

Lambda-Pi GmbH

Kompetenz in Bahntechnik und -betrieb

Bühlweg 3

CH-3072 Ostermundigen

Risikoanalyse zur Optimierung der Durchrutschwege für Aussensignalisierung

Technischer Grundlagenbericht zur Überarbeitung des R RTE 25011

Erstellt im Auftrag der Programmleitung RTE

Version 0.4, 01.10.2019

Änderungskontrolle

Version	Datum	Ausführende	Bemerkungen / Art der Änderung
0.1	20.04.2019	Pierre Senglet	Interne Arbeitsversion 1
0.2	10.05.2019	Pierre Senglet	Interne Arbeitsversion 2
0.3	28.09.2019	Pierre Senglet	Interne Arbeitsversion 3
0.4	01.10.2019	Pierre Senglet	Einarbeitung Reviewrückmeldungen von Benedikt Hitz-Gamper; Erstentwurf z.H. AGr RTE 25011
1.0			

© 2019 Lambda-Pi GmbH, Ostermundigen. Dieses Dokument oder Informationen daraus dürfen ohne unsere ausdrückliche Erlaubnis nicht an Dritte weitergegeben werden.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	6
1.1. Aufgabenbeschreibung	6
1.2. Ergebnisse.....	6
1.3. Empfehlungen	6
2. Aufgabenstellung.....	7
3. Vorarbeiten	7
4. Projektvorgehen	8
5. Grundkonzept der vorliegenden Risikoanalyse	8
6. Analyse der heutigen Risiken.....	10
6.1. Ziel dieser Analyse	10
6.2. Auswertung der BAV-Ereignisdatenbank der letzten 10 Jahre.....	10
6.2.1. Methodik	10
6.2.2. MKR-Verteilung auf Kollisionsursachen	11
6.2.3. Erkenntnis zur Verteilung des Risikos	12
6.2.4. MKR pro Kollision (Apportionment).....	14
6.3. Ergänzende Erkenntnisse aus früheren Jahren	14
6.4. Auswertung Signalfälle auf SBB Infrastruktur	15
6.5. Auswertung ZUB-Zwangsbremungen	16
7. Bremsmodelle	18
8. Streckenkategorien	19
9. Zugkategorien	20
9.1. Abschätzung der jährlichen Zug-km je Streckenkategorie	20
9.2. Tabelle der Zugkategorien	21
10. Aufbau der Risikoanalyse.....	22
10.1. Betrachteter Gegenstand der Risikoanalyse	22
10.2. Zugehörige Dateien.....	22
10.3. Teilrisiken je Zugkategorie.....	23
10.4. Ereignisbäume a und b.....	23
10.4.1. Allgemeines.....	23
10.4.2. Szenario a: Bremskurvenfall	23

10.4.3.	Szenario b: Release Speed Fall	24
10.4.4.	Detail-Erläuterungen zu den einzelnen Parametern der Ereignisbäume	24
10.5.	Umgang mit den Funktionalitätsunterschieden L1LS / ZUB.....	26
11.	Monte-Carlo-Simulation	27
11.1.	Allgemeines	27
11.2.	Zum Begriff Bremsgüte	27
11.3.	Rechenaufgaben je Szenario.....	27
11.3.1.	Szenario a	27
11.3.2.	Quercheck: Einhaltung der Risikoanalyse-Annahmen für Vorsignaldistanzen RTE 29100	28
11.3.3.	Szenario b	28
11.4.	Streuungsparameter des Bremssystems	28
12.	Kalibrierung der Risikoanalyse.....	29
13.	Vorwärtsberechnungen mit Bremsgütenvorgabe	30
13.1.	Geschwindigkeitsabhängigkeit.....	31
13.2.	Neigungsabhängigkeit	31
13.3.	Bemerkung	31
14.	Rückwärtsberechnung mit Metervorgabe	32
14.1.	Beschreibung der Methodik.....	32
14.2.	Resultate	33
14.2.1.	Varianten von Durchrutschwegtabellen	33
14.2.2.	Frage der Differenzierung nach Streckenkategorien	34
14.2.3.	Quercheck mit Vorsignaldistanzen RTE 29100.....	35
14.2.4.	Bewertung der Resultate im Blick auf die Gesamt-MKR-Situation	35
15.	Kostenaspekte	37
16.	Kapazitätsgewinn	39
17.	Untersuchung für ZBMS- und ZSL-90-Bahnen	40
17.1.	Methodik	40
17.2.	ZBMS	40
17.2.1.	10m-Tabelle	40
17.2.2.	5m-Tabelle	41
17.3.	ZSL-90	41
18.	Individuelles Risiko.....	42
19.	Zugfahrten ohne Zielgeschwindigkeitsüberwachung	43

20.	Fazit / Empfehlungen	45
21.	Abkürzungsverzeichnis	47
22.	Quellen- und Literaturverzeichnis	48

Zugehörige Exceldateien der Risikoanalyse

- Kalibrierungsversion *1_RA_D-Weg_Kalibrierungsversion_20190618_V12.xlsx*
- Basisversion 20m-Tabelle *2_RA_D-Weg_Basis_20m_20190620_V12.xlsx*
- Basisversion 30m-Tabelle *3_RA_D-Weg_Basis_30m_20190620_V12.xlsx*
- Basisversion 40m-Tabelle *4_RA_D-Weg_Basis_40m_20190618_V12.xlsx*
- Basisversion 50m-Tabelle *5_RA_D-Weg_Basis_50m_20190620_V12.xlsx*
- Version 10m-Tabelle ZBMS *6_RA_D-Weg_ZBMS_10m_20190628_V13.xlsx*
- Version 5m-Tabelle ZBMS *7_RA_D-Weg_ZBMS_5m_20190918_V14.xlsx*
- Version 2m-Tabelle ZSL-90 *8_RA_D-Weg_ZSL-90_2m_20190919_V13.xlsx*
- Version 5m-Tabelle ZSL-90 *9_RA_D-Weg_ZSL-90_5m_20190919_V13.xlsx*
- Risikoanalyse-Version für Zugfahrten ohne Zielgeschwindigkeitsüberwachung
10_RA_D-Weg_ohne_BKU_20190923_V2.xlsx

1. Zusammenfassung

1.1. Aufgabenbeschreibung

Die heute gültigen Tabellen für Durchrutschwege (AB-EBV 39.3.a Ziffer 4.3) sollen angesichts der weit fortgeschrittenen Ausrüstung mit Zugbeeinflussungssystemen für Zielgeschwindigkeitsüberwachung sowie aufgrund einer realistischen Modellierung der vorhandenen Bremsseigenschaften im heutigen Zugverkehr überprüft werden.

1.2. Ergebnisse

Die in diesem Bericht dokumentierte Risikoanalyse zeigt auf, dass eine Reduktion der heutigen Meterwerte für Durchrutschwege ohne Sicherheitseinbusse möglich ist.

Bedingung dazu ist, dass an den Signalen, wo die verkürzten Werte angewendet werden sollen, eine Zugbeeinflussung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung vorhanden ist, und dass auf den betreffenden Streckenabschnitten Züge ohne funktionierende Zielgeschwindigkeitsüberwachung mit reduzierter Geschwindigkeit verkehren.

Zudem sollte die Ausrüstung des Netzes mit Abfahrverhinderungen unbedingt weiter vorangetrieben werden. Irrtümliche Abfahrten bewirken innerhalb der Kategorie «Missachtung von Halt-zeigenden Signalen» rund 95% des Risikos. Sie werden sehr effektiv durch Abfahrverhinderungen mit Loops oder vorgelagerten Balisen verhindert. Ein reiner Durchrutschweg ohne Kombination mit einer solchen Einrichtung müsste als entsprechende Massnahme immer unverhältnismässig lang sein: Reisezüge benötigen aus 40 km/h je nach Bremsbauart bis zu 90m Anhalteweg, und schwere Güterzüge u.U. sogar bis knapp 200m.

Zusammengefasst zeigt die vorliegende Risikoanalyse, dass heute eine Reduktion der Durchrutschweg-Vorgaben wirtschaftlich absolut folgerichtig ist. In der Tat besteht sonst die Gefahr, dass der «Sicherheitsfranken» nicht mehr dort investiert wird, wo er am meisten Nutzen bringt, und dass deswegen an ganz anderen Stellen möglicherweise viel grössere Sicherheitsrisiken unbehandelt bleiben.

Eine 1:1-Kopplung der Ausrüstung mit Abfahrverhinderung an die Anwendung der verkürzten Durchrutschwege (d.h. die zwingende Pflicht, bei verkürzten Durchrutschwegen gleichenorts immer eine Abfahrverhinderung einzubauen) ist allerdings aus Sicht der Arbeitsgruppe nicht zielführend.

1.3. Empfehlungen

Die Arbeitsgruppe empfiehlt daher die Aufnahme der neuen Tabellen mit verkürzten Durchrutschwegen (siehe Tabelle 12 auf Seite 46) in die R RTE 25011, zusammen mit den entsprechenden Anwendungsbedingungen. Der Regelungsentwurf zur Neuausgabe der R RTE 25011 befindet sich in der entsprechenden Datei zur ersten Lesung vom 01.10.2019. Darin sind die Anwendungsbedingungen genau beschrieben, damit eine sichere Interpretation durch die Signalingenieure auch ohne detaillierte Kenntnis des vorliegenden Berichts gewährleistet ist.

2. Aufgabenstellung

Die Regelungssammlung R RTE 25000 Kompendium Sicherungsanlagen behandelt die Aspekte der Detailplanung von Sicherungsanlagen. Im Rahmen der Weiterentwicklung der AB-EBV 2020 und der 12. Ausgabe 2020 der R RTE 25000 steht unter anderem das Thema Durchrutschwege (R RTE 25011) im Fokus.

Die heute gültigen Tabellen für Durchrutschwege (AB-EBV 39.3.a Ziffer 4.3) sollen angesichts der weit fortgeschrittenen Ausrüstung mit Zugbeeinflussungssystemen für Zielgeschwindigkeitsüberwachung sowie aufgrund einer realistischen Modellierung der vorhandenen Bremsseigenschaften im heutigen Zugverkehr überprüft werden.

3. Vorarbeiten

Bereits 2011 führte das BAV mit einer Arbeitsgruppe eine Studie zum Thema Durchrutschwege durch, deren Ergebnisse im März 2012 im Standbericht [1] festgehalten wurden. Aus verschiedenen Gründen wurden die Arbeiten anschliessend nicht unmittelbar weitergeführt.

Im Frühling 2018 griff die Programmleitung RTE in Absprache mit dem BAV das Thema Durchrutschwege wieder auf. Eine entsprechende Vorstudie des Verfassers in Zusammenarbeit mit einer ad-hoc Arbeitsgruppe (teilweise mit gleichen Mitgliedern wie die ab 2019 gebildete, eigentliche Arbeitsgruppe RTE 25011) führte zum sogenannten Thesenpapier [2], in welchem der Erkenntnisstand von 2011 aufgegriffen und weiterentwickelt wurde.

Die wichtigsten Ergebnisse aus der «Thesenpapier»-Arbeitsphase waren:

- Die neuen Werte für die Durchrutschwege sollen klar auf der Grundannahme aufgebaut werden, dass eine Zugbeeinflussung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung besteht. Wo dies nicht der Fall ist, sollen auch in Zukunft die bestehenden Werte angewendet werden.
- Die heutigen Unterscheidungskriterien Spurweite sowie (im Fall der Meterspur¹) Vorhandensein von Magnetschienenbremsen werden nicht mehr als zielführend betrachtet. Stattdessen sind – falls überhaupt noch sinnvoll – Unterscheidungen nach der Art des Zugbeeinflussungssystems sowie der Züge auf den entsprechenden Strecken zu prüfen, also z.B. Strecken mit und ohne wesentlichem Güterverkehr.

Andere im Thesenpapier festgehaltene Punkte haben sich im weiteren Verlauf der Arbeiten aufgrund der Erkenntnisse aus der Risikoanalyse teilweise nicht bestätigt. Es hat sich einmal mehr gezeigt, dass sich eine quantitative Risikoanalyse anhand realistischer statistischer Eingangsgrössen lohnt und gegenüber eher intuitiv geäusserten Meinungen zu überraschenden Einsichten führen kann.

¹ In diesem Bericht sind aus Gründen der einfacheren Formulierung mit dem Begriff «Meterspur» auch alle übrigen Spezialsuren mit gemeint.

4. Projektvorgehen

Die Arbeitsgruppe RTE 25011 bestand aus folgenden Mitgliedern:

Funktion in AGr	Name	Vorname	Unternehmen
Mitglied	Aegerter	Fabian	SBB I-PJ
Mitglied	Byland	Rolf	RhB
Mitglied	Germann	Peter	BLS AG
Mitglied	Hauswirth	Jürg	SOB AG
Mitglied	Hörlein	Michael	RBS, Vertreter ZSL-90
Mitglied	Kalbfuss	Pierre-Yves	RhB Systemführer ZBMS
Mitglied	Locher	Martin	SBB Systemführer ETCS ²
Mitglied	Mosele	Urs	SBB SR40
Mitglied	Noti	Alfons	MGB
Projektleiter	Senglet	Pierre	Lambda-Pi GmbH
Mitglied	Theurillat	Raphael	SBB Infrastruktur, I-AT-SAZ-AZS-FDY
VöV-Coach	Walser	Urs	VöV

Im Hintergrund (Tools, Reviews etc.) sowie an einer der Arbeitsgruppensitzungen hat zudem Benedikt Hitz-Gamper (Lambda-Pi GmbH) mitgewirkt. Weiter wurde die Arbeitsgruppe durch Marcel Bartlome, BAV Sektion Sicherheitstechnik, sowie Hanspeter Debrunner, BAV Sektion Bahnbetrieb, begleitet.

Im Verlauf der kurz bemessenen Projekt-Durchlaufzeit fanden sechs Arbeitsgruppensitzungen (Workshops) statt, in denen Grundsätze gemeinsam definiert, die von Lambda-Pi erarbeiteten Inhalte besprochen und wichtige Beiträge zu den einzelnen Fragestellungen aufgenommen wurden. Es hat sich als sehr wertvoll erwiesen, dass alle existierenden Zugbeeinflussungssysteme für Aussensignalisierung durch kompetente Vertreter abgedeckt waren und dadurch eine für alle Systeme generische Methodik erarbeitet werden konnte.

Bereits an der Startsitzenz wurde klar, dass für eine seriös abgestützte Aktualisierung der Durchrutschwege kein Weg an einer quantitativen Risikoanalyse vorbeiführt. Diese ist denn auch das eigentliche Kernstück der vorliegenden Studie geworden.

5. Grundkonzept der vorliegenden Risikoanalyse

Das heutige Eisenbahnnetz der Schweiz weist einen bestimmten Ausrüstungsstand mit Zugbeeinflussung auf, der noch nicht einheitlich ist. Während auf den interoperablen Normalspurbahnen bereits ein hoher Anteil der Signale mit einer Zielgeschwindigkeitsüberwachung ausgerüstet ist – und zwar vor allem diejenigen mit den höchsten Risiken –, ist der Ausrüstungsstand bei den Meterspurbahnen äusserst divers, von 100%-iger Überwachung bis zu noch gar keiner Zielgeschwindigkeitsüberwachung.

² Leider ist Marin Locher nach der ersten Sitzungen schwer erkrankt und noch im Verlauf des Projektes verstorben.

Die Durchrutschwege im heutigen Streckennetz beruhen auf den aktuell gültigen Tabellen in der AB-EBV 39.3.a Ziffer 4.3. resp. – bei älteren Anlagen – auf den bei ihrem Bau gültigen früheren Vorgaben.

Das Risiko aufgrund von Missachtungen von geschlossenen Hauptsignalen (in diesem Bericht auch vereinfacht Signalfälle genannt) auf diesem heutigen Netz kann aufgrund der Ereignis-Statistiken der letzten Jahre abgelesen werden. Erschwerend für eine genaue Auswertung ist der Umstand, dass der Ausrüstungsstand der Zugbeeinflussung und auch die Zahl der Zugskilometer laufend angestiegen ist. Gerade die Anzahl der mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung ausgerüsteten Signale hat sich in den letzten Jahren stark erhöht. Dennoch ist eine konkrete Analyse der Ereignisse und deren Bewertung im Sinne eines MKR eine unverzichtbare und wertvolle Grundlage für die Bewertung von veränderten Durchrutschweg-Vorgaben.

Mit der Risikoanalyse, die in diesem Bericht dokumentiert ist, soll nun das Risiko für einen zukünftigen Endzustand des Netzes analysiert werden, der folgende Eigenschaften hat:

- Kürzere Durchrutschwege gemäss neuer Vorgabe
- Jedes Signal³ ist lückenlos mit Zugbeeinflussung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung ausgerüstet

In der Risikoanalyse wird also ein heute noch fiktiver, aber zukünftig angestrebter Ausrüstungsstand unterstellt, dem sich die Realität im Verlauf der Jahre immer mehr annähern wird.

Sobald die neuen Meterwerte für die Durchrutschwege auf diese Weise berechnet und freigegeben sind, können sie ab diesem Zeitpunkt bei jedem Hauptsignal angewendet werden, wo eine Zugbeeinflussung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung existiert und wo von der Verkehrsseite her ebenfalls die entsprechenden Bedingungen erfüllt sind. Letztere werden in Kapitel 19 behandelt. Die vorliegende Studie soll damit eine generische, für alle Bahnen der Schweiz gültige Sicherheitsbeurteilung im Sinne von AB-EBV 39.3.a Ziffer 4.3.3 liefern.

Bei Signalen, wo keine Zugbeeinflussung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung existiert und/oder wo von der Verkehrsseite her die entsprechenden Bedingungen nicht erfüllt sind, müssen weiterhin die bestehenden Durchrutschwege nach AB-EBV 39.3.a Ziffern 4.3.1 und 4.3.2 angewendet werden.

In der Risikoanalyse wird zur Monetarisierung im Sinne eines MKR der aktuell vom BAV angewendete Grenzkostensatz von 6.5 Mio CHF pro Todesfall unterstellt. Schwerverletzte werden mit 1/10 und Leichtverletzte mit 1/100 dieses Wertes angerechnet, was der national und international üblichen Praxis entspricht. Auf diese Weise können Personenschäden aller drei Schweregrade in der Risikoanalyse vereinfacht immer in Anzahl Todesfällen (oder präziser ausgedrückt Todesfall-Äquivalent) ausgedrückt werden.

³ In der Risikoanalyse wurde aufgrund der realen Risikoverteilung vor allem auf Ausfahr- und Gleisabschnittssignale fokussiert. Eine allfällige bewusste Nicht-Ausrüstung gewisser risikoarmer Signale (typischerweise z.B. reine Blocksignale) würde das Fazit der vorliegenden Risikoanalyse nicht ändern.

6. Analyse der heutigen Risiken

6.1. Ziel dieser Analyse

Als Ausgangsbasis für die Risikoanalyse soll ein realistisches Bild der heutigen Risikolandschaft bezüglich Zugskollisionen gewonnen werden. Insbesondere interessieren

- die Anzahl
- das Schadensausmass
- die Ursachen
- der Ausrüstungsstand bezüglich Gleistopologie, Zugbeeinflussung und vorhandenem Durchrutschweg

der Zugskollisionen aufgrund von missachteten geschlossenen Hauptsignalen.

Diese Erkenntnisse dienen zur Analyse, inwieweit der Durchrutschweg eine effektive Massnahme zur Verbesserung der Sicherheit ist, d.h. wie viele der Ereignisse überhaupt einen Zusammenhang mit den heutigen und zukünftigen Vorgaben zum Durchrutschweg haben.

Im Weiteren helfen diese Analysen bei der möglichst realistischen Kalibrierung der Risikoanalyse (Strukturierung in Szenarien sowie Zahlenwerte der Parameter in den Ereignisbäumen).

6.2. Auswertung der BAV-Ereignisdatenbank der letzten 10 Jahre

6.2.1. Methodik

Das BAV stellte der Arbeitsgruppe freundlicherweise einen Ereignisdatenbank-Auszug (Datenbank NEDB) zur Verfügung, der alle Fehlhandlungen gegen Halt-zeigende Hauptsignale im Zeitraum März 2009 bis März 2019 auf sämtlichen schweizerischen Bahnen enthält [3].

Durch die Schadensangaben konnten daraus diejenigen Ereignisse eruiert und näher analysiert werden, bei denen es zu Personenschäden kam. In Übereinstimmung mit den u.a. im Kontext Safety ETCS bei den SBB angewendeten Methodiken (siehe u.a. [4]) fokussiert auch die vorliegende Risikoanalyse auf Personenschäden; Ereignisse mit reinen Sachschäden werden daher weder in der Ereignisauswertung noch in der Risikoanalyse berücksichtigt.

Da in den letzten 10 Jahren auf Meterspurstrecken nur ein einziges Ereignis nach obiger Definition vorkam, bei dem Personenschäden entstanden sind (Visp MGB, 06.02.2010), und diese vergleichsweise gering blieben (4 Leichtverletzte), basieren die folgenden Analysen auf der Auswertung der Ereignisse ausschliesslich auf Normalspurstrecken. In Ziffer 6.3 werden jedoch zu den Meterspurbahnen noch einige Überlegungen im Sinne einer Absicherung der Allgemeingültigkeit ergänzt.

6.2.2. MKR-Verteilung auf Kollisionsursachen

Im Auswertungszeitraum ereigneten sich auf Normalspurstrecken 8 Zugskollisionen mit Personenschäden, die auf eine Missachtung eines Halt-zeigenden Hauptsignals zurückzuführen sind. Übrige Kollisionen werden hier nicht betrachtet, da sie nicht auf Signalfälle, sondern andere Ursachen wie Naturereignisse, andere Fehlhandlungen etc. zurückzuführen sind.

Insgesamt wurde 1000 Mal ein Halt-zeigendes Hauptsignal überfahren. Es entstanden bei den 8 Kollisionen Personenschäden von total 20.15 Mio CHF (1 Toter, 15 Schwerverletzte, 60 Leichtverletzte).

Zum Zweck der vorliegenden Analyse können die 8 Kollisionen gegliedert werden in die nachfolgenden drei Kategorien.

Irrtümliche Abfahrten – kein Durchrutschweg vorhanden

In dieser Kategorie haben sich zwei Kollisionen ereignet, welche über 2/3 der gesamten Personenschäden der 8 Kollisionen, nämlich über 13.5 Mio CHF, auf sich vereinen:

- Döttingen, 08.08.2011, Kollision Regionalzug gegen Lokzug
- Granges-Marnand, 29.07.2013, Kollision Regionalzug gegen RegioExpress

Auffällige Gemeinsamkeit ist, dass es sich beide Male um irrtümliche Abfahrten auf alten Landbahnhöfen mit Gruppensignalen handelte, ohne ZUB, ohne Abfahrverhinderung, nur mit Signum-Magnet nach dem Gefahrenpunkt. Es war also keinerlei Durchrutschweg vorhanden.

Auch wenn solche Bahnhöfe mehr und mehr der Vergangenheit angehören, wird es weiterhin auch auf neuen Anlagen Signale ohne Durchrutschweg geben, und zwar schlicht aus dem Grund, dass örtlich gleichzeitig eingestellte Fahrstrassen stellwerktechnisch ausgeschlossen sind und daher gar keine Durchrutschweganforderung besteht. Eine Änderung der Meterwerte in der R RTE 25011 hat bei solchen Anlagen keinerlei Einfluss, und damit ist auch das entsprechende Kollisionsrisiko durch Änderungen dieser Meterwerte gar nicht beeinflussbar, weder nach oben noch nach unten.

Irrtümliche Abfahrten – Durchrutschweg vorhanden

In diese Kategorie fallen ebenfalls zwei Kollisionen, die weitere 28% der gesamten Personenschäden der 8 Kollisionen, nämlich über 5.7 Mio CHF, auf sich vereinen:

- Neuhausen, 10.01.2013, Kollision zweier S-Bahnen
- Rafz, 20.02.2015, Kollision S-Bahn mit Interregio

Beide Male handelte es sich ebenfalls um irrtümliche Abfahrten, jedoch mit Gleissignalen, und mit einem Durchrutschweg von 70m (Neuhausen) bzw. 60m (Rafz). In beiden Fällen wirkte keine ZUB-Abfahrverhinderung. Der Durchrutschweg war wegen der stellwerktechnischen Möglichkeit von gleichzeitigen Fahrten vorhanden, was aber bei den beiden Ereignissen gar nicht der Situation entsprach; gegen das Risiko irrtümlicher Abfahrten ist in den gültigen Regelwerken kein Durchrutschweg vorgeschrieben.

Eine Änderung der Meterwerte in der R RTE 25011 hat bei solchen Situationen jedoch indirekt einen Einfluss auf das Risiko, wenn auch nur geringfügig; entsprechende Überlegungen siehe weiter hinten in Kapitel 14.2.4.

Zusammen vereinen die vier Fälle Döttingen, Granges-Marnand, Neuhausen und Rafz also 95% der gesamten Personenschäden der 8 Kollisionen auf sich. Alle diese Fälle waren irrtümliche Abfahrten gegen Halt-zeigende Ausfahrtsignale.

Übrige Fälle (Züge auf der Fahrt)

Die übrigen 4 Kollisionen haben lediglich 5% der gesamten Personenschäden der 8 Kollisionen verursacht. Es handelte sich dabei alles um Züge, die bereits bzw. noch auf der Fahrt waren und so einen Signalfall verursachten, also nicht um irrtümliche Abfahrten. Im Einzelnen waren dies folgende Fälle:

- Dietlikon, 18.11.2009, Kollision Postzug mit S-Bahn⁴
- Felsenburg (Frutigen), 24.06.2010, Kollision RegioExpress mit Autoreisezug
- Olten, 06.10.2011, Kollision Regionalzug mit Interregio
- Sattel-Aegeri, 09.05.2014, Kollision Voralpen-Express mit Auto auf Bahnübergang

6.2.3. Erkenntnis zur Verteilung des Risikos

Die Abbildung 1 visualisiert die Ergebnisse aus dem vorstehenden Kapitel:

⁴ In NEDB-Datenbank aufgeführt, es existiert dazu jedoch kein Untersuchungsbericht auf der SUST-Datenbank

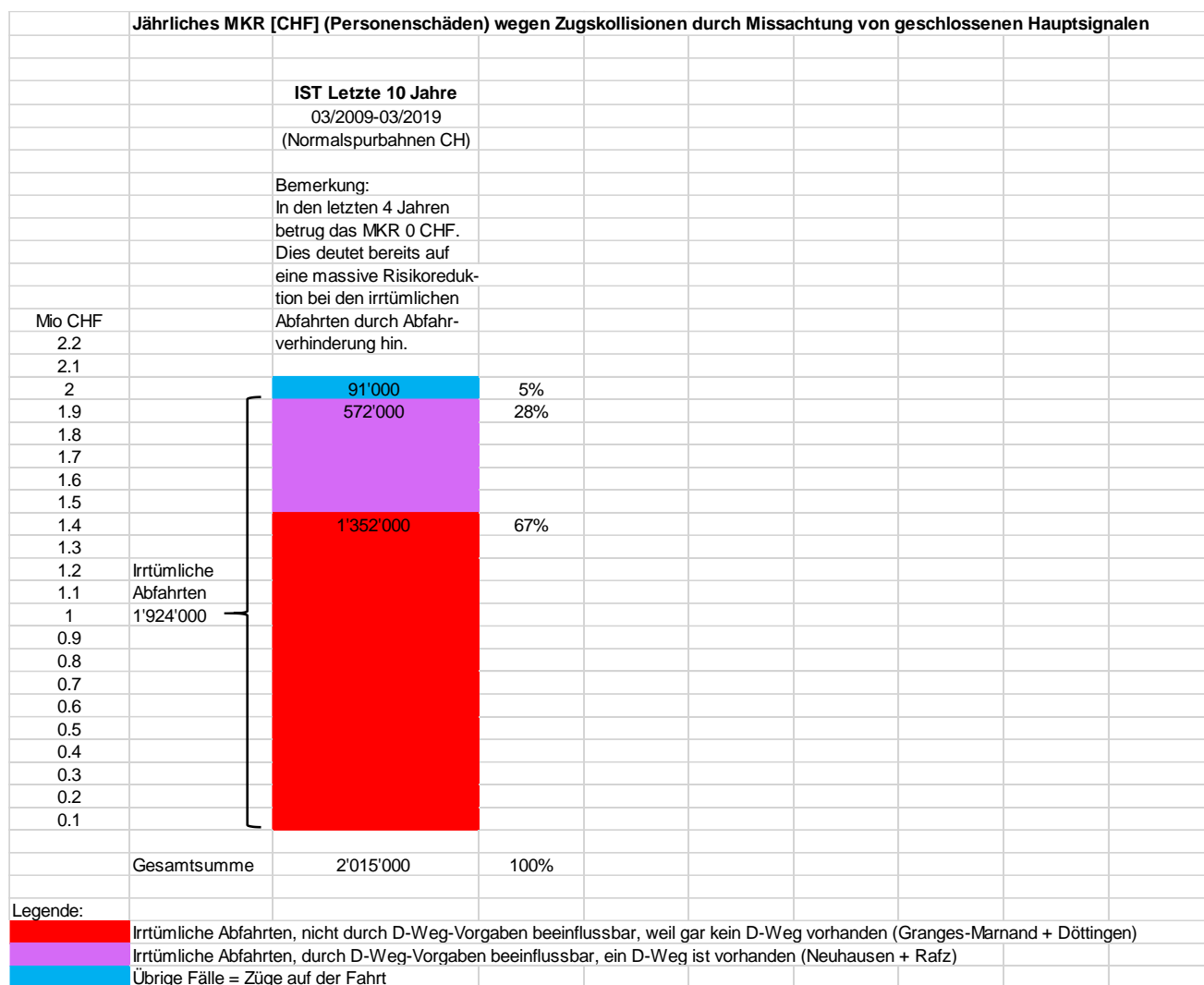


Abbildung 1: Monetarisierter mittlere jährliche Personenschäden durch Signalfälle auf Normalspurstrecken CH März 2009 – März 2019

Es zeigt sich in dieser Darstellung eindrücklich die enorme Dominanz des Themas irrtümliche Abfahrten; 95% des Gesamt-MKR (Personenschäden) im Bereich Signalfälle der letzten 10 Jahre geht auf deren Konto. Nur 5% ist also in einem Ursachenbereich, der von der hier zur Untersuchung stehenden Regelung über den Durchrutschweg überhaupt anvisiert wird, nämlich Signalfälle von Zügen auf der Fahrt. Eine Änderung der Meterwerte in der R RTE 25011 hätte nur auf diese «blauen» 5% des Gesamtrisikos einen direkten Einfluss, auf die «violetten» 28% nur einen indirekten und geringfügigen, und auf die «roten» 67% überhaupt keinen. Diese Erkenntnis ist sehr wichtig für die weiteren Überlegungen in der vorliegenden Risikoanalyse.

Sehr bemerkenswert ist an dieser Stelle noch die Tatsache, dass in den letzten 4 Jahren das entsprechende MKR Null war. Für die Arbeitsgruppe ist dies unter anderem eine klare Folge der grossen Investitionen der letzten Jahre in den Ausbau der Abfahrverhinderung.

6.2.4. MKR pro Kollision (Apportionment)

Eine wichtige Stellschraube der hier entwickelten Risikoanalyse ist das sogenannte Apportionment, d.h. hier konkret die angenommene Anzahl Todesopfer pro Kollision.

Die BAV-Statistik der letzten 10 Jahre enthält 8 Kollisionen mit Personenschäden, die rund 20 Mio CHF Personenschäden verursacht haben. Im Mittel sind dies 2.5 Mio CHF pro Kollision. Mit dem Grenzkostensatz von 6.5 Mio CHF pro Todesopfer entspricht dies also weniger als 1/2 Todesopfer (d.h. Todesfall-Äquivalent) pro Kollision.

Bemerkung: Diese Zahl gilt für die Kollisionen aufgrund von Signalfällen auf Normalspurstrecken der letzten 10 Jahre. Andere Unfälle sind hier bewusst nicht berücksichtigt, da sie mit dem Untersuchungsgegenstand nichts zu tun haben. Beispielsweise ist denkbar, dass der Wert z.B. für Kollisionen im Zusammenhang mit Naturereignissen, technischen Schäden an Rollmaterial oder Infrastruktur etc. davon abweichen kann.

Diese Zahl von 1/2 Todesopfer pro Kollision weicht von der Berechnung der Apportionments für ETCS Level 2 ab. Gemäss dem entsprechenden Apportionments-Papier [5] ergäben sich für Kollisionen Reisezug – Güterzug 2 Todesopfer und für Kollisionen Reisezug – Reisezug 4 Todesopfer. Diese ETCS Level 2 Apportionment-Annahmen sind also 4 bis 8 Mal konservativer als die Statistik der letzten 10 Jahre. Möglicherweise ist dies auf gewisse ETCS Level 2 spezifische Unterschiede in Technik und Methodik zurückzuführen, die an dieser Stelle jedoch nicht näher untersucht werden können.

Im Rahmen der vorliegenden, für Strecken mit Aussensignalisierung konzipierten Risikoanalyse wurde bewusst entschieden, mit möglichst realen statistikbasierten Zahlen zu operieren. Es wird daher mit dem oben berechneten Apportionment von 1/2 Todesopfer (d.h. Todesfall-Äquivalent) pro Kollision gearbeitet.

6.3. Ergänzende Erkenntnisse aus früheren Jahren

Das BAV hat der Arbeitsgruppe zusätzlich zu den oben beschriebenen Daten der letzten 10 Jahre zusätzlich eine Auswertung aus einer Vorgängerdatenbank zur Verfügung gestellt, welche die Jahre 2000 bis und mit 2008 umfasst [6]. In diesen 8 Jahren ergaben sich durch Signalfälle und die entstandenen 13 Kollisionen Personenschäden von total 32.8 Mio CHF (Normal- und Meterspur zusammen, Berechnung auch hier mit dem Grenzkostensatz von 6.5 Mio CHF)).

Diese Daten enthalten zwei (von den 13) Zugskollisionen wegen Missachtung von Halt-zeigenden Hauptsignalen, die zusammen 29.9 Mio CHF, also 91.3% der gesamten Personenschäden verursachten. Es sind dies:

- Chiasso, 21.02.2002, Kollision Trenitalia-Güterzug mit rangierender Lok
- Gsteigwiler, 07.08.2003, Kollision zweier BOB-Personenzüge

Der Fall Chiasso ist im wahrsten Sinn des Wortes ein Grenzfall, weil die Kollisionsursache das Überfahren eines Halt-zeigenden Signals (italienisches Signalsystem ohne schweize-

rische Zugsicherung) im Monte Olimpino-Tunnel auf italienischem Staatsgebiet durch italienisches Lokpersonal war; selbst der Ort der Kollision (Weiche 952) befindet sich zwar im durch die SBB betriebenen Bahnhof Chiasso, jedoch noch auf italienischem Territorium. Daher ist dieser Fall in der Auswertung von Ereignissen bei schweizerischen Bahnen eigentlich auszuklammern.

Der Fall Gsteigwiler (Frontalkollision auf offener Strecke) ist für die vorliegende Untersuchung ebenfalls nicht sehr aussagekräftig, weil zum Unfallzeitpunkt der Streckenabschnitt noch nicht mit funktionierender Zugbeeinflussung, ja nicht einmal mit einer einfachen Zugsicherung / Zugstopp ausgerüstet war; mit einer solchen wäre der Unfall verhindert worden.

Im Durchschnitt führten die 13 Kollisionen zu 2.5 Mio CHF Personenschäden oder 0.4 Todesfall-Äquivalent pro Kollision. Diese Rechnung beinhaltet auch den Fall Chiasso; würde dieser Fall ausgeklammert, wäre der Wert sogar nur noch etwa halb so gross. Damit ist bestätigt, dass das in 6.2.4. gewählte Apportionment von $\frac{1}{2}$ Todesfall pro Kollision einen konservativ angesetzten Wert darstellt, der für die Risikoanalyse auf der vorsichtigen Seite liegt.

Werden interessehalber die Personenschäden nur bei den Meterspurbahnen ausgewertet, und zwar über die gesamte verfügbare Datenbasis von 2000 bis März 2019, so sind insgesamt 6 Kollisionen der betrachteten Ereignisart aufgetreten, wobei nur bei zwei davon (Gsteigwiler und Visp) überhaupt Personen zu Schaden gekommen sind. Im Durchschnitt ergeben sich als Apportionment ebenfalls knapp 0.4 Todesfall-Äquivalent pro Kollision. Würde der Fall Gsteigwiler ausgeklammert, so ergäbe sich für die Meterspurbahnen ein Apportionment von sogar nur 0.007 Todesfall-Äquivalent pro Kollision! Im weiteren Verlauf der vorliegenden Studie wird wie bereits in 6.2.4. dargelegt einheitlich $\frac{1}{2}$ Todesfall-Äquivalent pro Kollision unterstellt, was bei Meterspurbahnen bewusst zu einer noch deutlich konservativeren MKR-Berechnung führt als bei Normalspurbahnen. Diese Bemerkung ist insofern relevant, als sich dennoch bei Meterspurbahnen gegenüber heute, und auch gegenüber den neuen Werten für Normalspurbahnen, teilweise massiv kürzere neue Durchrutschwege ergeben, wie im Kapitel 17 gezeigt werden wird.

6.4. Auswertung Signalfälle auf SBB Infrastruktur

Für die realistische Kalibrierung der zu erstellenden Risikoanalyse sind die Signalfallzahlen fahrender Züge ein wichtiger Eckpunkt. Insbesondere ist nebst der absoluten Zahl die Aufteilung auf die modellierten Szenarien (siehe Kapitel 10) sowie auf Reisezüge / Güterzüge wichtig. Dabei sollen nur die Signalfälle berücksichtigt werden, die trotz vorhandener Zielgeschwindigkeitsüberwachung vorgekommen sind, da ja in der Risikoanalyse der Endzustand der lückenlosen Ausrüstung simuliert werden soll. Leider sind qualitativ genügend aussagekräftige Ereignisdaten dazu sehr schwierig zu erhalten; oft fehlt in den Datenbank-einträgen der Bahnunternehmungen sogar die Angabe, ob eine Zugbeeinflussung vorhanden war oder nicht.

SBB Infrastruktur (Team Fahrdynamik) konnte jedoch eigens für die vorliegende Studie in aufwändiger Kleinarbeit eine aussagekräftige Auswertung der ersten 4 Monate des Jahres 2019 über das gesamte SBB-Streckennetz und über sämtliche EVU erstellen [7]. Diese Zeitperiode ist zwar für eine statistische Auswertung kurz, weist jedoch im Vergleich zu den vergangenen Jahren gemäss Aussagen des Erstellers eine überdurchschnittliche Gesamtzahl an entsprechenden Ereignissen auf; somit gehen die daraus abgeleiteten Hochrechnungen zu den zu erwartenden Signalfällen in der Risikoanalyse auf die vorsichtige / sichere Seite.

Die 10 Signalfälle von fahrenden Zügen trotz Zielgeschwindigkeitsüberwachung (ZUB / ETCS L1LS) teilen sich folgendermassen auf:

- 5 Szenario a (Fahrt in Bremskurve), davon 2 Reise- und 3 Güterzüge
- 5 Szenario b (Release Speed Fall), davon 3 Reise- und 2 Güterzüge

(Zur Definition der Szenarien siehe Kapitel 10)

Werden die 10 Fälle in 4 Monaten auf ein ganzes Jahr hochgerechnet, ergeben sich 30 Fälle. Für die Risikoanalyse muss diese Zahl zudem vom jetzigen, noch lückenhaften Netzausrüstungsstand mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung auf die zu simulierende Vollausrüstung hochgerechnet werden, da ja dann keine Signalfälle an nicht-ausgerüsteten Signalen mehr möglich sind, sondern nur noch solche wie die 10 hier betrachteten. Per Ende April 2019 waren 62% der Signale auf dem SBB-Netz mit einer Zielgeschwindigkeitsüberwachung ausgerüstet [8]; eine Hochrechnung der 30 Signalfälle von diesem aktuellen Ausrüstungsstand auf 100% Ausrüstung ergibt rund 48 Fälle.

Diese Zahl für das reine SBB-Netz muss noch auf das Gesamtnetz der schweizerischen Eisenbahnen hochgerechnet werden. Aus der BAV-Auswertung der letzten 10 Jahre [3] kann dazu als vorsichtige Richtgrösse ein Faktor 1.25 abgeleitet werden.

Damit ergibt sich eine hochgerechnete jährliche Zahl Signalfälle auf dem gesamten Eisenbahnnetz im Zustand «Vollausrüstung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung» von ca. 60.

In der Risikoanalyse kann diese Zahl wiederum im prozentualen Verhältnis wie auf der SBB-Infrastruktur auf die modellierten Szenarien (siehe Kapitel 10) sowie auf Reisezüge / Güterzüge aufgeteilt und quasi als «Zielgrösse» für die möglichst realistische Kalibrierung der Parameter in den einzelnen Ereignisbäumen genutzt werden (siehe Kapitel 12).

6.5. Auswertung ZUB-Zwangsbremungen

Ein weiteres Indiz zur möglichst realistischen Kalibrierung der Risikoanalyse können die ZUB-Zwangsbremungen sein, insbesondere die sogenannten berechtigten Zwangsbremungen, die einen Signalfall verhindert oder zumindest die überfahrene Distanz nach dem Zielsignal verkürzt haben.

Noch mehr als bei den Signalfällen ist es bei den meisten Bahnen schwierig bis unmöglich, aussagekräftige Statistiken dazu zu erhalten. Gewisse EVU verzichten aus Kostengründen auf eine systematische Erfassung. Unter den in der Arbeitsgruppe vertretenen Bahnen

konnte einzig die SOB für ihren Verkehr (also inkl. auf SOB-fremden Strecken) eine entsprechende konkret dokumentierte Statistik der Jahre 2017 und 2018 einbringen [9]. Gemäss dieser haben im Mittel 2.85% aller ZUB-Zwangsbremungen einen Signalfall verhindert.

Bei SBB Personenverkehr ereignen sich gemäss interner Erfassung [10] im Mittel jährlich bis zu ca. 7'000 ZUB-Zwangsbremungen, was $4.7 \cdot 10^{-5}$ Zwangsbremungen pro Zugkilometer entspricht. Auf die jährlichen Zug-km aller Bahnen (inkl. Güterverkehr und alle Spurweiten) hochgerechnet, ergibt sich eine geschätzte Zahl von knapp 11'000 ZUB-Zwangsbremungen. Wird darauf die SOB-Rate der berechtigten Zwangsbremungen angewendet, ergeben sich knapp über 300 berechnete Zwangsbremungen netzweit.

Dieser Wert kann ebenfalls als «Zielgrösse» für die möglichst realistische Kalibrierung der Parameter in den einzelnen Ereignisbäumen genutzt werden (siehe Kapitel 12). Theoretisch müsste er auch noch – wie die Signalfallzahlen – auf den Vollausbau der Zielgeschwindigkeitsüberwachung hochgerechnet werden; darauf wird jedoch hier angesichts der doch eher dürftigen statistischen Grundlage verzichtet, um nicht eine übertriebene Genauigkeit vorzutäuschen. In der Risikoanalyse wurde darauf geachtet, den Wert um grössenordnungsmässig 10-15% zu übertreffen, d.h. entsprechend auf die vorsichtige Seite zu gehen.

Ohnehin ist dazu zu sagen, dass die Risikoanalyse primär anhand der viel genauer verfügbaren bzw. hochrechenbaren Signalfallzahlen kalibriert wurde, die ja in der Reihenfolge der Ereignisbäume nach den Zwangsbremungen folgen. In diesem Sinn wird eine allfällig leicht von der Realität abweichende Fehleinschätzung der Anzahl berechtigter Zwangsbremungen innerhalb der Ereignisbäume von selbst wieder auskorrigiert. Für die vorliegende Studie über Durchrutschwege ist ausreichend, die schlussendlich resultierenden Risiken möglichst realistisch zu simulieren; die Zahlenwerte der einzelnen Parameter innerhalb der Ereignisbäume wurden nicht im Detail validiert, und könnten es anhand der verfügbaren Daten auch nicht.

7. Bremsmodelle

Wie bereits im Kapitel 3 erwähnt, sollte im vorliegenden Projekt die klassische Unterscheidung der zwei «Welten» Normalspur (interoperable Bahnen) und Meterspur möglichst überwunden werden, da dies wenig mit der Problematik der Durchrutschwege zu tun hat.

Für die Berechnung des physikalischen Anhalteweges der Züge inklusive der entsprechenden Modellierung der Streuungsfaktoren wurde daher auf zwei bewährte Bremsmodelle zurückgegriffen, die ursprünglich für die Normalspur entwickelt worden waren, nämlich:

- Reisezüge: Dreiteiliges Bremsablaufmodell nach Wende [11], bereits verwendet für die Neuberechnung der Vorsignaldistanzen Normalspur Reisezüge (Entwurf RTE 29100 3. Ausgabe, entsprechender technischer Bericht im Lesungsentwurf vorhanden [12]).
- Güter- und Erhaltungszüge:
 - Für Szenarien a (siehe Kapitel 10): Anhaltewegformel für Güterzüge SBB2014 [13], bereits verwendet für die Neuberechnung der Vorsignaldistanzen Normalspur für Güterzüge (RTE 29100 2. Ausgabe)
 - Für Szenarien b (siehe Kapitel 10): Dreiteiliges Bremsablaufmodell nach Wende [11], adaptiert für K-Sohlen-Reibwertverlauf und kalibriert für Übereinstimmung mit Anhaltewegformel für Güterzüge SBB2014 bei 20 km/h. Diese Lösung wurde für die tiefen Geschwindigkeiten der Szenarien b für Güterzüge gewählt, um je nach Zugkategorie die Länge der Schwellzeit realistisch angepasst modellieren zu können.

Meterspurzüge lassen sich – in der für das vorliegende Projekt geforderten Genauigkeit – problemlos ebenfalls mit diesen Bremsmodellen abbilden, sofern die unterschiedliche Definition der Bremsprozente UIC und AB-EBV entsprechend berücksichtigt wird. Konkret wurde hier vereinfacht angenommen, dass die Meterspurstrecken bremsbetrieblich gleich wie Normalspurstrecken funktionieren und die entsprechenden Meterspurzüge nach UIC-Bremsprozenten bewertet wären. Als Anhaltspunkt gibt die Tabelle 1 die Entsprechung zwischen UIC- und BAV-Bremsprozenten⁵ bei 100 km/h Bewertungsgeschwindigkeit wieder.

Lambda UIC [%]	Lambda AB-EBV [%]
70	48
75	51
80	54
95	65
115	80
135	95

Tabelle 1: Entsprechung zwischen Bremsprozenten (Lambda) nach Definition UIC und BAV (AB-EBV) bei 100 km/h Bewertungsgeschwindigkeit. Achtung: Bei anderen Bewertungsgeschwindigkeiten ergeben sich auch andere Zahlenwerte!

⁵ In diesem Bericht werden die BAV-Bremsprozente nach Definition der noch gültigen AB-EBV verwendet. Die im Entwurf AB-EBV 2020 vorgesehene Neudefinition hat aber auf die Ergebnisse dieser Studie keinen Einfluss.

Auf Meterspurstrecken verkehren teilweise noch Züge mit Vakuumbremse, die den Ruf langer Bremsentwicklungszeiten hat. Der ungünstigste solche Fall (aufgrund grosser Zuglängen) sind lange Züge auf der RhB. Selbst bei diesen bleibt die Zeit bis zum 95%-Bremskraftaufbau unter 4s (Information RhB), womit die Modellierung von Meterspurzügen – auch solchen mit Vakuumbremse – mit dem Bremsmodell wie für die Reisezug-Vorsignaltabellen Normalspur mit seiner dort hinterlegten Schwellzeit von 5s auf jeden Fall auf die sichere Seite geht.

Bemerkung 1: Anders als bei der Berechnung von Vorsignaldistanzen oder Bremskurvenparametern für Zugbeeinflussungssysteme genügt hier eine relativ grobe Zusammenfassung der Bremseigenschaften der Züge in Zugkategorien (siehe Kapitel 9.2). Auf eine allzu feine Differenzierung der Parameter für die Bremsmodelle wurde daher bewusst verzichtet.

Bemerkung 2: Für die spezifischen Risikoanalysen für die Validierung der Durchrutschwegtabellen für ZBMS und ZSL-90 (siehe Kapitel 17) wurden die Parameter gegenüber der Basisversion für ZUB / ETCS L1LS an die realen Verhältnisse dieser Bahnen angepasst.

8. Streckenkategorien

Es stellte sich eingangs die Frage, ob es überhaupt sinnvoll sei, das schweizerische Eisenbahnnetz für die vorliegende Aufgabenstellung in verschiedene Streckenkategorien aufzuteilen. Intuitiv wäre es etwas gar vereinfacht gewesen, von Anfang an von den transalpinen Güterverkehrskorridoren bis hin zu kleinen Meterspurlinien alles in eine einzige Klasse einzuteilen. Daher wurde entschieden, zwei Streckenkategorien zu unterscheiden:

Streckenkategorie 1 (K1)

Damit sind die normalspurigen Hauptlinien mit wesentlichem Güterverkehr gemeint. Nebst der Zugdichte an und für sich hat für diese Definition den Ausschlag gegeben, dass schwere Güterzüge brems technisch grössere Zeitkonstanten und Streuungen als andere Züge aufweisen und daher ein eventueller Bedarf für etwas längere Durchrutschwege vermutet wurde.

Konkret wurden für die vorliegende Studie folgende Strecken in die Kategorie K1 eingeteilt:

- Basel – Chiasso
- Genève – Romanshorn
- Basel – Brig
- Basel – Zürich
- Lausanne – Brig
- Zürich – Chur
- Zürich – Schaffhausen
- Zürich – St. Gallen

Diese Auswahl entspricht rund 27% des Schienennetzes der Schweiz.

Diese Einteilung diene nur der Abschätzung von Zugzahlen für die Risikoanalyse. Falls schlussendlich wirklich zwei verschiedene Durchrutschwegtabellen herausgegeben werden

sollten, müsste natürlich eine «signalscharfe» Einteilung gemacht werden, welche Streckenabschnitte genau dazu gehören. Die schlussendlich erarbeiteten Resultate und Empfehlungen der Arbeitsgruppe gehen allerdings ohnehin in Richtung einer einzigen, allgemeingültigen neuen Durchrutschwegtabelle für alle mit ZUB / ETCS L1LS ausgerüstete Strecken.

Streckenategorie 2 (K2)

Sämtliche übrige Eisenbahnstrecken der Schweiz wurden in die Kategorie K2 eingeteilt. Konkret umfasst diese also das gesamte Meterspurnetz sowie alle diejenigen Normalspurstrecken, die nicht zu den in K1 aufgeführten gehören.

9. Zugkategorien

9.1. Abschätzung der jährlichen Zug-km je Streckenategorie

Für die Risikoanalyse ist es wichtig, die relative Häufigkeit der verschiedenen Zugkategorien grössenordnungsmässig richtig abzubilden. Als Bezugsgrösse wurden im Folgenden die jährlichen Zug-km verwendet.

Im Jahr 2018 wurden gemäss Bundesamt für Statistik (Zeitreihen ÖV, im Internet verfügbar [14]) gerundet folgende Zug-km erbracht:

Reisezüge: 200 Mio (davon allein SBB 150 Mio)

Güterzüge: 30 Mio

Es wurden für die vorliegenden Analysen die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen:

- Sämtliche der jährlich 30 Mio Güterzugs-km werden auf K1-Strecken erbracht
- Die Reisezugsdichte auf K1-Strecken sei um den Faktor 1.5 höher als auf K2-Strecken (Schätzung). Dies ergibt gerundet folgende Aufteilung der 200 Mio Reisezug-km auf die beiden Streckenategorien:
 - Jährliche Reisezug-km auf K1-Strecken: 40% = 80 Mio
 - Jährliche Reisezug-km auf K2-Strecken: 60% = 120 Mio

9.2. Tabelle der Zugkategorien

Der Zugverkehr wurde – nach Streckenkategorien differenziert – mit den folgenden neun Zugkategorien modelliert (Tabelle 2):

Zugkat.	Beschreibung	umfasst die Bremsreihen:	λ_{UIC} für Berechnung	Anteil an den RZ bzw. GZ d. Streckenkat.	Zug-km/Jahr
Streckenkategorie K1					
K1_50	Integral G-gebremster schwerer GZ	50, 60, 65	50	10%	3 Mio
K1_70	Integral G-gebremster schwerer GZ	70, 75	70	40%	12 Mio
K1_80	GZ mit 60% G-Bremsen	80, 85	80	40%	12 Mio
K1_95	GZ mit 30% G-Bremsen	95, 105, 115	95	10%	3 Mio
K1_115	RZ «alt» ($\lambda < 135\%$)	115, 125	115	20%	16 Mio
K1_135	RZ «aktuell» ($\lambda \geq 135\%$)	135, 150, 180	135	80%	64 Mio
Streckenkategorie K2					
K2_70	EZ (selten GZ) mit 30% G-Bremsen	70 bis 115	70	5% ⁶	6 Mio
K2_115	RZ «alt» ($\lambda < 135\%$)	115, 125	115	15%	18 Mio
K2_135	RZ «aktuell» ($\lambda \geq 135\%$)	135, 150, 180	135	80%	96 Mio
Kontrollsumme RZ netzweit ⁷					200 Mio
Kontrollsumme GZ netzweit					30 Mio
Kontrollsumme alle Züge netzweit					230 Mio

Tabelle 2: In der Risikoanalyse verwendete Zugkategorien

RZ = Reisezug, GZ = Güterzug, EZ = Erhaltungszug/Bauzug, λ = Bremsverhältnis

⁶ Die EZ-km auf K2-Strecken werden hier vereinfachend als 5% der RZ-km auf diesen Strecken berechnet, was natürlich streng genommen falsch ist, aber wegen den schlechteren Bremseigenschaften dieser Züge für die Risikoanalyse eine pessimistische Annahme ist, die auf die sichere Seite geht.

⁷ inkl. EZ-km auf K2-Strecken, siehe obige Fussnote

10. Aufbau der Risikoanalyse

10.1. Betrachteter Gegenstand der Risikoanalyse

Die Analyse des heute bestehenden MKR bezüglich der Missachtung von Halt-zeigenden Hauptsignalen in Kapitel 6.2 hat eindrücklich aufgezeigt, dass nur ein kleiner Bruchteil des Risikos, nämlich 5%, von Zügen auf der Fahrt ausgeht, für die der Durchrutschweg ja primär gedacht ist. Die restlichen 95% gehen auf das Konto von irrtümlich abfahrenden Zügen.

Irrtümliche Abfahrten werden sinnvollerweise durch Abfahrverhinderungen mit Loops oder vorgelagerten Balisen verhindert. Ein reiner Durchrutschweg ohne Kombination mit einer solchen Einrichtung müsste als entsprechende Sicherheitsmassnahme immer unverhältnismässig lang sein: Reisezüge benötigen aus 40 km/h je nach Bremsbauart bis zu 90m Anhalteweg, und schwere Güterzüge sogar bis knapp 200m.

Die dominanten 95% des Risikos sollten daher – wie es ja bereits laufend geschieht – durch Abfahrverhinderungen reduziert werden. Wie in 6.2.3 erläutert, hat bereits jetzt in diesem Bereich eine Risikoreduktion stattgefunden.

Die genaue Bewertung der Wirksamkeit von Abfahrverhinderungen wäre jedoch Gegenstand einer gesonderten Risikoanalyse und würde den Rahmen der vorliegenden Studie sprengen. In diesem Bericht kann dazu lediglich der Gesamtzusammenhang mit dem Thema Durchrutschweg aufgezeigt werden, und daraus – in Kapitel 15 – eine Kosten-Nutzen-Folgerung abgeleitet werden.

In der vorliegenden quantitativen Risikoanalyse wird daher ausschliesslich die Entwicklung des (heutigen 5%-)MKR untersucht, das von **Zügen auf der Fahrt** ausgeht, und zwar für einen zukünftigen 100%-igen Ausrüstungsstand des Netzes mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung und unter flächendeckender Umsetzung von neuen, verkürzten Durchrutschwegvorgaben in der R RTE 25011. Irrtümliche Abfahrten werden also explizit **nicht** berücksichtigt.

Wie in 6.2.1 bereits angekündigt, wird das gesamte Bahnnetz der Schweiz in erster Näherung so modelliert und die Risikoanalyse entsprechend so kalibriert, wie wenn alle Strecken mit ZUB / ETCS L1LS funktionieren würden. Anschliessend werden für die Strecken mit ZBMS bzw. ZSL-90 darauf aufbauend spezifische Spezialrechnungen durchgeführt (Kapitel 17). Der Bedarf für letztere ergab sich aus den allgemeinen Ergebnissen der ersten Runde, die für die entsprechenden Zugbeeinflussungs- und Bremseigenschaften dieser Meterspurbahnen zu restriktiv gewesen wären.

10.2. Zugehörige Dateien

Technisch wurde die Risikoanalyse in Form einer Excel-Datei aufgebaut. Diese enthält folgende Tabellenblätter:

- Ergebnisse: Darin sind die MKR aus den weiter hinten enthaltenen Teil-Risikoanalysen je Zugkategorie zusammengefasst. Gleichzeitig sind auch gewisse Teilergebnisse

- wie berechnete Zwangsbremssungen, Signalfälle je Szenario etc. zusammengetragen, was vor allem der Kalibrierung der ganzen Risikoanalyse diene.
- Zug-km: Statistische Basis für die Herleitung der Zug-km je Kategorie
- Kat: Darin befindet sich die statistikbasierte Aufteilung der Zug-km je Strecken- und Zugkategorie (siehe Kapitel 8 und 9).
- RA Erkl: Erklärungen zu den beiden Ereignisbäumen a und b und zur spezifisch dazugehörenden, unterschiedlichen Berechnungsformel für die Bremsgüte (Definition siehe Ziffer 11.2) in den Monte-Carlo-Simulationen
- Die 9 Teil-Risikoanalysen je Zugkategorie

Die einzelnen Parameter in den Ereignisbäumen werden im Kapitel 10.4 behandelt.

Von der Excel-Datei gibt es die Kalibrierungsversion (Erklärung siehe Kapitel 12) sowie die verschiedenen Varianten, in denen die unterschiedlichen Meterwerte bzw. Zugbeeinflussungssysteme simuliert wurden, die in den Kapiteln 13, 14 bzw. 17 dokumentiert sind.

Für die Monte-Carlo-Simulationen wurde ein entsprechendes Tool in der Programmiersprache R erstellt, welches Durchrutschwegtabellen sowohl als Input verwenden (zur Berechnung der Bremsgüten bei fest vorgegebenen Meterwerten) als auch als Output berechnen kann (Meterwerte, die sich bei fest vorgegebenen Bremsgütenanforderungen ergeben).

10.3. Teilrisiken je Zugkategorie

Für jede der in Kapitel 9.2 definierten Zugkategorien wird eine eigene Berechnung des resultierenden MKR durchgeführt; darin fließen die spezifischen Eigenschaften ein wie jährliche Zug-km, Brems-Charakteristiken, sowie diverse je nach Zugkategorie aufgrund von Expertenschätzungen wo sinnvoll individuell angepasste weitere Parameter in den Ereignisbäumen. Bei letzteren wurden zudem bei der Kalibrierung der Risikoanalyse gewisse Feinjustierungen so gemacht, dass die Zielwerte ungefähr erreicht werden (Beschreibung dieses Kalibrierungsvorgehens siehe Kapitel 12).

Alle diese Teil-MKR werden dann zum Gesamt-MKR auf dem Eisenbahnnetz zusammenaddiert.

10.4. Ereignisbäume a und b

10.4.1. Allgemeines

Die Risiken durch Signalfälle von Zügen auf der Fahrt werden für die vorliegende Risikoanalyse mit zwei Szenarien bzw. Ereignisbäumen modelliert. Mit diesen können sämtliche relevanten Situationen erfasst werden. In der Risikoanalyse sind beide Szenarien in den Excel-Tabellenblättern je Zugkategorie direkt nebeneinander dargestellt.

10.4.2. Szenario a: Bremskurvenfall

Dieser Fall heisst, dass der Zug in eine Bremskurve der Zugbeeinflussung fährt und zwangsgebremst wird. Primär wird dabei an eine Fahrt aus der Herkunftsgeschwindigkeit heraus gedacht, d.h. aus der Strecken- oder Einfahrtsgeschwindigkeit heraus.

Hier mit gemeint sind aber auch die Spezialfälle, wo der Zug erst kurz vor dem Signal aus einer tieferen Annäherungsgeschwindigkeit heraus in die Bremskurve fährt, sofern eine solche (noch) wirkt. Andernfalls würde es sich um ein Szenario b handeln, z.B. wenn bereits irrtümlich manuell befreit wurde oder eine automatische Befreiung ab einer gewissen Geschwindigkeit wirkt.

10.4.3. Szenario b: Release Speed Fall

In diesem Fall wirkt auf das Zielsignal hin keine Bremskurve (mehr), z.B. wenn bereits irrtümlich manuell befreit wurde oder eine automatische Befreiung ab einer gewissen Geschwindigkeit wirkt. Es wirkt nur noch eine Überwachung auf eine konstante Maximalgeschwindigkeit («Deckel»), sei es diejenige der manuellen Befreiung (typischerweise z.B. ZUB 40 km/h) oder diejenige der automatischen Befreiung (typischerweise z.B. ETCS L1LS 15 km/h) und der Zug wird erst beim Überfahren der Balisengruppe beim geschlossenen Hauptsignal zwangsgebremst.

10.4.4. Detail-Erläuterungen zu den einzelnen Parametern der Ereignisbäume

Im Folgenden werden zu den 26 Zeilen der Ereignisbäume Detail-Erläuterungen gegeben.

Zeile	Erläuterung
1	Zug-km/Jahr Statistikbasierter Wert der Zugkategorie aus Reiter «Kat»
2	Hauptsignale pro km Einheitlich für sämtliche Kategorien und Berechnungsversionen als 1 angenommen; bewährter Wert für Risikoanalysen, u.a. abgestützt auf [15]
3	Anteil geschlossene Hauptsignale an der Gesamtzahl Reisezüge: Schätzung 1 von 100 Signalen; analog zu früheren Risikoanalysen [12], basierend auf [15]. Güterzüge: Schätzung 3 von 100 Signalen; dies ist eine konservative Expertenschätzung aufgrund der Tatsache, dass Güterzüge (sowie die analog betrachteten Erhaltungszüge) im Schnitt deutlich mehr unplanmässige Kreuzungen, Überholungen und Distanz-Situationen (teils auch durch Betriebsstörungen) erleben, da sie im Betrieb in der Regel tiefer priorisiert werden als Reisezüge.
4	Signal ist ein Ausfahr- oder Gleisabschnittsignal Für einen Fahrtverlauf wird hier der Wert als 0.5 angenommen. Es hat zwar im Verhältnis topologisch deutlich mehr solche Signale als Einfahr- und Blocksignale, aber hier ist relevant, was der Zug «erlebt», und er kann je Signalstaffel nur an einem einzigen von mehreren parallelen Signalen vorbeifahren. Zum Quercheck: Die SOB hatte 39% der ZUB-Zwangsbremsungen bei «Ausfahrt». Mit dem hier etwas höher gewählten Wert von 0.5 können zusätzlich noch Situationen z.B. mit Bahnübergängen kurz nach Einfahr- oder Blocksignalen als berücksichtigt betrachtet werden. Für die Risikoanalyse ist dieser Parameter relevant, weil angenommen werden kann, dass das Kollisionsrisiko bei den anderen als Ausfahr- und Blocksignalen durch die topologisch bedingt viel längeren Durchrutschwege, die in Realität vorhanden sind, im Mittel um mindestens zwei Größenordnungen tiefer ist und daher nicht mehr näher in der weiteren Analyse einbezogen werden muss. Bemerkung: In der Kalibrierungsversion der Risikoanalyse ist dieser Wert gleich 1 zu setzen, da ja dort auf sämtliche Signalfälle und nicht nur solche bei Ausfahr- oder Gleisabschnittsignalen abgestimmt wird (siehe Erklärung in Kapitel 12).

Zeile	Erläuterung
5	Aufteilung auf die 2 Szenarien (nur 1 ist je Signal möglich) Pro Signal schliessen sich die beiden Szenarien (Fälle) a und b aus: Man kann nicht durch eine Bremskurve gestoppt werden und gleichzeitig auch noch mit Release Speed über das Signal fahren. Die Aufteilung wurde für ZUB / ETCS L1LS je hälftig hinterlegt, was sich u.a. gut mit der SBB-Signalfall-Auswertung [7] deckt. Bei den Meterspurbahnen mit ZBMS oder ZLS-90, die beide keine Release Speed kennen, wurde der Wert für Szenario a auf 1 und für Szenario b auf 0 gestellt.
6	Nur a: Lf reagiert nicht vor dem Warnung zeigenden VS Einheitlich $5 \cdot 10^{-4}$; bewährter Wert aus früheren Risikoanalysen [12].
7	Nur a: Lf reag. auf ZB-Warnton nicht/zu spät --> Zwangsbremung Einheitlich 0.45 (Expertenschätzung bzw. aus Kalibrierungsprozess ergeben)
8	Nur b: Lf nimmt HS / Zieldistanz fälschlicherweise zu weit weg wahr Reisezüge: $2.0 \cdot 10^{-2}$ Güterzüge: $2.5 \cdot 10^{-2}$ (Expertenschätzung bzw. aus Kalibrierungsprozess ergeben)
9	Nur b: Lf bemerkt Irrtum nicht vor HS und wird zwangsgebremst Einheitlich $1 \cdot 10^{-3}$ (Expertenschätzung bzw. aus Kalibrierungsprozess ergeben)
10	Anzahl "berechtigte" Zwangsbremungen / Jahr Produkt aus Zeilen 1 bis 9
11	Nur b: Lf fährt mit der vollen release speed Die Wahrscheinlichkeit, dass der Zug in den Szenarien b auf der Höhe des Signals immer noch die volle Release Speed fährt, ist sicher deutlich unter 1. Dennoch wurde im Sinne einer konservativen Annahme der Wert in allen Analysen auf 1 gesetzt.
12	Lambda nicht oder nur unbedeutend höher als nach BZ Bei den a-Szenarien wurde dieser Wert aufgrund von Expertenwissen über die Zusammenhänge zwischen den Bremsreihen und den real vorhandenen Bremsverhältnissen sowie anhand der Einstellungen im Kalibrierungsprozess an die einzelnen Zugkategorien angepasst. Bei den b-Szenarien wurde der Wert durchgängig auf 1 gestellt, was der konservativst möglichen Annahme entspricht.
13	Kein Zusatzeffekt Mg-Bremse Bei den a-Szenarien wurde dieser Wert aufgrund von Expertenwissen über die Bremsausrüstung der Züge sowie anhand der Einstellungen im Kalibrierungsprozess an die einzelnen Zugkategorien angepasst. Bei den b-Szenarien wurde der Wert durchgängig auf 1 gestellt, was der konservativst möglichen Annahme entspricht.
14	Kein Zusatzeffekt ep-Bremse Bei den a-Szenarien wurde dieser Wert aufgrund von Expertenwissen über die Bremsausrüstung der Züge sowie anhand der Einstellungen im Kalibrierungsprozess an die einzelnen Zugkategorien angepasst. Bei den b-Szenarien wurde der Wert durchgängig auf 1 gestellt, was der konservativst möglichen Annahme entspricht.
15	Zwangsbremung genügt nicht, um Zug vor dem GP zu stoppen Dieser Rechenwert entspricht 1-Bremsgüte. Beispielsweise heisst 90% Bremsgüte in den a-Szenarien, dass bei 100 Zwangsbremungen durch Überschreitung einer Bremskurve in 90 Fällen der Zug noch vor dem Gefahrenpunkt (GP) zum Stehen kommt. Die Bremsgüten können hier manuell in den Exceltabellen eingegeben werden. Sie sind die Schnittstellengrösse zur dahinter laufenden Monte-Carlo-Simulation (mehr Informationen dazu in Kapitel 11).
16	Anzahl Überfahrungen des GP pro Jahr Produkt aus Zeilen 10 bis 15. Bemerkung: Dieser Resultatwert müsste ganz streng genommen «Anzahl Überfahrungen der Länge des Durchrutschwegs» heissen, denn falls z.B. eine Schutzweiche vorhanden ist, kann ja gar kein GP im Sinne dieser Analyse überfahren werden.
17	Kein spurbewirkter Flankenschutz vorhanden Bewährter generischer Wert übernommen aus früheren Risikoanalysen ([16], [12])
18	Feindliche Fahrstrasse eingestellt Bewährter generischer Wert übernommen aus früheren Risikoanalysen ([16], [12])

Zeile	Erläuterung
19	Feindlicher Zug kann nicht gestoppt werden Bewährter generischer Wert übernommen aus früheren Risikoanalysen ([16], [12])
20	Anzahl Kollisionen / Jahr Produkt aus Zeilen 16 bis 19
21	1 Kollision alle X Jahre; X = Kehrwert aus Zeile 20
22	Anzahl Tote im Schnitt im Falle einer Kollision Apportionment einheitlich ½ Todesfall-Äquivalent pro Kollision (Herleitung siehe Kapitel 6.2.4)
23	Anzahl Tote / Jahr Produkt aus Zeilen 20 und 22
24	1 Toter alle Y Jahre; Y = Kehrwert aus Zeile 23
25	Grenzkosten pro Todesfall [CHF] 6.5 Mio CHF gemäss aktueller BAV-Praxis
26	MKR [CHF] Produkt aus Zeilen 23 und 25

Bemerkung: Bei den b-Szenarien spielt (im Gegensatz zu den a-Szenarien) der Abstand zwischen der Fahrzeugspitze und der Fahrzeugantenne der Zugbeeinflussung physikalisch eine Rolle, denn die Zwangsbremmung wird erst ausgelöst, wenn die Antenne die Balisengruppe am Signal befährt. Allerdings ist diese Distanz von Fahrzeug zu Fahrzeug verschieden, weshalb eine exakte Modellierung für die Risikoanalyse sehr komplex wäre und daher darauf verzichtet wurde. Zur Kompensation nicht zuletzt dieses Effekts auf die sichere Seite dient, dass die Werte in den Zeilen 11 bis 14 alle auf 1 belassen wurden.

10.5. Umgang mit den Funktionalitätsunterschieden L1LS / ZUB

Die ZUB-Funktionalität kennt an Signalen ohne Loop die manuelle Befreiung auf 40 km/h durch den Lokführer, und zwar mittels der Betätigung des entsprechenden Befreiungsschalters. Dieser könnte auch irrtümlich bei Halt-zeigendem Signal betätigt werden, und der Zug könnte dann ungehindert mit 40 km/h über das Signal fahren.

Bei ETCS L1LS gibt es diese manuelle Befreiung nicht. Hingegen wird bei Signalen ohne Loop eine automatische Befreiung programmiert, unabhängig von der Stellung des Signals. Die Befreiungsgeschwindigkeit (meist in diesem Zusammenhang mit dem englischen Begriff Release Speed bezeichnet) beträgt in den hier interessierenden Fällen (vorhandener Durchrutschweg kleiner gleich 180m bis 40m) 15 km/h (SBB R I-20027 V5.0 [17]). Das heisst, dass der Zug irrtümlich mit 15 km/h über das Halt-zeigende Signal fahren könnte.

In der vorliegenden Risikoanalyse wurde für den Fall b nicht zwischen den beiden Funktionalitäten differenziert, sondern alles einheitlich so simuliert, wie wenn bei allen Zügen und Signalen die Funktionalität ETCS L1LS mit 15 km/h Release Speed wirkte.

Es wird damit explizit davon ausgegangen, dass ZUB mit manueller Befreiungshandlung des Lokführers auf 40 km/h Befreiungsgeschwindigkeit zu einem vergleichbaren Risiko führt wie ETCS L1LS mit automatischer Befreiung auf 15 km/h. Diese Aussage basiert auf der Risikoanalyse zur Gefährdung im Zusammenhang mit dem Release Speed unter ETCS L1 LS (SBB 20.02.2014 [18]) und wurde für die vorliegende Studie übernommen.

11. Monte-Carlo-Simulation

11.1. Allgemeines

Das Verfahren der Monte-Carlo-Simulation zur Untersuchung von Streuungen im Bremsystem und daraus der Bestimmung von Sicherheitsmargen ist bereits bei der Neuberechnung der Vorsignaldistanzen Normalspur (Projekt 3. Ausgabe R RTE 29100) angewendet worden und im entsprechenden Grundlagenbericht [12] dokumentiert. Es wurde zudem im Zusammenhang mit ETCS Bremskurven und ihren Sicherheitsmargen erfolgreich angewendet (siehe z.B. [19]). Im Grundsatz erlaubt die Monte-Carlo-Simulation, Berechnungen, die auf verschiedenen veränderlichen Grössen basieren, durchzuführen und eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit der Resultate zu machen, sofern die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen veränderlichen Eingangsgrössen bekannt sind. Auf eine ausführliche Wiederholung der Methodenbeschreibung wird an dieser Stelle jedoch verzichtet.

11.2. Zum Begriff Bremsgüte

Im vorliegenden Projekt diente die Monte-Carlo-Simulation dazu, den Zusammenhang zwischen Bremsgüten und Durchrutschwegen herzustellen. Mit dem Begriff Bremsgüte wird hier die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass bei einer durch ein Zugbeeinflussungssystem ausgelösten Zwangsbremung die Zugspitze noch vor dem Gefahrenpunkt zum Stehen kommt. Die Bremsgüte kann also somit immer nur im Zusammenhang von vorhandenem Bremssystem und einem (geforderten) Anhalteweg angegeben werden. Bei gleichem Bremssystem wird die Bremsgüte für längere (erlaubte) Anhaltewege zunehmen, da dann die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die Bremsung innerhalb der erlaubten Distanz gelingt.

11.3. Rechenaufgaben je Szenario

11.3.1. Szenario a

Bei einer Zwangsbremung durch eine Zugbeeinflussungs-Bremskurve ist die Rechenaufgabe für die Monte-Carlo-Simulation folgende:

Finde je v_0 und i denjenigen Wert d , damit $s \geq b + d$ nur in [1-Bremsgüte] der Fälle eintritt.

Formelzeichen:

v_0	Geschwindigkeit bei der Auslösung der Zwangsbremung
i	Massgebende Streckenneigung (für diese Berechnungen als konstant angenommen)
s	Anhalteweg aufgrund des jeweiligen Bremsmodells, streuungsbehaftet
b	EBI-Distanz der Zugbeeinflussungs-Bremskurve
d	Durchrutschweg

Das in R erstellte Tool kann die Rechnung auch umgekehrt machen, d.h. für einen gegebenen Durchrutschweg d die resultierende Bremsgüte berechnen.

11.3.2. Quercheck: Einhaltung der Risikoanalyse-Annahmen für Vorsignaldistanzen RTE 29100

Bei der Neuberechnung der Vorsignaldistanzen für Reisezüge (R RTE 29100 3. Ausgabe) wurde in der entsprechenden Risikoanalyse von der Annahme ausgegangen, dass bei einer Schnellbremsung auf Höhe des Vorsignals und einem dann entstehenden Signalfall (hinterlegte Bremsgüte 96%) nur in maximal 1/5 dieser Fälle der Durchrutschweg überschritten wird. Letztere Zahl ist ein sehr konservativer Wert, der aber auf den heute geltenden Durchrutschwegvorgaben beruht. Werden diese nun verkürzt, so muss überprüft werden, ob diese Bedingung immer noch eingehalten ist, bzw. nötigenfalls müssten die neuen Durchrutschweg-Werte so korrigiert werden, damit sie eingehalten wird. Würden neue Durchrutschwege definiert, die diese Bedingung nicht erfüllten, wäre dies eine grobe methodische Inkonsistenz.

Die entsprechende Rechenaufgabe für die Reisezugtabellen lautet damit:

Finde je v_0 und i denjenigen Wert d , damit $s \geq a + d$ nur in $[1/5 \cdot (1 - 0.96)] = (100\% - 99.2\%) = 0.8\%$ der Fälle eintritt.

D.h. die hier anzuwendende Bremsgüte ist 99.2%.

Formelzeichen:

a Vorsignaldistanz gemäss R RTE 29100

Da im Jahr 2014 bei der Neuberechnung der Vorsignaldistanzen für Güterzüge (R RTE 29100 2. Ausgabe) die Berechnungsmethodik noch leicht anders definiert worden war (Bremsgüte 99% auf den Gefahrenpunkt und nicht auf das Signal definiert), ist die Rechenaufgabe für die Güterzugstabellen damit folgende:

Finde je v_0 und i denjenigen Wert d , damit $s \geq a + d$ nur in $(100\% - 99.0\%) = 1\%$ der Fälle eintritt.

D.h. die hier anzuwendende Bremsgüte ist 99.0%.

11.3.3. Szenario b

Bei einer Zwangsbremsung beim Überfahren des Balisenpakets beim Signal ist die Rechenaufgabe:

Finde je v_0 und i denjenigen Wert d , damit $s \geq d$ nur in $[1 - \text{Bremsgüte}]$ der Fälle eintritt.

Auch hier ist die umgekehrte Rechnung selbstverständlich auch möglich.

11.4. Streuungsparameter des Bremssystems

Bei der Modellierung der Streuungen des Bremssystems wurden genau die gleichen Werte übernommen wie bei der Neuberechnung der Vorsignaldistanzen Normalspur (R RTE 29100 2. und 3. Ausgabe). Diese beruhen bei den Güterzügen auf den statistischen Ergebnissen der grossen Bremsversuchskampagne 2011 bis 2013, die in [13] und [16] ausführlich dokumentiert sind. Bei den Reisezügen beruhen sie auf der detaillierten Auswertung aller verfügbaren Bremsversuche und anderen Quellen für die Überarbeitung der R RTE 29100 3. Ausgabe, die in [12] beschrieben sind. Mit diesen Werten wird das Bremsverhalten der auf dem

Normalspurnetz verkehrenden Züge bezüglich der Erwartungswerte und auch der auftretenden Streuungen bestmöglich beschrieben. Gleichzeitig wird damit zwischen den Projekten zu den Vorsignaldistanzen und dem vorliegenden Projekt zu den Durchrutschwege eine methodische Einheitlichkeit gewahrt. Es ist damit sichergestellt, dass all die verschiedenen Ergebnisse aufeinander abgestimmt sind. Auf eine erneute Darstellung der einzelnen Parameter und deren Werte wird daher an dieser Stelle verzichtet.

Einzig bei den Untersuchungen zu den beiden Meterspur-Zugbeeinflussungssystemen ZBMS und ZSL-90 in Kapitel 17 wurden die Parameter für die Bremsmodellierung an die dort verkehrenden Zugtypen angepasst; entsprechende Details siehe an dieser Stelle.

Bemerkung: Die Monte-Carlo-Simulationen wurden in diesem Projekt immer mit 5'000 Repetitionen (Berechnungen) pro Tabellenzelle durchgeführt. Ein stichprobenweiser Vergleich mit den Resultaten bei 10'000 Repetitionen zeigte, dass die Unterschiede für die hier angesichts aller übrigen Schätzwerte erreichbare Genauigkeit absolut ausreichend ist (Abweichungen erst im Bereich von rund 1/10 bis 1/100 Prozent Bremsgüte).

12. Kalibrierung der Risikoanalyse

Die Ereignisbäume wurden bereits in Kapitel 10.4 im Detail beschrieben. Die Zahlenwerte der einzelnen Parameter sind darin begründet worden. Viele liessen sich aus Statistiken und Expertenschätzungen herleiten, so z.B. die Zug-km je Zugkategorie. Bei einigen Parametern ist allerdings der «Härtegrad» der Schätzung nicht so hoch, z.B. bei einzelnen Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen aufgeführten Lokführerfehler. Daher würde bei einer reinen «Vorwärtskalibrierung» der Risikoanalyse (d.h. es werden überall Schätzwerte eingesetzt und das Resultat nicht mehr gegenüber der Realität abgeglichen) eine gewisse Unsicherheit verbleiben, wie realistisch denn das Schlussresultat sei. Dies ist generell eine bekannte Schwierigkeit bei Risikoanalysen. Beim vorliegenden Projekt ist die Schwierigkeit insbesondere, dass zum Endzustand, der simuliert werden soll, noch keinerlei Erfahrungszahlen existieren.

Die Gefahr in einer solchen Situation ist nun, dass alle Unsicherheiten mit Sicherheitszuschlägen kompensiert werden, deren Zahlenwerte aber kaum irgendwie von der Realität her begründet werden können. Insgesamt führt dies sehr wahrscheinlich zu einem Resultat, das viel zu grosse Sicherheitsmargen enthält und damit unwirtschaftlich ist.

Im vorliegenden Projekt wurde daher grösster Wert auf eine realistische Kalibrierung gesetzt, die in Form einer «Rückwärtskalibrierung» umgesetzt wurde, d.h. ausgehend von bestimmten Kalibrierungs-Zielwerten wurden die Zahlenwerte der am wenigsten erhärteten Parameter in den Ereignisbäumen rückwärts so eingestellt, dass das Resultat möglichst nahe an der Realität zu liegen kam.

Die angewendeten Kalibrierungs-Zielwerte waren:

- Anzahl berechnete ZUB-Zwangsbremssungen pro Jahr aus Kapitel 6.5 (in der Ereignisbaum-Abfolge das erste Zwischenergebnis, jedoch etwas weniger gut statistisch abgestützt als der folgende zweite Zielwert). Es ist dabei zu beachten, dass dies alles Fälle gemäss Szenario a (Bremskurvenfall) sind, denn Fälle nach Szenario b würden

nicht als ZUB-Zwangsbremungen in die Statistik eingehen (reine «Haltauswertungs»-Funktionalität).

- Anzahl Signalfälle pro Jahr aus Kapitel 6.4, die sich je hälftig auf a- und b-Szenarien aufteilen

Um diese Werte verwenden zu können, musste folgender «Trick» angewendet werden:

Als Gedankenspiel wird angenommen, dass sämtliche Durchrutschwege gleich Null sind. In diesem Fall würden alle Signalfälle gleichzeitig zu Gefahrenpunkt-Überfahrungen. Damit können die realen (auf das Gesamtnetz und auf 100% Ausrüstung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung hochgerechneten) Signalfallzahlen aus Kapitel 6.4 genutzt werden, um die Parameter in den Ereignisbäumen so abzustimmen, dass im Ergebnis als Anzahl Gefahrenpunkt-Überfahrungen die Anzahl Signalfälle herauskommt, und zwar spezifisch nach a- und b-Szenarien und nach Reise- und Güterzügen aufgeteilt.

Die Bremsgüten wurden für die a-Szenarien aus einer Monte-Carlo-Simulation für durchgängig Null Meter Durchrutschweg berechnet und in die Risikoanalyse eingesetzt. Diese Berechnung war notwendig, weil bei den a-Szenarien auch bei Null Meter Durchrutschweg je nach Zugkategorie noch durchaus beachtliche Bremsgüten resultieren.

Bei den b-Szenarien wurde hingegen überall die Bremsgüte Null eingesetzt, denn beim Ansprechen der Zwangsbremung erst beim Signal und Null Meter Durchrutschweg ist eine Überfahrung des Gefahrenpunkts sicher.

Als weitere Spezialität für diese Kalibrierung wurde der Parameter in Zeile 4 «Signal ist ein Ausfahr- oder Gleisabschnittsignal» hier auf 1 statt 0.5 gesetzt, da ja auf sämtliche Signalfälle und nicht nur solche bei Ausfahr- oder Gleisabschnittsignalen abgestimmt wird.

Mit der so angepassten Kalibrierungsversion der Risikoanalyse konnten schlussendlich auch die weniger erhärteten Zahlenwerte wie oben beschrieben so eingestellt werden, dass die Kalibrierungszielwerte immer mit einer leichten Sicherheitsmarge erreicht wurden.

Dabei ist natürlich zu beachten, dass die einzelnen Zahlenwerte immer noch etwas von der – unbekannten – Realität abweichen können; wichtig ist für den vorliegenden Zweck vor allem, dass in der Gesamtwirkung der Ereignisbäume möglichst realistische Schätzungen herauskommen.

Als Resultat dieses Kalibrierungsvorgehens liegt somit ein bestmöglich kalibrierter «Mechanismus» vor, mit welchem nun auch andere Durchrutschwege und andere Bremsgüten untersucht werden können.

Die beschriebene Kalibrierungsversion der Risikoanalyse ist diesem Bericht als Beilage (Excel-Datei) beigelegt.

13. Vorwärtsberechnungen mit Bremsgütevorgabe

In ersten Monte-Carlo-Rechnungsläufen wurde zunächst mit fixen Bremsgütevorgaben gerechnet. Bezüglich der Struktur und Parametrierung der Risikoanalyse waren diese ersten

Runden noch provisorisch, aber sie waren eine wichtige Phase der Annäherung an die Problematik und boten erste wichtige Erkenntnisse über die Abhängigkeit der notwendigen Mindest-Durchrutschwege in Funktion von massgebender Geschwindigkeit und Neigung.

13.1. Geschwindigkeitsabhängigkeit

Bezüglich der Geschwindigkeitsabhängigkeit der a-Szenarien zeigte sich eine leichte Zunahme gegen die höheren Geschwindigkeiten, jedoch in viel geringerem Ausmass als bei den heutigen Durchrutschwegtabellen, die damals nach anderen Kriterien definiert worden waren. Der Maximalwert (Ebene) bei 160 km/h blieb bei allen getesteten Varianten unter 40m.

Diese Erkenntnis erstaunt wenig, denn die mit dieser Methode berechneten Durchrutschwege stellen ja letztlich Differenzen zwischen einer fixen Distanz (Bremskurve) und einer stochastischen Distanz (realer Anhalteweg) dar, welche beide in erster Näherung vom Quadrat der Geschwindigkeit abhängen. Überlagert dazu kommen natürlich noch die Effekte der Bremsaufbauzeiten und weiteren Phänomene des Bremsvorgangs, die einerseits in den Bremskurven der Zugbeeinflussung abgebildet sind und andererseits im realen Bremsverhalten vorkommen. Da die Absolutwerte dieser Meterdifferenzen aber relativ gering bleiben, fällt die Geschwindigkeitsabhängigkeit nicht sehr stark ins Gewicht.

Es wurde denn auch in der Arbeitsgruppe entschieden, auf eine Differenzierung der Durchrutschwege in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu verzichten.

Bemerkung: Wie in Kapitel 10.5 begründet, wurden bei den b-Szenarien alle Berechnungen für eine Release Speed von 15 km/h durchgeführt. In diesem Sinn gibt es bei den b-Szenarien auch keine Geschwindigkeitsabhängigkeit.

13.2. Neigungsabhängigkeit

Ebenso wurde aus den verschiedenen Rechnungsläufen klar, dass die Zuschläge für das Gefälle geringer zu sein brauchen als in den heute gültigen Durchrutschwegtabellen. Es zeigte sich, dass bei einem Ebene-Wert von 40m ein Zuschlag von 5m pro 10‰ Gefälle ausreichend ist. Bei kürzeren Werten in der Ebene kann dieser Zuschlag etwas verringert werden.

13.3. Bemerkung

Diese Ergebnisse wurden in den im folgenden Kapitel entworfenen und mit der Monte-Carlo-Simulation getesteten Durchrutschwegtabellen übernommen. Letztlich ist aber das resultierende MKR ausschlaggebend, das sich daraus ergibt, und nicht irgendeine exakte physikalische Modellierung für den Durchrutschweg. Die schlussendlich vorgeschlagenen Durchrutschwegtabellen wurden denn auch möglichst einfach gehalten, um ihre praktische Anwendung zu erleichtern.

14. Rückwärtsberechnung mit Metervorgabe

14.1. Beschreibung der Methodik

Da aus dem vorherigen Arbeitsschritt (Kapitel 13) klar geworden war, dass die verkürzten Durchrutschwege nur noch eine einfache Neigungsabhängigkeit, aber keine Geschwindigkeitsabhängigkeit mehr haben sollen, wurde für die weiteren Untersuchungen in den Monte-Carlo-Simulationen auf die Rückwärtsberechnung umgestellt. Damit ist gemeint, dass für eine fix vorgegebene Durchrutschwegtabelle mit einer Monte-Carlo-Simulation für jedes Tabellenfeld die resultierende Bremsgüte je Szenario berechnet wird. Die Tabelle 3 zeigt als Beispiel für eine solche zu testende Durchrutschwegtabelle diejenige für 40m in der Ebene (im Projekt vereinfacht «40m-Tabelle» genannt).

‰	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160 km/h
30	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
20	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
10	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
0	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
-10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
-20	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
-30	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55

Tabelle 3: Durchrutschwegtabelle für 40m in der Ebene [m] (vereinfacht «40m-Tabelle» genannt)

Die Monte-Carlo-Simulation lieferte jeweils je Szenario und Tabellenzelle einzeln den entsprechenden Bremsgütenwert. Tabelle 4 zeigt ein entsprechendes Beispiel.

‰	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100	110	120 km/h
30	0.8380	0.6096	0.4738	0.4938	0.5684	0.6792	0.8187	0.9200	0.9751	0.9922	0.9994	0.9998	0.9999
20	0.9506	0.8124	0.7070	0.7252	0.7897	0.8666	0.9406	0.9787	0.9940	0.9965	0.9993	0.9997	0.9998
10	0.9776	0.8993	0.8413	0.8622	0.9100	0.9534	0.9832	0.9944	0.9982	0.9971	0.9987	0.9993	0.9996
0	0.9766	0.9210	0.8988	0.9252	0.9612	0.9845	0.9952	0.9982	0.9992	0.9961	0.9967	0.9979	0.9985
-10	0.9581	0.9321	0.9476	0.9746	0.9924	0.9985	0.9997	0.9999	0.9999	0.9992	0.9996	0.9998	0.9999
-20	0.8713	0.9205	0.9732	0.9940	0.9994	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	1.0000	1.0000	1.0000
-30	0.6558	0.8981	0.9917	0.9997	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Tabelle 4: Resultierende Bremsgüten [1] mit der Durchrutschwegtabelle nach Tabelle 3 für Szenario a (Bremskurvenfall) für Güterzüge der Zugkategorie K1_50 (schwere, integral G-gebremste Güterzüge der Bremsreihen 50, 60 und 65)

Bei der Übertragung der Bremsgütenwerte in das Excel-Tool zur Risikoanalyse wurde folgendes pragmatische Vorgehen angewandt:

- Szenarien a:
 - Da unmöglich ist, die relative Häufigkeit des Vorkommens einer bestimmten Tabellenzelle (d.h. Konstellation Neigung – Geschwindigkeit) in der Realität auf dem Netz genau zu kennen, wurde jeweils die Zeile für die Ebene priorisiert betrachtet. Dies ist sinnvoll, denn bei den hier risikomässig im Fokus stehenden Ausfahr- und Gleisabschnittsignalen ist die massgebende Neigung in den meisten Fällen nahe bei Null. Natürlich gibt es auch spezielle Fälle, wo ein nennenswertes Gefälle oder eine Steigung besteht; diese Situationen fallen aber im Blick auf das Gesamt-MKR des schweizerischen Eisenbahnnetzes sicherlich um mindestens zwei Grössenordnungen weniger stark ins Gewicht.
 - Innerhalb der Zeile für die Ebene wurde jeweils manuell auf einen der tiefsten vorkommenden Werte im Geschwindigkeitsbereich über 50 km/h abgerundet. Im Beispiel nach Tabelle 4 wurde der Wert 0.9900, also 99% Bremsgüte gewählt und in die Risikoanalyse für die betreffende Zugkategorie übertragen.

- Ein Querblick durch die ganze Tabelle zeigt, dass Zellen mit einer geringeren Bremsgüte im tieferen Geschwindigkeitsbereich und tendenziell mehr in Steigungen vorkommen, also in Bereichen, die im Blick auf das Gesamt-MKR eine weniger hohe Wertigkeit haben. Hingegen fallen die Bremsgüten höher als 99% in der Ebene bei Geschwindigkeiten ab 60 km/h aufwärts stark ins Gewicht (z.B. 99.92% bei den für diese Zugkategorie wichtigen 80 km/h), womit die Bereiche mit tieferen Bremsgüten risikomässig sicher überkompensiert werden. Die Wahl des Wertes von 99% als «overall»-Bremsgüte für die a-Szenarien der Zugkategorie K1_50 ist also gut begründet und liegt eindeutig auf der konservativen Seite.
- Auf diese Weise wurden jeweils für alle Zugkategorien die Bremsgüten der a-Szenarien ermittelt und in die Risikoanalyse übernommen.
- Szenarien b: Bei den b-Szenarien wurden immer die Bremsgüten in der Ebene bei 15 km/h aus der Monte-Carlo-Simulation übernommen.

14.2. Resultate

14.2.1. Varianten von Durchrutschwegtabellen

Mit der beschriebenen Methodik wurden nun vier verschiedene Durchrutschwegtabellen auf ihre Risikowirkung untersucht, und zwar für konstant 20m, 30m, 40m und 50m in der Ebene und entsprechend angepasster Neigungsabhängigkeit gemäss Kapitel 13.2. Der Einfachheit halber wurden diese Tabellen im Projekt «20m-Tabelle», «30m-Tabelle» etc. genannt. Die 40m-Tabelle ist auf Seite 32 in Tabelle 3 als Beispiel aufgeführt.

Die entsprechenden resultierenden Risikoanalyse-Dateien sind diesem Bericht als Beilage beigelegt. Sie entsprechen der Kalibrierungsversion, wobei wie bereits in Kapitel 12 beschrieben der Parameter in Zeile 4 «Signal ist ein Ausfahr- oder Gleisabschnittsignal» auf 0.5 gestellt sowie in den Ereignisbäumen die Bremsgüten aus der Monte-Carlo-Simulation für die jeweilige Durchrutschwegtabelle eingesetzt wurden.

Die Tabelle 5 resp. die Abbildung 2 zeigen den Effekt der verschiedenen Varianten auf das jährliche netzweite MKR. Die Zahlenwerte sind die auf 1'000 CHF gerundeten Ergebnisse aus der Risikoanalyse, die natürlich angesichts der ganzen Schätzungsungenauigkeiten immer noch «zu genau» sind; in ihrer Grössenordnung erlauben sie jedoch sicherlich eine realistische Bewertung der verschiedenen Varianten untereinander und gegenüber den heutigen statistischen Zahlen.

Durchrutschwegtabelle	Netzweites MKR [CHF]
20m-Tabelle	1'034'000
30m-Tabelle	492'000
40m-Tabelle	288'000
50m-Tabelle	46'000

Tabelle 5: Aus den verschiedenen Durchrutschwegtabellen-Entwürfen resultierendes jährliches netzweites MKR

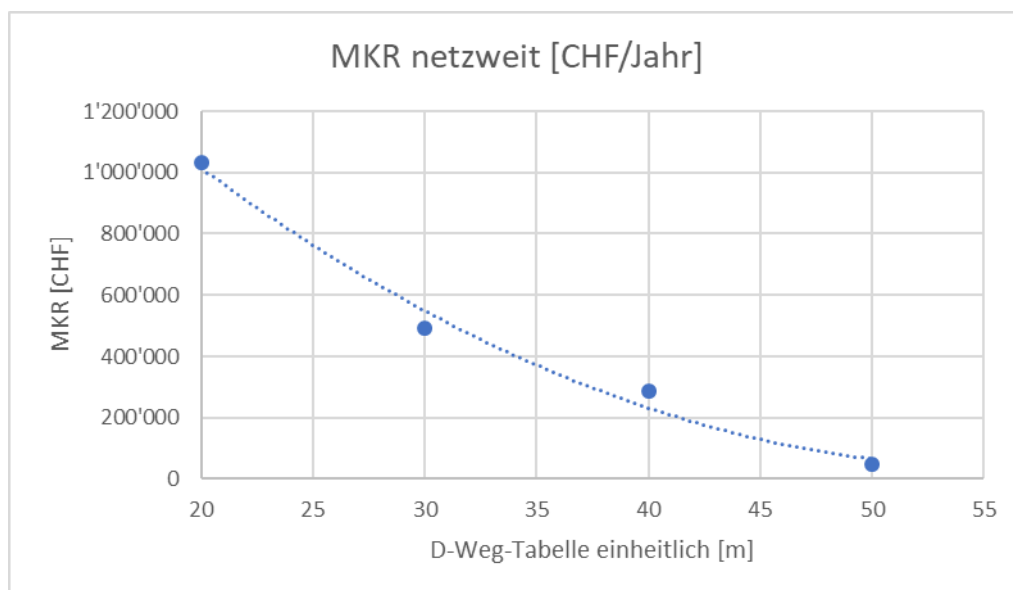


Abbildung 2: Grafische Darstellung des netzweiten jährlichen MKR in Funktion der angewendeten Durchrutschwegtabelle

Zum richtigen Verständnis sei nochmals erklärt, dass diese MKR dem Kollisionsrisiko aufgrund von Missachtung Halt-zeigender Hauptsignale durch Züge auf der Fahrt auf dem schweizerischen Gesamtnetz entsprechen, wenn sämtliche Signale eine Zielgeschwindigkeitsüberwachung und alle Ausfahr- und Gleisabschnittsignale den minimalen Durchrutschweg gemäss der entsprechenden Tabelle haben. Die Modellierung erfolgte hier zunächst so, wie wenn sämtliche Bahnen die Funktionalität ZUB / ETCS L1LS hätten. Die spezifischen Funktionalitäten und Bremseigenschaften der Bahnen mit ZBMS und ZSL-90 werden in Kapitel 17 untersucht.

Wie in Kapitel 15 noch näher begründet werden wird, wurde in der Arbeitsgruppe entschieden, die 40m-Tabelle für sämtliche ZUB / ETCS L1LS-Strecken vorzuschlagen.

14.2.2. Frage der Differenzierung nach Streckenkategorien

In der Arbeitsgruppe wurde vorgängig diskutiert, ob eventuell eine Differenzierung nach Streckenkategorie sinnvoll sei. Konkret wurde untersucht, ob auf K1-Strecken die 40m-Tabelle und auf K2-Strecken die 30m-Tabelle anzuwenden sei. Tatsächlich würde durch diese Kombination das Gesamt-MKR netzweit auf 343'000 CHF steigen, oder anders ausgedrückt, gegenüber einer durchgängigen Anwendung der 40m-Tabelle um 55'000 CHF zunehmen, was – im Vergleich zu den rund 40x höheren Risiken durch irrtümliche Abfahrten – immer noch annehmbar erscheint.

Dem Vorteil von 10m kürzeren Durchrutschwegen auf K2-Strecken stünden aber grosse Nachteile in der baulich-betrieblichen Handhabbarkeit gegenüber. Die Differenzierung müsste ja in Anlagen, wo K1- und K2-Strecken zusammenkommen, «signalscharf» erfolgen, was bereits viele Fragen in der Praxis aufwerfen dürfte. Zudem blieben viele Fragen offen bei längeren Streckensperrungen / Umleitungen, bei Fahrplan- bzw. Nutzungsänderungen der Strecken etc. Aus diesen Gründen wurde schlussendlich entschieden, für sämtliche ZUB / ETCS L1LS-Strecken einheitlich nur die 40m-Tabelle vorzuschlagen.

Die netzweite Umsetzung der vorgeschlagenen 40m-Tabelle bei gleichzeitig lückenloser Zielgeschwindigkeitsüberwachung führt wie oben gezeigt zu einem netzweiten jährlichen MKR (Kollisionsrisiko aufgrund von Missachtung Halt-zeigender Hauptsignale durch Züge auf der Fahrt) von – auf die nächsten 100'000 CHF aufgerundet – 300'000 CHF (Tabelle 5).

Wie in Kapitel 6.2.3 gezeigt, beträgt der entsprechende Wert über die letzten 10 Jahre 91'000 CHF. Es handelt sich in der Abbildung 1 um das «blaue» Risiko. Das heisst, der Vorschlag führt – isoliert betrachtet – zu einem netzweiten Risikoanstieg aufgrund von Missachtung Halt-zeigender Hauptsignale durch Züge auf der Fahrt um rund 200'000 CHF oder 1 zusätzlichen Todesfall-Äquivalent alle durchschnittlich 32 Jahre.

Das «violette» Risiko wird durch verkürzte Durchrutschwege indirekt ebenfalls geringfügig erhöht. Es sind die irrtümlichen Abfahrten an Signalen, wo es «zufällig» irgend einen D-Weg hat, d.h. aus Gründen gleichzeitig einstellbarer Fahrstrassen, was aber bei diesen Ereignissen nicht der Situation entspricht. Veränderte Vorgaben in der R RTE 25011 haben also eigentlich keinen direkten Einfluss darauf, da gegen irrtümliche Abfahrten gar keine Durchrutschwegforderungen bestehen; aber in der netzweiten Gesamtwirkung ist eine solche Änderung natürlich dennoch zu betrachten.

Wie in Kapitel 10.1 dargelegt, sprengt die quantitative Untersuchung der Risiken irrtümlicher Abfahrten und der Wirkungen von Abfahrverhinderungen den Rahmen der vorliegenden Studie und wäre Gegenstand einer gesonderten Risikoanalyse. Daher kann der Anstieg des «violetten» Risikos nur qualitativ abgeschätzt werden. Aufgrund der folgenden Betrachtung kann angenommen werden, dass der Anstieg nur geringfügig ausfällt:

Die Anhaltewege von Zügen bewegen sich bereits aus sehr tiefen Geschwindigkeiten in einer Grössenordnung, wo selbst Durchrutschwege nach bisheriger Regelung in sehr vielen Fällen ein Überfahren des Gefahrenpunkts nicht mehr verhindern können. Besonders ausgeprägt ist dies bei Güterzügen der Fall. Die Tabelle 6 zeigt dazu einige typische Werte. Diese entsprechen dem Anhalteweg aus freiem Rollen ohne Zugkraft oder elektrische Bremskraft heraus. Bei irrtümlichen Abfahrten kommt hier noch ein merklicher, fahrzeugabhängiger Zuschlag dazu aufgrund der aufgesteuerten Zugkraft bis zur Zugkraftabschaltung.

v_0 [km/h]	Reisezüge	Güterzüge
15	20	45
20	32	70
30	60	130
40	90	190

Tabelle 6: Typische Grössenordnungen von Anhaltewegen [m] in der Ebene aus tiefen Bremsausgangsgeschwindigkeiten v_0

Bei den beiden Kollisionen, die in den letzten 10 Jahren in diese Kategorie gefallen sind, betrugen die erreichten Geschwindigkeiten bei der Schnellbremsauslösung:

- Neuhausen: 56.3 km/h
- Rafz: 59 km/h

Es kann davon ausgegangen werden, dass das Schadensausmass bei einer Kollision kaum von der Anzahl Meter abhängt, um die der Gefahrenpunkt überfahren wird. Sobald das Lichtraumprofil des zweiten Zuges auch nur um einen Meter (oder sogar nur einen Bruchteil davon) verletzt wird, steigt das Risiko von Sach- und Personenschäden sprunghaft praktisch auf den «Endwert». Bei einer Verkürzung der Durchrutschweg-Vorgaben werden also logischerweise bei einem Ereignis die Anzahl Meter Gefahrenpunktüberschreitung zunehmen, die Anzahl der Gefahrenpunktüberschreitungen an und für sich jedoch in deutlich geringerem Mass. Aus diesem Grund ist eine nur geringfügige MKR-Zunahme der «violetten» Ereignisse zu erwarten.

Der grösste Block am Risiko, der «rote» (irrtümliche Abfahrten an Orten, wo gar kein Durchrutschweg da ist), kann über eine neue Durchrutschweg-Vorgabe weder nach oben oder nach unten verändert werden, sondern ausschliesslich über Abfahrverhinderungen.

Würden die neuen Durchrutschweg-Vorgaben also bei sonst gleichen Bedingungen, sprich keinem weiteren Ausbau der Abfahrverhinderungen, umgesetzt, entstünde theoretisch eine Erhöhung des netzweiten MKR um grössenordnungsmässig abgeschätzt zwischen 200'000 und 400'000 CHF jährlich (in Abbildung 3 die Situation 2 «Zukunft fiktiv»).

Wie erwähnt ist in den letzten Jahren massiv in Abfahrverhinderungen investiert worden, und dies wird auch weiterhin der Fall sein. Bereits jetzt scheint das MKR aus irrtümlichen Abfahrten deutlich gesunken zu sein (siehe 6.2.3), und eine weitere Abnahme ist praktisch sicher, so dass in Realität die Situation 3 «Zukunft realistisch» eintreten wird. Auch wenn es im Rahmen dieser Studie nicht möglich war, eine genaue Quantifizierung des Effekts der Abfahrverhinderung zu erstellen, ist es offensichtlich, dass der leichte MKR-Anstieg im «blauen» Bereich deutlich überkompensiert wird durch die MKR-Reduktion im «roten» und «violetten» Bereich.

15. Kostenaspekte

Um ein Gespür für den wirtschaftlich optimalen Durchrutschweg zu bekommen, wurde versucht, nicht nur das MKR in Funktion der Meterwerte zu berechnen (was in 14.2.1 erfolgte), sondern auch den entsprechenden Nutzen in Form von finanziellen Einsparungen.

Letztere wurden folgendermassen abgeschätzt:

Für die Einsparungen pro Meter Gleis wurde der Wiederbeschaffungswert von 3'500 CHF eingesetzt (beinhaltend konkret Unter- und Oberbau sowie Fahrleitung, z.B. gemäss Netzzustandsberichten), was eine sehr konservative Annahme sein dürfte; bei Bahnhofumbauten wie Stellwerkersatz, Nachrüstung gleichzeitiger Einfahrten, Perronverlängerungen etc. liegen die realen Kosten pro Meter zusätzlichem Durchrutschweg je nach Situation sicherlich oft viel höher (Landkäufe, ev. Abriss von Liegenschaften, Bau längerer Stützmauern etc.).

Für die Hochrechnung der Einsparungen auf das Gesamtnetz wurde folgende vereinfachte Überlegung gemacht:

Bei netzweit grob 7'000 Ausfahr- und Gleisabschnittsignalen und einer konservativ geschätzten Lebensdauer eines Signalstandorts (d.h. wie lange ein Signal topologisch an der

gleichen Stelle bleibt; ein technischer 1:1-Ersatz während dieser Zeit hätte keinen Einfluss) von 50 Jahren ergäben sich jährlich 140 Signale, die nach den neuen Durchrutschweg-Anforderungen aufgestellt werden können.

Je Durchrutschwegtabelle wurde grob die mittlere erwartete Einsparung an Metern (pro Signal) gegenüber der heutigen Vorgabe abgeschätzt, ebenfalls auf die konservative Seite. Mit diesen Annahmen konnte schliesslich die jeweilige Kosteneinsparung pro Jahr und der Kosten/Nutzen-Faktor abgeschätzt werden; die Tabelle 7 gibt diese Resultate wieder.

D-Weg Tabelle einheitlich [m]	MKR netzweit [CHF/Jahr]	Geschätzte Einsparung D-Weg pro Signal [m]	Kosteneinsparung pro Signal [CHF]	Kosteneinsparung pro Jahr [CHF/Jahr]	Kosten/Nutzen [%]
20	1'034'000	30	105'000	14'700'000	7.0
30	492'000	20	70'000	9'800'000	5.0
40	288'000	10	35'000	4'900'000	5.9
50	46'000	0	0	0	∞
			Kosten einer Abfahrverhinderung [CHF] (SBB 2013)		
			35'000		

Tabelle 7: Überschlägliche Kosten-Nutzen-Rechnung je Durchrutschwegtabelle

Die farbig hervorgehobenen Zellen zeigen auf, dass bei Anwendung der 40m-Tabelle bereits die durchschnittliche erwartete Kosteneinsparung pro Signal dem Betrag entspricht, den eine Ausrüstung mit Abfahrverhinderung kosten würde, nämlich 35'000 CHF.

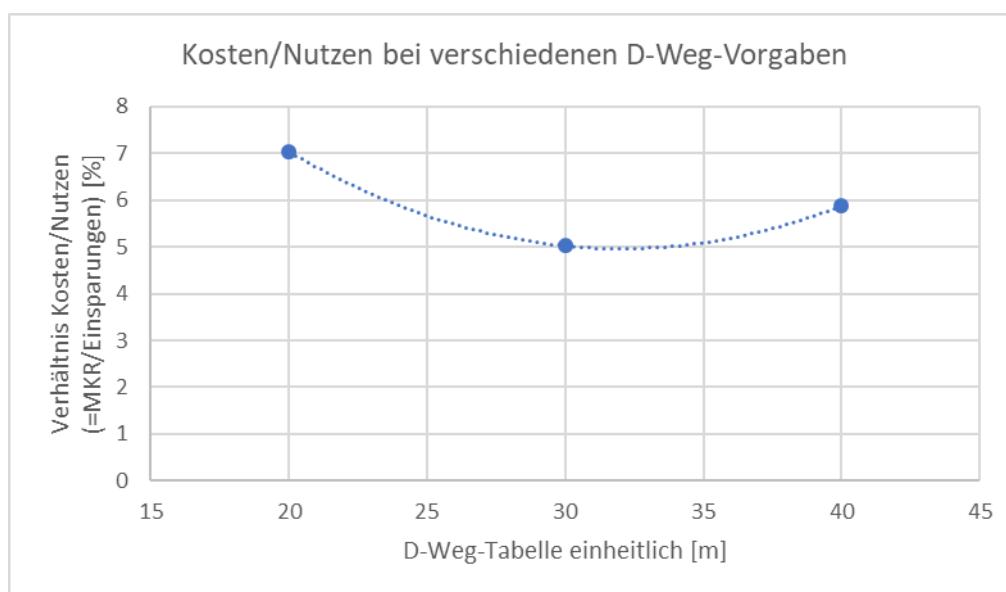


Abbildung 4: Kosten/Nutzen-Faktor je angewendeter Durchrutschwegtabelle

Die Abbildung 4 zeigt grafisch den Kosten/Nutzen-Faktor je angewendeter Durchrutschweg-tabelle auf.

Rein aufgrund dieser Grafik läge der wirtschaftlich optimale Durchrutschweg in der Ebene also bei ca. 32m. Angesichts der insgesamt aber doch auf vielen Annahmen beruhenden Berechnung und angesichts der bereits massiven Einsparungen mit der 40m-Tabelle wurde in der Arbeitsgruppe entschieden, die Spannweite nicht vollständig auszureizen und wie bereits erwähnt die Anwendung der 40m-Tabelle für sämtliche ZUB/ETCS L1LS-Strecken vorzuschlagen.

Die vorstehenden Überlegungen zeigen nochmals deutlich auf: Durchrutschwege nach heutigen Vorgaben sind eine sehr teure Sicherheitsmassnahme, die noch aus der Zeit stammt, als höchstens Zugsicherungen mit Warnung-/Halt-Auswertung existierten. Die Zugbeeinflussung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung bringt nun (schon seit über 20 Jahren in immer mehr zunehmendem Mass) eine sehr hohe Sicherheitssteigerung, die auf der anderen Seite eine Reduktion der Durchrutschwege wirtschaftlich zwingend erscheinen lässt. In der Tat besteht sonst die Gefahr, dass der «Sicherheitsfranken» nicht mehr dort investiert wird, wo er am meisten Nutzen bringt, und dass deswegen an ganz anderen Stellen möglicherweise viel grössere Sicherheitsrisiken unbehandelt bleiben.

Zusammenfassend kann also argumentiert werden, dass pro Signal mit verkürzten Durchrutschwegen mit der durchschnittlichen Einsparung eine Abfahrverhinderung finanziert werden kann. Die auf diese Weise kostenneutrale Ausrüstung erzielt jedoch eine massiv höhere Sicherheit als nach heutigen Durchrutschweg-Vorgaben ohne Abfahrverhinderung.

16. Kapazitätsgewinn

Bei Anwendung der 40m-Tabelle auf ZUB/ETCS L1LS-Strecken (und je nach bisheriger Praxis auch bei Anwendung der entsprechenden verkürzten Tabellen auf ZBMS- und ZSL-90-Strecken) resultieren zusätzlich je nach örtlicher Situation massive Vorteile bezüglich der Kapazität und Fahrplanstabilität. In der Tat werden die heutigen Fahrstrassenausschlüsse und Tiefhaltungen bei ungenügenden Durchrutschwegen dort hinfällig, wo die neuen Minimalwerte vorhanden sind. Damit wird es auf gewissen bestehenden Bahnhofsanlagen möglich, ohne Anpassung der Aussenanlagen (ausser der ggf. noch nötigen Nachrüstung mit Zugbeeinflussung) gleichzeitige Einfahrten zuzulassen.

Eine genauere Quantifizierung und Monetarisierung dieser Effekte konnte im Rahmen der vorliegenden Studie jedoch nicht erstellt werden.

17. Untersuchung für ZBMS- und ZSL-90-Bahnen

17.1. Methodik

Grundsätzlich wurden diese Bahnen nach der gleichen Methodik modelliert und analysiert wie die bis dahin behandelten ZUB / ETCS L1LS Bahnen. Allerdings wurden

- die abweichenden Funktionalitäten der Zugbeeinflussungssysteme und
- die abweichenden Bremseigenschaften

in der Risikoanalyse und in den Einstellungen der Bremsmodellierung berücksichtigt.

Sämtliche Züge dieser Bahnen verkehren auf K2-Strecken, weshalb nur diese entsprechend untersucht wurden. Zudem wurde die Zugkategorie K2_70 (Güter- und Erhaltungszüge) nicht gesondert modelliert; sie wurden implizit als Teil des übrigen Zugverkehrs und als bremstechnisch ausreichend ähnlich wie die unterste Kategorie desselben angenommen.

Aufgrund der von ZUB / ETCS L1LS abweichenden Projektierungsgrundlagen der Zugbeeinflussungssysteme existieren die Szenarien b nicht; sämtliche Risiken fallen in den Szenarien a an. Die Zeile 5 in den Ereignisbäumen wurde entsprechend angepasst (siehe auch 10.4.4).

Unter diesen Voraussetzungen konnte nun untersucht werden, wie sich das MKR des K2-Netzes gegenüber der in den vorstehenden Kapiteln behandelten Basisvariante (ZUB / ETCS L1LS) verändert, wenn fiktiv das gesamte K2-Netz mit der entsprechenden Zugbeeinflussung, den entsprechenden Zügen sowie der zu untersuchenden Durchrutschwegtabelle betrieben würde. Das Ziel war, zu zeigen, dass die jeweilige vorgeschlagene Durchrutschwegtabelle das K2-MKR der Basisvariante nicht oder nur unwesentlich überschreitet, also im Rahmen der hier erreichbaren Genauigkeit mindestens gleich sicher ist.

17.2. ZBMS

17.2.1. 10m-Tabelle

Als Grundversion für die Durchrutschwege bei ZBMS-Bahnen wurde die 10m-Tabelle (siehe Tabelle 8) untersucht.

‰	D-Weg [m]
≥0	10
-10	13.3
-20	16.7
-30	20

Tabelle 8: 10m-Tabelle für ZBMS (Auszug); Meterwerte gelten bei ZBMS ab Bremskurven-Zielpunkt

Die Parameter des dreiteiligen Bremsablaufmodells wurden für die Zugkategorien K2_115 und K2_135 so angepasst, dass sie möglichst gut die Palette der zu erwartenden Züge abdecken. Es wurde anhand der Scheibenbrems-Charakteristik auf 100 km/h und 110‰_{BAV} kalibriert; für die beiden Zugkategorien wurden dann 95‰_{BAV} resp. 135‰_{BAV} eingestellt.

Für die entsprechenden ZBMS-Bremskurven wurden Parameter hinterlegt, wie sie für relativ kurze Trieb- bzw. Reisezüge angewendet werden. Da die Bremsgüten bei den a-Szenarien ja aus der Differenz der physikalischen Anhaltewege und der ZBMS-Bremskurven resultieren, geht diese Wahl auf die deutlich sichere Seite, was die Ergebnisse auch für Bahnen mit längeren Zügen und entsprechend angepassten Bremskurven belastbar macht.

Die Details der angewendeten Parameter sind in der zugehörigen Excel-Datei zur Risikoanalyse zu finden.

Das mit dieser Modellierung resultierende K2-MKR liegt leicht über 17'000 CHF pro Jahr. Bei der Basisvariante ZUB / ETCS L1LS mit der 40m-Tabelle kam die entsprechende Zahl auf knapp 20'300 CHF zu liegen. Damit ist gezeigt, dass die 10m-Tabelle für ZBMS-Bahnen zu einem gleichwertigen Sicherheitsniveau führt wie bei der Basisvariante.

Wichtiger Hinweis: Aufgrund der unterschiedlichen Philosophie bezüglich des Zielpunktes der Bremskurven bei ZBMS gelten die Durchrutschwege der 10m-Tabelle nicht ab Signal, sondern **ab Zielpunkt der ZBMS-Bremskurve**. Dieser darf je nach örtlicher Situation auch bewusst nach dem Signal festgelegt werden; in solchen Fällen muss zum Wert aus der 10m-Tabelle die Distanz zwischen Signal und Bremskurven-Zielpunkt dazu addiert werden.

17.2.2. 5m-Tabelle

Wenn sämtliche im kommerziellen Betrieb eingesetzten Triebfahrzeuge und Wagen an jedem Fahrwerk mit Magnetschienenbremsen, die bis zum Stillstand des Zugs wirken, ausgerüstet sind (in der Regel Strassenbahn-Fahrzeuge), wäre zu erwarten, dass auch kürzere Durchrutschwege genügen. Es wurde daher in einer gesonderten Version der Risikoanalyse untersucht, ob die Durchrutschwege aus der 10m-Tabelle halbiert werden dürfen.

Bei sonst gleicher Bremsmodellierung, gleichen Bremskurven und Risikoanalyse-Parametern, nur mit einer entsprechend angepassten Zeile 13 in den Ereignisbäumen (Wert «Kein Zusatzeffekt Mg-Bremse» auf 0.05) konnte gezeigt werden, dass mit der entstehenden 5m-Tabelle ein K2-MKR von deutlich unter 10'000 CHF pro Jahr eingehalten werden kann, womit diese Tabelle unter den angegebenen Bedingungen ebenfalls zulässig ist.

17.3. ZSL-90

In einem ersten Anlauf wurde für die ZSL-90-Bahnen untersucht, ob angesichts der speziellen Projektierungsgrundlagen und Funktionalitäten dieser Zugbeeinflussung auf einen Durchrutschweg völlig verzichtet werden könnte (d.h. Null Meter). Diese Fragestellung wurde u.a. auch beflügelt von der Statistik dieser Bahnen, wonach Signalfälle bei funktio- nierender ZSL-90 schlicht noch nie vorgekommen sind [20].

Auf eine gesonderte Bremsmodellierung für diese Untersuchung wurde verzichtet, d.h. es wurden die gleichen Annahmen zu den Bremseigenschaften hinterlegt wie für die ZBMS 10m-Tabelle. Hingegen wurden die ZSL-90-Bremskurven originalgetreu nachgebildet. Es wurde auch berücksichtigt, dass der Bremskurven-Zielpunkt bei der ZSL-90 jeweils 2m vor

dem Signal liegt, womit also de facto auch bei «Null Meter» Durchrutschweg immer ein 2m-Durchrutschweg vorhanden wäre.

Es resultiert ein jährliches K2-MKR von ca. 36'000 CHF, also rund 1.5x höher als für die Basisvariante ZUB / ETCS L1LS mit der 40m-Tabelle. Damit entspricht Null Meter Durchrutschweg bei ZSL-90 zumindest gemäss der vorliegenden Methodik nicht der Anforderung eines annähernd mindestens gleich sicheren Betriebes wie auf dem übrigen Bahnnetz.

Hingegen konnte gezeigt werden, dass bei sonst gleicher Modellierung der Bremseigenschaften und Bremskurven eine Tabelle mit (in der Ebene) 5m ab Bremskurven-Zielpunkt bzw. 3m ab Signal (siehe Tabelle 9) zu einem K2-MKR von 22'400 CHF führt. Dieser Wert ist geringfügig höher als die knapp 20'300 CHF der Basisvariante ZUB / ETCS L1LS mit der 40m-Tabelle. In Anbetracht der hier überhaupt erzielbaren Genauigkeiten sowie der Tatsache, dass die für die Simulation hinterlegte Bremseigenschaften für die Züge der ZSL-90-Bahnen eher auf die konservative Seite gehen, wird die Verwendung dieser Tabelle als sinnvoll erachtet.

‰	D-Weg [m]
≥0	3
-10	4.7
-20	6.4
-30	8

Tabelle 9: 3m-Tabelle für ZSL-90 (Auszug); diese Meterwerte gelten ab Signal

18. Individuelles Risiko

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch verifiziert, dass das individuelle Risiko im zulässigen Bereich bleibt. Methodisch wird gemäss [18] vorgegangen.

Das mit der 40m-Tabelle entstehende MKR beträgt gemäss Tabelle 7 aufgerundet 300'000 CHF pro Jahr, was knapp 0.05 Todesfall-Äquivalent entspricht. Jährlich verkehren knapp 460 Mio Reisende mit der SBB (Wert 2018 aus Internet SBB). Für einen Pendler, der an 250 Tagen im Jahr pro Tag rund 10 Mal so weit fährt wie ein durchschnittlicher Reisender, berechnet sich das individuelle Risiko r_i :

$$r_i = \frac{0.05 \cdot 250 \cdot 10}{460 \cdot 10^6} = 2.7 \cdot 10^{-7}$$

Diese Zahl ist pessimistisch gerechnet, denn eigentlich müsste das MKR nicht nur auf die SBB-Reisenden, sondern auf alle Reisenden sämtlicher Bahnunternehmungen aufgeteilt werden, was zu einer tieferen Zahl führen würde. Dennoch liegt die hier berechnete Zahl bereits sehr deutlich unter dem akzeptierten Grenzwert von 10^{-5} (Quelle [3] in [18]). Damit ist sichergestellt, dass die hier erarbeiteten Vorschläge auch die Vorgaben bezüglich des individuellen Risikos einhalten.

19. Zugfahrten ohne Zielgeschwindigkeitsüberwachung

Während einer längeren Übergangszeit werden weiterhin in geringem Mass Züge ohne funktionierende Ausrüstung für Zielgeschwindigkeitsüberwachung verkehren. Es sind dies:

- Fahrzeuge, die noch nicht mit der Zugbeeinflussung ausgerüstet worden sind
- Historische Fahrzeuge
- Fahrzeuge mit momentan defekter Zugbeeinflussung

Wenn die verkürzten Durchrutschwege angewendet werden, stellt sich die Frage, ob die Risikoerhöhung bei den Zugfahrten ohne funktionierende Zielgeschwindigkeitsüberwachung zulässig ist, oder ob Gegenmassnahmen notwendig sind.

Diese Risikoabschätzung ist noch mehr von Annahmen abhängig als die generelle Risikoanalyse, die vorstehend dokumentiert worden ist. Daher wurde hier auf eine grobe Abschätzung von zwei Betrachtungsrichtungen her, nämlich quasi «top-down» und «bottom-up», zurückgegriffen.

Top-down-Abschätzung:

Damit ist eine sehr grobe allgemeine Abschätzung von den Zugzahlen und Signalfällen gemeint. Aus [14] können (gerundet) folgende Zug-km für die Jahre 1995 und «heute» (2018) entnommen werden (Tabelle 10):

	Reisezüge	Güterzüge	total
1995	135	30	165
2018	200	30	230

Tabelle 10: Anzahl Millionen Zug-km pro Jahr

Das Jahr 1995 ist für die vorliegende Fragestellung interessant, weil es damals noch kaum in signifikantem Ausmass Signale mit Zugbeeinflussung (ZUB) gab. Die jährliche Anzahl Signalfälle auf dem SBB-Netz bewegte sich damals im Bereich von ca. 100 bis 120 (persönliche Erinnerung des Autors, der damals in der zuständigen Fachsektion der SBB Generaldirektion arbeitete). Werden dazu noch die Signalfälle der übrigen Bahnen in bewusst stark pessimistischer Weise abgeschätzt und dazugerechnet, ergeben sich für das Jahr 1995 ca. 200 Signalfälle. Wird diese Zahl anhand der Entwicklung der Zug-km auf den heutigen Verkehr hochgerechnet, ergäben sich heute ca. 280 Signalfälle, wenn das Netz heute immer noch keinerlei Zielgeschwindigkeitsüberwachung hätte.

Aus der 10-Jahres-Statistik des BAV (NEDB-Datenbank) kann das durchschnittliche Personenschaden-MKR eines Signalfalles berechnet werden (über alle Bahnen / Spurweiten): Es sind dies 16.7 kCHF pro Signalfall. Hochgerechnet auf die 280 Signalfälle ergäbe sich ein jährliches MKR von ca. 4.7 Mio CHF.

Wird nun angenommen, dass in der Realität nur 1% der Zugfahrten ohne Zielgeschwindigkeitsüberwachung verkehrt, ergäbe sich ein reales MKR von 47'000 CHF.

Diese Zahl ist jedoch wahrscheinlich deutlich zu tief, weil in den letzten 10 Jahren natürlich in steigendem Mass Signale mit Zugbeeinflussung ausgerüstet worden sind; dies hat nicht nur die Anzahl, sondern auch die mittlere Schwere der Personenschäden reduziert, womit die 16.7 CHF pro Signalfall eher zu optimistisch sind, um eine Situation mit völligem Fehlen der Zielgeschwindigkeitsüberwachung abzubilden. Als grobe Annahme soll hier gelten, dass die Personenschäden in den letzten Jahren ganz ohne Zielgeschwindigkeitsüberwachung 20x höher gewesen wären. Damit kommt man schlussendlich auf eine Grobschätzung «top-down» von knapp 1 Mio CHF jährliches MKR der 1% Zugfahrten ohne funktionierende Einrichtung für Zielgeschwindigkeitsüberwachung.

Bottom-up-Abschätzung:

Hier wurde versucht, das MKR bei 2.3 Mio Zug-km ohne Zielgeschwindigkeitsüberwachung jährlich direkt aufgrund einer entsprechend angepassten Version der Risikoanalyse abzuschätzen. Das entsprechende Excel-File findet sich ebenfalls in den Beilagen zu diesem Bericht. Im Ergebnis resultieren bei dieser Betrachtung über 2.5 Mio CHF jährliches MKR aufgrund der 1% Züge ohne funktionierende Zielgeschwindigkeitsüberwachung. Diese Zahl ist noch deutlich höher als diejenige (1 Mio) aus der top-down Abschätzung. Ein Grund könnte darin zu finden sein, dass die Zunahme der Zug-km zwischen 1995 und heute zu einer überproportionalen theoretischen Zunahme der Signalfälle geführt hätte, da natürlich bei zunehmender Zugdichte auch die Wahrscheinlichkeit von Konfliktsituationen im Fahrplan ansteigt.

Bewertung und Massnahme

Die wahre MKR-Zahl von Zugfahrten ohne funktionierende Zielgeschwindigkeitsüberwachung auf dem Netz im Endzustand (alle Signale mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung, überall verkürzte Durchrutschwegtabellen angewendet) dürfte also irgendwo zwischen 1 und 2.5 Mio CHF jährlich liegen. Sie ist auf jeden Fall eindeutig zu hoch, als dass Zugfahrten ohne Zielgeschwindigkeitsüberwachung ohne Gegenmassnahme toleriert werden könnten.

In der Arbeitsgruppe wurde entschieden, als Gegenmassnahme zur Risikominderung solcher Zugfahrten gezielte Geschwindigkeitsbegrenzungen vorzuschlagen. Physikalisch ist die Begründung dazu naheliegend: Der Anhalteweg steigt im Quadrat der Geschwindigkeit, also bringt bereits eine relativ geringfügig tiefere Geschwindigkeit schon sehr viel Risikoreduktion bezüglich Zielbremsungen. Eine exakte Quantifizierung der Auswirkung auf das MKR wäre jedoch sehr schwierig und würde den Rahmen des vorliegenden Projekts sprengen.

Für das R RTE 25011 wurde folgender konkreter Vorschlag (Tabelle 11) entworfen:

Normale Streckengeschwindigkeit für die Zugreihe des betreffenden Zuges V_{normal} [km/h]	Höchstgeschwindigkeit für Züge mit fehlender oder defekter Einrichtung für Zielgeschwindigkeitsüberwachung $V_{\text{reduziert}}$ [km/h]
60 bis 160	$V_{\text{normal}} - 20$, höchstens jedoch 80
0 bis 55	$V_{\text{normal}} - 15$, mindestens jedoch 15 (resp. die ggf. noch tiefere V_{normal})

Tabelle 11: Vorschlag einer Regelung im R RTE 25011 zur Begrenzung der Höchstgeschwindigkeit von Zugfahrten mit fehlender oder defekter Einrichtung für Zielgeschwindigkeitsüberwachung

20. Fazit / Empfehlungen

Die in diesem Bericht und den zugehörigen Excel-Dateien dokumentierte Risikoanalyse zeigt klar auf, dass eine Reduktion der heutigen Meterwerte für Durchrutschwege möglich ist, ohne die Sicherheit des Eisenbahnsystems zu beeinträchtigen. Bedingung dazu ist, dass an den Signalen, wo die verkürzten Werte angewendet werden sollen, eine Zugbeeinflussung mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung vorhanden ist, und dass auf den betreffenden Streckenabschnitten allenfalls noch existierende Züge ohne funktionierende Zielgeschwindigkeitsüberwachung mit reduzierter Geschwindigkeit verkehren. Zudem sollte die Ausrüstung des Netzes mit Abfahrverhinderungen unbedingt weiter vorangetrieben werden, da dies für die Sicherheit eine massiv effektivere Investition darstellt als es das Beibehalten der alten Durchrutschweg-Vorgaben wäre. Eine 1:1-Kopplung der Ausrüstung mit Abfahrverhinderung an die Anwendung der verkürzten Durchrutschwege (d.h. die zwingende Pflicht, bei verkürzten Durchrutschwegen gleichorts immer eine Abfahrverhinderung einzubauen) ist allerdings aus Sicht der Arbeitsgruppe nicht zielführend.

Zusammengefasst empfiehlt die Arbeitsgruppe die folgenden neuen Durchrutschweg-tabellen für Signale mit Zielgeschwindigkeitsüberwachung (Tabelle 12):

Massgebende Neigung [‰]	Minstdurch- rutschweg ETCS L1LS / ZUB [m]	Minstdurch- rutschweg ZBMS [m]	Minstdurch- rutschweg ZSL-90 [m]
80	10.0	10.0	3.0
70	10.0	10.0	3.0
60	10.0	10.0	3.0
50	15.0	10.0	3.0
40	20.0	10.0	3.0
30	25.0	10.0	3.0
20	30.0	10.0	3.0
10	35.0	10.0	3.0
0	40.0	10.0	3.0
-10	45.0	13.3	4.7
-20	50.0	16.7	6.4
-30	55.0	20.0	8.0
-40	60.0	23.3	9.7
-50	65.0	26.7	11.3
-60	70.0	30.0	13.0
-70	75.0	33.3	14.6
-80	80.0	36.7	16.3

Tabelle 12: Vorschlag für die drei verkürzten Durchrutschwegtabellen für die Neuausgabe R RTE 25011.
Hinweise: Bei ETCS L1LS / ZUB und ZSL-90 gelten die Werte ab Signal, bei ZBMS ab Zielpunkt der Bremskurve.
Die massgebende Neigung wird gleich berechnet wie für die Vorsignaldistanz auf das betrachtete Signal.

Der Regelungsentwurf zur Neuausgabe der R RTE 25011 befindet sich in der entsprechenden Datei zur Lesungsrunde Herbst 2019. Darin sind die Anwendungsbedingungen genau beschrieben, damit eine sichere Interpretation durch die Signalingenieure auch ohne detaillierte Kenntnis des vorliegenden Berichts gewährleistet ist.

21. Abkürzungsverzeichnis

BAV	Bundesamt für Verkehr
BZ	Bremszettel
D-Weg	Durchrutschweg (Abkürzung im vorliegenden Bericht teilweise in Grafiken etc. verwendet)
EBI	Emergency Brake Intervention Curve = Schnellbremseinsatzkurve der Zugbeeinflussung (Begriff aus der ETCS-Welt)
ep-Bremse	Elektropneumatische Bremse
ETCS	European Train Control System
ETCS L1LS	ETCS Level 1 Limited Supervision
EVU	Eisenbahn-Verkehrsunternehmen
EZ	Erhaltungs- oder Bauzug
GP	Gefahrenpunkt
GZ	Güterzug
HS	Hauptsignal
Lf	Lokführer
Mg-Bremse	Magnetschienenbremse
MKR	Monetarisiertes kollektives Risiko
RZ	Reisezug
SUST	Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle
VS	Vorsignal
ZBMS	Zugbeeinflussung Meterspur (Nationaler Standard)
ZSL-90	Zugbeeinflussungssystem mit Linienleiter gewisser Meterspurbahnen, die nicht zu ZBMS migrieren
ZUB	Zugbeeinflussungssystem ZUB 121
λ	(griechisch Lambda) Bremsprozente oder Bremsverhältnis

22. Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] BAV, AB-EBV Durchrutschweg, Standbericht Ende 2011, 21.03.2012.
- [2] Lambda-Pi GmbH, Pierre Senglet, Thesenpapier Aktualisierung Durchrutschweg V3.2, 30.06.2018.
- [3] BAV, Auszug aus Datenbank NEDB zu Signalfällen März 2009 - März 2019.
- [4] SBB I-AT-SAL/ZBF RAMS, Sicherheitsziele für Sicherungsanlagen auf Strecken mit ETCS Level 2 mit Vmax bis 160 km/h, V1.3, 15.09.2011.
- [5] SBB I-AT-SAL, Projekt SA ETCS Level 2, Apportionments, 22.07.2013.
- [6] BAV, Ereignisdatenbankauszug 2000 - 2009.
- [7] SBB Infrastruktur Team Fahrdynamik, Projektbezogene Auswertung der Signalfälle auf der SBB Infrastruktur, erste 4 Monate 2019.
- [8] SBB Infrastruktur I-AT-ZBF, ZB Cockpit, Stand Ende April 2019.
- [9] SOB, ZUB Ereignisanalyse 2018, 05.02.2019.
- [10] SBB P-OP-RSQ-SIM-ERA, Statistische Auskünfte zu ZUB-Zwangsbremungen (Mailverkehr), Dezember 2018.
- [11] Wende Dietrich, Fahrdynamik des Schienenverkehrs, Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, September 2003.
- [12] Lambda-Pi GmbH, Pierre Senglet, Vorsignaldistanzen für Reisezüge Normalspur und weitere Überarbeitungen im R RTE 29100, technischer Grundlagenbericht zur 3. Ausgabe, Lesungsentwurf V0.4, 22.03.2019.
- [13] Senglet Pierre, Bremsversuche mit Güterzügen, Herleitung der Anhaltewegformel SBB und der Vorsignaltabellen 2014, SBB, 15.05.2014.
- [14] Bundesamt für Statistik (BFS), Öffentlicher Verkehr (inkl. Schienengüterverkehr) - detaillierte Zeitreihen (Excel-File zum Download im Internet), 17.09.2019.
- [15] Schlatter Hanspeter, Theoretische Überlegungen zum Überfahren Halt zeigender Signale, Signal & Draht, 2010.
- [16] Hitz-Gamper Benedikt, Risikoorientierte Festlegung der Vorsignaldistanzen für Güterzüge, SBB I-AT-SAL-SIH, 07.04.2014.
- [17] SBB, R I-20027, Konzept für den Einsatz der Zugbeeinflussung auf Strecken mit Aussensignalisierung, Version 5-0, 01.01.2017.

- [18] SBB I-AT-SAL, Markus Gerber, Projekt Pilot L1LS, Risikoanalyse Release Speed V1.1, 20.02.2014.
- [19] Bourgeteau Franck, Gilon Guillaume, Meyer Pierre, Chavagnat Richard, Une approche statistique de la sécurité et de la performance sous ERTMS, Revue Générale des Chemins de Fer, Février 2011.
- [20] Hörlein Michael, RBS, Mündliche Aussage im Rahmen dieses Projektes nach Rückfrage innerhalb RBS sowie der anderen ZSL-90-Bahnen, 2019.
- [21] BAV, Bericht über die Sicherheit im öffentlichen Verkehr 2017.
- [22] BAV, Bericht über die Sicherheit im öffentlichen Verkehr 2018.
- [23] SOB Geschäftsbereich Verkehr, ZUB Ereignisanalyse 2018, 05.02.2019.
- [24] SBB-P Sicherheitsmanagement, Ereignisanalyse, Statistische Aussagen zu ZUB-Zwangsbremssungen, e-Mail-Wechsel, 06.12.2018.
- [25] SBB Systemführerschaft ETCS, KGB-Projektierungsregel 6.1.1.1 V2 (Minstdurchrutschweg), 08.02.2018 von Martin Locher erhalten; nicht in der Version, die auf der BAV-Homepage aufgeschaltet ist, enthalten.

Zudem wurden zu den analysierten Kollisionen, die in diesem Bericht erwähnt sind, soweit in der SUST-Internet-Datenbank vorhanden die entsprechenden SUST-Schlussberichte ausgewertet.