diverse individuelle Lösungsansätze zur Minimierung lokaler klimatischer Problemstellungen. Viele dieser Strategien befinden sich noch in der Forschungsphase und werden erst in den kommenden Jahren ihr Potenzial zur Verhinderung von Schäden

Präventive Gegenmaßnahmen sind den reaktiven vorzuziehen, da dadurch Unterbrechungen und kostenintensive Reparaturen im Vorhinein vermieden werden.

an Schienenverkehrsstrecken aufzeigen. Ein globaler Lösungsansatz, der mehrere Aspekte der klimatischen Veränderungen gleichzeitig berücksichtigt, ist bisher noch nicht zu erkennen. Dieser sogenannte Multi-Hazard-Ansatz wird im Hinblick auf die erwarteten Klimaveränderungen notwendig, um den Schienenverkehr ganzheitlich gegenüber den Folgen von Extremwetterereignissen abzusichern [11]. Auch wenn die zukünftigen Klimaszenarien großen Unsicherheiten unterliegen sind und die tatsächlichen Auswirkungen stark davon abhängen, wie schnell die Menschheit die Treibhausgasemissionen senken kann, sind Anpassungsmaßnahmen zwingend erforderlich, um auch in Zukunft einen reibungslosen und sicheren Betriebsablauf gewährleisten zu können. ●

Literatur

- [1] DB AG: Zerstörungen in historischem Ausmaß: DB zieht nach Flutkatastrophe Zwischenbilanz, 2021, https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Zerstoeuerungen-in-historischem-Ausmass-DB-zieht-nach-Flutkatastrophe-Zwischenbilanz-6868360 [Zugriff am: 04.05.2022].
- [2] Rahmstorf, S.; Schellnhuber, H.-J.: Der Klimawandel – Diagnose, Prognose, Therapie. Verlag C.H. Beck, Beck'sche Reihe, C.H. Beck, München, 2019.
- [3] RSSB: Safety Implications of Weather, Climate and Climate Change: Final Report. Rail Safety & Standards Board; AEA Technology, 2004.
- [4] Palin, E.J.; Thornton, H.E.; Mathison, C.T. et al.: Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. In: Climatic Change (2013), Heft 120, S. 71-93.
- [5] DB AG: Neues Ziel 2040: Die Deutsche Bahn wird zehn Jahre früher klimaneutral, 2021, https://www.deutschebahn.com/de/presse/suche_Medienpakete/medienpaket_klimaschutzziel-1201550?qli=true&1.=1176054&pageNum=0&contentId=1204722 [Zugriff am: 08.05.2022].
- [6] Federal Railroad Administration: Rail Temperature Control System for Improved Railway Safety. In: Research Results 18-15 (2018).
- [7] Jänsch, E.; Lang, H.P.; Nießen, N. (Hrsg.): Handbuch Das System Bahn, Edition Eurail Press, PMC Media House GmbH, Leverkusen, 2021.
- [8] Gremmler Bauchemie GmbH: Schotterverklebung im Gleisbau, 2021, https://www.gremmler.de/fileadmin/tdb_englisch/Flyer_Schotterverklebung_D_LoRes.pdf [Zugriff am: 08.05.2022].
- [9] PFISTERER Holding AG: TENSOREX C+ Federnachspannsystem für Oberleitungen elektrischer Bahnen, 2018, <https://www.pfisterer.com/fileadmin/pfisterer/downloads/TENSOREX-C-PI-DE.pdf> [Zugriff am: 08.05.2022].
- [10] Fendrich, L.; Fengler, W. (Hrsg.): Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Springer Vieweg, Berlin, 2019.
- [11] Palin, E.J.; Stipanovic Oslakovic, I.; Gavin, K. et al.: Implications of climate change for railway infrastructure. In: WIREs Climate Change 12 (2021), Heft 5.
- [12] Weisemann, U.; Klügel, S.; Grischek, T.: Beurteilung der Bemessung von Gleisentwässerungseinrichtungen und Durchlässen von Fließgewässern. EBA Forschungsbericht 2019-05. Eisenbahn-Bundesamt, Bonn, 2019.
- [13] Network Rail: Railway at Devon geared up to combat extreme weather, 2013, <https://www.networkrailmediacentre.co.uk/news/railway-at-devon-geared-up-to-combat-extreme-weather> [Zugriff am: 18.05.2022].
- [14] Sosa, E.M.; Thompson, G.J.; Holter, G.M. et al.: Large-scale inflatable structures for tunnel protection: a review of the Resilient Tunnel Plug project. In: Journal of Infrastructure Preservation and Resilience (2020), 1:11.
- [15] DB AG: Vegetationsmanagement an Bahntrassen der Deutschen Bahn AG in Niedersachsen, 2019.
- [16] AEG: 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.
- [17] Kostianaia, E.A.; Kostianoy, A.G.; Scheglov, M.A. et al.: Impact of Regional Climate Change on the Infrastructure and Operability of Railway Transport. In: Transport and Telecommunication Journal 22 (2021), Heft 2, S. 183-195.
- [18] Network Rail: Dawlish Sea Wall - Section Two: Frequently Asked Questions, 2020, <https://www.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2020/06/Dawlish-Sea-Wall-section-2-FAQs.pdf> [Zugriff am: 18.05.2022].
- [19] Daron, J.: Challenges in using a Robust Decision Making approach to guide climate change adaptation in South Africa. In: Climatic Change 132 (2015), Heft 3, S. 459-473.
- [20] British Steel: Zinoco Corrosion Protection, 2022, <https://britishsteel.co.uk/what-we-do/rail/zinoco/the-need-for-corrosion-protection/> [Zugriff am: 18.05.2022].
- [21] Network Rail: Leaves, 2019, <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/delays-explained/leaves/> [Zugriff am: 18.05.2022].
- [22] Europäische Kommission: LaserTrain: Schmutzabseitung von Eisenbahnschienen mithilfe von Laser, 2020, <https://cordis.europa.eu/article/id/422422-using-lasers-to-clear-debris-from-railroad-tracks/de> [Zugriff am: 18.05.2022].
- [23] Network Rail: Vegetation management, 2022, <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/vegetation-management/> [Zugriff am: 18.05.2022].
- [24] Nemry, F.; Demirel, H.: Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012.

Summary

Climate adaption measures at rail roads

As climate change proceeds, extreme weather events will become more frequent. These also have an impact on rail transport infrastructure and may lead to availability restrictions. This article highlights the potential consequences of these extreme weather events on Central European rail transport lines and provides an overview on possible preventive and reactive measures to avoid infrastructure failures.