

Emissionsfreier Bahnbau: Ökonomisch und ökologisch nachhaltig

Nachhaltigkeitsziele treten auch im Bahnbau in den Vordergrund und verändern das Umfeld, in dem Unternehmen aktiv sind. Seit mittlerweile zehn Jahren arbeitet Plasser & Theurer an Gleisbaumaschinen mit alternativen Antrieben. Neben Leistung und Wirtschaftlichkeit ist ökologische Zukunftssicherheit ein Hauptaspekt, den Betreiber der Maschinen als zentrales Entscheidungs- und Bewertungskriterium für neue Fahrzeuge heranziehen.



Der grüne Weg

Der Übergang vom mechanischen zum hydraulischen Stopfantrieb war vor 70 Jahren ein wichtiger Meilenstein in der Gleislagebearbeitung. Durch das asynchrone Stopfprinzip konnten erstmals Wirkungsgrade von etwa 70 % erreicht werden. Diese Grundidee wurde im Hause Plasser & Theurer über die Jahrzehnte kontinuierlich weiterentwickelt, um die Effizienz des Stopfeinsatzes weiter zu steigern. Dabei sind die kontinuierliche Arbeitsweise oder die Drehzahlregelung bei Stopfaggregaten wesentliche Meilensteine. Der Energiebedarf sinkt durch den Einsatz der kontinuierlichen Arbeitsweise, da nur mehr 20 % der Maschinenmasse bei jedem Stopf-

eingriff gebremst und wieder beschleunigt werden müssen. Drehzahlregelungen bei Stopfaggregaten machen die Arbeitseinätze leiser und effizienter.

Ein weiterer bedeutender Schritt in der jüngeren Vergangenheit war der Übergang zu elektrischen Antrieben. Um den CO₂-Fußabdruck im Bahnbau zu reduzieren, wurden beginnend mit den 2010er-Jahren Stromabnehmer und elektrische Komponenten in das Antriebssystem integriert. Diese Entwicklung eröffnete die Option, Bahnstrom aus der Oberleitung als Energiequelle zu nutzen. Zum Dieselmotor, der dem hydraulischen Antriebssystem Energie liefert, kam ein Elektromotor, der durch Bahnstrom über Dachgarten, Transformator und Stromrichter versorgt



Dipl.-Ing. Markus Jürgen Buchner
Produktmanagement
Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen
markus.buchner@plassertheurer.com



Ing. Marc Demml
Produktmanager für Stopfmaschinen, Stabilisatoren und Schotterpflüge
Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen
marc.demml@plassertheurer.com



Simon Misar
Kampagnenleiter Nachhaltigkeit und Ökologie
Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen
simon.misar@plassertheurer.com

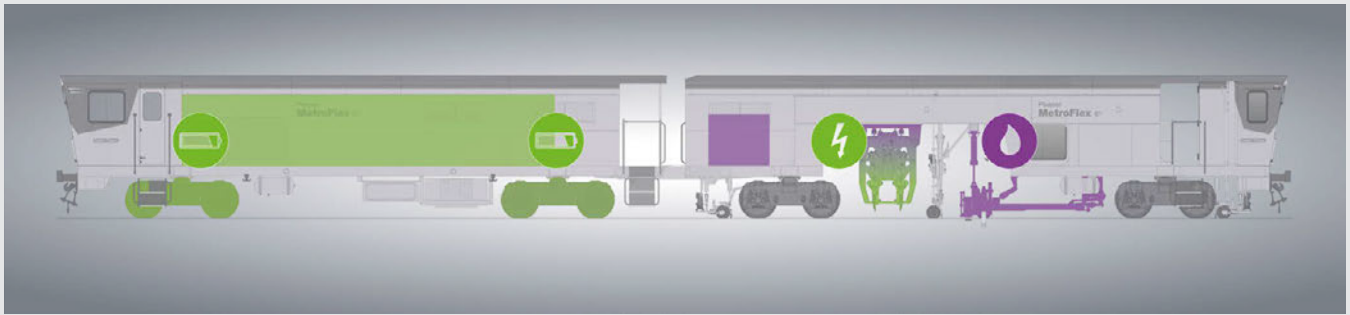
EMISSIONSFREIE GLEISDURCHARBEITUNG - DER WEG ZUM ZIEL

- Hydraulische Arbeitsaggregate mit Drehzahlregelung** reduzieren Lärm und erhöhen die Standzeit
- +30 % Leistungssteigerung** durch kontinuierliche Arbeitsweise und bis zu +40 % durch Mehr-Schwellen-Stopftechnologie
- Elektrisches Fahren und Arbeiten** durch hybride Antriebstechnik spart über den Lebenszyklus bis zu 3 Mio Euro und 400 t CO₂ pro Jahr und reduziert Lärm um 20 dB(A)
- Geringere Lärmemissionen, gesteigerter Gesamtwirkungsgrad** und bis zu 40 % reduzierter Treibstoffverbrauch durch elektrifizierte Stopfaggregate
- Vollständig CO₂-neutrales Fahren und Arbeiten** mit vollelektrisch angetriebenen Maschinen und Aggregaten

1: Stufen zur emissionsfreien Gleisdurcharbeitung

wird. Dies war die erste Evolutionsstufe der E³-Technologie.

Danach erfolgte die konsequente Weiterentwicklung zum vollelektrischen System, das durch signifikante Reduktion der Hydrauliksysteme einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 83% ermöglicht. Alle relevanten rotatorischen Verbraucher werden dabei vom hydraulischen auf elektrischen Antrieb umgestellt. Dazu zählen der Fahr-antrieb für die elektrischen Triebdrehgestelle, die Antriebe der Arbeitsaggregate wie Vibrationsantrieb der Stopfaggregate



2: Antriebskonzept einer elektrischen Stopmaschine für Metros mit Batterieanhänger und signifikant reduziertem Hydrauliksystem

und Dynamischer Gleisstabilisator sowie die elektrische Satelliten-Vorfahrt der kontinuierlich arbeitenden Stopfmaschinen. Dieses Antriebskonzept verfügt neben der Energieversorgung über die Oberleitung noch über einen zusätzlichen dieselektrischen Antriebszweig, mit dem die Maschine auf nicht-elektrifizierten Strecken oder bei abgeschalteter Oberleitung fahren und arbeiten kann.

Maschinen bestehender Flotten können durch Öko-Retrofits mit elektrischen Stopfaggregaten ausgestattet werden, um durch Senkung der Motordrehzahl Lärmemissionen, CO₂-Ausstoß und Treibstoffverbrauch zu reduzieren.

Im Bereich von Oberbauwagen und Maschinen für den Oberleitungsbau erhielt der elektrische Antrieb mit dem Einsatz von modernen Batteriesystemen eine weitere Energiequelle. Durch die Entwicklung des trimodalen Antriebskonzeptes arbeiten Maschinen der Plasser Crafter E³-Serie ausschließlich elektrisch. Bei Fahrten zum Einsatzort liefert die Oberleitung den Strom, im Arbeitseinsatz ein Batteriesystem. Ein dieselektrisches Powerpack ist zusätzlich als Rückfallebene vorhanden. Es kann auch umweltfreundlich mit alternativen Kraftstoffen wie HVO100 betrieben werden. [1]

Batteriebetriebene Stopmaschine

In Tunneln ist schadstofffreies Arbeiten besonders wichtig, um die Arbeitssicherheit zu verbessern, gesundheitliche Risiken zu minimieren und den Arbeitsplatz attraktiver zu gestalten. Emissionen von Baumaschinen haben in Tunneln verstärkte Auswirkungen, da Schall reflektiert wird und die Belüftung begrenzt ist, was besonders auf den Arbeitsbereich von U-Bahnen zutrifft. Dies hat ein europäischer Personenverkehrsbetreiber erkannt und darauf

aufbauend eine Ausschreibung für neue Stopfmaschinen veröffentlicht, bei der die Verwendung von Verbrennungsmotoren bei der Arbeit komplett untersagt ist.

Lokal emissionsfreies Antriebskonzept mit höchster Effizienz

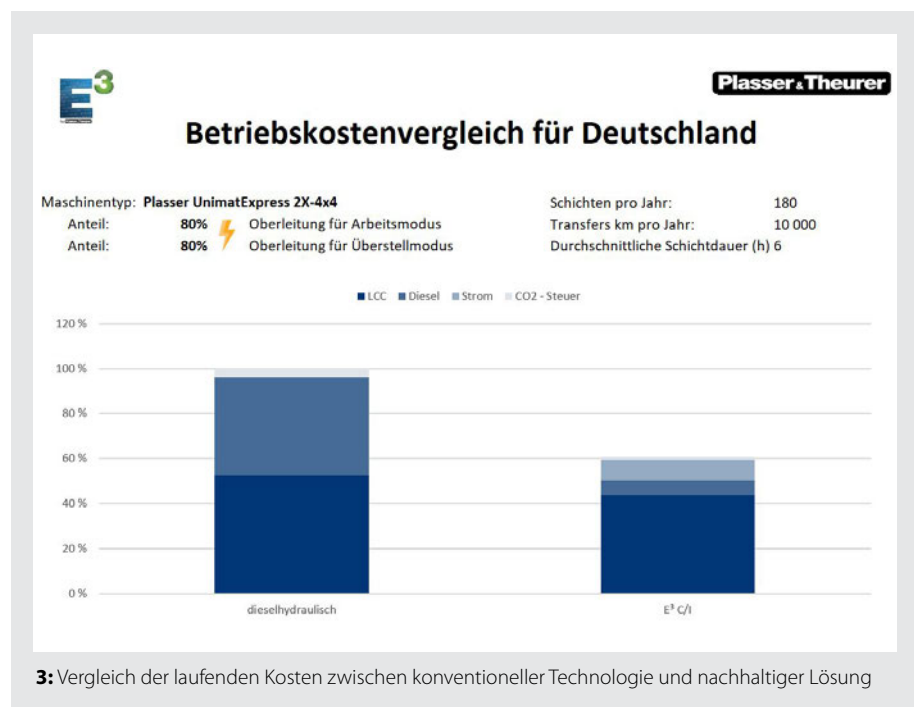
Die Forderung nach einem Antrieb ohne Verbrennungsmotor wirft sofort die Frage nach einer geeigneten Energiequelle auf. Die beste Entscheidung ist ein vollelektrischer Hybridantrieb. [2]

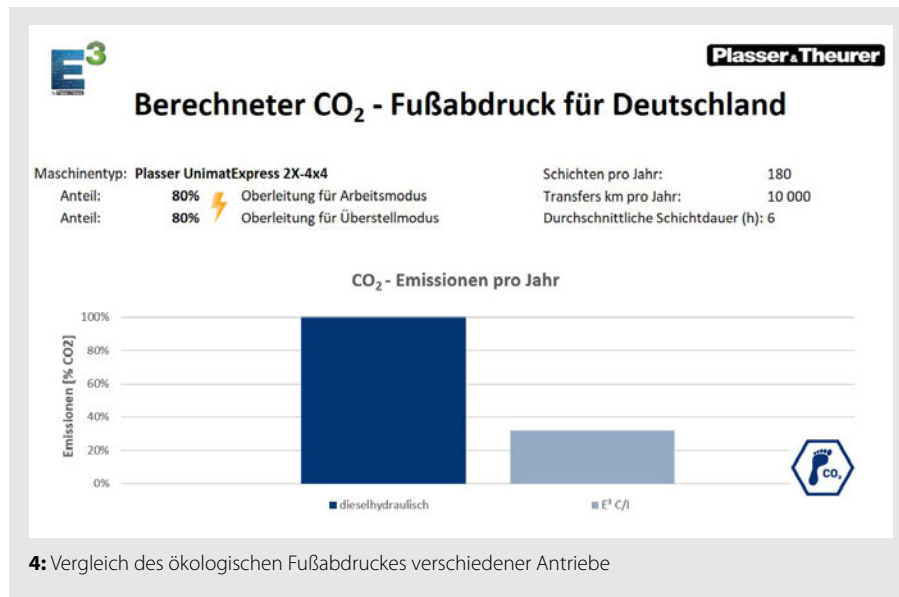
Zu diesem Ergebnis kommt auch die Studie „Assessment and Recommendations for a Fossil Free Future for Track Work Machinery“ (Landgraf, 2021), in der für dieses Einsatzszenario eine Kombination aus Oberleitung und Batterie empfohlen

wird. [3] Die Wahl eines hybriden Antriebskonzeptes ist in diesem Fall auch deshalb zwingend, da aus Sicherheitsgründen die stromführende dritte Schiene bei Arbeiten stromlos geschaltet sein muss.

Die Verwendung eines Wasserstoffkonzeptes wurde kurz in Betracht gezogen, jedoch aufgrund zahlreicher Nachteile gegenüber Alternativkonzepten verworfen. Ein entscheidender Grund war neben der aktuell unzureichenden Infrastruktur das ungünstige Kosten-Nutzen-Verhältnis in Bezug auf Nachhaltigkeit im Vergleich zum Szenario mit batterieelektrischem Betrieb.

Da der Fahrgastbetrieb der U-Bahn in der Regel von ca. 5:30 Uhr morgens bis 1:00 Uhr nachts läuft, sind die verfügbaren Zeitfenster für die Instandhaltung nur kurz. Ein batteriebetriebenes Antriebskonzept





kann hier seine Vorzüge ausspielen, da das Verhältnis von benötigter Energie (Batteriekapazität) und vorhandener Ladezeit es ermöglicht, dass die Maschine tagsüber zwischen den Einsätzen problemlos geladen werden kann.

Das Antriebskonzept ist schematisch in Bild 2 dargestellt und zeigt ein System, das über mehrere Möglichkeiten verfügt, die Batterien zu laden. Zum schnellen Laden kann die Leistung direkt von der dritten Schiene über den Stromrichter zum Batteriesystem geleitet werden. [4] Ein geeignetes BTMS (Battery Thermal Management System) hält dabei die Betriebsparameter in einem geeigneten Rahmen, was die geforderte Lebensdauer der Batterien positiv beeinflusst.

Als weitere Möglichkeit bietet die Maschine auch eine 3 x 400 V-AC-Ladeschnittstelle an. Diese ist für eine Erhaltungsladung oder bei längerem Stillstand auch für ein Nachladen der Batterien geeignet.

Um den ökologischen Fußabdruck noch weiter zu reduzieren, verfügt die Maschine neben der mechanischen Bremse über die Möglichkeit, verschleißfrei elektrisch zu bremsen. Dadurch werden zum einen direkte Emissionen in Form von Wärme, Lärm und Bremsstaub reduziert, zum anderen kann die Bremsenergie bei geeigneten Randbedingungen ins Netz oder in die Batterie zurückgespeist werden.

Neben weiteren projektspezifischen Innovationen hebt dieses Maschinenkonzept im Bereich Nachhaltigkeit und CO₂-Reduktion den neuen Standard von Stopfmaschinen auf ein höheres Level.

Neue Technologien erfordern ganzheitliche Kostentransparenz

Um den Betreibern von Maschinen die Möglichkeit für eine langfristige Perspektive auf ihre Investitionsentscheidung zu geben, werden Total Cost of Ownership-Berechnungen (TCO) angestellt. Gleichzeitig wird neben dem ökonomischen Aspekt auch dem CO₂-Ausstoß im Betrieb durch transparente Darstellung mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Das Ziel ist, ökonomische, nachhaltige und ergonomische Lösungen für die Bahn der Zukunft zu liefern.

Basis für Kaufentscheidungen war in der Vergangenheit oftmals der Anschaf-

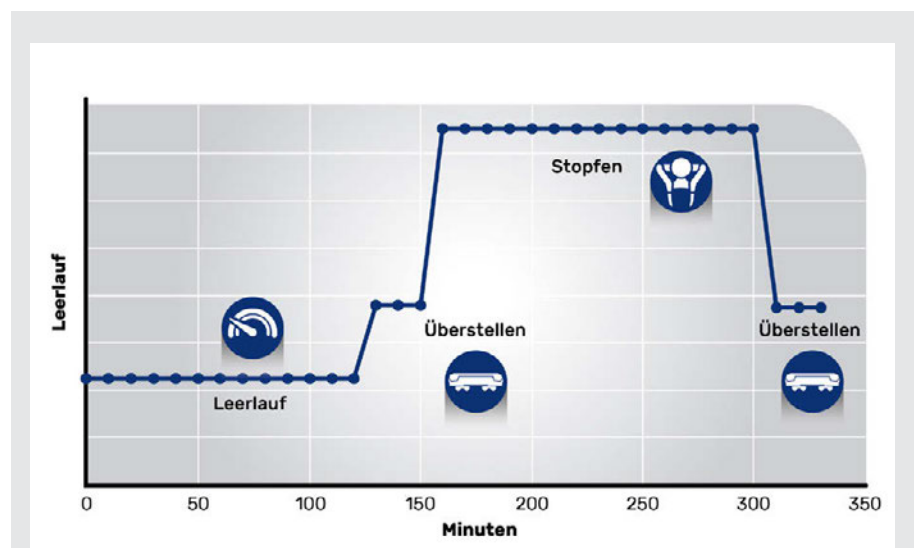
fungspreis einer Gleisbaumaschine, alle weiteren im Produktlebenszyklus entstehenden Kosten hatten untergeordneten Einfluss. Gemeint sind Energiekosten durch Diesel oder Bahnstrom und typische Lebenszykluskosten (LCC), die auch die Wartung einschließen. Immer wichtiger werden in vielen Regionen auch anfallende CO₂-Zertifikatskosten.

Ökologische und wirtschaftliche Vorteile gehen Hand in Hand

Die Potenziale der Nutzung alternativer Antriebe können gut berechnet werden. Der in der Folge vorgestellte TCO-Rechner basiert auf der Kapitalwertmethode, die alle Einzahlungen und Auszahlungen (von der Investition bis zu zukünftigen Zahlungsströmen) durch Abzinsung bewertet.

Die Beispielkalkulation geht von einem Szenario aus, in dem für das Arbeiten und Fahren zu 20% der Verbrennungsmotor und zu 80% elektrische Energie von der Oberleitung verwendet wird, bei 180 Schichten pro Jahr und einer Transferleistung (Fahren von und zur Baustelle) von 10.000 km pro Jahr.

Über einen Beobachtungszeitraum von 20 Jahren fallen durch die Nutzung einer Hybridmaschine E³ C/I rund 40% weniger Kosten für den Betrieb an gegenüber einer dieselhydraulischen Maschine. Diese Einsparungen sind primär auf den reduzierten Energieverbrauch zurückzuführen, ein weiterer Grund sind geringere Life Cycle Costs (LCC). Durch die längeren Wartungsintervalle elektrischer Komponenten können



5: Ein typischer Schichtablauf zeigt Energiesparpotenziale auf

hier signifikante Einsparungspotenziale gehoben werden.

Eine weitere wichtige Information für die Investitionsentscheidung ist die Berechnung des CO₂-Ausstoßes von Maschinen. Der TCO-Rechner bietet diese Möglichkeit und gibt transparent Auskunft über die relativen Einsparungen an CO₂-Emissionen. Diese Betrachtung wird über die Nutzungsdauer der Maschine, das definierte Einsatzprofil und die jeweilige Technologie dargestellt.

Versteckte Potenziale unterschiedlicher Arbeitsweisen

Arbeitsablauf und Einsatzbedingungen von Stopfmaschinen unterscheiden sich erheblich voneinander. Wichtige Kriterien sind dabei:

- Erhaltungsstopfung versus Neulage/Sanierung
- Einzelfehlerbehebung versus Streckenstopfung
- Weiche versus Strecke
- Regionale Spezifika.

Neben den technisch-funktionalen Erfordernissen spielen im Gesamtbild auch gesetzliche Regelungen, Vorschriften und unterschiedliche Vergütungsmodelle eine wichtige Rolle.

Am Beispiel eines möglichen Arbeitsablaufes für eine Weichendurcharbeitung werden in der Folge versteckte Potenziale der E³-Technologie gegenüber konventionellem Antrieb auf Verbrennerbasis aufgezeigt.

Bei einem solchen Arbeitsablauf wird die Stopfmaschine am nächstgelegenen Bahnhof zu Beginn der Schicht startklar gemacht. Dort steht die konventionelle Maschine mit eingeschaltetem Dieseltraktionsmotor, um die Verbraucher zu versorgen. Die Crew bespricht z.B. den Arbeitseinsatz oder nimmt die tägliche Wartung vor. Der zu deckende Leistungsbedarf in dieser Phase ist relativ gering und umfasst vor allem die Nebenverbraucher wie Heizung, Kühlung, Rechner- und Kommunikationssysteme. Eine Dauer von etwa zwei Stunden ist für diese Phase nicht unüblich. In der Folge wird die Maschine zum Arbeitsbereich überstellt und in der Hauptphase die Weiche durchgearbeitet. Am Ende einer Arbeitsschicht wird die Stopfmaschine wieder zum Bahnhof überstellt.

Für das Stopfen selbst wird in Fachpublikationen aufgezeigt, dass vollelektri-

sches Stopfen bis zu 69% weniger Kosten verursacht als das dieselhydraulische Pendant. [5] Bei einer Überstellung mit aufgebügeltem Pantographen kann mit höchster Effizienz nachhaltiger Bahnstrom für die Traktion eingesetzt werden, mit den bekannten Vorteilen einer rein elektrischen Traktion gegenüber einem dieselhydraulischen Antrieb mit seinen inhärent größeren Verlusten.

Bisher noch wenig untersucht wurde die Leerlaufphase der Maschine, die zeitlich im Bereich von 30% der gesamten Einsatzdauer liegt. Der Treibstoffverbrauch beläuft sich auf ca. 7 bis 10% des Gesamtverbrauches pro Arbeitsschicht. In dieser Phase wird bei konventionellem Antrieb der Dieseltraktionsmotor mit ca. 6 bis 15% seiner Nennleistung betrieben, wobei der Wirkungsgrad sehr gering und der spezifische Verbrauch deutlich erhöht ist.

Üblicherweise werden somit 8 bis 15% mehr Kraftstoff pro kWh verbraucht als im optimalen Bereich des Motors. Das Abgassystem wird dadurch stark belastet und erfordert wiederholte aktive Regeneration der Dieselpartikelfilter.

Bei Einsatz der E³-Technologie kann diese Phase rein elektrisch aus der Oberleitung abgedeckt werden. Der Dieselmotor und das Abgassystem werden geschont und die Lärmemissionen deutlich gesenkt, was sich besonders vorteilhaft auswirkt, da die Maschine sich zu dieser Zeit meist in einem Bahnhofsbereich befindet. In einem zukünftigen Szenario kann diese Phase über Batterien versorgt werden, was eine weitere Flexibilisierung bedeutet.

Monetarisierung der Reduktion von CO₂-Emissionen

Für die Vergabe von Gleisinstandhaltung mit mechanisierten Stopf-, Richt- und Nivellierarbeiten werden in Europa zunehmend Forderungen nach emissionsarmen Antrieben gestellt, die als Grundvoraussetzung für die Teilnahme an öffentlichen und teilweise auch privaten Ausschreibungen zu erfüllen sind. In diesem Kontext müssen rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit diese Forderungen umgesetzt werden können.

Ein Mehr an Nachhaltigkeit bedeutet für den Betreiber von Bahnbaumaschinen Zusatzinvestitionen. Diese werden bis zu einem gewissen Grad durch verbesserte Effizienz und geringere LCC-Kosten im Laufe der Zeit wieder erwirtschaftet. Um den Umstieg zu beschleunigen, sind zusätzlich

Anreize erforderlich, um die Reduktion von Umweltauswirkungen auch finanziell zu belohnen.

Ist das Ziel einer Dekarbonisierung ernst gemeint, dürfen sie nicht nur als „weiche Faktoren“ betrachtet werden. [6] •

Literatur

- [1] Adamiczek C., Raffel J.: Grüne Instandhaltungsflotte für Österreichs Bahnnetz. Internationales Verkehrswesen 4 | 2022.
- [2] Folie G.: Potenziale und Grenzen alternativer Antriebe im Gleisbau. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau September 2023 | Nr. 9.
- [3] Zeiner M., Landgraf M., Knabl D., Antony B., Barrena Cárdenas V., Koczwara C.: Assessment and Recommendations for a Fossil Free Future for Track Work Machinery. Sustainability 2021, 13, 11444. <https://doi.org/10.3390/su132011444>.
- [4] Kiessling F., Puschman R., Schmieder A.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen: Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb. John Wiley & Sons, New York 2014. S. 162.
- [5] Radler T., Hofmann L., Koczwara C., Buchner M. J.: Energieeffizient und emissionsarm stopfen. EI - Der Eisenbahningenieur. Januar 2024 | Nr. 1.
- [6] Landgraf M.: Ökologische Aspekte des Systems Bahn. ÖVG Salzburg (2023).

Summary

Emission-free railway construction: economically and ecologically sustainable

The article describes the sustainable evolution of track maintenance machines, focusing on emission-free technologies. The development of alternative drives in railway construction is driving this progress. One highlight is the world's first battery-powered tamping machine. TCO calculations enable a transparent assessment of costs, benefits and CO₂ emissions for investment decisions. Nevertheless, framework conditions are needed in which it is also financially attractive to operate railway construction with the lowest possible environmental impact.