



# **Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen**

**Minimisation des risques d'incendie de véhicules électriques dans les infrastructures de circulation souterraine**

**Risk minimisation of electric vehicle fires in underground traffic infrastructures**

**Amstein + Walthert Progress AG**  
Lars Derek Mellert  
Urs Welte

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)**  
Dr. Martin Tuchschnid  
Marcel Held

**Versuchsstollen Hagerbach AG**  
Michael Hermann  
Dr. Michael Kompatscher

**Centre d'études des tunnels (CETU)**  
Marc Tesson  
Léa Nacheff

**Forschungsprojekt AGT 2018/006 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)**

**August 2020**

**1678**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen**

**Minimisation des risques d'incendie de véhicules électriques dans les infrastructures de circulation souterraine**

**Risk minimisation of electric vehicle fires in underground traffic infrastructures**

**Amstein + Walthert Progress AG**  
Lars Derek Mellert  
Urs Welte

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)**  
Dr. Martin Tuchschnid  
Marcel Held

**Versuchsstollen Hagerbach AG**  
Michael Hermann  
Dr. Michael Kompatscher

**Centre d'études des tunnels (CETU)**  
Marc Tesson  
Léa Nacheff

**Forschungsprojekt AGT 2018/006 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)**

**August 2020**

**1678**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Lars Derek Mellert (Amstein + Walthert Progress AG)

### Mitglieder

Urs Welte (Amstein + Walthert Progress AG)

Dr. Martin Tuchschnid (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa)

Marcel Held (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa)

Ronald Lay (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa)

Dr. Markus Faller (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa)

Renato Figi (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa)

Claudia Schreiner (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa)

Markus Zennegg (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Empa)

Dr. Michael Kompatscher (Versuchsstollen Hagerbach AG)

Michael Hermann (Versuchsstollen Hagerbach AG)

Léa Nacheff (Centre d'études des tunnels, CETU)

Marc Tesson (Centre d'études des tunnels, CETU)

## Begleitkommission

### Präsident

Dr. Arnd Rogner (Securiton AG)

### Mitglieder

Kurt Bopp (Schweizerischer Feuerwehrverband, SFV)

Michael Derungs (Schutz & Rettung Zürich, SRZ)

Urs Steinemann (US+FZ Beratende Ingenieure)

Prof. Peter Affolter (Berner Fachhochschule, BFH)

Markus Eisenlohr (Bundesamt für Strassen, ASTRA)

Dr. Michele Steiner (wst21)

Simon Baschung (Baschung Consulting GmbH)

Marguerite Trocmé (Bundesamt für Strassen, ASTRA)

Chantal Leuenberger (Environment Consulting ENCOMA GmbH)

## Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung, AGT

## Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
	<b>Résumé</b> .....	<b>9</b>
	<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>13</b>
1.1	Veränderte Brandgefährdungen durch Elektrofahrzeuge .....	13
1.2	Hypothese und Ziele des Projekts .....	13
1.3	Aufbau des Berichts .....	15
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>17</b>
2.1	Energiespeicher für Elektrofahrzeuge .....	17
2.2	Spezifische Brandemissionen.....	19
2.3	Risiken in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen .....	21
2.4	Richtlinien und Normen .....	21
<b>3</b>	<b>Methodik</b> .....	<b>23</b>
3.1	Versuchsmaterial .....	23
3.2	Versuchsraum und Standorte .....	25
3.3	Messkonzept.....	27
3.4	Versuchsszenarien.....	28
3.4.1	Infrastruktur und Schutzausrüstung .....	29
3.4.2	Löschwasser .....	30
3.4.3	Transport- und Ablagerungsverhalten.....	31
3.4.4	Materialanalyse .....	32
3.5	Sicherheit und Umwelt .....	32
<b>4</b>	<b>Resultate</b> .....	<b>35</b>
4.1	Voranalysen.....	35
4.2	Infrastruktur und Schutzausrüstung (Batteriemodul 1) .....	38
4.3	Löschwasser (Batteriemodul 2) .....	45
4.4	Transport- und Ablagerungsverhalten (Batteriemodul 3) .....	48
4.5	Materialanalyse (Batteriemodul 4) .....	53
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>55</b>
5.1	Auswirkungen auf die Sicherheit und den Betrieb .....	55
5.2	Auswirkungen auf die Ereignisbewältigung .....	62
5.3	Massnahmenempfehlung .....	64
<b>6</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf</b> .....	<b>69</b>
6.1	Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen .....	69
6.2	Risikofolgeabschätzung der Wasserstoffmobilität für Strasseninfrastrukturen .....	69
6.3	Risiken durch stationäre Speicheranlagen .....	71
	<b>Anhänge</b> .....	<b>73</b>
	<b>Glossar</b> .....	<b>91</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>93</b>
	<b>Projektabschluss</b> .....	<b>99</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen</b> .....	<b>102</b>



## Zusammenfassung

Elektrofahrzeugbrände mit Lithium-Ionen-Batterien führen zu neuartigen Schadstoffemissionen. Die vorliegende Studie belegt, dass sich dadurch die toxikologischen Risiken in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen verändern, weil diese Schadstoffe in Bränden von konventionellen Fahrzeugen nicht auftreten. Die batteriespezifischen Kontaminationen werden zwar keine nachhaltigen technischen Betriebsbeeinträchtigungen in Tiefgaragen oder Strassentunneln zur Folge haben; sie machen aber einen vorsichtigen Umgang mit Lösch- und Kühlwasser zwingend erforderlich.

Die experimentellen Erkenntnisse wurden nach wissenschaftlichen Grundsätzen hergeleitet. Das Experiment wurde in den unterirdischen Anlagen der VersuchsStollen Hagerbach AG durchgeführt, die eine reale Umgebung für Brandversuche mit einem Bezug sowohl zu Tiefgaragen als auch zu Strassentunneln bieten. Da die vorliegende Studie auf den Versuchen eines Vorgängerprojekts aus dem Jahre 2018 aufbaut, wurde dasselbe Versuchsmaterial wie damals verwendet: Das Experiment konzentrierte sich auf die maximale Beschädigung einer Lithium-Ionen-Batterie (Typ NMC), die in einem rein batteriebetriebenen und für den Verkehr zugelassenen Fahrzeug zur Anwendung kommt (Stand 2019). Dabei lag die Analyse von Brandrückständen und deren Auswirkung für Infrastrukturen im Zentrum. Es wurden weder Brand- oder Crashtests mit ganzen Elektrofahrzeugen durchgeführt, noch wurden Analysen zur Eintretenswahrscheinlichkeit unternommen.

Die Hypothese, dass die Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen zu nachhaltigen Auswirkungen führen, kann nicht pauschal bestätigt werden. Die Studie kommt zum Schluss, dass eine technische Beeinträchtigung von typischen Infrastrukturkomponenten in Tiefgaragen und in Strassentunneln praktisch ausgeschlossen werden kann. Die batteriespezifischen Emissionen eines Elektrofahrzeugbrandes werden aber zu Kontaminationen führen, die in toxikologischer Hinsicht für die Dekontaminations- und Entsorgungsarbeiten von Bedeutung sind. Aufgrund der Erkenntnisse können sechs risikomindernde Massnahmen abgeleitet werden, die primär organisatorischer Natur sind; zwei davon werden als dringend erachtet.

Bei einem Elektrofahrzeugbrand anfallendes Lösch- und Kühlwasser ist stark kontaminiert. Da die Konzentrationen von Lithium und der Schwermetalle Kobalt, Nickel und Mangan derzeitige Grenzwerte für die Einleitung in die Kanalisation um ein Vielfaches überschreiten, muss eine entsprechende Vorbehandlung in der Praxis zwingend umgesetzt werden. Die Anwendung der aktuellen Grundsätze für ABC-Einsätze sind hierfür ausreichend. Hinsichtlich des Kühlwassers, das typischerweise in der Nachbehandlung von ausgebrannten Batterien anfällt, ist zudem die Definition eines standardisierten Umgangs erforderlich. Die weiteren Empfehlungen umfassen zusätzliche präventive Massnahmen, die einen angemessenen Umgang mit der sich verändernden Risikolandschaft erlauben.

Mit Bezug zur Elektromobilität in unterirdischen Infrastrukturen stehen zwei Aspekte im Vordergrund, die vertiefter untersucht werden sollten: (I) Die Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen, die international, gerade auch unter dem Argument der alternativen Antriebstechnologien vereinzelt zum Einsatz kommen. Weil in der Schweiz diese Anlagen in unterirdischen Infrastrukturen kaum oder gar nicht eingesetzt werden, sollten sie im Zuge der zunehmenden Anwendungsdichte von Lithium-Ionen-Speichern neu beurteilt werden. (II) Zum anderen sind die Risiken von wasserstoffbetriebenen Elektrofahrzeugen, insbesondere im Falle von schweren Nutz- und Lastfahrzeugen in unterirdischen Infrastrukturen nach wie vor nicht geklärt. Eine Risikofolgeabschätzung mit experimentellen Methoden scheint hier empfehlenswert.

Lithium-Ionen-Speicher führen nicht nur im mobilen Anwendungsbereich zu veränderten Risiken. Stationäre Speicheranlagen von Gebäuden basieren auf derselben Technologie und werden immer zahlreicher in Untergeschossen installiert, wo sich die betriebs- und sicherheitstechnische Situation ähnlich gestaltet. Die spezifischen Risiken, insbesondere potenzielle Schadensausmasse sind weitgehend unklar und sollten ebenfalls experimentell untersucht werden.



## Résumé

Les incendies de véhicules électriques équipés de batteries au lithium-ion entraînent de nouveaux types d'émissions polluantes. La présente étude montre que cela modifie les risques toxicologiques dans les infrastructures de transport souterrain car ces polluants ne se produisent pas dans les incendies de véhicules conventionnels. Bien que la contamination spécifique des batteries n'entraîne pas de dégradation technique durable des opérations dans les parkings souterrains ou les tunnels routiers, elle rend absolument indispensable un prétraitement soigneux de l'eau d'extinction et de l'eau refroidissement.

Les résultats expérimentaux ont été obtenus selon des principes scientifiques. L'expérience a été réalisée dans les installations souterraines de VersuchsStollen Hagerbach AG, qui offrent un environnement réel pour les essais d'incendie liés aux parkings souterrains et aux tunnels routiers. Comme la présente étude est basée sur les expériences d'un projet antérieur datant de 2018, le même matériel d'essai a été utilisé qu'à l'époque : L'expérience s'est concentrée sur les dommages maximums subis par une batterie au lithium-ion (type NMC) utilisée dans un véhicule purement alimenté par une batterie et homologué pour la circulation (état 2019). L'analyse des résidus d'incendie et de leur impact sur les infrastructures a été l'objet principal. Aucun test d'incendie ou de collision n'a été effectué avec des véhicules électriques entiers, et aucune analyse de la probabilité d'occurrence n'a été effectuée.

L'hypothèse selon laquelle les émissions des incendies de véhicules électriques dans les infrastructures de transport souterraines ont des effets durables ne peut être confirmée de manière générale. L'étude conclut qu'une dégradation technique des éléments d'infrastructure typiques des parkings souterrains et des tunnels routiers peut être pratiquement exclue. Cependant, les émissions spécifiques des batteries d'un feu de véhicule électrique entraîneront une contamination qui est d'une importance toxicologique pour les travaux de décontamination et d'élimination. Sur la base des résultats, six mesures de réduction des risques peuvent être déduites, qui sont principalement de nature organisationnelle ; deux d'entre elles sont considérées comme urgentes.

L'eau d'extinction et l'eau de refroidissement résultant d'un incendie de véhicule électrique est fortement contaminée. Étant donné que les concentrations de lithium et de métaux lourds tels que le cobalt, le nickel et le manganèse dépassent largement les limites actuelles de rejet dans le réseau d'égouts, un prétraitement approprié doit être mis en œuvre dans la pratique. L'application des principes actuels pour les opérations NBC est suffisante à cet effet. En ce qui concerne l'eau de refroidissement qui est généralement produite lors du post-traitement des piles usagées, il est également nécessaire de définir une maintenance normalisée. Les autres recommandations comprennent des mesures préventives additionnelles qui permettent une gestion appropriée avec les nouveaux risques.

En ce qui concerne l'électromobilité dans les infrastructures souterraines, deux aspects sont au premier plan et devraient être étudiés plus en profondeur : (I) L'efficacité des systèmes de brouillard d'eau à haute pression, qui sont utilisés au niveau international, notamment sous l'argument des technologies d'entraînement alternatives. Comme ces systèmes ne sont guère ou pas du tout utilisés dans les infrastructures souterraines en Suisse, ils devraient être réévalués en raison de l'augmentation de l'application des systèmes de stockage au lithium-ion. (II) D'autre part, les risques de la mobilité de l'hydrogène, en particulier dans le cas des poids lourds dans les infrastructures souterraines, ne sont toujours pas clairs. Une évaluation des risques à l'aide de méthodes expérimentales semble être recommandée ici.

Les systèmes de stockage au lithium-ion entraînent une modification des risques, et pas seulement dans le domaine des applications mobiles. Les systèmes de stockage stationnaire des bâtiments sont basés sur la même technologie et sont de plus en plus souvent installés dans des sous-sols où la situation opérationnelle et la sécurité sont similaires. Les risques spécifiques, en particulier l'étendue potentielle des dommages, sont largement imprécis et devraient également être étudiés de manière expérimentale.



## Summary

Electric vehicle fires with lithium-ion batteries lead to new types of pollutant emissions. The present study shows that this changes the toxicological risks in underground traffic infrastructures because these pollutants do not occur in fires of conventional vehicles. These battery specific contaminations will not impair technical operations in underground car parks or road tunnels; but they will make a careful handling of fire-fighting and cooling water essential.

The experimental findings were derived using a systematic approach based on scientific principles. The experiment was carried out in the underground facilities of VersuchsStollen Hagerbach AG, which provide a real environment for fire tests related to both underground car parks and road tunnels. Since the present study is based on the experiments of a previous project from 2018, the same test material was used: The experiment focused on maximum damaging a lithium-ion battery (type NMC) used in a battery electric vehicle approved for traffic (status 2019). The analysis of fire residues and their impact on infrastructures was the main focus. Neither fire or crash tests were conducted with full electric vehicles nor were there any analyses on the probability of such damages.

The hypothesis that the emissions from electric vehicle fires in underground traffic infrastructures lead to lasting effects cannot be confirmed. The study concludes that a technical impairment of typical infrastructure components in underground car parks and road tunnels can be practically excluded. However, the battery specific emissions will lead to contamination which is of toxicological importance especially for decontamination and disposal works. Based on the findings, six risk-reducing measures can be derived, which are primarily of an organisational nature; two of them are urgent.

Fire-fighting and cooling water resulting from an electric vehicle fire is highly contaminated. Since the concentrations of lithium and the heavy metals cobalt, nickel and manganese exceed current thresholds for discharge into the sewerage system many times over, appropriate pre-treatment must be implemented in practice. The application of the current principles for NBC operations is sufficient for this purpose. Regarding the cooling water which is typically produced in the after-treatment of damaged batteries, a standardised handling needs to be defined. The other recommendations include additional preventive measures that allow an appropriate handling of the changing risk landscape.

Concerning electric mobility in underground infrastructures, two aspects are in the foreground that should be investigated in greater depth: (I) The effectiveness of high-pressure water mist systems, which are used internationally, especially under the argument of new energy carriers. Since these systems are hardly or not at all used in underground infrastructures in Switzerland, they should be reassessed in the course of the increasing use of lithium-ion storage systems. (II) On the other hand, the risks of fuel cell electric vehicles, especially in the case of heavy goods vehicles in underground infrastructures, are still not clear. A risk assessment with experimental methods seems to be recommendable.

Lithium-ion storage systems lead to changed risks, not only in mobile applications. Stationary storage systems of buildings are based on the same technology and are increasingly installed in basements where the operational and safety situation is similar. The specific risks, particularly the potential severity, are largely unclear and should also be investigated experimentally.



# 1 Einleitung

## 1.1 Veränderte Brandgefährdungen durch Elektrofahrzeuge

Mit dem Forschungsprojekt «Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände» ([59]) wurde im Jahr 2018 experimentell nachgewiesen, dass brennende Elektrofahrzeugbatterien die chemische Gefährdungssituation in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen verändern.

In mehreren Versuchen wurde damals aufgezeigt, dass starke mechanische und thermische Beschädigungen von Lithium-Ionen-Batterien eines Elektrofahrzeugs augenblicklich zu unkontrollierbaren Bränden mit hoher Energieentfaltung, starker Rauchentwicklung sowie neuen Schadstoffemissionen führen. Die Studie kam zum Schluss, dass die thermischen Brandgefährdungen von Elektrofahrzeugen mit jenen von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind. In unmittelbarer Nähe oder bei ungünstigen Lüftungssituationen werden Elektrofahrzeugbrände hingegen 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. Die emittierten Metallstäube überschreiten maximale Konzentrationswerte, bei denen eine exponierte Person nach 30 Minuten schwere oder dauerhafte Schäden erleidet (engl. *immediately dangerous to life or health*, IDLH). Diese Schadstoffe treten bei konventionellen Fahrzeugbränden nicht in solch erhöhten Mengen auf und sind sowohl für Menschen als auch für die Umwelt toxisch ([10]).

Die pauschale Hypothese, dass sich die Brandgefährdung in Strassentunneln aufgrund von hochkapazitiven Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen generell erhöhen wird, konnte indessen nicht bestätigt werden. Die experimentell hergeleiteten Erkenntnisse legten den Schluss nahe, dass die chemische Energiespeicherung typischer Elektrofahrzeuge in Form von Lithium-Ionen-Batterien insgesamt nicht zu einer Verschärfung im eigentlichen Sinne, aber doch zu einer Veränderung der Gefährdungssituation in Strassentunneln führt. Der bisherige Erkenntnisstand lässt sich zur besseren Einordnung anhand essenzieller Fragestellungen gemäss Tabelle 1 zusammenfassen.

**Tabelle 1** Veränderungen durch Elektrofahrzeugbrände: bisherige Erkenntnisse ([59])

Aspekt	Feststellung
Ergeben sich veränderte thermische Gefährdungen im Strassentunnel?	Nein.
Verändern sich die chemischen Gefährdungen mit potenziellen Auswirkungen auf den Menschen?	Ja – in unmittelbarer Nähe oder ungünstigen Lüftungssituationen.
Verändern sich die chemischen Gefährdungen mit potenziellen Auswirkungen auf die Umwelt?	Ja – in Bezug auf mögliche Kontaminationen.
Ergibt sich technischer Anpassungsbedarf in Strassentunneln?	Nein.
Verändert sich die Ereignisbewältigung im Hinblick auf die Brandbekämpfung?	Nein – in Bezug auf die Löschmittelwahl oder Einsatztaktik. Ja – im Hinblick auf neue, potenzielle Gefahren bei der Brandbekämpfung.
Verändert sich die Ereignisbewältigung im Hinblick auf die Sicherheitsmassnahmen und Schutzausrüstung von Einsatzkräften?	Nein – sofern sie dem aktuellen Stand der Praxis entsprechen.

## 1.2 Hypothese und Ziele des Projekts

Weil davon ausgegangen werden kann, dass die bestehende Betriebs- und Sicherheitsausrüstung in Strassentunneln für die Bekämpfung (Detektion, Lüftung, Wasserversorgung

etc.) dieser veränderten Gefährdungen ausreichend ist, wurden keine technischen Anpassungen empfohlen. Über mögliche Auswirkungen und Spätfolgen der Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in Strassentunneln, vor allem aber auch in kleineren unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen konnten bislang aber noch keine abschliessenden Antworten gegeben werden.

Die für Mensch und Umwelt toxischen Metallstäube verteilen sich nach ihrem Ausstoss in der Umgebung und reagieren nach ihrer Ablagerung nicht ab. Es musste somit davon ausgegangen werden, dass diese neuartigen Schadstoffe in ungünstigen Fällen zu grossräumigen Kontaminationen und damit zu nachhaltigen Beeinträchtigungen des Betriebs, der Infrastruktursicherheit oder auch der Umwelt führen können. Aktuelle Studien aus Deutschland deuten ebenfalls auf diese Problematik hin (vgl. [49]), angemessene Massnahmenempfehlungen zur Prävention und Minimierung solcher Schäden liegen jedoch noch keine vor.

### **Fragestellungen und Hypothese**

Unter Berücksichtigung dieses aktuellen Erkenntnisstandes lassen sich zurzeit mit Blick auf Schadstoffverunreinigungen durch Elektrofahrzeugbrände sowohl in Tunneln als auch Parkhäusern oder Einstellhallen die folgenden Fragestellungen erörtern:

- Inwiefern führen Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Infrastrukturen zu Kontaminationen, die sich von konventionellen Fahrzeugbränden unterscheiden?
- Sind für den Umgang mit kontaminierten Bauteilen, technischen Einrichtungen und Löschwasser nach Elektrofahrzeugbränden besondere Massnahmen erforderlich?
- Ergeben sich dadurch nachhaltige Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit von unterirdischen Infrastrukturen?

Zur Schliessung dieser Wissenslücken wurden mit Unterstützung des ASTRA sowie des französischen Centre d'études des tunnels (CETU) Folgeuntersuchungen initiiert. Mit dem nun vorliegenden Forschungsprojekt war zu untersuchen, inwiefern die spezifischen Gefährdungen von Elektrofahrzeugbränden den Betrieb und die Sicherheit von unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen nachhaltig beeinflussen. Gemeinsam mit der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) sowie der VersuchsStollen Hagerbach AG (VSH) sollten auf experimentelle Weise Massnahmen hergeleitet werden, die zur Risikominimierung bei Brandereignissen mit Elektrofahrzeugen beitragen (d.h. Prävention und Minderung potenzieller Schäden). Dem Projekt wurde die folgende Hypothese zugrunde gelegt, die mit spezifischen Versuchen schliesslich verifiziert oder falsifiziert werden sollte:

**"Emissionen von Elektrofahrzeugbränden führen in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen zu Kontaminationen mit nachhaltigen Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit"**

Der Fokus des Forschungsprojektes wurde ausschliesslich auf Personenkraftwagen mit reinem batterieelektrischem Antrieb (engl. *battery electric vehicle*, BEV) gerichtet; Brandauswirkungen von elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen oder Hybridlösungen wurden nicht untersucht.

### **Verfügbarkeit und Sicherheit von unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen**

Im Kontext der zunehmenden Elektromobilität sowie der Tendenz, den Verkehr in urbanisierten Räumen in den Untergrund zu verlagern, nimmt die Bedeutung von verfügbaren und sicheren unterirdischen Infrastrukturen zu. Ein grosser Teil des zukünftigen Individualverkehrs in Städten wird elektrifiziert sein und unterirdisch stattfinden, sei es beim Durchfahren von Tunneln oder beim Parkieren und Aufladen in Parkhäusern. Solange die potenziellen Auswirkungen von Elektrofahrzeugbränden auf den Betrieb dieser Verkehrsinfrastrukturen unbekannt bleiben, werden sie für Betreiber ein schwer kalkulierbares Risiko darstellen. Unverfügbarkeiten aufgrund von aufwendigen Dekontaminationen oder unsachgemässer Umgang mit Überresten nach einem Brandereignis können sowohl den Betrieb als auch die Sicherheit von Infrastrukturen wesentlich beeinflussen.

Die Formulierung der obigen Hypothese konzentriert sich deshalb auf diese infrastrukturübergreifende Problematik und verdeutlicht, dass im vorliegenden Forschungsprojekt der Fokus nicht nur auf Strassentunnel, sondern generell auf unterirdische Verkehrsinfrastrukturen im Einflussbereich der Elektromobilität gerichtet wurde. Damit die Hypothese eindeutig beantwortet werden konnte, musste der zu wählende Forschungsansatz entsprechend ganzheitlich sein und zentrale Aspekte der Betriebssicherheit von unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen berücksichtigen.

#### **State-of-the-Art-Technologie und Worst-Case-Ansatz**

Obschon die jahrzehntelange Entwicklung zahlreiche Technologien und Varianten hervor gebracht hat, kommen seitens Automobilhersteller als wieder aufladbare elektrochemische Speicher für Elektrofahrzeuge aktuell – und voraussichtlich auch in Zukunft – vor allem Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz (vgl. [19]; [22]; [23]; [50]; [93]). Im Kern sollten deshalb die batteriespezifischen Schadstoffkontaminationen eines typischen Elektrofahrzeugs (Stand 2019) mit einer hochkapazitiven Lithium-Ionen-Batterie experimentell analysiert und angemessene Massnahmen für die Risikominimierung in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen abgeleitet werden. Der Fokus richtete sich dabei prioritär auf die bereits nachgewiesenen Schwermetallaerosole Kobalt, Nickel und Mangan aber auch auf Lithium und Fluorverbindungen. Es galt, die folgenden Projektziele zu erreichen:

1. **Experimentelle Analyse** möglicher Schadstoffkontaminationen durch Elektrofahrzeugbrände mittels aussagekräftiger Brandversuche und Messungen
2. Deduktion der **Auswirkungen auf unterirdische Verkehrsinfrastrukturen** im Einflussbereich der Elektromobilität (Tunnel, Parkhäuser, Einstellhallen etc.)
3. Formulierung von angemessenen technischen und organisatorischen **Massnahmen zur Schadensprävention und -minderung**

### **1.3 Aufbau des Berichts**

Der folgende Bericht gliedert sich in fünf aufeinander aufbauende Teile, die auch den Rahmen für das gesamte Projekt setzen. Zuerst werden in Kapitel 2 theoretische Grundlagen über batteriespezifische Brandemissionen einerseits und die Risiken in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen andererseits vermittelt, um die Überlegungen der folgenden Kapitel besser nachvollziehen zu können. Dabei wird ein theoretischer Überblick der potenziellen Gefährdungen von Elektrofahrzeugbränden sowie der geltenden Normen und Richtlinien für Sicherheitseinrichtungen in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen gegeben.

Anschliessend bildet Kapitel 3 den methodischen Teil, der die Vorgehensweise im Experiment beschreibt. Die dazu erforderlichen Vorbereitungen und Konzepte, aber auch Abgrenzungen werden detailliert erläutert, damit eine nachvollziehbare Grundlage für die spätere Beschreibung und Diskussion der Resultate geschaffen werden kann.

In Kapitel 4 folgt die Dokumentation der Resultate aus sämtlichen Versuchen des Experiments. Die Beschreibung erfolgt dabei für jeden Versuch einzeln, jeweils abschliessend mit einer kurzen Beurteilung aber ohne Interpretation.

Die Erkenntnisse aus dem Experiment werden in Kapitel 5 schliesslich in Bezug zu einander gestellt und im Gesamtkontext der zunehmenden Elektromobilität in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen reflektiert. Zur besseren Einordnung werden dabei die wichtigsten Erkenntnisse anhand einiger essenzieller Fragestellungen diskutiert und die Gültigkeit der zugrundeliegenden Hypothese untersucht.

Abschliessend unternimmt Kapitel 6 einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.



## 2 Grundlagen

Sämtliche Fahrzeuge, die mit elektrischer Energie angetrieben werden, gelten als Elektrofahrzeuge [42]; der Elektrifizierungsgrad spielt dabei keine Rolle: auch Hybridfahrzeuge oder Brennstoffzellenfahrzeuge sind in definitorischer Hinsicht Elektrofahrzeuge ([42]; [83]). Wenn im vorliegenden Projekt der generelle Begriff «Elektrofahrzeug» zur Anwendung kommt, dann sind damit aber lediglich Personenwagen für den Strassenverkehr gemeint – obschon darunter eigentlich sämtliche elektrifizierte Fahrzeuge, also auch Schienenfahrzeuge oder elektrisch betriebene Fahrräder, subsumiert werden müssten.

Elektrofahrzeuge, deren Energiespeicherung ausschliesslich mit einer wiederaufladbaren Batterie (auch «Traktionsbatterie») erfolgt, werden als batterieelektrische Fahrzeuge (engl. *battery electric vehicle, BEV*) bezeichnet; jene, die über einen Verbrennungsmotorantrieb verfügen (engl. *internal combustion engine vehicle, ICEV*), werden einfachheitshalber als «konventionelle Fahrzeuge» zusammengefasst. Die zentralen Vergleiche im vorliegenden Bericht werden zwischen BEV und ICEV gemacht.

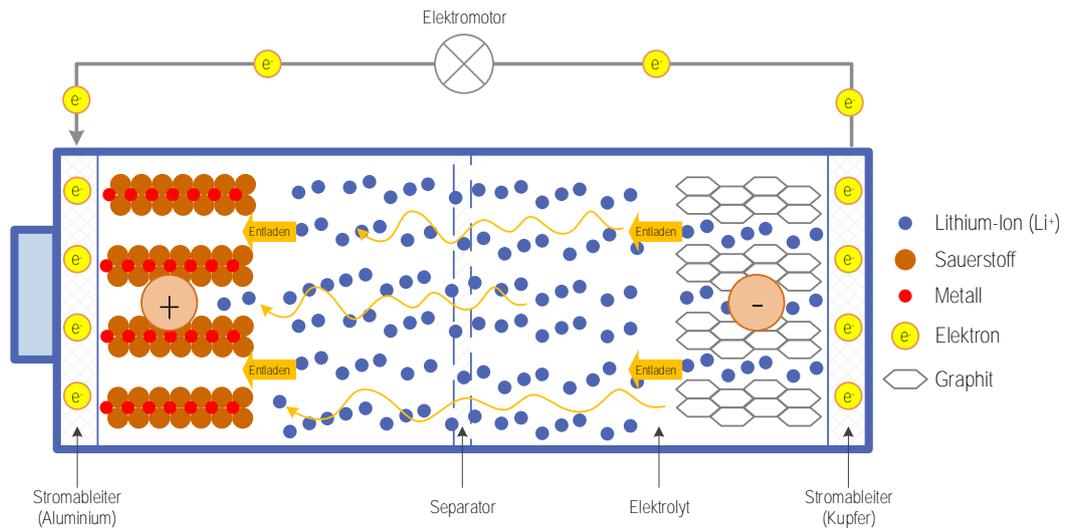
**Tabelle 2** Definition verschiedener Fahrzeugtypen (nach [7] und [43])

Fahrzeugtyp	Abkürzung	Definition
«Konventionelles» Fahrzeug mit Verbrennungsmotor	ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle)	Fahrzeugantrieb mit Verbrennungsmotor
Batterieelektrisches Fahrzeug	BEV (Battery Electric Vehicle)	Fahrzeugantrieb mit Elektromotor, Akku (auch "Batterie") am Netz aufladbar
Brennstoffzellenfahrzeug	FCHEV (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle)	Fahrzeugantrieb mit Elektromotor plus Brennstoffzelle zur Energieerzeugung
Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung (auch Range Extender)	REEV (Range Extended Electric Vehicle)	Elektrofahrzeug mit zusätzlichem Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle zur mobilen Aufladung des Akkus (eigentlich Hybrid, da 2 Energiewandler und 2 Energiequellen)
Hybridfahrzeug	HEV (Hybrid Electric Vehicle)	Fahrzeugantrieb mit Verbrennungsmotor plus Elektromotor, Akku nicht am Netz aufladbar
Plug-in Hybridfahrzeug	PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	Kombination Elektroantrieb und Verbrennungsmotor, Akku am Netz aufladbar

### 2.1 Energiespeicher für Elektrofahrzeuge

Damit die bedarfsgerechte Verfügbarkeit der elektrischen Energie optimal gewährleistet ist, erfolgt die Energiespeicherung in Elektrofahrzeugen mit wieder aufladbaren Batterien ([84]). Wesentliche Fahrzeugcharakteristiken wie Leistung oder Reichweite sind direkt abhängig von ihr, weshalb die Batterie die Rolle eines ganz zentralen Bauteils einnimmt und oftmals als die Schlüsseltechnologie der Elektromobilität beschrieben wird ([41]; [46]). Seit jeher werden somit zahlreiche Anforderungen insbesondere an die Traktionsbatterie eines Elektrofahrzeuges gestellt ([51]).

Trotz jahrzehntelanger Entwicklungen und technologischer Optimierungen, werden als wiederaufladbare elektrochemische Speicher praktisch ausschliesslich Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt ([60]; vgl. auch Abbildung 1). Der Grund hierfür liegt in einer ganzen Reihe positiver Eigenschaften, die von hohen Zellspannungen, Leistungs- und Energiedichten, über eine geringe Temperaturanfälligkeit und Selbstentladung bis hin zu hoher Zyklenfestigkeit reichen, und so gerade in der Elektromobilität fundamentale Vorteile bringen ([13]; [43]). Weil zurzeit noch wenige vergleichbare Speichertechnologien diese Marktreife erlangt haben, werden Lithium-Ionen-Batterien auch die mittelfristige Zukunft der Elektromobilität mitbestimmen ([19]; [22]; [23]; [93]).



**Abbildung 1 Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie (eigene Darstellung nach [20]; [22]; [43]; [94])**

Diese Speichertechnologie ist bereits seit vielen Jahren erprobt und hat seit ihrer kommerziellen Markteinführung im Jahr 1991 rasante Weiterentwicklungen, auch mit Bezug zur Sicherheit, durchlaufen. Lithium-Ionen-Batterien werden bereits in der Produktion und vor der Zulassung als Traktionsbatterie systematisch auf Funktion und Sicherheit getestet ([17]; [61]; [62]). Im Einsatz wird die Sicherheit zudem durch weitere chemische, mechanische und elektrische Schutzmassnahmen sichergestellt und durch ein übergeordnetes Batteriemanagementsystem funktional überwacht ([18]; [33]; [44]; [87]). Lithium-Ionen-Batterien können daher als sehr zuverlässig bezeichnet werden ([45]).

Der Fokus der Batterieforschung konzentriert sich vor allem auf die Optimierung der Zellchemie, sodass Energiedichten, Lebensdauern aber auch die Sicherheit laufend erweitert werden können. Hierzu existiert ein breites Spektrum an vielversprechenden Materialien, die eingesetzt werden können. Weil alle ihre eigenen chemischen oder auch wirtschaftlichen Nachteile mit sich bringen, wird versucht mit geeigneten Materialkombinationen und -substitutionen ein Optimum zu erreichen. So liegen aktuell mehrere marktreife Typen von Lithium-Ionen-Batterien vor, die sich vor allem aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung des Kathodenaktivmaterial unterscheiden ([37]; [56]). Die häufigsten Varianten des erforderlichen Lithium-Metalloxids an der positiven Elektrode sind Lithium-Kobalt-Oxid (LCO), Lithium-Mangan-Oxid (LMO), Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC), Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA) sowie Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) ([64]). Hierbei ist wichtig zu betonen, dass es sich bei allen Varianten letztlich um Kompromisse handelt, in denen wirtschaftliche und leistungsspezifische, aber auch sicherheitstechnische Abwägungen gemacht werden ([89]).

Im konkreten Anwendungsfall von Elektrofahrzeugen kommt zurzeit aber vorwiegend der Typ NMC zum Einsatz, weil Batterien mit diesem Kathodenmaterial die Vorteile andere Technologien ideal zusammenführen und als sehr zuverlässig gelten. Bei NMC-Batterien können so hohe Energiedichten, gute Hochstromfähigkeiten, Überladestabilitäten sowie Preisvorteile zu einer optimalen Gesamtlösung kombiniert werden. Sie bieten ausserdem eine hohe mittlere Entladespannung und können relativ schnell geladen werden ([81]; [89]).

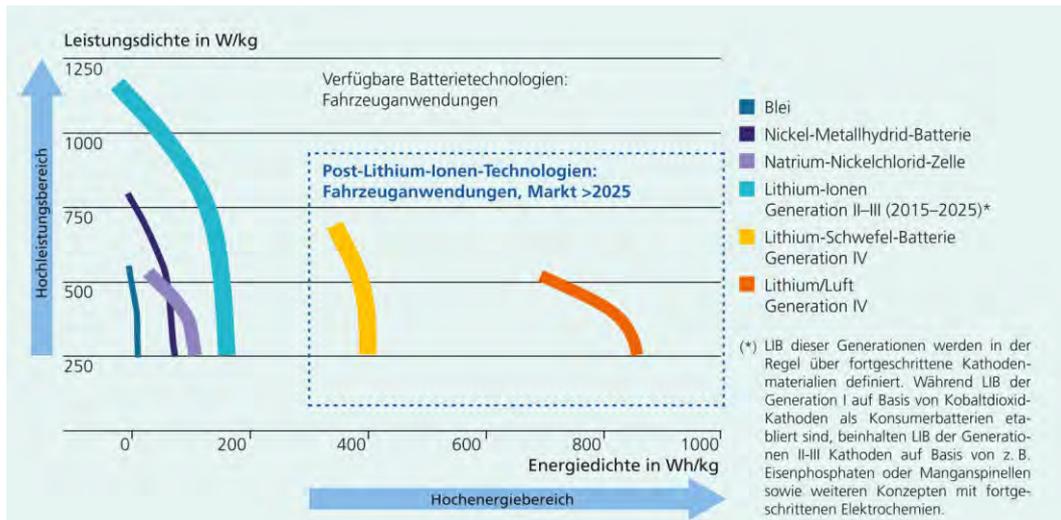


Abbildung 2 Energie- und Leistungsdichte von aktuellen und zukünftigen Batterietechnologien ([80])

## 2.2 Spezifische Brandemissionen

### Batteriebrände

Unter normalen Betriebsbedingungen und sofern keine Fabrikationsfehler das System schwächen, werden Lithium-Ionen-Batteriesysteme so ausgelegt, dass sie ausreichend vor einer spontanen Brandentwicklung geschützt sind (vgl. [72]; [73]). Die Batterien eines Elektrofahrzeuges beginnen in der Regel nicht ohne vorheriges Stressereignis zu brennen.

Aufgrund ihres grossen Energiegehalts, der hohen Spannungen, vor allem aber wegen der hochreaktiven Bestandteile, bergen Lithium-Ionen-Batterien aber dennoch potenzielle Brandgefährdungen mit gesundheitsschädigenden Folgen, die grundsätzlich sehr gut erforscht sind. So ist zum Beispiel bekannt, dass die nicht-wässrige, organische Elektrolytlösung genauso wie das Graphit im Aktivmaterial der Anode brennbar sind ([14]; [22]). Unter Einwirkung eines mechanischen, thermischen oder elektrischen Ereignisses, kann eine Batterie plötzlich überbeansprucht sein und eine sich selbstverstärkende Reaktion ausgelöst werden ([68]). Bei diesem sogenannten «thermischen Durchgehen» (engl. *thermal runaway*) erwärmt sich die Batterie durch chemische Vorgänge einerseits selbstständig, d.h. ohne äussere thermische Einwirkung und andererseits sehr schnell ( $>10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , [94]). Sie verlässt dabei ihren stabilen Betriebsbereich und die Materialien beginnen sich exotherm zu zersetzen, sodass ein Batteriebrand mit sehr hoher Energiefreisetzung entsteht. Solche Batteriebrände sind aus batteriechemischen Gründen (der erforderliche Sauerstoff wird durch das brennende Kathodenmaterial selber freigesetzt) nicht im konventionellen Sinne löschbar ([34]) sondern können nur gekühlt werden.

### Potenzielle Brandemissionen und Gefährdungen

Eine stoffliche Betrachtung von heutigen Batteriesystemen zeigt, dass neben Lithium und den Schwermetallen im Kathodenmaterial auch Fluor und organische Komponenten im Elektrolyt vorkommen ([39]). Diese Stoffe können für Mensch und Umwelt ein erhebliches Risiko darstellen, wenn sie im Brandfall staub- oder gasförmig freigesetzt werden. Bisherige Studien belegen, dass abgesehen von den herkömmlichen Brandemissionen (Bsp. CO, CO<sub>2</sub>, vgl. [16]; [55]), diese zusätzlichen toxischen und teilweise karzinogenen Stoffe, beispielsweise auch die nicht brennbaren aber gesundheitsschädigenden Fluorophosphatsalze im Elektrolyten, besonders zu beachten sind ([53]; [54]; [63]). Schadstoffemissionen eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes, die sich von einem Benzin- oder Dieselbrand unterscheiden sind in Tabelle 3 aufgeführt.

**Tabelle 3** Zersetzungsprodukte während eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes

Stoff	Formel	Beschreibung (u.a. nach [25])
Fluorwasserstoff	HF	farbloses Gas mit stechendem Geruch, sehr giftig
Phosphoroxidfluorid	POF <sub>3</sub>	farbloses, stechend riechendes Gas, undefinierte Toxizität ([53])
Phosphorsäure	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	farb- und geruchloser Feststoff oder Flüssigkeit, giftig
Flüchtige organische Verbindungen	VOC	kohlenstoffhaltige Stoffe, typisch als Gas vorliegend
Monophosphan	PH <sub>3</sub>	brennbares, giftiges, farb- und geruchloses Gas, sehr giftig
Schwermetallaerosole	Co, Ni, Mn	Staubförmige Rückstände in der Luft, sehr giftig

Lithium-Ionen-Batterien sind in der Regel gasdicht verschlossen, sodass im Normalbetrieb keine Inhaltsstoffe austreten bzw. keine Stoffe in die Batterien eindringen können. Diese Vorkehrung ist gerade auch im Zusammenhang mit Wasser sehr wichtig, da in den Batterien enthaltenes elementares Lithium beim Kontakt mit Wasser stark exotherm zu Wasserstoff und Lithiumhydroxid reagiert. Der dabei entstehende Wasserstoff H<sub>2</sub> ist unter atmosphärischem Druck bei einem Volumenanteil zwischen 4 und 77 % explosiv (das sogenannte «Knallgas»). Dieser sehr weite Bereich an zündfähigen Mischungsverhältnissen macht Wasserstoff gerade in unterirdischen Infrastrukturen hochgefährlich. Besonders Feuerwehren müssen diese Problematik beachten, da Wasser nach wie vor als bestes Bekämpfungsmittel für nicht löschbare Lithium-Ionen-Batteriebrände empfohlen wird ([27]; [74]). Diese potenziellen Emissionen sowie Gefahren von Lithium-Ionen-Batterien in unterirdischen Infrastrukturen lassen sich von den in den Batterien enthaltenen chemischen Bestandteilen ableiten und sind den betroffenen Einsatzkräften mittlerweile ausreichend bekannt.

In einigen Untersuchungen wird die Bestimmung der Zusammensetzung und des Volumens der entstehenden, zum Teil entzündbaren Gase beim thermischen Durchgehen von kommerziellen Batteriezelltypen (Bsp. NMC, LCO, LFP, LMO) aufgezeigt ([85]; [36]; [71]). Dabei können Konzentrationen von 5 bis 30 % H<sub>2</sub>, 5-30 % CO, 20-50 % CO<sub>2</sub>, und 0.1 bis 9 % diverser Kohlenwasserstoffe (Methan, Ethen, Propen, Ethan, Buten, Propan, Butan) festgestellt werden. Der umfangreiche Bericht der Forschungsstelle für Brandschutztechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT, [48]) beschreibt die Zusammensetzungen von Lithium-Ionen-Batterien und theoretisch mögliche chemische Reaktionen beim thermischen Durchgehen. Bei einem Brandversuch mit einer allerdings nicht näher spezifizierten Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie wurden reizende, giftige, umweltgefährliche, wassergefährdende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und z.T. toxische Konzentrationen von Schwermetallen festgestellt. Dioxine, Furane und Phosgen konnten nicht nachgewiesen werden. Ein wesentlicher Teil der Literatur bezieht sich nur auf die Analyse der chemischen Zersetzung beim Verbrennen des Elektrolyten, des Leitsalzes LiPF<sub>6</sub> oder deren Kombination ([15]; [24]; [47]; [58]). In [24] wird für die Verbrennung von Elektrolytmischungen mit Leitsalzen bestehend aus LiPF<sub>6</sub> und LiFSI eine Quantität von 18 bis 60 mg HF pro Gramm Elektrolytmischung angegeben. Bei der Verbrennung von kompletten Lithium-Ionen-Batteriesystemen der Typen LCO, LFP und NCA wurden in [52] Mengen von 10 bis 200 mg HF pro Wh Batteriekapazität ermittelt, in ([70]) sind es 36 bis 68 mg HF pro Wh für eine LMO-Pouchzelle von 2.9Ah / 11Wh. [78] zeigt einen relativen Vergleich der Mengen an HF und POx bei der Verbrennung von kommerziellen 18650-Zellen (LMO, NMC, LFP) und findet eine Vielzahl von akut toxischen Substanzen, allerdings ohne Mengenangaben.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die potenziellen Brandemissionen von Lithium-Ionen-Batteriebränden grundsätzlich bekannt sind. Aufgrund der breiten Varianz der Feststellungen ist zurzeit jedoch nicht klar, inwiefern bei Brandereignissen mit Elektrofahrzeugen in unterirdischen Infrastrukturen von einer nachhaltigen Beeinträchtigung der Betriebssicherheit ausgegangen werden muss. Das ist auch der Grund dafür, dass bislang keine einheitlichen Empfehlungen für technische oder organisatorische Massnahmen zur Schadensprävention und -minderung solcher Ereignisse vorliegen.

## 2.3 Risiken in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen

Aufgrund der sich verändernden Antriebsformen und dem vermehrten Einsatz von hochkapazitiven Lithium-Ionen-Batterien in Strassenfahrzeugen, ist zu erwarten, dass sich auch das Sicherheitsrisiko mit der Zeit verändern wird. Ein besonderer Fokus liegt hierbei auf geschlossenen und unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen, die oftmals durch eingeschränkte Lüftungs- und Rettungsmöglichkeiten charakterisiert sind. Die reaktiven und teils sehr giftigen Materialien führen in geschlossenen Infrastrukturen in erster Linie zu veränderten chemischen Gefährdungen, die verschiedene Risikoänderungen zur Folge haben können ([59]). Die möglichen Auswirkungen und Spätfolgen eines Traktionsbatteriebrandes in einem unterirdischen Infrastruktursystem sind jedoch nach wie vor nicht geklärt.

Unter bestimmten Umständen können sich die emittierten Schadstoffe einerseits noch während des Brandereignisses in der Umgebungsluft konzentrieren und für Menschen kritische Schwellenwerte schneller überschreiten als im Freien, wo die Rauchgase rasch verdünnt werden. Andererseits ist es aufgrund der persistenten Natur bestimmter batterieartiger Emissionen denkbar, dass diese während und auch nach einer Brandbekämpfung verschleppt werden und an anderen, ereignisunabhängigen Orten zu Kontaminationen führen. Die anzunehmenden Risikoveränderungen in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen können zum jetzigen Zeitpunkt kaum quantifiziert werden; sie lassen sich aber nach bestimmten Aspekten kategorisieren. Die in Tabelle 4 aufgeführten, möglichen Risikoveränderungen beruhen auf der Annahme eines Worst-Case-Szenarios, in dem unter anderem die Ereignisbewältigung nicht nach dem aktuellen Stand der Technik und Erfahrung ausgeführt wird.

**Tabelle 4** Potenzielle Risikoveränderungen in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen

Aspekt	Risikoveränderung	Auswirkungen
Verfügbarkeit	Längerfristige Sperrungen der Infrastruktur aufgrund aufwendiger Dekontaminationsarbeiten.	Betriebsausfälle
Personensicherheit	Beeinträchtigung der Personensicherheit durch Ablagerungen und Verschleppungen toxischer Schadstoffe bspw. über Lüftungskanäle oder kontaminierte Schutzausrüstung.	Gesundheitsrisiko
Schutz von Bauteilen und technischen Einrichtungen	Zusätzliche Korrosionsschädigung von Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen durch neuartige, bislang atypische Schadstoffemissionen.	Sicherheitsbeeinträchtigung
Ereignisbewältigung	Unsachgemässe Ereignisbewältigung aufgrund fehlenden Wissens über spezifische Brandemissionen von Li-Ionen-Batterien und nicht einheitlichen Praxisempfehlungen.	Unkoordinierte Prozessänderungen
Umweltschutz	Beeinträchtigung der Umwelt durch Ablagerungen und Verschleppungen toxischer Schadstoffe bspw. bei unkontrolliertem Abfließen von kontaminiertem Löschwasser oder beim Austrittsberiech von Lüftungen.	Umweltrisiko

## 2.4 Richtlinien und Normen

### Strassentunnel

Eine Grundlage für die Planung von Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) in Strassentunneln ist die Annahme einer zu erwartenden Verkehrszusammensetzung im betroffenen Tunnel (Anteil Schwerverkehr, Gefahrguttransporte etc.). Im Kontext der sich wandelnden Mobilität, unterliegt dieser Aspekt aktuell aber einer schleichenden Veränderung: die zukünftige Verkehrszusammensetzung wird sich zunehmend weniger durch reine Benzin- und Dieselfahrzeuge dafür mehr durch batteriebetriebene und weitere alternativ angetriebene Fahrzeuge charakterisieren (vgl. [79]; [80]; [81]).

Obschon die Elektromobilität durch die Politik aktiv gefördert wird (vgl. [4]; [8]), werden in den schweizerischen Richtlinien und Normen potenzielle Auswirkungen der Elektromobilität auf die Tunnelsicherheit zurzeit nicht behandelt. So sind den Empfehlungen für die Bemessung der BSA aktuell Fahrzeugbrände mit fossilen Treibstoffen zugrunde gelegt – neuartige Energiespeicherungen werden bislang nicht miteinbezogen. Obschon in den Betrachtungen Gefahrguttransporte berücksichtigt werden, geht die Norm SIA 197/2 in ihren Definitionen ausschliesslich von Brandereignissen mit Beteiligung konventioneller Antriebsarten aus (vgl. [75]). Bei den zunehmend eingesetzten alternativen Treibstoffen, d.h. nicht nur bei elektrochemischen Speichern, sondern auch bei gasförmigen Treibstoffen besteht allerdings ein bedeutendes Schadenpotential ([1]). Neuartige Schadensszenarien durch Anreicherung zündfähiger Gas-Luft-Gemische nach einem Unfall, allfällige Grenzbelastungen für Feuerwehrleute aufgrund der veränderten chemischen Gefährdungen, oder die Gefahr der Wasserstoffbildung durch Wasser als Löschmittel werden somit nicht behandelt. Auch in den Vorgaben des ASTRA zu den Lüftungs- und Detektionsanlagen eines Strassentunnels (vgl. [2] und [3]) werden die Auswirkungen des steigenden Anteils von Elektrofahrzeugen nicht berücksichtigt und somit keine risikomindernden Massnahmen vorgesehen. Auch wenn sich aufgrund der Erkenntnisse des Vorgängerprojekts kein grundsätzlicher Änderungsbedarf aufdecken liess ([59]), so wird die Aktualisierung der bestehenden Vorgaben des ASTRA hinsichtlich neuer Antriebstechnologien nach wie vor als sinnvoll erachtet.

### **Kleinere unterirdische Verkehrsinfrastrukturen**

Mit Blick auf die Sicherheit in kleineren Verkehrsinfrastrukturen ist der Mobilitätswandel in den geltenden schweizerischen Richtlinien und Normen ebenfalls noch nicht umfassend miteinbezogen. Dadurch wird für die Projektierung der brandschutztechnischen Massnahmen nach wie vor eine Verkehrszusammensetzung zugrundegelegt, die ausschliesslich aus Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben besteht. Spezifische Gefährdungen, die von alternativen Antriebsformen ausgehen können, sowie weitergehende betriebliche oder organisatorische Schutzmassnahmen bleiben dadurch vorerst unbeachtet.

Aktuell existieren für die Schweiz noch keine einheitlichen Vorgaben für den Umgang mit spezifischen Brandgefährdungen durch Elektrofahrzeuge in Parkhäusern, Einstellhallen oder Garagen. Weil das Brandrisiko während des Ladevorgangs einer Batterie an einer Ladestation aufgrund der potenziellen Überladung grundsätzlich erhöht ist ([94]), werden diesbezüglich in den folgenden normativen Dokumenten des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) bzw. des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) konkretere Empfehlungen gemacht:

**Tabelle 5** Aktueller Normenstand betreffend kleinere Verkehrsinfrastrukturen

<b>Norm</b>	<b>Vorgaben betreffend</b>
VSS 40 294 «Parkfelder mit Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Parkhäusern – Sicherheitsmassnahmen» (vgl. [88])	Standortwahl von Ladestationen unter einem Sicherheitsaspekt
	Technische Sicherheitsmassnahmen
	Organisatorische Sicherheitsmassnahmen
SIA 2060 «Infrastruktur für Elektrofahrzeuge in Gebäuden» (vgl. [76])	Genereller Brandschutz

Diverse Informationsbroschüren von Ladestationenbetreibern oder Energieversorgungsunternehmen bieten regelmässig Überblicke wichtiger Themen rund um die Elektromobilität in Infrastrukturen für verschiedene Akteure in der Schweiz (Bsp. Ladestationen und Lademanagement in Wohnüberbauungen). In diesen Informationen werden aber meist nur elektrische Risiken behandelt; weitere Sicherheitsaspekte, insbesondere die thermischen und chemischen Gefährdungen in geschlossenen Räumen werden nicht beleuchtet. Eigentümer und Betreiber von kleineren Infrastrukturen können also nur auf spärliche Vorgaben zurückgreifen und sind in der Wahl von spezifischen Sicherheitsvorkehrungen somit oftmals auf sich allein gestellt.

### 3 Methodik

Mit den Kontaminationsversuchen im vorliegenden Projekt wurden grösstmögliche, batterie-spezifische Auswirkungen eines Elektrofahrzeugbrandes untersucht (engl. *worst case*). Dabei wurden lediglich Risiken durch chemische Gefährdungen betrachtet – thermische oder elektrisch bedingte Risiken wurden ausser Acht gelassen.

Die experimentelle Situation musste so hergestellt werden, dass die zu untersuchenden Kenngrössen (abhängige Variablen) ohne Beeinträchtigungen gemessen werden konnten. Für den Ausschluss weiterer beeinflussender Faktoren, wie zum Beispiel elektronische oder mechanische Schutzvorkehrungen an den Batteriesystemen, wurden in den Versuchen einzelne Module eines Batteriesystems ohne überwachendes Batteriemanagementsystem und losgelöst von einem typischen Fahrzeugüberbau analysiert. Die Versuchsergebnisse wurden anschliessend bis auf die Fahrzeugebene skaliert (vgl. Abbildung 3), plausibilisiert und in Bezug zu realen Ereignissen in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen gestellt.

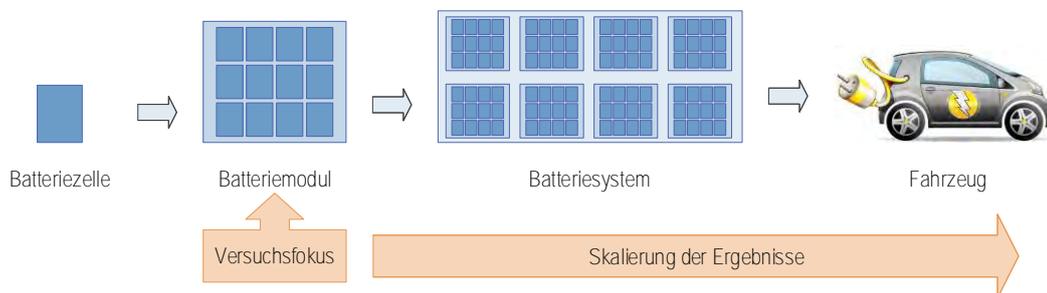


Abbildung 3 Modularer Aufbau eines Batteriesystems und Fokus der Versuche

#### 3.1 Versuchsmaterial

Im Fokus standen hochkapazitive Batterien für gängige batterieelektrische Personenkraftwagen der Mittelklasse (Stand 2019), d.h. keine Hybrid- oder Nutzfahrzeuge. Damit die Analysen direkt auf den Erkenntnissen des Vorgängerprojektes (vgl. [59]) aufbauen konnten, wurde in den vorliegenden Versuchen das gleiche Fahrzeugbatteriesystem untersucht (vgl. Abbildung 4 und Tabelle 6).

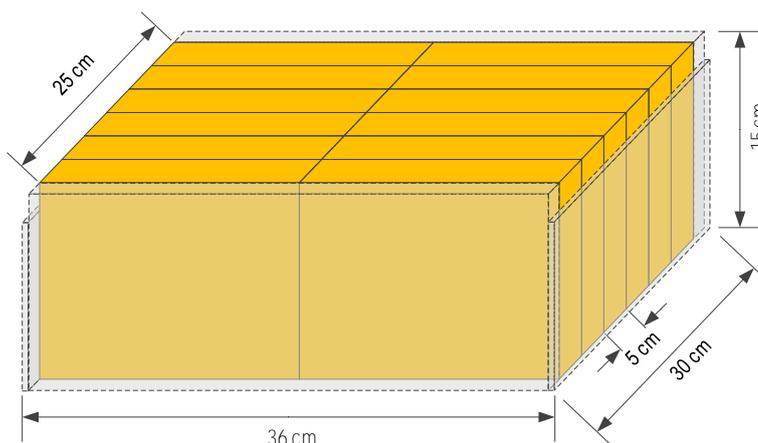


Abbildung 4 Schematische Darstellung des untersuchten Batteriemoduls mit 12 Batteriezellen (orange) und stabilisierendem Aluminiumrahmen (grau transparent)

Die im Experiment verwendeten Batteriemodule waren neuwertige (Produktion 2018) und vollständig gebrauchstaugliche Bestandteile eines zugelassenen BEV. Sie wurden durch den Fahrzeugmarkenvertreter aus Sicherheitsgründen mit der Nominalspannung von 3.6

V pro Batteriezelle (Ladezustand <60 %) angeliefert und wurden in geeigneten Räumlichkeiten, d.h. mit wenig entzündbaren Materialien und ausschliesslichem Zugang für autorisierte Personen, bis zu den Versuchen im VSH gelagert. Für den Zeitpunkt der Versuche wurden die Batteriezellen auf die empfohlene Ladeschlussspannung aufgeladen (vgl. Tabelle 6).

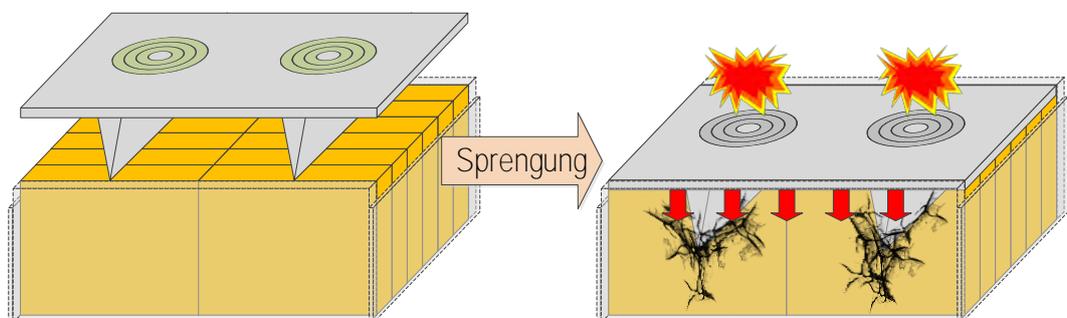
**Tabelle 6** Eigenschaften des untersuchten Batteriesystems für BEV (Stand 2019)

Eigenschaft	Beschreibung	
	Batteriemodul	Batteriesystem
Anzahl der Zellen	12	96
Zelltyp	Prismatische Zellen	
Elektrodenaktivmasse	Anode: Graphit ; Kathode: Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC)	
Leitsalz	Lithiumhexafluorophosphat LiPF <sub>6</sub>	
Nominalspannung	44.4 V (3.7 V pro Batteriezelle)	355 V
Ladeschlussspannung	49.2 V (4.1 V pro Batteriezelle)	394 V
Energie	4.15 kWh	33.2 kWh
Spezifische Energie	0.14 kWh/kg	
Thermisches Durchgehen	Ab 210°C typisch. Hohe Ladungen sind begünstigend.	

### Beschädigungskonzept

Ein realitätsnaher Hergang der Batteriebeschädigung (Crash, Brand, elektrische Beschädigung) war für die vorliegende Worst-Case-Betrachtung nicht relevant und wurde daher für die Versuche nicht weiter konkretisiert. Ziel war bei allen Versuchsszenarien die simultane Beschädigung sämtlicher Batteriezellen, sodass ein umfassendes thermisches Durchgehen in einer kontrollierten Umgebung herbeigeführt werden konnte. Hierzu wurde das Beschädigungskonzept des Vorgängerprojektes übernommen, das sich für Untersuchungen solcher Art bewährt hat. Demnach wurden sämtliche Batteriezellen der Batteriemodule gleichzeitig mechanisch beschädigt, wobei die erforderlichen Kräfte mit sprengtechnischen Methoden herbeigeführt werden. Die Batteriemodule selbst wurden dabei nicht gesprengt.

Den auf dem Untergrund festgeschraubten Batteriemodulen wurden jeweils lose eine Stahlplatte (38 cm x 27 cm x 2 cm) aufgelegt, auf deren Unterseite über die gesamte Länge zwei 8 cm lange Stahlkeile (8 cm x 25 cm x 0.8 cm) befestigt waren (vgl. Abbildung 5). Auf der Oberseite der Stahlplatte wurden zweimal je 100 g Sprengschnur (Detonex, 40 g/m) fest angebracht. Durch die simultane Detonation beider Sprengladungen beschleunigte sich die Stahlplatte in Richtung des Batteriemodules. Ziel war, dass die auf der Unterseite fixierten Keile gleichmässig in die beiden Batteriezellenreihen der Batteriemodule eindringen, wo sie verbleiben und elektrische Kurzschlüsse bewirken sollten.

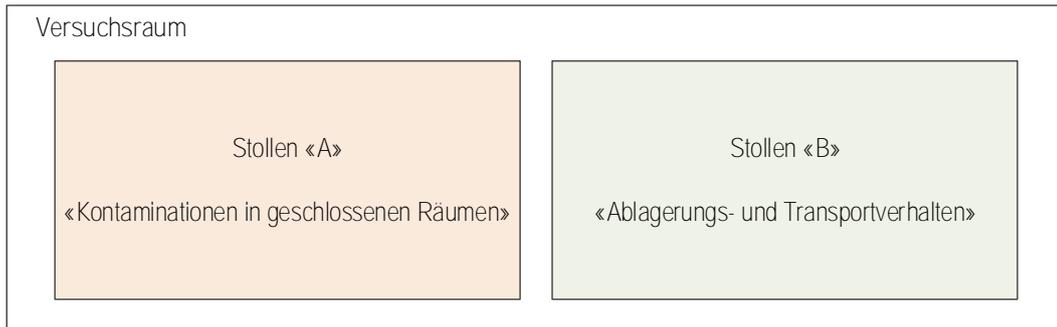


**Abbildung 5** Batteriemodul (orange) und aufliegende Stahlplatte mit Keilen (grau) mit Sprengschnur (grün) vor und nach der Krafteinwirkung (rot)

## 3.2 Versuchsraum und Standorte

Die Versuche wurden 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 zielorientierte, sichere und umweltschutzgerechte Durchführung der Versuche wurden zwei unterschiedliche Umgebungsprofile benötigt (vgl. Abbildung 6): 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.

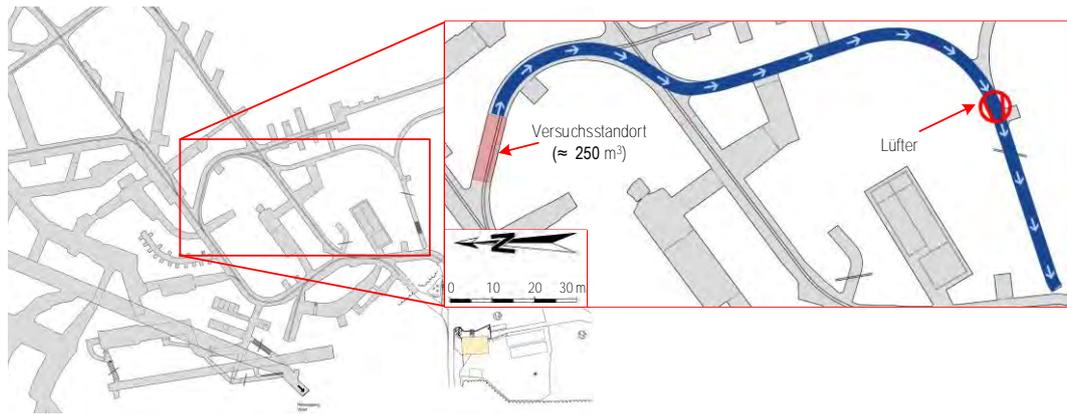


**Abbildung 6 Strukturierung des Versuchsraumes aufgrund unterschiedlicher Analyseziele**

### Stollen «A»

An diesem Standort fanden diejenigen Versuche statt, in denen Brandrückstände in einem klar begrenzten Raumvolumen ohne Luftzirkulation, d.h. ohne mechanische Lüftung untersucht werden sollten. Damit die Skalierung der Konzentrationsmessungen bis auf Fahrzeugebene zulässig ist, wurde das experimentelle Raumvolumen proportional zur Energiekapazität der Batteriemodule gewählt: 1/8 eines Batteriesystems → 1/8 eines Parkgeschosses mit ca. 2'000 m<sup>3</sup> (28 x 28 x 2.5 m) ≈ 250 m<sup>3</sup>. Der Stollen «A» zeichnete sich durch die folgenden Eigenschaften aus (vgl. Abbildung 7):

- Klar abgrenzbares Raumvolumen (≈ 250 m<sup>3</sup>) ohne mechanische Lüftung: die Abgrenzung erfolgte beidseits mittels eines an der Unterkante freihängenden (Expansionsmöglichkeit) und mit Wasser benetzten Bauvlies (Brandschutz).
- Tunnel- und parkhausähnliche Umgebung
- Explosionssichere und rauchunempfindliche Umgebung
- Chemisch inerte Oberflächen
- Mechanische Luftreinigung und Rauchableitung ins Freie jederzeit möglich



**Abbildung 7 Lage des Stollens «A» mit Lüftungsstrecke (blau)**



**Abbildung 8 Versuchsplatz Stollen «A» (links) mit Abluftreinigungsvorrichtung (rechts)**

### **Stollen «B»**

An diesem Standort fand derjenige Versuch statt, mit dem die Brandrückstände über eine längere Transportstrecke untersucht werden sollten. Zur Sichtbarmachung eines distanzabhängigen Ablagerungsverhaltens der batteriespezifischen Brandemissionen wurde die Messstrecke bewusst möglichst lang gewählt. Der Stollen «B» zeichnete sich durch die folgenden Eigenschaften aus (vgl. Abbildung 9):

- Tunnel- und parkhausähnliche Umgebung mit langer Messstrecke (ca. 160 m)
- Explosionssichere und rauchunempfindliche Umgebung
- Chemisch inerte Oberflächen
- Konstante Luftströmung von ca. 1.5 m/s
- Lüftungssteuerung und Rauchableitung ins Freie jederzeit möglich

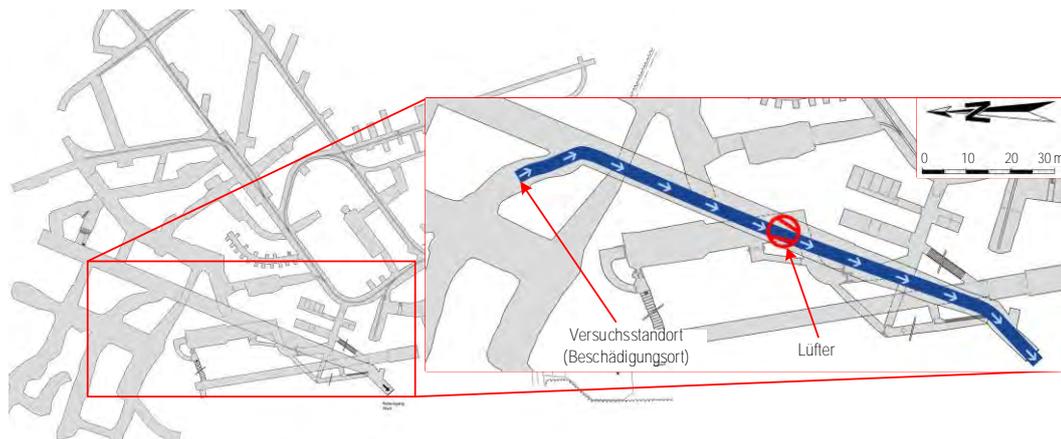


Abbildung 9 Lage des Stollens «B» mit Lüftungsstrecke (blau)

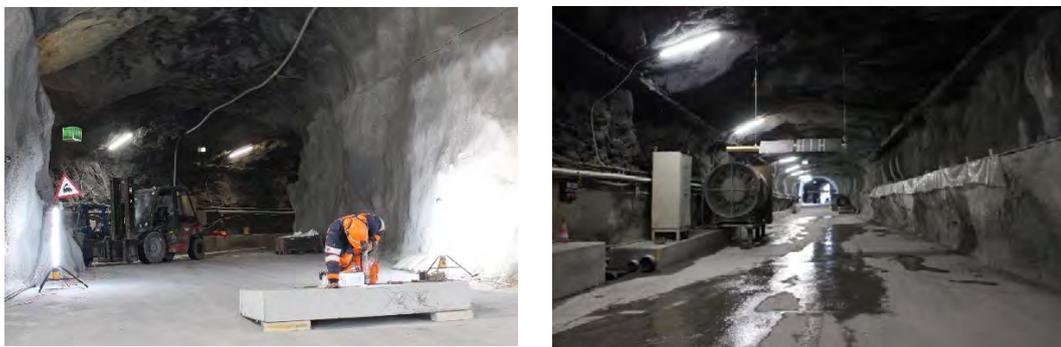


Abbildung 10 Versuchsplatz Stollen «B» (links) und darauffolgende Messstrecke (rechts)

### 3.3 Messkonzept

#### Messgrößen und -methoden

Im vorliegenden Projekt lag der Fokus auf der sogenannten «kalten Brandstelle», weshalb ausschliesslich Analysen von Brandrückständen und keine Gasanalysen während den Bränden durchgeführt wurden. Letztere bildeten das Zentrum des Vorgängerprojekts und sind im dazugehörigen Schlussbericht dokumentiert (vgl. [59]). Die damaligen Messungen sowie erste Praxiserfahrungen der Empa deuten im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugbränden auf veränderte chemische Gefährdungen und Kontaminationen durch BEV-Brände hin. Diese sollten deshalb nun mit dem vorliegenden Forschungsprojekt anhand geeigneter Messgrößen und den entsprechenden Methoden vertiefter analysiert werden.

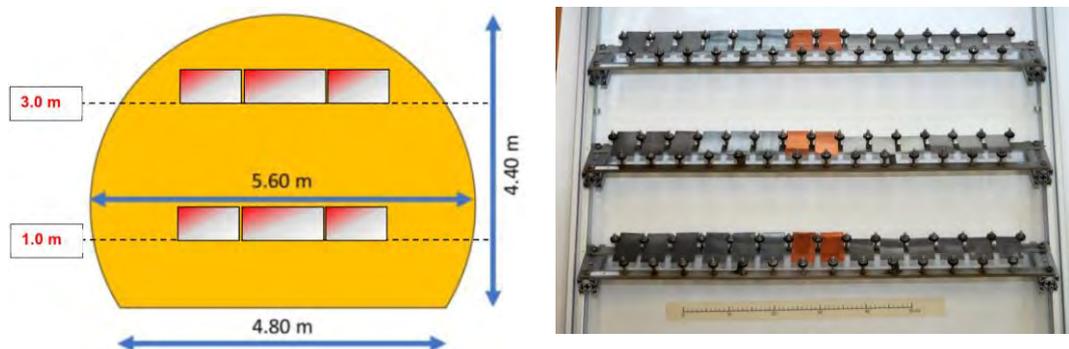
In den Versuchen wurden nur messtechnische Einrichtungen und Geräte eingesetzt, die geprüft waren und sich innerhalb des vom Hersteller angegebenen Kalibrationszyklus befanden. Die vor Ort herrschenden Umgebungsbedingungen wurden vor und während jeder Versuchsdurchführung mit geeigneten Messmitteln erfasst und dokumentiert. Die eingesetzten Messtechniken und -methoden für die einzelnen Parameter sind der Tabelle 7 und Abbildung 11 zu entnehmen.

**Tabelle 7** Messgrößen während des Experiments

Messgröße	Beschreibung	Methode/Messtechnik
Temperatur (°C)	Temperatur in der direkten Umgebung sowie innerhalb des havarierten Batteriemodules	Direkt, mit Thermoelement Typ K
F <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , Br <sup>-</sup>	Kontamination mit Halogenen (insbesondere auch Flußsäure HF)	Oberflächenwischproben; Anionen-Analyse im wässrigen Extrakt mittels Kapillarelektrophorese (CE)
HCOO <sup>-</sup> , CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	Kontamination mit Ameisen- und Essigsäure	

**Tabelle 7 Messgrößen während des Experiments**

Messgröße	Beschreibung	Methode/Messtechnik
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Kontamination mit Schwefel, Salpeter- und Phosphorsäure	
Li	Kontamination mit Lithiumverbindungen	Oberflächenwischproben; Kationen-Analyse im Salpetersäure-Extrakt
Ni, Co, Mn	Kontamination mit Nickel-, Kobalt- und Manganverbindungen	mittels Plasmaemissionsspektrometrie (ICP-OES)
PAK, PCB, PCDD/F	Kontamination mit polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, polychlorierten Biphenylen und polychlorierten Dibenzodioxinen/-furanen	Oberflächenwischproben; PAK-, PCB- und PCDD/F-Analyse im Cyclohexan- bzw. Toluol-Extrakt mittels Gaschromatographie und hochauflösender Massenspektrometrie (GC-MS)
Element-Screening	Analyse der chemischen Gesamtzusammensetzung der Brandrussproben	Semiquantitative Elementanalyse mittels REM/EDX und ED-XRF
Rauchentwicklung	Ausprägung (Intensität) und zeitlicher Verlauf der Rauchentwicklung	Direkt, mit Video (hochauflöste (1080p) Aufnahmen mit normaler (30 fps) Bildfrequenz.
Thermische Effekte	Bsp. Verpuffungen, Explosionen etc.	Direkt, mit Video (hochauflöste (1080p) Aufnahmen mit normaler (30 fps) Bildfrequenz.
Korrosivität der Rauchgase	Analyse der Korrosionsschädigung von verschiedenen typischen Infrastruktur-Metallen (Zink, Stahl, Kupfer, Aluminium, Inox, etc.)	Gravimetrische Analyse des korrosionsbedingten Materialabtrages von exponierten Prüfblechen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkt nach Exposition der Prüfbleche durch Rauchgase (und Dekontamination)</li> <li>• Nach Exposition der kontaminierten Prüfbleche bei 90 % rLF (während 3 Monaten)</li> </ul>



**Abbildung 11 Montageschema der Probenahme-Kollektoren (links, Bsp. Stollen A) und Rack für das Korrosions-Monitoring (rechts)**

### 3.4 Versuchsszenarien

Zur Untersuchung potenzieller Brandfolgeschäden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen wurden mit insgesamt vier Batteriemodulen drei Versuchsszenarien sowie eine Materialanalyse durchgeführt (vgl. Tabelle 8).

**Tabelle 8 Versuchsszenarien mit den Batteriemodulen 1, 2, 3 und 4**

#	Szenario	Illustration
1	<p><b>«Infrastruktur und Schutzausrüstung»:</b> Mechanische Beschädigung des Batteriemoduls mittels Sprengtechnik in einem geschlossenen Raum ohne mechanische Lüftung.</p> <p>Ziel: Analyse Brandrückstände auf Oberflächen und textiler Schutzausrüstung sowie Korrosivität gegenüber typischen Metallen.</p> <p>→ Stollen «A»</p>	
2	<p><b>«Löschwasser»:</b> Mechanische Beschädigung des Batteriemoduls mittels Sprengtechnik in einem geschlossenen Raum ohne mechanische Lüftung und mit kontinuierlichem Wasserzustrom in Brandemissionen (nicht auf Batteriemodul, ohne Druckaufbereitung).</p> <p>Ziel: Analyse Löschwasserkontamination</p> <p>→ Stollen «A»</p>	
3	<p><b>«Transport- und Ablagerungsverhalten»:</b> Mechanische Beschädigung des Batteriemoduls mittels Sprengtechnik in einem offenen Raum mit konstanter Luftströmung von ca. 1.5 m/s.</p> <p>Ziel: Analyse räumliches Ablagerungsverhalten</p> <p>→ Stollen «B»</p>	
4	<p><b>«Materialanalyse»:</b> Untersuchung des Batteriemoduls ohne Zerstörung der Batteriezellen zwecks Materialanalyse sämtlicher Modulbestandteile (Batteriezellen, Kabel, Elektronik, Isolation, Gehäuse etc.).</p> <p>Ziel: Abgrenzung zwischen «zellchemischen» und «weiteren» Brandfolgeprodukten</p> <p>→ Labor Empa</p>	

### 3.4.1 Infrastruktur und Schutzausrüstung

**Tabelle 9 Versuchsszenario mit Batteriemodul 1**

Aspekt	Beschreibung
Ziele	Quantitative Analyse der in korrosionschemischer und toxikologischer Hinsicht relevanten Kontaminationen
	Quantitative Analyse der Korrosivität der Brandemissionen gegenüber verschiedenen typischen Infrastrukturmetallen
	Erkenntnisse über die Kontamination von Schutzausrüstung mit in toxikologischer Hinsicht relevanten Substanzen (v.a. Schwermetalle und HF) und Konsequenzen für Mensch und Umwelt bei Verschleppung.
Aufbau und Ablauf	1 NMC-Batteriemodul (à ca. 4 kWh)
	Klar abgrenzbarer, mechanisch nicht belüfteter Versuchsraum mit ca. 250 m <sup>3</sup> Volumen und chemisch inerten Oberflächen (Stollen «A»)
	Montage von mehreren, geneigt (45° Richtung Experiment) exponierten Probenkollektorblechen (Inox 1.4401) im Versuchsraum auf 1.5 und 3.0 m Höhe

**Tabelle 9 Versuchsszenario mit Batteriemodul 1**

Aspekt	Beschreibung
	Aufbau von Korrosionsmonitoring-Racks im Versuchsraum auf 1.5 m Höhe
	Platzierung und Exposition eines für solche Einsätze typischen textilen Feuerwehrschtanzzugs (93 % m-Aramid (Nomex), 5 % p-Aramid (Kevlar), 2 % P140 (Carbon))
	Installation diverser Messgeräte für kontinuierliche Messungen (Bsp. Temperatur, Spannungsänderungen in Batteriemodul, Filmaufnahmen)
	Mechanische Beschädigung aller Batteriezellen mit sprengtechnischer Methode (vgl. Abbildung 5)
	Kompletter Abbrand des Batteriemoduls ohne mechanische Entlüftung des Versuchsraumes und ohne Lösversuche (→ ungehinderte Ablagerung der Brandemissionen auf Oberflächen)
	Mittels Luftreinigungsanlage kontrollierte Entlüftung des Versuchsraumes nach Versuchsende unter Einhaltung der Anforderungen an Sicherheit und Umwelt
	Eintauchen des havarierten Batteriemoduls in einem Wasserbecken zwecks Analyse des Kontaminationspotenzials einer abgebrannten und nachträglich gefluteten Batterie (→ aktuelle Praxisempfehlung)
Probenentnahmen	Wischproben: Entnahme mit deionisiertem Wasser bzw. n-Hexan von dekontaminierten Kollektoren auf Flächen von 200 cm <sup>2</sup> (Proben für Analyse von Anionen und Kationen) bzw. 1'000 cm <sup>2</sup> (Proben für Analyse von PAK, PCB und PCDD/F)
	Brandrussproben: Trockenentnahme von dekontaminierten Kollektoren auf einer Fläche von 8'000 cm <sup>2</sup> (Proben für die chemische Analyse der Anionen, Kationen, PAK, PCB und PCDD/F sowie für das Element-Screening)
	Textilproben: Entnahme von Wischproben (s.oben) im kontaminierten und gereinigten Zustand
Analysemethoden	Kapillarelektrophorese (CE): Anionen-Analyse im wässrigen Extrakt
	Plasmaemissionsspektrometrie (ICP-OES): Kationen-Analyse in Salpetersäure-Extrakt
	Isotopenverdünnungsanalyse (GC-HRMS): PAK-, PCB- und PCDD/F-Analyse im Cyclohexan- bzw. Toluol-Extrakt
	Röntgenfluoreszenzspektrometrie (ED-XRF, REM/EDX): Semiquantitative Analyse der chemischen Elemente von Trockenproben
Korrosions-Monitoring	Prüfmetalle: Kohlenstoffstahl, Zink, Kupfer, Aluminiumlegierung AlMgSi1 und nichtrostender Stahl 1.4404 (vgl. Abbildung 11)
	Exposition gegenüber Brandgasen: geneigt (45° Richtung Experiment)
	Exposition gegenüber Feuchtigkeit: bei 90 % rLF (während 1 und 3 Monaten)
	Analyse des Materialabtrages: gravimetrisch

### 3.4.2 Löschwasser

**Tabelle 10 Versuchsszenario mit Batteriemodul 2**

Aspekt	Beschreibung
Ziele	Erkenntnisse über die Kontamination von Löschwasser mit in toxikologischer Hinsicht relevanten Substanzen (v.a. Schwermetalle und HF) und Konsequenzen für Mensch und Umwelt bei unkontrolliertem Abfließen.
Aufbau und Ablauf	1 NMC-Batteriemodul (ca. 4 kWh)
	Klar abgrenzbarer, mechanisch nicht belüfteter Versuchsraum mit 250 m <sup>3</sup> Volumen und chemisch inerten Oberflächen (Stollen «A»)
	Installation diverser Messgeräte für kontinuierliche Messungen (Bsp. Temperatur, Spannungsänderungen in Batteriemodul, Filmaufnahmen)

**Tabelle 10 Versuchsszenario mit Batteriemodul 2**

Aspekt	Beschreibung
	Mechanische Beschädigung aller Batteriezellen mit sprengtechnischer Methode (vgl. Abbildung 5)
	Kompletter Abbrand des Batteriemoduls ohne mechanische Entlüftung des Versuchsraumes (→ ungehinderte Ablagerung der Brandemissionen im Löschwasser)
	Fortführung des aus dem Batteriemodul austretenden Rauchs mittels geeigneter Leitbleche in eine «Beregnungszone»
	Beregnung des Brandrauchs <sup>1</sup> mittels Brause (400 mm x 400 mm) mit 324 Düsen auf einer Höhe von 2.5 m mit konventionellem Leitungswasser ohne zusätzliche Druckaufbereitung (kein Lösversuch) und einem kontinuierlichen Volumenstrom von ca. 20 l/min
	Sammlung des gesamten Löschwassers in der Beregnungszone mittels eines angrenzenden, chemisch inerten Kunststoffbehälters mit einem Volumen von ≈ 200 l.
	Sammlung des anfallenden Bodensatzes als Probe. Dokumentation des aufgefangenen Gesamtvolumens an Wasser. Weiterleitung der Aliquote der gesammelten Flüssigkeit in Laborglasflaschen zur Analyse an Empa-Labor.
	Mittels Luftreinigungsanlage kontrollierte Entlüftung des Versuchsraumes sowie auf Basis der Laboranalysen allfällige gesonderte Entsorgung des aufgesammelten Löschwassers nach Versuchsende unter Einhaltung der Anforderungen an Sicherheit und Umwelt
Analysemethoden Löschwasser	Kapillarelektrophorese (CE): Anionen-Analyse (Direktanalyse)
	Plasmaemissionsspektrometrie (ICP-OES): Kationen-Analyse (Direktanalyse)
	Isotopenverdünnungsanalyse (GC-HRMS): PAK-, PCB- und PCDD/F-Analyse (n-Hexan-Extrakt von C18-Phase bzw. Polymerkartusche)
Analysemethoden Feststoffe (Bodensatz, Schwebstoffe)	gemäss Batteriemodul 1 (Trockenproben), vgl. Tabelle 9

### 3.4.3 Transport- und Ablagerungsverhalten

**Tabelle 11 Versuchsszenario mit Batteriemodul 3**

Aspekt	Beschreibung
Ziele	Quantitative Analyse der in korrosionschemischer und toxikologischer Hinsicht relevanten Kontaminationen über eine längere Transportstrecke.
	Erkenntnisse über das Transport- und Ablagerungsverhalten von Schwermetallaerosolen über eine längere Strecke.
Aufbau und Ablauf	1 NMC-Batteriemodul (ca. 4 kWh)
	Durchführung am Versuchsplatz des Vorgängerprojektes (Stollen «B» und Brandstollen) mit klar definiertem Luftstrom (1-2 m/s) und vorgegebener Entlüftungsstrecke via Brandstollen ins Freie
	Montage von mehreren, geneigt (45° Richtung Experiment) exponierten Proben-Kollektorblechen (Inox 1.4401) im Entrauchungsstollen auf 3.0 m Höhe im Abstand von ca. 50, 100 und 150 m vom Experiment
	Installation diverser Messgeräte für kontinuierliche Messungen (Bsp. Temperatur, Spannungsänderungen in Batteriemodul, Filmaufnahmen)
	Mechanische Beschädigung aller Batteriezellen mit sprengtechnischer Methode (vgl. Abbildung 5)
	Kompletter Abbrand des Batteriemoduls ohne Lösversuche (→ ungehinderte Fracht und Ablagerung der Brandemissionen entlang der Messstrecke)

<sup>1</sup> Das Batteriemodul durfte nicht direkt mit Wasser benetzt werden, da ansonsten die Entstehung von Wasserstoff zu einer Explosionsgefahr hätte führen können.

**Tabelle 11 Versuchsszenario mit Batteriemodul 3**

Aspekt	Beschreibung
	Wärmebildkamera-Aufnahmen (WBK) durch Feuerwehrexperthen von Schutz & Rettung Zürich (SRZ)
	Entlüftung des Versuchsraumes nach Versuchsende unter Einhaltung der Anforderungen an Sicherheit und Umwelt
Probeentnahme und Analysemethoden	gemäss Batteriemodul 1 (Wischproben und Brandrussproben), vgl. Tabelle 9

### 3.4.4 Materialanalyse

**Tabelle 12 Versuchsszenario mit Batteriemodul 4**

Aspekt	Beschreibung
Ziele	Materialcharakterisierung der einzelnen Bestandteile eines NMC-Batteriemoduls (Batteriezellen, Kabel, Elektronik, Isolation, Gehäuse etc.)
	Abgrenzung zwischen «zellchemischen» und «weiteren» Brandfolgeprodukten (Bsp. Cl, Br)
Aufbau und Ablauf	1 NMC-Batteriemodul (ca. 4 kWh)
	Untersuchung eines Batteriemoduls ohne Zerstörung der Batteriezellen
	Zerstörungsfreie Materialanalyse der weiteren Modulbestandteile mittels ED-XRF

## 3.5 Sicherheit und Umwelt

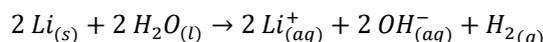
Das Experiment wurde unter Berücksichtigung der geltenden Sicherheits- und Umweltschutzvorgaben sowie in Anlehnung an einschlägige internationale Standards durchgeführt (Bsp. ISO 45001). Sämtliche Versuche im VSH wurden zudem vorgängig mit dem zuständigen Amt für Umwelt des Kantons St. Gallen besprochen. Die von den Versuchen ausgehenden kinetischen, thermischen und chemischen Gefährdungen für das Versuchspersonal wurden mit angemessenen Sicherheitsvorkehrungen eliminiert.

### Explosionsschutz bezüglich Pyrolysegase

Es musste davon ausgegangen werden, dass zu Beginn des thermischen Durchgehens der Batteriemodule zündfähige Gasgemische austreten, ohne dass vorerst eine dauerhafte, effektive Zündung der Gase stattfindet. In dieser Phase wäre eine Akkumulation zündfähiger Gasgemische möglich gewesen, die bei einer nachfolgenden Zündung zu einer Verpuffung geführt hätte. Um dieses Ereignis wirksam zu verhindern, wurde während der Versuche jeweils eine Funkenstrecke in unmittelbarer Nähe zum Batteriemodul betrieben, die austretende zündfähige Gasgemische laufend und damit noch vor einer kritischen Akkumulation gezündet hätte. Zudem durften brennende Batteriemodule im unbelüfteten und abgeschlossenen Versuchsraum nicht mit Wasser gekühlt werden, da dies ein Austreten von nicht direkt abbrennenden Pyrolysegasen begünstigt hätte.

### Explosionsschutz bezüglich Wasserstoff (Knallgas)

Werden nicht vollständig abreagierte Batteriemodule mit Wasser beaufschlagt, kann das darin verbliebene Lithium zusammen mit Wasser zu gasförmigem Wasserstoff reagieren.



Von gasförmigem Wasserstoff ( $H_2$ ) geht eine hohe Explosionsgefahr<sup>2</sup> aus, weshalb eine Akkumulation in geschlossenen Räumlichkeiten ohne mechanische Lüftung aus Sicherheitsgründen unbedingt ausgeschlossen werden musste. In der Stollenanlage des VSH durften aus diesem Grund keine brennenden Batteriemodule direktem Kontakt mit Wasser ausgesetzt werden.

### **Abluftreinigung**

Während des Experiments wurden grössere Schadstoffmengen in die Umgebungsluft des Versuchsraumes abgegeben. Bei den Versuchen im Stollen «A» wurde während des Abbrandes der Batteriemodule die Umgebungsluft aus experimentellen Gründen nicht ausgetauscht. Nach der Durchführung der Versuche wurde die kontaminierte Luft mittels Gebläse und Lutte abgesaugt, über ein geeignetes Filtersystem gereinigt und schliesslich ins Freie geleitet (vgl. Abbildung 7). Das Gebläse wies eine Nennleistung von  $4'000 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$  und ein vierstufiges Filtersystem auf. Die ersten drei Stufen entfernen Partikel (fest, flüssig), der nachgelagerte Aktivkohlefilter auch gasförmige Substanzen. Bis auf tiefsiedende Verunreinigungen wie CO oder  $\text{CO}_2$  konnten somit alle Schadstoffe zuverlässig aus der Abluft entfernt werden.

Nach der Durchführung der Versuche im Stollen «A» wurde der Versuchsraum mit Frischluft gespült (vgl. Szenariobeschreibungen in Tabelle 9 und Tabelle 10). Sobald keine Rauchschwaden mehr im Versuchsbereich sichtbar waren, wurde eine HF-Messung (Dräger-Röhrchen) durch einen Feuerwehrexperthen von Schutz & Rettung Zürich mit einer für solche Einsätze angemessenen Schutzausrüstung (luftunabhängiger Atemschutz, Handschuhe etc.) durchgeführt. Für eine Freigabe des Versuchsraumes durfte die HF-Konzentration den MAK-Wert (8 Stunden-Exposition) von  $1 \text{ mlm}^{-3}$  oder  $0.83 \text{ mgm}^{-3}$  resp. den Kurzzeitexpositionswert (maximal 4 x 15 Minuten pro Tag mit mindestens 1 h Unterbruch) von  $2 \text{ mlm}^{-3}$  oder  $1.66 \text{ mgm}^{-3}$  nicht überschreiten. Die erhobenen Messresultate wurden anschliessend durch einen Chemiefachberater bewertet; nach positiver Beurteilung konnte der Versuchsraum für die Probenahmen freigegeben werden.

Während des Versuchs im Stollen «B» wurde der Versuchsraum laufend mit einer konstanten Luftströmung von ca. 1.5 m/s mechanisch belüftet. Aufgrund des sehr grossen Volumenstroms sowie der Tatsache, dass sich dadurch bereits im Tunnel starke Verdünnungseffekte ergaben, wurde eine Abluftreinigung an diesem Standort als nicht verhältnismässig erachtet.

### **Ablagerungskontaminationen (HF)**

Es war davon auszugehen, dass erhebliche Emissionen an Fluorwasserstoff, in Verbindung mit Feuchtigkeit, zu HF-belasteten Niederschlägen auf den umgebenden Oberflächen führen würden. Werden die Niederschläge chemisch nicht vollständig umgesetzt (z.B. durch vorhandene Basen), wäre eine fortlaufende Abgabe von HF an die Umgebungsluft auch nach Beseitigung der gasförmigen Kontaminationen im Versuchsraum möglich gewesen. Auch chemisch gebundenes HF (als Fluorid-Salz) kann unter Umständen (z.B. in saurer Umgebung) freies HF an die Umgebungsluft abgeben. Diese sicherheitsrelevanten Effekte sind vor allem bei grossen betroffenen Flächen von Bedeutung und mussten unbedingt in die Betrachtungen miteinbezogen werden. Sofern aufgrund eines solchen Effektes der MAK-Wert resp. der KZGW-Wert nicht unterschritten würden, wäre eine behelfsmässige Reinigung des Versuchsraumes mit Wasser geplant gewesen (Wände herunterwaschen).

### **Wasserkontamination**

Während des Experiments fielen entweder versuchsbedingt oder aufgrund von Reinigungsarbeiten grosse Mengen kontaminiertes Wasser an (vgl. Szenariobeschreibung in Tabelle 10). Im Anschluss an die Versuche wurden zudem abreagierte Batteriemodule zur

<sup>2</sup> Wasserstoff ist unter atmosphärischem Druck bei einem Volumenanteil zwischen 4 % und 77 % explosiv. Dieses sehr breite Mischungsverhältnis macht Wasserstoffakkumulationen gerade in unterirdischen Infrastrukturen sehr gefährlich.

Sicherheit bzw. für weitergehende Analysen mit Wasser geflutet. Das gesamte kontaminierte Wasser wurde zentral in einem Kunststofftank gesammelt und zu einem späteren Zeitpunkt einem zertifizierten Entsorger übergeben.

### **Dekontamination Versuchsraum (Russ und andere Emissionen)**

Insbesondere der Stollen «A» war nach der Durchführung der Versuche mit starken Ablagerungen (Russ, Fluoride, Metallaerosole, usw.) belastet. Die Reinigung des Versuchsraumes wurde von einer spezialisierten Firma für Brandschadensanierungen mit professioneller Ausrüstung innert weniger Tage nach Versuchsende durchgeführt. Die Wirksamkeit der Reinigungsmethode (gleich wie bei Brandschadensanierungen in Tunneln) wurde zum Schluss mit Vergleichsmessungen überprüft.

### **Sicherheitszonen**

Während den Versuchen wurden vier verschiedene Sicherheitszonen analog zur Zonenbildung von Einsatzkräften bei besonderen Ereignissen definiert (vgl. Tabelle 13). Alle Personen in den Arbeitsbereichen mussten permanent geeignete, signalfarbene Arbeitskleidung, Sicherheitsschuhe (min. S3) und einen Helm tragen. Schutzbrille, Schutzhandschuhe und Gehörschutz mussten jederzeit bei sich getragen und wenn angezeigt, eingesetzt werden.

**Tabelle 13** Sicherheitszonen während des Experiments

<b>Zone</b>	<b>Beschreibung</b>
0	Bereiche, die direkt oder indirekt von Splintern getroffen werden können, die grosser Hitze oder Feuer ausgesetzt sein können oder, die stark konzentrierte Emissionen (Rauch) des Versuchs enthalten können. Während der Versuchsdurchführung dürfen sich keine Personen darin aufhalten. Während in der Zone 0 Sprengstoff vorhanden ist, ist der Zugang zur Zone 0 nur für Sprengberechtigte gestattet. Ausnahmen sind durch den Sprengverantwortlichen direkt zu begleiten.
1	Bereiche, die Emissionen (Rauch) der Versuche enthalten können, dürfen bis zur abschliessenden Freigabe durch die Versuchsleitung nur mit Atemschutz (ABEK-P), Schutzanzug und Handschuhen betreten werden.
2	Bereiche, die durch die Versuche mit Schalldruck affektiert werden können aber sonst keinen anderen Gefährdungen ausgesetzt sind. Während der Versuchsdurchführung dürfen sich nur Personen darin befinden die durch die Versuchsleitung autorisiert und entsprechend instruiert wurden. Die Personen müssen mit Gehörschutzkapseln ausgerüstet sein.
Deko-Zone	Klar definierter und direkt an den Versuchsraum angrenzender Bereich, in dem sämtliche kontaminierte oder potenziell kontaminierte Schutzausrüstung und Geräte abgelegt und die Kleidung gewechselt werden kann.

### **Entsorgung von havarierten Batteriemodulen**

Nach der Versuchsdurchführung wurden die abreagierten Batteriemodule auf verbleibendes reaktives Material untersucht. Diese Prüfung wurde unter schwerer Schutzausrüstung (Atemschutzmaske, Helm, schwerem Spritzschutzanzug (abgeklebt), schweren Handschuhen) durchgeführt. Während der Untersuchung durften die Batteriemodule nur von der Seite her betrachtet werden (Gefahr durch Ansprechen der oberseitig abgebrachten Überdruckentlastungen). Wenn in den Batteriemodulen kein reaktives Material mehr festgestellt werden konnte, wurden diese in einer Kunststoffbox eingeschlossen und nachfolgend die Kunststoffboxen mit Wasser gefüllt. Nach mindestens zwei Tagen Ruhezeit unter Wasser, konnten die Überreste der Batteriemodule trockengelegt und einer ordentlichen Verbrennungsanlage zugeführt werden. Wäre in einem Batteriemodul noch reaktives Material festgestellt worden, dann hätte dieses im direkten Anschluss unschädlich gemacht werden müssen, wobei die Versuchsleitung situativ über das angemessene Vorgehen entschieden hätte (Bsp. Penetration mit Stift, Beschuss, Reaktion mit Wasser, Verbrennen). Damit Gefährdungen durch die Unschädlichmachung mit geeigneten Massnahmen vorgängig eliminiert werden konnten, war ein ausgewiesener Sicherheitsexperte permanent Teil des Versuchsteams.

## 4 Resultate

### 4.1 Voranalysen

#### Ausgangslage und Ziele

Am 11. Juli 2019, fast zwei Jahre nach dem vorherigen Experiment im Herbst 2017, wurde der ehemalige Testraum auf mögliche Schadstoffverunreinigungen aus den damaligen Batterietests untersucht. Ziel dieser Analysen war, das Vorhandensein bestimmter Schadstoffe nachzuweisen, die auch zwei Jahre nach ihrer Emission kausal auf das Experiment zurückgeführt werden konnten. Die Probenahmestellen wurden aufgrund ihrer Exposition gegenüber den früheren Batterietests ausgewählt: Alle Material- und Wischproben (MP bzw. WP) wurden von Stellen an der Decke des Versuchstunnels bzw. auf dem Gehäuse des Rauchabzugsventilators entnommen, die alle direkt dem Rauch ausgesetzt waren (vgl. Abbildung 12).

Der untersuchte Tunnelabschnitt wurde nach den damaligen Versuchen nicht dekontaminiert. Es ist hierbei anzumerken, dass innerhalb der relativ langen Zeitspanne von fast zwei Jahren zwischen Emission und Messung das Testgelände zwar für den gewöhnlichen VSH-Betrieb genutzt wurde, dass aber keine anderen Ereignisse mit Schwermetallemissionen stattfanden.

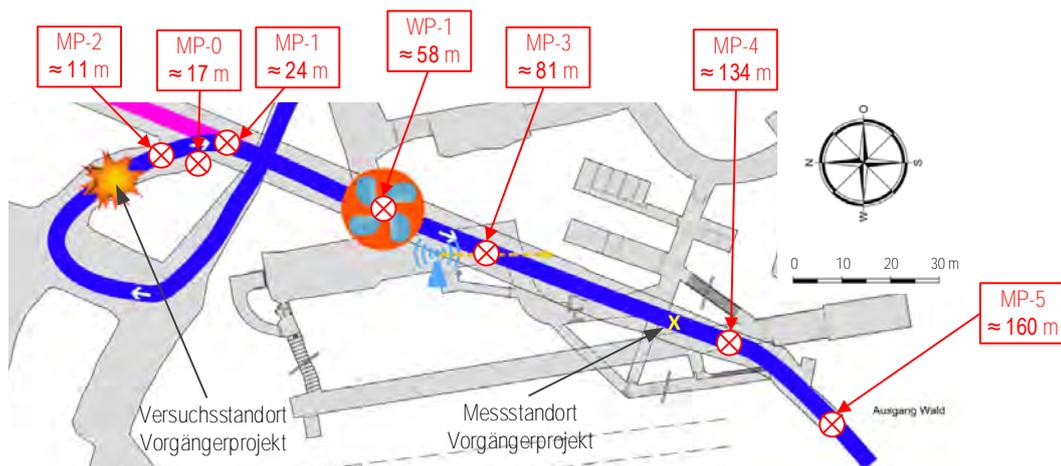


Abbildung 12 Probenahmeplan Empa vom 11. Juli 2019

#### Konzept und Methoden

Zum einen wurden die Voruntersuchungen mit einer Messmethode für den orientierenden, halbquantitativen Nachweis der Schwermetalle Co, Ni und Mn (Röntgenfluoreszenzspektrometrie) durchgeführt, die sowohl vor Ort als auch im Labor eingesetzt werden konnte. Zum anderen wurden geeignete Proben entnommen, um das Vorhandensein von wasserlöslichen Lithium- und Fluoridverbindungen im Labor mittels Kapillarelektrophorese (CE) quantitativ zu analysieren. Nach der Probeentnahme an den Stellen gemäss Abbildung 12 wurden die folgenden Analysemethoden angewandt (vgl. auch Anhang I):

- Röntgenfluoreszenzspektrometrie (ED-XRF): Orientierende, semiquantitative Analyse der Trockenproben (Brandrussrückstände) zur Gehaltsbestimmung von Ni, Co und Mn (sowie anderen Schwermetallen). Die Analysen erfolgen im Labor nach Aufbereitung des Probenmaterials.
- Kapillarelektrophorese (CE): Quantitative Laboranalyse der Trocken- und Wischproben im wässrigen Extrakt zur Bestimmung der wasserlöslichen Anionen- und Kationen-Konzentrationen (u.a. Lithium und Fluorid).



Abbildung 13 Ehemaliges Testgelände mit schwarzen Brandrussresten (links) und Probenahmestelle WP-1 am Gehäuse des Entrauchungsventilators (rechts)

## Resultate

**Tabelle 14 Anionen-Beaufschlagungen (wässriger Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$**

Proben-Nr.	Chlorid $\text{Cl}^-$	Bromid $\text{Br}^-$	Fluorid $\text{F}^-$	Sulfat $\text{SO}_4^{2-}$	Nitrat $\text{NO}_3^-$	Formiat $\text{HCOO}^-$	Acetat $\text{CH}_3\text{COO}^-$
WP-1	0.7	n.n.	n.n.	420	n.n.	n.n.	n.n.

n.n. = nicht nachweisbar ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Angaben in () = Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze

**Tabelle 15 Kationen-Beaufschlagungen (wässriger Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$**

Proben-Nr.	Ammonium $\text{NH}_4^+$	Kalium $\text{K}^+$	Natrium $\text{Na}^+$	Lithium $\text{Li}^+$	Magnesium $\text{Mg}^{2+}$	Calcium $\text{Ca}^{2+}$
WP-1	n.n.	7.9	4.5	(0.1)	12	150

n.n. = nicht nachweisbar ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) Angaben in () = Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze

**Tabelle 16 Anionen-Gehalte in Massen-% (bezogen auf die trockene Festsubstanz)**

Proben-Nr.	Chlorid $\text{Cl}^-$	Bromid $\text{Br}^-$	Fluorid $\text{F}^-$	Sulfat $\text{SO}_4^{2-}$	Nitrat $\text{NO}_3^-$	Formiat $\text{HCOO}^-$	Acetat $\text{CH}_3\text{COO}^-$
MP-1	n.n.	n.n.	(0.01)	4.6	0.07	n.n.	n.n.
MP-2	n.n.	n.n.	(0.01)	0.72	0.05	n.n.	n.n.
MP-3	n.n.	n.n.	n.n.	4.4	n.n.	n.n.	n.n.
MP-4	0.02	n.n.	n.n.	5.3	0.09	n.n.	n.n.
MP-5	0.02	n.n.	n.n.	3.0	0.06	n.n.	n.n.
MP-0	n.n.	n.n.	n.n.	2.4	0.12	n.n.	n.n.

n.n. = nicht nachweisbar ( $<0.01 - 0.001$  Massen-%); Angaben in () = Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze

**Tabelle 17 Kationen-Gehalte in Massen-% (bezogen auf die trockene Festsubstanz)**

Proben-Nr.	Ammonium $\text{NH}_4^+$	Kalium $\text{K}^+$	Natrium $\text{Na}^+$	Lithium $\text{Li}^+$	Magnesium $\text{Mg}^{2+}$	Calcium $\text{Ca}^{2+}$
MP-1	n.n.	0.07	0.15	(0.001)	0.07	1.2
MP-2	n.n.	0.50	0.18	(0.001)	(0.002)	(0.01)

**Tabelle 17 Kationen-Gehalte in Massen-% (bezogen auf die trockene Festsubstanz)**

Proben-Nr.	Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Kalium K <sup>+</sup>	Natrium Na <sup>+</sup>	Lithium Li <sup>+</sup>	Magnesium Mg <sup>2+</sup>	Calcium Ca <sup>2+</sup>
MP-3	0.02	0.86	0.03	n.n.	0.04	1.1
MP-4	n.n.	0.19	0.05	n.n.	0.51	1.2
MP-5	n.n.	0.33	0.06	n.n.	0.02	1.0
MP-0	n.n.	0.15	0.04	n.n.	0.01	1.0

*n.n. = nicht nachweisbar (<0.01 – 0.001 Massen-%); Angaben in () = Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze*

**Tabelle 18 Orientierende chemische Analyse (Feststoffanalytik ED-XRF, Brand-russproben) Gehaltsangaben in Massen-% (Mittelwerte 3-fach-Messung ± Standardabweichung)**

Element	MP-1	MP-2	MP-3	MP-4	MP-5	MP-0	WP-1
Al	0.9 ± 0.1	1.3 ± 0.1	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.3 ± 0.1	0.8 ± 0.1
Ca	17 ± 2	21 ± 2	25 ± 2	15 ± 2	21 ± 2	29 ± 2	14 ± 2
Cl	n.n.	n.n.	(0.04)	(0.04)	(0.04)	n.n.	n.n.
Co	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.22 ± 0.01	n.n.	(0.01)	n.n.	0.15 ± 0.01
Cu	(0.01)	(0.03)	n.n.	(0.01)	(0.01)	(0.01)	(0.02)
Fe	0.7 ± 0.1	1.4 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	0.9 ± 0.1
K	1.7 ± 0.1	2.8 ± 0.1	2.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.8 ± 0.1	1.1 ± 0.1	0.5 ± 0.1
Mn	0.11 ± 0.01	0.19 ± 0.01	0.26 ± 0.01	(0.01)	0.03 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.17 ± 0.01
Ni	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.22 ± 0.01	(0.01)	(0.01)	(0.01)	0.15 ± 0.01
P	0.12 ± 0.03	0.24 ± 0.03	0.49 ± 0.03	0.09 ± 0.03	0.51 ± 0.03	0.28 ± 0.03	(0.04)
Pb	(0.01)	(0.01)	(0.01)	(0.02)	0.05 ± 0.01	(0.01)	0.08 ± 0.01
S	10.4 ± 0.2	0.7 ± 0.1	6.4 ± 0.2	12.0 ± 0.2	3.1 ± 0.2	2.5 ± 0.2	1.1 ± 0.2
Si	3.3 ± 0.2	5.8 ± 0.2	4.0 ± 0.2	3.5 ± 0.2	5.2 ± 0.2	4.8 ± 0.2	2.5 ± 0.2
Zn	(0.02)	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.10 ± 0.01	(0.02)	(0.02)

*n.n. = nicht nachweisbar (<0.01 – 0.001 Massen-%); Angaben in () = Gehalte im Bereich der Nachweisgrenze*

### Gesamtbeurteilung

Die Substanzen Kobalt, Nickel und Mangan, die im vorangegangenen Experiment mittels Aerosolanalysen in hohen Konzentrationen gemessen wurden, konnten nun an einigen Entnahmestellen immer noch in deutlichen Mengen nachgewiesen werden (vgl. MP-1, MP-2 und MP-3 sowie WP-1 in Tabelle 18). Die Entnahmestellen dieser Proben lagen dem eigentlichen Versuchsort am nächsten und waren daher bei den Batterietests den grössten Rauchgasemissionen ausgesetzt. In den Materialproben MP-0 (Blindprobe) sowie MP-4 und MP-5, deren Probenahmestellen während des Experiments den geringsten Rauchgasemissionen ausgesetzt waren (Seitenwand bzw. Austrittsbereich), konnten die oben genannten Stoffe nicht nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 12).

Die Korrelation der Massenanteile der oben genannten Substanzen und die Tatsache, dass die Substanzen an weniger exponierten Stellen nicht nachgewiesen werden konnten, legt zwei Schlussfolgerungen nahe: (I) dass die Rückstände aus demselben Ereignis stammen und (II) dass sie auf die Versuchsreihe vom November 2017 zurückgeführt werden können. Seitdem haben in diesem Tunnelabschnitt zwar weitere Aktivitäten und auch Brandversuche stattgefunden, aber es wurden keine Schwermetallemissionen mehr freigesetzt. Die Tatsache, dass die Rückstände auch nach 19 Monaten in dem betroffenen Tunnelabschnitt noch deutlich nachweisbar sind, unterstreicht das Fortbestehen, d.h. die Persistenz dieser spezifischen Emissionen aus einem BEV-Brand.

## 4.2 Infrastruktur und Schutzausrüstung (Batteriemodul 1)

### Schadstoffanalysen

Die folgenden Analysen basieren auf den Messungen, die am 10. Dezember 2019 anhand des definierten Versuchsszenarios von Kapitel 3.4.1 und gemäss dem in Anhang II dokumentierten Analysekonzept im Versuchsstollen Hagerbach durchgeführt wurden. Das erläuternde Probenverzeichnis ist in Anhang III.1 vollständig aufgeführt.

**Tabelle 19 Anionen-Beaufschlagungen (wässriger Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$**

Proben-Nr.	Chlorid $\text{Cl}^-$	Bromid $\text{Br}^-$	Fluorid $\text{F}^-$	Sulfat $\text{SO}_4^{2-}$	Nitrat $\text{NO}_3^-$	Phosphat $\text{PO}_4^{3-}$	Formiat $\text{HCOO}^-$	Acetat $\text{CH}_3\text{COO}^-$
<b>Inox-Kollektorbleche</b>								
A-11	5.2	n.n.	40	4.6	n.n.	2.1	n.n.	n.n.
B-11	6.4	n.n.	52	6.0	n.n.	2.2	n.n.	n.n.
<b>Textilproben</b>								
T-11	5.3	n.n.	46	6.0	n.n.	0.8	n.n.	n.n.
TR-11	1.5	n.n.	n.n.	1.3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
<b>Blindproben</b>								
OW-K	0.1	n.n.	n.n.	6.7	0.4	n.n.	0.1	n.n.
OT-K	1.5	n.n.	n.n.	1.2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

*n.n. = nicht nachweisbar ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )*

**Tabelle 20 Kationen-Beaufschlagungen (wässriger Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$**

Proben-Nr.	Ammonium $\text{NH}_4^+$	Kalium $\text{K}^+$	Natrium $\text{Na}^+$	Lithium $\text{Li}^+$	Magnesium $\text{Mg}^{2+}$	Calcium $\text{Ca}^{2+}$
<b>Inox-Kollektorbleche</b>						
A-11	n.n.	n.n.	3.2	17	n.n.	n.n.
B-11	n.n.	n.n.	3.6	23	n.n.	n.n.
<b>Textilproben</b>						
T-11	n.n.	n.n.	1.1	9.0	n.n.	n.n.
TR-11	n.n.	n.n.	0.9	n.n.	5.9	35
<b>Blindproben</b>						
OW-K	n.n.	n.n.	1.2	n.n.	n.n.	n.n.
OT-K	n.n.	n.n.	3.0	n.n.	0.2	0.3

*n.n. = nicht nachweisbar ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )*

**Tabelle 21 Co-, Ni-, Mn- und Li-Beaufschlagungen (Salpetersäure-Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$**

Proben-Nr.	Kobalt Co	Nickel Ni	Mangan Mn	Lithium Li
<b>Inox-Kollektorbleche</b>				
A-12	233	234	221	42
B-12	155	156	148	30

**Tabelle 21 Co-, Ni-, Mn- und Li-Beaufschlagungen (Salpetersäure-Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$** 

Proben-Nr.	Kobalt Co	Nickel Ni	Mangan Mn	Lithium Li
<b>Textilproben</b>				
T-12	400	400	380	70
TR-12	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5
<b>Blindproben</b>				
0W-A	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5
0T-A	0.5	0.5	0.5	<0.5

**Tabelle 22 Beaufschlagungen mit organischen Schadstoffen (n-Hexan-Extrakt, Oberflächen-Wischproben)**

Proben-Nr.	PAK $\Sigma$ 16 EPA-PAH $\mu\text{g}/\text{m}^2$	PCB $\Sigma$ 6 cong. Ballschmitter x 5 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	PCDD/PCDF $\Sigma$ I-TEQ $\text{ng}/\text{m}^2$
<b>Inox-Kollektorbleche</b>			
A-13	269	--	--
B-13	304	--	--
A-14	--	0.22	6.3
B-14	--	9.6	8.4
<b>Textilproben</b>			
T-13	120	--	--
TR-13	5.6	--	--
T-14	--	0.26	3.4
TR-14	--	0.17	0.3
<b>Blindproben</b>			
0W-O1	6.0	--	--
0T-O1	6.0	--	--
0W-O2	--	0.36	0.2
0T-O2	--	0.80	0.2

**Tabelle 23 Brandruss-Kontamination (Beaufschlagungsmengen und Feststoffanalytik, Brandrussproben)**

Proben-Nr.	Menge	Zusammensetzung *
A-2b	17 $\text{g}/\text{m}^2$	Hauptbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Co, Ni, Mn (je 18-20 Gew.-%)</li> <li>• (20-25 Gew.-%)</li> </ul>
Stollen A Kollektorbleche Inox Höhe = 3.5 m		Nebenbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Al, C, F, P (je 1-5 Gew.-%)</li> <li>• Si, Ca, S, Cl (&lt;1 Gew.-%)</li> </ul>

**Tabelle 23 Brandruss-Kontamination (Beaufschlagungsmengen und Feststoffanalytik, Brandrussproben)**

Proben-Nr.	Menge	Zusammensetzung *
B-2b	20 g/m <sup>2</sup>	Hauptbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Co, Ni, Mn (je 18-20 Gew.-%)</li> <li>• O (20-25 Gew.-%)</li> </ul> Nebenbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Al, C, F, P (je 1-5 Gew.-%)</li> <li>• Si, Ca, S, Cl (&lt;1 Gew.-%)</li> </ul>
Stollen A Kollektorbleche Inox Höhe = 1.5 m		
* Resultate REM-EDX-Analysen		



**Abbildung 14 Anordnung der Schutzausrüstung (links) sowie der Kollektorbleche (rechts)**

**Tabelle 24 Orientierende chemische Analyse (Feststoffanalytik ED-XRF, Brandrussproben) Gehaltsangaben in Massen-% (Mittelwerte 3-fach-Messung ± Standardabweichung aufgerundet)**

Stoff	A-2b	B-2b	Stoff	A-2b	B-2b
Ag	<0.01	<0.01	Ni	18.1 ± 0.5	18.6 ± 0.5
Al	1.4 ± 0.2	1.2 ± 0.2	P	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.1
As	<0.01	<0.01	Pb	<0.01	<0.01
Au	<0.01	<0.01	Pd	<0.01	<0.01
Ba	<0.05	<0.05	Rb	<0.01	<0.01
Bi	<0.01	<0.01	Re	<0.01	<0.01
Ca	0.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	S	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1
Cd	<0.01	<0.01	Sb	<0.01	<0.01
Cl	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.1	Se	<0.01	<0.01
Co	18.2 ± 0.5	18.6 ± 0.5	Si	<0.5	<0.5
Cr	<0.05	<0.05	Sn	<0.01	<0.01
Cu	<0.05	<0.05	Sr	<0.01	<0.01
Fe	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	Ta	<0.01	<0.01
Hf	<0.01	<0.01	Th	<0.01	<0.01
Hg	<0.1	<0.1	Ti	<0.1	<0.1
K	<0.1	<0.1	U	<0.01	<0.01
Mg	<1	<1	V	<0.1	<0.1
Mn	19.6 ± 0.5	19.9 ± 0.5	W	<0.05	<0.05

**Tabelle 24 Orientierende chemische Analyse (Feststoffanalytik ED-XRF, Brandrussproben) Gehaltsangaben in Massen-% (Mittelwerte 3-fach-Messung ± Standardabweichung aufgerundet)**

Stoff	A-2b	B-2b	Stoff	A-2b	B-2b
Mo	<0.01	<0.01	Zn	<0.1	<0.1
Nb	<0.01	<0.01	Zr	<0.1	<0.1

**Tabelle 25 Co-, Ni-, Mn- und Li-Gehalte (Salpetersäure-Extrakt, Brandrussproben) in Massen-%**

Proben-Nr.	Kobalt Co	Nickel Ni	Mangan Mn	Lithium Li
<b>Inox-Kollektorbleche</b>				
A-2b	17.7	17.4	17.1	3.2
B-2b	17.7	17.3	17.1	3.2

### Korrosionsmonitoring

Zwecks Analyse des korrosionsbedingten Materialabtrages wurden die verschiedenen Materialien zum ersten Mal nach drei Tagen während Umgebungsbedingungen und zum zweiten Mal nach einem bzw. drei Monaten nach einer Lagerung bei 90% relativer Luftfeuchtigkeit untersucht.

**Tabelle 26 Korrosionsbedingter Materialabtrag**

Material	Massenverlust in g/m <sup>2</sup>		
	nach 3 Tagen (Lagerung Stollen A)	nach 1 Monat (Lagerung 90 % rLF)	nach 3 Monaten (Lagerung 90 % rLF)
Unlegierter Stahl	4.3	23	37
Zink	1.8	4.4	7.3
Kupfer	0.3	0.4	0.4
Aluminium	0.2	0.2	0.2
Nichtrostender Stahl	0.1	0.1	0.1

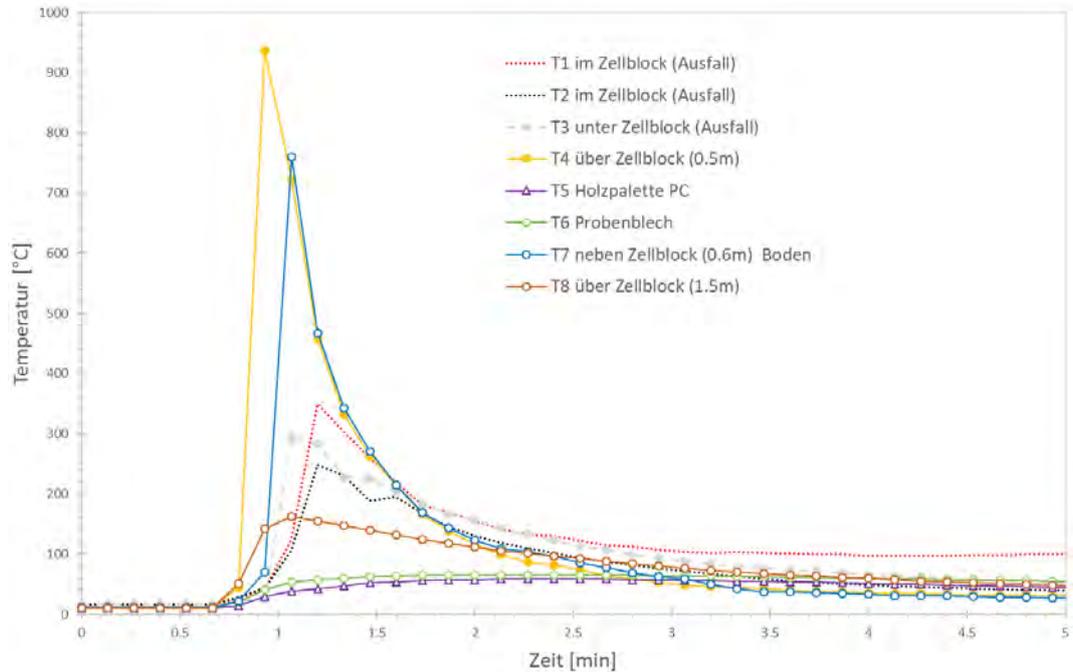


**Abbildung 15 Korrosions-Monitoring im Stollen «A»**

### Messung der Brandtemperaturen

Die höchsten gemessenen Temperaturen traten an den Messpunkten T4 (>900 °C, 0.4 m über dem Zellblock) und T7 (>700 °C, 0.6 m neben dem Zellblock, am Boden) auf. Auf einer Höhe von 1.5 m über dem Zellblock war der höchste Wert noch 163 °C (T8). Die

höchsten Temperaturen in einiger Entfernung zum Zellblock lagen bei 59 °C (T5, Holzpalette mit PC-Gehäuse) bzw. 65 °C (T6, Probenblech). Die Kabel der Thermoelemente T1, T2 und T3 wurden durch die seitlich austretenden Flammen beschädigt.



**Abbildung 16** Verlauf der Brandtemperaturen im Szenario «Infrastruktur und Schutz-ausrüstung»

#### Befunde an Elektronik-Testvorrichtung

Alle Leiterplatten und der SIR Einzel-Messrechen waren nach dem Brandversuch mit einer dicken Schicht Brandruss bedeckt (vgl. Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19). Die Isolationsmessungen waren jedoch in Ordnung, d.h. der Brandruss verursachte keine leitenden Pfade zwischen den Fingern der Messrechen. Die Analyse mit SEM / EDX (Hitachi TM3030 plus) zeigt vor allem die Schwermetalle der Kathode der Batteriezellen Nickel, Kobalt und Mangan sowie grössere Mengen an Kohlenstoff und Sauerstoff.



**Abbildung 17** PC Gehäuse (links) und Leiterplatten (rechts) nach Brandversuch

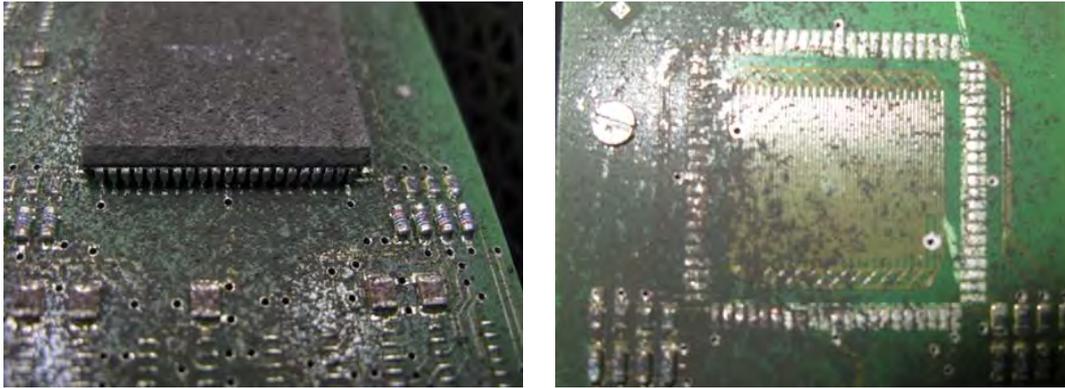


Abbildung 18 IC auf Leiterplatte (links) und freiliegender SIR Einzel-Messrechen (rechts) nach Brandversuch

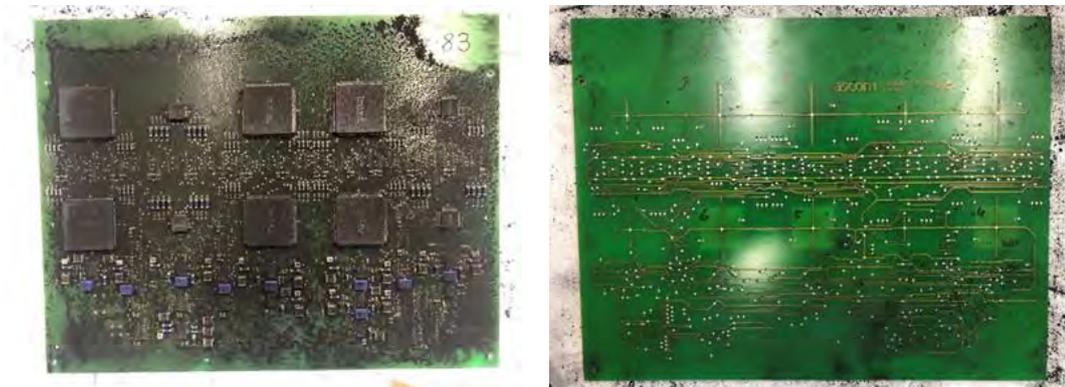


Abbildung 19 Leiterplatte Oberseite (links) und Unterseite (rechts) nach Brandversuch



Abbildung 20 SEM Aufnahmen von Ablagerungen auf den Leiterplatten, EDX Elementanalyse Nickel (links) Mangan (Mitte) und Kobalt (rechts)

### Gesamtbeurteilung

#### Brandruss – Beaufschlagungsmengen und Zusammensetzung

Die Beaufschlagungsmengen mit Brandruss liegen im Versuchsstollen bei rund 20 g/m<sup>2</sup>, wobei die Brandrussablagerungen aus je rund 18-20 Massen-% der Elemente Co, Ni, Mn und O sowie je rund 1-5 Massen-% der Elemente Al, C, F und P bestehen. Im Salpetersäure-Extrakt der Brandrussablagerungen können je rund 17-18 Massen-% der Elemente Co, Ni und Mn sowie rund 3 Massen-% des Elementes Li nachgewiesen werden.

#### Infrastruktur – Kontaminationen

Bezüglich toxikologischer und korrosionschemischer Hinsicht relevanten anorganischen Schadstoffen können auf den Kollektorbleichen (45° geneigte Oberflächen) sehr hohe Beaufschlagungen der Elemente Co, Ni und Mn von je rund 150-250 µg/cm<sup>2</sup>, des Elementes Li von rund 30-40 µg/cm<sup>2</sup> und wasserlöslicher Fluoride von rund 40-50 µg/cm<sup>2</sup> nachgewiesen werden, welche die üblichen Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen um

Faktoren von bis rund 2'000 (Co, Ni), 500 (Mn), 400 (Li) bzw. 50 (Fluoride) übersteigen (vgl. Tabelle 42). Wasserlösliche Chloride und Bromide können nur in sehr geringen, in korrosionschemischer Hinsicht unbedeutenden Mengen  $\leq 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  nachgewiesen werden.

#### Textilien – Kontaminationen vor und nach Reinigung

An in toxikologischer Hinsicht relevanten organischen Schadstoffen können schwach erhöhte PAK-Beaufschlagungen von rund 250-300  $\mu\text{g}/\text{m}^2$  festgestellt werden, welche die üblichen Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen um Faktoren bis rund 3 bzw. 30 übersteigen (vgl. Tabelle 43). Die PCB- und PCDD/F-Beaufschlagungen von  $\leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^2$  (PCB) bzw.  $\leq 10 \text{ ng}/\text{m}^2$  (PCDD/F) liegen im Bereich üblicher Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen.

An in toxikologischer Hinsicht relevanten anorganischen Schadstoffen können auf den *kontaminierten* Textilien (horizontale Oberflächen) sehr hohe Beaufschlagungen der Elemente Co, Ni und Mn von je rund 400  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , des Elementes Li von rund 70  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  und wasserlöslicher Fluoride von rund 50  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  gemessen werden, welche die üblichen Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen um Faktoren von bis rund 4'000 (Co, Ni), 700 (Mn), 700 (Li) bzw. 50 (Fluoride) übersteigen (vgl. Tabelle 44). Wasserlösliche Chloride und Bromide können nur in sehr geringen, in korrosionschemischer Hinsicht unbedeutenden Mengen  $\leq 5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  nachgewiesen werden.

An in toxikologischer Hinsicht relevanten organischen Schadstoffen können auf den *kontaminierten* Textilien schwach erhöhte PAK-Beaufschlagungen von rund 300  $\mu\text{g}/\text{m}^2$  festgestellt werden, welche die üblichen Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen um den Faktor 1.2 leicht übersteigen (vgl. Tabelle 45). Die PCB- und PCDD/F-Beaufschlagungen von  $\leq 10 \mu\text{g}/\text{m}^2$  (PCB) bzw.  $\leq 10 \text{ ng}/\text{m}^2$  (PCDD/F) liegen im Bereich üblicher Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen.

Auf den *gereinigten* Textiloberflächen können die o.g. in toxikologischer Hinsicht relevanten anorganischen und organischen Schadstoffen nicht mehr bzw. in nur noch unbedeutenden Mengen nachgewiesen werden.

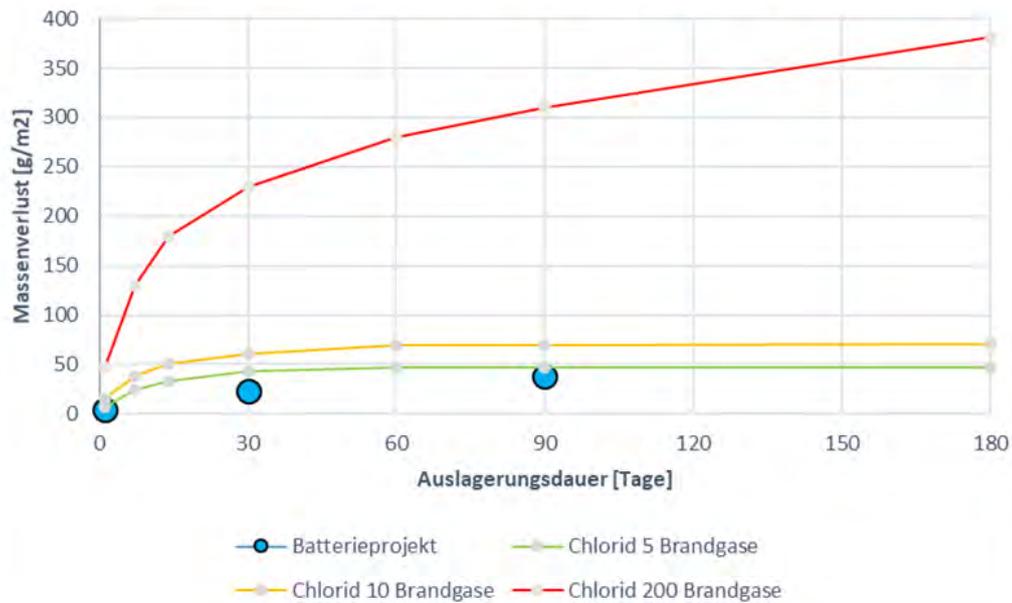
#### Infrastruktur – Korrosionsschädigung

Die Korrosivität der beim Batteriebrandversuch entstehenden Brandgaskondensate kann insgesamt als unbedeutend (vgl. [85]) bewertet und wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Versuchsmetalle "Stahl, unlegiert" und "Zink" zeigen nach 3 Monaten Exposition bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit einen nur sehr schwachen Materialabtrag, welcher vergleichbar ist mit demjenigen von mit einer Chlorid-Beaufschlagung von  $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  kontaminierten, bei 90 % rLF 3 Monate exponierten Metallen (vgl. Abbildung 21).
- An den Versuchsmetallen "Kupfer", "Aluminium" und "nichtrostender Stahl" ist nach 3 Monaten Exposition bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit kein korrosionsbedingter Materialabtrag feststellbar.

#### Elektronik – Schädigung

Alle Leiterplatten im PC-Gehäuse waren mit einer dicken, rissartigen Schicht bedeckt. Alle 42 SIR-Messrechen sowie der SIR Einzel-Messrechen zeigten einen hohen Isolationswiderstand ( $\infty$ ) bei Messungen mit 500 VDC. Die Analyse der Ablagerungen mittels SEM/EDX zeigte erhebliche Mengen von Nickel, Mangan, Kobalt und Sauerstoff sowie geringe Mengen an Aluminium. Der hohe Isolationswiderstand ist ein Hinweis darauf, dass die Schwermetalle als schlechtleitende Oxide vorliegen.



**Abbildung 21** Korrosionsbedingte Materialabträge an unlegiertem Stahl bei 90% rLF – Vergleich der Versuchsergebnisse mit Untersuchungsergebnissen der Empa bei Einwirkung von Chlorid-haltigen Brandgasen (Chlorid-Beaufschlagungen von 5, 10 und 200  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  ([85]))

### 4.3 Löschwasser (Batteriemodul 2)

#### Schadstoffanalysen

Die folgenden Analysen basieren auf den Messungen, die am 9. Dezember 2019 anhand des definierten Versuchsszenarios von Kapitel 3.4.2 und gemäss dem in Anhang II dokumentierten Analysekonzept im Versuchstollen Hagerbach durchgeführt wurden. Das erläuternde Probenverzeichnis ist in Anhang III.2 vollständig aufgeführt.

**Tabelle 27 Anionengehalte (Wasserproben) in mg/l**

Proben-Nr.	Chlorid $\text{Cl}^-$	Bromid $\text{Br}^-$	Fluorid $\text{F}^-$	Sulfat $\text{SO}_4^{2-}$	Nitrat $\text{NO}_3^-$	Phosphat $\text{PO}_4^{3-}$	Formiat $\text{HCOO}^-$	Acetat $\text{CH}_3\text{COO}^-$
<b>Löschwasser</b>								
W-41	2	n.n.	8	34	2	n.n.	n.n.	n.n.
<b>Kühlwasser</b>								
KW-41	22	n.n.	330	98	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
<b>Blindprobe (Brauchwasser)</b>								
0W-K	3	n.n.	n.n.	2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

*n.n. = nicht nachweisbar (<1 mg/l)*

**Tabelle 28 Kationengehalte (Wasserproben) in mg/l**

Proben-Nr.	Ammonium $\text{NH}_4^+$	Kalium $\text{K}^+$	Natrium $\text{Na}^+$	Lithium $\text{Li}^+$	Magnesium $\text{Mg}^{2+}$	Calcium $\text{Ca}^{2+}$
<b>Löschwasser</b>						
W-41	n.n.	n.n.	n.n.	4	11	67
<b>Kühlwasser</b>						
KW-41	16	59	52	1'600	n.n.	n.n.

**Tabelle 28 Kationengehalte (Wasserproben) in mg/l**

Proben-Nr.	Ammonium NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Kalium K <sup>+</sup>	Natrium Na <sup>+</sup>	Lithium Li <sup>+</sup>	Magnesium Mg <sup>2+</sup>	Calcium Ca <sup>2+</sup>
<b>Blindprobe (Brauchwasser)</b>						
OW-K	n.n.	n.n.	5	n.n.	n.n.	n.n.

*n.n. = nicht nachweisbar (<1 mg/l)*

**Tabelle 29 Co-, Ni-, Mn- und Li-Gehalte (Wasserproben, angesäuert) in mg/l**

Proben-Nr.	Kobalt Co	Nickel Ni	Mangan Mn	Lithium Li
<b>Löschwasser</b>				
W-42	36	36	36	7
<b>Kühlwasser</b>				
KW-42	50	55	53	1'460
<b>Blindprobe (Brauchwasser)</b>				
OW-A	<0.4	<0.7	<1.3	<1.3

**Tabelle 30 Gehalte an organischen Schadstoffen (Wasserproben)**

Proben-Nr.	PAK Σ 16 EPA-PAH µg/l	PCB Σ 6 cong. Ballschmitter x 5 ng/l	PCDD/PCDF Σ I-TEQ ng/l
<b>Löschwasser</b>			
W-43	1.9	0.2	0.013
<b>Kühlwasser</b>			
KW-43	0.11	2.9	n.b.
<b>Blindprobe (Brauchwasser)</b>			
OW-O	0.06	0.2	0.018

*n.b. = nicht bestimmbar*

**Tabelle 31 Co-, Ni-, Mn- und Li-Gehalte (Schwebstoffe der Wasserproben) in Massen-%**

Proben-Nr.	Kobalt Co		Nickel Ni		Mangan Mn		Lithium Li	
	Massen-%	mg/l	Massen-%	mg/l	Massen-%	mg/l	Massen-%	mg/l
<b>Löschwasser</b>								
W-45	21	46	22	48	20	44	1.4	3.1
<b>Kühlwasser</b>								
KW-45	10	181	10	181	11	199	1.7	31

*Schwebstoffanteile: W-45 = 0.22 g/l ; KW-45 = 1.81 g/l*

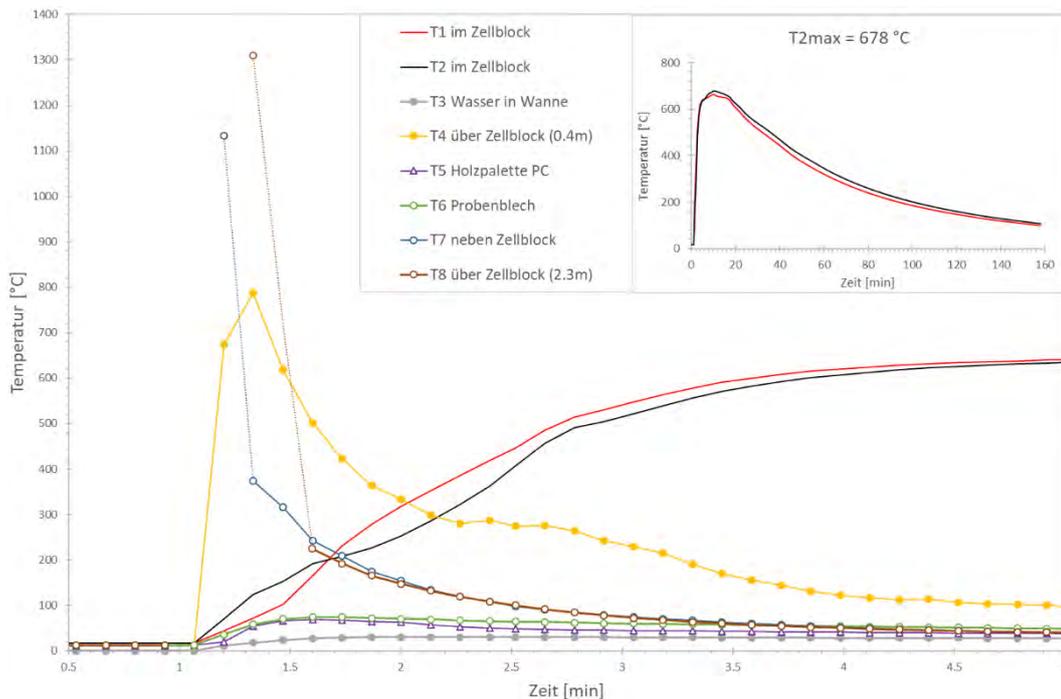
**Tabelle 32 Gehalte an organischen Schadstoffen (Schwebstoffe der Wasserproben)**

Proben-Nr.	PAK Σ 16 EPA-PAH		PCB Σ 6 cong. Ballschmitter x 5		PCDD/PCDF Σ I-TEQ	
	mg/kg	µg/l	µg/kg	ng/l	µg/kg	ng/l
<b>Löschwasser</b>						
W-43	11	1.8	4.1	0.67	0.20	0.032
<b>Kühlwasser</b>						
KW-43	3.2	3.4	0.9	0.91	0.92	1.0

Schwebstoffanteile: W-43 = 0.16 g/l ; KW-43 = 1.15 g/l

### Messung der Brandtemperaturen

Die höchsten gemessenen Temperaturen traten an den Messpunkten T8 (>1'300 °C, 2.3 m über dem Zellblock) und T7 (>1'100 °C, neben dem Zellblock, am Boden) auf. Diese Messwerte wurden möglicherweise durch die thermischen Effekte der Explosion beeinträchtigt. Auf einer Höhe von 0.4 m über dem Zellblock war der höchste Wert noch 788 °C (T4). Die im Zellblock gemessenen Temperaturen (T1, T2) stiegen innert 143 Sekunden nach der Detonation auf über 600 °C an, was einer Rate von etwa 4K/s entspricht. Der maximale Wert im Zellblock lag bei 678 °C und wurde nach 9.2 Minuten erreicht (T2). Von ihrem Höchstwert fielen die Temperaturen im Zellblock langsam ab und erreichten erst nach ca. 95 Minuten Werte unter 200 °C. Die höchsten Temperaturen in einiger Entfernung zum Zellblock lagen bei 69 °C (T5, Holzpalette mit PC-Gehäuse) bzw. 74 °C (T6, Probenblech). Die Wassertemperatur in der Wanne stieg von 12 °C auf maximal 30 °C an.

**Abbildung 22 Verlauf der Brandtemperaturen im Szenario «Löschwasser»**

### Gesamtbeurteilung

#### Löschwasser – Kontaminationen

Im Löschwasser, welches chemisch annähernd neutral ist (pH-Wert 8) und eine moderate elektrische Leitfähigkeit von knapp 500 µS/cm aufweist, können nur geringe Gehalte an

wasserlöslichen Sulfaten (34 mg/l), Fluoriden (8 mg/l), Chloriden und Nitraten (je 2 mg/l) sowie Lithium-Ionen (4 mg/l) analysiert werden. Die analysierten Anionen- und Kationen-Gehalte für Sulfate, Chloride und Nitrate liegen deutlich unterhalb der Grenzwerte für Trinkwasser in der Schweiz (vgl. Tabelle 48). Der analysierte Fluorid-Gehalt übersteigt den Grenzwert um einen Faktor 5. Der analysierte Lithium-Gehalt übersteigt die typischen Gehalte von Trinkwasser in Deutschland (<0.05 mg/l) um einen Faktor >80 (ein Grenzwert existiert nicht).

Gelöste organische Brandfolgesubstanzen (PAK, PCB, PCDD/F) können nur in äusserst geringen Konzentrationen von 2 µg/l (PAK; Σ 16 EPA-PAH), 0.2 ng/l (PCB; Σ 6 cong. Ballschmitter x 5) und 0.01 ng/l (PCDD/F; Σ I-TEQ) nachgewiesen werden. Im Falle der PCB und PCDD/F liegen die Konzentrationen im Bereich des im Löschversuch verwendeten Brauchwassers. Im Falle der PAK liegt der gelöste Gehalt um einen Faktor 30 über demjenigen des Brauchwassers. Die anwendbaren Grenzwerte für Trinkwasser werden im Falle der PAK nicht (gelöste Anteile) bzw. um Faktoren 4 bis 7 (partikelgebundene Anteile) überschritten (vgl. Tabelle 48). Die PCB-Konzentrationen liegen im Bereich typischer Gehalte von Schweizer Fließgewässern (gelöste und partikelgebundene Anteile).

Die Schwermetalle Co, Ni und Mn können in sehr hohen säurelöslichen Konzentrationen von je 36 mg/l nachgewiesen werden. Die analysierten Co-, Ni- und Mn-Gehalte übersteigen die Grenzwerte für Trinkwasser in der Schweiz (soweit definiert) um Faktoren von 700 bis 1'800 (vgl. Tabelle 48). Die Einleitwerte in die Kanalisation für Industrieabwässer in der Schweiz werden um Faktoren von 20 bis 70 überschritten.

#### Kühlwasser Batterie – Kontaminationen

Im Kühlwasser der Batterie, welches chemisch stark alkalisch reagiert (pH-Wert 12) und eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit von rund 35'000 µS/cm aufweist, können neben geringen Gehalten an wasserlöslichen Sulfaten (98 mg/l), Chloriden (2 mg/l) und Nitraten (<1 mg/l) sehr hohe Konzentrationen an wasserlöslichen Fluoriden (330 mg/l) und Lithium-Ionen (1'600 mg/l) analysiert werden. Der analysierte Fluorid-Gehalt übersteigt den Grenzwert für Trinkwasser in der Schweiz um einen Faktor 220 (vgl. Tabelle 48). Der analysierte Lithium-Gehalt übersteigt die typischen Gehalte von Trinkwasser in Deutschland (<0.05 mg/l) um einen Faktor >30'000 (ein Grenzwert existiert nicht).

Organische Brandfolgesubstanzen (PAK, PCB, PCDD/F) können nur in sehr geringen gelösten Konzentrationen von 0.1 µg/l (PAK; Σ 16 EPA-PAH) und 2.9 ng/l (PCB; Σ 6 cong. Ballschmitter x 5) nachgewiesen werden (PCDD/F konnten nicht bestimmt werden). Im Falle der PAK liegt der gelöste Gehalt im Bereich des im Löschversuch verwendeten Brauchwassers. Im Falle der PCB liegt der gelöste Gehalt um einen Faktor 15 über demjenigen des Brauchwassers (vgl. Tabelle 48). Die anwendbaren Grenzwerte für Trinkwasser werden im Falle der PAK nicht (gelöste und partikelgebundene Anteile) überschritten. Der PCB-Gehalt liegt um Faktor von 5 bis 15 über den typischen Gehalten von Schweizer Fließgewässern (gelöste und partikelgebundene Anteile).

Die Schwermetalle Co, Ni und Mn können in sehr hohen säurelöslichen Konzentrationen von je 50 bis 55 mg/l nachgewiesen werden. Die analysierten Co-, Ni- und Mn-Gehalte übersteigen die Grenzwerte für Trinkwasser in der Schweiz (soweit definiert) um Faktoren von 1'000 bis 2'800. Die Einleitwerte in die Kanalisation für Industrieabwässer in der Schweiz werden um Faktoren von 30 bis 100 überschritten.

## **4.4 Transport- und Ablagerungsverhalten (Batteriemodul 3)**

### **Schadstoffanalysen**

Die folgenden Analysen basieren auf den Messungen, die am 11. Dezember 2019 anhand des definierten Versuchsszenarios von Kapitel 3.4.3 und gemäss dem in Anhang II dokumentierten Analysekonzept im Versuchsstollen Hagerbach durchgeführt wurden. Das erläuternde Probenverzeichnis ist in Anhang III.3 vollständig aufgeführt.

**Tabelle 33 Anionen-Beaufschlagungen (wässriger Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$** 

Proben-Nr.	Chlorid $\text{Cl}^-$	Bromid $\text{Br}^-$	Fluorid $\text{F}^-$	Sulfat $\text{SO}_4^{2-}$	Nitrat $\text{NO}_3^-$	Phosphat $\text{PO}_4^{3-}$	Formiat $\text{HCOO}^-$	Acetat $\text{CH}_3\text{COO}^-$
<b>Inox-Kollektorbleche</b>								
C-11	0.7	n.n.	0.5	1.5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
D-11	0.6	n.n.	0.3	1.3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
E-11	0.6	n.n.	0.2	0.9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
<b>Ventilatoroberfläche</b>								
V-11	1.8	n.n.	1.4	3.5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

*n.n. = nicht nachweisbar ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )*

**Tabelle 34 Kationen-Beaufschlagungen (wässriger Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$** 

Proben-Nr.	Ammonium $\text{NH}_4^+$	Kalium $\text{K}^+$	Natrium $\text{Na}^+$	Lithium $\text{Li}^+$	Magnesium $\text{Mg}^{2+}$	Calcium $\text{Ca}^{2+}$
<b>Inox-Kollektorbleche</b>						
C-11	n.n.	n.n.	1.5	0.3	0.1	0.8
D-11	n.n.	n.n.	1.4	0.2	0.1	0.9
E-11	n.n.	n.n.	1.3	0.1	0.1	0.7
<b>Ventilatoroberfläche</b>						
V-11	n.n.	n.n.	3.2	0.9	0.3	3.9

*n.n. = nicht nachweisbar ( $<0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )*

**Tabelle 35 Co-, Ni-, Mn- und Li-Beaufschlagungen (Salpetersäure-Extrakt, Oberflächen-Wischproben) in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$** 

Proben-Nr.	Kobalt $\text{Co}$	Nickel $\text{Ni}$	Mangan $\text{Mn}$	Lithium $\text{Li}$
<b>Inox-Kollektorbleche</b>				
C-12	4.5	4.6	4.3	0.8
D-12	4.3	4.3	4.1	0.6
E-12	2.3	2.3	2.2	0.3
<b>Ventilatoroberfläche</b>				
V-12	18	19	17	2.6

**Tabelle 36 Beaufschlagungen mit organischen Schadstoffen (Sohxlet-Extrakt, Oberflächen-Wischproben)**

Proben-Nr.	PAK $\Sigma 16 \text{ EPA-PAH}$ $\mu\text{g}/\text{m}^2$	PCB $\Sigma 6 \text{ cong. Ballschmitter x 5}$ $\mu\text{g}/\text{m}^2$	PCDD/PCDF $\Sigma \text{ I-TEQ}$ $\text{ng}/\text{m}^2$
<b>Inox-Kollektorbleche</b>			
C-13	8.8	--	--
D-13	7.6	--	--
E-13	5.9	--	--

**Tabelle 36 Beaufschlagungen mit organischen Schadstoffen (Sohxlet-Extrakt, Oberflächen-Wischproben)**

Proben-Nr.	PAK Σ 16 EPA-PAH µg/m <sup>2</sup>	PCB Σ 6 cong. Ballschmitter x 5 µg/m <sup>2</sup>	PCDD/PCDF Σ I-TEQ ng/m <sup>2</sup>
C-14	--	0.20	0.2
D-14	--	1.1	0.2
E-14	--	0.18	0.2
<b>Ventilatoroberfläche</b>			
V-13	17	--	--
V-14	--	0.66	0.4

**Tabelle 37 Brandruss-Kontamination (Beaufschlagungsmengen und Feststoffanalytik, Brandrussproben)**

Proben-Nr.	Menge	Zusammensetzung
C	0.4 g/m <sup>2</sup>	Hauptbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Co, Ni, Mn (je 7-9 Gew.-%)</li> <li>• O (20-25 Gew.-%),</li> <li>• C und Ca (je 10-15 Gew.-%)</li> </ul> Nebenbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, Al, F (je 1-5 Gew.-%)</li> <li>• Mg, K, P, S, Cl (&lt;1 Gew.-%)</li> </ul>
D	0.4 g/m <sup>2</sup>	Hauptbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Co, Ni, Mn (je 7-9 Gew.-%)</li> <li>• O (20-25 Gew.-%),</li> <li>• C und Ca (je 10-15 Gew.-%)</li> </ul> Nebenbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, Al, Mg, S, F (je 1-5 Gew.-%)</li> <li>• P, Cl (&lt;1 Gew.-%)</li> </ul>
E	0.1 g/m <sup>2</sup>	Hauptbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Co, Ni, Mn (je 7-9 Gew.-%)</li> <li>• O (20-25 Gew.-%),</li> <li>• C und Ca (je 10-15 Gew.-%)</li> </ul> Nebenbestandteile: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, Al, Mg, S, F (je 1-5 Gew.-%)</li> <li>• P, Cl (&lt;1 Gew.-%)</li> </ul>

**Tabelle 38 Orientierende chemische Analyse (Feststoffanalytik ED-XRF, Brandrussproben) Gehaltsangaben in Massen-% (Mittelwerte 3-fach-Messung ± Standardabweichung aufgerundet)**

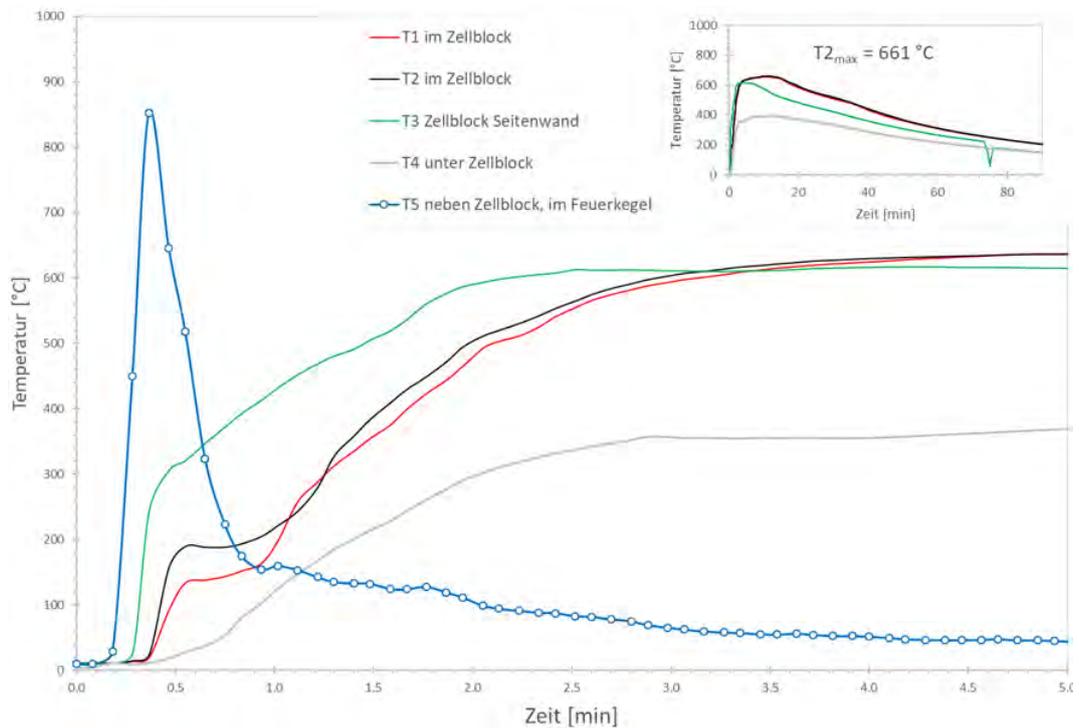
Stoff	C	D	E	Stoff	C	D	E
Ag	<0.01	<0.01	<0.01	Ni	7.4 ± 0.5	7.4 ± 0.5	7.5 ± 0.5
Al	3.1 ± 0.2	1.9 ± 0.2	2.0 ± 0.2	P	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1
As	<0.01	<0.01	<0.01	Pb	<0.01	<0.01	<0.01
Au	<0.01	<0.01	<0.01	Pd	<0.01	<0.01	<0.01
Ba	<0.05	<0.05	<0.05	Rb	<0.01	<0.01	<0.01
Bi	<0.01	<0.01	<0.01	Re	<0.01	<0.01	<0.01
Ca	14.4 ± 0.5	15.9 ± 0.5	17.2 ± 0.5	S	1.2 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.4 ± 0.1

**Tabelle 38 Orientierende chemische Analyse (Feststoffanalytik ED-XRF, Brandrussproben) Gehaltsangaben in Massen-% (Mittelwerte 3-fach-Messung  $\pm$  Standardabweichung aufgerundet)**

Stoff	C	D	E	Stoff	C	D	E
Cd	<0.01	<0.01	<0.01	Sb	<0.01	<0.01	<0.01
Cl	0.2 $\pm$ 0.1	<0.2	<0.2	Se	<0.01	<0.01	<0.01
Co	7.5 $\pm$ 0.5	7.5 $\pm$ 0.5	7.5 $\pm$ 0.5	Si	2.8 $\pm$ 0.2	3.1 $\pm$ 0.2	3.7 $\pm$ 0.2
Cr	<0.05	<0.05	<0.05	Sn	<0.01	<0.01	<0.01
Cu	0.2 $\pm$ 0.1	<0.2	<0.2	Sr	<0.01	<0.01	<0.01
Fe	1.2 $\pm$ 0.1	1.5 $\pm$ 0.1	1.6 $\pm$ 0.1	Ta	<0.01	<0.01	<0.01
Hf	<0.01	<0.01	<0.01	Th	<0.01	<0.01	<0.01
Hg	<0.1	<0.1	<0.1	Ti	<0.1	<0.1	<0.1
K	0.5 $\pm$ 0.1	0.6 $\pm$ 0.1	0.7 $\pm$ 0.1	U	<0.01	<0.01	<0.01
Mg	<1	<1	<1	V	<0.1	<0.1	<0.1
Mn	8.3 $\pm$ 0.5	8.1 $\pm$ 0.5	8.0 $\pm$ 0.5	W	<0.05	<0.05	<0.05
Mo	<0.01	<0.01	<0.01	Zn	<0.1	<0.1	<0.1
Nb	<0.01	<0.01	<0.01	Zr	<0.1	<0.1	<0.1

### Messung der Brandtemperaturen

Die höchste gemessene Temperatur trat an Messpunkt T5 (ca. 850 °C, neben dem Zellblock, im Feuerkegel) auf. Von diesem Maximalwert fiel die Temperatur innert weniger als 30 Sekunden unter 200 °C und nach etwa 100 Sekunden unter 100 °C. Die im Zellblock gemessenen Temperaturen (T1, T2) stiegen innert 173 Sekunden nach der Detonation auf über 600 °C an, was einer Rate von etwa 3.4 K/s entspricht. Der maximale Wert im Zellblock lag bei 661 °C und wurde nach 10.3 Minuten erreicht (T2). Von ihrem Höchstwert fielen die Temperaturen im Zellblock langsam ab und erreichten erst nach ca. 92 Minuten Werte unter 200 °C. Die höchste Temperatur in der Seitenwand des Zellblocks wurde nach 240 Sekunden erreicht und lag bei 617 °C (T3), wobei der initiale Temperaturanstieg in den ersten 5 Sekunden 43.6 K/s betrug. Unter dem Zellblock wurde eine maximale Temperatur von 395 °C nach 12 Minuten registriert.



**Abbildung 23 Verlauf der Brandtemperaturen im Szenario «Transport- und Ablageverhalten»**

### Gesamtbeurteilung

#### Brandruss – Beaufschlagungsmengen und Zusammensetzung

Die Beaufschlagungsmengen mit Brandruss und aufgewirbeltem Baustaub liegen im Versuchsstollen bei allen Probenahmestellen bei  $<1 \text{ g/m}^2$ . Die Brandruss- und Baustaubablagerungen bestehen aus je rund 7-9 Massen-% der Elemente Co, Ni und Mn, rund 10-15 Massen-% der Elemente Ca und C, rund 20-25 Massen-% des Elementes O sowie je rund 1-5 Massen-% der Elemente Si, Al, Mg, S und F.

#### Infrastruktur (Kollektorbleche) – Kontaminationen

Hinsichtlich toxikologisch und korrosionschemisch relevanter anorganischer Schadstoffe können auf den Kollektorblechen ( $45^\circ$  geneigte Oberflächen) schwach erhöhte Beaufschlagungen der Elemente Co, Ni und Mn von je rund  $2\text{-}5 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  und des Elementes Li von rund  $0.3\text{-}0.8 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  analysiert werden. Diese übersteigen die üblichen Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen um Faktoren von bis rund 50 (Co, Ni), 5 (Mn) bzw. 10 (Li) (vgl. Tabelle 42). Wasserlösliche Chloride, Bromide und Fluoride können nur in sehr geringen, in korrosionschemischer Hinsicht unbedeutenden Mengen  $\leq 5 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  (Chloride, Bromide) bzw.  $<1 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  (Fluoride) nachgewiesen werden.

Die PAK-, PCB- und PCDD/F-Beaufschlagungen von  $\leq 10 \text{ }\mu\text{g/m}^2$  (PAK),  $\leq 1 \text{ }\mu\text{g/m}^2$  (PCB) bzw.  $<1 \text{ ng/m}^2$  (PCDD/F) liegen im Bereich üblicher Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen (vgl. Tabelle 43).

#### Infrastruktur (Ventilatorgehäuse) – Kontaminationen

An in toxikologischer und korrosionschemischer Hinsicht relevanten anorganischen Schadstoffen können auf dem Ventilatorgehäuse (horizontale Oberfläche) hohe Beaufschlagungen der Elemente Co, Ni und Mn von je rund  $20 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  und des Elementes Li von rund  $3 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  analysiert werden, welche die üblichen Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen um Faktoren von bis rund 200 (Co, Ni), 20 (Mn) bzw. 30 (Li) übersteigen (vgl. Tabelle 42). Wasserlösliche Chloride, Bromide und Fluoride können nur in sehr geringen, in korrosionschemischer Hinsicht unbedeutenden Mengen  $\leq 5 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  (Chloride, Bromide) bzw. rund  $1 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$  (Fluoride) nachgewiesen werden.

Die PAK-, PCB- und PCDD/F-Beaufschlagungen von  $<20 \mu\text{g}/\text{m}^2$  (PAK),  $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^2$  (PCB) bzw.  $0.4 \text{ ng}/\text{m}^2$  (PCDD/F) liegen im Bereich üblicher Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen (vgl. Tabelle 43).

## 4.5 Materialanalyse (Batteriemodul 4)

Die metallischen Bauteile des Batteriemoduls (Batteriegehäuse, Zellgehäuse) bestehen aus verschiedenen Aluminium-Legierungen. Die Mehrheit der Kunststoffbauteile des Batteriemoduls (Gehäuse, Isolations- und Zellfolien) besteht aus chlor- und bromfreien Kunststoffen. Einzig die Kabelmäntel der Batterie- und Zellverkabelungen bestehen aus einem chlorhaltigen Kunststoff (PVC). Die Werkstoffcharakterisierung erfolgte mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (ED-XRF).

**Tabelle 39 Orientierende Werkstoffcharakterisierung: Kunststoffbauteile**

Bauteile	Gehaltsangaben in Massen-%				
	Cl	Br	Co	Ni	Mn
Gehäuse, schwarz	<0.5	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05
Abdeckung, schwarz	<0.5	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05
Stecker, schwarz	<0.5	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05
Isolation Batterie, weiss	<0.5	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05
Zellfolie, transparent	<0.5	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05
Polabdeckung, beige	<0.5	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05
Kabel dick, orange	28	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05
Kabel dünn, orange	35	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05

**Tabelle 40 Orientierende Werkstoffcharakterisierung: Metallische Bauteile**

Bauteile	Gehaltsangaben in Massen-%						
	Al	Si	Mg	Fe	Co	Ni	Mn
Grundplatte Gehäuse	95	0.2	3.6	0.2	<0.05	<0.05	0.4
Frontblech Gehäuse	98	0.5	0.6	0.2	<0.05	<0.05	<0.05
Seitenblech Gehäuse	98	1.2	0.6	0.1	<0.05	<0.05	0.05
Trennblech Gehäuse	98	1.2	0.4	0.1	<0.05	<0.05	0.06
Leitblech Batterie	99	0.2	<0.2	0.2	<0.05	<0.05	<0.05
Zellgehäuse Batterie	98	0.2	0.5	0.5	<0.05	<0.05	1.1
Pol Batterie	98	0.9	<0.2	0.3	<0.05	<0.05	1.0



**Abbildung 24 Aufbau Batteriemodul mit untersuchten Bauteilen aus Kunststoff und Metall**



## 5 Diskussion

Mit dem Experiment wurde nachgewiesen, dass BEV-Brände mit Lithium-Ionen-Batterien (Typ NMC) zu neuartigen Schadstoffemissionen führen. Diese werden die toxikologischen Risiken in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen verändern, weil sie bei gewöhnlichen ICEV-Bränden nicht auftreten. Die beobachteten thermischen Effekte ( $>700\text{ °C}$ ) während des Experiments legen zudem nahe, dass sich der Brand einer Lithium-Ionen-Batterie auf die umliegenden Karosserieteile ausweiten und in der Regel zu einem vollständigen Fahrzeugbrand führen wird. Sobald jedoch ein BEV-Vollbrand entstanden ist, unterscheidet er sich hinsichtlich der thermischen Charakteristiken kaum mehr von einem ICEV-Brand: Experimentelle Studien belegen, dass Brände vergleichbarer Elektrofahrzeuge und konventioneller Fahrzeuge ähnliche Brandleistungen (ca. 5 MW) haben und durch eine hochkapazitive Traktionsbatterie nicht beeinflusst werden (vgl. [16]; [55]).

Die Hypothese, dass die spezifischen Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen zu nachhaltigen Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit führen, kann indessen nicht pauschal bestätigt, sondern 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 ein objektunabhängiges Risiko bergen:

- In Parkhäusern, Einstellhallen oder Garagen werden BEV-Brände unter gewissen Voraussetzungen die Sicherheits- und Betriebsrisiken erhöhen. In toxikologischer Hinsicht werden sie vor allem die Dekontaminations- und Entsorgungsarbeiten beeinflussen; technische Beeinträchtigungen durch Korrosionsschädigung sind unwahrscheinlich.
- In Strassentunneln kann praktisch ausgeschlossen werden, dass es nach einem BEV-Brandereignis zu kritischen Kontaminationen, technischen Beeinträchtigungen durch Korrosionsschädigung oder atypischen Sicherheits- oder Betriebseinschränkungen kommt. In toxikologischer Hinsicht werden die Dekontaminations- und Entsorgungsarbeiten aber auch beeinflusst werden (z.B. Personenschutz, Rückhaltung und fachgerechte Entsorgung des Waschwassers).
- BEV-Brände führen zu Lithium- und Schwermetallkonzentrationen im Lösch- und Kühlwasser, welche die anwendbaren bzw. derzeit verfügbaren Grenzwerte für die Einleitung in die Kanalisation um ein Vielfaches überschreiten. Diese Tatsache macht eine entsprechende Vorbehandlung sowohl des Lösch- als auch des Kühlwassers vor der Einleitung in andere Abwassermedien in der Praxis zwingend erforderlich.

Die Erkenntnisse aus dem Experiment werden zur besseren Einordnung in den folgenden Kapiteln anhand essenzieller Fragestellungen diskutiert. Sofern nicht anders erwähnt, wird bei sämtlichen Erläuterungen stets vorausgesetzt, dass die Ereignisbewältigung einerseits und die spätere Dekontamination andererseits professionell und nach dem aktuellen Stand der Technik durchgeführt werden.

### 5.1 Auswirkungen auf die Sicherheit und den Betrieb

#### **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 (vgl. Tabelle 41): 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. Bei diesem Ereignis wurden die Messungen mit identischen Methoden und von derselben Person wie im vorliegenden Projekt durchgeführt. Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen waren um ein Vielfaches kleiner als im aktuellen Experiment mit nur einer Lithium-Ionen-Batterie (vgl. Tabelle 41).

**Tabelle 41** Spezifischer Schadstoffvergleich eines BEV- und eines ICEV-Brandes

Substanz	Schadstoffkonzentrationen nach einem	
	BEV-Brand in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (Experiment)	ICEV-Brand in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (Realbrand)
Kobalt	155 – 400	0.2
Nickel	156 – 400	0.3
Mangan	148 – 380	3
Lithium	30 – 70	1.2
Fluorid	40 – 52	0.5

Die bereits im Vorgängerprojekt ([59]) beschriebenen und nun erneut bestätigten Schwermetalle Kobalt, Nickel und Mangan aber auch Fluorid- und Lithiumemissionen können somit als BEV-spezifische Schadstoffe bezeichnet werden, mit denen bei ICEV-Bränden bislang nicht gerechnet werden musste. Selbstverständlich ist diese Aussage abhängig von der chemischen Zusammensetzung einer Traktionsbatterie und trifft insbesondere auf den Typ NMC zu. Sie ist aber dennoch zulässig, weil zurzeit in den Antriebsbatterien der meisten BEV weltweit diese Substanzen im Kathodenaktivmaterial in vergleichbaren Verhältnissen zur Anwendung kommen.

#### Sind die gemessenen Schadstoffmengen überhaupt relevant?

Ja, die Schadstoffkonzentrationen müssen deshalb beachtet werden, weil sie in konventionellen ICEV-Bränden 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 (vgl. Tabelle 42). In diesem Zusammenhang sind neben den Schwermetallen Kobalt, Nickel und Mangan insbesondere auch Fluoride und Lithium sowie PAK-Verunreinigungen zu beachten (vgl. Tabelle 43). Diese BEV-spezifischen Substanzgruppen sind in humantoxikologischer Hinsicht schädlich und können damit zu einer Verschärfung des Risikos in unterirdischen Infrastrukturen führen. Die festgestellten Kontaminationen können als repräsentativ für die diesbezügliche Situation nach einem BEV-Brand in einem Tiefgaragendeck mit einem Volumen von ungefähr  $2'000 \text{ m}^3$  (ca.  $28 \times 28 \times 2.5 \text{ m}$ ) betrachtet werden.

**Tabelle 42** Potenzielle Kontamination in unterirdischer Infrastruktur ( $\approx 2'000 \text{ m}^3$ ) ohne mechanische Lüftung und Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen (Erfahrungswerte Empa)

Elemente	Messwerte Stollen «A» in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	MAK-Werte in $\text{mg}/\text{m}^3$	Hintergrundwerte in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	Quotient (Messwerte/Hintergrundwerte)
Co	155 – 400	0.05	<0.1	$\approx 1'500 - 4'000$
Ni	156 – 400	0.05	<0.1	$\approx 1'500 - 4'000$
Mn	148 – 380	0.5	<1	$\approx 150 - 400$
F	40 – 52	1	<1	$\approx 40 - 50$
Li	30 – 70	0.2	<0.1	$\approx 300 - 700$

**Tabelle 43** Potenzielle Kontamination in unterirdischer Infrastruktur ( $\approx 2'000 \text{ m}^3$ ) ohne mechanische Lüftung und Hintergrundwerte von PAK- PCB- und PCDD/F-Beaufschlagungen auf nicht kontaminierten Oberflächen (gemäss VdS 2357, [35])

Verbindungen	Messwerte Stollen «A»	Hintergrundwerte Industrie	Hintergrundwerte Wohnen/Büro	Quotient (Messwerte/Hintergrundwerte Industrie)
PAK $\Sigma$ 16 EPA-PAH	269 – 304 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	<100 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	<10 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\approx 2.7 - 3$
PCB $\Sigma$ 6 cong. Ballschmitter x 5	0.22 – 9.6 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\ll$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\ll$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\ll$ 1
PCDD/F $\Sigma$ I-TEQ	6.3 – 8.4 $\text{ng}/\text{m}^2$	<50 $\text{ng}/\text{m}^2$	<10 $\text{ng}/\text{m}^2$	<1

Diese Aussagen können aber auch relativiert werden. Die Messungen im vorliegenden Experiment wurden nämlich in einem Raum mit einer freiliegenden, d.h. nicht verbauten Traktionsbatterie durchgeführt. Die versuchsbedingt fehlende Umhüllung der Batterie begünstigte eine sofortige und ungehinderte Schadstoffausbreitung im Raum. In einem realen Brandereignis mit einem BEV, in dem die Traktionsbatterie aus Sicherheitsgründen typischerweise sehr solide im Fahrzeug verbaut ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Schadstoffe nicht so frei in der Umgebung ausbreiten. Es ist davon auszugehen, dass sich beträchtliche Anteile im Fahrzeugumbau niederschlagen werden, wodurch eine weiträumige Kontamination in einer Infrastruktur verringert wird. Zur Verifizierung dieser Annahme müsste ein Versuch mit einem Mock-up durchgeführt werden.

#### Wird die Personensicherheit beeinträchtigt?

Hinsichtlich der vom Brandereignis direkt betroffenen Personen – Nein. Die Schadstoffemissionen eines Fahrzeugbrandes 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. Auch in einem realen Brandereignis mit einem BEV ist deshalb davon auszugehen, dass sowohl die Selbstrettung als auch die Fremdrettung von Fahrzeuginsassen wie bei einem konventionellen Fahrzeugbrand vorstattgehen gehen müssen, d.h. schnellstmöglich. Durch die zusätzlichen chemischen Gefährdungen sollte die grundsätzliche Personensicherheit der unmittelbar Betroffenen somit nicht beeinträchtigt werden. Die feuerwehrtypischen Erträglichkeits- und Reanimationsgrenzen (massgebende Brandgasgehalte in einem Brandraum, [30]) haben weiterhin Bestand und sollen nach wie vor als Richtzeiten für Feuerwehren gelten.

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 (vgl. Kapitel 4.1). 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.

Das zweite Problem in diesem Zusammenhang sind die nach wie vor weit verbreiteten, widersprüchlichen Empfehlungen betreffend die Bekämpfung eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes. Sofern die Brandbekämpfung und auch Dekontaminationsarbeiten mit unzu-

reichenden oder gar fehlenden Schutzvorkehrungen durchgeführt werden, kann die Unkenntnis über die zusätzlichen chemischen Gefährdungen die Personensicherheit wesentlich beeinträchtigen. Tabelle 44 und Tabelle 45 illustrieren, dass der Schutzanzug eines Feuerwehrmannes während eines Brandereignisses sehr stark durch batteriespezifische Schadstoffe kontaminiert werden kann. Dass derartige Konzentrationsüberschreitungen dieser Schadstoffe, die durch den Menschen über Atemwege, die Schleimhäute aber auch über Hautkontakt aufgenommen werden können, im ungeschützten Falle nachhaltige Schädigungen auslösen würden, liegt auf der Hand. 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.

**Tabelle 44** Potenzielle Kontamination von textiler Schutzausrüstung und Hintergrundwerte nicht kontaminierter Oberflächen (Erfahrungswerte Empa)

Elemente	Messwerte in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	MAK-Werte in $\text{mg}/\text{m}^3$	Hintergrundwerte in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	Quotient (Messwerte/Hintergrundwerte)
Co	400	0.05	<0.1	$\approx 4'000$
Ni	400	0.05	<0.1	$\approx 4'000$
Mn	380	0.5	<1	$\approx 700$
F <sup>-</sup>	46	1	<1	$\approx 50$
Li	70	0.2	<0.1	$\approx 700$

**Tabelle 45** Potenzielle Kontamination von textiler Schutzausrüstung und Hintergrundwerte von PAK- PCB- und PCDD/F-Beaufschlagungen auf nicht kontaminierten Oberflächen (gemäss VdS 2357, [35])

Verbindungen	Messwerte	Hintergrundwerte Industrie	Hintergrundwerte Wohnen/Büro	Quotient (Messwerte/Hintergrundwerte Industrie)
PAK $\Sigma$ 16 EPA-PAH	120 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	<100 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	<10 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\approx 1.2$
PCB $\Sigma$ 6 cong. Ballschmitter x 5	0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\ll$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\ll$ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^2$	$\ll 1$
PCDD/F $\Sigma$ I-TEQ	3.4 $\text{ng}/\text{m}^2$	<50 $\text{ng}/\text{m}^2$	<10 $\text{ng}/\text{m}^2$	< 1

Es muss jedoch betont werden, dass sowohl die schweizerischen Einsatzkräfte als auch die professionellen Brandschadensanierungs- und Dekontaminationsfirmen sowie Entsorgungsunternehmen grundsätzlich über angemessene Schutzvorkehrungen und das nötige Fachwissen verfügen. Hinzu kommt, dass die herkömmlichen Reinigungsverfahren für kontaminierte textile Schutzausrüstung nach einem Brandereignis auch für die BEV-spezifischen Verunreinigungen ausreichend sind: An den gereinigten Textiloberflächen konnten die anorganischen und organischen Schadstoffen nicht mehr bzw. in nur noch unbedeutenden Mengen nachgewiesen werden. Somit müssen angesichts von BEV-Brandereignissen keine neuen Empfehlungen und Massnahmen geschaffen werden, die bestehenden sind ausreichend, sie müssen aber zwingend umgesetzt werden.

#### Ergeben sich neue Gefahren für die Umwelt durch Luftschadstoffe?

Nein. Im Falle eines vollständigen BEV-Brandes werden viele weitere toxische Brandgase emittiert, deren Mengen die zusätzlichen batteriespezifischen Schadstoffe bei weitem übertreffen. Hinzu kommt, dass in grossen oder mechanisch belüfteten Infrastrukturen bereits während des Brandereignisses starke Verdünnungseffekte einsetzen, sodass in der Umgebungsluft nicht mit kritischen Konzentrationen der neuartigen Substanzen gerechnet werden muss. Der Versuch mit Batteriemodul Nr. 3 verdeutlicht diese Tatsache (vgl. Tabelle 46): im belüfteten Versuchsraum mit tunnelähnlichen Dimensionen konnten nur noch

ein Bruchteil der Schwermetallkonzentration aus dem unbelüfteten und kleineren Versuchsraum nachgewiesen werden. Sobald diese Emissionen ins Freie gelangen, werden sie weiter verdünnt, sodass sie hinsichtlich einer Umweltschädigung nicht mehr als relevant bezeichnet werden können.

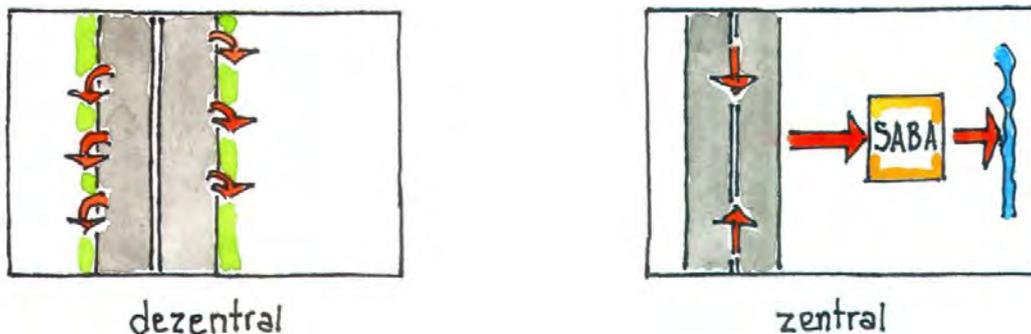
**Tabelle 46** Volumen- und lüftungsbedingte Verdünnungseffekte während eines BEV-Brandes in unterirdischen Infrastrukturen

Elemente	Messwerte in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in einem		Quotient (Stollen «A»/«B»)
	unbelüftetem Raum (Stollen «A»)	belüftetem Raum (Stollen «B»)	
Co	155 – 400	2.3 – 18	$\approx 9 - 174$
Ni	156 – 400	2.3 – 19	$\approx 8 - 171$
Mn	148 – 380	2.2 – 17	$\approx 9 - 173$
Li	30 – 70	0.3 – 2.6	$\approx 11 - 233$

### Stellen sich neue Umweltgefahren durch unkontrolliert abfließendes Löschwasser?

Ja. Das Wasser, das durch die Feuerwehr während eines BEV-Brandereignisses zur Brandbekämpfung 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 (soweit definiert) um Faktoren von 700 bis 1'800; die Einleitwerte in die Kanalisation für Industrieabwässer in der Schweiz werden um Faktoren von 20 bis 70 überschritten (vgl. Tabelle 48). 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 ([31]; [32]), sollte das Umweltrisiko durch abfließendes Löschwasser nach einem BEV-Brand reduziert werden können. Ziel ist dabei immer die Einhaltung des gesetzlich vorgegebenen Gewässerschutzes.

Auf Nationalstrassen wird dieses Umweltrisiko durch die immer häufiger vorhandenen Strassenabwasserbehandlungsanlagen (SABA) zusätzlich minimiert. Diese speziellen Reinigungsanlagen müssen gemäss den Gewässerschutzvorschriften des Bundes an stark befahrenen Strassen eingerichtet werden und sind in der Lage auch schwermetall- und PAK-belastete Abwässer mittels Transport- und Retentionsmöglichkeiten sowie effizienten Filtersystemen zu reinigen ([5]). Weil der Einsatz von SABA auch bei der Bewältigung von Havarien und Störfällen mit chemischen Schadstoffen vorgesehen ist, wird das Risiko von unkontrolliert abfließendem Löschwasser bei einem BEV-Brandereignis als gering eingestuft; bei einem BEV-Ereignis erscheint ein vorsorglicher Havariebetrieb der SABA zum jetzigen Kenntnisstand als empfehlenswert. Auf Nationalstrassenabschnitten, in denen die Entwässerung dezentral über das Bankett erfolgt (vgl. Abbildung 25), d.h. ohne SABA, sollten im Ereignisfall aufgrund der batteriespezifischen Substanzen aus Sicherheitsgründen immer angemessene Massnahmen zur Löschwasserbehandlung ergriffen werden.



**Abbildung 25** Dezentrale Beseitigung über Böschung (links) und zentrale Beseitigung des Strassenabwassers über SABA (rechts) ([5])

Eine gesonderte Nachbehandlung von Böschungen und Grünstreifen entlang der von einem BEV-Ereignis betroffenen Strassen ist im Einzelfall zu prüfen, sie sollte aus Risikoüberlegungen aber nicht zwingend erforderlich sein: diese Bodenflächen sind grundsätzlich bereits durch das Verspritzen und Verwehen von anderen verkehrsbedingten Schadstoffen (u.a. Schwermetalle und PAK) stark belastet. Über das Bankett abfliessendes, kontaminiertes Löschwasser nach einem BEV-Brand würde dann zu einer Schadstoffanreicherung in ohnehin vorbelasteten Bereichen der Strassenanlage führen<sup>3</sup> (vgl. [5]).

#### **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 (nicht löschrare Lithium-Ionen-Batteriebrände, vgl. Kapitel 2.2). Wird eine beschädigte oder auch komplett ausgebrannte Traktionsbatterie mit dieser Methode über einige Tage gelagert, 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 (pH  $\approx$  8) hin zu einer stark basischen Lösung (pH > 12) verändert (vgl. Tabelle 47).

**Tabelle 47 Elektrochemische Charakteristik (Wasserproben)**

Proben-Nr.	pH-Wert (23 °C) (DIN 19268)	elektr. Leitfähigkeit $\mu$ S/cm (25 °C) (DIN EN 27 888)
Löschwasser (W-41)	8.2	488
Kühlwasser (KW-41)	12.3	35'200
Blindprobe (Brauchwasser) (0W-K)	8.0	421

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 >1'000-2'800 (vgl. Tabelle 48). 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 unternommen 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.

<sup>3</sup> Strassenabwässer gelten grundsätzlich bei einem DTV > 14'000 als hoch belastet ([5]).

**Tabelle 48** Vergleich der gemessenen Versuchswerte mit Grenz-, Richt- und Hintergrundwerten für Wasser

Kriterium	Versuchswerte		Brauchwasser	Trinkwasser Grenzwerte <sup>(1)</sup>	Einleitwerte Industrieabwässer <sup>(2)</sup>
	Löschwasser	Kühlwasser			
pH-Wert	8.2	12.3	8.0	6.8 – 8.2	6.5 – 9.0
Chlorid (mg/l)	2	22	3	250	k.A.
Sulfat (mg/l)	34	98	2	250	k.A.
Nitrat (mg/l)	2	<1	<1	40	k.A.
Phosphat (mg/l)	<1	<1	<1	1	k.A.
Fluorid (mg/l)	8	330	<1	1.5	k.A.
PAK(c) (µg/l)	0.001 <sup>(a)</sup> 0.36 <sup>(b)</sup>	0.02 <sup>(a)</sup> 0.02 <sup>(b)</sup>	0.001 <sup>(a)</sup> <0.001 <sup>(b)</sup>	0.1	k.A.
Benzo[a] pyren (µg/l)	<0.001 <sup>(a)</sup> 0.07 <sup>(b)</sup>	0.004 <sup>(a)</sup> 0.01 <sup>(b)</sup>	<0.001 <sup>(a)</sup> <0.001 <sup>(b)</sup>	0.01	k.A.
Kobalt (µg/l)	36'000 <sup>(a)</sup> 46'000 <sup>(b)</sup>	50'000 <sup>(a)</sup> 181'000 <sup>(b)</sup>	<400	k.A. (≤70)	500
Mangan (µg/l)	36'000 <sup>(a)</sup> 44'000 <sup>(b)</sup>	53'000 <sup>(a)</sup> 199'000 <sup>(b)</sup>	<1'300	50	k.A.
Nickel (µg/l)	36'000 <sup>(a)</sup> 48'400 <sup>(b)</sup>	55'000 <sup>(a)</sup> 181'000 <sup>(b)</sup>	<700	20	2'000
Lithium (µg/l)	7'000 <sup>(a)</sup> 2'200 <sup>(b)</sup>	1'460'000 <sup>(a)</sup> 31'000 <sup>(b)</sup>	<1'300	k.A. (≤40)	k.A.

<sup>(a)</sup> Gehalte, gelöst / <sup>(b)</sup> Gehalte, partikelgebunden / <sup>(c)</sup> Summe von Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k] fluoranthren, Benzo-[ghi]perylen, Indeno[1,2,3-cd] pyren

<sup>(1)</sup> Grenzwerte Trinkwasser CH gemäss TBDV (2016)

<sup>(2)</sup> Einleitwerte Industrieabwässer in Kanalisation CH gemäss GSchV (2014)

Farbcodierung Tabelle:

- grün = unterhalb Grenzwert Trinkwasser
- gelb = bis maximal 10x über Grenzwert Trinkwasser
- orange = 50x bis 200x über Grenzwert Trinkwasser
- rot = >500x über Grenzwert Trinkwasser

### 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 aufgebauten 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.

Im vorliegenden Projekt wurde der sehr stark kontaminierte Versuchsort «Stollen A» umfassend und mit einem für solche Räume typischen Prozedere gereinigt. Probenahmen von vormals stark belasteten Stellen an den Stollenwänden haben nun bestätigt, dass mit den konventionellen Sanierungsmethoden auch die BEV-spezifischen Emissionen ausreichend und mit herkömmlichem Aufwand beseitigt werden können. Nach der Reinigung lagen alle Konzentrationen, insbesondere jene der Schwermetalle sowie der Fluoride und

von Lithium unterhalb der erfahrungsbasierten Hintergrundwerte, die branchenweit als eigentliche Zielwerte hinzugezogen werden.

Mit zunehmendem BEV-Verkehr und der beobachtbaren Tendenz, den Verkehr unterirdisch zu verlagern, entstehen natürlich neue Risiken für die Infrastrukturbetreiber. Gleichzeitig sehen sie sich einem steigenden Druck ausgesetzt, ihre Infrastrukturen verfügbar zu halten und sie nach einem Störfall rasch wieder zu öffnen. Lange Ausfallzeiten und zusätzliche Kosten durch umfassendere Dekontaminationsarbeiten nach einem BEV-Brand sind Folgen, die vor allem für die Betreiber städtischer Infrastrukturen mit typischerweise hohem Verkehrsaufkommen und relativ vielen BEV unbedingt zu vermeiden sind. Aufgrund der bestätigten Wirksamkeit der konventionellen Sanierungsmassnahmen kann diesbezüglich aber Entwarnung gegeben werden. Es muss nicht davon ausgegangen werden, dass nach einem Brandereignis mit BEV-Beteiligung umfangreichere Dekontaminationsarbeiten als bisher erforderlich werden. Dadurch bedingte längere Sperrzeiten und somit ausgedehntere Betriebsunterbrüche oder sogar komplette Unverfügbarkeiten sind daher unwahrscheinlich – vorausgesetzt die Sanierungsmassnahmen werden angemessen, systematisch und nach dem aktuellen Stand der Technik umgesetzt.

### **Werden Anlagenwerte von Bauteilen und technischen Einrichtungen übermässig vermindert?**

Nein. Die Untersuchungen hinsichtlich der Korrosionsschädigung von verschiedenen metallischen Werkstoffen haben keine auffälligen Befunde geliefert. Sowohl direkt nach der Exposition als auch nach drei Monaten Lagerung bei verschiedener Luftfeuchtigkeit konnten keine atypischen Materialabträge festgestellt werden (vgl. Tabelle 26). 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 BEV-Brandereignisse die in Strassentunneln und Parkhäusern ohnehin schon korrosive Umgebung nicht verstärken und dadurch die Anlagenwerte von Bauteilen und technischen Einrichtungen nicht übermässig vermindert werden.

## **5.2 Auswirkungen auf die Ereignisbewältigung**

### **Müssen Prozesse in der Ereignisbewältigung angepasst werden?**

Nein. Die Ereignisbewältigung durch die Einsatzkräfte und die spätere Brandschadenssanierung in Strassentunneln oder auch Parkhäusern müssen nicht grundsätzlich verändert werden. Sofern sie beide gemäss dem aktuellen Stand der Praxis und Technik angewendet werden, reichen die bislang geltenden Richtzeiten und Empfehlungen aus, um auf die thermischen und insbesondere auch die chemischen Gefährdungen von BEV-Bränden sicher reagieren zu können. An der Bedeutung eines angemessenen Sanierungskonzeptes hat sich aufgrund der veränderten Risikolandschaft in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen nichts verändert: mit der Umsetzung von passenden Massnahmen in einer geordneten Abfolge wird es auch zukünftig möglich sein, Folgerisiken abzufedern und damit nachhaltige Auswirkungen von BEV-Bränden zu minimieren.

In diesem Zusammenhang muss aber erneut auf die Wichtigkeit eines kontinuierlichen Wissenstransfers zwischen sämtlichen an der Ereignisbewältigung Beteiligten hingewiesen werden. Verschiedene Kreise im In- und Ausland betonen immer wieder, dass wegen den häufigen Unklarheiten im fachgerechten Umgang mit batteriebetriebenen Unfallfahrzeugen der Wissensaustausch intensiviert und breiter abgestützt werden sollte: insbesondere bei Abschleppdiensten oder herkömmlichen Schrotthändlern bestehen zurzeit oftmals Unsicherheiten, sodass reibungslose und vor allem einheitliche Betriebsabläufe nicht immer gewährleistet sind (vgl. [77]). Dies birgt die Gefahr, dass sowohl der Transport, die Lagerung wie auch die Entsorgung von batteriebetriebenen Fahrzeugwracks nicht fachgerecht gestaltet wird und zusätzliche Risiken entstehen können (vgl. Abschnitte zu Personensicherheit und Umweltgefahren in Kapitel 5.1).

Aufgrund der erst wenigen Ereignisfälle ist die praktische Erfahrung im Umgang mit BEV-Bränden in unterirdischen Infrastrukturen noch nicht weit gereift. Und dennoch ist es wichtig, dass das bisherige, wenn auch spärliche Wissen gesammelt, aufbereitet und in Form

von «Best-Practices» den betroffenen Interessensgruppen vermittelt wird. Auf internationaler Ebene liegen teilweise Empfehlungen und Merkblätter für Feuerwehren vor, die jedoch den Fokus noch nicht auf mögliche Spätfolgen eines Brandereignisses richten und nicht spezifisch auf die Risiken in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen eingehen (vgl. [27]; [29]; [48]; [90]). Umso wichtiger ist es, dass wissenschaftliche Erkenntnisse aus angewandten Forschungsprojekten mit den Erfahrungen aus der Praxis vereint und zu praktikablen Massnahmenempfehlungen geformt werden.

### Muss die Anwendung von Wasser als Brandbekämpfungsmittel in geschlossenen Infrastrukturen überdacht werden?

Nein – Wasser bleibt das geeignetste Bekämpfungsmittel für einen BEV-Brand. Brennende Lithium-Ionen-Batterien können aufgrund der chemischen Eigenschaften jedoch nicht «gelöscht» werden. Während eines thermischen Durchgehens wird der für eine Verbrennungsreaktion erforderliche Sauerstoff durch das Kathodenaktivmaterial der Batteriezellen selbst gebildet, wodurch sich der Brand laufend selbst versorgt solange noch Kathodenaktivmaterial vorhanden ist. Eine Unterdrückung der Sauerstoffzufuhr durch Wasseraufbringung, selbst eine komplette Wässerung der gesamten Batterie, führt daher nicht zu einer Brandlöschung (vgl. auch [34]) – bereits beschädigte Zellen reagieren ab.

Brennende Traktionsbatterien können nur «gekühlt» werden, und Wasser gilt nach wie vor als bestes Kühlmittel für Lithium-Ionen-Batteriebrände. Die Brandbekämpfung mittels Wasser hat das Ziel, unbeschädigte Zellen einer Batterie wirksam zu kühlen und vor einem verzögerten thermischen Durchgehen zu bewahren. Das Problem allerdings, das einer effizienten Kühlung durch Wasser im Wege steht, ist die schwere Zugänglichkeit einer Traktionsbatterie in einem typischen Elektrofahrzeug. Eine mögliche Lösung sind spezielle, normalerweise geschlossene Luken am Fahrzeug, die geöffnet werden können und einer Feuerwehr die Wasserzufuhr direkt in den Batterieraum ermöglichen. Solche spezifischen Flutvorrichtungen sind bei durchschnittlichen BEV für den Strassenverkehr bislang nur beim Renault Zoe 50 bekannt (vgl. Abbildung 26).



**Abbildung 26 Rettungsdatenblatt Renault Zoe 50 mit Angabe des spezifischen Feuerwehrezugangs und der Empfehlung von Wasser als Bekämpfungsmittel ([69])**

In geschlossenen Räumen stehen in theoretischer Hinsicht bei der Brandbekämpfung von brennenden Lithium-Ionen-Batterien mit Wasser zwei Gefahren im Vordergrund: einerseits ist dies die potenzielle Wasserstoffanreicherung. Im vorliegenden Experiment konnten während des Versuchs mit Wassereintrag im unbelüfteten Versuchsraum jedoch keine kritischen  $H_2$ -Konzentrationen gemessen werden (vgl. Kapitel 3.4.2). Weil aber die Möglichkeit besteht, dass dies auf die versuchsbedingten Vorsichtsmassnahmen zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 3.5), darf nicht darauf geschlossen werden, dass die Wasserstoffakkumulation ein vernachlässigbares Risiko ist. Es ist eine chemische Tatsache, dass Lithium und Wasser zu gasförmigem Wasserstoff reagieren, sobald sie in direkten Kontakt kommen. Inwiefern dann zündfähige Mischungsverhältnisse in einem Raum entstehen, ist jedoch

von vielen Faktoren abhängig und lässt sich nicht vorhersagen. Aufgrund des grossen Schadenpotenzials müssen deshalb bei der Ereignisbewältigung eines BEV-Brandes in unterirdischen Infrastrukturen nach wie vor mit Akkumulationen von H<sub>2</sub> gerechnet und entsprechende Präventionsmassnahmen getroffen werden (Bsp. mobile Lüfter). Aus diesem Grund erscheint auch der Einsatz von sogenannten «Löschlanzen» zumindest in geschlossenen Räumen nicht empfehlenswert: bei dieser Löschtechnik werden die Lanzenspitzen in die Batteriezellen eingestossen und das Löschwasser in direkten Kontakt mit der Zellchemie gebracht, was unter Umständen zur Bildung kritischer Gasgemische führen kann.

Andererseits wird im Zusammenhang mit Wasser als Brandbekämpfungsmittel für Batteriebrände in verschiedenen, auch experimentellen Untersuchungen auf die potenzielle Gefahr durch Fluorwasserstoff (HF) hingewiesen (vgl. [16]; [34]; [55]; [82]). Das oftmals in Elektrolyten enthaltene Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat LiPF<sub>6</sub> reagiert mit Wasser zur sogenannten Flusssäure, die sowohl für Mensch als auch Umwelt sehr toxisch ist. Die Flusssäurebildung konnte aber im Vorgängerprojekt des vorliegenden Experiments nicht in kritischen Mengen nachgewiesen werden: Die Analysen aus dem ersten Experiment zeigten die Bildung von knapp 40 g HF/kWh ([59]). Diese Ergebnisse decken sich zwar mit den in Kapitel 2.2 beschriebenen Angaben aus anderen Studien, können aber zum jetzigen Kenntnisstand nicht als kritisch und auch nicht als validiert bezeichnet werden. Inwiefern sie auf das spezifische Versuchslayout (Bsp. Messanordnung, Luftverhältnisse im Versuchsraum) zurückzuführen sind, ist bislang unbekannt und müsste weiter untersucht werden. Aufgrund der Toxizität und des damit verbundenen Schadenpotenzials für Mensch und Umwelt sind aber, wie auch schon bei der Wasserstoffanreicherung, weiterhin angemessene Vorsichtsmassnahmen durch die Feuerwehr im Einsatzfall angezeigt (Bsp. Löschwasserrückhaltung, Lüftung).

### 5.3 Massnahmenempfehlung

Auf Basis der obigen Auswirkungsabschätzungen lassen sich unterschiedliche Handlungsempfehlungen ableiten. Diese betreffen primär organisatorische Massnahmen und lassen sich wie folgt nach ihrem Risikoeinfluss in absteigender Wichtigkeit strukturieren:

**Table 49** Massnahmen zur Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen

#	Massnahme	Art	Risikoeinfluss
1	Zwingender Rückhalt sowie umwelt- und fachgerechte Entsorgung von Löschwasser gemäss geltenden Vorgaben	organisatorisch / technisch	schadensmindernd
2	Definition eines sicheren Umgangs mit Kühlwasser und dringende Praxisumsetzung	organisatorisch	schadensmindernd
3	Vereinheitlichung des Übergabeprozesses für havarierte Traktionsbatterien	organisatorisch	schadensmindernd
4	Risikobasierte Standortwahl von Ladestationen in Parkhäusern	organisatorisch	präventiv
5	Berücksichtigung weitergehender Brandschutzmassnahmen in kleineren Infrastrukturen	technisch	präventiv / schadensmindernd
6	Integration neuer Antriebstechnologien in Risikomodelle	technisch	präventiv

#### Zwingender Rückhalt sowie umwelt- und fachgerechte Entsorgung von Löschwasser gemäss geltenden Vorgaben

Bei einem BEV-Brand anfallendes Löschwasser ist stark kontaminiert. Da die Konzentrationen von Lithium und der Schwermetalle Kobalt, Nickel und Mangan im Lösch- und Kühlwasser der Batteriemodule die anwendbaren bzw. derzeit verfügbaren Grenzwertkonzentrationen für die Einleitung in die Kanalisation um ein Vielfaches überschritten werden, muss eine entsprechende Vorbehandlung des Lösch- und Kühlwassers vor der Einleitung in andere Abwassermedien in der Praxis zwingend umgesetzt werden. Es wird daher dringend empfohlen, bei jedem BEV-Brand die Standardeinsatzregeln und Grundsätze für ABC-Einsätze anzuwenden und Abfälle sowie Abwasser gemäss den Vorgaben umwelt- und fachgerecht zu entsorgen (vgl. auch [31]; [32]). Auf Nationalstrassen mit vorhandener

SABA werden nach einem BEV-Ereignis der Havariebetrieb und eine Ereignisbewältigung gemäss geltendem Havariekonzept empfohlen (vgl. [5]).

### Definition eines sicheren Umgangs mit Kühlwasser und dringend Praxisumsetzung

In vielen europäischen Ländern lautet nach einem BEV-Brandereignis die aktuelle Praxisempfehlung: «Bergen, in Wasser eintauchen, kühlen und beobachten!». Manchmal werden hierfür speziell angefertigte Container für Feuerwehren eingesetzt<sup>4</sup>, manchmal kommen pragmatischere Lösungen zum Einsatz<sup>5</sup> (vgl. Abbildung 27). In jedem Fall ist aber mit beträchtlichen Mengen Kühlwasser (bis zu 20 m<sup>3</sup>) zu rechnen, das wie aufgezeigt wurde, sehr stark mit Schadstoffen belastet sein kann (vgl. Kapitel 4.3). So uneinheitlich die Methoden zurzeit noch sind, so wenig ist aktuell auch ein sicherer Umgang mit diesem angefallenen Kühlwasser definiert. Das muss geändert werden.



**Abbildung 27 Aktuelle Praxislösungen zur Kühlung von havarierten BEV-Wracks (Quellen siehe Fussnoten <sup>4</sup> und <sup>5</sup>)**

Zurzeit ist nämlich nicht abschätzbar, wo und durch wen auf solche Art gekühlte Unfallfahrzeuge gelagert werden. Aus Risikoüberlegungen ist anzunehmen, dass die Entsorgung des Kühlwassers nicht einheitlich gehandhabt und auch nicht immer fachgerecht entsorgt wird. Aufgrund der potenziellen Gefährdungen für Mensch und Umwelt ist es deshalb empfehlenswert, ein einheitliches Vorgehen für den Umgang mit wassergekühlten BEV-Wracks zu definieren. Die Prozesse des Transports sowie der Lagerung und insbesondere der Entsorgung müssen dabei in Form eines Leitfadens beschrieben und Verantwortungen klar zugewiesen werden. Es ist empfehlenswert, dass alle möglichen Beteiligten, d.h. Feuerwehren, Abschleppdienste, Autoverwerter, Schrotthändler etc., frühzeitig in die Erarbeitung der Empfehlungen eingebunden werden. So kann sichergestellt werden, dass die Definition eines sicheren Umgangs mit kontaminiertem Kühlwasser anschliessend beachtet und auch umgesetzt wird.

### Vereinheitlichung Übergabeprozess für havarierte Traktionsbatterien

Im Gegensatz zum Versuchsmaterial des vorliegenden Forschungsprojektes, sind Traktionsbatterien nach einem realen mechanischen oder thermischen Beschädigungsereignis, in den meisten Fällen nicht vollständig abreagiert und chemisch inert. Wenn Traktionsbatterien bei einem Fahrzeugbrand beispielsweise von den Einsatzkräften mit Wasser gekühlt wurden, können sich die Batteriezellen möglicherweise in einem vorübergehend supprimierten Zustand befinden. Frühere Versuche haben verdeutlicht, dass dieser Zustand von aussen betrachtet kaum verlässlich verifiziert werden kann (vgl. [59]). Studien belegen zudem, dass bei scheinbar stabilem Batteriezustand auch Stunden bis Tage nach einer Stresseinwirkung die exothermen Reaktionen wieder zu deutlichen lokalen Erwärmungen und somit zu einem erneuten Übergang in einen unkontrollierbaren Zustand führen können.

Das bedeutet, dass beschädigte aber nicht vollständig abreagierte Zellen einer Lithium-Ionen-Batterie wiederholt und ohne Vorzeichen gesundheitsschädliche Substanzen emittieren oder gar erneut aufflammen können. Im Weiteren besteht nach einem Unfallereignis

<sup>4</sup> <https://www.blubox.ch/download/firebox-flyer.pdf>

<sup>5</sup> <https://www.moto.ch/gefaehrliche-elektrofahrzeuge/>

mit Beteiligung eines Elektrofahrzeuges latent die Gefahr von elektrischer Spannung. Nicht vollständig abreagierte Batteriezellen können durchaus noch relevante Zellspannungen aufweisen, die sich besonders im Verbund mit anderen, möglicherweise noch intakten Batteriezellen, zu lebensgefährlichen Gleichspannungen akkumulieren können. Durch die beschädigte Batterie kann diese Gleichspannung auf Fahrzeugteile übertragen werden und so Personen gefährden, die in Kontakt mit den betroffenen Fahrzeugteilen kommen.

Aus Sicht der Einsatzkräfte ist es deshalb eminent wichtig, davon ausgehen zu können, dass von beschädigten Traktionsbatterien keine chemischen und elektrischen Gefahren mehr ausgehen (vgl. [21]). Zurzeit bestehen diesbezüglich aber noch keine einheitlichen Vorgehensweisen zur Risikobegrenzung. Einsatzkräfte aber auch Abschleppdienste und Fahrzeugverwerter werden momentan zur generellen Vorsicht mit havarierten Traktionsbatterien und Autowracks aufgerufen (vgl. [13]; [20]; [26]; [28]; [57]). Aufgrund fehlender Erfahrungen und Vorgaben können aktuell unterschiedliche Auffassungen über den korrekten Umgang mit beschädigten chemischen Energiespeichern und ein gewisses Mass an Verunsicherung vorgefunden werden.

Bezüglich der Übergabe und Weiterbehandlung von havarierten Traktionsbatterien und Elektrofahrzeugen ist es ein Bedürfnis aller Betroffenen, mehr Klarheit und auch Rechtssicherheit zu schaffen. Der Berufsverband Auto-Strassenhilfen-Schweiz (ASS) hat in Zusammenarbeit mit Feuerwehren, Polizeien, Versicherern, Verwertern und Entsorgern eine Empfehlung für den Umgang mit BEV-Fahrzeugen und einen Übergaberapport lanciert. Und auch in einer aktuellen Studie der Berner Fachhochschule zur Technologiefolgenabschätzung von lithiumhaltigen Batterien ([94]) wurden zwar bereits Empfehlungen für deren fachgerechten Umgang, auch während der Entsorgung formuliert. Diese sind allerdings allgemeiner Natur und bedürfen je nach Anwendungsfall weiterer Abklärungen. Für Einsatzkräfte fehlen somit weiterhin allgemein akzeptierte, praktische Handlungsanweisungen in Form von dokumentierten Prozessabläufen. Die folgenden Massnahmen können einen Beitrag zur Schadensminderung nach einem Ereignis beitragen und werden zur Umsetzung empfohlen:

- Formulierung von konkreten, szenariobasierten Handlungsabläufen für den sicheren Transport vom Ereignisort und die fachgerechte Entsorgung durch Einsatzkräfte
- Definition der dafür erforderlichen Kompetenzen aller Beteiligten

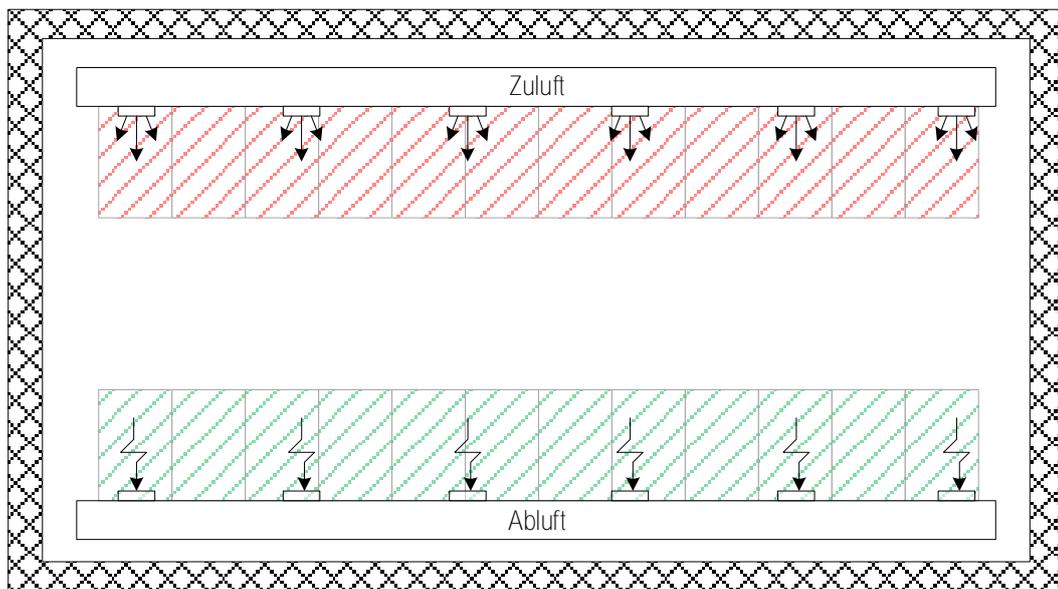
Ein standardisiertes Vorgehen zur endgültigen Unschädlichmachung von beschädigten Traktionsbatterien erhöht die Sicherheit grundsätzlich. Sie hat zudem das Potential Einsatzzeiten zu verkürzen, die Freigabe des Schadenplatzes schneller zu ermöglichen und damit die Verfügbarkeit von beeinträchtigten Strassenabschnitten innert kürzerer Fristen wiederherstellen zu können.

### **Risikobasierte Standortwahl von Ladestationen in Parkhäusern**

Während des Ladeprozesses – genauso während der Entladung – ist eine Lithium-Ionen-Batterie chemisch gesehen dauernd in Bewegung: Lithium-Ionen wandern vom Aktivmaterial der Kathode zur Anode und lagern sich dort im Graphit ab ([91]). Bei diesem Prozess wird Wärme freigesetzt, so dass die Batterie dauernd durch das übergeordnete Batteriemagementsystem thermisch überwacht und geregelt werden muss ([92]). Im Vergleich zu einer ruhenden Batterie bestehen insbesondere in diesem Vorgang mehrere Risiken, die ein thermisches Durchgehen provozieren können (nach [7]):

- Ladung einer bereits beschädigten Batterie
- zu hohe Ströme bei Ladung oder Entladung (unabhängig von Ladeleistung)
- Überladung, Tiefentladung (unabhängig von Ladeleistung)
- Ungleichmässige elektrische Zellladungsverteilung
- Ladung bei kalter Umgebung (<0 °C) und hohen Strömen
- mechanische Einwirkungen (Vibrationen, Schläge)
- Überhitzung, Kälte, Nässe
- Kurzschlüsse

Weil der Ladeprozess von BEV insbesondere in unterirdischen Infrastrukturen mit besonderen Risiken behaftet ist, sollten zweckmässige Massnahmen zur Schadensprävention ergriffen werden. Die wichtigste davon ist die Standortwahl von Ladestationen in Parkhäusern unter einem Sicherheitsaspekt. Ideale Standorte für Parkfelder mit Ladestationen zeichnen sich generell durch das Vorhandensein einer schnellen Entrauchungsmöglichkeit im Brandfall aus, sodass eine Kontamination durch die neuartigen Schwermetallemissionen frühzeitig eingedämmt werden kann. Parkfelder mit Ladestationen sollten deshalb bei Vorhandensein einer Rauch- und Wärmeabzugsanlage in der Nähe der Abzugsvorrichtungen angeordnet werden. Sofern im Brandfall keine maschinelle Entrauchung vorgesehen ist, sind Ladestationen im Bereich der Fortluft zu platzieren. Standorte in der Nähe von Fluchtwegen und Liftschächten und generell in tiefergelegenen Parkebenen sind unter diesem Sicherheitsaspekt grundsätzlich nicht zu empfehlen (vgl. Abbildung 28).



**Abbildung 28 Geeignete (grün) und nicht geeignete (rot) Standorte für Parkfelder mit Ladestationen ([88])**

Die Erfahrung, aber auch Beobachtungen aus dem Alltag zeigen, dass diese einfachen Grundsätze häufig nicht umgesetzt sind. Der Grund hierfür liegt vielfach in der nachträglichen Ausrüstung von Parkhäusern mit Ladestationen und der damit verbundenen wirtschaftlichen Entscheidungskriterien. Oftmals werden Ladestationen dort platziert, wo die kürzesten Kabelwege zu einer bereits bestehenden Elektroverteilung ausgenutzt werden können. Mit dieser ausschliesslich monetären Betrachtungsweise wird aber ausser Acht gelassen, dass diese Standorte nicht zwingend auch aus Risikoüberlegungen ideal sind. Es wird deshalb empfohlen, dass für die Anordnung von Parkfeldern mit Ladestationen neben ökonomischen Zielsetzungen auch Sicherheitsaspekte massgebend sein sollen. Im Falle von Zielkonflikten zwischen Aspekten der Wirtschaftlichkeit, Benutzerfreundlichkeit und Sicherheit sollte durch Infrastrukturbetreiber immer eine sorgfältige Interessensabwägung vorgenommen werden ([88]).

#### **Berücksichtigung weitergehender Brandschutzmassnahmen in kleineren Infrastrukturen**

Unterirdische Verkehrsinfrastrukturen müssen aufgrund der zunehmenden Elektromobilität nicht grundsätzlich umgerüstet werden - weder grosse noch kleine. Die thermischen Auswirkungen eines BEV-Brandes sind vergleichbar mit jenen eines ICEV-Brandes und auch die zusätzlichen chemischen Risiken können mit den bereits zur Verfügung stehenden technischen Einrichtungen und Praktiken bewältigt werden.

Und dennoch sollten Betreiber von kleineren Infrastrukturen ihre aktuellen Brandschutzmassnahmen mit Blick auf die vorliegenden Erkenntnisse kritisch hinterfragen. Die gesetzlich vorgeschriebenen Massnahmen gehen nämlich immer noch von einer konventionellen Verkehrszusammensetzung aus und lassen neue Antriebs- und Energiespeichertechnologien gänzlich unberücksichtigt (vgl. Kapitel 2.4). Gerade bei Parkhäusern in urbanen Gebieten mit potenziell hohem BEV-Anteil, kann eine strikte Befolgung der gesetzlich vorgeschriebenen Massnahmen, unter Umständen, zu kurz greifen. Zur besseren Beherrschung der Risiken wird daher empfohlen, dass Infrastrukturbetreiber – immer objektspezifisch – auch Brandschutzmassnahmen in die Betrachtungen miteinbeziehen, die allenfalls über die geltenden kantonalen und eidgenössischen Vorgaben hinausgehen. Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Parkhauses, können insbesondere die folgenden, präventiven und schadensmindernden Massnahmen als zweckmässig erachtet werden:

- Brandmelder über Parkfeldern für Elektrofahrzeuge zur schnelleren Lagebeurteilung im Ereignisfall (typischerweise befinden sich dort auch Ladestationen)
- Automatische Inbetriebsetzung einer Rauch- und Wärmeabzugsanlage via lokale Brandmelder über Parkfeldern mit Ladestationen zur frühestmöglichen Verhinderung einer Ausbreitung batteriespezifischer Emissionen
- Implementierung BEV-spezifischer Betriebsprozesse zwecks frühzeitiger Risikoerkennung (Bsp. Inspektion von Ladestationen, Betriebsrundgänge, Sensibilisierung Betriebspersonal auf die spezifischen Brandgefährdungen durch Elektrofahrzeuge, Information Ladestationsnutzer auf korrekte Handhabung von Ladestationen)
- Thermische Kontrolleinrichtung an Einfahrten zur Früherkennung von überhitzten Traktionsbatterien (analog Thermoportal am Gotthard-Strassentunnel<sup>6</sup>)

#### **Integration neuer Antriebstechnologien in Risikomodelle**

Die systematische Risikoanalyse für Strassentunnel ist international sehr etabliert und wird auch in der Schweiz mit breit abgestützten Inputparametern angewandt (vgl. [3]; [6]). Historisch bedingt werden jeweils aber nur Ereignisse von konventionellen Fahrzeugen mit fossilen Treibstoffen und Gefahrgütertransporten berücksichtigt. Die spezifischen Risiken, die sich nun durch den steigenden BEV-Anteil aber auch durch alternative Antriebs- und Speichertechnologien zukünftig ergeben werden (Bsp. Wasserstofffahrzeuge, Erdgasfahrzeuge) bleiben vorerst unbeachtet. Im Fokus stehen hierbei die im vorliegenden Projekt nachgewiesenen toxischen Emissionen aber auch potenzielle Gasfreisetzungen ohne Brandentwicklung oder Gasexplosionen. Damit Risikoanalysen zeitgemäss bleiben, müssen sie den aktuellen Stand der Technik in der Mobilitätsentwicklung berücksichtigen, ansonsten können Veränderungen in der Risikolandschaft nicht mehr abgebildet werden. Auch der Weltstrassenverband PIARC<sup>7</sup> empfiehlt daher in seiner Forschungsstrategie, die folgenden Aspekte vertiefter zu untersuchen und in die bestehenden Risikoanalysemodelle zu implementieren (vgl. [66]):

- Definition neuer Szenarien einschliesslich neuer Antriebs- und Speichertechnologien
- Berücksichtigung neuer Inputparameter für die neuartigen Substanzen, insbesondere Schwermetalle (Co, Ni, Mn), Fluorwasserstoff (HF) und Phosphin (PH<sub>3</sub>)
- Wahrscheinlichkeitsermittlung für die neuen Szenarien
- Folgenabschätzung für die neuen Szenarien

<sup>6</sup> <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-60226.html>

<sup>7</sup> <https://www.piarc.org/en/>

## 6 Weiterer Forschungsbedarf

Mit dem vorliegenden Forschungsprojekt konnten mit einer systematischen und auf wissenschaftlichen Grundsätzen basierenden Vorgehensweise verschiedene Aspekte im Spannungsfeld Elektromobilität und Infrastruktursicherheit untersucht werden. Die Erkenntnisse sensibilisieren sowohl Betreiber von Verkehrsinfrastrukturen auf die mögliche Veränderung der Gefährdungssituation, unterstützen aber auch Einsatzkräfte in der Ereignisbewältigung. Obschon die ursprüngliche Hypothese über die nachhaltigen Sicherheits- und Betriebsauswirkungen nicht bestätigt werden konnte, so wurden im Verlauf des Experimentes dennoch neue Themenfelder aufgedeckt, die in weiteren Schritten vertiefter untersucht werden sollten.

### 6.1 Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen

Erfahrungen mit Ereignissen auf Hochseefähren haben gezeigt, dass der Einsatz von Hochdruckwassernebelanlagen bei Elektrofahrzeugbränden besonders geeignet erscheint. Das Bekämpfungsmittel verteilt sich gut im Raum und hat überdies die Eigenschaft, in verdeckte Räume und Stellen einzudringen ([74]). Gerade die sicherheitsbedingt schwere Zugänglichkeit der Traktionsbatterien behindert eine effiziente Eindämmung eines thermischen Durchgehens, weil das Kühlmittel nicht bis zum Brandherd gebracht werden kann ([34]). Bei Hochdruckwassernebelanlagen wird nun vermutet, dass aufgrund der geringen Tröpfchengrößen sowie der lokal inertisierenden und kühlenden Wirkung des Wassernebels, ein Übergreifen und damit eine Ausweitung eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes sowie potenzielle Kontaminationen eingedämmt werden könnten. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Dichte an Lithium-Ionen-Speichern sowohl in mobilen als auch stationären Anwendungen und aufgrund der Tatsache, dass Hochdruckwassernebelanlagen wirksame Sicherheitseinrichtung gegenüber Lithium-Ionen-Batteriebrände sein könnten, scheint eine vertieftere Untersuchung empfehlenswert.

Hochdruckwassernebelanlagen sind in schweizerischen, unterirdischen Infrastrukturen noch nicht weit verbreitet; in Strassentunneln sind sie grundsätzlich gar nicht vorgesehen. Im internationalen Kontext werden Hochdruckwassernebelanlagen aber vereinzelt für den Bauwerksschutz von spezifischen Tunneln als mögliches Ausstattungsmerkmal in die Sicherheitsbetrachtungen miteinbezogen ([40]; [66]). Beispiele aus dem angrenzenden Ausland sind hierfür der Arlbergtunnel, der Mona Lisa Tunnel und der Felbertauerntunnel in Österreich sowie der Virgolo Tunnel in Italien. Die risikobezogene Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen bleibt aber in Fachkreisen umstritten, weil sie passgenau in die bestehende Systemlandschaft integriert werden müssen – und in Bezug auf Elektrofahrzeugbrände in unterirdischen Infrastrukturen (Bsp. Strassentunneln, Parkhäusern) wurde sie noch nicht detailliert untersucht. Es bleibt somit unklar, ob und inwiefern sich diese Anlagen auf den Brandverlauf von batteriebetriebenen Fahrzeugen auswirken können.

Betreffend die Sicherheit in unterirdischen Infrastrukturen soll deshalb mit spezifischen Fahrzeugbrandversuchen geprüft werden, ob die angebliche Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen gegen Elektrofahrzeugbrände ihren Einbau in bestimmten Infrastrukturen aus risikobezogener Sicht rechtfertigt und sie mindestens objektspezifisch als Sicherheitseinrichtung empfehlenswert sind (Bsp. urbane Strassentunnel mit hohem Verkehrsaufkommen, bedeutsame Parkhäuser, stationäre Speicheranlagen).

### 6.2 Risikofolgeabschätzung der Wasserstoffmobilität für Strasseninfrastrukturen

Die vorliegenden Resultate illustrieren, dass sich die Risikolandschaft in unterirdischen Infrastrukturen aufgrund der zunehmenden Elektromobilität verändern wird. Neben den hier untersuchten, rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen werden insbesondere dem Elektrofahrzeug mit Brennstoffzelle – das auch mit einer Traktionsbatterie ausgerüstet ist – sehr günstige Voraussetzungen für die Zukunft zugesprochen ([65]). Auch wenn die Marktdurchdringung von Brennstoffzellenfahrzeugen zurzeit noch nicht sehr ausgeprägt

ist, so ist die technische Reife betreffend Leistung, Funktionalität, aber auch Sicherheit mittlerweile weit fortgeschritten. Hinzu kommt, dass die Reichweiten der Fahrzeuge, deren Energie in Form von Wasserstoff gespeichert und mittels Brennstoffzellen zu elektrischer Antriebsenergie umgewandelt werden, laufend optimiert werden und im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen grösser sind. Der Grund hierfür liegt in der deutlich höheren Energiedichte von Brennstoffzellensystemen, weshalb generell von einer Zunahme dieser Antriebsform auszugehen ist ([1]).

Aufgrund dieser technischen Vorteile und weiterer Umweltaspekte muss davon ausgegangen werden, dass die Wasserstoffmobilität auch in der Schweiz zumindest in spezifischen Anwendungsgebieten zunehmen wird ([9]), auch wenn der Aufbau einer zwingend erforderlichen Betankungsinfrastruktur in der Schweiz zurzeit noch ausstehend ist. Das Potenzial für diese nachhaltige Mobilität wird insbesondere bei schweren Nutz- und Lastfahrzeugen vermutet, die auf lange Reichweiten angewiesen sind und die sehr hohen Energiedichten des Wasserstoffs ausnutzen können. Weil Brennstoffzellenfahrzeuge lokal keine Emissionen ausstossen, ist es zudem naheliegend, dass solche Fahrzeuge für Anwendungen in geschlossenen Räumen, beispielsweise in Bereichen der Logistik oder in grossen unterirdischen Infrastrukturen zum Einsatz kommen werden. Unter diesen Annahmen und vor dem Hintergrund aktueller Mobilitätsentwicklungen weltweit (zunehmende Verlagerung des Verkehrs in unterirdische Infrastrukturen, [11]), müssen für eine volkswirtschaftliche Gesamtbetrachtung neben Potenzial- aber unbedingt auch Risikofolgenabschätzung unternommen werden.

Im aktuellen Positionspapier des Bundesamtes für Energie (BFE) wird genau darauf hingewiesen ([9]): die Wasserstoffmobilität würde in den verschiedenen Szenarien der Energiestrategie 2050 des Bundes nicht ausreichend berücksichtigt und zudem fehlt momentan die Datengrundlage für gesamtwirtschaftliche Kostenbetrachtungen. Es wird erwähnt, dass noch «(...) keine klaren Vorstellungen, welche Rolle diese Technologie in den nationalen Energieszenarien spielen könnte (...)» ([9]) vorhanden sind und dass das mittel- und langfristige Potenzial noch nicht umfassend geklärt ist. In den Argumenten für den Einsatz von Wasserstoff in der Mobilität werden über mögliche Risikofolgen keine Aussagen gemacht. Obschon bei Wasserstoff theoretisch ein erhebliches Schadenspotenzial besteht, wenn sich zündfähige Gemische in geschlossenen Räumen anreichern ([34]; [38]), liegen hierfür noch keine belastbaren Einschätzungen oder gar mögliche Praxismassnahmen vor. Aus Sicht von Strasseninfrastrukturbetreibern lassen sich diesbezüglich aber bereits heute die folgenden Fragestellungen erörtern:

- Welche strasseninfrastrukturbezogenen Risikoszenarien entstehen durch eine zunehmende Wasserstoffmobilität?
- Mit welchen Risiken und Schadenspotenzialen ist insbesondere in unterirdischen oder geschlossenen Verkehrsinfrastrukturen mit starkem Verkehr oder hoher Personenbelegung zu rechnen?
- Welche präventiven und schadensmindernden Massnahmen erscheinen für Betreiber von Strasseninfrastrukturen zweckmässig?
- Sind infrastrukturelle Anpassungsmassnahmen im Falle einer zunehmenden Wasserstoffmobilität erforderlich?

Solange die potenziellen Sicherheitsauswirkungen einer zunehmenden Wasserstoffmobilität auf den Betrieb von Strasseninfrastrukturen unbekannt bleiben, werden sie für Betreiber ein schwer kalkulierbares Risiko darstellen. So decken sich die obigen Fragestellungen auch mit dem Forschungsschwerpunkt Nr. 9 der Arbeitsgruppe «Brücken, Geotechnik und

Tunnel» des ASTRA<sup>8</sup> und sind überdies in der Forschungsstrategie des Weltstrassenverbands PIARC<sup>9</sup> berücksichtigt. Die offenen Aspekte sollten mit geeigneten Untersuchungen und mit Bezug zu den schweizerischen Mobilitätsverhältnissen geklärt werden, sodass spezifische Massnahmenempfehlungen für die schweizerische Verkehrsinfrastruktur abgeleitet werden können. Zur Schaffung einer verlässlichen Datengrundlage werden experimentelle und szenariobasierte Untersuchungen empfohlen.

### 6.3 Risiken durch stationäre Speicheranlagen

Brände von Elektrofahrzeugbatterien sind nicht löschar. Genauso verhält es sich auch mit stationären Lithium-Ionen-Speichern, die vermehrt als Energiepufferlösung für Photovoltaiksysteme in Gebäuden eingesetzt und typischerweise in unterirdischen Geschossen platziert werden. Und weil sie häufig im Zuge einer Nachrüstung installiert werden, befinden sie sich oftmals in einem aus Sicherheitsicht nicht idealen Raum. Sowohl die eingesetzte Technologie als auch das Umfeld dieser stationären Speicheranlagen sind somit unter einem Risikoaspekt mit dem vorliegenden Forschungsprojekt vergleichbar. Aufgrund der Versuchsergebnisse scheint es daher naheliegend, dem Thema Sicherheit nicht nur im Zusammenhang mit der zunehmenden Elektromobilität, sondern allgemein für chemische Energiespeicher in geschlossenen oder nicht optimal belüfteten Infrastrukturen eine grössere Beachtung zu geben (vgl. auch [12]).

Dieses Themengebiet soll mit einem aussagekräftigen Experiment untersucht werden. Unter Berücksichtigung der aktuellen Speichertechnologien ist insbesondere den folgenden Fragestellungen mittels spezifischer Versuche in einer realitätsnahen Umgebung nachzugehen:

- Welche Risiken bestehen für Gebäudenutzer und Gebäudebetreiber?
- Existieren zweckmässige Detektionsmöglichkeiten?
- Welche technischen Brandbekämpfungsmöglichkeiten bieten sich an (Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen, vgl. Kapitel 6.1)?
- Was sind konkrete Empfehlungen für die Ereignisbewältigung?

---

<sup>8</sup> [https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/forschung\\_im\\_strassenwesen/forschungsschwerpunkte.pdf.download.pdf/Forschungsschwerpunkte%202020-2024.pdf](https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/forschung_im_strassenwesen/forschungsschwerpunkte.pdf.download.pdf/Forschungsschwerpunkte%202020-2024.pdf)

<sup>9</sup> <https://www.piarc.org/ressources/documents/Technical-Committees-2016-2020-Terms-of-Reference/8b6e056-32562-Terms-of-Reference-TC-4.4-TUNNELS.pdf>



# Anhänge

<b>I</b>	<b>Konzept Voranalysen</b> .....	<b>75</b>
I.1	Angewendete Probenahme- und Analysemethoden .....	75
<b>II</b>	<b>Analysenkonzept Experiment</b> .....	<b>77</b>
II.1	Untersuchungs- und Probenahmekonzept .....	77
II.1.1	Wischproben und Brandruss-Sammelproben (Module 1 und 3) .....	77
II.1.2	Textilmuster (Modul 1).....	78
II.1.3	Löschwasserproben (Modul 2) .....	78
II.1.4	Kühlwasserproben (Modul 2).....	78
II.1.5	Korrosions-Monitoring (Modul 1).....	78
II.1.6	Elektronik-Testvorrichtung (Modul 1) .....	79
II.1.7	Messung der Brandtemperaturen (Module 1 bis 3) .....	80
II.1.8	Klima-Monitoring (Module 1 bis 3) .....	80
II.1.9	Orientierende Werkstoffcharakterisierung Batteriemodul (Modul 4).....	80
II.2	Angewendete Probenahmemethoden.....	80
II.2.1	Wischproben.....	80
II.2.2	Feststoffproben .....	81
II.2.3	Löschwasserproben .....	81
II.3	Angewendete Analysemethoden .....	81
II.3.1	Anionen-Analytik (Feststoffe und Wasserproben) .....	81
II.3.2	Kationen-Analytik (Feststoffe und Wasserproben) .....	81
II.3.3	PAK-Analytik (Feststoffe) .....	82
II.3.4	PCDD/F- und PCB-Analytik (Feststoffe) .....	82
II.3.5	PAK-, PCDD/F- und PCB-Analytik (Wasserproben).....	82
II.3.6	Halbquantitative Element-Analytik (Feststoffe).....	82
II.3.7	Orientierende Werkstoff-Analytik (Batteriemodul) .....	83
<b>III</b>	<b>Probenverzeichnisse</b> .....	<b>85</b>
III.1	Batteriemodul 1 .....	85
III.2	Batteriemodul 2.....	87
III.3	Batteriemodul 3.....	88
<b>IV</b>	<b>Klimamonitoring</b> .....	<b>89</b>



# I Konzept Voranalysen

## I.1 Angewendete Probenahme- und Analysemethoden

### **Wischproben (WP-1)**

Eine repräsentative Oberfläche mit definierten Abmessungen wird mit zwei mit deionisiertem Wasser angefeuchteten Watte pads gründlich gereinigt. Die Watte pads werden bis zur Analyse im Labor in einem verschlossenen Kunststoffbeutel aufbewahrt.

Das orientierende, semiquantitative Element-Screening erfolgt direkt am Watte-pad mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie (siehe unten).

Im Labor werden die Proben mit deionisiertem Wasser extrahiert. Die Bestimmung der Anionen- und Kationen-Konzentrationen erfolgt mittels Kapillarelektrophorese (Empa-SOP Nr. 03'043).

### **Materialproben (MP-1 bis MP-5; Blindprobe MP-0)**

Eine Sammelprobe der Oberflächenverschmutzung (im vorliegenden Fall: Brandrusrückstände und eine Blindprobe von betrieblichen Staubablagerungen) wird von einer repräsentativen Oberfläche mit einem geeigneten, sauberen Werkzeug (im vorliegenden Fall mittels Stahlbürste) trocken entnommen. Die Sammelprobe wird bis zur Analyse im Labor in einem verschlossenen Kunststoffbeutel aufbewahrt. Probenaufbereitung: Zerkleinerung/Homogenisierung und Extraktion der Fraktion <0.125 mm (Siebung).

Die orientierenden, semiquantitativen Element-Screenings erfolgen an den aufbereiteten Materialproben mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie (ED-XRF) in Anlehnung an Empa-SOP Nr. 03'850. Die Analysen erfolgen mit einem Gerät des Typs "NITON XL5" (Thermo Fisher Scientific) im Messmodus „MINING“ (Filter-Konfiguration / Messzeit = Main-Low-High-Light / 45-45-45-45 sec).

Im Labor werden die Proben mit deionisiertem Wasser extrahiert. Die Bestimmung der Anionen- und Kationen-Konzentrationen erfolgt mittels Kapillarelektrophorese (Empa-SOP Nr. 03'043).



## II Analysenkonzept Experiment

### II.1 Untersuchungs- und Probenahmekonzept

#### II.1.1 Wischproben und Brandruss-Sammelproben (Module 1 und 3)

##### Art und Anzahl Probenahme-Kollektoren

- Bleche aus nicht rostendem Stahl 1.4401 (walzblank; Blechdicke: 1.5 mm)
- 1 Stk. (50 x 120 cm) und 2 Stk. (50 x 90 cm) pro Probenahme-position

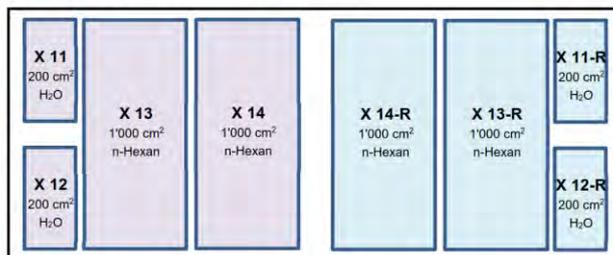
##### Positionierung Probenahme-Kollektoren Modul 1:

- Positionierung im Stollen A: UK Kollektoren ca. 1.0 und 3.0 Meter über Boden (Seite Stahltor)
- Ausrichtung: 45° geneigt (Richtung Experiment)
- Montage an horizontal, im Gewölbe verankerten Kanthölzern (je 2 Stk.)

##### Positionierung Probenahme-Kollektoren Modul 3:

- Positionierung im Stollen B: UK Kollektoren ca. 3.0 Meter über Boden / 3 Positionen: Ausgang Stollen A, Höhe Ventilator Stollen B, Ausgang Stollen B
- Ausrichtung: 45° geneigt (Richtung Experiment)
- Montage z.B. an horizontal, im Gewölbe verankerten Kanthölzern (je 2 Stk.)
- vgl. Abbildung 11

##### Kollektor Xa (Inox 1.4401; 50 x 120 cm):



[R-Proben = Rückstellmuster]

##### Kollektoren Xb und Xc (Inox 1.4401; je 50 x 90 cm):

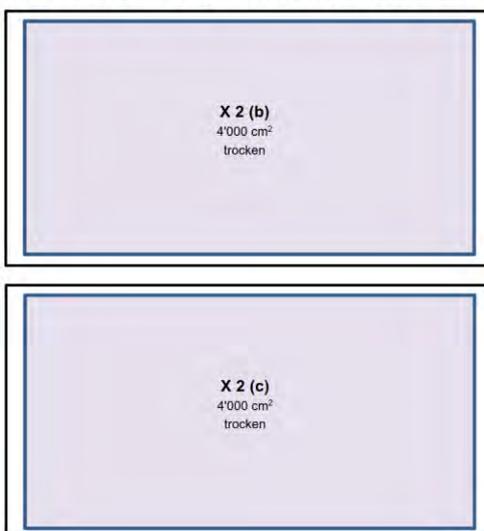


Abbildung 29 Probenahmeschema Wischproben und Brandruss-Sammelproben (Kollektoren)

#### **Bezeichnung der Kollektoren**

- Modul 1: Aa/Ab/Ac (h = 3.0 m) und Ba/Bb/Bc (h = 1.0 m)
- Modul 3: Ca/Cb/Cc (d = 50 m), Da/Db/Dc (d = 100 m) und Ea/Eb/Ec (d = 150 m)

#### **Zusätzliche Wischproben von Ventilator**

- Modul 3: ein komplettes zusätzliches Wischproben-Set wurde vom vorgängig gereinigten Ventilatorgehäuse (d = 55 m) entnommen

### **II.1.2 Textilmuster (Modul 1)**

#### **Art und Anzahl Muster**

- Fw-Einsatz-Jacken (2 Stk.)
- Material gereinigt: 93% m-Aramid (Nomex), 5% p-Aramid (Kevlar), 2% P140 (Carbon)

#### **Positionierung Textilproben**

- Positionierung im Stollen A: Abstand > 5m von Batterie, auf ca. 0.8-1m Höhe (Seite Stahltor)
- Ausrichtung: horizontal (Rückenteil gegen oben gerichtet)
- Montage: auf Holzpalette

#### **Beprobung**

- Wischproben, Entnahme in kontaminiertem und gereinigtem (Standardreinigung Schutz & Rettung Zürich) Zustand entsprechend Kap. 2.1

### **II.1.3 Löschwasserproben (Modul 2)**

#### **Art und Anzahl Sammelbehälter**

- Kunststoff-Sammelbehälter (>200 Liter)

#### **Positionierung Sammelbehälter**

- Positionierung: unterhalb Löschbrause
- Montage: auf Stollenboden

#### **Hilfsinstrumente für Probenahme**

- Akku-Bohrmaschine
- Grosser Rührstab für Farben

### **II.1.4 Kühlwasserproben (Modul 2)**

#### **Batterie-Abkühlbehälter**

- Kunststoff-Box mit Deckel
- Lagerung des abgebrannten Batterie-Moduls (inkl. Stahlplatte) vom 09.12.2019 bis 10.01.2020 in Wasser des Typs «0W» (Wasservolumen gesamt: ca. 56 x 37 x 20 cm = ca. 42'000 cm<sup>3</sup>)

#### **Hilfsinstrumente für Probenahme**

- Akku-Bohrmaschine
- Grosser Rührstab für Farben

### **II.1.5 Korrosions-Monitoring (Modul 1)**

Um den korrosiven Einfluss der Brandgase auf verschiedene metallische Werkstoffe zu charakterisieren, wird ein Auslagerungsversuch mit verschiedenen Metallproben durchgeführt. Nach der Exposition gegenüber den Brandgasen werden die Metallproben bei 90% rLF während 1 und 3 Monaten gelagert. Anschliessend werden die Metallproben visuell und korrosionschemisch untersucht. Mittels gravimetrischer Messungen wird die korrosionsbedingte Abtragsrate ermittelt.

**Tabelle 50 Bestückung Monitoring-Racks**

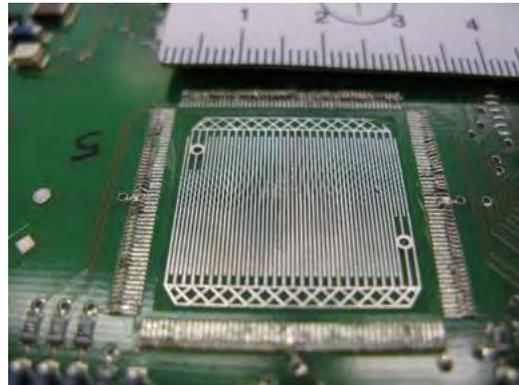
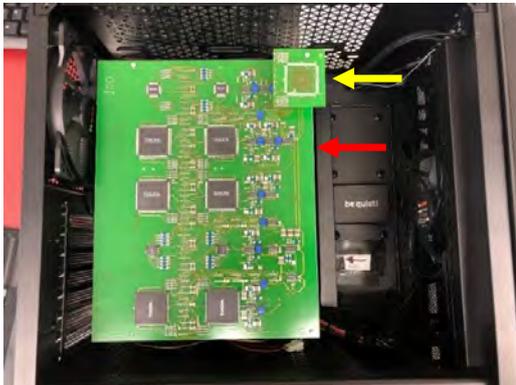
Proben-Nr.	Werkstoff	Probentyp	Werkstoff-Nr.	Dimension (mm)
1	Kohlenstoffstahl unlegiert	Platten	1.0660	100 x 50 x 1
2	Zink 99.9%	Platten	-	100 x 50 x 1
3	Kupfer 99.9%	Platten	-	100 x 50 x 1
4	Aluminium-Leg. AlMgSi1 (Anticorodal-100)	Platten	3.2315	100 x 50 x 1
5	nichtrostender Stahl	Platten	1.4404	100 x 50 x 1

**Positionierung Korrosions-Monitoring Modul 1**

- Positionierung im Stollen A: UK Alu-Rahmen (1x1 Meter) ca. 1 m über Boden (Seite Stahltor)
- Ausrichtung: Alu-Rahmen horizontal / Metallproben 45° geneigt (Richtung Experiment)
- Montage auf Holzpalette
- vgl. Abbildung 11

**II.1.6 Elektronik-Testvorrichtung (Modul 1)****Art und Anzahl Vorrichtung**

- 7 Testleiterplatten Topline (ascom L54927) im PC-Gehäuse Pur Base 500 mit 2 Lüftern (Pure Wing 2, 140 mm, je 104m<sup>3</sup>/h)
- Optische Inspektion und elektrische Charakterisierung (SIR Surface Insulation Resistance) vor und nach Brandversuch
- Isolationsmessgerät METRISO 1000V (Metrawatt GmbH, Empa M21434)
- Durchführung Initialmessung:
  - Reinigung der PCBs mit Druckluft
  - Widerstandsmessung der 6 SIR Messrechen pro Leiterplatte mit 500 VDC
  - Laborbedingungen, Temperatur 23°C



**Abbildung 30 Elektronik-Testvorrichtung Modul 1: Testleiterplatte im PC Gehäuse, roter Pfeil zeigt Durchströmungsrichtung, gelber Pfeil zeigt freiliegender SIR Einzel-Messrechen (links) und SIR Messrechen unter Chips, der Abstand der Messfinger beträgt 0.2 mm (rechts)**

**Positionierung der Vorrichtung**

- Positionierung im Stollen A: 1 m Höhe über Boden, 5 m Abstand zum Zellblock (Seite Stahltor)
- Montage auf Holzpalette
- Beim Brandversuch laufen beide Lüfter im PC-Gehäuse

## II.1.7 Messung der Brandtemperaturen (Module 1 bis 3)

Mit robusten 4.5 mm Mantelthermoelementen Typ K und einem Multiplexer-Datenerfassungssystem Keithley 2700 wurden Temperaturen in und um die Batterie erfasst. Die Positionierung der Thermoelemente wurde an die jeweiligen Versuchsbedingungen angepasst. Die Abtastrate der Messungen ist abhängig von der Anzahl der erfassten Kanäle. Bei Modulen 1 und 2 betrug die Abtastrate 8, bei Modul 3 lag sie bei 10 Messungen / Minute.

### Equipment

- Multichannel data acquisition system Keithley 2700
- Data Acquisition software Labview, program TDL, V1.3.6
- Laptop HP Probook 6570b, Empa Inv. Nr. 4674



Abbildung 31 Zwei Mantelthermoelemente mit Messspitze im Zentrum des Batteriemodules

## II.1.8 Klima-Monitoring (Module 1 bis 3)

### Standort Klima-Monitoring

Tragkonstruktion Kollektorbleche (oben)

### Erfassungszeitraum

9. Dezember (12:00) bis 12. Dezember (08:15) 2019

### Methodik

Zur Anwendung kamen Temperatur-/Feuchte-Logger des Typs „iButton“ der Firma Thermochron:

- programmierte Datenerfassungskadenz: 1 Minute
- Aufzeichnungsdauer: 3 Tage

## II.1.9 Orientierende Werkstoffcharakterisierung Batteriemodul (Modul 4)

Mittels zerstörungsfreier energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (ED-XRF) wurden die chemischen Zusammensetzungen der im Batteriemodul verbauten Werkstoffe (Metalle und Kunststoffe) – soweit ohne Zerlegung des Moduls möglich – orientierend analysiert.

Zur Anwendung kam ein Gerät des Typs "NITON XL2" (Thermo Fisher Scientific, Billerica, MA 01821). Die Elementgehalte wurden in den Messmodi "ALLOYS" und "PLASTICS" analysiert.

## II.2 Angewendete Probenahmemethoden

### II.2.1 Wischproben

### **Wischproben 1 (anorganische Analytik)**

Auf der Kollektorblech- bzw. Textil-Oberfläche wird eine **Fläche von 200 cm<sup>2</sup>** mit zwei mit deionisiertem Wasser angefeuchteten Watte pads gründlich gereinigt. Die Watte pads werden bis zur Analyse im Labor in einem verschlossenen Kunststoffbeutel aufbewahrt.

### **Wischproben 2 (organische Analytik)**

Auf der Kollektorblech- bzw. Textil-Oberfläche wird eine **Fläche von 1'000 cm<sup>2</sup>** mit mehreren mit n-Hexan angefeuchteten, vorextrahierten Watte pads gründlich gereinigt. Die Watte pads werden bis zur Analyse im Labor in einem verschlossenen Glasbehältnis aufbewahrt (Glasflasche mit Schraubdeckel).

### **Blindproben**

Von allen Proben-Sets wird vor den Versuchen eine Blindprobe ("0"-Proben) entnommen.

## **II.2.2 Feststoffproben**

### **Brandrussproben**

Eine Brandruss-Sammelprobe wird von den zwei Kollektorblech-Oberflächen auf einer **Gesamtfläche von 8'000 cm<sup>2</sup>** mit einem geeigneten, sauberen Werkzeug (z.B. Spachtel) trocken entnommen. Die Brandruss-Sammelprobe wird bis zur Erstellung der Teilproben und deren Analyse im Labor in einem verschlossenen Glasgefäß aufbewahrt.

## **II.2.3 Löschwasserproben**

### **Wasserproben 1 (Schwermetall-Analytik)**

Es wird ein **Aliquot von 2 x 2 Liter** während laufendem Umrühren mittels Bohrmaschine betriebenem Rührstab entnommen und in PE-Flaschen abgefüllt, welche mit 10 mL HNO<sub>3</sub> 65% p.a. versetzt sind (pH= <1). Die Proben werden bis zur Analyse im Kühlschrank bei 4-5°C aufbewahrt.

### **Wasserproben 2 (anorganische und organische Analytik)**

Es wird ein **Aliquot von 2 x 2 Liter** (anorganische Analytik) und ein **Aliquot von 5x 2L in Glasflaschen** (organische Analytik) während laufendem Umrühren mittels Bohrmaschine betriebenem Rührstab entnommen und in Glasflaschen abgefüllt. Die Proben werden bis zur Analyse im Kühlschrank bei 4-5°C aufbewahrt.

### **Schwebstoffproben**

Nach der Dekantierung und der Membran-Filtration der Proben (<0.45 µm für Schwermetall-Analytik bzw. <1 µm für organische Analytik) werden die Filter zur Bestimmung der ungelösten Anteile in einem Exsikkator aufbewahrt.

### **Rückstellmuster "R"**

Vom Brauchwasser werden vor den Versuchen Blindproben ("0"-Proben) entnommen.

## **II.3 Angewendete Analysemethoden**

### **II.3.1 Anionen-Analytik (Feststoffe und Wasserproben)**

Die Wischproben sowie die Brandruss- und Textilproben werden mit deionisiertem Wasser extrahiert. Die Wasserproben werden nach der Filtration <0.45 µm in unverdünntem Zustand direkt analysiert. Die Analyse der Chlorid-, Bromid-, Fluorid-, Sulfat-, Nitrat-, Phosphat-, Formiat- und Acetat-Konzentrationen erfolgt mittels Kapillarelektrophorese (CE).

### **II.3.2 Kationen-Analytik (Feststoffe und Wasserproben)**

Die Wischproben sowie die Brandruss- und Textilproben werden mit konzentrierter Salpetersäure extrahiert (Wisch- und Textilproben: Rückfluss-Extraktion; Brandrussproben: Mikrowellen-Druckaufschluss). Von den Wasserproben wird – nach Filtration  $<0.45\ \mu\text{m}$  – ein mit  $\text{HNO}_3$  65% auf pH 1 angesäuerter Aliquot analysiert.

Die Analyse der Kobalt-, Lithium-, Mangan- und Nickel-Konzentrationen erfolgt mittels Plasmaemissionsspektrometrie (ICP-OES).

### II.3.3 PAK-Analytik (Feststoffe)

Die Wischproben sowie die Brandruss- und Textilproben werden mit Cyclohexan im Soxhlet während 16 Stunden extrahiert. Der Extrakt wird anschliessend auf 250 ml mit Cyclohexan verdünnt und ein Aliquot von 50 ml für die Analyse verwendet. Nach Zugabe einer Mischung von 16 deuterierten PAK als interner Standard wird das Lösemittel am Rotavap bei  $50\ ^\circ\text{C}$  und ca. 300 mbar auf ca. 1 ml eingeeengt. Danach folgt eine chromatographische Reinigung mit Kieselgel.

Der gereinigte Extrakt wird bis auf 0.3 ml eingeeengt und nach Zugabe des Wiederfindungsstandards (deuteriertes Perylen) werden die PAK-Konzentrationen mittels GC-HRMS bestimmt (Isotopenverdünnungsanalyse).

### II.3.4 PCDD/F- und PCB-Analytik (Feststoffe)

Die Wischproben sowie die Brandruss- und Textilproben werden mit Toluol im Soxhlet während 16 Stunden extrahiert. Der Extrakt wird anschliessend auf 250 ml mit Toluol verdünnt und ein Aliquot von 50 ml für die Analyse verwendet. Nach Zugabe einer Mischung von 17  $^{13}\text{C}_{12}$  isotoopenmarkierten PCDD/F und 18  $^{13}\text{C}_{12}$  isotoopenmarkierten PCB (6 i-PCB und 12 di-PCB) als interne Standards wird das Lösemittel am Rotavap bei  $50\ ^\circ\text{C}$  und ca. 70 mbar auf 1 ml eingeeengt. Danach erfolgte die chromatographische Probenaufreinigung an drei verschiedenen Festphasen (sauer, basisch, neutrales Kieselgel, Aluminiumoxid und Aktivkohle).

Der gereinigte und auf zwei Fraktionen verteilte Extrakt wird jeweils bis auf 0.025 ml eingeeengt und nach Zugabe der Wiederfindungsstandards ( $^{13}\text{C}_{12}$  1,2,7,8-TCDF und  $^{13}\text{C}_{12}$  PCB-70) werden die PCDD/F- und PCB-Konzentrationen mittels GC-HRMS bestimmt (Isotopenverdünnungsanalyse).

### II.3.5 PAK-, PCDD/F- und PCB-Analytik (Wasserproben)

Die Wasserproben (ca. 2 Liter) werden nach der Filtration  $<1.0\ \mu\text{m}$  mit den isotoopenmarkierten internen Standardmischungen versetzt (16 deuterierte EPA PAK, 17  $^{13}\text{C}_{12}$  markierte PCDD/F und 18  $^{13}\text{C}_{12}$  markierte PCB). Die Probe wird sehr gut geschüttelt um die Standards in Lösung zu bringen. Danach wird die Probe mit leichtem Druck auf eine  $\text{C}_{18}$ -Phase oder Polymerkartusche, mit ca. 500 mg adsorbens, gepumpt. Die Fliessrate beträgt ca. 3 ml/Minute. Die Kartusche wird danach für exakt 30 Sekunden unter Vakuum getrocknet und anschliessend werden die PAK, PCDD/F und PCB mit 6-8 mL n-Hexan von der Kartusche eluiert.

Unter Stickstoffbegasung wird das Volumen auf ca. 0.05 ml reduziert und nach Zugabe der Wiederfindungsstandards ( $^{13}\text{C}_{12}$ -1,2,7,8-TCDF,  $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB-70, deuteriertes Perylen) werden die PAK-, PCDD/F- und PCB-Konzentrationen mittels GC-HRMS bestimmt (Isotopenverdünnungsanalyse).

### II.3.6 Halbquantitative Element-Analytik (Feststoffe)

Die Brandrussproben werden in pulverförmigem Zustand direkt analysiert.

Mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (ED-XRF) werden die Konzentrationen der *chemischen Elemente* halbquantitativ mittels standardlosem Verfahren analysiert.

### **II.3.7 Orientierende Werkstoff-Analytik (Batteriemodul)**

Die im Batteriemodul verbauten Werkstoffe werden – soweit ohne Zerstörung des Moduls möglich – direkt analysiert.

Mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (ED-XRF) wird die chemische Zusammensetzung der metallischen Werkstoffe (Metalle und Kunststoffe) des Moduls charakterisiert.



### III Probenverzeichnisse

#### III.1 Batteriemodul 1

##### Probenverzeichnis vom 10.12.2019

###### BLINDPROBEN "Blech":

Position	Proben-Nr.	Probenahme-fläche (cm <sup>2</sup> )	Lösemittel	Analysen
<b>Wischproben Kollektorbleche KORR</b>				[wässriger Extrakt; CE-Analytik]
Blech unten (2 Watte pads WP)	<b>0W-K</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
<b>Wischproben Kollektorbleche ANORG</b>				[Säure-Extrakt; ICP-OES-Analytik]
Blech unten (2 Watte pads WP)	<b>0W-A</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wischproben Kollektorbleche ORGAN</b>				[Sohxlet-Extrakt; GC-HRMS-Analytik]
Blech unten (4 Watte pads WP)	<b>0W-O1</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Blech unten (4 Watte pads WP)	<b>0W-O2</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F

###### HAUPTPROBEN "Blech":

Position	Proben-Nr.	Probenahme-fläche (cm <sup>2</sup> )	Lösemittel	Analysen
<b>Wischproben Kollektorbleche KORR</b>				[wässriger Extrakt; CE-Analytik]
Kollektorblech Aa (h = 3.0 m) 2 WP	<b>A-11</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
Kollektorblech Ba (h = 1.0 m) 2 WP	<b>B-11</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
<b>Wischproben Kollektorbleche ANORG</b>				[Säure-Extrakt; ICP-OES-Analytik]
Kollektorblech Aa (h = 3.0 m) 2 WP	<b>A-12</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
Kollektorblech Ba (h = 1.0 m) 2 WP	<b>B-12</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wischproben Kollektorbleche ORGAN</b>				[Sohxlet-Extrakt; GC-HRMS-Analytik]
Kollektorblech Aa (h = 3.0 m) 3 WP	<b>A-13</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Kollektorblech Ba (h = 1.0 m) 3 WP	<b>B-13</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Kollektorblech Aa (h = 3.0 m) 3 WP	<b>A-14</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F
Kollektorblech Ba (h = 1.0 m) 3 WP	<b>B-14</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F

Position	Proben-Nr.	Probenahme-fläche (cm <sup>2</sup> )	Proben-menge (mg)	Analysen
<b>Brandrussproben Kollektorbleche</b>				[Sammelproben Versuch 10.12.19 "Infrastruktur"]
Kollektorbleche Ab+Ac (h = 3.0 m)	<b>A-2b</b>	8'000 cm <sup>2</sup>	13'470 mg	Feststoffanalytik
Kollektorbleche Bb+Bc (h = 1.0 m)	<b>B-2b</b>	8'000 cm <sup>2</sup>	16'080 mg	Feststoffanalytik

BLINDPROBEN "Textil":

Position	Proben-Nr.	Probenahme-fläche (cm <sup>2</sup> )	Lösemittel	Analysen
<b>Wischproben Textilmuster KORR</b>				[wässriger Extrakt; CE-Analytik]
Anzug 1 (2 Watte pads)	<b>0T-K</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
<b>Wischproben Textilmuster ANORG</b>				[Säure-Extrakt; ICP-OES-Analytik]
Anzug 2 (2 Watte pads)	<b>0T-A</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wischproben Textilmuster ORGAN</b>				[Sohxlet-Extrakt; GC-HRMS-Analytik]
Anzug 1 (2 Watte pads)	<b>0T-O1</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Anzug 2 (2 Watte pads)	<b>0T-O2</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F

HAUPTPROBEN "Textil kontaminiert":

Position	Proben-Nr.	Probenahme-fläche (cm <sup>2</sup> )	Lösemittel	Analysen
<b>Wischproben Textilmuster kontam. KORR</b>				[wässriger Extrakt; CE-Analytik]
Anzug 1 (2 Watte pads)	<b>T-11</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
<b>Wischproben Textilmuster kontam. ANORG</b>				[Säure-Extrakt; ICP-OES-Analytik]
Anzug 2 (2 Watte pads)	<b>T-12</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wischproben Textilmuster kontam. ORGAN</b>				[Sohxlet-Extrakt; GC-HRMS-Analytik]
Anzug 1 (4 Watte pads)	<b>T-13</b>	990 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Anzug 2 (4 Watte pads)	<b>T-14</b>	990 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F

HAUPTPROBEN "Textil gereinigt":

Position	Proben-Nr.	Probenahme-fläche (cm <sup>2</sup> )	Lösemittel	Analysen
<b>Wischproben Textilmuster gereinigt KORR</b>				[wässriger Extrakt; CE-Analytik]
Anzug 1 (2 Watte pads)	<b>TR-11</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
<b>Wischproben Textilmuster gereinigt ANORG</b>				[Säure-Extrakt; ICP-OES-Analytik]
Anzug 2 (2 Watte pads)	<b>TR-12</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wischproben Textilmuster gereinigt ORGAN</b>				[Sohxlet-Extrakt; GC-HRMS-Analytik]
Anzug 1 (4 Watte pads)	<b>TR-13</b>	990 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Anzug 2 (4 Watte pads)	<b>TR-14</b>	990 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F

## III.2 Batteriemodul 2

### Probenverzeichnis vom 09.12.2019

#### BLINDPROBEN "Löschwasser":

Position	Proben-Nr.	Probenmenge (ml)	Verdünnung	Analysen
<b>Wasserproben KORR</b>				[CE-Analytik]
Wasserprobe, unkontaminiert	<b>OW-K</b>	2'000 ml	keine	Anionen+Kationen
<b>Wasserproben ANORG</b>				[angesäuert; ICP-OES-Analytik ME]
Wasserprobe, unkontaminiert	<b>OW-A</b>	2'000 ml	keine	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wasserproben ORGAN</b>				[Extraktion; GC-HRMS-Analytik]
Wasserprobe, unkontaminiert	<b>OW-O</b>	2'000 ml	keine	PAK, PCB, PCDD/F

#### HAUPTPROBEN "Löschwasser":

Position	Proben-Nr.	Probenmenge (ml)	Verdünnung	Analysen
<b>Wasserproben KORR</b>				[CE-Analytik]
Löschwasser, homogenisiert	<b>W-41</b>	2 x 2'000 ml	keine	Anionen+Kationen
<b>Wasserproben ANORG 1</b>				[angesäuert; ICP-OES-Analytik ME]
Löschwasser, homogenisiert	<b>W-42</b>	2 x 2'000 ml	keine	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wasserproben ANORG 2</b>				[ICP-OES-Analytik NM + Feststoffanalytik Filtrat]
Löschwasser, homogenisiert	<b>W-45</b>	2 x 2'000 ml	keine	... + Co, Mn, Ni, Li
<b>Wasserproben ORGAN</b>				[Extraktion; GC-HRMS-Analytik]
Löschwasser, homogenisiert	<b>W-43</b>	5 x 2'000 ml	keine	PAK, PCB, PCDD/F

#### HAUPTPROBEN "Kühlwasser":

Position	Proben-Nr.	Probenmenge (ml)	Verdünnung	Analysen
<b>Wasserproben KORR</b>				[CE-Analytik]
Kühlwasser, homogenisiert	<b>KW-41</b>	2 x 2'000 ml	keine	Anionen+Kationen
<b>Wasserproben ANORG 1</b>				[angesäuert; ICP-OES-Analytik ME]
Kühlwasser, homogenisiert	<b>KW-42</b>	2 x 2'000 ml	keine	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wasserproben ANORG 2</b>				[ICP-OES-Analytik NM + Feststoffanalytik Filtrat]
Kühlwasser, homogenisiert	<b>KW-45</b>	2 x 2'000 ml	keine	... + Co, Mn, Ni, Li
<b>Wasserproben ORGAN</b>				[Extraktion; GC-HRMS-Analytik]
Kühlwasser, homogenisiert	<b>KW-43</b>	1 x 2'000 ml	keine	PAK, PCB, PCDD/F

#### Entnahme "Kühlwasser" Batterie:

- Lagerung des abgebrannten Batterie-Moduls (inkl. Stahlplatte) vom 09.12.2019 bis 10.01.2020 in mit Wasser des Typs "OW" gefüllter Kunststoff-Box
- Wasservolumen gesamt: ca. 56 x 37 x 20 cm = ca. 42'000 cm<sup>3</sup>
- Entnahme Kühlwasserproben: 10.01.2020

### III.3 Batteriemodul 3

#### Probenverzeichnis (Versuch vom 11.12.2019)

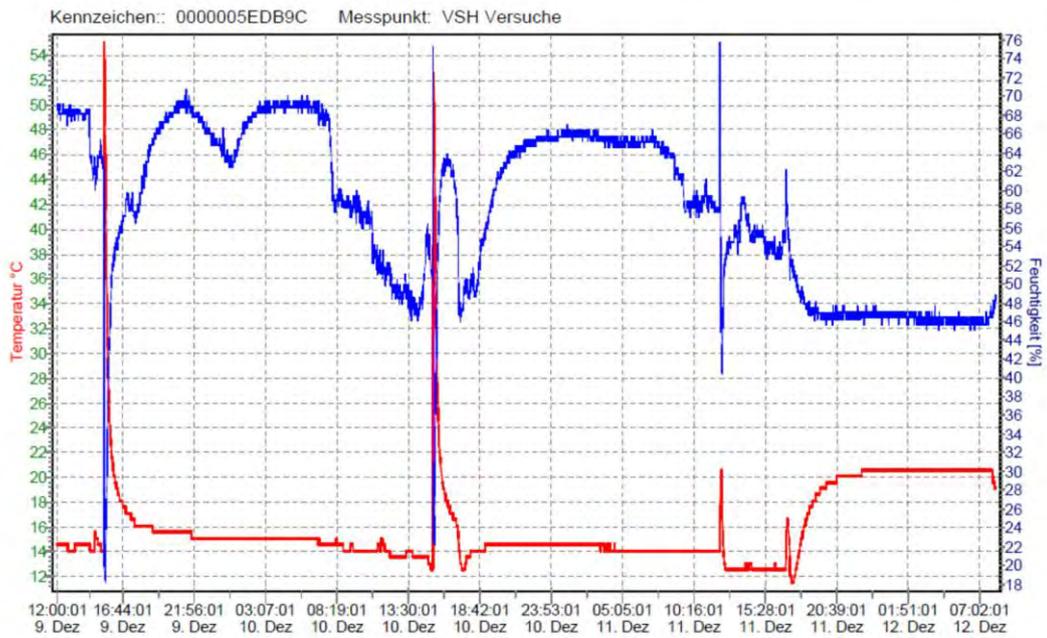
##### HAUPTPROBEN "Blech":

Position	Proben-Nr.	Probenahme-fläche (cm <sup>2</sup> )	Lösemittel	Analysen
<b>Wischproben Kollektorbleche KORR</b>				[wässriger Extrakt; CE-Analytik]
Kollektorblech Ca (d = 50 m) 2 WP	<b>C-11</b>	480 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
Kollektorblech Da (d = 100 m) 2 WP	<b>D-11</b>	480 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
Kollektorblech Ea (d = 150 m) 2 WP	<b>E-11</b>	480 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
Ventilator V (d = 55 m) 2 WP	<b>V-11</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Anionen+Kationen
<b>Wischproben Kollektorbleche ANORG</b>				[Säure-Extrakt; ICP-OES-Analytik]
Kollektorblech Ca (d = 50 m) 2 WP	<b>C-12</b>	480 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
Kollektorblech Da (d = 100 m) 2 WP	<b>D-12</b>	480 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
Kollektorblech Ea (d = 150 m) 2 WP	<b>E-12</b>	480 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
Ventilator V (d = 55 m) 2 WP	<b>V-12</b>	200 cm <sup>2</sup>	H <sub>2</sub> O deion.	Co, Mn, Ni, Li
<b>Wischproben Kollektorbleche ORGAN</b>				[Sohxlet-Extrakt; GC-HRMS-Analytik]
Kollektorblech Ca (d = 50 m) 3 WP	<b>C-13</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Kollektorblech Da (d = 100 m) 3 WP	<b>D-13</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Kollektorblech Ea (d = 150 m) 3 WP	<b>E-13</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Ventilator V (d = 55 m) 3 WP	<b>V-13</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PAK
Kollektorblech Ca (d = 50 m) 3 WP	<b>C-14</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F
Kollektorblech Da (d = 100 m) 3 WP	<b>D-14</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F
Kollektorblech Ea (d = 150 m) 3 WP	<b>E-14</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F
Ventilator V (d = 55 m) 3 WP	<b>V-14</b>	1'000 cm <sup>2</sup>	n-Hexan	PCB, PCDD/F
<b>Brandrussproben Kollektorbleche</b>				[Sammelproben]
Kollektorbleche Cb+Cc (d = 50 m)	<b>C-2</b>	8'000 cm <sup>2</sup>	338 mg	ED-XRF
Kollektorbleche Db+Dc (d = 100 m)	<b>D-2</b>	8'000 cm <sup>2</sup>	309 mg	ED-XRF
Kollektorbleche Eb+Ec (d = 150 m)	<b>E-2</b>	8'000 cm <sup>2</sup>	106 mg	ED-XRF

## IV Klimamonitoring

**Tabelle 51** Angaben zum Klimamonitoring

Standort	Datum	Höhe	Distanz zum Versuchsort
Stollen «A»	09. – 10.12.2020	ca. 4 m	ca. 4 m
Stollen «B»	11.12.2020	ca. 4 m	ca. 50 m



**Abbildung 32** Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit während des gesamten Experiments



**Abbildung 33** Klima-Monitoring Stollen A (links) und B (rechts)



## Glossar

Begriff	Bedeutung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
Batterieelektrisches Fahrzeug (BEV)	Elektrofahrzeug, dessen Energie ausschliesslich in Form einer wiederaufladbaren Batterie (auch Akkumulator) gespeichert wird.
Batteriemanagementsystem (BMS)	Elektronische Überwachungs- und Steuerungseinheit einer Batterie zur Verhinderung kritischer Zustände (Bsp. Überladung) sowie zur Datenkommunikation.
Batteriemodul	Ein Batteriemodul ist ein Verbund von mehreren Batteriezellen in Serie oder parallelgeschaltet oder in Kombination.
Batteriesystem (auch Batterie)	Ein Batteriesystem besteht aus einer oder mehreren Batteriezellen oder Batteriemodulen. Es besitzt ein übergeordnetes BMS und unter Umständen auch ein Heiz- oder Kühlsystem.
Batteriezelle	Eine Batteriezelle bildet durch einen elektrochemischen Aufbau von Anode, Kathode, Separator und Elektrolyt den eigentlichen Energiespeicher.
BEV	engl. Battery Electric Vehicle → Batterieelektrisches Fahrzeug
Brennstoffzellenfahrzeug	Elektrofahrzeug, das mit einem Elektromotor angetrieben und dessen Energie in einer Brennstoffzelle erzeugt wird.
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
Elektrofahrzeug	Fahrzeug, das mit einem Elektromotor angetrieben wird.
Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung	Elektrofahrzeug, das mit einem Elektromotor angetrieben wird und das über einen zusätzlichen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle zur mobilen Aufladung der Batterie verfügt (eigentlich Hybrid, da 2 Energiewandler und 2 Energiequellen).
Elektromobilität	Personen- und Güterverkehr mittels Fahrzeugen, die mit elektrischer Energie angetrieben werden.
FCEV	Engl. <i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> → Brennstoffzellenfahrzeug
HEV	Engl. <i>Hybrid Electric Vehicle</i> → Hybridfahrzeug
Hybridfahrzeug (HEV)	Elektrofahrzeug, das sowohl zwei Energiewandler (Elektromotor und Verbrennungsmotor) beinhaltet als auch über zwei verschiedene Energiespeicher verfügt (Bsp. Batterie und Brennstoff). Die Batterie ist nicht am Netz aufladbar.
IDLH	Engl. <i>Immediately Dangerous to Life or Health</i>
ISO	Engl. <i>International Organization for Standardization</i>
MAK-Werte	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration für gesundheitsgefährdende Stoffe
NMC	Ein Batteriezelltyp, dessen Kathodenmaterial aus einer schichtartigen Metallverbindung von Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid besteht.
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PHEV	engl. Plug-in Hybrid Electric Vehicle → Plug-In Hybridfahrzeug
Plug-In (PHEV) Hybridfahrzeug	Elektrofahrzeug, das sowohl zwei Energiewandler (Elektromotor und Verbrennungsmotor) beinhaltet als auch über zwei verschiedene Energiespeicher verfügt (Batterie und Brennstoff). Die Batterie ist am Netz aufladbar.
SABA	Strassenabwasserbehandlungsanlage
Thermal Runaway	→ Thermisches Durchgehen
Thermisches Durchgehen	Eine sich selbstverstärkende, exotherme Reaktion, während der sich eine Batterie durch chemische Vorgänge selbstständig und schnell (>10°C/min) erwärmt, sodass sie ihren stabilen Betriebsbereich verlässt und ein Batteriebrand mit sehr hoher Energieentfaltung entsteht.



## Literaturverzeichnis

- [1] Amsterdam Roundtable Foundation and McKinsey & Company (2014): Electric vehicles in Europe: gearing up for a new phase? <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Locations/Europe%20and%20Middle%20East/Netherlands/Our%20Insights/Electric%20vehicles%20in%20Europe%20Gearing%20up%20for%20a%20new%20phase/Electric%20vehicles%20in%20Europe%20Gearing%20up%20for%20a%20new%20phase.ashx> Zugriff: 22.04.2020.
- [2] ASTRA (2007): Branddetektion in Strassentunneln. Richtlinie, ASTRA 13004. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [3] ASTRA (2008): Lüftung der Strassentunnel. Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung. Richtlinie, ASTRA 13001. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [4] ASTRA (2012): Elektromobilität 2012. Bericht des Bundesamts für Strassen ASTRA. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [5] ASTRA (2013): Strassenabwasserbehandlung an Nationalstrassen. Richtlinie, ASTRA 18005. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [6] ASTRA (2014): Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen. Richtlinie, ASTRA 19004. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [7] BFE (2009): Risikoabschätzung zu alternativen Treibstoffen und Antrieben. Möglicher Einfluss auf die Risiken des Strassenverkehrs durch Einsatz neuer Antriebskonzepte. Bundesamt für Energie BFE, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [8] BFE (2015): Bericht in Erfüllung der Motion 12.3652. Elektromobilität. Masterplan für eine sinnvolle Entwicklung. Bundesamt für Energie BFE, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [9] BFE (2016): Wasserstoffmobilität in der Schweiz. Positionspapier. Bundesamt für Energie BFE, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- [10] Binnewiese, M., Finze, M., Jäckel, M., Schmidt, P., Willner, H., Rayner-Canham, G. (2016): Allgemeine und Anorganische Chemie. 3. Auflage, Springer Spektrum, Springer-Verlag GmbH Deutschland, Berlin.
- [11] Broere, W. (2016): Urban underground space: Solving the problems of today's cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 55, 245-248.
- [12] BSW-Solar (Hrsg.) (2014): Einsatz an stationären Lithium-Solarstromspeichern. Hinweise für die Brandbekämpfung und technische Hilfeleistung. Merkblatt für Einsatzkräfte. Herausgegeben vom Bundesverband Solarwirtschaft BSW-Solar.
- [13] Buser, M., Gruber, K. (2013): So sorgen Sie für Sicherheit beim Umgang mit Lithium-Batterien. *Praxishandbuch Arbeitssicherheit & Gesundheitsschutz im Betrieb*. L 40/1-24.
- [14] Buser, M., Mahliss, J. (2016): Lithium Batterien. Brandgefahren und Sicherheitsrisiken. Effektive Schadenverhütung und wirksame Brandbekämpfung. [https://www.riskexperts.at/fileadmin/downloads/Publikationen/Lithiumbatterien\\_\\_Sicherheitsratgeber\\_\\_BUSER\\_\\_Mahliss\\_\\_2016.pdf](https://www.riskexperts.at/fileadmin/downloads/Publikationen/Lithiumbatterien__Sicherheitsratgeber__BUSER__Mahliss__2016.pdf) , Zugriff: 30.01.2017.
- [15] Champion C.L. (2005): Thermal Decomposition of LiPF<sub>6</sub>-Based Electrolytes for Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 152 (12) A2327-A2334.

- [16] Colella, F., Biteau, H., Ponchaut, N. F., Marr, K., Somandepalli, V., Horn, Q., Long, R. (2016): Electric vehicle fires. Tunnel Safety & Security, 7th International Symposium, Montréal, 629-639.
- [17] Dallinger, F., Schmid, P., Bindel, R. (2013): Funktions- und Sicherheitstests an Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 321-333.
- [18] Dorn, R., Schwartz, R., Steurich, B. (2013): Batteriemanagementsystem. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 177-187.
- [19] Drillkens J., Kowal, J., Sauer, D. U. (2015): Speicherung der elektrischen Energie. Superkondensatoren. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 68-76.
- [20] Ecker, M., Sauer, D. U. (2015): Speicherung der elektrischen Energie. Lithium-Ionen-Batterien. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 60-68.
- [21] EKAS (2015): Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz im Umgang mit Hochvolt-systemen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Informationsbroschüre Eidgenössische Koordinationskommission EKAS.
- [22] EMPA (2017): Batterien der Zukunft. EMPA Quarterly, Forschung & Innovation #58, 10-21.
- [23] Eriksson, T. (2001): LiMn2O4 as a Li-Ion Battery Cathode. From Bulk to Electrolyte Interface. Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 651, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Sweden.
- [24] Eshetu G.G. et al (2014): Fire behavior of carbonates-based electrolytes used in Li-ion rechargeable batteries with a focus on the role of the LiPF6 and LiFSI salts. Journal of Power Sources, Volume 269, Pages 804-811.
- [25] Europäische Union (2008): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006.
- [26] Fire Protection Research Foundation (2010): Fire fighter safety and emergency response for electric drive and hybrid electric vehicles. Final report.
- [27] Fire Protection Research Foundation (2010): Fire fighter safety and emergency response for electric drive and hybrid electric vehicles. Final report.
- [28] Fire Protection Research Foundation (2013): Best practices for emergency response to incidents involving electric vehicles battery hazards: a report on full-scale testing results. Final report.
- [29] Fire Protection Research Foundation (2013): Best practices for emergency response to incidents involving electric vehicles battery hazards: a report on full-scale testing results. Final report.
- [30] FKS (2009): Feuerwehr 2015. Konzeption der FKS. Beschluss der Regierungskonferenz der Feuerwehr Koordination Schweiz FKS vom 5. Juni 2009.
- [31] FKS (2014): Behelf für ABC-Einsätze. Feuerwehr Koordination Schweiz FKS.
- [32] FKS (2014): Handbuch für ABC-Einsätze. Feuerwehr Koordination Schweiz FKS.
- [33] Fleischhammer, M., Döring, H. (2013): Chemische Sicherheit. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 285-298.

- [34] Gehandler, J., Karlsson, Vylund, L. (2017): Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages. SP Technical Research Institute of Sweden.
- [35] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GVD) (2014): Richtlinien zu Brandschadensanierung. Publikation zur Sach-Schadensanierung, VdS 2357 : 2014-06 (06). VdS Schadenverhütung GmbH, Köln.
- [36] Golubkov A.W. et al. (2014): Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes, RSC Adv., 4, 3633.
- [37] Graf, C. (2013): Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 31-44.
- [38] Groethe, M., Merilo, E., Colton, J., Chiba, S., Sato, Y., Iwabuchi, H. (2007): Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. International Journal of Hydrogen Energy, 32, 2125-2133.
- [39] Hartnig, C., Schmidt, M. (2013): Elektrolyte und Leitsalze. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 61-77.
- [40] Jha, A., Zhou, A. (2017): Impact of fixed fire fighting systems on road tunnel resilience, ventilation, and other systems. Technical Notes, Final report, Fire Protection Research Foundation, University of North Carolina at Charlotte, USA.
- [41] Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A. (Hrsg.) (2018): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. 2. Auflage, Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH, Berlin.
- [42] Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A., Thomes P., Kasperk, G., Brost, W., Deutschens, C., Kreisköther, K., Fluchs, S., Förstmann, R., Nee, C., Mecklenborg, A., Drauz, R. (2018): Grundlagen. In: Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A. (Hrsg.) (2018): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. 2. Auflage, Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH, Berlin, 3-85.
- [43] Karle, A. (2017): Elektromobilität: Grundlagen und Praxis. Carl Hanser Verlag, München.
- [44] Köhler, U. (2013): Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 95-106.
- [45] Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [46] Kowal, J., Sauer, D. U. (2015): Speicherung der elektrischen Energie. Grundlagen und Überblick über die Batterietechnik. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 52-60.
- [47] Kraft V. et al. (2015): Two-dimensional ion chromatography for the separation of ionic organophosphates generated in thermally decomposed lithiumhexafluorophosphate-based lithium ion battery electrolytes, Journal of Chromatography A, 1409, 201–209.
- [48] Kunkelmann, J. (2015): Untersuchung des Brandverhaltens von Lithium-Ionen- und Lithium-Metall-Batterien in verschiedenen Anwendungen und Ableitung einsatztaktischer Empfehlungen. Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Forschungsbericht Nr. 175. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- [49] Kunkelmann, J. (2017): Studie zur Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Batterien (Akkus) und Lithium-Metall-Batterien. Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,

- Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Forschungsbericht Nr. 192. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik.
- [50] Kurzweil, P., Dietlmeier, O. K. (2018): Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen. 2. Auflage, Springer Vieweg, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden.
- [51] Lamp, P. (2013): Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 393-415.
- [52] Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., Mellander, B.-E. (2017): Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific Reports* 7(1), 10018(2017), 1-13.
- [53] Larsson, F., Andersson, P., Mellander, B. E. (2014): Battery aspects on fires in electrified vehicles. 3rd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2014, Berlin, Germany, 209-220.
- [54] Larsson, F., Andersson, P., Mellander, B. E. (2016): Lithium-Battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(9), 1-13.
- [55] Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., Marlair, G. (2012): Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. 2nd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2012, Chicago, United States, 183-194.
- [56] Leuthner, S. (2013): Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 13-19.
- [57] LFS (2011): Einsatzhinweise für Elektrofahrzeuge. Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz im Umgang mit Hochvoltssystemen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Landesfeuerwehrschule (LFS) Baden-Württemberg, Bruchsal.
- [58] Lux S.F. et al. (2013): HF Formation in LiPF<sub>6</sub>-Based Organic Carbonate Electrolytes ECS *Electrochemistry Letters*, 2 (12) A121-A123.
- [59] Mellert, L. D., Welte, U., Hermann, M., Kompatscher, M., Ponticq, X., Tesson, M., Beckbissinger, J. (2018): Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände. Forschungsbericht Nr. 1630, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.
- [60] Möller, K. C. (2013): Übersicht über die Speichersysteme/Batteriesysteme. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 3-9.
- [61] Morche, D., Schmitt, F., Genuit, K., Elsen, O., Kampker, A., Deutschens, C., Heimes, H. H., Swist, M., Maue, A., vom Hemdt, A., Lienemann, C., Haunreiter, A., Wessel, S., Hollah, A., Friedrich, B., Vest, M. (2018): Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität. Zulassung und Zertifizierung von Batteriepacks. In: Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A. (Hrsg.) (2018): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. 2. Auflage, Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH, Berlin, 245-249.
- [62] Morche, D., Schmitt, F., Genuit, K., Elsen, O., Kampker, A., Deutschens, C., Heimes, H. H., Swist, M., Maue, A., vom Hemdt, A., Lienemann, C., Haunreiter, A., Wessel, S., Hollah, A., Friedrich, B., Vest, M. (2018): Fahrzeugkonzeption für die Elektromobilität. Normen und Standards. In: Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A. (Hrsg.) (2018): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. 2. Auflage, Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH, Berlin, 231-234.
- [63] Nedjalkov, A., Meyer, J., Köhring, M., Doering, A., Angelmahr M., Dahle, S., Sander, A., Fischer, A., Schade, W. (2016): Toxic Gas Emissions from Damaged Lithium Ion Batteries - Analysis and Safety Enhancement Solution. *Batteries*, 2(5), 1-10.

- [64] Nitta, N., Wu, F., Lee, J. T., Yushin, G. (2015): Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18(5), 252-264.
- [65] Noreikat, K. E. (2015): Brennstoffzelle. In: Tschöke, H. (Hrsg.): *Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch*, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 105-122.
- [66] PIARC (2016): *Fixed fire fighting systems in road tunnels: current practices and recommendations*. Technical committee C.3.3 Road tunnel operations, World Road Association PIARC.
- [67] PIARC (2020): *PIARC Strategic plan - 2020-2023*. Technical committee 4.4 – tunnels. <https://www.piarc.org/ressources/documents/Technical-Committees-2016-2020-Terms-of-Reference/8b6e056-32562-Terms-of-Reference-TC-4.4-TUNNELS.pdf> Zugriff: 30.04.2020.
- [68] Rahimzei, E., Sann, K., Vogel, M. (2015): *Kompendium: Li-Ionen-Batterien*. BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic. Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. VDE Verband der Elektrotechnik.
- [69] Renault (2020): *Rettungsdatenblatt Renault Zoe 50*. RSE-FAD-B10-2019-1. [https://www.cdn.renault.com/content/dam/Renault/DE/renault-services/anleitungen-tipps-guides/rettungskarten/renault\\_rettungsdatenblatt\\_zoe50\\_ze\\_02\\_2020\\_v1.pdf](https://www.cdn.renault.com/content/dam/Renault/DE/renault-services/anleitungen-tipps-guides/rettungskarten/renault_rettungsdatenblatt_zoe50_ze_02_2020_v1.pdf) Zugriff: 29.04.2020.
- [70] Ribière P. et al. (2012): Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire Calorimetry, *Energy Environ. Sci.*, 5, 5271.
- [71] Roth E.P. et al. (2004): *Thermal Abuse Performance of 18650 Li-Ion Cells*, SANDIA REPORT SAND2004-0584.
- [72] Röth, T., Kampker, A., Deutschens, C., Kreisköther, K., Heimes, H. H., Schnitty, B., Ivanescu, S., Kleine Büning, M., Reinders, C., Wessel, S., Haunreiter, A., Reisgen, U., Thiele, R., Hameyer, K., De Doncker, R. W., Sauer, U., van Hoek, H., Hübner, M., Hennen, M., Stolze, T., Vetter, A., Hagedorn, J., Müller, D., Rewitz, K., Wesseling, M., Flieger, B. (2018): *Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen. Systembetrachtung zum Thermomanagement*. In: Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A. (Hrsg.) (2018): *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. 2. Auflage, Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH, Berlin, 365-380.
- [73] Röth, T., Kampker, A., Deutschens, C., Kreisköther, K., Heimes, H. H., Schnitty, B., Ivanescu, S., Kleine Büning, M., Reinders, C., Wessel, S., Haunreiter, A., Reisgen, U., Thiele, R., Hameyer, K., De Doncker, R. W., Sauer, U., van Hoek, H., Hübner, M., Hennen, M., Stolze, T., Vetter, A., Hagedorn, J., Müller, D., Rewitz, K., Wesseling, M., Flieger, B. (2018): *Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen. Batteriesysteme und deren Steuerung*. In: Kampker, A., Vallée, D., Schnettler, A. (Hrsg.) (2018): *Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. 2. Auflage, Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH, Berlin, 342-360.
- [74] Securius, P., Kähler, N. (2013): *Studie zum Brandschutz bei der Beförderung von Fahrzeugen mit Elektroaggregaten oder mit Elektroantrieb auf RoRo- und RoPax-Schiffen*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland. [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Wasser/brandschutz-roro-schiffen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Wasser/brandschutz-roro-schiffen.pdf?__blob=publicationFile) Zugriff: 30.01.2017.
- [75] SIA (2004): *Projektierung Tunnel. Strassentunnel*. Norm SIA 197/2, Zürich.
- [76] SIA 2060 (2020): *Infrastruktur für Elektrofahrzeuge in Gebäuden*. Merkblatt SNR 592060. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [77] *Sonderabfallwissen (2020): Infrastruktur für Elektromobilität. Klimaschutz-Lösung Elektroauto: Wenn Entsorgung zur Herausforderung wird*. Online-Magazin. <https://www.sonderabfall-wissen.de/wissen/klimaschutz-loesung-elektroauto-wenn-entsorgung-zur-herausforderung-wird/> Zugriff: 29.04.2020.

- [78] Sun, J., Jigang, L., Tian, Z., Kai, Y., Shouping, W., Na, T., Nannan, D., Hong, L., Xinping, Q., Liquan, C. (2016): Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion Battery. *Nano Energy*, 27, 313-319.
- [79] Thielmann, A., Isenmann, R., Wietschel, M. (2010): Technologie-Roadmap Lithium-ionen-Batterien 2030. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- [80] Thielmann, A., Sauer, A., Isenmann, R., Wietschel, M., Plötz, P. (2012): Produkt-Roadmap Lithium-ionen-Batterien 2030. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- [81] Thielmann, A., Sauer, A., Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Lithium-ionen-Batterien 2030. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.
- [82] Truchot, B., Fouillen, F., Collet, S. (2018): An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires. *Fire Safety Journal*, 97, 111-118.
- [83] Tschöke, H. (2015): Elektrifizierte Antriebssysteme mit Verbrennungsmotoren. In: Tschöke, H. (Hrsg.): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2-17.
- [84] Tschöke, H. (Hrsg.) (2015): Die Elektrifizierung des Antriebstrangs. Basiswissen. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- [85] Tuchschnid, M., Werner, R. (2001): Vergleichende Untersuchungen korrosiver Brandgaskondensate. Allianz Report 5.
- [86] U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration (2016): Lithium Battery Thermal Runaway Vent Gas Analysis, DOT/FAA/TC-15/59, Final Report, 2016.
- [87] Vogt, M. (2013): Funktionale Sicherheit von Fahrzeugen. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 307-320.
- [88] VSS (2019): Parkfelder mit Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Parkhäusern – Sicherheitsmassnahmen. Schweizer Regel VSS 40 294. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS.
- [89] Vuorilehto, K. (2013): Materialien und Funktion. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 21-29.
- [90] Wisch, M., Ott, J., Thomson, R., Léost, Y., Abert, M., Yao, J. (2014): Recommendations and guidelines for battery crash safety and post-crash safe handling. Everyday Safety for Electric Vehicles (EVERSAFE), ERA-Net collaborative project, work program "Electromobility+".
- [91] Wöhrle, T. (2013): Lithium-Ionen-Zelle. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 107-117.
- [92] Zeyen, M. G., Wiebelt, A. (2013): Thermisches Management der Batterie. In: Korthauer, R. (Hrsg.) (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 165-175.
- [93] Ziegert, S. (2016): Wettlauf um die beste Batterie. In: NZZ am Sonntag, 17.04.2016.
- [94] Züger, B. J. (2017): Studie: Technologiefolgenabschätzung und Prüfrichtlinien von Li-haltigen Batterien. armasuisse, Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS, Schlussbericht V1.1.

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 22.06.2020

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2018/006

Projekttitel: Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen

Enddatum: 30.06.2020

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Elektrofahrzeugbrände mit Lithium-Ionen-Batterien führen zu neuartigen Schadstoffemissionen. Die vorliegende Studie belegt, dass sich dadurch die toxikologischen Risiken in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen verändern, weil diese Schadstoffe in Bränden von konventionellen Fahrzeugen nicht auftreten. Die batteriespezifischen Kontaminationen werden zwar keine nachhaltigen technischen Betriebsbeeinträchtigungen in Tiefgaragen oder Strassentunneln zur Folge haben; sie machen aber einen vorsichtigen Umgang mit Lösch- und Kühlwasser zwingend erforderlich.

Die experimentellen Erkenntnisse wurden nach wissenschaftlichen Grundsätzen hergeleitet. Das Experiment wurde in den unterirdischen Anlagen der VersuchsStollen Hagerbach AG durchgeführt, die eine reale Umgebung für Brandversuche mit einem Bezug sowohl zu Tiefgaragen als auch zu Strassentunneln bieten. Da die vorliegende Studie auf den Versuchen eines Vorgängerprojekts aus dem Jahre 2018 aufbaut, wurde dasselbe Versuchsmaterial wie damals verwendet: Das Experiment konzentrierte sich auf die maximale Beschädigung einer Lithium-Ionen-Batterie (Typ NMC), die in einem rein batteriebetriebenen und für den Verkehr zugelassenen Fahrzeug zur Anwendung kommt (Stand 2019). Dabei lag die Analyse von Brandrückständen und deren Auswirkung für Infrastrukturen im Zentrum. Es wurden weder Brand- oder Crashtests mit ganzen Elektrofahrzeugen durchgeführt, noch wurden Analysen zur Eintretenswahrscheinlichkeit unternommen.

Die Hypothese, dass die Emissionen von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen zu nachhaltigen Auswirkungen führen, kann nicht pauschal bestätigt werden. Die Studie kommt zum Schluss, dass eine technische Beeinträchtigung von typischen Infrastrukturkomponenten in Tiefgaragen und in Strassentunneln praktisch ausgeschlossen werden kann. Die batteriespezifischen Emissionen eines Elektrofahrzeugbrandes werden aber zu Kontaminationen führen, die in toxikologischer Hinsicht für die Dekontaminations- und Entsorgungsarbeiten von Bedeutung sind.

Zielerreichung:

Die aufgeworfenen Fragestellungen wurden mit diesem Forschungsprojekt systematisch und mit einer wissenschaftlichen Vorgehensweise beantwortet. Die folgenden Projektziele wurden dabei erreicht:

1. Wissenschaftliche Analyse mittels aussagekräftiger Brandversuche und Messungen
2. Deduktion der Auswirkungen auf unterirdische Verkehrsinfrastrukturen im Einflussbereich der Elektromobilität
3. Formulierung von angemessenen technischen und organisatorischen Massnahmen zur Schadensprävention und -minderung

Folgerungen und Empfehlungen:

Aufgrund der Erkenntnisse können sechs risikomindernde Massnahmen abgeleitet werden, die primär organisatorischer Natur sind; zwei davon werden als dringend erachtet.

1. Bei einem Elektrofahrzeugbrand anfallendes Lösch- und Kühlwasser ist stark kontaminiert. Da die Konzentrationen von Lithium und der Schwermetalle Kobalt, Nickel und Mangan derzeitige Grenzwerte für die Einleitung in die Kanalisation um ein Vielfaches überschreiten, muss eine entsprechende Vorbehandlung in der Praxis zwingend umgesetzt werden. Die Anwendung der aktuellen Grundsätze für ABC-Einsätze sind hierfür ausreichend.
2. Hinsichtlich des Kühlwassers, das typischerweise in der Nachbehandlung von ausgebrannten Batterien anfällt, ist zudem die Definition eines standardisierten Umgangs erforderlich.

Die weiteren Empfehlungen umfassen zusätzliche präventive Massnahmen, die einen angemessenen Umgang mit der sich verändernden Risikolandschaft erlauben.

Publikationen:

Mellert, L. D., Welte, U., Tuschmid, M., Held, M., Hermann, M., Kompatscher, M., Tesson, M., Nacheff, L. (2020): Risikominimierung von Elektrofahrzeugbränden in unterirdischen Verkehrsinfrastrukturen. Forschungsprojekt AGT 2018/006 auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT), Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.

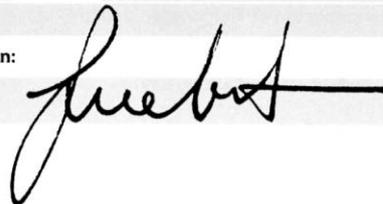
Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Mellert

Vorname: Lars Derek

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walthert Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:





## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Im Rahmen der frühzeitig geplanten BK-Sitzungen wurde jeweils der aktuelle Stand des Forschungsprojektes sowie die Ressourcensituation (Budget und Termine) transparent präsentiert und anschliessend protokolliert. Während den Diskussionen hatten die Mitglieder der BK die Möglichkeit, fachliche Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge einzubringen sowie auf auffälligen Anpassungsbedarf hinzuweisen. Die Planung und Durchführung des Experiments sowie der anschliessenden Analysen wurden dadurch wesentlich optimiert.

Das Projektmanagement insgesamt sowie die erfolgreiche Planung und Durchführung des Experiments und die Aufbereitung der Ergebnisse werden von der BK positiv beurteilt.

##### Umsetzung:

Die angewandten Methoden zur Untersuchung der Hypothese waren angemessen und vermochten alle Fragestellungen zu beantworten. Sämtliche gesetzten Meilensteine wurden dabei fristgerecht erreicht und der BK an den entsprechenden Terminen präsentiert. Der Schlussbericht führt den Leser systematisch durch die theoretischen Grundlagen der Studie und ermöglicht aufgrund der detaillierten Beschreibung des Versuchsaufbaus die Reproduzierbarkeit der Experimente. Die Messungen und Analysen erfolgten nach wissenschaftlichen Grundsätzen und werden im Bericht in verständlicher Art und Weise wiedergegeben. Der Bezug zwischen den Ergebnissen und den Forschungsfragen wird zum Schluss erneut hergestellt.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Mit Bezug zur Elektromobilität in unterirdischen Infrastrukturen stehen zwei Aspekte im Vordergrund, die vertiefter untersucht werden sollten:

1. Die Wirksamkeit von Hochdruckwassernebelanlagen gegenüber Lithium-Ionen-Batteriebränden sollten experimentell untersucht und neu beurteilt werden.
2. Eine Risikofolgeabschätzung der zunehmenden H2-Mobilität in unterirdischen Infrastrukturen mittels experimentellen Methoden scheint empfehlenswert.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Keiner.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Rogner

Vorname: Arnd

Amt, Firma, Institut: Securiton AG

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Bern, 24.6.2020

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.