



VSS

STRASSE UND VERKEHR ROUTE ET TRAFIC

VSS-Webinar

**Welche Mobilität wollen
und brauchen wir in
Zukunft?**

Webinaire VSS

**Quelle est la mobilité
souhaitée et nécessaire
dans le futur?**

Forschung | Recherche

Wie gefährlich sind brennende Elektroautos im Parkhaus?

Les incendies de véhicules électriques dans les parkings couverts sont-ils dangereux?

Elektrofahrzeugbrand im Parkhaus – und nun?

Fragen und Antworten aus dem experimentellen Forschungsprojekt AGT 2018/006

Incendies de véhicules électriques dans des parkings couverts – et maintenant?

Questions et réponses issues du projet de recherche expérimentale AGT 2018/006

Ingenieure und Wissenschaftler sind der Frage nachgegangen, inwiefern sich die toxischen Emissionen nach einem Elektrofahrzeugbrand in unterirdischen Infrastrukturen auf die Sicherheit auswirken und ob sich Betreiber langfristig auf veränderte Risiken einstellen müssen. In einem internationalen Forschungsprojekt unter der Leitung von Amstein + Waltherth Progress AG (A+W) wurde dazu eine bislang einzigartige Versuchsreihe mit Traktionsbatterien in realer Umgebung im VersuchsStollen Hagerbach (VSH) fortgeführt. Die Erkenntnisse sind folgenreich.

Ingénieurs et scientifiques se sont demandé dans quelle mesure les émissions de fumées toxiques résultant de l'incendie d'un véhicule électrique dans des infrastructures souterraines ont des répercussions sur la sécurité et si les exploitants doivent s'attendre à long terme à des modifications des risques. Dans le cadre d'un projet de recherche international dirigé par Amstein + Waltherth Progress SA (A+W), une série d'essais avec des batteries de traction unique à ce jour a été menée en environnement réel dans la galerie d'essai de VersuchsStollen Hagerbach (VSH). Les résultats sont instructifs et permettront d'agir.

Veränderte Risikolandschaft

Elektrofahrzeugbrände mit Lithium-Ionen-Batterien führen zu neuartigen Schadstoffemissionen. Und wenn diese in unterirdischen Infrastrukturen anfallen, dann können sehr schnell kritische Konzentrationen überschritten werden, so dass die bisherige Gefährdungssituation in chemischer Hinsicht verändert wird. Diese Erkenntnis war das Resultat eines internationalen Experiments, das mit dem Forschungsprojekt VSS 2016/221 bereits im Jahr 2018 umgesetzt wurde.



VON
LARS MELLERT
MSc Geographie Universität Zürich,
Senior Consultant,
Amstein + Waltherth Progress AG,
Präsident NFK 2.5



VON
MICHAEL KOMPATSCHER
Dr. sc. nat.
Geschäftsführer
VersuchsStollen Hagerbach AG

Die Studie kam damals zum Schluss, dass die thermischen Brandgefährdungen von Elektrofahrzeugen mit jenen von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind. Aber bei ungünstigen Lüftungssituationen würden Elektrofahrzeugbrände zu neuen und potenziell stärkeren chemischen Gefährdungen führen. Die Schadstoffanalysen deuteten auf kritische Konzentrationen der Schwermetalle Kobalt, Nickel und Mangan sowie Lithium in Form von Aerosolen hin.

Un paysage des risques modifié

Les incendies de véhicules électriques équipés de batteries lithium-ion entraînent de nouveaux types d'émissions polluantes. Et lorsqu'ils se produisent dans des infrastructures souterraines, les concentrations critiques peuvent être très rapidement dépassées, ce qui modifie la situation en matière de risques chimiques. Tel est le constat qui ressort d'une expérience internationale mise en œuvre en 2018 dans le cadre du projet de recherche VSS 2016/221.

L'étude est parvenue à l'époque à la conclusion que les risques thermiques liés à l'incendie de véhicules électriques étaient comparables à ceux des véhicules conventionnels. Toutefois, lorsqu'ils se produisent dans des conditions d'aération insuffisantes, les incendies de véhicules électriques pourraient entraîner de nouveaux risques chimiques potentiellement plus importants. Les analyses de polluants indiquaient des concentrations critiques, sous forme d'aérosols, des métaux lourds que sont le cobalt, le nickel, le manganèse ainsi que de lithium.



1 | Ein Batteriemodul eines Elektroautos entwickelt beim Brand grosse Mengen von Russ, in dem sich giftige Metalloxide befinden (Foto: Amstein + Walther/Empa).

1 | En cas d'incendie, un module de batterie de voiture électrique émet de grandes quantités de suie contenant des oxydes métalliques toxiques (photo: Amstein + Walther/Empa).

Bislang unklare Konsequenzen für Infrastrukturen

Über mögliche Auswirkungen und Spätfolgen der Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in Strassentunneln und Parkhäusern oder Tiefgaragen konnten bislang aber noch keine abschliessenden Antworten gegeben werden. Zur definitiven Schliessung dieser noch offenen Wissenslücken wurden mit Unterstützung des ASTRA deshalb Folgeuntersuchungen initiiert. Und A+W kehrte mit seinen bewährten Forschungspartnern des VSH sowie mit weiteren Batterie- und Brandschadenspezialisten der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) für ein weiteres Experiment in den Untergrund zurück. Die übergeordnete Frage lautete dieses Mal: Führen Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Infrastrukturen zu Kontaminationen mit nachhaltigen Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit?

Erneut ein innovatives Experiment im Hagerbach

Zur Untersuchung der Forschungsfragen mussten mehrere neuwertige und vollständig gebrauchstaugliche Batterien für gängige batterieelektrische Personenkraftwagen der Mittelklasse zu Brand gebracht werden. Das gesamte Experiment bestand aus verschiedenen Versuchsszenarien (vgl. Tab.1) und wurde im Stollensystem des VSH durchgeführt. Dieser hatte sich in der Vergangenheit für Versuche solcher Art bewährt und eignete sich auch zur Untersuchung der nun vorliegenden, weitergehenden Fragestellungen. Für eine

Des conséquences sur les infrastructures incertaines jusqu'à présent

Mais jusqu'ici, il n'avait pas été possible de fournir des réponses définitives quant aux effets et conséquences possibles des émissions dues aux incendies de véhicules électriques dans les tunnels routiers et les parkings couverts ou souterrains. Des recherches supplémentaires ont donc été engagées avec le soutien de l'OFROU afin de combler définitivement ces lacunes. Et A+W a repris le chemin du sous-sol pour mener une nouvelle expérience avec ses anciens partenaires de recherche de VSH ainsi que d'autres spécialistes des batteries et des dégâts causés par les incendies du Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa). La question centrale était cette fois de savoir si les émissions produites lors des incendies de véhicules électriques dans des infrastructures souterraines entraînaient des contaminations avec des effets durables sur l'exploitation et la sécurité.

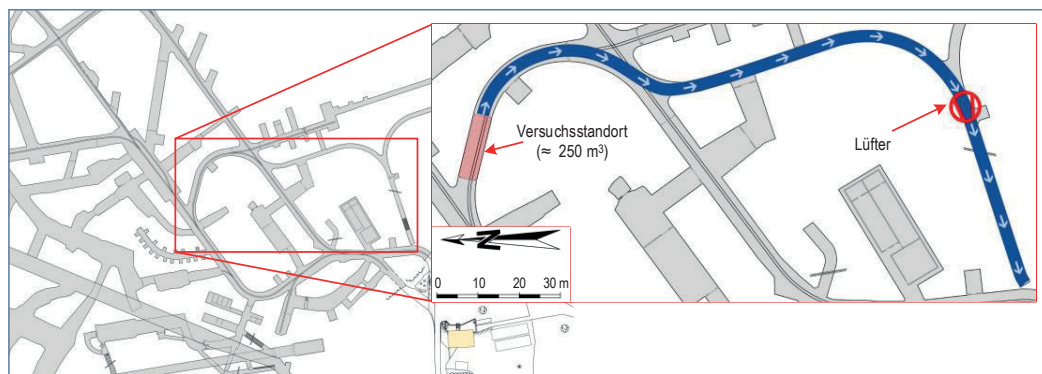
Une nouvelle expérience innovante dans la galerie d'essai de Hagerbach

Afin d'étudier les problématiques définies, le feu a été mis à plusieurs batteries neuves et en parfait état de marche telles que celles qui équipent des voitures électriques de milieu de gamme classiques. L'expérience était basée sur différents scénarios de recherche (voir tableau 1) et a été menée dans le système de galeries de VSH, qui avait déjà fait ses preuves lors de recherches de ce type par le passé et convenait également à l'étude de ces problématiques complémentaires. Deux profils d'environnement différents (voir illustrations 2, 3, 4 et 5) étaient nécessaires à la conduite sûre et ciblée des essais: d'une part, un site d'essai avec

zielorientierte und sichere Durchführung der Versuche wurden zwei unterschiedliche Umgebungsprofile benötigt (vgl. Abb. 2, 3, 4 und 5): Einerseits ein Versuchsstandort mit einem klar abgrenzbaren Raumvolumen (Stollen «A») zur Analyse von Kontaminationen in einer geschlossenen Umgebung ohne Luftzirkulation. Und ein Versuchsstandort mit einer langen Messstrecke zur Untersuchung des Transport- und Ablagerungsverhaltens der batteriespezifischen Brandemissionen (Stollen «B») andererseits.

un volume clairement délimitable (galerie «A») pour analyser les contaminations dans un environnement clos sans circulation d'air. Et d'autre part, un site d'essai doté d'une longue section de mesure afin d'étudier le comportement de transfert et de dépôt des émissions spécifiques aux feux de batterie (galerie «B»).

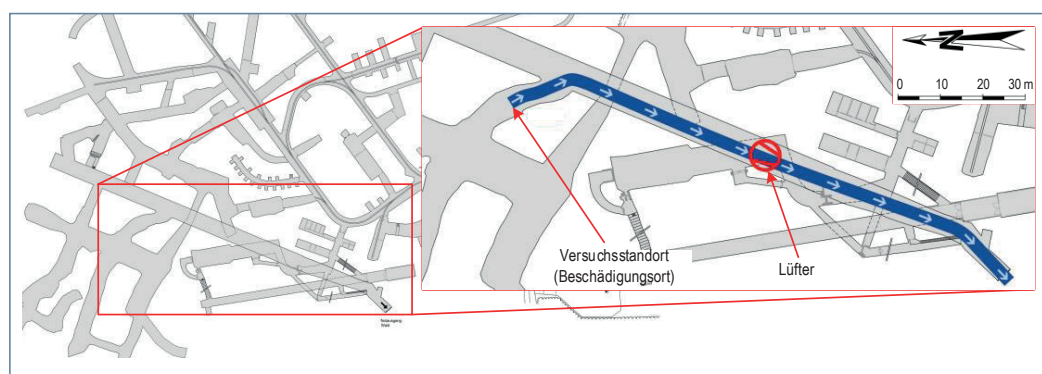
L'hypothèse selon laquelle les émissions spécifiques aux incendies de véhicules électriques dans des infrastructures de transport souterraines pourraient entraîner des effets durables



2 | Lage des Stollens «A» mit Lüftungsstrecke (blau).
2 | Plan de la galerie «A» avec sa section de ventilation (en bleu).



3 | Versuchsplatz Stollen «A» (links) mit Abluftreinigungs-vorrichtung (rechts).
3 | Site d'essai de la galerie «A» (à gauche) avec son dispositif d'assainissement de l'air pollué (à droite).

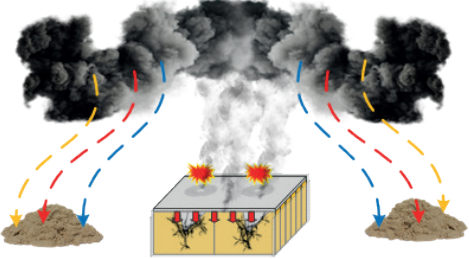
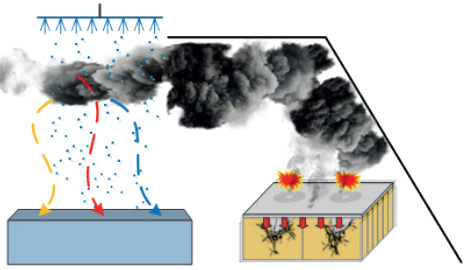
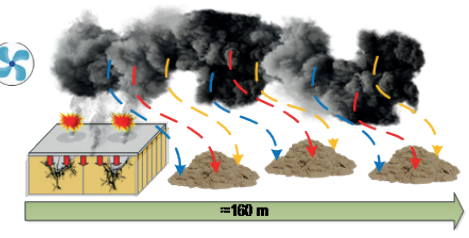
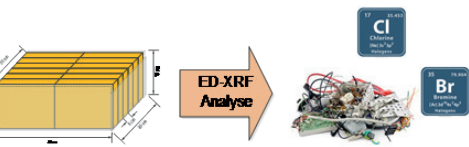


4 | Lage des Stollens «B» mit Lüftungsstrecke (blau).
4 | Plan de la galerie «B» avec sa section de ventilation (en bleu).



5 | Versuchsplatz Stollen «B» (links) und darauffolgende Messstrecke (rechts).
5 | Site d'essai de la galerie «B» (à gauche) et section de mesure adjacente (à droite).

Tab. 1: Versuchsszenarien mit den Batteriemodulen 1, 2, 3 und 4
Tab. 1: scénarios d'essai avec les modules de batterie 1, 2, 3 et 4

Szenario Scénario	Illustration
1 «Infrastruktur und Schutzausrüstung»: Mechanische Beschädigung des Batteriemoduls mittels Sprengtechnik in einem geschlossenen Raum ohne mechanische Lüftung. Ziel: Analyse Brandrückstände auf Oberflächen und textiler Schutzausrüstung sowie Korrosivität gegenüber typischen Metallen. → Stollen «A» «Infrastructure et équipement de protection»: Endommagement mécanique du module de batterie au moyen d'explosifs dans un espace clos sans ventilation mécanique. Objectif: analyse des résidus d'incendie sur les surfaces et les équipements de protection textiles ainsi que de la corrosivité sur les métaux typiques. → Galerie «A»	
2 «Löschwasser»: Mechanische Beschädigung des Batteriemoduls mittels Sprengtechnik in einem geschlossenen Raum ohne mechanische Lüftung und mit kontinuierlichem Wasserzustrom in Brandemissionen (nicht auf Batteriemodul, ohne Druckaufbereitung). Ziel: Analyse Löschwasserkontamination. → Stollen «A» «Eau d'extinction»: Endommagement mécanique du module de batterie au moyen d'explosifs dans un espace clos sans ventilation mécanique avec un apport d'eau continu sur les émissions dues à l'incendie (et non sur le module de batterie, arrosage sans pression). Objectif: analyse de la contamination de l'eau d'extinction. → Galerie «A»	
3 «Transport- und Ablagerungsverhalten»: Mechanische Beschädigung des Batteriemoduls mittels Sprengtechnik in einem offenen Raum mit konstanter Luftströmung von ca. 1.5 m/s. Ziel: Analyse räumliches Ablagerungsverhalten. → Stollen «B» «Comportement de transfert et de dépôt»: Endommagement mécanique du module de batterie au moyen d'explosifs dans un espace ouvert avec un courant d'air constant d'environ 1,5 m/s. Objectif: analyse du comportement de dépôt dans l'espace. → Galerie «B»	
4 «Materialanalyse»: Untersuchung des Batteriemoduls ohne Zerstörung der Batteriezellen zwecks Materialanalyse sämtlicher Modulbestandteile (Batteriezellen, Kabel, Elektronik, Isolation, Gehäuse etc.). Ziel: Abgrenzung zwischen «zellchemischen» und «weiteren» Brandfolgeprodukten. → Labor Empa «Analyse de matériaux»: Étude du module de batterie sans destruction des cellules de la batterie afin d'analyser les matériaux de tous les composants du module (cellules de batterie, câbles, système électronique, isolation, boîtier, etc.). Objectif: délimitation entre les produits d'incendie chimiques issus des cellules et les autres produits d'incendie. → Laboratoire Empa	

Die Hypothese, dass die spezifischen Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen zu nachhaltigen Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit führen, konnte nicht pauschal bestätigt. Sie muss differenzierter beantwortet werden. Die zentralen Erkenntnisse verdeutlichen, dass sich solche Brandereignisse in kleinen oder nicht aktiv belüfteten Infrastrukturen anders auswirken als in grossen oder mechanisch belüfteten, und zudem objektunabhängige Risiken bergen.

Treten die gemessenen Schadstoffe auch bei konventionellen Fahrzeugbränden auf?

Nein. Die Schwermetalle Kobalt, Nickel und Mangan sowie Lithium sind Substanzen, die in konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, wenn überhaupt, nicht in grösseren Mengen vorkommen – weder im Fahrzeugüberbau noch im Antriebssystem. Sie werden deshalb auch bei einem vollständigen Fahrzeugbrand nicht ausgestossen. Ein aktuelles Brandereignis aus der Schweiz zeigt diese Tatsache eindrücklich auf: nach einem Lagerhallenbrand im Februar 2020 mit Beteiligung von sieben komplett ausgebrannten Lieferwagen mit konventionellem Verbrennungsmotorantrieb, konnten keine nennenswerten Schwermetallkonzentrationen in den Brandrückständen nachgewiesen werden. Schwermetall- und Lithiumemissionen können deshalb als elektrofahrzeugspezifisch bezeichnet werden.

Sind die gemessenen Schadstoffmengen überhaupt relevant?

Ja, die Schadstoffkonzentrationen müssen deshalb beachtet werden, weil sie in konventionellen Fahrzeugbränden nicht vorkommen und somit eine zusätzliche Gefährdung darstellen. Sie sind zudem relevant, weil sie die Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen insbesondere in kleineren Infrastrukturen um ein Vielfaches überschreiten, bis zu einem Faktor 4000. In diesem Zusammenhang sind neben den Schwermetallen Kobalt, Nickel und Mangan insbesondere auch Fluoride und Lithium sowie PAK-Verunreinigungen zu beachten. Alle diese neuartigen Substanzgruppen sind in humantoxikologischer Hinsicht schädlich und können damit zu einer Verschärfung des Risikos in unterirdischen Infrastrukturen führen. Kobalt- und Nickel-Oxide gelten zudem als sogenannte «Sensibilisierer»: Sie können (auch bei kurzer Expositionszeit) Immunreaktionen (Typ IV-Allergien) über die Haut hervorrufen, und einige Studien weisen zudem darauf hin, dass sie auch via Atemwege sensibilisieren können.

Wird die Personensicherheit beeinträchtigt?

Hinsichtlich der vom Brandereignis direkt betroffenen Personen: Nein. Die Schadstoffemissionen eines Fahrzeugbrands waren schon immer gefährlich und unter bestimmten Umständen letal. Völlig unabhängig von der Antriebsform oder der Speichertechnologie eines Fahrzeuges wird das oberste Ziel weiterhin sein, dass sich Personen möglichst schnell aus der Gefahrenzone und in Sicherheit begeben.

sur l'exploitation et la sécurité n'a pas pu être confirmée de manière générale. Les réponses doivent être apportées de façon plus nuancée. Les principaux résultats montrent que de tels incendies ont des répercussions différentes selon qu'ils se produisent dans des infrastructures exiguës ou non équipées d'un système de ventilation active ou bien dans des infrastructures vastes ou à ventilation mécanique, et qu'ils recèlent par ailleurs des risques indépendants des installations touchées.

Les substances polluantes mesurées s'observent-elles également lors de feux de véhicules conventionnels?

Non. Les métaux lourds tels que le cobalt, le nickel et le manganèse ainsi que le lithium sont des substances qui sont absentes ou ne sont pas présentes en grandes quantités dans les véhicules conventionnels à moteur à combustion – que ce soit dans la superstructure du véhicule ou dans le système d'entraînement. C'est pourquoi elles ne sont pas émises, y compris en cas de destruction totale du véhicule par le feu. Un cas d'incendie récent en Suisse l'a clairement démontré: suite à l'incendie d'un entrepôt en février 2020, au cours duquel sept véhicules de livraison dotés de moteurs à combustion conventionnels ont été intégralement brûlés, il n'a pas été relevé de concentrations notables de métaux lourds dans les résidus d'incendie. On peut donc dire que les émissions de métaux lourds et de lithium sont spécifiques aux véhicules électriques.

Les quantités de substances polluantes mesurées sont-elles réellement importantes?

Oui, les concentrations de substances polluantes sont en soi un sujet, car elles ne sont pas présentes dans les feux de véhicules conventionnels et représentent donc un danger supplémentaire. Elles sont par ailleurs importantes, car elles dépassent largement, en particulier dans les petites infrastructures, les niveaux de fond des surfaces non contaminées, avec des niveaux jusqu'à 4000 fois supérieurs. On observe dans ce contexte, outre les métaux lourds que sont le cobalt, le nickel et le manganèse, du fluorure et du lithium ainsi que des contaminations aux HAP. Tous ces nouveaux groupes de substances sont nocifs sur le plan toxicologique pour l'homme et peuvent donc accroître les risques dans les infrastructures souterraines. De plus, les oxydes de cobalt et de nickel sont ce que l'on appelle des «sensibilisateurs»: ils peuvent, y compris avec un faible temps d'exposition, déclencher des réactions immunitaires cutanées (allergies de type IV) et quelques études semblent aussi indiquer qu'ils peuvent sensibiliser via les voies respiratoires.

Y a-t-il un impact sur la sécurité des personnes?

En ce qui concerne les personnes directement touchées par l'incendie, la réponse est non. Les émissions polluantes dues à un feu de véhicule ont toujours été dangereuses et, dans certaines circonstances, létales. Indépendamment du mode d'entraînement ou de la technologie de stockage d'un véhicule, la priorité numéro un reste de mettre à l'abri les personnes hors de la zone de danger le plus rapidement possible.

Die Sicherheit der indirekt betroffenen Personen kann aber durchaus beeinträchtigt werden – im besonderen Fokus stehen hierbei das Betriebs- sowie das Dekontaminations- und Entsorgungspersonal. Die persistenten Schwermetallemissionen können über Lüftungskanäle oder Löschwasser verfrachtet und an anderen Orten über längere Zeit abgelagert werden und im schlechtesten Falle akkumulieren. Sofern sie unbekannt und unbehandelt bleibt, kann diese potenziell verschleppte Kontamination die Personensicherheit nachhaltig beeinträchtigen: Dann nämlich, wenn Personen zu einem späteren Zeitpunkt ohne Vorkenntnisse oder geeignete Schutzvorkehrungen in Kontakt mit schadstoffbelasteten Orten kommen (Bsp. Reinigung von Lüftungskanälen durch Betriebspersonal).

Das Problem wird hierbei jedoch weniger bei grossen unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen wie Tunneln oder Parkhäusern mit professioneller Organisation und regelmässigen Betriebsprozessen gesehen. Es wird eher bei kleineren Anlagen vermutet, wie Einstellhallen oder privaten Garagen, die oftmals mit weniger Aufwand betrieben und nach einem Ereignis möglicherweise nicht immer fachgerecht und nach dem aktuellen Stand der Technik dekontaminiert werden.

Stellen sich neue Umweltgefahren durch unkontrolliert abfliessendes Löschwasser?

Ja. Das Wasser, das durch die Feuerwehr während eines Elektrofahrzeugbrandes zur Bekämpfung eingesetzt wird, wird sehr stark mit batteriespezifischen Substanzen, insbesondere Schwermetallen, kontaminiert sein. Die hohen gemessenen Konzentrationen an Kobalt, Nickel und Mangan übersteigen die Grenzwerte für Trinkwasser in der Schweiz um Faktoren von 700 bis 1800. Die Einleitwerte in die Kanalisation für Industrieabwässer in der Schweiz werden um Faktoren von 20 bis 70 überschritten. Diese Erkenntnisse unterstreichen die Wichtigkeit einer entsprechenden Löschwasserbehandlung während und nach einer Ereignisbewältigung. Weil der Rückhalt und die Kontrolle von Löschwasser aber bei einer schweizerischen Feuerwehr zum regulären Ereignisablauf gehören, sollte das Umweltrisiko durch abfliessendes Löschwasser nach einem Elektrofahrzeugbrand reduziert werden können.

Und was ist mit dem Kühlwasser für eine havarierte Lithium-Ionen-Batterie?

Ja, durch das Kühlwasser ergeben sich potenzielle Gefährdungen für die Umwelt. Die aktuelle Praxisempfehlung für beschädigte Traktionsbatterien sieht eine vollständige Flutung in einem Wasserbecken und Überwachung über mehrere Tage vor. Ziel dabei ist es, die chemischen Reaktionen zu verlangsamen und insbesondere ein Überhitzen noch intakter Zellen zu verhindern –im Idealfall kann die Kettenreaktion unterbrochen werden. Bereits beschädigte Zellen werden trotz der Wasserkühlung abreagieren und ausbrennen. Wird eine beschädigte oder auch komplett ausgebrannte Traktionsbatterie mit dieser Methode über einige Tage gela-

La sécurité des personnes indirectement touchées peut toutefois être impactée – cela concerne particulièrement le personnel chargé de l'exploitation mais aussi des travaux de décontamination et d'élimination. Les émissions persistantes de métaux lourds peuvent être transférées via les conduits de ventilation ou l'eau d'extinction et stockées dans d'autres endroits pendant un certain temps voire, dans le pire des cas, s'y accumuler. Si elle demeure ignorée et non traitée, cette contamination «de transfert» potentielle peut durablement impacter la sécurité des personnes: par exemple lorsque des personnes sans connaissances préalables ou n'ayant pas pris de mesures de protection appropriées entrent ultérieurement en contact avec des lieux contaminés par des substances polluantes (par exemple lors du nettoyage des conduits de ventilation par le personnel d'exploitation).

Le problème ne devrait toutefois pas tellement concerner les grandes infrastructures de transport souterraines telles que les tunnels et parkings couverts qui font l'objet d'une organisation professionnelle et de processus d'exploitation réguliers. Il devrait toucher davantage les installations de taille plus modeste comme les halles de garage ou les garages privés qui sont souvent exploités à moindres frais et qui, suite à un événement, ne sont pas toujours décontaminés dans les règles de l'art et conformément à l'état actuel de la technique.

L'écoulement incontrôlé de l'eau d'extinction représente-t-il de nouveaux risques pour l'environnement?

Oui. L'eau utilisée par les pompiers pour éteindre un incendie de véhicule électrique est très fortement contaminée par des substances spécifiques aux batteries, en particulier des métaux lourds. Les fortes concentrations de cobalt, nickel et manganèse mesurées sont 700 à 1800 fois supérieures aux valeurs limites autorisées pour l'eau potable en Suisse. Et 20 à 70 fois supérieures aux valeurs admissibles pour le déversement des eaux usées industrielles dans le réseau d'égouts en Suisse. Ces résultats soulignent l'importance d'un traitement approprié de l'eau d'extinction pendant et après la maîtrise d'un incendie. Mais étant donné qu'en Suisse, la récupération et le contrôle de l'eau d'extinction font partie du déroulement ordinaire d'une intervention des pompiers, le risque environnemental dû à un écoulement de l'eau d'extinction après un incendie de véhicule électrique devrait pouvoir être réduit.

Et qu'en est-il de l'eau de refroidissement pour une batterie au lithium-ion endommagée?

C'est vrai, l'eau de refroidissement est une source de risques potentiels pour l'environnement. La pratique actuelle recommandée lorsque des batteries de traction sont endommagées consiste à les immerger entièrement dans une cuve d'eau et à les surveiller pendant plusieurs jours. L'objectif est de ralentir les réactions chimiques et notamment d'éviter la surchauffe des cellules encore intactes – dans le meilleur des cas, il est ainsi possible d'interrompre la réaction en chaîne. Les cellules déjà endommagées réagiront et se consumeront malgré le refroidis-

gert, dann durchdringt das Kühlwasser die gesamte Batterie und kommt in Kontakt mit allen darin enthaltenen Substanzen. Dadurch werden zahlreiche Substanzen im Wasser gelöst, sodass sich dieses von einer praktisch neutralen ($\text{pH} \approx 8$) hin zu einer stark basischen Lösung ($\text{pH} > 12$) verändert. Die festgestellten Fluorid-, Lithium- und Schwermetallgehalte im Kühlwasser überschreiten die Grenzwerte oder typische Gehalte für Trinkwasser in der Schweiz bzw. Deutschland um ein Vielfaches: Fluorid > 220 , Lithium $> 30\,000$, Kobalt, Nickel und Mangan $> 1000\text{--}2800$. Die Einleitwerte in die Kanalisation für Industrieabwässer in der Schweiz werden um Faktoren von 30 bis 100 überschritten.

Aufgrund der Tatsache, dass bis anhin keine einheitlichen Vorgaben für den Übergabe- und Nachbehandlungsprozess von havarierten Traktionsbatterien bestehen, werden diese zurzeit an ganz verschiedenen Orten gelagert. Von professionell betriebenen Havarieplätzen bis hin zur unbewachten Mulde auf einem Kiesplatz direkt neben einem Schutzgebiet ist alles möglich. Es muss deshalb auch davon ausgegangen werden, dass die Entsorgung des stark kontaminierten Kühlwassers ganz unterschiedlich gehandhabt wird und im ungünstigsten Fall ohne jegliche Schutzvorkehrungen vorgenommen wird.

Zum jetzigen Kenntnisstand muss davon ausgegangen werden, dass das einfache Ausschütten von derart kontaminiertem Kühlwasser in die Umwelt, noch nicht einschätzbare Folgen haben kann, die wiederum vom jeweiligen Standort abhängig sind (Bsp. urbane oder rurale Standorte, Schutzgebiete etc.). Hierbei ist insbesondere zu beachten, dass einige Stoffe karzinogen sind, in elementarer Form vorliegen, nicht abbaubar sind und sich in der Umwelt akkumulieren können. Die Bedeutung einer fachgerechten Entsorgung kann auch in diesem Falle nicht genügend unterstrichen werden.

Ergeben sich längere Sperrzeiten aufgrund von Dekontaminationsarbeiten?

Nein. Professionell betriebene unterirdische Verkehrsinfrastrukturen werden nach einem Brandereignis ohnehin umfassend saniert. Und weil jedes Feuer in einem Strassentunnel oder einem Parkhaus das Potenzial für nachhaltige Betriebsbeeinträchtigungen hat, entscheiden die aufgebotenen Brandschadenssanierer jeweils vor Ort und je nach Ereignis über die angemessenen Massnahmen und deren Reihenfolge. Das Ziel jeder Sanierung ist dabei die fachgerechte Entfernung von Brandrückständen wie Russ, Brandkondensate oder kontaminiertes Waschwasser und dadurch die potenziellen Folgeschäden nach einem Brandereignis zu minimieren.

Werden Anlagenwerte von Bauteilen und technischen Einrichtungen übermässig vermindert?

Nein. Die Untersuchungen hinsichtlich der Korrosionsschädigung von verschiedenen metallischen Werkstoffen ha-

sement à l'eau. Si une batterie de traction endommagée ou entièrement brûlée est stockée pendant plusieurs jours selon cette méthode, l'eau de refroidissement pénètre dans l'ensemble de la batterie, entrant en contact avec toutes les substances qu'elle contient. De nombreuses substances se dissolvent ainsi dans l'eau, de sorte que celle-ci, d'une solution quasiment neutre ($\text{pH} \approx 8$), devient une solution fortement basique ($\text{pH} > 12$). Les teneurs en fluorure, lithium et métaux lourds constatées dans l'eau de refroidissement dépassent largement les valeurs limites ou les concentrations typiques applicables à l'eau potable en Suisse et en Allemagne: fluorure > 220 , lithium $> 30\,000$, cobalt, nickel et manganèse $> 1000\text{--}2800$. Et elles sont 30 à 100 fois supérieures aux valeurs admissibles pour le déversement des eaux usées industrielles dans le réseau d'égouts en Suisse.

Puisqu'il n'existe pas à ce jour de prescriptions standardisées pour le processus de remise et de post-traitement de batteries de traction endommagées, celles-ci sont actuellement stockées dans les endroits les plus variés. Des déchetteries exploitées par un professionnel à la benne sans surveillance sur un parking gravillonné à proximité d'un site protégé, tout est possible. On peut donc penser que l'élimination de l'eau de refroidissement fortement contaminée est gérée de diverses façons et, dans le pire des cas, s'effectue sans la moindre mesure de protection.

Dans l'état actuel des connaissances, nous devons partir du principe que déverser sans précaution de l'eau de refroidissement contaminée dans l'environnement peut avoir des conséquences encore impossibles à évaluer, qui dépendent aussi du site concerné (par exemple zone urbaine ou rurale, sites protégés, etc.). Il convient de noter ici que certaines substances sont cancérigènes, sont présentes sous leur forme élémentaire, ne sont pas biodégradables et peuvent s'accumuler dans l'environnement. On ne soulignera donc jamais assez, dans ce cas également, l'importance d'une élimination dans les règles de l'art.

Les infrastructures restent-elles longtemps inaccessibles en raison des travaux de décontamination?

Non. Les infrastructures de transport souterraines exploitées professionnellement sont de toute façon entièrement réhabilitées après un incendie. Et comme chaque feu dans un tunnel routier ou un parking couvert peut potentiellement perturber durablement l'exploitation, les professionnels chargés de la réhabilitation suite à un incendie décident à chaque fois sur place et en fonction de la situation quelles mesures prendre et dans quel ordre. Le but de chaque réhabilitation est d'éliminer les résidus d'incendie tels que la suie, les produits condensés issus de la combustion ou l'eau de nettoyage contaminée et de réduire ainsi les potentiels dommages consécutifs à l'incendie.

Y a-t-il une forte perte de valeur des composants et des équipements techniques?

Non. Les études portant sur les dégâts dus à la corrosion de différents matériaux métalliques n'ont pas donné de résultats

ben keine auffälligen Befunde geliefert. Sowohl direkt nach der Exposition als auch nach drei Monaten Lagerung bei verschiedener Luftfeuchtigkeit konnten keine atypischen Materialabträge festgestellt werden. Durch die festgestellten Kontaminationen kann eine technische Beeinträchtigung typischer Infrastrukturkomponenten von Tiefgaragen aber auch von Strassentunneln (Korrosionsschädigung metallischer Bauteile, Schädigung Elektronik) praktisch ausgeschlossen werden. Es ist somit davon auszugehen, dass Brandereignisse mit Elektrofahrzeugen die in Strassentunneln und Parkhäusern ohnehin schon korrosive Umgebung nicht verstärken und dadurch die Anlagenwerte von Bauteilen und technischen Einrichtungen nicht übermässig vermindert werden.

Welche Massnahmen sind empfehlenswert?

Auf Basis der obigen Auswirkungsabschätzungen lassen sich unterschiedliche Handlungsempfehlungen ableiten (vgl. Tab. 2). Diese betreffen primär organisatorische Massnahmen und lassen sich wie folgt nach ihrem Risikoeinfluss in absteigender Wichtigkeit strukturieren, wobei die ersten beiden als dringend erachtet werden:

significatifs. Que ce soit directement après l'exposition ou au bout de trois mois de stockage à différents degrés d'humidité de l'air, aucun enlèvement de matière atypique n'a été constaté. Sur la base des contaminations observées, la dégradation technique des composants d'infrastructures caractéristiques des parkings souterrains et des tunnels routiers (dégâts dus à la corrosion des pièces métalliques, dégradation des systèmes électroniques) peut pratiquement être exclue. On peut donc penser que les incendies de véhicules électriques ne renforcent pas l'atmosphère déjà corrosive dans les tunnels routiers et les parkings couverts et qu'il n'y a donc pas de perte massive de valeur des composants et des équipements techniques.

Quelles sont les mesures recommandées?

Différentes recommandations découlent des évaluations d'impact évoquées plus haut (voir tableau 2). Elles concernent principalement des mesures organisationnelles et peuvent être classées comme suit par ordre décroissant en fonction de leur impact sur le risque, les deux premières mesures étant considérées comme urgentes:

Tab. 2: Massnahmen zur Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen
Tab. 2: mesures de réduction des risques d'incendie de véhicules électriques dans les infrastructures de transport souterraines

	Massnahme Mesure	Art Type	Risikoeinfluss Impact sur le risque
1	Zwingender Rückhalt sowie umwelt- und fachgerechte Entsorgung von Löschwasser gemäss geltenden Vorgaben Récupération impérative et élimination respectueuse de l'environnement et dans les règles de l'art de l'eau d'extinction conformément aux directives en vigueur	organisatorisch/ technisch organisationnelle/ technique	schadensmindernd réduction des dégâts
2	Definition eines sicheren Umgangs mit Kühlwasser und dringende Praxisumsetzung Définition d'une procédure de gestion sûre de l'eau de refroidissement et mise en œuvre pratique urgente	organisatorisch organisationnelle	schadensmindernd réduction des dégâts
3	Vereinheitlichung des Übergabeprozesses für havarierte Traktionsbatterien Standardisation du processus de remise des batteries de traction endommagées	organisatorisch organisationnelle	schadensmindernd réduction des dégâts
4	Risikobasierte Standortwahl von Ladestationen in Parkhäusern Choix de l'emplacement des bornes de recharge en fonction des risques dans les parkings couverts	organisatorisch organisationnelle	präventiv mesure préventive
5	Berücksichtigung weitergehender Brandschutzmassnahmen in kleineren Infrastrukturen Mise en œuvre de mesures de protection contre l'incendie renforcées dans les petites infrastructures	technisch technique	präventiv/ schadensmindernd mesure préventive réduction des dégâts
6	Integration neuer Antriebstechnologien in Risikomodelle Intégration des nouvelles technologies d'entraînement dans les modèles de risque	technisch technique	präventiv mesure préventive

Auswirkungen auf die Normen

Aktuell existieren für die Schweiz noch keine einheitlichen Vorgaben für den Umgang mit den spezifischen Brandgefahren durch Elektrofahrzeuge in geschlossenen Räumen, die sich insbesondere während des Ladevorgangs manifestieren können. Der VSS hat diesen Bedarf erkannt und unter anderem basierend auf den obigen Erkenntnissen die Norm VSS 40 294 für angemessene Sicherheitsmassnahmen für Ladestationen in Parkhäusern erstellt. Sie gilt für öffentlich und nicht öffentlich zugängliche Parkhäuser, die über Parkfelder mit Ladestationen für Elektrofahrzeuge verfügen und beschreibt zum Beispiel die Anordnung von Parkfeldern mit Ladestationen unter einem Sicherheitsaspekt. Die Norm ist eine Projektierungshilfe und dient der sicherheitstechnischen Vereinheitlichung von Parkfeldern mit Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Parkhäusern sowie der Parkhaus-sicherheit generell. Die Norm wurde bereits im Sommer 2019 publiziert.

Für die Planung der fach- und nutzergerechten Integration der Ladestationen in die Gebäudeinfrastruktur ist das Merkblatt SIA 2060 «Infrastruktur für Elektrofahrzeuge in Gebäuden» anzuwenden.

Das Projekt erfolgte mit Unterstützung des Bundesamtes für Strassen (ASTRA).

Impact sur les normes

À l'heure actuelle, il n'existe pas en Suisse de prescriptions standardisées pour réagir face aux risques d'incendie spécifiques liés aux véhicules électriques dans les espaces fermés susceptibles de se présenter notamment pendant le processus de chargement. La VSS a identifié cette lacune et élaboré, entre autres sur la base des constats énoncés ci-dessus, la norme VSS 40294 relative aux mesures de sécurité adéquates pour les bornes de recharge installées dans les parkings couverts. La norme s'applique aux parkings d'accès public et non public comportant des places avec borne de recharge pour véhicules électriques; elle décrit par exemple la disposition des places avec borne de recharge sous le jour de la sécurité. La norme est conçue en tant qu'aide à l'étude pour la standardisation des places de stationnement avec borne de recharge pour véhicules électriques dans les parkings couverts sous le jour de la sécurité tout comme pour la sécurité des parkings couverts en général. La norme a été publiée à l'été 2019.

En ce qui concerne la planification de l'intégration des bornes de recharge selon les règles de l'art et les besoins des utilisateurs, il convient de se reporter au cahier technique SIA 2060 «Infrastructures pour les véhicules électriques dans les bâtiments».

Le projet a été réalisé avec le soutien de l'Office fédéral des routes (OFROU).

VSH – internationales Kompetenzzentrum für den Untertagbau

Die VersuchsStollen Hagerbach AG (VSH) feiert 2020 das 50jährige Jubiläum seit Start der Versuchstätigkeit im März 1970. Seither hat sich zusammen mit schweizerischen und internationalen Industrie- und Forschungspartnern und Projekt für Projekt eine faszinierende Welt untertage entwickelt. In den 1980er-Jahren kam ein eigenes Baustoffprüflabor mit SAS-Akkreditierung hinzu und in den 1990er-Jahren die unterirdische Betonmischanlage. Mit wachsender Stollengrösse und neuen Bedürfnissen der Tunnelforschung kamen auch Schulungs- und Trainingsangebote hinzu – mit eigenem Restaurant und diversen Seminarräumlichkeiten. Heute gilt der Hagerbach Stollen als internationales Kompetenzzentrum in Sachen Untertagbau und hat sich als Event-Location international einen Namen gemacht. Pro Jahr besuchen an die 17 500 Interessierte den VersuchsStollen in Flums SG.

<https://hagerbach.ch>

VSH – un centre de compétence international pour les travaux souterrains

La société VersuchsStollen Hagerbach AG (VSH) fête en 2020 son cinquantième anniversaire depuis le début des activités d'essai en mars 1970. Depuis, de projet en projet et en collaboration avec des partenaires suisses et internationaux des secteurs de l'industrie et de la recherche, c'est un univers fascinant qui s'est développé sous terre. Dans les années 1980, est venu s'y ajouter un laboratoire d'essai de matériaux de construction accrédité SAS et dans les années 1990, une centrale à béton souterraine. Parallèlement à l'agrandissement des galeries et à l'évolution des besoins en matière de recherche sur les tunnels, de nouvelles offres de formation ont été proposées – avec un restaurant dédié et divers locaux accueillant des séminaires. Aujourd'hui, la galerie d'essai de Hagerbach est considérée comme un centre de compétence international pour tout ce qui a trait aux travaux souterrains et s'est aussi fait un nom à l'échelle internationale en tant que lieu de réception. Chaque année, 17 500 visiteurs environ se rendent à Flums (SG) pour découvrir la galerie d'essai.

<https://hagerbach.ch>