

# Proaktive Magnetfeldtechnologie zur Unfallvermeidung an Baumaschinen

O. Golovina, J. Teizer, F. P. Rauth, M. König

**Zusammenfassung** Obwohl rund 7,5 % aller Erwerbstätigen in der Europäischen Union (EU) im Baugewerbe arbeiten, entfallen auf sie 15 % aller Unfälle und 30 % aller tödlichen Arbeitsunfälle. Baustellen zählen daher zu den gefährlichsten Arbeitsumfeldern mit einer hohen Unfallrate. Besonders beim Einsatz von Baumaschinen existiert ein hohes Risiko, erfasst, schwer verletzt oder sogar getötet zu werden. Trotz Vorschriften ergibt sich durch eine hohe Konzentration von beweglichen Maschinen auf engstem Raum ein schwieriges Arbeitsumfeld. So besteht zum Beispiel die Gefahr, beim Arbeiten von neben sich bewegenden Maschinen eingeklemmt oder überfahren zu werden. Insbesondere menschliche Faktoren spielen eine wesentliche Rolle in der Unfallvermeidung. Zwar gibt es Sicherheitsschulungen und Einweisungskonzepte, sie sind in der Praxis oftmals aber ineffektiv, weil der dynamische Baufortschritt nicht jede mögliche Arbeitssituation planen oder erfassen lässt.

Der Einzug der Digitalisierung im Tunnelbau ermöglicht mittlerweile den Einsatz neuer Technologien, die unter anderem zu einer Erhöhung der Arbeitssicherheit führen können. So lassen sich beispielsweise mithilfe moderner Annäherungs- und Warntechnologie die Arbeiter und Maschinenführer in Echtzeit warnen, wenn sich Personen und Maschinen gefährlich nähern. Auch lassen sich Bewegungsmuster aufzeichnen. Erstellte Berechnungsalgorithmen ermöglichen dann das automatische Ableiten von Detailinformationen zu bisher nicht bekannten Risiken, die dann wiederum Verwendung in einer verbesserten Arbeitsvorbereitung und Sicherheits-schulung finden. Dieser Beitrag beinhaltet im Detail die Forschungsmotivation, ein theoretisch erstelltes Konzept, eine Beschreibung der entwickelten Technologien sowie den Versuchsaufbau und die Ergebnisse zu praxisgerechten Feldversuchen an Baumaschinen im Erdbau und Tunnelbau. Einschränkungen, Chancen eines erfolgreichen Einsatzes der entwickelten Technologien im Tunnelbau sowie Wissensgenerierung und -transfer werden umfassend dargestellt.

## 1 Einleitung

Das Bauwesen zählt zu den gefährlichsten Arbeitsumfeldern mit einer hohen Unfallrate. Weltweit wird von den Fatal Four (engl.) gesprochen, wenn es sich um die vier häufigsten Ursachen handelt, die zu tödlichen Arbeitsunfällen auf Baustellen führen. Diese sind in Deutschland bekannt als Arbeiten in Höhen, Herabfallen und Kippen von Teilen, Maschinenunfälle und Stolpern, Rutschen oder Stürzen [1]. Weitere Brennpunkte sind Elektrounfälle und angefahren oder überfahren werden. In Deutschland werden alle tödlichen Arbeitsunfälle von der Berufsgenossenschaft Bau (BG Bau) untersucht. Allerdings wird durch die BG Bau keine separate Unfallstatistik für Arbeitsunfälle nach Einsatzbereichen, zum Beispiel im Erd-, Straßen-, Hoch- oder Tunnelbau, geführt. Auch sind Unfallberichte aus einer Reihe von Gründen oft nicht detailliert genug, um den Unfallhergang im Detail auswerten zu können und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Im Weiteren sind Datenanalysen oder das Erfassen von Beinahe-Unfällen ein großes, ungeklärtes Problem auf vielen Baustellen.

Im Vergleich zu anderen Industrien existiert in der Bauwirtschaft ein höheres Unfallrisiko, von Maschinen erfasst und verletzt oder getötet zu werden. Das lässt sich damit begründen, dass es kaum ein vergleichbares Bauwerk gibt, bei dem die Herstellung so viele komplexe Anforderungen in Bezug auf Qualität und Sicherheit mit sich bringt [2]. Daher erfasst das Europäische Amt für Statistik tragbare oder ortsveränderliche Maschinen in einer separaten Statistik [3]. Dazu zählen vor allem fahrbare Maschinen, die bei Erdbauarbeiten und im Straßenbau eingesetzt werden. Auch zählen Bagger, Planiertrauben, Grader, Rüttler und ähnliche Baumaschinen dazu. Maschinen bei Tunnel- und Kanalarbeiten, wie zum Beispiel Bohrmaschinen für Erdbauarbeiten und Bitumier- oder Betoniermaschinen, werden ebenfalls erfasst.

Im Tunnelbau, der im Weiteren als Beispiel zur Gefährdungsanalyse herangezogen wird, lassen sich die eingesetzten Maschinen im Wesentlichen den Maschinen oder Geräten für die Erdbewegung (Bagger, Kipper, Lader usw.) zuordnen. In 2016 kam es in Deutschland zu 1 938 meldepflichtigen und zu zwölf tödlichen Unfällen in der Kategorie „Maschinen oder Geräten für die Erdbewegung“ [4]. Dabei handelt es sich um eine Unterkategorie der „Maschinen zur Rohstoffgewinnung und für Erdarbeiten“, wo es in 2016 in Summe zu 3 901 meldepflichtigen und 15 tödlichen Arbeitsunfällen kam. Dieser Vergleich zeigt, dass bei vier weiteren Kategorien (Vorrichtung für Sondierungs- und Bohrarbeiten, Rüttler, Maschinen und Geräte für Straßenbau und unterhalt sowie Herstellung und Verlegung von Beton) das Unfallrisiko mit Maschinen für die Erdbewegung mit Abstand am größten ist. Des Weiteren lässt sich festhalten, dass das Risiko für einen tödlichen Arbeitsunfall mit einer Maschine für die Erdbewegung im Vergleich zu Maschinen anderer Kategorien deutlich größer ist [4]. Aufgrund der Tatsache, dass sich in den vergangenen Jahren die Unfall-

**Dipl.-Ing. Olga Golovina**

olga.golovina@rub.de

**Dr.-Ing. Jochen Teizer**

jochen.teizer@rub.de

**M. Sc. Florian P. Rauth**

florian.rauth@rub.de

**Prof. Dr.-Ing. Markus König**

koenig@inf.bi.rub.de

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen

Universitätsstraße 150, 44801 Bochum

www.inf.bi.ruhr-uni-bochum.de

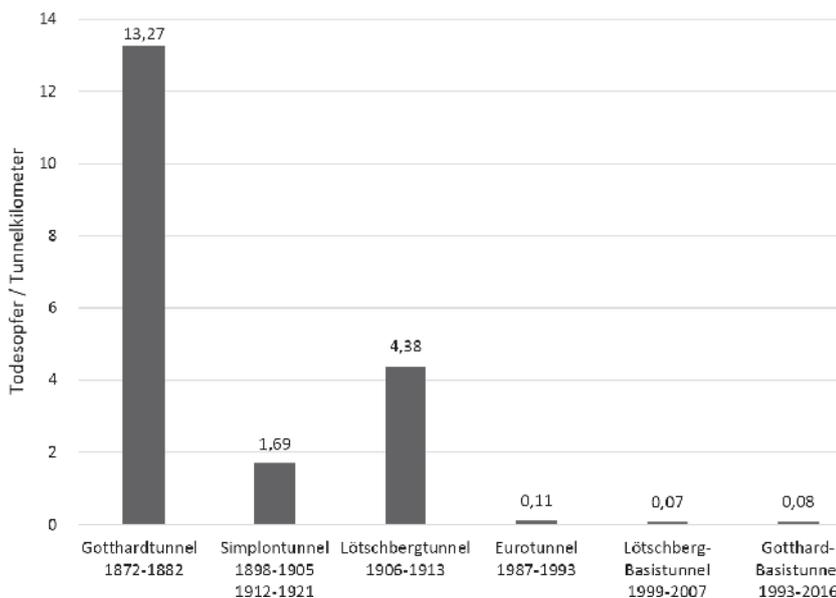


Bild 1. Statistik zu tödlichen Arbeitsunfällen im Tunnelbau bekannter Projekte

statistiken insbesondere in Bezug auf Baumaschinen nicht immer positiv entwickelten [5], leitet sich die Forschungsmotivation der vorgestellten Arbeit ab.

## 2 Historie

Die historische Betrachtung auf den Aspekt der Arbeitssicherheit im Tunnelbau zeigt, dass durch die Weiterentwicklung der Technik und wachsende Sensibilität für das Thema Arbeitssicherheit die Anzahl an tödlichen Arbeitsunfällen reduziert werden konnte. Dabei wurden gerade in den letzten 20 Jahren hinsichtlich Automatisierung und Umweltverträglichkeit wesentliche Fortschritte in den Bauprozessen erzielt. Dadurch werden heutzutage viele Arbeiten mithilfe von Maschinen durchgeführt und sind nicht mehr so stark von Handarbeit geprägt wie früher. Was zur Folge hat, dass die Arbeitsbedingungen zum Teil einfacher geworden sind und die Arbeit nicht mehr so gefährlich ist [6]. Diese Entwicklung lässt sich anhand einer Statistik zu den tödlichen Arbeitsunfällen bei bekannten Tunnelprojekten darstellen [7]. Die Auswertung in **Bild 1** zeigt, dass die Zahl der tödlichen Arbeitsunfälle im Tunnelbau signifikant reduziert werden konnte. Auf der horizontalen Achse in **Bild 1** sind sechs Tunnelprojekte chronologisch nach Fertigstellungsdatum mit der entsprechenden Anzahl an tödlichen Arbeitsunfällen pro aufgefahretem Tunnelkilometer dargestellt. In der Berechnung wurde die Anzahl der Tunnelröhren, aber keine Servicetunnels, berücksichtigt. So war es bei den ersten drei Projekten die traurige Wahrheit, dass zwischen 64 und 199 Personen zu Tode gekommen sind. Im Vergleich dazu zeigen die nicht so weit zurückliegenden Projekte, dass die Anzahl an tödlichen Arbeitsunfällen deutlich reduziert werden konnte. So sind bei den zwischen 1987 und 2016 entstandenen Projekten zwischen fünf und elf Personen zu Tode gekommen [7]. Bei dieser Betrachtung sollte jedoch unbedingt berücksichtigt werden, dass jeder einzelne Todesfall einer zu viel ist. Heutzutage ist die Anzahl der Arbeiter im Tunnelbau ebenso gesunken wie im gleichen Zeitraum der Maschineneinsatz gestiegen ist. Historische Vergleiche sind daher nur bedingt aussagekräftig, auch weil aussagekräftige Statistiken im Arbeitsschutz am

geeignetsten mit Unfall pro geleistete Arbeitsstunde erstellt werden sollten. Dazu fehlt allerdings die Datengrundlage.

Durch Gesetze, Regulierungen und die stetige Weiterentwicklung der Tunnelbautechnik kommt es zwangsläufig zu immer höheren Anforderungen an die Sicherheit im Tunnelbau. Eine Gefährdungsbeurteilung und Risikoanalyse sollte bereits beim Projektentwurf durch den Auftraggeber beginnen und durch den Auftragnehmer an alle Beteiligten vermittelt werden. Dabei hat aus Sicht des Auftragnehmers die Sicherheit des angestellten Personals im Tunnel oberste Priorität, wohingegen der Anschein entsteht, dass für den Bauherrn die nachhaltige Sicherheit des Bauwerks im Vordergrund steht. Hinzu kommt, dass sich Bauherren durch knappe Budgets veranlasst sehen, die Dauer für die Realisierung von Tunnelbauwerken auf ein Minimum zu reduzieren. Dieser Aspekt bezieht sich sowohl auf die Planung als auch

auf die Bauausführung. Somit entsteht der Eindruck, dass der Faktor Zeit eines Bauprojekts eine überragende Rolle spielt. Eine Reduzierung des Zeitaufwands kann damit zu einer unausweichlichen Erhöhung des Sicherheitsrisikos führen [2].

## 3 Gefahren im Tunnelbau

Die Liste der Gefahren, denen Personen im Tunnelbau ausgesetzt sind, ist lang. An oberster Stelle stehen Unfälle mit Baumaschinen. Gerade im konventionellen Tunnelbau besteht eine hohe Konzentration von beweglichen Maschinen auf engstem Raum. Neben dem hohen Unfallrisiko mit Baumaschinen bestehen im Tunnelbau noch weitere Risiken, wie zum Beispiel das Risiko von Gesteinsniederbrüchen oder Tunnelbränden mit starker Rauchentwicklung. Für das Personal im Tunnel können durch Quarzstaub, Rußpartikel aus Dieselmotoren, Sprengschwaden, Bauchemikalien, Lärm, Vibrationen sowie körperliche Beanspruchung und Schichtarbeit weitere Gefahren entstehen [7]. Auf Letztere wird in diesem Beitrag nicht näher eingegangen.

Bewegliche Maschinen werden im Tunnelbau an verschiedenen Stellen eingesetzt. Dabei wird zwischen den Einsatzszenarien unterschieden. Diese sind unter anderem Verkehrswege zum Arbeitsplatz, Ausbruch und Sichern des Gebirges, Transport von Ausbruchmaterial, Einbringen von Materialien und Installation von Signalanlagen. Einige dieser Gefahrenquellen werden nun im Detail beschrieben.

Bei unachtsamem Verhalten im Tunnel seitens Maschinenführer und Personen am Boden besteht die Gefahr, beim Erreichen des Einsatzorts im Tunnel zu Fuß von beweglichen Maschinen erfasst und überfahren zu werden. Des Weiteren kommt es im Tunnelbau immer noch vor, dass Personen auf Baumaschinen transportiert werden. So werden beispielsweise Arbeiter in der Schaufel eines Radladers befördert oder dessen Schaufel als notdürftige Bühne zum händischen Beräumen des Abschlags verwendet. Dabei besteht die Gefahr abzustürzen und von der Maschine überfahren oder an der Tunnelwand eingequetscht zu werden, unabhängig davon, dass solche Beförderungsarten strengstens verboten sind. Für Personen im Sohlbereich besteht



Bild 2. Eingeschränkte Sichtverhältnisse im Tunnelbau

die Gefahr beim Lösen von Gestein an der Ortsbrust, von Steinen getroffen zu werden. Das Gleiche gilt für den Ankereinbau, den Einbau von Ausbaubögen und das Anbringen von Bewehrungsmatten an der Tunnelwand.

Im Zuge des Vortriebs und dem händischen Bohren von Sprenglöchern besteht die Gefahr, bei einem nicht ausreichend festen Stand, auszurutschen und zu stürzen. Zusätzlich besteht bei nicht ausreichender Schutzausrüstung das Risiko, durch Lärm und Staub, der durch das Bohren entsteht, langfristige Gesundheitsschäden davonzutragen, ebenso beim Bohren mittels Bohrwagen. Für Personen, die sich zwischen Bohrwagen und Ortsbrust aufhalten, besteht das Risiko, von einer Bohrlafette erfasst und so umgestoßen oder eingequetscht zu werden. Zusätzlich besteht beim Bewegen des Bohrwagens das Risiko, durch schlechte Sichtverhältnisse vom Maschinenführer übersehen und so überfahren zu werden (**Bild 2**). Beim Bohren und Laden der Sprenglöcher besteht für die Arbeiter an der Ortsbrust die Gefahr, durch ein unabsichtliches Anbohren von Sprengladungen eine Detonation auszulösen. Beim Laden der Sprenglöcher im Firstbereich der Ortsbrust mittels Leiter besteht das Risiko, dass die Leiter bei nicht ausreichend festem Stand oder durch das Berühren mittels Bohrwagen umgestoßen wird.

Nach dem Laden der Bohrlöcher und Räumen der Ortsbrust von Personen und beweglichen Maschinen erfolgt das Sprengen. Beim Sprengvorgang besteht für das Personal bei einem nicht ausreichenden Sicherheitsabstand die Gefahr, von weggeschleuderten Steinen getroffen zu werden. Ebenso besteht durch die entstandenen Sprengschwaden das Risiko, sich zu vergiften, wenn nicht ausreichend Frischluft an die Ortsbrust geblasen wurde. Beim Nachprofilieren nach dem Sprengvorgang oder einem reinen Baggervortrieb herrscht ein sehr hohes Unfallrisiko, das von dem sich bewegenden Bagger ausgeht. Für Personen besteht so die Gefahr, bei einem Übersehen durch den Maschinenführer eingequetscht oder überfahren zu werden. In **Bild 3** ist eine solche Gefahrensituation dargestellt. Dabei werden besonders die beengten Platzverhältnisse und die Unübersichtlichkeit deutlich.

Rechts in Bild 3 ist eine Person zu erkennen, die nicht direkt vom Maschinenführer gesehen werden kann und sich in einem sehr nahen Abstand zwischen beweglichem Bagger und Tunnelwand aufhält. Der sogenannte tote Winkel ist abhängig vom Maschinentyp. In diesem Raum besteht ein besonders hohes Risiko, nicht gesehen zu werden und so



Bild 3. Tunnelbagger und Personen am Boden an der Ortsbrust

bei einem Drehen oder Zurücksetzen der Maschine nicht bemerkt und überfahren oder zerquetscht zu werden.

Beim Abtransport von Ausbruchmaterial, beispielsweise in der Ladezone, besteht ein signifikantes Risiko für das Personal, von den Maschinenführern durch die Unübersichtlichkeit in den Maschinen nicht erkannt und von einem Radlader oder Dumper erfasst zu werden. Personen zwischen zwei Maschinen oder zwischen der Maschine und der Tunnelwand können damit sehr leicht eingequetscht werden. Solche Unfälle enden oft tödlich. Verletzungen gibt es selten zu beobachten. Zusätzlich besteht durch herabfallende Steine von den Maschinen die Gefahr, getroffen zu werden. Das gilt auch für Arbeitsplätze, die sich entlang der Strecke des Materialabtransports für die Dumper befinden. Durch Unachtsamkeit von Maschinenführer oder Arbeiter besteht dort die Gefahr, von herabfallendem Material getroffen oder von der Maschine überfahren zu werden. Ein erhebliches Gesundheitsrisiko ist auch bei nicht ausreichendem Schutz vor Staub und Lärm gegeben.

Ein weiteres signifikantes Unfallrisiko besteht beim Wenden und Rückwärtsfahren der großen Maschinen innerhalb und außerhalb des zu erstellenden Tunnelbauwerks. Weil das Rückwärtsfahren in regelmäßigen Abständen, zum Beispiel beim Wechsel der unterschiedlichen Vortriebsmaschinen, auftritt, ist die Gewohnheit an sich wechselnde Arbeitsbedingungen eine Ursache für Unfälle. In **Bild 4** ist beispielhaft ein Tunnellader gezeigt, der im Lade- und Entladevorgang häufig in beengten Platzverhältnissen rückwärtsfahren muss.

Zuletzt wird auf den Einbau von Spritzbeton eingegangen. In **Bild 5** ist ein Betonmischer zu sehen, der von einem Mineur eingewiesen wird, um so den richtigen Abstand zum danebenstehenden Spritzmobil zu gewährleisten. Dabei muss sich der Maschinenführer voll auf den Einweiser verlassen, da er keinen direkten Sichtkontakt nach hinten hat. Einweisende Personen sind damit einem besonders hohen Risiko ausgesetzt, überfahren zu werden.

Beim Aufbringen des Spritzbetons besteht die Gefahr, dass sich größere Brocken Spritzbeton von der Tunnelwand lösen und den Maschinenführer treffen, wenn nicht ein entsprechender Sicherheitsabstand eingehalten wird. Ebenso kommt es beim Aufbringen des Betons, der mit einem sehr hohen Druck aus der Düse an die Tunnelwand aufgebracht wird, zu einem Rückprall, der sich nicht vermeiden lässt.



Bild 4. Dimensionen eines Tunnelladers



Bild 6. Vermessungsarbeiten in einem Querstollen als Gefahrenquelle



Bild 5. Einweisung eines Betonmischers beim Rückwärtsfahren

Wie auch nach dem Sprengen, kommt es in diesem Arbeitsschritt zu einer stärkeren Staubentwicklung und Betonzusätze werden freigesetzt, die die Atemwege schädigen können. Von der Maschine geht die Gefahr vom Roboterarm aus, der bei falscher Bedienung Personen, die sich im Gefahrenbereich aufhalten, einquetschen kann. Auch von den Förderschläuchen kann eine Gefahr ausgehen, wenn sie platzen und sich Personen in unmittelbarer Nähe aufhalten. Beim Reinigen des Spritzmobils ist besonders darauf zu achten, sich nicht die Hände bei laufender Maschine einzquetschen. Ebenso geht ein Risiko vom alkalihaltigen Erstarungsbeschleuniger aus, der zu Haut- und Augenverletzungen führen kann [4].

Ein weiterer Sicherheitsaspekt resultiert aus dem Personal, das für die Baustelle verantwortlich ist. Dabei besteht eine direkte Verbindung zwischen dem Sicherheitsniveau auf der Tunnelbaustelle und den Erfahrungen der für die Baustelle verantwortlichen Personen. Im Tunnelbau, einem durch die natürlichen und technischen Randaspekte gefährlichen Arbeitsplatz, kommt es im Vergleich zu Industriearbeitsplätzen zu einer stärkeren Fluktuation der Mitarbeiter. Das hat unter anderem zur Folge, dass unerfahrene oder schlechter trainierte Mitarbeiter, die Gefahren, die im Untertagebau herrschen, nicht immer in vollem Umfang erkennen [2]. Neben den Mineuren, die mit den baubetrieblichen Abläufen vertraut sind, stellen Personengruppen, wie Vermesser, Geologen, Praktikanten, Bauüberwacher

und Besucher, ebenso eine Gefahrenquelle dar (Bild 6). Da sie mit dem Bauablauf im Tunnel unter Umständen nicht genau vertraut sind, besteht die Gefahr, dass sie sich beim Zusammentreffen mit einer beweglichen Baumaschine anders als vom Maschineneführer erwartet verhalten. Das wiederum kann zu einem erhöhten Kollisionsrisiko führen. Wie bereits beschrieben, kann zusätzlich der gesetzte Zeitdruck zu einer Erhöhung des Sicherheitsrisikos führen, das sich zu Beginn durch kleinere Unachtsamkeiten bemerkbar macht. Dabei sind es bereits die kleinen Ursachen, die zu den größeren Arbeitsunfällen führen können, wenn die wesentlichen Regeln nicht eingehalten werden [4]. Daher ist auch auf das Einhalten der kleinen Regeln zu achten.

#### 4 Hintergrund Arbeitsschutz

Das hohe Gefahrenpotenzial im konventionellen Tunnelbau erfordert ein konsequentes Umsetzen und Anwenden unterschiedlicher Maßnahmen für den Arbeitsschutz. Es werden nachfolgend diverse Verfahren im Arbeitsschutz und mögliche Technologien dargestellt, die speziell für die beweglichen Maschinen eine Unterstützung sein können.

##### 4.1 Verfahren der Unfallprävention

Folgende Verfahren und Maßnahmen zur Unfallprävention und zum Arbeitsschutz auf Tunnelbaustellen sollen vorgestellt werden.

Der Bauzaun, der die komplette Baustelleneinrichtungsfläche und den Baustellenbereich umgibt, soll ein unbefugtes Betreten der Baustelleneinrichtungsfläche verhindern. Der Zugang zur Baustelle erfolgt in der Regel über eine Toranlage oder über eine Pforte mit Personal. Darüber hinaus erfolgt eine Personenerfassung beim Betreten des Tunnels. In Bild 7 ist eine Magnettafel für die Erfassung der Personen, die sich im Tunnel aufhalten, dargestellt. Mittlerweile kommen batteriebetriebene Radio Frequency Identification (RFID) tags über oder QR-Codes alternativ zum Einsatz. Sie lassen sich einfach und kosteneffektiv in Baustellenausweise oder die Persönliche Schutzausrichtung (PSA) integrieren.

Weiterhin spielt die Beleuchtung im Tunnel eine wichtige Rolle. So ist darauf zu achten, dass die allgemeine Baustellenbeleuchtung entsprechend dimensioniert ist: Verkehrswege mit 20Lux, Arbeitsplätze mit 100Lux und für an-

spruchsvolle Tätigkeiten ist eine Beleuchtung von 200 Lux vorzuhalten. Zusätzlich ist eine Sicherheitsbeleuchtung für einen möglichen Stromausfall notwendig. Die Beleuchtung ist in regelmäßigen Abständen zu reinigen und zu warten sowie vor mechanischen Einflüssen zu schützen. Bei Gefahrenstellen im Tunnel, auf die besonders aufmerksam gemacht werden soll, sind Warnblinkleuchten aufzustellen [8]. Im Tunnel stellen die befahrbaren Querschläge und Pannenbuchten besondere Gefahrenstellen für das Personal dar. Um auf die Stellen aufmerksam zu machen und das Unfallrisiko damit zu reduzieren, wird eine bessere Ausleuchtung durch eine erhöhte Anzahl von Leuchten sowie eine farblich abgesetzte Beleuchtung eingesetzt. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden in der Regel an den Ulmen des Haupttunnels gegenüber den Querschlägen Eckspiegel angebracht, die sauber und unbeschädigt gehalten sein sollen. So können von den Maschinenführern Querschlag oder Haupttunnel besser eingesehen werden. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse in den befahrbaren Querschlägen sind Leitwände aufzustellen, um Fußgängerweg und Fahrbahn räumlich zu trennen. Die Maßnahme soll Unfällen zwischen Personen und Fahrzeugen vorbeugen.

Um diverse Maschinen mit Strom zu versorgen, sind die elektrischen Anlagen entsprechend auszulegen. Darüber hinaus sind die besonderen Anforderungen, wie zum Beispiel Wassereinwirkung, Stau und starke mechanische Beanspruchungen, zu beachten. Beim Verlegen der Leitungen ist darauf zu achten, dass sie an der Tunnelwand aufgehängt werden muss, um ein Überfahren, Knicken oder Durchscheuern zu vermeiden [8]. Wie eingangs beschrieben, sind Elektrounfälle eine wesentliche Ursache von Todesfällen. Der lokale Zugriff und Zutritt zu elektrischen Anlagen sollte daher auf einen ausgewiesenen Personenkreis beschränkt werden.

Eine PSA, die aus Schutzhelm, Sicherheitsschuhen, Schutzkleidung sowie Gehörschutz besteht, ist ständig zu tragen. Je nach Erfordernis oder als gute Praxis gilt es, Schutzhandschuhe, Atemschutz oder Augenschutz zu tragen [8]. Oftmals reichen diese aber nicht aus, um Menschen vor Unfällen mit Maschinen zu schützen [9]. Die Personen im Tunnel werden weiterhin mit Selbstrettern und Lampen ausgestattet. Die Geräte sind von den Personen mitzuführen oder in entsprechend markierten Behältern im Tätigkeitsbereich aufzubewahren. Auch die Maschinenführer haben beim Verlassen der Fahrzeuge die PSA zu tragen.

Das Baustellenpersonal muss in regelmäßigem Turnus vor Beginn der Tätigkeit sowie bei Veränderung der Bausituation hinsichtlich des Arbeitsschutzes eingewiesen, im Brandschutz geschult sowie zum Sicherheits- und Rettungskonzept aktenkundig belehrt werden. Die Belehrung geht auf die richtige Anwendung der PSA ein sowie auf das richtige Verhalten bei Arbeitsunfällen. Dabei werden auch alle Personen in die selbsttätige Brandbekämpfung eingewiesen. Neben den regelmäßigen Unterweisungen des Baustellenpersonals sind die unterschiedlichen Arbeitsplätze während jeder Schicht mindestens einmal durch den Ausführenden zu überprüfen. Ebenso ist darauf zu achten, dass Personen nicht alleine beim Abbauen, Beräumen (Schutteln) oder Sichern der Hohlräume tätig sind [8].

Bei Arbeitsplätzen und Verkehrswegen ist darauf zu achten, dass sie ausreichend gegen mögliches Hereinbrechen von Gebirge gesichert sind. Dabei müssen die Arbeitsplätze im



Bild 7. Manuelle „Tag-In Tag-Out“ Tafel (links) und elektronisches RFID-System (rechts) zur Personenerfassung und Zugangskontrolle

Tunnel durch sichere Verkehrswege erreichbar sein. Um Kollisionen zwischen Personen und beweglichen Maschinen zu vermeiden, sind separate Fuß- und Fahrwege anzulegen. Es ist zu beachten, dass Fußwege bei zeitgleichem Fahrbetrieb eine Mindestbreite von 1,0 m und eine Höhe 2,0 m haben müssen. Ansonsten haben Fußgänger keinen Zutritt. Das gilt im Allgemeinen für das Schuttern. Während des Schutterns dürfen die Gefahrenbereiche der bewegten Maschinen nicht betreten werden, da Lebensgefahr besteht. Durch das Einrichten von Wendestellen im Tunnel soll das Rückwärtsfahren von Maschinen auf ein Minimum reduziert werden, da es eine wesentliche Gefahrenquelle für Personenunfälle ist [8], [10].

Vor einem Maschineneinsatz ist zu analysieren, ob die Maschinen nach Angaben des Herstellers für den Einsatz im Tunnel geeignet sind. Dabei sind die Geräte mit Schutzaufbauten (Schutzdach, Frontgitter) gegen hereinbrechendes Gebirge zu sichern und Dieselmotoren mit Dieselpartikelfiltern auszustatten und in regelmäßigen Abständen auf Funktionalität zu untersuchen. Bei Maschinen mit Einschränkungen des Sichtfelds und Aufenthalt von Personen im Gefahrenbereich ist durch den Einsatz eines Kamera-Monitor-Systems (KMS) die Sicht des Maschinenführers zu verbessern [8], [10]. Grundsätzlich sind alle Fahrzeuge, deren Sicht beim Rückwärtsfahren im Tunnel eingeschränkt oder nicht vorhanden ist, mit Rückfahrkameras auszurüsten. Ebenso sind alle Fahrzeuge in Fluchtrichtung abzustellen und der Fahrzeugschlüssel im Zündschloss stecken zu lassen.

Die Straßen auf dem Baufeld haben in der Regel eine Breite von 3,5 m und sind für Schwerlastverkehr sowie das Befahren von Rettungsfahrzeugen ausgelegt. Durch befestigte und asphaltierte Baustraßen wird die Staubentwicklung und somit die Sichteinschränkung reduziert, was zu einer Erhöhung der Arbeitssicherheit führt. Zusätzlich werden sowohl auf den Baustraßen über Tage, auf dem Baufeld als auch im Tunnel die Verkehrswege in regelmäßigen Abständen gewässert, um der Staubentwicklung entgegenzuwirken. Für alle eingesetzten Fahrzeuge und Großgeräte gilt im Tunnel auf den nicht asphaltierten Flächen der Baustelleneinrichtung und auf den nicht asphaltierten Baustraßen eine maximale Höchstgeschwindigkeit von 25 km/h. Auf den asphaltierten Flächen der Baustelleneinrichtung und den asphaltierten Baustraßen über Tage ist eine Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h zugelassen. Einzelne Organisa-

tionen reduzieren jedoch die Fahrgeschwindigkeiten, um Unfällen vorzubeugen [11].

Neben einer PSA sorgen Notruf- und Rettungseinrichtungen bei einer möglichen Havarie für eine gute Versorgung. Es sind Erste-Hilfe- und Rettungseinrichtungen sowie passende Feuerlöscher oder automatische Löscheinrichtungen auf Maschinen vorzuhalten. Auf andere wesentliche Einrichtungen in der Unfallprävention und Vorsorge im Tunnelbau, wie zum Beispiel Frischluftzufuhr und Reduktion der Staubentwicklung, wird an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen. Sie und weitere sind in [8] beschrieben.

#### 4.2 Normen und Regeln

Die Analyse der Gefahren im Tunnelbau zeigt, dass das größte Risiko von Kollisionen mit beweglichen Maschinen ausgeht (besonders beim Rückwärtsfahren) und die Beschäftigten angefahren, überfahren oder gequetscht werden können [10]. Auf Basis dieser Gefahren werden in den Technischen Regeln für Betriebssicherheit „Mechanische Gefährdung – Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen beim Verwenden von mobilen Arbeitsmitteln“ mehrere Maßnahmen zur Unfallvermeidung fixiert [12]. Generell muss der Arbeitgeber nach den allgemeinen Grundsätzen in § 4 des Arbeitsschutzgesetzes die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten durch geeignete Maßnahmen sicherstellen. Dabei unterscheidet man zwischen technischen, organisatorischen und personenbezogenen Maßnahmen (auch TOP-Modell genannt). Des Weiteren beinhalten die Normen und Regeln Vorschriften zur Auswahl des geeigneten mobilen Arbeitsmittels und die Unterweisung von Beschäftigten.

##### 4.2.1 Technische Maßnahmen

Durch den Arbeitgeber sind „technische Maßnahmen zur Vermeidung oder, wenn das nicht möglich ist, zur Reduzierung der Gefährdung von Beschäftigten durch Anfahren, Überfahren oder Quetschen durch mobile Arbeitsmittel aufgrund unzureichender Sichtverhältnisse, insbesondere beim Rückwärtsfahren, zu treffen.“ Die Richtlinie schlägt unterschiedliche Maßnahmen vor, die hinsichtlich der maximalen Wirksamkeit auszuwählen sind. Für den Tunnelbau kommen in erster Linie folgende technische Maßnahmen infrage: Der Einsatz von KMS, 360-Grad-KMS oder Zusatzspiegel. Ebenso können zusätzliche Scheinwerfer an der Baumaschine zur Ausleuchtung von Rangier- und Fahrbereichen zur Erhöhung der Arbeitssicherheit beitragen. Bei Maschinen, die regelmäßig rückwärtsfahren müssen, sind anhebbare, drehbare oder redundante ausgerüstete Fahrerinnenkabinen oder drehbare Fahrersitze vorzusehen. In **Bild 8** ist beispielhaft ein Transportgerät für Tübbinge dargestellt, das am Sanierungstunnel Belchen die Tunnelvortriebsmaschine (TVM) mit Tübbingen versorgt. Durch die beengten Platzverhältnisse im Tunnel ist ein Wenden nicht möglich, daher befindet sich an beiden Enden der Maschine eine Fahrerinnenkabine. So muss das Fahrzeug nicht rückwärtsfahren. Eine weitere technische Maßnahme ist der Einsatz von Systemen zur Erkennung von Personen oder Hindernissen (z. B. funkbasierte Anwendungen, Transponder- und RFID-Erkennungssysteme), die den Maschinenführer warnen [12].



Bild 8. Transportgerät für Tübbinge

##### 4.2.2 Organisatorische Maßnahmen

Im technischen Regelwerk sind diverse organisatorische Maßnahmen zur Reduzierung der Gefährdung durch Anfahren, Überfahren oder Quetschen infolge der Fahrbewegungen von mobilen Arbeitsmitteln dargelegt. Das können betriebliche Regeln für die Nutzung der mobilen Arbeitsmittel, wie zum Beispiel die Festlegung von Höchstgeschwindigkeiten und Vorfahrtsregeln, sein. Ebenso können Aufenthaltsverbote festgelegt werden, wie beispielsweise im Gefahrenbereich beim Be- und Entladen von Dumpfern oder eine Trennung von Transport- und Verkehrswegen. Die Verwendung von Warneinrichtungen ist festzulegen, wie zum Beispiel das Verhalten beim Auslösen einer Warneinrichtung durch einen Beschäftigten. Weiterhin sind durch den Arbeitgeber Maßnahmen zu treffen, die eine ausreichende Sicht für den Maschinenführer gewährleisten. Dabei sind beispielsweise mobile Arbeitsmittel mit angemessenen Sichtverhältnissen für das geplante Einsatzgebiet auszuwählen. Ist für den Maschinenführer keine ausreichende Sicht beim Bewegen der Baumaschine gewährleistet, sind zusätzlich zu den bereits beschriebenen technischen Maßnahmen weitere organisatorische Maßnahmen zu treffen, wie zum Beispiel das Beschäftigen von Einweiskern und das Festlegen von Handsignalen zum Einweisen von Fahrzeugen. Der Einsatz von Spiegeln, KMS sowie Rangier- und Warneinrichtungen für ein zum Beispiel sicheres Rückwärtsfahren kann ebenso festgelegt werden. Als letzter möglicher Punkt kann der Einsatz von Warnkleidung bei den Beschäftigten festgelegt werden, um die Erkennbarkeit zu verbessern [12].

##### 4.2.3 Personenbezogene Maßnahmen

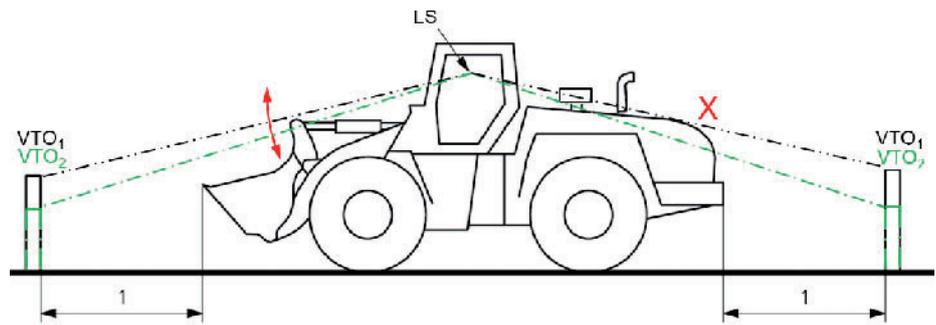
Ergibt die Gefährdungsbeurteilung, dass die technischen und organisatorischen Maßnahmen nicht ausreichend sind, sind durch den Arbeitgeber passende personenbezogene Schutzmaßnahmen festzulegen. Dabei hat der Arbeitgeber sicherzustellen, dass die zur Verfügung gestellte PSA genutzt wird [12].

In der internationalen Norm ISO 5006:2017 „Erdbaumaschinen – Sichtfeld – Testverfahren und Anforderungskriterien“ wird die Problematik zur Sichtfeldeinschränkung aufgegriffen, damit Maschinen ihre Betriebszulassung auf Baustellen und für das Fahren auf öffentlichen Straßen erhalten können [15]. Im Folgenden werden wesentliche Punkte der Norm besprochen. Eine frühere Ausgabe der

Norm, veröffentlicht im Jahr 2006, befasst sich mit der „Sichtbarkeit des Bediener in einer Weise, dass der Bediener die Maschine sehen kann, um einen sachgerechten, effektiven und sicheren Betrieb zu ermöglichen, der in objektiven technischen Bedingungen quantifiziert werden kann.“ Die Norm enthält daher ein Testverfahren, das tote Winkel entlang einer Grenzlinie (1 m) von dem kleinsten die Maschine umgebenden Rechteck und der Sichtbarkeit auf einem Testkreis (12 m) misst. Der Bediener (engl.: VTO für Vertical Test Object) ist seit ISO 5006:2017 nunmehr mit einem Meter als Höhe angesetzt [13]. Teile, die einen toten Winkel verursachen können, sind zum Beispiel Kabinenelemente wie Überrollschutzkonstruktionen, Fenster- und Türrahmen, Abgas- oder Emissionskontrollrohre, Motorhaube und Ausrüstung oder Anbaugeräte, wie Schaufel oder Ausleger. Die direkte Sichtbarkeit ist definiert als die Sichtbarkeit durch die direkte Sichtlinie des Bediener auf ein Objekt, die indirekte Sichtlinie ist definiert als die Sichtbarkeit nur durch Hilfsmittel wie Spiegel oder Kameras (Bild 9) [14]. Dabei sind Spiegel-zu-Spiegel-Systeme unzulässig, und Sichtmittel wie Kamera-Monitor-Assistenzsysteme müssen in Vorwärtsrichtung angebracht sein. In Bild 10 sind Teilergebnisse des Testverfahrens mittels modernen Laser Scannings anhand eines Kompaktladers visualisiert [15], [16].

### 4.3 Assistenzsysteme

Einige der im technischen Regelwerk beschriebenen Technologien zur Vermeidung von Kollisionen zwischen Beschäftigten und mobilen Baumaschinen wurde von verschiedenen Forschungsgruppen ausführlich analysiert oder experimentell getestet [15], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [25], [24]. Durch die zunehmende Höhe der Motorenräume oder durch das Vibrieren der Spiegelhalterungen, während das Gerät im Betrieb ist, ist es für den Maschinenführer praktisch unmöglich, den Nahbereich der Maschine vollständig zu erfassen. In Bild 11 ist ein Radlader abgebildet, der ein solches Spiegelsystem nicht besitzt. Die Person hinter der Maschine kann nicht ausreichend erfasst werden. In Großbritannien und Deutschland wurden deshalb die Forderungen zum Einsatz von KMS laut, die zusätzlich oder als Ersatz von Spiegeln verwendet werden sollen. Der Einsatz moderner technischer Systeme bietet oft Vorteile gegenüber der Verwendung von zusätzlichen Spiegeln.



#### Legend

VTO<sub>1</sub> = Vertical test object (1.5 m tall)  
 LS = Light source

VTO<sub>2</sub> = Vertical test object (1.0 m tall)  
 BS = New blind spots

Bild 9. Sichtfeldeinschränkungen und Veränderungen am Messkörper [14]

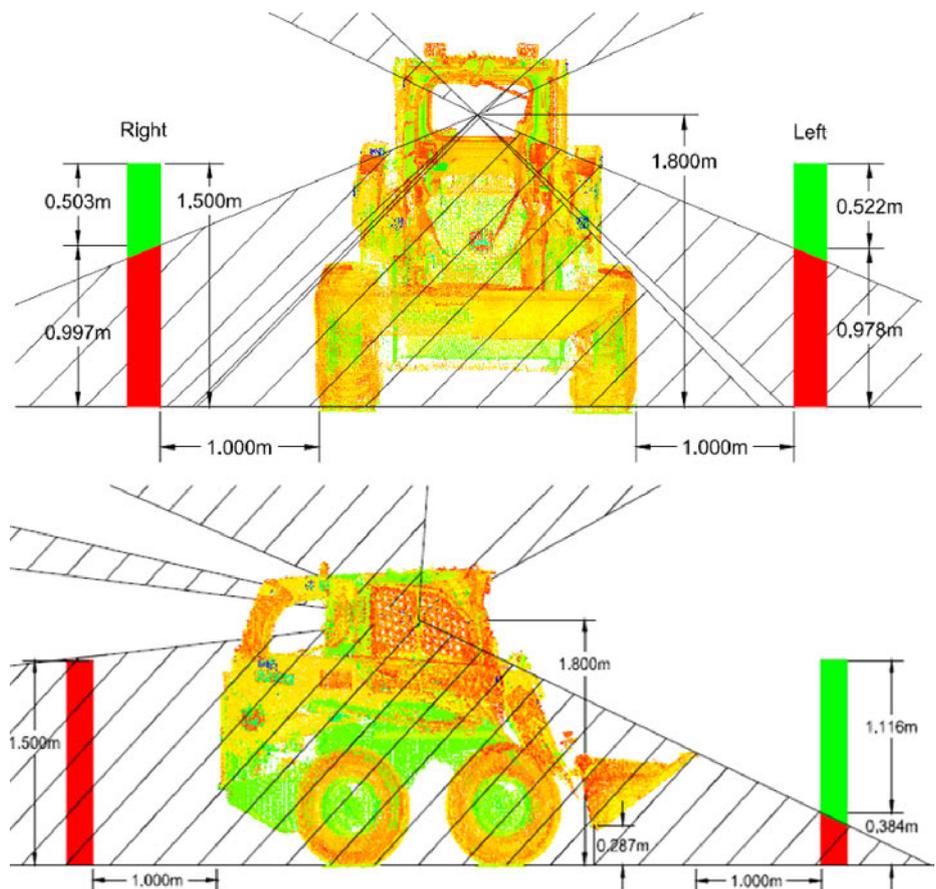


Bild 10. Vermessung der toten Winkel (schraffiert) an einem Kompaktlader [15]

#### 4.3.1 Kamera-Monitor-Systeme (KMS)

Bei KMS wird zwischen einfachen KMS und 360°-KMS unterschieden [12]. Bei KMS handelt es sich um eine Apparatur zur Verbesserung der Sichtverhältnisse für den Maschinenführer. Dabei werden die Gefahrenbereiche vor, hinter oder um die beweglichen Maschinen für den Maschinenführer auf dem Monitor sichtbar. Allerdings sind die KMS nicht dafür gedacht, längere Rückwärtsfahrten auf Sicht zu absolvieren. Sie dienen ausschließlich zur Überwachung des Nahbereichs um die Maschine [25]. Bei den einfachen KMS ist ein zentraler Monitor in der Fahrerkabine mit einer Front-, Seiten- oder Heckkamera verbunden. Durch den Monitor kann sich so der Maschinenführer ein Bild in Echtzeit vom Umfeld seiner Maschine machen, das er nicht di-



Bild 11. Toter Winkel im Heck einer Baumaschine [14]

rekt einsehen kann. In **Bild 12** ist eine Kamera dargestellt, die sich an der vorderen Achse einer Baumaschine befindet, um das durch eine Schaufel eingeschränkte Sichtfeld zu verbessern. In vielen Unternehmen gehören die recht preiswerten einfachen KMS mittlerweile zum Standard. In vielen Ländern wird das Nachrüsten dieser Systeme auch von Versicherungsunternehmen oder staatlichen Einrichtungen subventioniert, um weitere Anreize für einen Einsatz zu schaffen. Beim 360°-KMS handelt es sich um eine Weiterentwicklung des einfachen KMS. Dabei werden mehrere Kameras (i. d. R. vier Stück) miteinander gekoppelt und ermöglichen so eine 270°- bis 360°-Ansicht um das Fahrzeug. Auf diese Weise wird das nähere Umfeld für den Maschinisten auf dem Monitor in der Vogelperspektive sichtbar. Das bedeutet gleichzeitig, dass es keinen toten Winkel mehr im Fahrzeugbereich gibt [26]. In **Bild 13** ist der Monitor einer Rundumansicht eines Fahrzeugs dargestellt. Der Nachteil der KMS besteht allerdings darin, dass durch den Maschinisten der Bildschirm ständig überwacht werden muss, was ihn möglicherweise davon ablenkt, die Bereiche um die Maschine durch eine direkte Sichtkontrolle nach Personen oder gefährlichen Hindernissen zu kontrollieren. Jedoch hat sich herausgestellt, dass die Kamerasysteme gerade beim Wechsel der Fahrtrichtung zum Prüfen des Umfelds, das als nächstes angefahren werden soll, sehr nützlich sind. Aufgrund der Helligkeitsprobleme in Tunnelbauwerken muss gegebenenfalls auf lichtstarke oder Infrarot-Kameras zurückgegriffen werden. Schmutz an den Kameras und das möglicherweise einge-



Bild 13. Monitoransicht eines 360°-KMS [14]

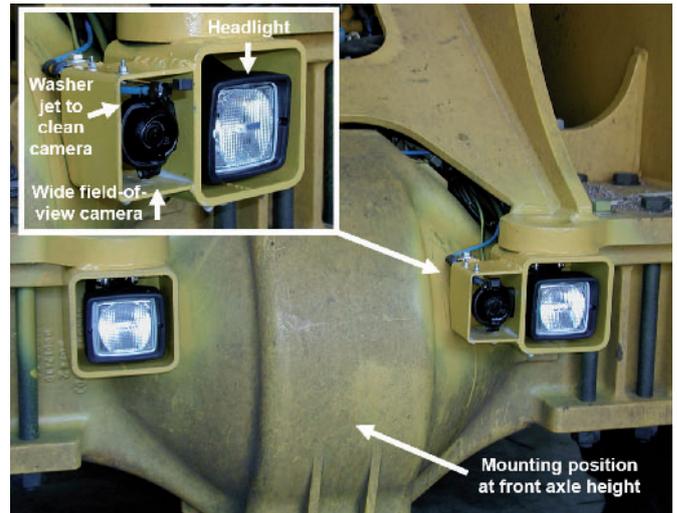


Bild 12. Komplexität eines Kamera-Monitor-Systems, montiert an der Frontachse einer Baumaschine [14]

schränkte Sichtfeld sind weitere Probleme, die es zu lösen gilt.

#### 4.3.2 Akustische Warnsysteme

Der Einsatz eines akustischen Warnsystems soll Personen in direktem Umfeld einer mobilen Maschine warnen. Um auf eine mobile Maschine aufmerksam zu machen, werden unterschiedliche akustische Warner eingesetzt. Es wird zwischen einem permanenten (z.B. beim Rückwärtsfahren) oder einem situativen Warnsystem unterschieden. Beim situativen Warnsystem werden mittels Sensoren Personen oder Objekte im Gefahrenbereich der Maschine detektiert und lösen das akustische Signal aus. Es können unterschiedliche Warnsignale eingesetzt werden. Dabei wird zwischen einem „Zischen“ und einem „Piepen“ unterschieden, die jeweils an die vorhandene Umgebungslautstärke angepasst werden können. Durch den „Pieper“ werden Personen in der gesamten Umgebung der Maschine gewarnt. Wohingegen beim „Zischer“ nur Personen durch ein gerichtetes Warnsignal im näheren Gefahrenbereich gewarnt werden. Was allerdings gegen die Verwendung eines „Piepers“ spricht, sind die verursachende Lärmbelastung (kann zu Stress bei den Beschäftigten und Anwohnern führen) und eine mögliche Desensibilisierung, was dazu führen kann, dass eine sich anbahnende Gefährdung nicht mehr entsprechend wahrgenommen wird [25]. Der Nachteil beim alleinigen Einsatz eines akustischen Warnsystems besteht darin, dass sich viele Bauarbeiter mittlerweile an die Signaltöne gewöhnt haben und der Maschinist nicht separat gewarnt wird, wenn eine Person den Gefahrenbereich betritt. Dadurch ist bei Unachtsamkeit eine Kollision mit der Maschine nicht ausgeschlossen.

#### 4.3.3 Sensorsysteme zur Objekterkennung

Im Folgenden wird zwischen Ultraschallsystemen, Radarsystemen und 3D-Kamerasensoren unterschieden, die mehr oder weniger im Tunnelbau einsetzbar sind. Diese Systeme können den Maschinisten bei beengten Platzverhältnissen unterstützen, um Personen in nur schwer einsehbaren Bereichen zu erkennen. So ist ein konzentrierteres Arbeiten auch bei widrigen Umständen möglich,

wenn durch isolierten Einsatz ein KMS nicht möglich ist [25].

#### *Ultraschallsysteme*

Ultraschallsysteme können Personen oder Hindernisse erkennen, wenn sie sich im Erfassungsbereich der an der mobilen Maschine montierten Sensoren befinden. Sollte sich ein Hindernis im Erfassungsbereich der Ultraschallsensoren befinden, kann zum Beispiel durch ein akustisches Signal der Maschinenführer gewarnt werden, und ein zeitnahes Anhalten der Maschine ist möglich. Dabei können Ultraschallsensoren Hindernisse mit einer sehr hohen Genauigkeit von bis zu 10 cm detektieren (bei Entfernungen von bis zu 3 m). Die Distanz zum Hindernis wird aus der Differenzzeit eines Schallimpulses zwischen Sender und Empfänger berechnet. Dabei ist es möglich, dass die Ultraschallsysteme mehrere Hindernisse gleichzeitig registrieren. Durch die präzise Objekterfassung ist eine stetige Kontrolle eines Annäherungsvorgangs möglich (z. B. Stapler an Übergabepunkt). Bei Verschmutzung der Sensoren, bei schlechten Sichtverhältnissen (Staub, Nebel und Rauch) sowie in unwegsamem Geländebereichen kann es zu Fehlmeldungen kommen. Im Tunnelbau besteht daher die Gefahr, dass es zu wiederholten Fehlmeldungen kommt und die Sensibilität für eine mögliche Gefahrensituation abnimmt [25].

#### *Radarsysteme*

Im Gegensatz zu den Ultraschallsystemen erfassen Radarsysteme Personen und Objekte auch bei widrigsten Bedingungen (z. B. bei Schlamm, Staub, Feuchtigkeit, Hitze, Vibrationen und schlechten Sichtverhältnissen) sehr zuverlässig. Durch die Radarsysteme lassen sich Hindernisse in einem Umfeld von bis zu 20 m erfassen. So können die Maschinenführer mit einer minimalen Zeitverzögerung vor dem Betreten des Gefahrenbereichs gewarnt werden. Radarsysteme bestehen in der Regel aus einem oder zwei Sensoren. Dabei werden die Sensoren je nach zu kontrollierendem Gefahrenbereich an der entsprechenden Stelle der mobilen Maschine angebracht. Zusätzlich lässt sich der Detektionsbereich in unterschiedliche Zonen unterteilen, was dem Maschinenführer eine Information über den Abstand zum Hindernis gibt. Dabei wird vom Radarsensor eine elektromagnetische Welle in Lichtgeschwindigkeit gesendet und vom reflektierenden Objekt wieder empfangen. Durch die gemessene Zeit zwischen Senden und Empfangen des Signals kann auf die Entfernung geschlossen werden. Radarsysteme erlauben so eine stetige Überwachung des Gefahrenbereichs und können dabei auch in Kombination mit einem KMS betrieben werden. Der Nachteil des Systems besteht darin, dass es in unwegsamem Geländebereichen zu wiederholten Fehlermeldungen kommen kann [25].

#### *3D-Kamerasensoren*

Durch den Einsatz von 3D-Kamerasensoren werden die Maschinenführer durch akustische und optische Signale gewarnt. Durch eine Verknüpfung mit einem KMS wird die Gefahrensituation ebenfalls auf dem Monitor in der Fahrkabine angezeigt. So ist kein permanentes Überwachen des Monitors notwendig und ein konzentrierteres Arbeiten möglich. Der 3D-Kamerasensor nimmt aus zwei leicht unterschiedlichen Perspektiven die Umgebung der Baumaschine auf. Beim Überlagern der beiden Aufnahmen ist es

möglich, die Abstandsinformationen herauszurechnen. Auf Basis einer Bildererkennung lässt sich das Umfeld der beweglichen Maschine analysieren und so den Maschinenführer vor gefährlichen Situationen zu warnen. Auf diese Weise ist es möglich, dass eine Maschine auch durch enge Bereiche (z. B. einen Tunnelquerschlag) fährt, ohne dass durch die Wand ein Fehlalarm ausgelöst wird. Der 3D-Kamerasensor deckt in der Regel einen Detektionsbereich von 7 m Entfernung und eine Breite von 6 m ab. So ist das direkte Umfeld um die bewegliche Maschine gut sichtbar. Durch die Kombination mit einem KMS können auf dem Monitor Bereiche von einer Entfernung bis zu 20 m dargestellt werden [25]. Die Analyse der beschriebenen Sensorsysteme zur Objekterkennung hat gezeigt, dass sie nach heutigem Stand der Technik im Vergleich zu funktechnischen Systemlösungen zwei Nachteile haben: Sie können nicht direkt Personen erkennen, selbst die 3D-Kamerasensoren werden durch Licht, Nebel und Staub beeinträchtigt. Es verbleiben damit Stellen an Baumaschinen, die keine Personenerkennung erlauben.

## 5 Konzept und Methode

Der Einzug der Digitalisierung im Tunnelbau ermöglicht mittlerweile den Einsatz neuer Technologien, die unter anderem zu einer Erhöhung der Arbeitssicherheit im Tunnelbau führen können. So lassen sich mithilfe einer funktechnischen Systemlösung Personen und Maschinenführer in Echtzeit warnen, wenn sie sich einer Maschine gefährlich nähern. Durch die Verbindung des Funksystems mit der Steuereinheit der Maschine ist eine proaktive Geschwindigkeitsreduktion bis hin zum vollständigen Stoppen möglich. Weiterhin lassen sich mobile Baumaschinen mithilfe von Positionierungstechnologien im Tunnel (eingeschränkt) und auf dem Baufeld verorten und die Bewegungsmuster von Personen und Maschinen abbilden. Erstellte Berechnungsalgorithmen ermöglichen das automatische Ableiten von Detailinformationen zu bisher nicht bekannten Risiken. Anschließend können die abgeleiteten Informationen in einem vereinfachten geometrischen Informationsmodell (BIM-Teilmodell) abgebildet und vom Baustellenpersonal abgerufen werden. Die Auswertung von erforderlichen oder zusätzlichen Steuerungsprozessen zur Unfallvermeidung können im Anschluss nahezu in Echtzeit entsprechend angepasst werden. Personalisiertes Feedback an einzelne Arbeiter wird ebenso ermöglicht, um deren Potenziale zur Steigerung der Arbeitssicherheit zu motivieren. Besonderes Augenmerk der entwickelten Technologie gilt hierbei der möglichen Erfassung von Beinahe-Unfällen. Ein grundlegendes Problem in der Arbeitssicherheit auf Baustellen ist das manuelle und unregelmäßige Melden von Beinahe-Unfällen (**Bild 14**). Zu nahe Personen-Maschine-Kontakte werden zwar von Arbeitern oder Maschinenführern erfahren, aber oftmals aus verschiedenen Gründen (z. B. Angst vor Arbeitsplatzverlust) nicht gemeldet. Eine verzögerte bis gar keine Rückmeldung bedeutet wiederum eine geringe Motivation, neue Beinahe-Unfälle zu melden. Ein weiterer Grund für den Einsatz von intelligenten Assistenzsystemen in der Datensammlung und -auswertung von Beinahe-Unfällen sind die oft fehlenden Details zu den beteiligten Umständen, die zu einem Beinahe-Unfall oder Unfall führen.

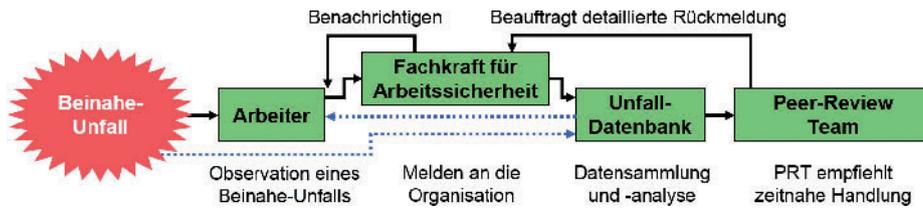


Bild 14. Konzept des personalisierten Meldens und Rückmeldens von Beinahe-Unfällen und noch fehlender Assistenzsysteme (gestrichelte Linien)

10

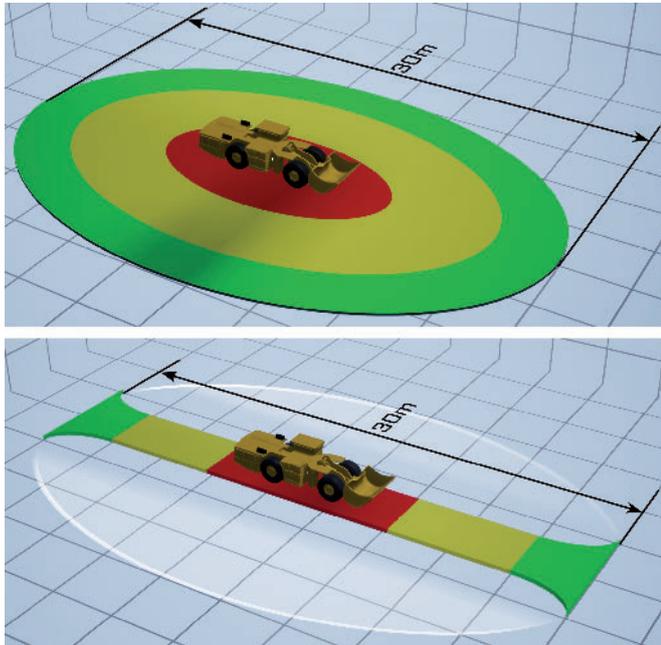


Bild 15. Einstellung von elektromagnetischen Warnfeldern je nach Maschinentyp  
Abb.: Selectronic Funk- und Sicherheitstechnik GmbH

### 5.1 Magnetfeldtechnologie (funktechnische Systemlösung) als Warnassistenz

Bei der Magnetfeldtechnologie handelt es sich um ein funkbasiertes Personenerkennungssystem, das sich allerdings nur sinnvoll auf einem abgeschlossenen Betriebsgelände mit einer zuverlässigen Zugangskontrolle einsetzen lässt. Zusätzlich sind alle Personen, die sich auf dem Gelände befinden, mit einem elektrischen Baustein (Personen-Tag) auszustatten, der zum Beispiel am Gürtel, als Uhrenbaustein am Arm oder ähnlichen Trageversionen am Körper mitgeführt werden muss. Wird der Tag nicht von der Person getragen, ist ein Erfassen durch das Fahrzeug oder die Maschine nicht möglich. Weil jede verfügbare Technologie ähnliche Einschränkungen besitzt, entweder wegen des technischen Hintergrunds oder spätestens bei der Prozessintegration, bietet das Zusammenspiel von funktechnischen Systemlösungen mit intelligenten Videokamera- oder Radarassistenzsystemen eine Möglichkeit, die jeweiligen Nachteile der einzelnen Technologien zu lösen.

Um Personen oder Fahrzeuge gegen Kollisionen mittels Funksystemen abzusichern, werden nach heutigem Stand der Technik zwei unterschiedliche Frequenzspektren, je nach Anforderung an das Absicherungssystem, eingesetzt. Dabei wird zwischen LF (im kHz-Frequenzbereich) und HF (im MHz/GHz-Frequenzbereich) unterschieden. Die LF-Frequenzen von etwa 4 kHz bis 450 kHz sind keine Frequenzen, die mit einer Antenne „abgestrahlt“ werden können, wie zum Beispiel bei einem Funkgerät oder Handy, weil

hier die Wellenlänge im Kilometerbereich liegt und somit keine elektrische Abstrahlung erfolgt. Das hat aber einen entscheidenden Vorteil bei Absicherungssystemen für Personen im Nahbereich zu Fahrzeugen und Maschinen: Es erfolgt nur die Generierung eines elektromagnetischen Felds, das in seiner Form zunächst, physikalisch bedingt, eine

dreidimensionale ovale Form hat und sich cm-genau in seiner Größe einstellen lässt. Daher kann man um eine Maschine ein Warnfeld erzeugen, das dann mittels Personen-Tag detektiert und auf einer normalen Funkfrequenz, zum Beispiel zum Fahrzeug, zurückgesendet wird (Bild 15, oben).

Somit wird der Personen-Tag-Träger am Boden (angenommen) als auch der Fahrer des Fahrzeugs gewarnt und entsprechend informiert (Bild 16) [27]. Dieses Verfahren ist aber aus Gründen der Warnfeldsendeleistung und der möglichen Empfangsempfindlichkeit des Personen-Tags nur auf eine Entfernung von bis zu circa 15 m bis 18 m um die Antenneneinheit (also einen Durchmesser von ca. 30 m um das Fahrzeug) limitiert. Für eine Absicherung von Personen ist das im Allgemeinen genug, auch unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeiten und der Reaktionszeit des Systems von circa 250 ms. Jedoch für eine Absicherung von Fahrzeug zu Fahrzeug gegeneinander, in der Hauptsache über Tage, wie auf Baustellen mit schnell fahrenden Fahrzeugen, ist diese maximale Reaktionsentfernung zu klein. Hier kommt dann das zweite Frequenzspektrum HF (Strahlungsfrequenz) zum Einsatz, da hier die Wellenlänge kurz ist (z. B. 70 cm oder weniger) und ein elektrisches Feld abgestrahlt wird, was bei Funkgeräten bedeutet, dass größere Reichweiten mit kleinen Leistungen (zugelassene ISM-Frequenzbereiche müssen benutzt werden) erreichbar sind, was für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Absicherung gegen Kollision problemlos bis 100 m bedeutet. Jedoch möchte der Anwender auch hier eine einigermaßen genaue Entfernung erhalten, was mit herkömmlicher Funktechnik über die Messung der Feldstärke (Relative Signal Strength Indication – RSSI) nicht realisierbar ist, da bei diesem Frequenzspektrum das Sendesignal von allen möglichen Materialien reflektiert wird und dadurch eine möglichst genaue Entfernung zur Sendequelle nicht möglich ist. Daher kann dies nur realisiert werden,

wenn ein HF-System benutzt wird, das unter anderem softwaregestützt die Laufzeit des Sendesignals für eine Entfernungsbestimmung verwendet. Dies ist bereits realisiert, aber noch nicht im Tunnelbau erprobt.

Die für die Experimente verwendete Magnetfeldtechnologie [27] besteht aus Komponenten, die in Echtzeit miteinander kommunizieren. Die Komponenten und die Installations- und Testverfahren sind:

- Installieren der Alarmtechnologie an der Maschine (Antenne mit Ferritkern, Verarbeitungshub, Display, Lautsprecher) und den Arbeitern (je ein persönlicher Tag),
- Kalibrieren der Alarmentfernungen (Sichern, Warnen/Alarm, Langsam, Stopp) je nach Bedarf,
- Ermöglichen, dass sich die Testperson von den Winkeln (je 10°) langsam der Maschine nähert,
- Stoppen und Messen der Entfernung nach Alarmaktivierung.

Während die Abstände der Alarmzone und ihre Form für jeden Gerätetyp kalibriert werden können, löst die sich nähernde Testperson, sobald sie sich innerhalb der Reichweite der Magnetfeldsignale befindet, mittels Tag automatisch aufeinander folgende Warnsignale für sich und gleichzeitig den Maschinenführer aus. Dabei sind je nach Wahl die Warnsignale in Form von Vibration, Akustik oder Visualisation möglich. In Bild 16 sind die Grundkomponenten der Technologie beispielhaft anhand eines Feldversuchs dargestellt [23]. Die Warnsignale staffeln sich nach Zonen, wobei Zone 1 gestaffelt kalibriert werden kann, in ein Warnsignal, zuerst an die Person am Boden und danach, bei verringerter Distanz, an den Maschinenführer.

- Zone 0: „System OK“ = System funktioniert (einmalig beim Einschalten, kein Alarm)
- Zone 1a: „Warnung“ = Warnung an Person am Boden (sich wiederholendes Signal)
- Zone 1b: „Warnung“ = Warnung an Maschinenführer (sich wiederholende Stimme)
- Zone 2: „Langsam“ = Automatisches Abbremsen der Maschine (Signal oder Stimme)
- Zone 3: „Stopp“ = Automatisches Anhalten der Maschine (Signal oder Stimme)

Im Tunnelbau als auch auf anderen maschinenintensiven Baustellen herrschen beengte Platzverhältnisse, was besondere Anforderungen an das Magnetfeld zur Folge hat. Da das erzeugte elektromagnetische Warnfeld den physikalischen Gesetzen in seiner Form unterliegt (Länge zu Breite ca. im Verhältnis 1,3 : 1) und für die erste Warnung nach vorn/hinten vom Fahrzeug möglichst die maximale Reichweite (ca. 15m) eingestellt sein soll, ist das Warnfeld jedoch an beiden Seiten auch noch je circa 11m breit. Dies führt dazu, dass Personen mit dem Personen-Tag, die seitlich ungefährdet laufen, ständig Alarm bei sich und dem Fahrer auslösen, was dazu führt, dass der Fahrer unsensibel für Alarme wird. Dieses Problem wurde von der Firma Selectronic Funk- und Sicherheitstechnik GmbH mit dem System CWS 900 NB gelöst (Bild 15, unten). Mit einer speziellen Antennenkonstruktion und entsprechend aufwendiger Software ist es realisiert, ein Feld zu generieren, dass nach vorn und hinten die Reichweite von circa 15m bis 18m hat, die Ausdehnung des Warnfelds zu den Seiten jedoch programmierbar ist, was in einfachen Worten bedeutet, es kann ein quasi rechteckiges Warnfeld um das Fahrzeug erzeugt werden (Bild 17).

### 5.2 Positionstechnologie zum Tracking

Verschiedene Technologien existieren, um die Position von Arbeitern und Maschinen genau zu bestimmen. Wie in [28], [29] ausführlich erläutert, offerieren Global Navigation Satellite Systems (GNSS), LoRa, Ultra-Wideband (UWB), Radio Frequency Identification (RFID), Kamera-Tracking und weitere Technologien bereits erfolgversprechende Lösungen zu anspruchsvollen Anwendungsbereichen der Baubranche, jedoch haben sie alle auch Vor- und Nachteile. Insbesondere der Einsatz innerhalb von unfertigen Bauwerken stellt ein großes Problem dar, da dort Positionssignale ohne weitere und durchaus kostspielige Sensorinfrastruktur nicht störungsfrei empfang- oder sendbar sind. Damit sind Tunnelbauwerke zwar nicht komplexer als ein anderes Bauwerk, aber die Anforderungen an Positionierungstechnologien bleiben ähnlich komplex.



Bild 16. Magnetfeldantennenposition auf dem Dach einer Baumaschine, Personen-Tag angebracht an der PSA und drei Alarmzonen angezeigt innerhalb der Führerkabine [23]

### 5.3 Building Information Modeling (BIM) zur Datenauswertung

BIM beschreibt eine Arbeitsmethode im Bauwesen, die bereits in den 1970er-Jahren in einem Grundkonzept publiziert wurde. Im Allgemeinen wird BIM als eine Planungsmethode im Bauwesen beschrieben, die die Erzeugung und die Verwaltung von digitalen virtuellen Darstellungen der physikalischen und funktionellen Eigenschaften eines Bauwerks beinhaltet. Die Bauwerksinformationsmodelle stellen dabei eine Informationsdatenbank rund um das Bauwerk dar, um eine verlässliche Quelle für Entscheidungen während des gesamten Lebenszyklus zu bieten; von der ersten Vorplanung bis zum Rückbau. Auch im Tunnelbau hat sich BIM mittlerweile etabliert [30]. In Bezug zu BIM und Arbeitsschutz gibt es bereits zahlreiche Anwendungen [26], [31], [32], [33]. Hier wird BIM hauptsächlich zu Visualisierungszwecken eingesetzt, um die Versuchsergebnisse zu den Alarmzonen in einen Kontext zur Arbeitsumgebung zu bringen. Sicherlich lassen sich solche Daten, unter anderem Heatmaps die Orte und Zeitpunkte von Beinahe-Unfällen

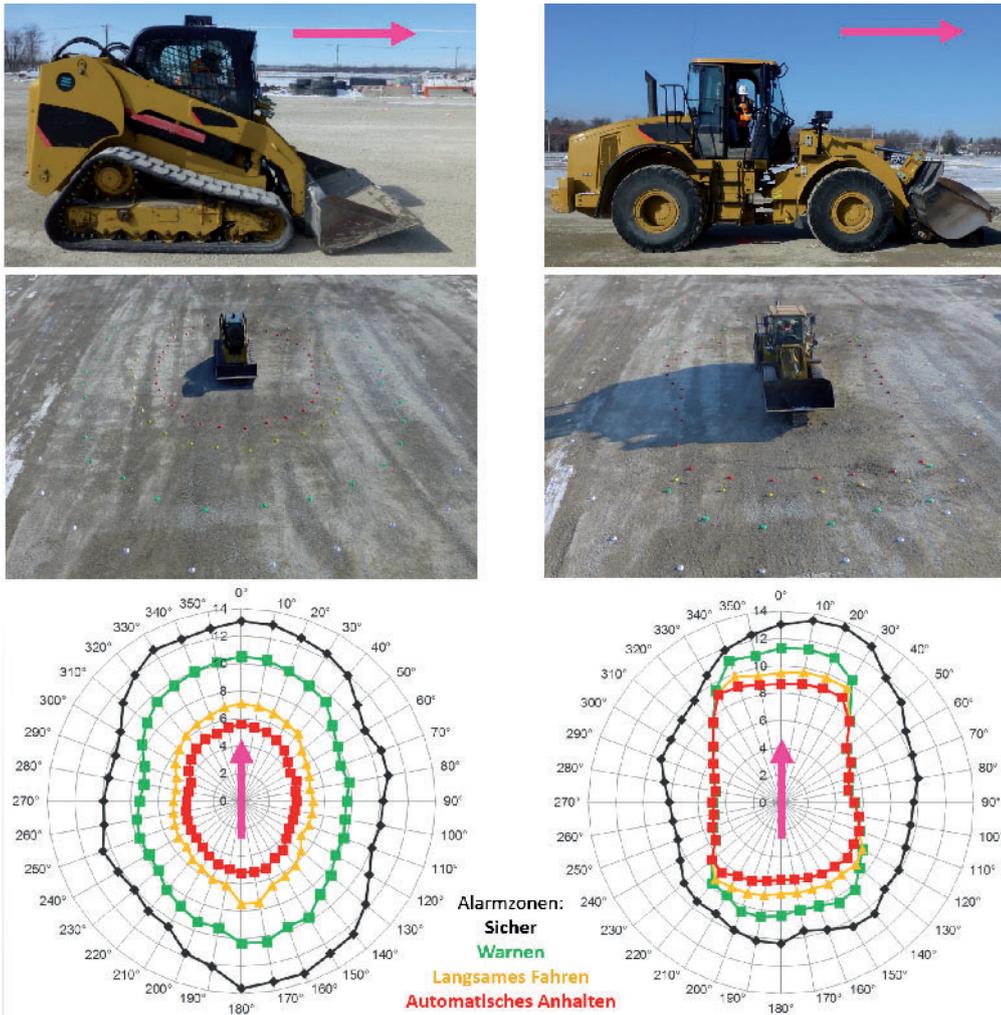


Bild 17. Testergebnisse zu Warnzonen im freien Feld

len anzeigen lassen, auch zur Unfallanalyse und in Schulungen einsetzen (Bild 18).

## 6 Experimente und Resultate

Ziel der ausgeführten Feldversuche ist es, die Ergebnisse zu einer experimentellen Bewertung der Zulässigkeit und Effektivität der existierenden Magnetfeldtechnologie in typischen Arbeitsumgebungen des Tunnelbaus hervorzuheben.

### 6.1 Hintergrund zum Projekt

Die Feldversuche wurden am Sanierungstunnel Belchen in der Schweiz durchgeführt. Der Tunnel befindet sich auf der Autobahn A2 zwischen Basel und Egerkingen und durchfährt das Juragebirge. Der Tunnel wird von der Arbeitsgemeinschaft Marti Belchen, bestehend aus der Marti Tunnelbau AG, der Marti AG Basel und der Marti AG Solothurn, gemeinschaftlich erstellt. In Bild 19 ist ein Teil des Baufelds zu sehen. Im hinteren Bildbereich befindet sich das Tunnelportal und im vorderen Bereich ist ein Teil der Baustelleneinrichtung abgebildet. Der richtungstrennte doppelspurröhrlige Belchentunnel aus dem Jahr 1970 ist in beiden Röhren stark sanierungsbedürftig. Damit die durch die sanierungsbedingten verkehrstechnischen Einschränkungen auf den Verkehr auf ein Minimum reduziert werden, wurde der Bau des Sanierungstunnels Belchen beschlossen. Der

Tunnel hat eine Länge von 3,2 km und liegt in einem Abstand von circa 40 m bis 116 m westlich der beiden bestehenden Tunnelröhren in gleicher Höhenlage. Der Sanierungstunnel wurde mit einer TVM aufgeföhren. Mit Hilfe der 13,97 m und circa 75 m langen TVM wurden rund 550 000 m<sup>3</sup> Gestein ausgebrochen. Die tägliche Vortriebsgeschwindigkeit betrug in Abhängigkeit von der Gesteinsqualität durchschnittlich 10 m/Tag. Der Sanierungstunnel ist über elf Querschläge mit dem bestehenden Tunnelbauwerk verbunden. Die Querschläge wurden zum Zeitpunkt des Experiments mit unterschiedlichen Verfahren aufgeföhren und haben einen Ausbruchquerschnitt zwischen 20 m<sup>2</sup> und 40 m<sup>2</sup>. Vor der geplanten Inbetriebnahme des Sanierungstunnels im Jahre 2021 werden noch die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung installiert, bestehend aus Lüftung, Branddetektion, Videoanlage, Funksystemen, Signalisation, Türen/Tore und Verkehrszählern [34].

### 6.2 Ergebnisse

Es wurden in der Vergangenheit wissenschaftliche Testmethoden entwickelt, um Annäherungs- und Alarmsysteme, basierend auf Magnetfeldtechnologie, zu evaluieren [17], [18], [35]. Diese Testmethoden untergliedern sich in zwei Szenarien: statische und fahrende Maschine. Im statischen Fall wird die Distanz zwischen dem Ort des Auftretens des Warnsignals (ausgelöst durch den Personen-Tag, der sich einer Maschine mit Schrittgeschwindigkeit weniger als 1,5 m/s nähert) und der auf den Boden projizierten Position des Maschinenführers/der Antenne auf der Maschine gemessen. Dabei werden 36 Messungen im Abstand von 10° zueinander vollzogen. Im zweiten Fall handelt es sich um eine fahrende Maschine, die sich einem stationären Personen-Tag in der Höhe von 1,00 m nähert. Obwohl die Signale der Magnetfeldtechnik Hindernisse wie Stahlbeton durchdringen können, wurden die statistischen Feldversuche (wie in [13] vorgesehen) sowohl auf einer flachen als auch freien Fläche an einem nahen Außengelände durchgeführt. Dies entspricht im Übrigen den Bestimmungen zur Sichtfeldvermessung von Maschinen [16], [36], [37]. Im Anschluss daran folgten Messungen in beengten Arbeitsräumen innerhalb des Tunnels.

Vier Feldversuche (Tabelle 1) wurden unter folgenden Randbedingungen durchgeführt. Ein elliptisches Magnetfeld (800er-System) kommt zur Anwendung, wenn es sich um eine Baumaschine mit vielen Rotationsbewegungen



Bild 18. Drohnenbild mit überlagerter Heatmap zum Aufzeigen von Beinahe-Unfällen zwischen Baumaschinen und Personen am Boden im Bereich der Rampe einer Baugrube [28]



Bild 19. Baufeld des Sanierungstunnels Belchen

handelt. Zum Beispiel benötigen Kompaktlader aufgrund ihrer Wendigkeit umfassenderen Schutz an den Seiten. Maschinen mit weniger großen Rotationsbewegungen wurden mit einem rechteckigen Magnetfeld (900er-System) ausgestattet. Der Unterschied zwischen 800er- und 900er-Systemen ist die Montage einer zusätzlichen Antenne. Zum Beispiel fahren Dumper vorwärts oder rückwärts und auch Tunnelbagger in einem Querstollen haben nur langsame Rotationsbewegungen. Daher bietet sich das 900er-System für beide Maschinentypen an.

### 6.2.1 Ergebnisse im Außengelände

Die erhaltenen Ergebnisse in Bild 16 zeigen die Position und Orientierung der Maschine. Die Vermessungspunkte und Abstände zu den einzelnen Alarmzonen wurden anschließend visualisiert. Die Zuverlässigkeit der Evaluierung wurde durch Wiederholbarkeit der Messwerte bestätigt, wobei in Bild 20 immer die geringste von drei Messungen pro Winkel festgehalten ist.

### 6.2.2 Ergebnisse im Tunnel

Ein zweites Experiment mit derselben Maschine und gleicher Antennenkonfiguration hat innerhalb des Tunnels an einem Querstollen stattgefunden. Das gleiche Messverfah-

Tabelle 1. Charakteristik der Feldversuche

Versuchsnummer	Umfeld	Fahrzeug	Maschinenposition	Systemtyp
1	Außengelände	Radlader Kramer 8085	statisch	800er
2	Tunnel	Radlader Kramer 8085	statisch	800er
3	Tunnel	Tunnelbagger Liebherr R950	statisch	900er
4	Tunnel	Radlader Kramer 8085	dynamisch	800er

ren wurde eingesetzt. Bei der Datensammlung konnten aufgrund des sehr beengten Platzverhältnisses nicht alle Werte aufgenommen werden, weil das Messumfeld durch einige Hindernisse, unter anderem Kanalarbeiten, eingeschränkt war. Auch zum Teil hochfrequentierter Baustellenverkehr durch Kipper, Betonmischfahrzeuge, andere Radlader, Lastwagen und Pickup-Trucks erschwerten die Messung. Zur Visualisierung der komplexen Testumgebung wurde ein Rohbaumodell des Haupttunnels und der Querschnitte in Level of Development (LoD) 200 erstellt und mit den ausgewerteten Messpunkten verknüpft (Bild 21).

Die Ergebnisse zwischen dem ersten und zweiten Versuch (am Außengelände und im Tunnel) wurden im Anschluss verglichen (Tabelle 2). Die Auswertung zur Position mit dem Winkel 180° wird beispielhaft im Detail erläutert. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass der Tunneldurchmesser und die Breite der vorhandenen Fahrbahn im Tunnel kleiner als die Breite des erzeugten Magnetfelds waren, daher konnten nicht alle Messpunkte im Außengelände im Tunnel wiederholt werden.

Bei der Auswertung der Daten sind Abweichungen bei insgesamt allen Winkeln um einen ähnlichen Faktor zu beobachten. Verschiedene Faktoren haben womöglich die Messungen beeinflusst. Wesentliche Einschränkungen während Versuchsaufbau und -durchführung innerhalb des Tunnels waren das manuelle Messverfahren mit Maßband, bestehender Baustellenverkehr, begrenzte Arbeitsumgebung und eine sehr kurze Messdauer. Auch der prototypische Antennenaufbau kann sich leicht verschoben haben.

Im dritten, ebenfalls statischen Versuch wurde ein Tunnelbagger des Typs Liebherr R950 mit zwei Magnetfeldantennen ausgestattet. Das ermöglichte die Erzeugung eines rechtwinkligen Magnetfelds. In Bild 22 ist der Wirkungsbereich eines solchen Magnetfelds zu erkennen. Um den Arbeitsablauf nicht zu stören, wurden die Abstände der Alarmzonen entsprechend vor Ort kalibriert. Zu beachten ist, dass der Oberwagen des Baggers um circa 15° in Fahrtrichtung nach links gedreht war. Vor und hinter der Maschine bildet sich daher eine leicht gekrümmte Linie, während an den Seiten eine gerade Linie entsteht. Der seitliche Abstand kann variabel eingestellt werden, um die Entfernung zu einem Arbeiter sicher zu gestalten, ohne Arbeiter oder Maschinenführer zu desensibilisieren.

Der vierte Versuch wurde durchgeführt, um die Wirksamkeit des Magnetfeldsensors an einer fahrenden Maschine zu testen. Der Tunnelbereich wurde für diesen Test abgesperrt. Das Ziel zu diesem Zeitpunkt war weniger eine wissenschaftliche Bewertung, als vielmehr eine Demonstration einer praktischen Anwendung der Technologie anhand einer fahrenden Maschine in der Tunnelröhre. Für diesen

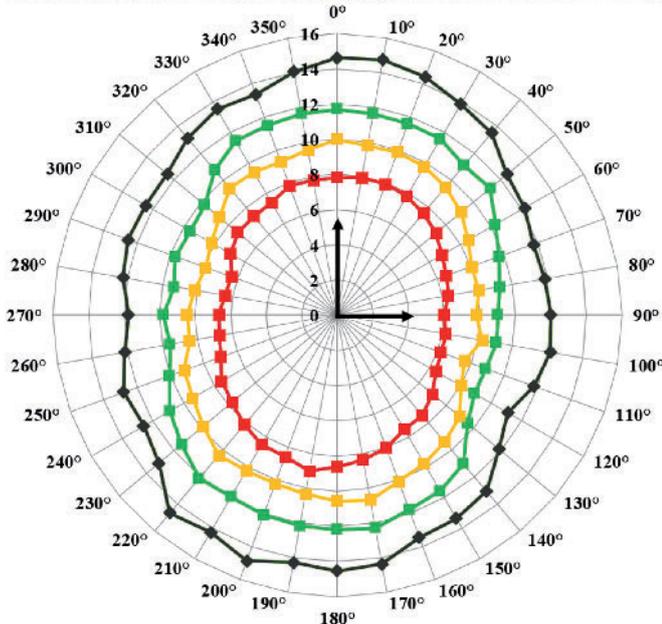


Bild 20. Vermessungsergebnis der Warnzonen eines statischen Radladers; in m

Feldversuch wurde wieder die 800er-Antennensystemkonfiguration benutzt. Die Entfernung zwischen Startpunkt der Maschine und dem nicht sichtbaren Personen-Tag (im Querstollen nahe der Tunnelröhre positioniert) betrug circa 50m. Auf Handzeichen fuhr die Maschine auf gerader Strecke los, um eine konstante Geschwindigkeit von 20km/h zu erreichen. Nach circa 20m wurde die vorgegebene Geschwindigkeit erreicht, die anhand der Ablesung am Tachometer stetig kontrolliert wurde. Es war im weiteren Verlauf dem Maschinenführer nicht bewusst, wann das Warnsignal aktiviert. Beim Hören oder Sehen des ausgelösten Warnsignals (Signalton oder Anzeige im Display) wurde der Maschinenführer angewiesen, sofort die Bremse zu betätigen, umso die Maschine so zügig wie möglich zum Stillstand zu bringen. Nach vollständigem Maschinenstillstand wurde ein Messpunkt durch eine Bodenmarkierung vorläufig auf-

Tabelle 2. Auswertung der Warnentfernungen bei Winkel 180° (äquivalent zur Rückwärtsrichtung)

Alarmzone	Entfernung der Alarmzone [m]			
	1a	1b	2	3
Art des Alarms	Person am Boden warnen	Maschinenführer warnen	Maschine langsamer fahren	Maschine stoppen
1 (Außengelände)	14,55	12,18	10,56	8,63
2 (Tunnel)	16,50	13,80	11,40	9,00
Differenz [m]	1,95	1,62	0,84	0,37

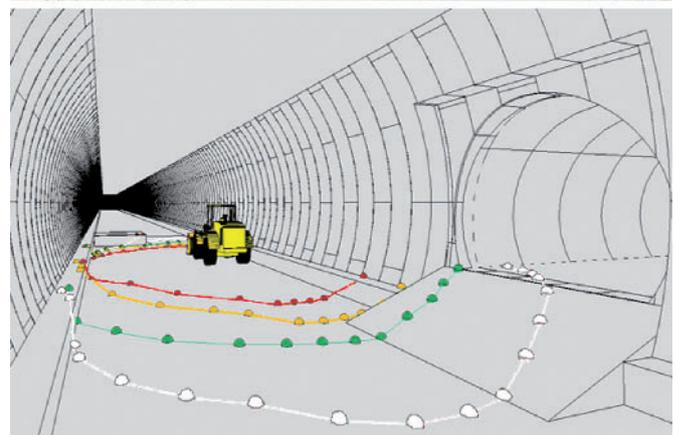


Bild 21. Messdaten der Warnzonen anhand eines Fotos und in einem BIM-Teilmodell

genommen, der die kürzeste Entfernung vom Personen-Tag zum nächsten Maschinenteil darstellt. Danach kehrte das Fahrzeug zur Startposition zurück und wiederholte anschließend diesen Ablauf 30 mal. Bei der Berechnung des Anhaltewegs (Reaktionsweg und Bremsweg) bei Baumaschinen muss die oft nasse, glatte und zum Teil unbefestigte Oberfläche der Fahrbahn in Tunneln und die verzögerte Reaktionszeit des Maschinenführers aufgrund der schwierigen Lichtverhältnisse mitberücksichtigt werden. Gemessen wurde daher nur die naheste Entfernung eines Maschinenteils zum Personen-Tag, nachdem die Maschine zum vollständigen Stillstand kam. Die Geschwindigkeit von Maschinen darf daher nur so groß sein, dass sie vor gefährdeten Personen und Hindernissen innerhalb des Anhaltewegs sicher angehalten werden können [38]. Die kürzeste Distanz des nächsten Maschinenteils war 0,9m und im Durchschnitt rund 1,8m (bei insgesamt 31 Messungen) entfernt vom Personen-Tag (Bild 25).

### 7 Diskussion, Zusammenfassung und Ausblick

Baustellen, insbesondere im Tunnelbau, sind komplexe Projekte, bei denen Menschen, Maschinen und Methoden auf engstem Raum zum Einsatz kommen. Unfälle zu vermeiden, geniest oberste Priorität, wobei die Unfallzahlen in der Bauindustrie in den letzten Jahren stagnieren oder leicht steigen. Gerade der unsachgemäße Einsatz von Maschinen

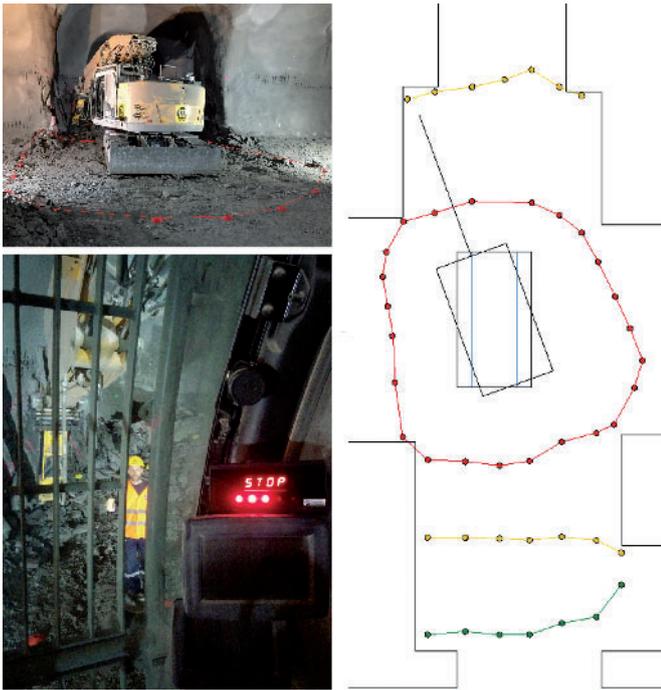


Bild 22. Wirkungsbereich des Magnetfelds an einem Tunnelbagger

verursacht oft schwere Verletzungen bis hin zu Todesfällen. Vorgestellt wurde das Hintergrundwissen, warum Forschung im Arbeitsschutz in der Sparte Tunnelbau, notwendig ist. Auch wurden die Vor- und Nachteile von Technologien beschrieben, die Abhilfe leisten können. Bisher sind nur wenige der möglichen technologischen Assistenzsysteme in der in der Baupraxis auf Vor- und Nachteile hin erprobt.

Die Verwendung von Magnetfeldtechnologie zum Abschirmen von Baumaschinen vor zu nahen Personen am Boden wurde vorgestellt und in Feldversuchen demonstrativ erprobt. Alle in diesem Artikel durchgeführten Versuche zeigten positive Anwendungsmöglichkeiten im Tunnelbau auf, um Menschen proaktiv vor zu nahen Fahrzeugen und Maschinen zu warnen. Auch das Sammeln von Daten zu Beinahe-Unfällen scheint möglich zu sein. Da alle Versuche unter hohem Zeitdruck (innerhalb von anderthalb Tagen) abgeschlossen sein mussten, werden folgende Verbesserungsvorschläge gemacht:

- Messungen in Versuchsstollen sollten möglichen Messfehlern vorbeugen,
- Präzise Vermessungsinstrumente wie Totalstationen und Laserscanning sollten gleichzeitig zum Einsatz kommen,
- Die Anbindung der gesammelten Daten an Bauwerksinformationsmodelle (BIM) sollte automatisiert werden,

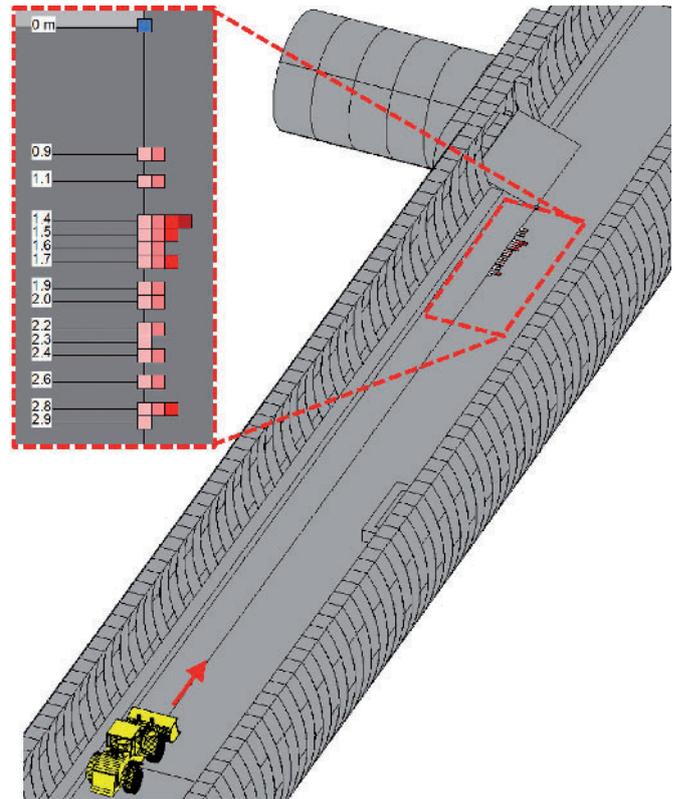


Bild 23. Fahrende Maschine mit Anhaltepositionen des nächsten Maschinenteils nach Häufigkeit

- Technologien zur Positionsbestimmung von Maschinen innerhalb von Tunneln sollten wie in [28], [59] und [40] beschrieben auch in Tunneln Heatmaps generieren,
- Computeralgorithmen zur automatischen Datenauswertung, unter anderem von Beinahe-Unfällen sollten zur Anwendung kommen, und
- Strategien zur technischen Verwertung der gesammelten Informationen sollten neben vorbeugenden Arbeitsvorbereitungs- und Planungsarbeiten in Ausbildungs- und Schulungsmaterialien zum Einsatz kommen, um personalisiertes Lernen zu ermöglichen.

**Danksagung**

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „DigiRAB (Digitale Regeln zum Arbeitsschutz auf Baustellen)“ wird im Rahmen des Programms „Zukunft der Arbeit“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Europäischen Sozialfonds (ESF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

**Literatur**

[1] BG Bau: Unfallschwerpunkte in der Bauwirtschaft. Bundeskoordinatorentag, 3. November 2016.  
 [2] Galler, R.: Sicherheit unter Tage – Beitrag aus der Sicht des Tunnelbaus. BHM Berg- Hüttenmänn, Monatshefte, Bd. 155 (2010), Nr. 4, S. 154–157.

[3] AUaU: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/12643-au-statistik-2016.pdf> [Zugriff am: 02.08.2018].  
 [4] DGUV: Sicher arbeiten im Tunnelbau. Leitfaden für Tunnelbauer.BG Bau und ITA, DGUV Information 201-035, Mai 2011.  
 [5] Teizer, J.: Right-time vs. Real-time Pro-active Construction Safety and Health System Architecture. In: Construction Innovation, Information,

- Process, Management, Emerald, Vol. 16 (2016), Heft 3, S. 253–280, DOI 10.1108/CI-10-2015-0049.
- [6] *Brugger, G.; Sachs, M.*: Tunnelbau im Wandel von 20 Jahren am Beispiel Roppener Tunnel. In: *Geomechanics and Tunneling*, Bd. 2, Nr. 1, 2009, DOI doi.org/10.1002/geot.200900004.
- [7] *Soukup, M.*: Die toten Arbeiter vom Gotthard. Tages-Anzeiger, 2016.
- [8] BG Bau Bausteine: C 466 – Tunnelbau, 2017.
- [9] *Teizer, J.*: Wearable, Wireless Identification Sensing Platform: Self-Monitoring Alert and Reporting Technology for Hazard Avoidance and Training (SmartHat). In: *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, Vol. 20 (2015), pp. 295–312, <http://www.itcon.org/2015/19> [Zugriff am: 02.08.2018].
- [10] *Hinze, J.W.; Teizer, J.*: Visibility-Related Fatalities Related to Construction Equipment. In: *Journal of Safety Science*, Elsevier, Vol. 49 (2011), Iss. 5, pp. 709–718, DOI 10.1016/j.ssci.2011.01.007.
- [11] *Garrett, J. W.; Teizer, J.*: Human Factors Analysis Classification System Relating to Human Error Awareness Taxonomy in Construction Safety. In: *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 135 (2009), Iss. 8, pp. 754–763, DOI 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000034.
- [12] BAuA: Technische Regeln zur Betriebssicherheit – Mechanische Gefährdungen – Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen beim Verwenden von mobilen Arbeitsmitteln. Ausschuss für Betriebssicherheit, TRBS 2111, Teil 1, April 2015.
- [13] ISO 5006:2017: Erdbaumaschinen – Sichtfeld – Testverfahren und Anforderungskriterien, <https://www.iso.org/standard/45609.html> [Zugriff am: 02.08.2018].
- [14] *Teizer, J.*: Safety 360: Surround-View Sensing to Comply with Changes to the ISO 5006 Earth-Moving Machinery – Operator’s Field of View – Test Method and Performance Criteria. In: *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Oulu, Finland, 2015, DOI 10.22260/ISARC2015/0105.
- [15] *Marks, E.; Cheng, T.; Teizer, J.*: Laser Scanning for Safe Equipment Design that Increases Operator Visibility by Measuring Blind Spots. In: *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 139 (2013), Iss. 8, pp. 1006–1014, DOI 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000690.
- [16] *Bostelman, R.; Teizer, J.; Ray, S. J.; Agronind, M.; Albanese, D.*: Methods for Improving Visibility Measurement Standards of Powered Industrial Vehicles. In: *Safety Science*, Elsevier, Vol. 62 (2014), pp. 257–270, DOI: 10.1016/j.ssci.2013.08.020.
- [17] *Teizer, J.; Allread, B. S.; Fullerton, C. E.; Hinze, J.*: Autonomous Pro-Active Real-time Construction Worker and Equipment Operator Proximity Safety Alert System. In: *Automation in Construction*, Elsevier, Vol. 19 (2010), Iss. 5, pp. 630–640, DOI 10.1016/j.autcon.2010.02.009.
- [18] *Teizer, J.; Allread, B. S.; Mantripragada, U.*: Automating the Blind Spot Measurement of Construction Equipment. In: *Automation in Construction*, Elsevier, Vol. 19 (2010), Iss. 4, pp. 491–501, DOI 10.1016/j.autcon.2009.12.012.
- [19] *Teizer, J.*: 3D Range Image Sensing for active Safety in Construction. In: *Journal of Information Technology in Construction, Sensors in Construction and Infrastructure Management*, Vol. 13 (2008), Special Issue, pp. 103–117.
- [20] *Pratt, S. G.; Fosbroke, D. E.; Marsh, S. M.*: Building Safer Highway Work Zones: Measures to Prevent Worker Injuries From Vehicles and Equipment, Department of Health and Human Services: CDC, NIOSH, 5–6, 2001.
- [21] *Ruff, T. M.*: Advances in Proximity Detection Technologies for Surface Mining. In: *Proceeding of the 24th Annual Institute on Mining Health, Safety and Research*, Salt Lake City, 2004.
- [22] *Schiffbauer, W. H.; Mowrey, G. L.*: An Environmentally Robust Proximity Warning System for Surface and Underground Mining Applications, Pittsburgh, PA: National Institute of Safety and Health, NIOSH, Sept. 5, 2012, <https://www.cdc.gov/niosh/mining/UserFiles/works/pdfs/aerpw.pdf> [Zugriff am: 02.08.2018].
- [23] *Teizer, J.*: Magnetic Field Worker Proximity Detection And Alert Technology For Safe Heavy Construction Equipment Operation. In: *Proceedings of the 32nd Intl. Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Oulu, Finland, 2015, DOI 10.22260/ISARC2015/0062.
- [24] *Teizer, J.*: Wearable, Wireless Identification Sensing Platform: Self-Monitoring Alert and Reporting Technology for Hazard Avoidance and Training (SmartHat). In: *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, Vol. 20 (2015), pp. 295–312, <http://www.itcon.org/2015/19> [Zugriff am: 02.08.2018].
- [25] Initiative Neue Qualität der Arbeit: Personen- und Objekterkennung in Gefahrenbereichen. Netzwerk Baumaschinen der Offensive Gutes Bauen, <http://www.inqa.de> [Zugriff am: 02.08.2018].
- [26] *Zhang, S.; Teizer, J.; Lee, J.-K.; Eastman, C.; Venugopal, M.*: Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. In: *Automation in Construction*, Elsevier, Vol. 29 (2013), pp. 183–195, DOI 10.1016/j.autcon.2012.05.006.
- [27] Selectronic Funk- und Sicherheitstechnik GmbH, <http://www.selectronic-funk.de> [Zugriff am: 02.08.2018].
- [28] *Golovina, O.; Teizer, J.; Pradhananga, N.*: Heat Map Generation for Predictive Safety Planning: Preventing Struck-by and Near Miss Interactions between Workers-on-Foot and Construction Equipment. In: *Automation in Construction*, Elsevier, Vol. 71 (2016), pp. 99–115, DOI 10.1016/j.autcon.2016.03.008.
- [29] *Weber, J.; Teizer, J.; König, J.; Ochner, B.*: LoRa for Construction Site Logistics. In: *Proceedings of the 35th Intl. Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Berlin, 2018.
- [30] *König, M.; Rahm, T.; Nagel, F.; Speier, L.*: BIM-Anwendungen im Tunnelbau, Digitale Planung und Ausführung von Tunnelbauprojekten. In: *Bautechnik 94* (2017), Heft 4, S. 227–231, DOI 10.1002/ba-te.201700005.
- [31] *Zhang, S.; Sulankivi, K.; Kiviniemi, M.; Romo, I.; Eastman, C. M.; Teizer, J.*: BIM-based Fall Hazard Identification and Prevention in Construction Safety Planning. In: *Safety Science*, Elsevier, Vol. 72 (2015), pp. 31–45, DOI 10.1016/j.ssci.2014.08.001.
- [32] *Teizer, J.; Melzner, J.*: Sicherheitstechnische Planung von Hoch- und Ingenieurbauprojekten mithilfe von Bauwerksinformationsmodellen (BIM). In: *Bauingenieur*, Jahresausgabe 2015/16, S. 128–135.
- [33] *Melzner, J.; Teizer, J.; Zhang, S.; Bargstädt, H.-J.*: Objektorientierte sicherheitstechnische Planung von Hochbauprojekten mit Hilfe von Bauwerksinformationsmodellen. In: *Bauingenieur 88* (2013), Heft 11, S. 471–479.
- [34] Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Straßen, A2 Sanierungstunnel Belchen, 2014–2021, [http://www.belchentunnel.ch/docs/astra\\_sanierungstunnel\\_belchen\\_projektflyer\\_2017\\_lowres.pdf](http://www.belchentunnel.ch/docs/astra_sanierungstunnel_belchen_projektflyer_2017_lowres.pdf) [Zugriff am: 02.08.2018].
- [35] *Marks, E.; Teizer, J.*: Method for Testing Proximity Detection and Alert Technology for Safe Construction Equipment Operation. In: *Construction Management and Economics*, Taylor & Francis, Special Issue on Occupational Health and Safety in the Construction Industry, Vol. 31 (2013), Iss. 6, pp. 636–646.
- [36] *Ray, S. J.; Teizer, J.*: Dynamic Blindspots Measurement for Construction Equipment Operators. In: *Safety Science*, Elsevier, Vol. 85 (2016), pp. 139–151, DOI 10.1016/j.ssci.2016.01.011.
- [37] *Ray, S. J.; Teizer, J.*: Computing 3D Blind Spots of Construction Equipment: Implementation and Evaluation of an Automated Measurement and Visualization Method Utilizing Range Point Cloud Data. In: *Automation in Construction*, Elsevier, Vol. 36 (2013), pp. 95–107, DOI 10.1016/j.autcon.2013.08.007.

- [38] Verordnung des Bundesministers für Arbeit und Soziales über Vorschriften zum Schutz des Lebens, der Gesundheit und der Sittlichkeit der Arbeitnehmer bei Ausführung von Bauarbeiten (Bauarbeiterschutzverordnung – BauV). BGBl.Nr. 340/1994, Paragraph 101 (Verkehr in Tunnel- und Stollenbau).
- [39] *Teizer, J.; Cheng, T.*: Proximity hazard indicator for near miss location recording and mapping of workers-on-foot interactions with construction equipment and geo-referenced hazard areas. *In: Automation in Construction*, Elsevier, Vol. 60 (2015), pp. 58–73, DOI 10.1016/j.autcon.2015.09.003.
- [40] *Golovina, O.; Perschewski, M.; Teizer, J.; König, M.*: Quantitative Analysis of Close Call Events. EG-ICE 2018, Lausanne, Switzerland.