

Satellite Assisted WArning System SAWAS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2015
(VIF2015)

03 2019



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

Rail Expert Consult GmbH
Praterstraße 25/27
A – 1020 Wien



TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation
Gußhausstraße 27-29/E120
A – 1040 Wien



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Satellite Assisted Warning System SAWAS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2015)

Autoren:

Dipl.-Phys. Florimond COLLETTE, MSc

Dipl.-Ing. Jadre MARAS

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard NAVRATIL

DI(FH) Stefan SCHMIDT, MSc

Dr. Robert SCHÖNAUER

DI(FH) Clemens VIERTHALER

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Auftragnehmer:

Rail Expert Consult GmbH

TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation

INHALTSVERZEICHNIS

1	Projektübersicht SAWAS.....	6
1.1	Ausgangssituation und Stand der Technik.....	6
1.1.1	SCWS-Technologie	6
1.1.2	Stand der Technik bei den ÖBB.....	7
1.1.3	GNSS / TEPOS / EPOSA	10
1.2	Innovationsgehalt des Vorhabens und erwartete Ergebnisse.....	11
1.3	Methode und wissenschaftlicher Lösungsansatz	12
1.3.1	Systemkonzeption	13
1.3.2	Entwicklung	14
1.3.3	Feldtests.....	14
1.3.4	Evaluierung / Verwertung.....	15
2	Systemkonzeption.....	16
2.1	Anwendungsfälle	16
2.2	Systemkonzept.....	16
2.3	Pflichtenheft.....	20
3	Entwicklung.....	21
3.1	Betriebsformen des Demonstrators	21
3.2	Infrastrukturdaten.....	22
3.3	SAWAS Demonstrator App.....	23
4	Feldtests	42
4.1	Testplanung.....	42
4.2	Datenerhebung.....	42
4.3	Testdurchführung	44
4.3.1	Testszenarien	44
4.3.2	Testverlauf.....	44
4.3.3	Protokollierung.....	47
5	Evaluierung / Verwertung	48
5.1	Datenauswertung	48
5.1.1	Applikationsdaten und NMEA-Daten.....	48
5.1.2	RINEX-Daten.....	53
5.2	Umsetzungsempfehlung	59
5.2.1	Aufbau der Umsetzungsempfehlung.....	59
5.2.2	Positionierungsgenauigkeit.....	60
5.2.3	Sekundäre Technologien zur Positionsbestimmung.....	61
5.2.4	Infrastrukturdaten	63

5.2.5	Realisierbarkeit der Anwendungsfälle	63
5.3	Ausblick	65
	Literaturverzeichnis	72

1 PROJEKTÜBERSICHT SAWAS

In diesem Kapitel werden die Ausgangssituation und Ziele des Forschungsprojekts SAWAS beschrieben. Es wird kurz auf stellwerkgebundene Warnsysteme (en: *Signal Controlled Warning System*; kurz: SCWS) generell und auf das bei den ÖBB aktuell im Einsatz befindliche Rottenwarnsystem AWS im Speziellen eingegangen, um anschließend die Ziele des Forschungsprojekts SAWAS dazu in Relation zu setzen.

1.1 Ausgangssituation und Stand der Technik

1.1.1 SCWS-Technologie

Das Rottenwarnsystem AWS der ÖBB ist ein SCWS, welches herannahende Züge oder Schienenfahrzeuge durch Daten aus der Leit- und Sicherungstechnik (LST) erkennt, Warnungen generiert, und an MitarbeiterInnen im Gleisbereich ausgibt.

Die generische Architektur von SCWS beinhaltet:

- Leit- und Sicherungstechnik,
- SCWS-Innenanlage,
- SCWS-Außenanlage,
- Warnmittel.

Die generische Architektur in Abbildung 1 und die nachfolgende Beschreibung geben eine vereinfachte Übersicht auf funktionaler Ebene und sind unabhängig von der speziellen Ausprägung der technischen Implementierung.

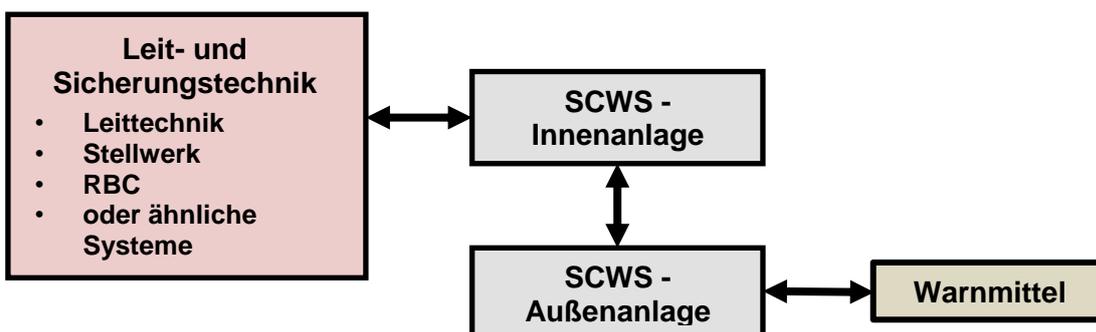


Abbildung 1: Generische Architektur eines SCWS

Die Leit- und Sicherungstechnik meldet relevante Zugpositionen und Signalisierungsinformationen an die SCWS-Innenanlage. Die Daten werden aus der Leittechnik, aus Stellwerksinformationen, aus einem Radio Block Center (RBC), oder aus

einem ähnlichen System generiert. Grundsätzlich besteht auch die technische Möglichkeit, dass die SCWS-Innenanlage den Fahrstraßenstellprozess beeinflusst (z.B. um die Freistellung des Signals zu verzögern).

Die SCWS-Innenanlage empfängt und verarbeitet die Daten über Zugpositionen und Signalisierung. Diese Daten sind die Basis, um eine Warninformation zu generieren, welche dazu dient MitarbeiterInnen im Gleisbereich vor herannahenden Zügen zu warnen.

Die SCWS-Außenanlage ist mit der SCWS-Innenanlage und dem Warnmittel verbunden. Die SCWS-Außenanlage empfängt die Informationen aus der SCWS-Innenanlage und gibt diese verarbeitet an das Warnmittel weiter. Die Außenanlage umfasst Warnmittel wie zum Beispiel Horn und Drehlicht sowie das Warngerät (zum Beispiel das Personenwarngerät ZPW von Zöllner Signal).

Das Warnmittel ist mit der SCWS-Außenanlage verbunden oder ist im Warngerät enthalten. Basierend auf den Informationen der SCWS-Außenanlage gibt das Warnmittel ein akustisches und/oder visuelles Signal aus, um Arbeiter vor herannahenden Zügen zu warnen. Die generierte Warninformation wird von der SCWS-Innenanlage an die SCWS-Außenanlage gesendet.

Die Erhöhung der Sicherheit durch ein SCWS beruht auf der Tatsache, dass die Warninformation ausschließlich technisch, ohne menschliche Handlungen, generiert und übertragen wird. Dadurch sind menschliche Fehler bei der Generierung und Aussendung des Warnsignals und bei der Detektion herannahender Züge weitgehend ausgeschlossen.

1.1.2 Stand der Technik bei den ÖBB

1.1.2.1 Hintergrund des bestehenden AWS

Die betriebliche Abwicklung des Verkehrs im Netz der ÖBB erfolgt in 5 Betriebsführungszentralen (BFZ). Einer der Gründe der Entscheidung hierfür war, die Anzahl der FahrdienstleiterInnen zu senken. Diese Entscheidung hat zur Folge, bei der Sicherung von Arbeitsstellen die FahrdienstleiterInnen durch eine technische Lösung zu substituieren.

1.1.2.2 Kurze Systemübersicht

Das stellwerksgebundene AWS der ÖBB, welches zurzeit teilweise eingesetzt wird, ist ein SCWS mit statisch projektierten Warnbereichen. Ein Warnbereich bezeichnet dabei einen in seiner topologischen Ausdehnung definierten Bereich im Gleisbereich, der aus Gleisabschnitten, Teilen von Gleisabschnitten und/oder Weichen besteht.

Das AWS ist mit dem Stellwerk verbunden und kann dadurch Warnungen für zuvor definierte Warnbereiche generieren und Parameter berechnen. Bei der Anmeldung der Warngeräte an der Arbeitsstelle werden die möglichen Warnbereiche über das Auslesen der RFID-Anmeldepunkte vorselektiert. Diese sind entlang der Strecke (z.B. auf Masten) installiert. Die vorselektierten Warnbereiche werden dem/der FahrdienstleiterIn übermittelt und von diesem bestätigt. Durch diese Vorgehensweise bei der Anmeldung unterstützt AWS, dass das Warngerät an der korrekten Position ist und nur die vorgesehenen Warnbereiche ausgewählt werden können. Um eine zeitgerechte Warnung vor herannahenden Schienenfahrzeugen sicherstellen zu können, darf sich der Mitarbeiter nur in jenen Warnbereichen bewegen, für die er sich bei dem/der FahrdienstleiterIn angemeldet hat.

1.1.2.3 Systemarchitektur

Abbildung 2 zeigt die grobe Systemarchitektur des AWS der ÖBB. Die Daten über Zugpositionen und Signalisierung werden von der Eisenbahnsicherungsanlage (ESA) bereitgestellt. Die Komponenten sind:

- AWS-Außenanlage (RFID-Anmeldepunkte, AWS-Warngeräte, und AWS-Warneinrichtungen)
- AWS-Innenanlage (umfasst die AWS-Zentrale)

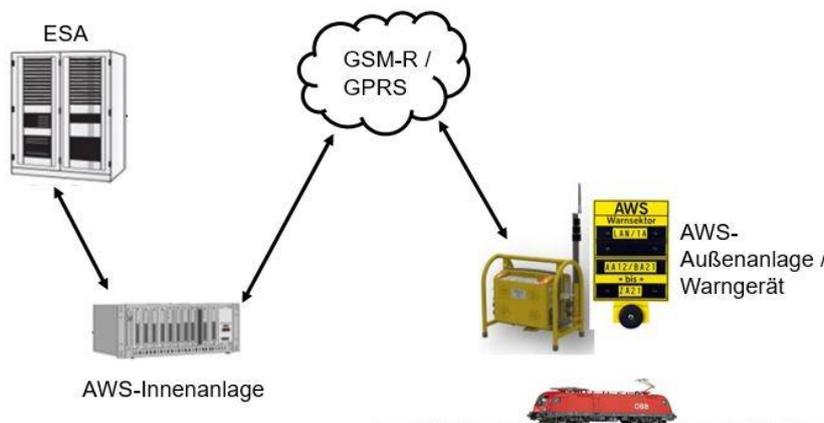


Abbildung 2: Grundarchitektur des AWS der ÖBB

Auch das GSM-R Netzwerk kann als eigenes Teilsystem betrachtet werden. Für die Kommunikation wird der Dienst GPRS des GSM-R Netzwerkes verwendet.

Jedes Stellwerk ist mit einer AWS-Innenanlage ausgerüstet, welche die Daten des Sicherungssystems verarbeitet und relevante Informationen an die AWS-Außenanlage versendet.

Die **Eisenbahnsicherungsanlage** hat folgende Eigenschaften:

- Das Stellwerk überträgt folgende Daten an die AWS-Innenanlage:
 - Fahrstraßeninformationen,
 - Weicheninformationen,
 - Informationen der Gleisfreimeldeanlage,
 - Signalstellungen und -zustand;
- Die Bedienoberfläche des Stellwerks oder der Leittechnik haben die Funktion, Warnbereiche zu aktivieren und die aktivierten Warnbereiche bildlich darzustellen;
- Das Stellwerk hat die Möglichkeit, die Freistellung von Signalen zu verzögern, um die Mindestvorwarnzeit sicherzustellen.

Die **AWS-Innenanlage** hat unter anderem folgende Funktionen:

- Erzeugung von Informationen für jeden zugeordneten Warnbereich (statisch definiert);
- Generieren zeitgerechter Warninformation anhand der Informationen aus der Eisenbahnsicherungsanlage;
- Zurücksetzen der Warninformation wird automatisch durchgeführt.

Die **AWS-Außenanlage** hat unter anderem folgende Funktionen:

- Basierend auf Informationen der AWS-Innenanlage löst die AWS-Außenanlage eine akustische bzw. optische Warnung über das Warngerät an einer Arbeitsstelle aus;
- Ein oder mehrere Warnbereiche können durch einen Bediener mit der AWS-Außenanlage angemeldet werden;
- Die Abmeldung eines Warnbereichs ist jederzeit möglich.

Korrekte Positionierung des Bedieners wird durch folgende Systeme unterstützt:

- RFID-Anmeldepunkte sind entlang der Strecke angebracht;

- RFID-Anmeldepunkte enthalten alle Informationen für die Anmeldung von Warnbereichen;
- Für die Aktivierung des AWS müssen sich sowohl Bediener als auch AWS-Außenanlage an der richtigen Position befinden.

Die **Warneinrichtung** gibt Warnsignale mit folgenden Eigenschaften aus:

- Das Warnsignal besteht aus einem akustischen und einem visuellen Signal;
- Der Schallpegel des akustischen Warnsignals ist 3 dB(A) höher als die Umgebungsgeräusche an der Arbeitsstelle;
- Ist mit dem Warngerät verbunden oder in diesem integriert.

1.1.3 GNSS / TEPOS / EPOSA

GNSS (globale Navigationssatellitensysteme) wie GPS, Galileo, GLONASS, oder Beidou werden zur Positionsbestimmung und Navigation durch den Empfang der Signale von Navigationssatelliten eingesetzt.

TEPOS (T-Kom Services Echtzeitpositionierung) bezeichnet ein seit 2008 existierendes Referenzstationsnetzwerk für die Bereitstellung von Korrekturdaten. Mit TEPOS können in ganz Österreich Korrekturdaten für die Positionsbestimmung mit GNSS empfangen, und so die Genauigkeit der Positionierung gesteigert werden.

EPOSA (Echtzeit Positionierung Austria) ist ein Service zur Bereitstellung von Korrekturdaten für Positionsbestimmungen. EPOSA ist die Dachmarke der drei Referenzstationsnetzwerkbetreiber TEPOS, Wiener Netze und Energie Burgenland. Das System unterstützt die Positionsbestimmung durch GNSS mittels Referenzstationen. Die Korrekturdaten werden im standardisierten Format RTCM SC-104 in Echtzeit übermittelt. Die Datenkommunikation zwischen dem EPOSA-Service und dem Endgerät findet mittels GPRS und NTRIP Protokoll statt. Der Nutzer eines Endgerätes sendet die über GNSS selbst ermittelten Positionsdaten an den EPOSA-Service und dieser sendet die korrigierte Position (Verbesserung der Genauigkeit) zurück. Von EPOSA werden verschiedene Dienste angeboten, die unterschiedliche Genauigkeit bei der Positionsbestimmung beinhalten. Für SAWAS muss ein Echtzeitdienst herangezogen werden, um eine dynamische Positionsbestimmung zu ermöglichen. Mit einem Echtzeitdienst von EPOSA kann theoretisch eine Ortungsgenauigkeit von bestenfalls $\pm 1,5$ cm erreicht werden.

1.2 Innovationsgehalt des Vorhabens und erwartete Ergebnisse

Der Innovationsgehalt im erarbeiteten Konzept SAWAS liegt in der Erleichterung des Anmeldeprozesses als auch in der erweiterten Optimierung der Vorwarnzeit. Die Bediener der AWS-Warngeräte werden durch die GNSS-Ortung unterstützt. Die Warnbereiche können zukünftig dynamisch, in Abhängigkeit des Standorts der AWS-Warngeräte festgelegt werden. Durch die dynamische Anpassung der Warnbereiche ist eine Optimierung der Vorwarnzeit und somit eine Reduzierung der Dauer von Arbeitsunterbrechungen durch eine Warnung möglich.

Anders als beim bisherigen AWS der ÖBB wird die Ortung der AWS-Warngeräte durch GNSS-gestützte Ortung durchgeführt. Bei der derzeitigen Lösung wird die Ortung der AWS-Warngeräte über die Registrierung von RFID-Tags unterstützt. Die RFID-Tags müssen vorab aufwändig entlang der ÖBB-Infrastruktur installiert werden. Um die Verfügbarkeit zu garantieren, müssen sie auch regelmäßig gewartet und eventuell ersetzt werden. Die Registrierung der AWS-Warngeräte erfolgt durch eine manuelle – und daher aufwändige – Bedienung.

Für SAWAS sind keine RFID-Tags nötig, wodurch Kosten für Hardware, deren Installation und Wartung eingespart werden können. Auch der Anmeldeprozess wird für die Bediener erleichtert. Es sind keine aufwändigen Bedienhandlungen nötig, da die Ortung der AWS-Warngeräte automatisch mittels GNSS-Ortung stattfindet. Durch den erleichterten und verkürzten Anmeldeprozess wird die Wirtschaftlichkeit für Arbeitsstellen erhöht. Weiters wird durch den Entfall der RFID-Tags im Anmeldeprozess die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems AWS erhöht.

Bei SAWAS werden bei der Positionsbestimmung der AWS-Warngeräte Warnbereiche dynamisch, je nach Standort der AWS-Warngeräte, festgelegt. Verändert sich der Standort der angemeldeten AWS-Warngeräte, erfolgt eine Neuberechnung des dazugehörigen Warnbereichs. Durch die dynamische Anpassung der Warnbereiche ist eine Optimierung der Vorwarnzeit möglich. Auch wird die bisherige Vorgehensweise der statischen Projektierung von Warnbereichen entfallen.

Die Ergebnisse wurden anschaulich aufbereitet und dem Auftraggeber präsentiert. Folgende Zielsetzungen wurden im Rahmen des Projekts angestrebt:

1. Systemkonzept für SAWAS;
2. Demonstrator, der die geforderten Funktionen nachbildet;

3. Wissen über die funktionale Performance des Demonstrators;
4. Umsetzungsempfehlung für netzweiten Einsatz.

Die aus SAWAS gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse können dazu beitragen, das bestehende AWS dergestalt aufzuwerten, dass es in Einklang mit aktuellen Innovationen bei Geoinformationsdiensten steht und damit Kosten bei Gleisbaustellen reduziert werden können.

1.3 Methode und wissenschaftlicher Lösungsansatz

Im Projekt SAWAS wurde ein Konzept zur GNSS-gestützten Positionserfassung der AWS-Warngeräte beim Anmeldevorgang und bei der Sicherung von Arbeitsstellen erarbeitet. Zur Steigerung der Genauigkeit der GNSS-gestützten Ortung der AWS-Warngeräte wurde der von den ÖBB bereits genutzte Referenzdienst TEPOS/EPOSA verwendet.

Des Weiteren wurde ein Demonstrator entwickelt und validiert, welcher die Funktionalität der Echtzeit-Ortung der AWS-Warngeräte abbildet. Es wurde gezeigt, wie bei Anmeldungen und Positionsänderungen der AWS-Warngeräte dynamisch neue Warnbereiche berechnet werden können.

Der **methodische Ansatz** für den Workflow für das Projekt SAWAS ist in Abbildung 3 dargestellt, die einzelnen Phasen werden in den Abschnitten 1.3.1 bis 1.3.4 kurz erörtert. Die Ergebnisse der einzelnen Phasen werden in den Kapiteln 2 bis 5 detailliert dargestellt.

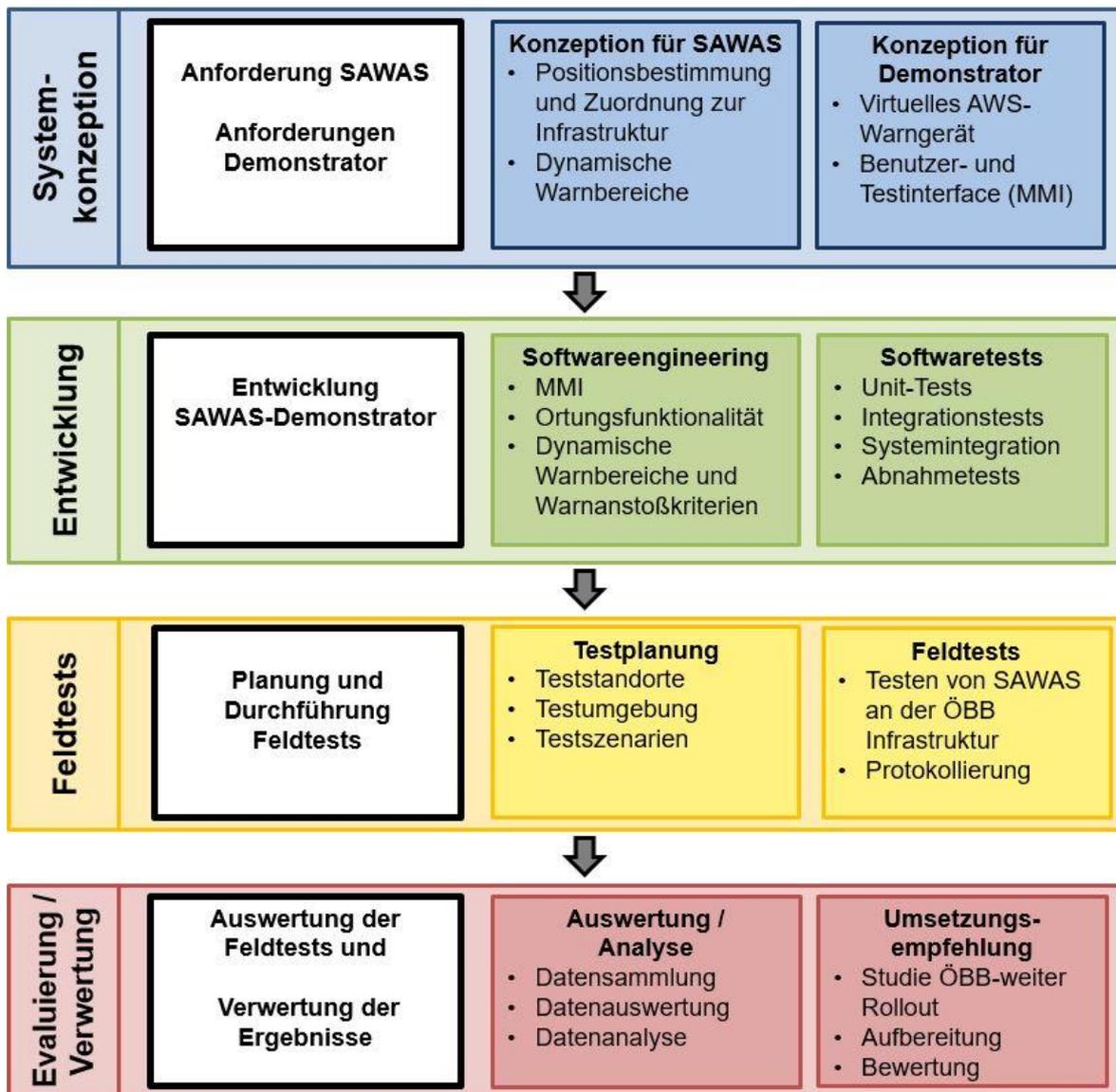


Abbildung 3: Methodischer Ansatz für den Workflow im Projekt SAWAS

1.3.1 Systemkonzeption

Die Systemkonzeption wurde in zwei Teile aufgegliedert:

- die Konzeption von SAWAS als Upgrade des bestehenden AWS mit GNSS-Ortung,
- die Konzeption des Demonstrators.

Das Konzept von SAWAS als AWS-Upgrade sieht vor, dass jedem Endgerät bei Anmeldung auf Grundlage der aktuellen Position ein Warnbereich zugeordnet wird. Es wurde gezeigt, wie bei Anmeldungen und Positionsänderungen der AWS-Warngeräte dynamisch neue Warnbereiche berechnet werden können.

Für die genaue Positionsbestimmung der AWS-Warngeräte mittels GNSS-Ortung wurden die Korrekturdaten des TEPOS/EPOSA Diensts herangezogen.

Der Demonstrator wurde so konzipiert, dass die Funktionen der AWS-Warngeräte mit GNSS-Ortung abgebildet wurden. Zusätzlich wurden die Funktionen für die Zuordnung von Warnbereichen zu einem AWS-Warngerät und deren Aktivierung nachgebildet (keine Realisierung einer Anbindung an die Leit- und Sicherungstechnik des bestehenden AWS).

Anhand der Konzeption des Demonstrators wurden funktionale Anforderungen in einem Pflichtenheft (en: *functional requirements specification*; kurz: FRS) verfasst, an der sich die nachfolgende Entwicklung des Demonstrators orientierte.

1.3.2 Entwicklung

Anhand der FRS wurde die Entwicklung der Systemkomponenten für den Demonstrator umgesetzt. Es wurde eine Hardware (Endgerät) ausgewählt, die den Demonstrator darstellt. Auf dieser wurde die Software, die die Funktionen enthält, welche in der FRS beschrieben sind, installiert.

Die Bedienbarkeit am Demonstrator/AWS-Warngerät orientierte sich an dem derzeit in Betrieb befindlichen Bediengerät (ZPW-G von Zöllner Signal GmbH) und wurde in iterativen Abstimmungen mit den ÖBB festgelegt.

Es wird darauf hingewiesen, dass keine CENELEC-konforme Entwicklung und Nachweisführung durchgeführt wurde. Bei der Entwicklung handelt es sich um einen Demonstrator, der die zur Evaluierung des Konzept SAWAS benötigten Funktionen darstellt.

1.3.3 Feldtests

Die Organisation der Feldtests erfolgte in Abstimmung mit den ÖBB.

Ein Testplan wurde ausgearbeitet, um Abgrenzung, Vorgehensweise, Mittel und Ablaufplan der Testaktivitäten zu bestimmen. Anschließend wurde die Testspezifikation ausgearbeitet, um den Testablauf und Testfälle zu bestimmen.

Die Feldtests wurden mitprotokolliert, und die Ergebnisse wurden in einem Testbericht dargestellt, welcher als Vorlage für die anschließende Datenauswertung und Verwertung diente.

Zur Erhebung der Positionsdaten wurde ein hochgenauer GNSS-Empfänger (Modell 10xx von ppm Precise Positioning Management GmbH) verwendet. Dieser hat gegenüber den später im Echtbetrieb einzusetzenden Geräten den Vorteil, dass eventuell auftretende Lokalisierungsfehler besser analysiert werden können.

1.3.4 Evaluierung / Verwertung

Als Input für die Evaluierung der Daten aus den Feldtests diente der Testbericht. Es wurden die relevanten Daten gesammelt, analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse wurden in einer abschließenden Umsetzungsempfehlung aufbereitet und dargestellt.

Anhand der erhobenen Daten sowie aus zusätzlichen Recherchen in Fachliteratur und Statistiken aus bereits durchgeführten Projekten wurden in der Umsetzungsempfehlung weitere Empfehlungen für eine Umsetzung für die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Funktionen ausgearbeitet, wobei besonders Bezug auf das bestehende AWS genommen wurde.

2 SYSTEMKONZEPTION

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Abbildung 3 dargestellten Phase der Systemkonzeption vorgestellt.

2.1 Anwendungsfälle

In einem ersten Schritt wurden die im Projekt zu behandelnden generischen Anwendungsfälle definiert. Diese wurden in Form von UML Flussdiagrammen und ausführlichen Beschreibungen (Ausgangssituation, Endsituation, Prozessschritte) in einem Dokument festgehalten und stehen in dieser Phase noch in keinem unmittelbaren Zusammenhang zu dem in einer späteren Phase zu entwickelnden Demonstrator.

Folgende Anwendungsfälle wurden gemeinsam mit den ÖBB identifiziert:

- Anwendungsfall 1: Anmeldung Warngerät;
- Anwendungsfall 2: Positionierung Warngerät;
- Anwendungsfall 3: Generierung dynamischer Warnbereich;
- Anwendungsfall 4: Positionsänderung Warngerät;
- Anwendungsfall 5: Generierung Warnung;
- Anwendungsfall 6: Tracing;
- Anwendungsfall 7: Abmeldung Warngerät.

2.2 Systemkonzept

Im nächsten Schritt erfolgte die Erstellung eines Systemkonzepts, das eine funktionale Erläuterung des Systems des SAWAS Demonstrators und der technischen Systemkomponenten sowie Umsysteme enthält. Weiters wird die prinzipielle Systemarchitektur von SAWAS dargestellt, wobei die einzelnen, grundlegenden Funktionen bestimmten Systemkomponenten und Umsystemen zugeordnet werden. Das Systemkonzept beruht auf den beschlossenen Anwendungsfällen und beschreibt Systemfunktion und Systemarchitektur des SAWAS Demonstrators, welcher im Projekt SAWAS umgesetzt wurde. Es diene somit als Grundlage für die anschließende Spezifizierung des SAWAS Demonstrators.

Die grundlegende Systemarchitektur ist in Abbildung 4 dargestellt und zeigt folgende Elemente:

- Innenanlage (interne Systemkomponente, Softwaremodul),
- Warneinrichtung (interne Systemkomponente, Softwaremodul),
- Eisenbahninfrastrukturdaten (interne Systemkomponente, Datenquelle),
- GNSS-Empfänger (externe Systemkomponente),
- GNSS (Umsystem),
- EPOSA (Umsystem).

Die in Abbildung 4 dargestellten **orange** Systemkomponenten sind die internen Systemkomponenten des SAWAS Demonstrators. Die Funktionen der Innenanlage und Warneinrichtung wurden innerhalb des SAWAS Demonstrators in Softwaremodulen nachgestellt (Softwaremodul Innenanlage, Softwaremodul Warneinrichtung). Die im SAWAS Demonstrator integrierten und in elektronischer Form bereitgestellten Eisenbahninfrastrukturdaten dienen als Datenquelle für die Innenanlage. Die Innenanlage verarbeitet die Informationen aus den Eisenbahninfrastrukturdaten und von der Warneinrichtung bzw. übermittelt Informationen an die Warneinrichtung.

Die **grüne**, externe Systemkomponente, der GNSS-Empfänger, dient zur Übermittlung von Positionsdaten an die Warneinrichtung und ist direkt mit dem SAWAS Demonstrator verbunden.

Die Umsysteme GNSS und EPOSA, welche in Abbildung 4 blau dargestellt sind, dienen zur Positionsbestimmung des GNSS-Empfängers.

Gestrichelte Pfeile zeigen eine drahtlose Kommunikationsverbindung, durchgängig gezeichnete Pfeile eine kabelgebundene Kommunikationsverbindung. Die Kommunikation der internen Systemkomponenten untereinander wurde innerhalb des SAWAS Demonstrators nachgestellt.

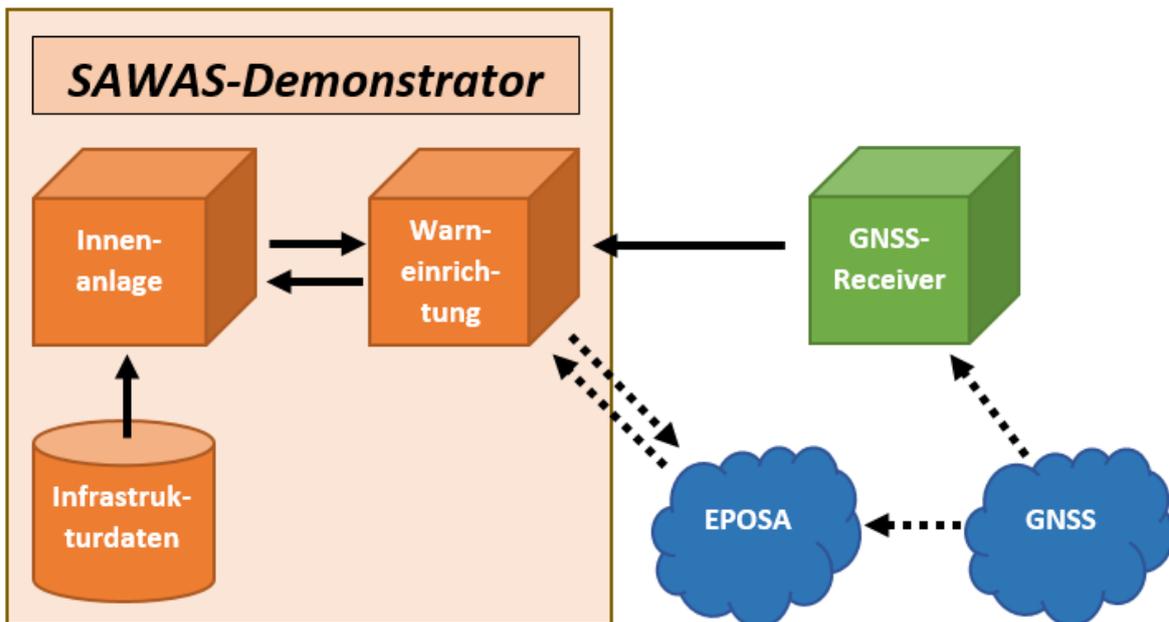


Abbildung 4: SAWAS Systemarchitektur

Als Entscheidungsgrundlage für in Betracht kommende GNSS-Empfänger für die Umsetzung des Demonstrators wurden die generischen technischen Anforderungen an den GNSS-Empfänger gemeinsam mit den Experten der TU Wien wie folgt festgelegt:

- Es wird ein mobiler GNSS-Empfänger verwendet;
- Der Empfänger unterstützt GPS und GLONASS (Unterstützung weiterer GNSS ist optional);
- Der Empfänger muss nur als Einfrequenz-Empfänger ausgeführt sein (L1);
- Der Empfänger kann Inputdaten im Format RTCM3.1 oder höher verarbeiten;
- Der Empfänger gibt Daten im standardisierten Format NMEA 0183 aus;
- Der Empfänger muss geeignete serielle Schnittstellen für die Ein- und Ausgabe der Daten zur Verfügung stellen (zum Beispiel USB, RS232);
- Der Empfänger muss Gauß-Krüger-MGI- oder ITRF-Koordinaten ausgeben.

Auf Basis dieser Anforderungen wurden im weiteren Entscheidungsprozess drei mögliche Umsetzungsvarianten betrachtet und final die in Abbildung 5 dargestellten Schnittstellen und Umsysteme für die zu implementierende SAWAS Demonstrator App festgelegt.

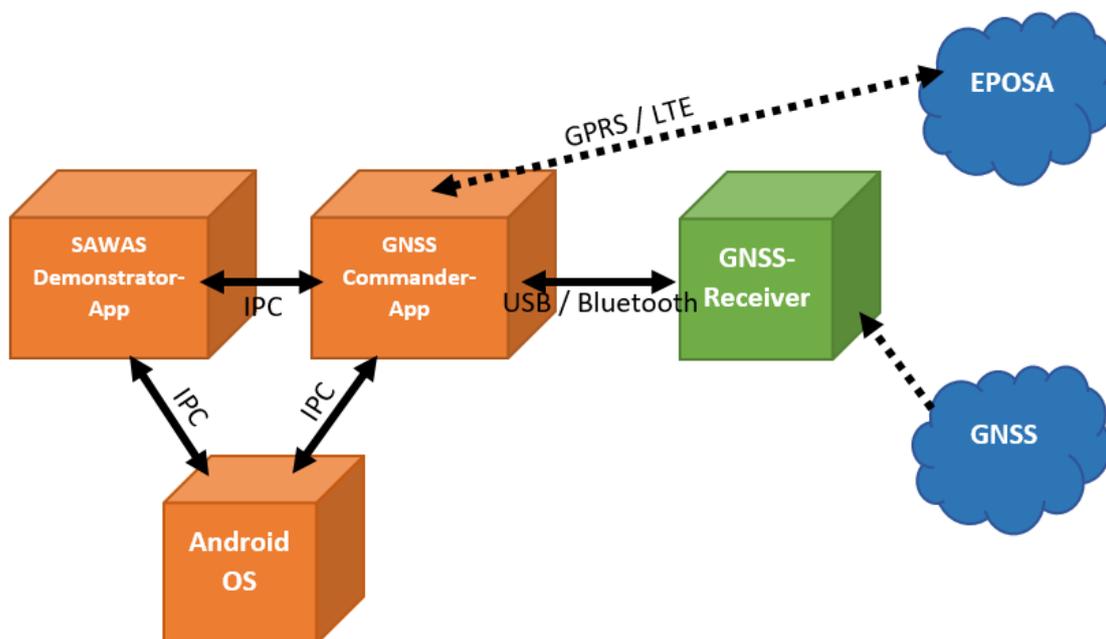


Abbildung 5: Schnittstellen und Umsysteme der SAWAS Demonstrator App

Die in Abbildung 5 dargestellten **orangenen** Systemkomponenten sind Softwarekomponenten, wobei das Android Betriebssystem bzw. Software-Plattform und die GNSS-Commander App sowie deren applikationsspezifische Konfiguration als Systemvoraussetzungen für die SAWAS Demonstrator App zu verstehen sind. Die Kommunikation zu diesen beiden Komponenten erfolgt jeweils über eine Softwareschnittstelle in Form von Interprozess-Kommunikation (IPC).

Die **grüne**, externe Systemkomponente, der GNSS-Empfänger, dient zur Übermittlung von Positionsdaten an die Warneinrichtung und ist direkt mit dem SAWAS Demonstrator verbunden.

Die Umsysteme GNSS und EPOSA, welche in Abbildung 5 **blau** dargestellt sind, dienen zur Positionsbestimmung des GNSS-Empfängers.

Die in Abbildung 5 dargestellte GNSS-Commander App der Firma PilaBlu¹ stellt für den SAWAS Demonstrator folgende Funktionalitäten zur Verfügung:

- Interface für die Einwahl am EPOSA-Referenzdienst;
- Übertragung von Daten zum EPOSA-Referenzdienst über GPRS/LTE;
- Empfang von Korrekturdaten vom EPOSA-Referenzdienst über GPRS/LTE/NTRIP;

¹ <http://www.pilablu.de/apps/gps/gnss-commander>

- Weitergabe korrigierter und transformierter Positionsdaten an das Android Betriebssystem;
- Protokollierung von Positionsdaten und GNSS-Metadaten;
- Anzeige von Positionsdaten und GNSS-Metadaten.

2.3 Pflichtenheft

Die funktionalen Anforderungen an die SAWAS-Demonstrator App wurden in Form eines Pflichtenhefts festgehalten und dienen als Basis für die anschließende Implementierung.

3 ENTWICKLUNG

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Abbildung 3 dargestellten Phase der Entwicklung des Demonstrators vorgestellt.

3.1 Betriebsformen des Demonstrators

Die in Abschnitt 2.1 gelisteten Anwendungsfälle wurden mithilfe eines Demonstrators unter realen Bedingungen im Rahmen von Feldtests nachgestellt. Der verwendete SAWAS Demonstrator ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: SAWAS Demonstrator mit GNSS-Empfänger

Zur Nachstellung der definierten Anwendungsfälle wurden im SAWAS Demonstrator drei Betriebsformen umgesetzt, die nachfolgend kurz erläutert werden sollen:

- Statische Warnbereiche: Für die Betriebsform der statischen Warnbereiche wurden die derzeit vorprojektierten statischen AWS-Warnbereiche in den Infrastrukturdaten als Polygone nachgebildet. Für den Anmeldeprozess des Warngeräts an der

Innenanlage wurde in einem ersten Schritt die Position des Warngeräts bestimmt, auf deren Basis relevante Warnbereiche vorgeschlagen werden.

- **Semistatische Warnbereiche:** Die Betriebsform der semi-statischen Warnbereiche diene als Zwischenschritt hin zur Implementierung der dynamischen Warnbereiche. Es erfolgte eine Unterteilung der statischen Warnbereiche in sogenannte „Sub-Warnbereiche“. Die Unterteilung erfolgte dabei an sichtbaren Infrastrukturelementen, um den Bedienern des Warngeräts im Feld eine bessere Orientierung zu ermöglichen. In der Betriebsform der semistatischen Warnbereiche hat der Bediener des Warngeräts die Möglichkeit, die Ausdehnung des benötigten Warnbereichs besser an die Größe der Arbeitsstelle anzupassen, in dem nur Teilbereiche statischer WB zur Aktivierung ausgewählt werden.
- **Dynamische Warnbereiche:** In der Betriebsform der dynamischen Warnbereiche wurden die „Sub-Warnbereiche“, die für die Betriebsform der semistatischen Warnbereiche gebildet wurden, wiederverwendet. Der aktuelle Warnbereich wird dynamisch jeweils auf Basis der aktuellen Position des Warngeräts gebildet und besteht aus einem oder mehreren „Sub-Warnbereichen“.

Der Anwendungsfall „Tracing“ wurde für alle drei genannten Betriebsformen umgesetzt und getestet. Dabei wird bei Eintritt des Demonstrators in nicht aktivierte Warnbereiche oder Warnbereiche für die kein Fahrtrückhalt aktiv ist (Gefahrenbereiche), ein Hinweissignal an der Bedienoberfläche des Demonstrators ausgegeben. Für Warnbereiche mit aktivem Fahrtrückhalt wird eine Annäherung eines Schienenfahrzeuges erst nach der Räumung des Gefahrenraumes der Gleise zugelassen, in diesem Fall wird am HMI des Demonstrators kein Hinweissignal ausgegeben.

3.2 Infrastrukturdaten

Die für die Umsetzung des Demonstrators benötigten Infrastrukturdaten wurden von den ÖBB in mehreren Datenformaten zur Verfügung gestellt. Die Erstellung der Polygone, die für die Umsetzung der einzelnen Betriebsformen des SAWAS Demonstrators benötigt wurden, erfolgte mit der Software AutoCAD 2018 der Firma Autodesk Inc.² in den Vermessungsplänen. Dabei war zusätzlich eine Orientierung an sicherheitstechnischen Lageplänen und weiteren Dateien mit Stellwerks- sowie AWS-spezifischen Daten für die Projektierung von Warnbereichen nötig. Nach Erstellung der Warnbereiche und Sub-

² <https://www.autodesk.eu/products/autocad/compare/compare-releases>

Warnbereiche in AutoCAD wurden diese in Form von Shapefile-Dateien (Dateiformat für Geodaten) zusammen mit den bereits vorhandenen relevanten Infrastrukturelementen wie Signalen und Achszählern exportiert und in der SAWAS Demonstrator App eingebunden.

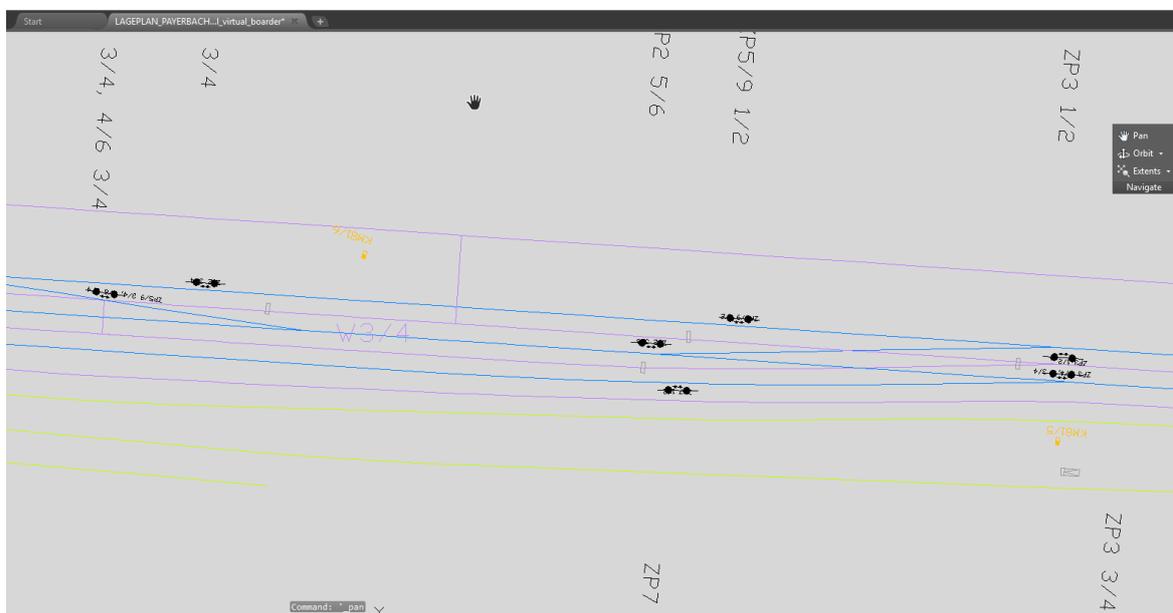


Abbildung 7: Erstellen von Polygonen für Warnbereiche und Sub-Warnbereiche in AutoCAD

Bei der Erstellung der Polygone (**violette** Linien in Abbildung 7) für die Warnbereiche und Sub-Warnbereiche wurde darauf geachtet, keinen zusätzlichen Genauigkeitsverlust in den relativen Positionen der Warnbereiche und Sub-Warnbereiche zu den bereits vorhandenen Infrastrukturelementen einzuführen. Anhand von Messungen in der Software AutoCAD konnte festgestellt werden, dass solche Ungenauigkeiten, die sich durch die manuelle Erstellung der Polygone ergaben, an keiner Stelle größer als 1 cm sind.

3.3 SAWAS Demonstrator App

Für die Entwicklung des Demonstrators wurde Android Studio³ als Entwicklungsumgebung gewählt, zusätzlich wurde das ArcGIS Runtime SDK for Android⁴ eingebunden. Bei der Umsetzung des Demonstrators wurden die Funktionen der AWS-Innenanlage sowie jene der AWS-Außenanlage in der Softwarearchitektur als getrennte Komponenten ausgeführt, um erste Erkenntnisse hinsichtlich der erforderlichen Daten auf der Schnittstelle zwischen den beiden Komponenten ableiten zu können. Die Dateistruktur der Applikation ist aus Abbildung 8 ersichtlich.

³ <https://developer.android.com/studio/>

⁴ <https://developers.arcgis.com/android/latest/>

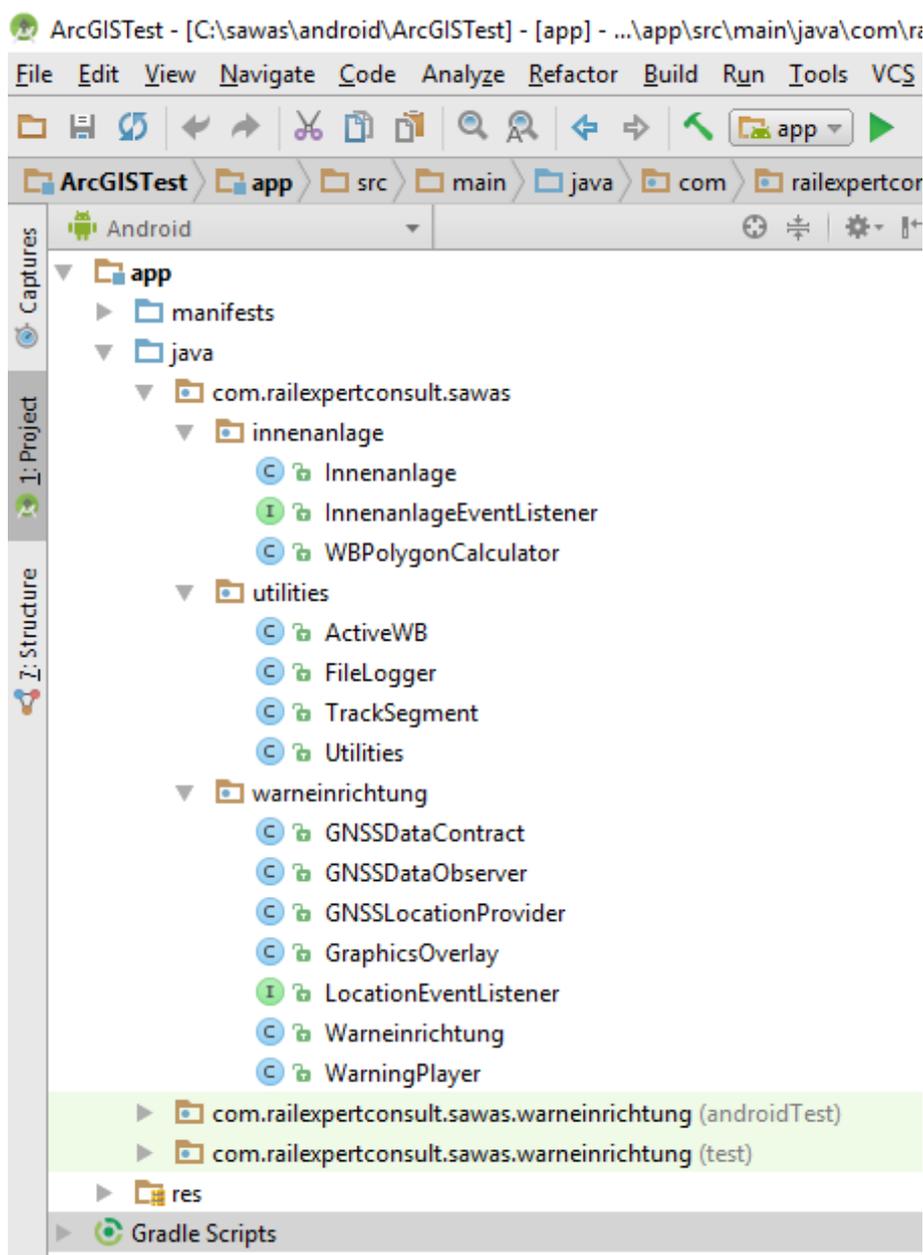


Abbildung 8: Dateistruktur der SAWAS Demonstrator App

Die Ausführung der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Betriebsformen des Demonstrators werden im Folgenden anhand von Screenshots der SAWAS Demonstrator App veranschaulicht und näher erläutert. Die drei Betriebsformen können an der grafischen Benutzerschnittstelle des Demonstrators über das jeweilige Symbol in der Menüleiste am linken Bildschirmrand gestartet werden. Über das oberste Symbol werden die statischen Warnbereiche, darunter die semistatischen und wiederum darunter die dynamischen Warnbereiche gewählt.

Vor der Auswahl von Warnbereichen, für die Warnungen vor Zugfahrten ausgegeben werden sollen, kann der Bediener des Demonstrators optional einen Bereich festlegen, in dem keine Zugfahrten erlaubt sind (Gleissperre / keine Fahrten). Abbildung 9 zeigt die Auswahl zweier solcher Bereiche, die im Rahmen der Arbeitsstelle nicht befahrbar sind. Die Auswahl erfolgt dabei über Touch Input an der grafischen Benutzerschnittstelle. Die Bezeichnung des Warnbereichs wird dabei zur besseren Orientierung möglichenfalls innerhalb des jeweiligen Polygons dargestellt.

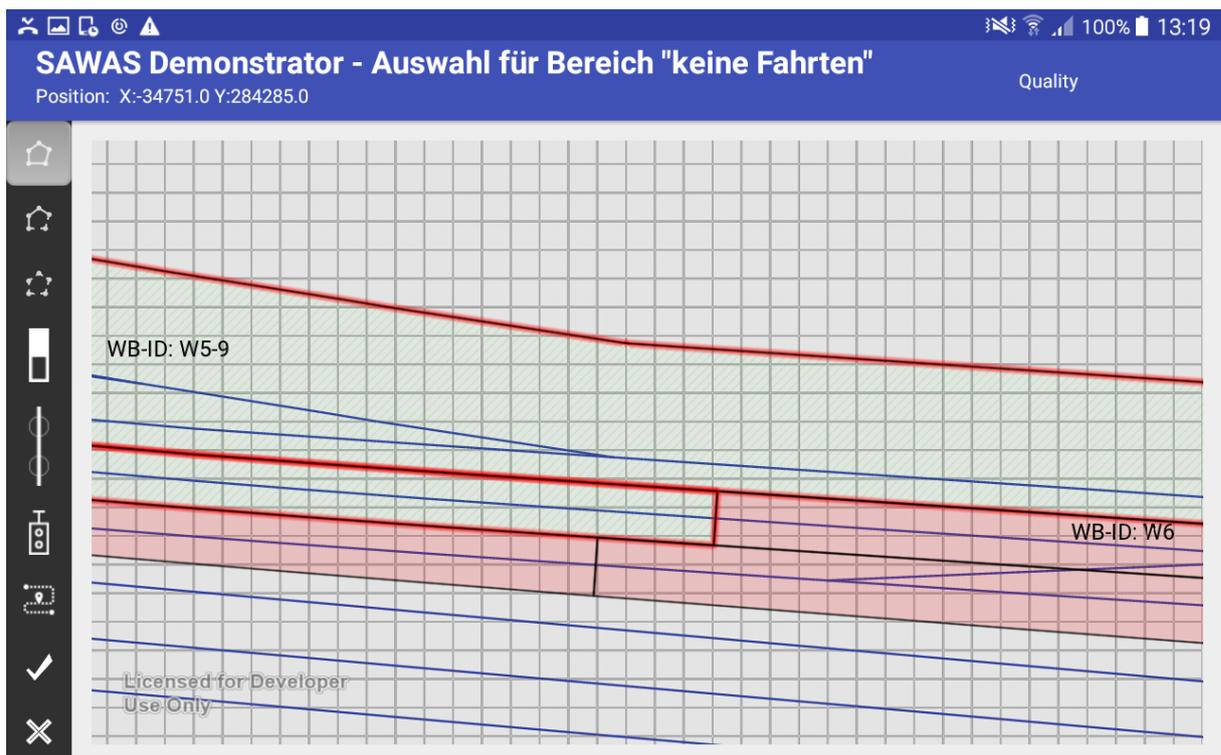


Abbildung 9: Auswahl für den Bereich „keine Fahrten“

Die anschließende Auswahl der zu aktivierenden Warnbereiche erfolgt ebenfalls durch Selektion über Touch Input. Im Gegensatz zu den grün schraffierten, vorselektierten Polygonen für die gesperrten Bereiche werden die vorselektierten Warnbereiche wie in Abbildung 10 dargestellt orange schraffiert.

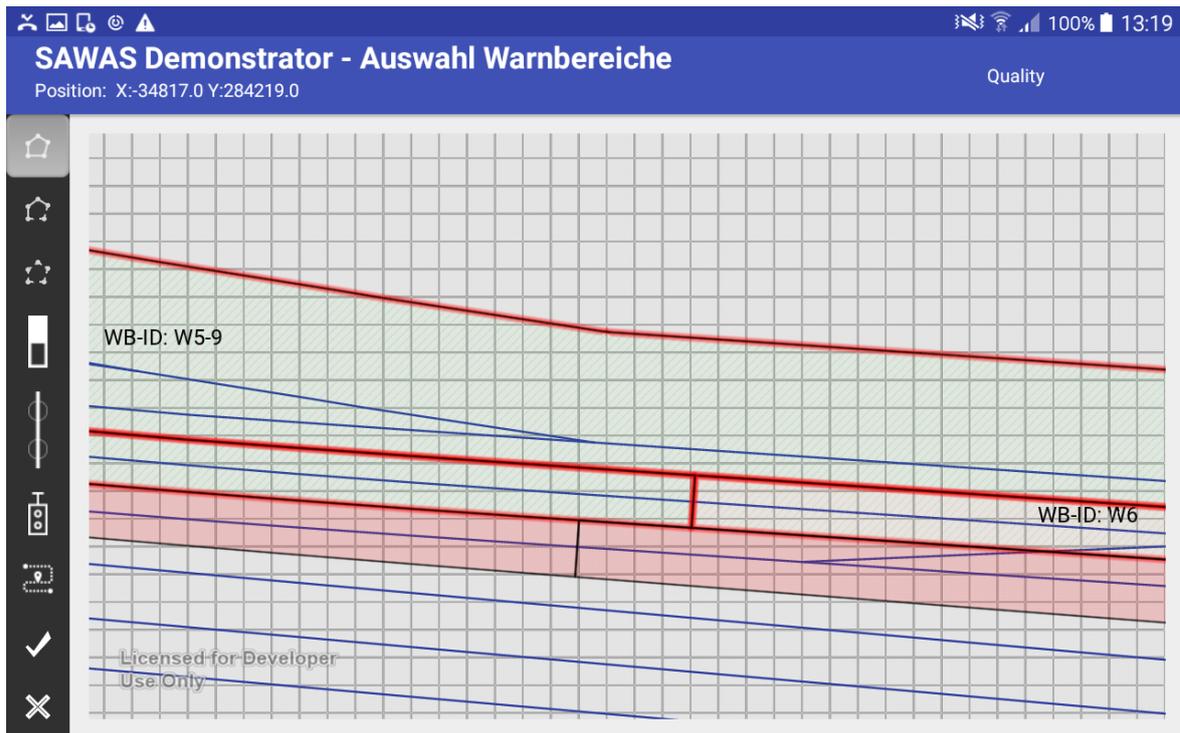


Abbildung 10: Auswahl von zu aktivierenden Warnbereichen

Nach Bestätigung der Auswahl durch den Bediener an der Menüleiste wird der Bediener gefragt, ob für die gewählten Warnbereiche ein Fahrtrückhalt aktiviert werden soll, der im späteren Verlauf durch den Bediener erst aufgehoben wird, sobald die Arbeitsstelle fertig geräumt wurde. Die beschriebene Abfrage ist in Abbildung 11 dargestellt.

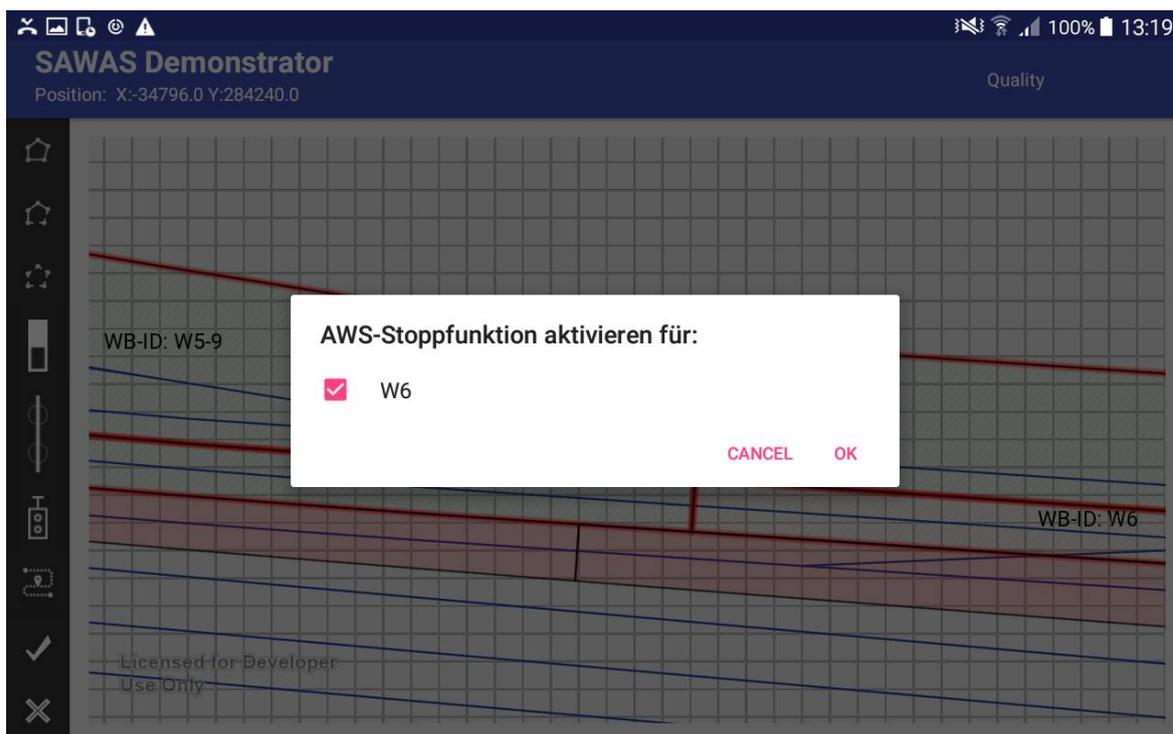


Abbildung 11: Dialog zur Aktivierung von Fahrtrückhalt für Warnbereiche

Nachdem festgelegt wurde, für welche Warnbereiche ein Fahrtrückhalt aktiviert werden soll, ergibt sich der in Abbildung 12 dargestellte Zustand der SAWAS Demonstrator App. Die zuvor getroffene Auswahl für die Bereiche „keine Fahrten“ und die Warnbereiche wurde an die in der SAWAS Demonstrator App nachgestellte Innenanlage übermittelt und die bestätigt. Die Bereiche sind somit aktiv und werden durch die Tracing Funktion überwacht. Sofern der dargestellte Ausschnitt der Infrastrukturdaten grün umrandet dargestellt ist, befindet sich der Demonstrator in einem sicheren Bereich (in einem für Fahrten gesperrten grünen Bereich oder außerhalb des Gefahrenbereichs im weiß dargestellten Bereich).

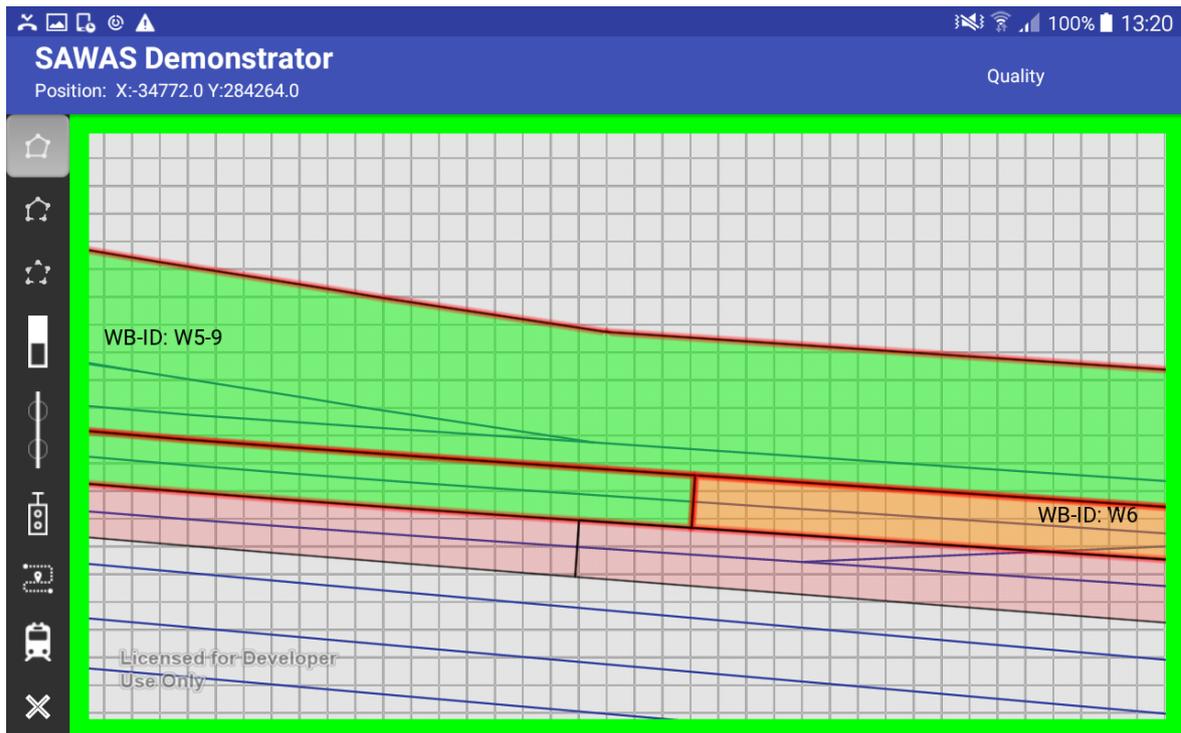


Abbildung 12: Aktivierte statische Warnbereiche

Alternativ zur in den bisherigen Abbildungen dargestellten Auswahl der Bereiche über Touch Input auf die Polygone, die an der grafischen Benutzerschnittstelle dargestellt werden, ist auch eine Auswahl der jeweiligen Bereiche über eine Liste möglich.

Wird diese Option gewählt, so muss in einem Dialogfenster festgelegt werden, wie weit die zur Auswahl stehenden Bereiche von der aktuellen Position des Demonstrators entfernt sein dürfen. Der Dialog für diese Auswahl ist in Abbildung 13 dargestellt.

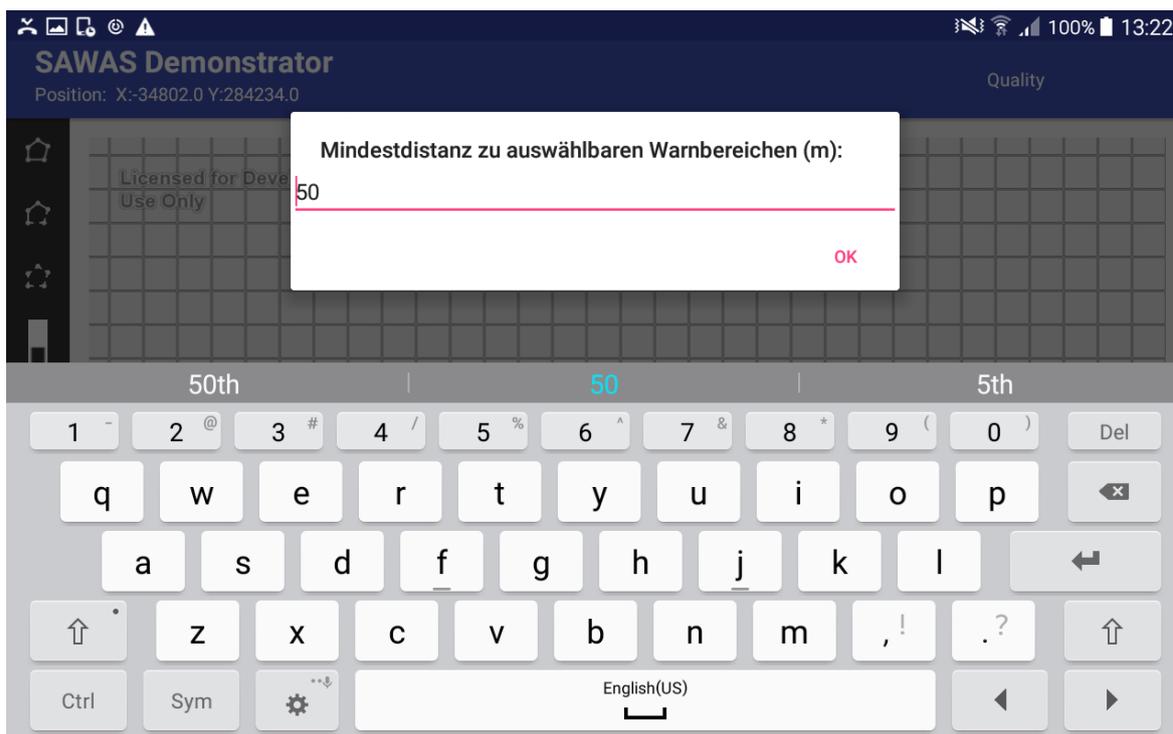


Abbildung 13: Dialog zur Festlegung relevanter Polygone

Auf Basis der in Abbildung 13 dargestellten, erfolgten Eingabe, werden die für die Auswahl in Frage kommenden Bereiche in Form einer Liste dargestellt (Abbildung 14). Nach Bestätigung dieser Auswahl kann aus den verbleibenden Bereichen die Auswahl zur Aktivierung von Warnbereichen getroffen werden (Abbildung 15). Danach folgt die Festlegung, ob für die gewählten Warnbereiche jeweils ein Fahrtrückhalt aktiviert werden soll, analog zu Abbildung 11 und die gewählten Bereiche werden durch die Softwarekomponente Innenanlage geprüft und aktiviert und es ergibt sich ein Bild analog zu Abbildung 12, sofern sich der Demonstrator in einem sicheren (grünen oder weißen) Bereich befindet.

Die Tracing Funktion überwacht nun kontinuierlich die Position des Demonstrators und gibt bei einem Eintritt in einen aktiven Warnbereich (orange Polygone, Abbildung 16) und bei einem Eintritt in den nicht überwachten Gefahrenbereich (rote Polygone, Abbildung 17) entsprechende Hinweis- und Warnsignale in visueller und akustischer Form aus.

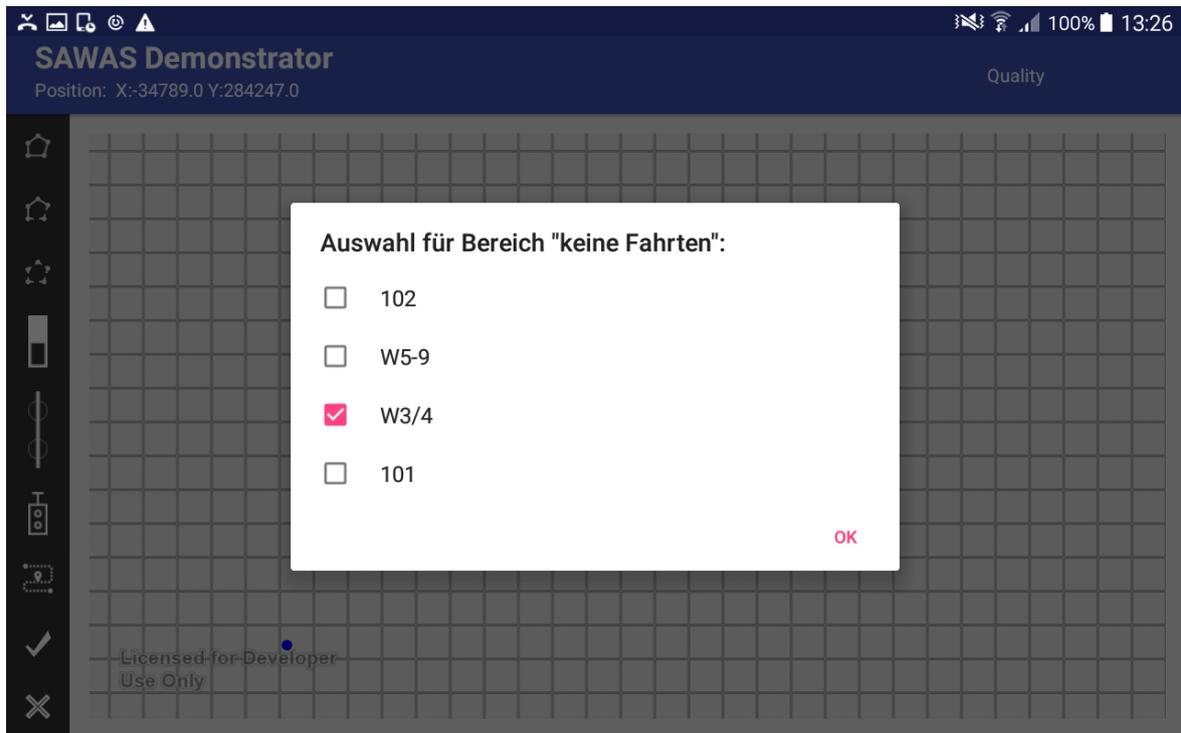


Abbildung 14: Auswahl für Bereich „keine Fahrten“ aus Liste

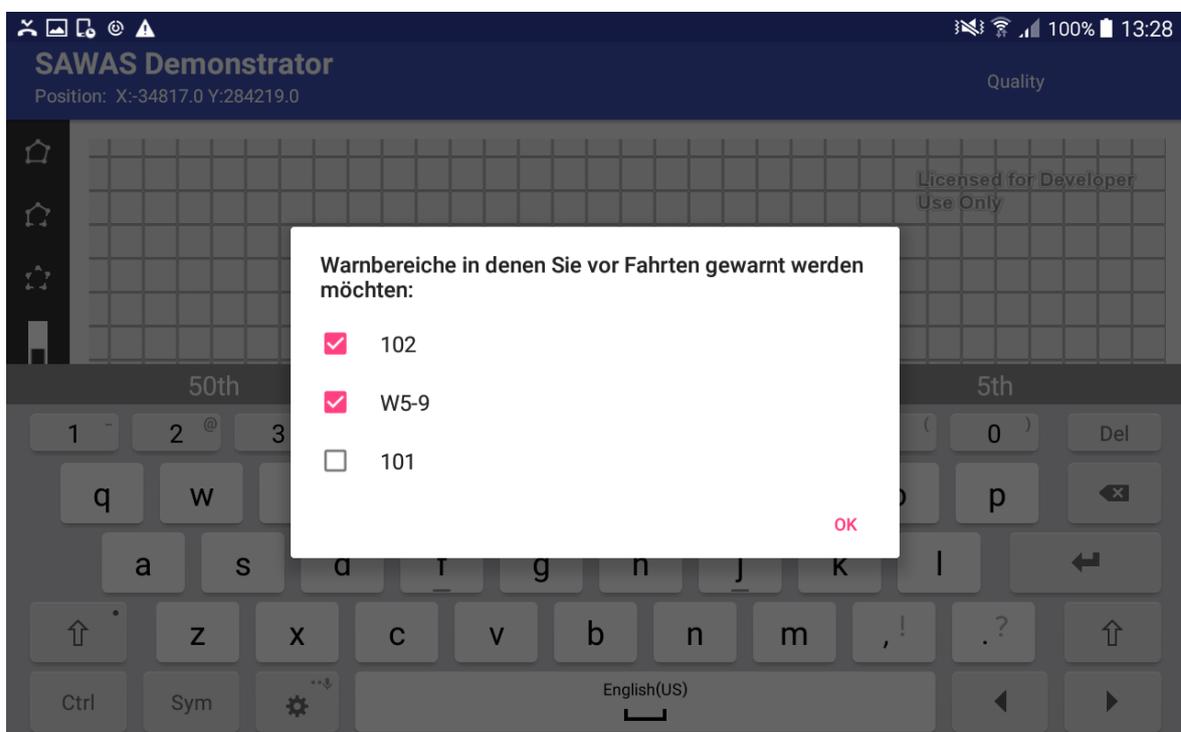


Abbildung 15: Auswahl von zu aktivierenden Warnbereichen aus Liste

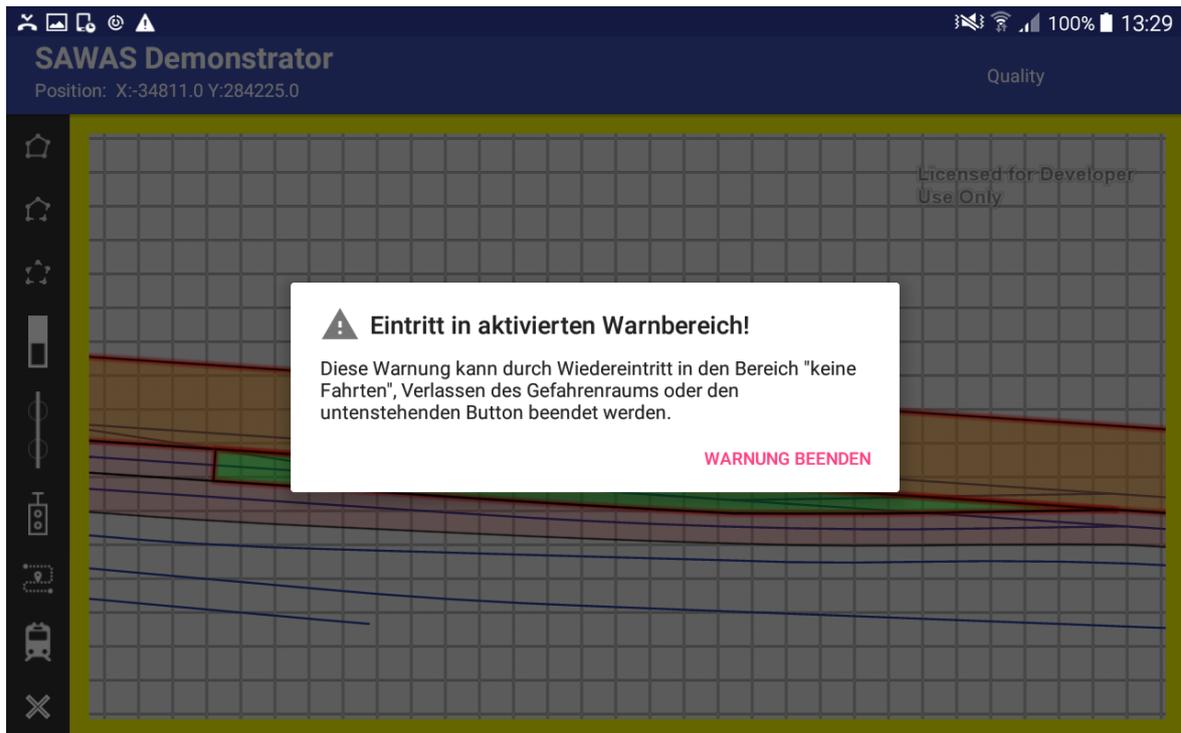


Abbildung 16: Eintritt in aktivierten Warnbereich

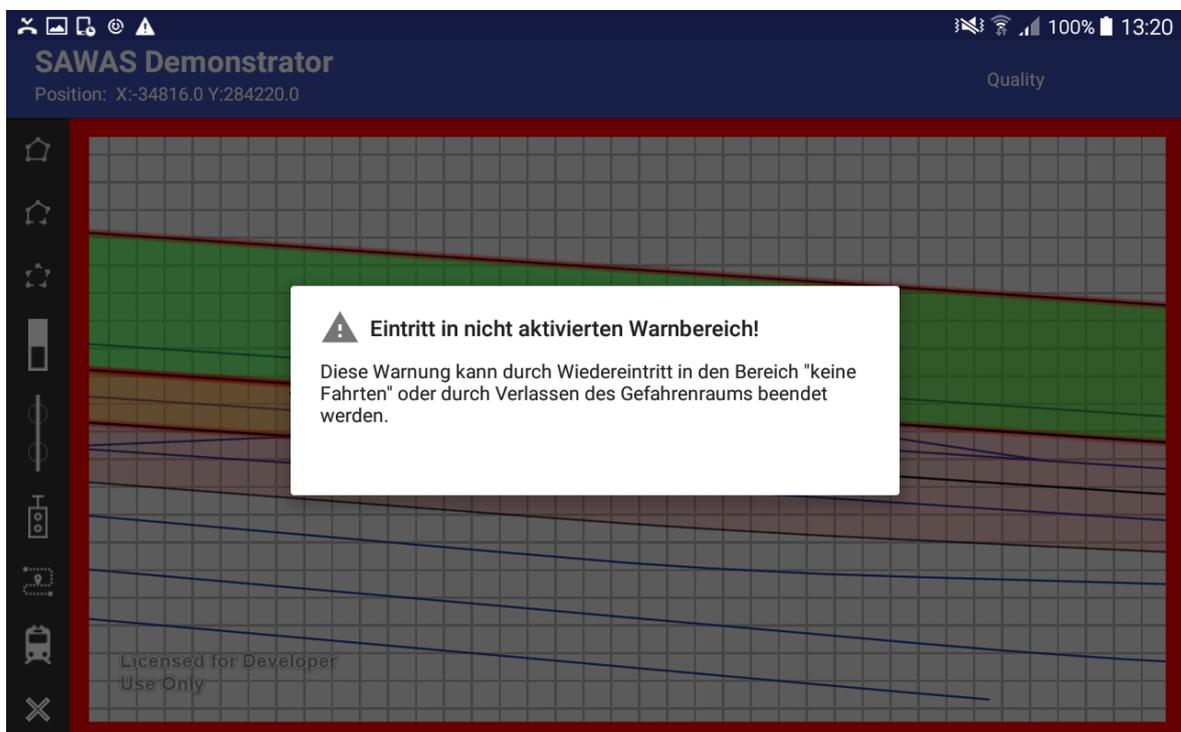


Abbildung 17: Eintritt in nicht aktivierten Warnbereich

Zur Simulation von Zugfahrten für aktive Warnbereiche kann über das Menü der grafischen Benutzerschnittstelle (Schaltfläche mit Zugsymbol) ein Dialog gestartet werden, in dem festgelegt wird, für welchen der aktiven Warnbereiche eine Fahrt simuliert werden soll. Dieser Dialog ist in Abbildung 18 dargestellt.

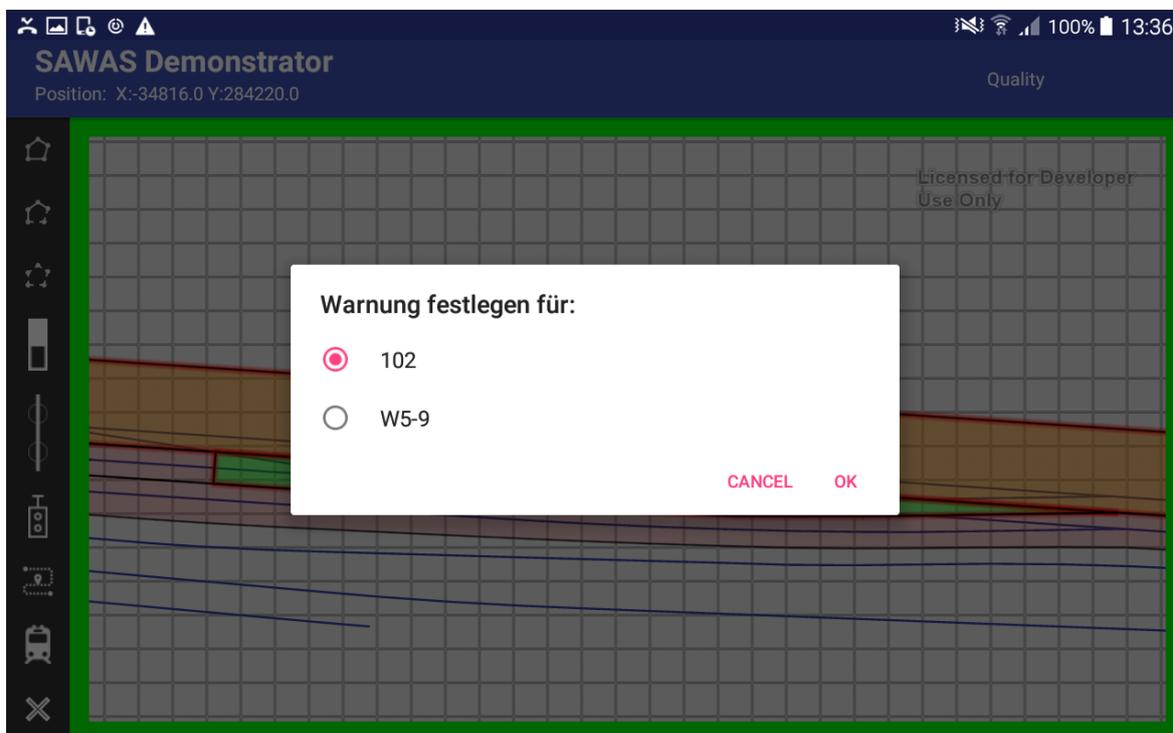


Abbildung 18: Dialog zur Simulation von Zugfahrten

Nach Ablauf eines Timers wird eine Warnung für den gewählten Warnbereich ausgegeben. Je nachdem, ob der Warnbereich mit oder ohne Fahrtrückhalt konfiguriert wurde, erfolgt die Ausgabe der Warnung wie in Abbildung 19 (Fahrtrückhalt nicht aktiv) oder wie in Abbildung 20 (Fahrtrückhalt aktiv) dargestellt. Wird eine Warnung für einen Warnbereich mit aktiviertem Fahrtrückhalt ausgegeben, so kann die fertige Räumung des Gefahrenraums über den in Abbildung 20 dargestellten Schaltfläche bestätigt werden. Dadurch wird der Fahrtrückhalt aufgehoben. Die akustische Warnung wird bis zum Freifahren des Warnbereichs weiterhin ausgegeben, der grafische Ausschnitt der dargestellten Warnbereiche wird über diese Dauer wie in Abbildung 21 dargestellt weiterhin rot umrandet.

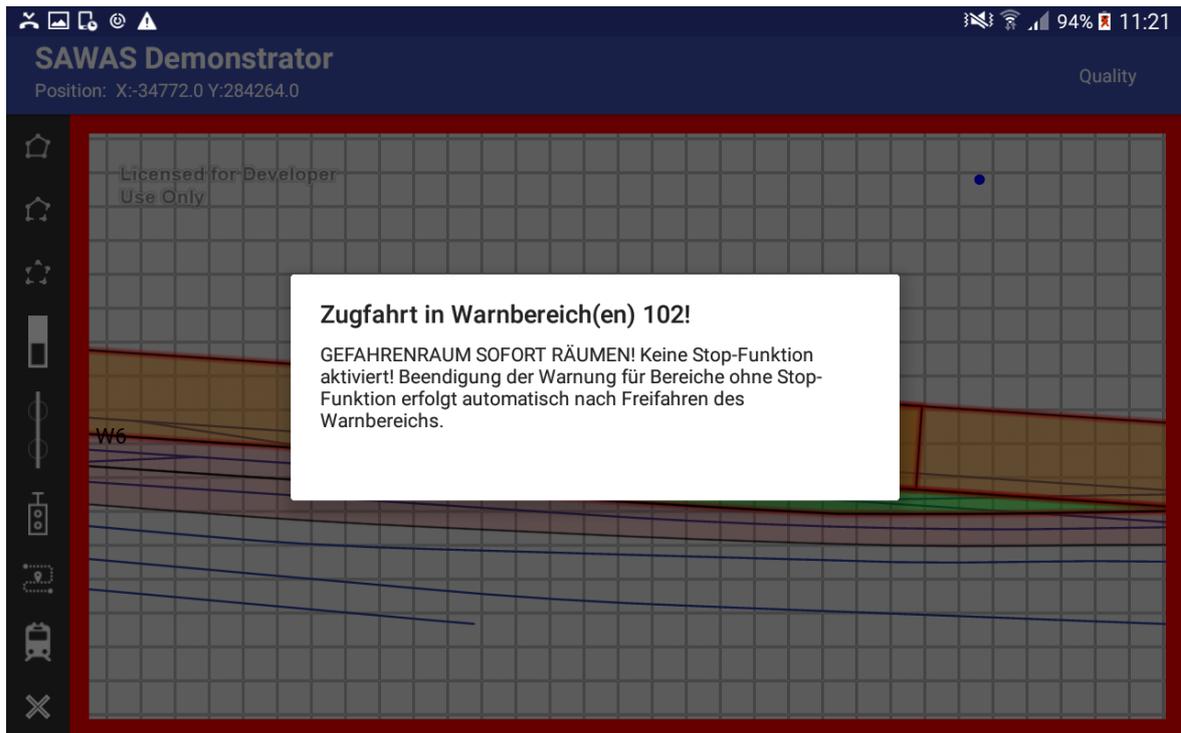


Abbildung 19: Fahrt in Bereich ohne aktiven Fahrtrückhalt

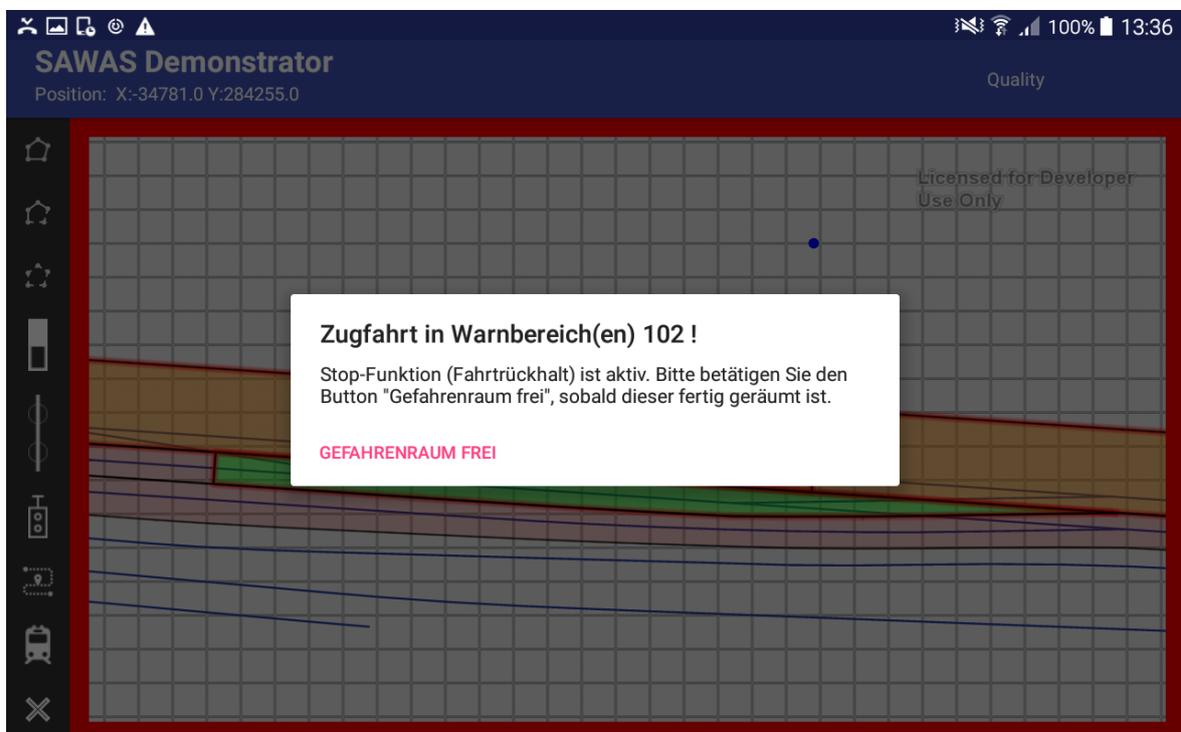


Abbildung 20: Fahrt in Warnbereich mit aktivem Fahrtrückhalt

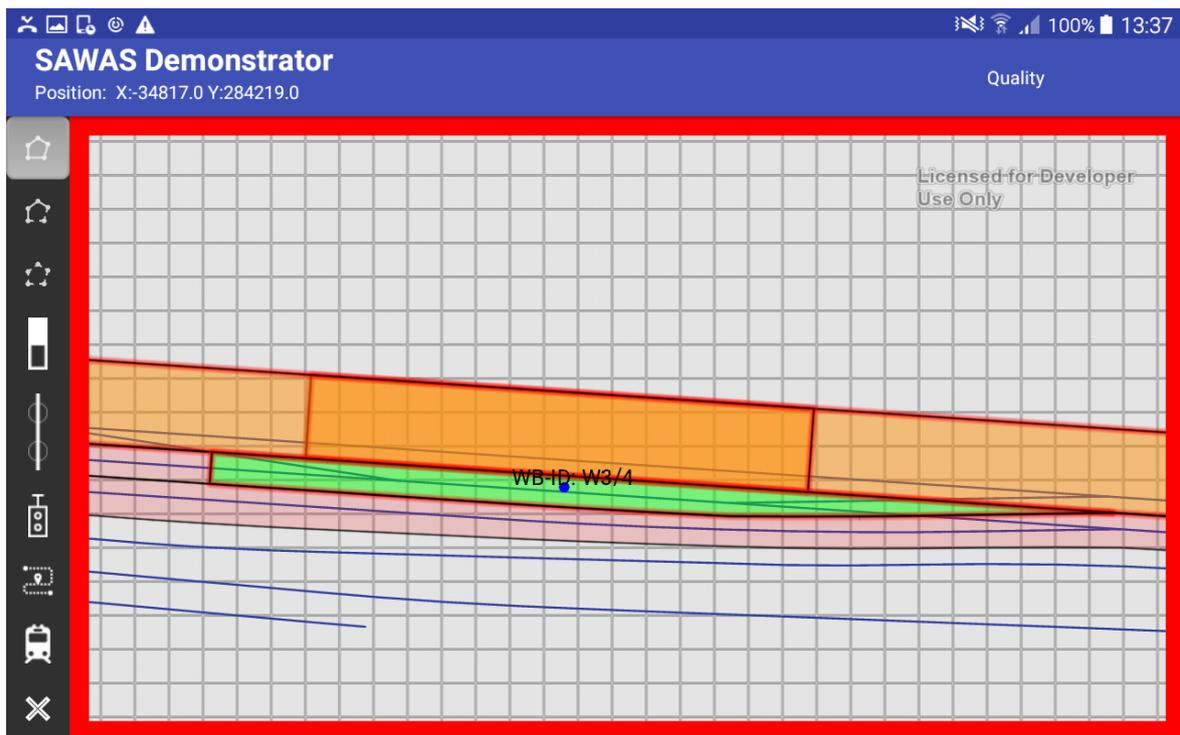


Abbildung 21: Warnung bis Freifahren des Warnbereichs



Abbildung 22: Warnbereiche vs. Sub-Warnbereiche

In Abbildung 22 werden die statisch vorprojektierten Warnbereiche den für die Betriebsformen der semistatischen und dynamischen Warnbereiche definierten Sub-Warnbereichen gegenübergestellt. Die Sub-Warnbereiche stellen dabei eine Unterteilung der statischen Warnbereiche anhand von im Feld erkennbaren Infrastrukturelementen wie Grenzmarken, Achszählern oder Signalen dar, die den Bedienern an der Arbeitsstelle eine einfache Orientierung ermöglichen.

Für die Betriebsform der dynamischen Warnbereiche werden die Sub-Warnbereiche durch Touch Input an der grafischen Benutzerschnittstelle selektiert (Abbildung 23). Die Auswahl

wird an die Softwarekomponente Innenanlage übermittelt und zurück an die Warnanlage bestätigt. Die Innenanlage überprüft dabei automatisiert, ob die ausgewählten Sub-Warnbereiche aneinandergrenzen und somit ein zusammenhängender dynamischer Warnbereich gebildet werden kann. Grenzen die ausgewählten Warnbereiche wie in Abbildung 24 dargestellt nicht aneinander, so wird die Auswahl von der Innenanlage abgelehnt und die Ablehnung wird dem Bediener, wie in Abbildung 25 dargestellt, über die Bedienoberfläche zur Kenntnis gebracht.

Wird die Auswahl der Sub-Warnbereiche von der Innenanlage bestätigt, so erfolgt vor der Markierung als aktivierbare Warnbereiche analog zu Abbildung 11 die Auswahl, ob für den dynamischen Warnbereich ein Fahrrückhalt aktiviert werden soll oder nicht.

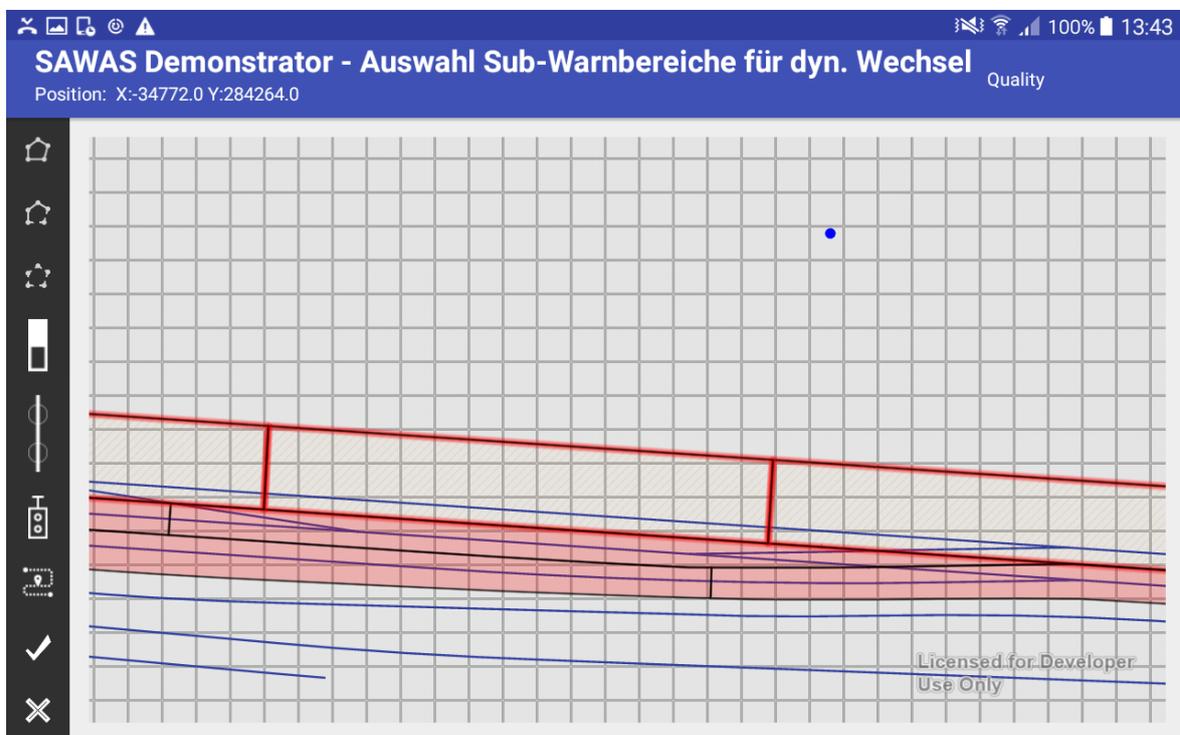


Abbildung 23: Auswahl zusammenhängender Sub-Warnbereiche

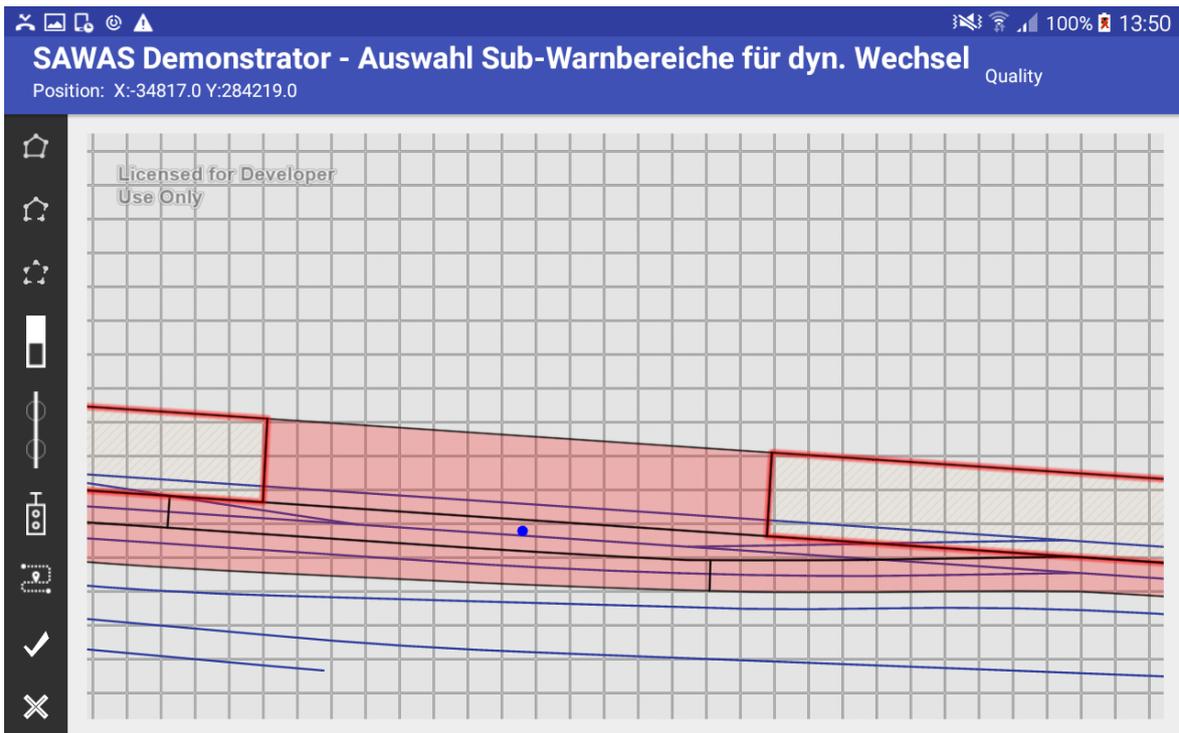


Abbildung 24: Auswahl nicht zusammenhängender Sub-Warnbereiche

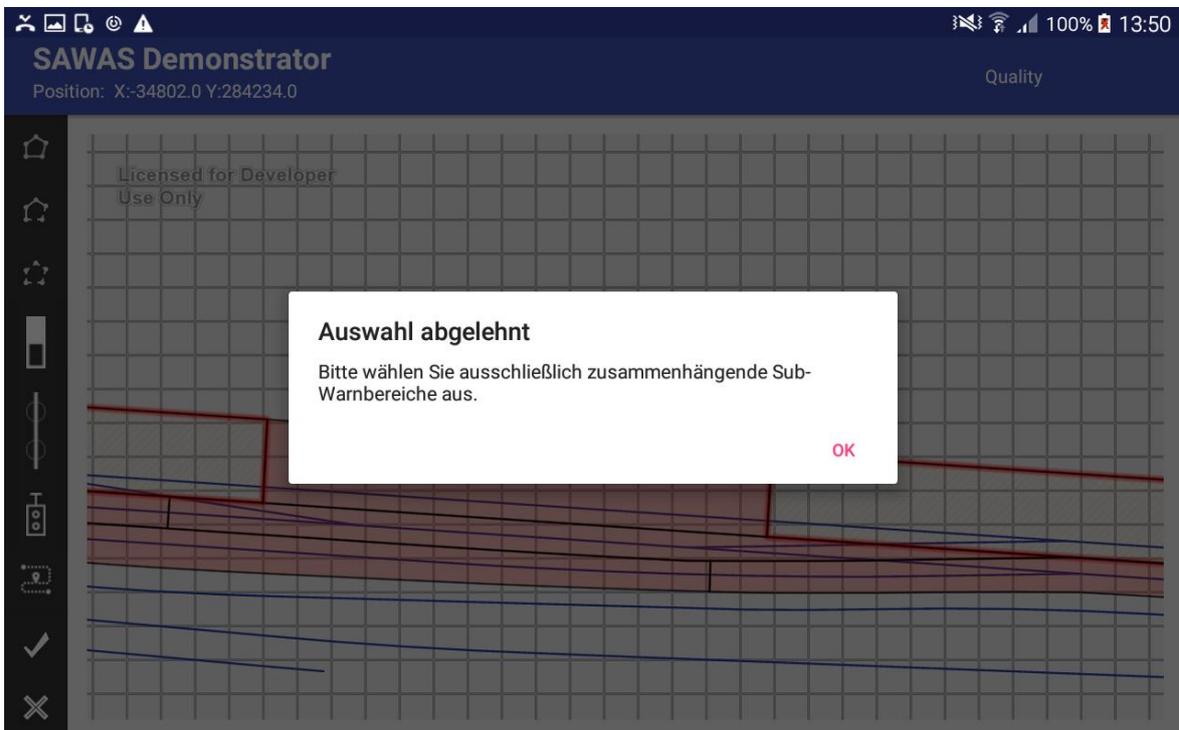


Abbildung 25: Ablehnung nicht zusammenhängender Sub-Warnbereiche

Abbildung 26 zeigt Sub-Warnbereiche, die von der Innenanlage zur Bildung eines dynamischen Warnbereichs bestätigt wurden. Die gelb markierten Bereiche können auf Basis der jeweils aktuellen Position des Demonstrators als Warnbereich aktiviert werden: Ist der Abstand von der Position des Demonstrators zu einem markierten Bereich kleiner als ein zuvor festgelegter Wert (Radius des Kreises in Abbildung 27), so wird dieser als Warnbereich aktiviert und an der grafischen Benutzerschnittstelle als orange gefülltes Polygon dargestellt (Abbildung 27).

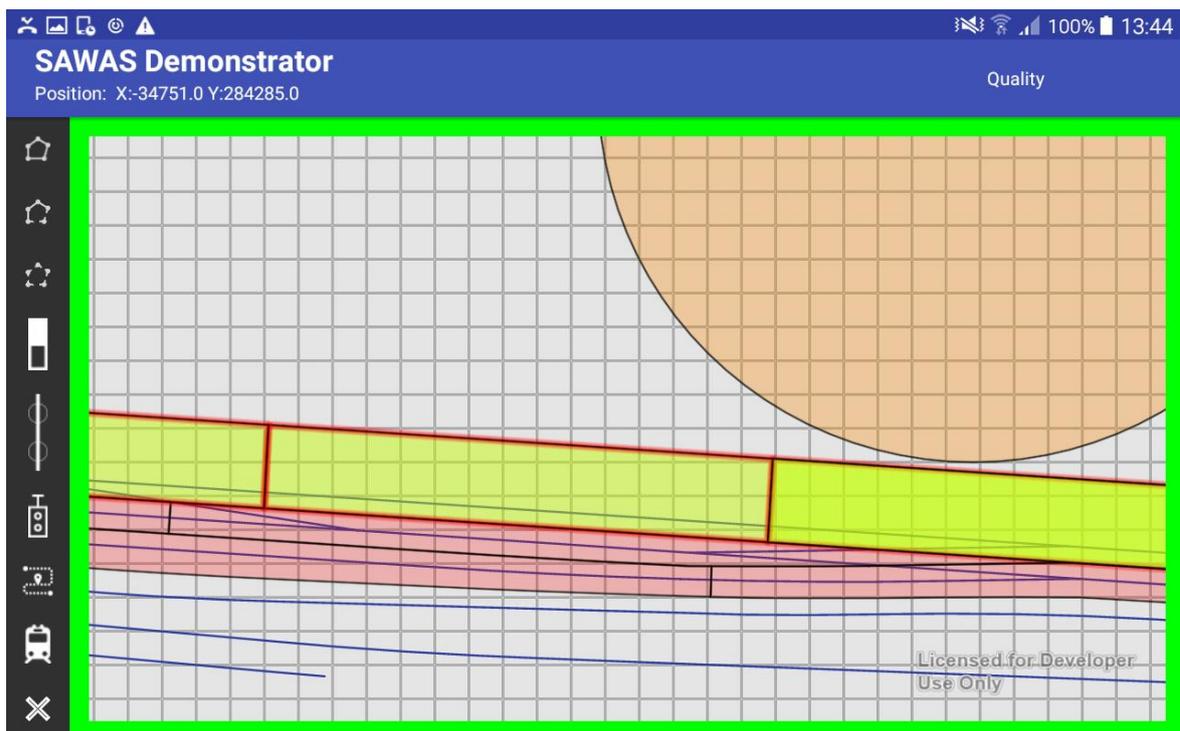


Abbildung 26: Markierte Sub-Warnbereiche zur Bildung eines dynamischen Warnbereichs

Die Tracing Funktion ist auch für dynamische Warnbereiche aktiv und gibt bei einem Eintritt in einen aktiven dynamischen Warnbereich (orange Polygone, Abbildung 28) und bei einem Eintritt in den nicht überwachten Gefahrenbereich (rote Polygone, Abbildung 29) entsprechende Hinweis- und Warnsignale in visueller und akustischer Form aus. Zugfahrten können analog zu den bereits beschriebenen Prinzipien auch für dynamische Warnbereiche simuliert werden (Abbildung 30). Abbildung 31 zeigt die Ausgabe einer Warnung bei Fahrt in einen dynamischen Warnbereich, für welchen kein Fahrtrückhalt aktiviert wurde.

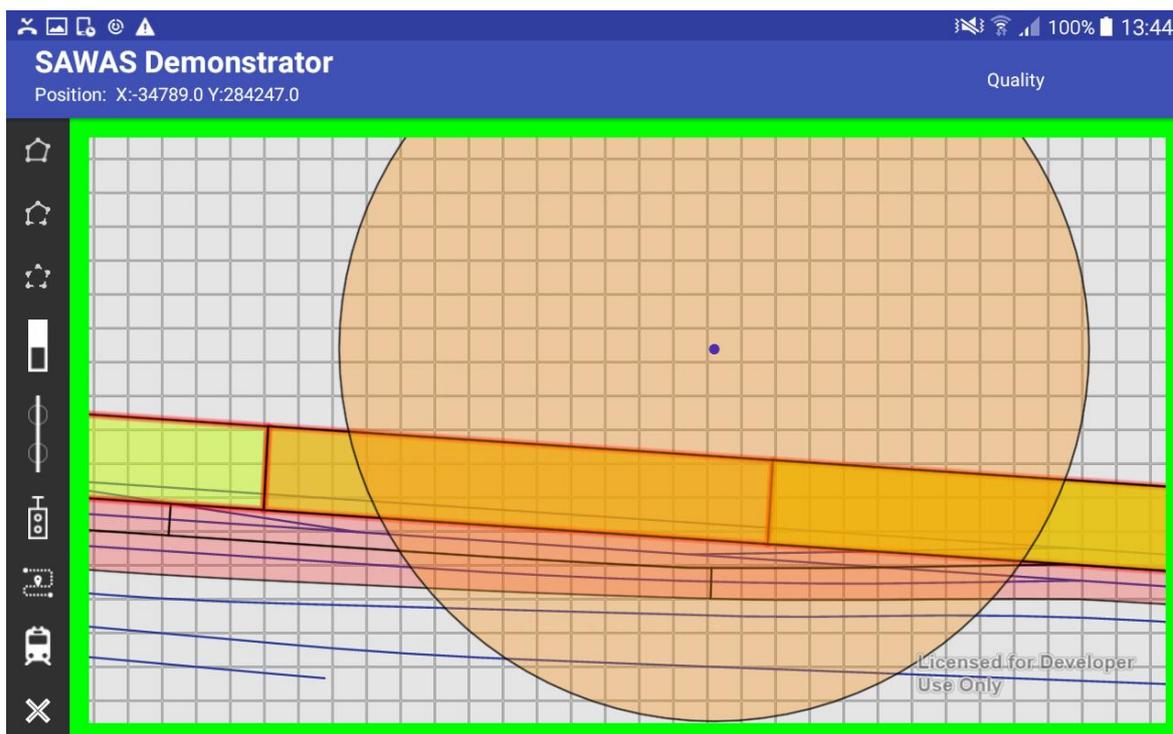


Abbildung 27: Prinzip der Bildung eines dynamischen Warnbereichs

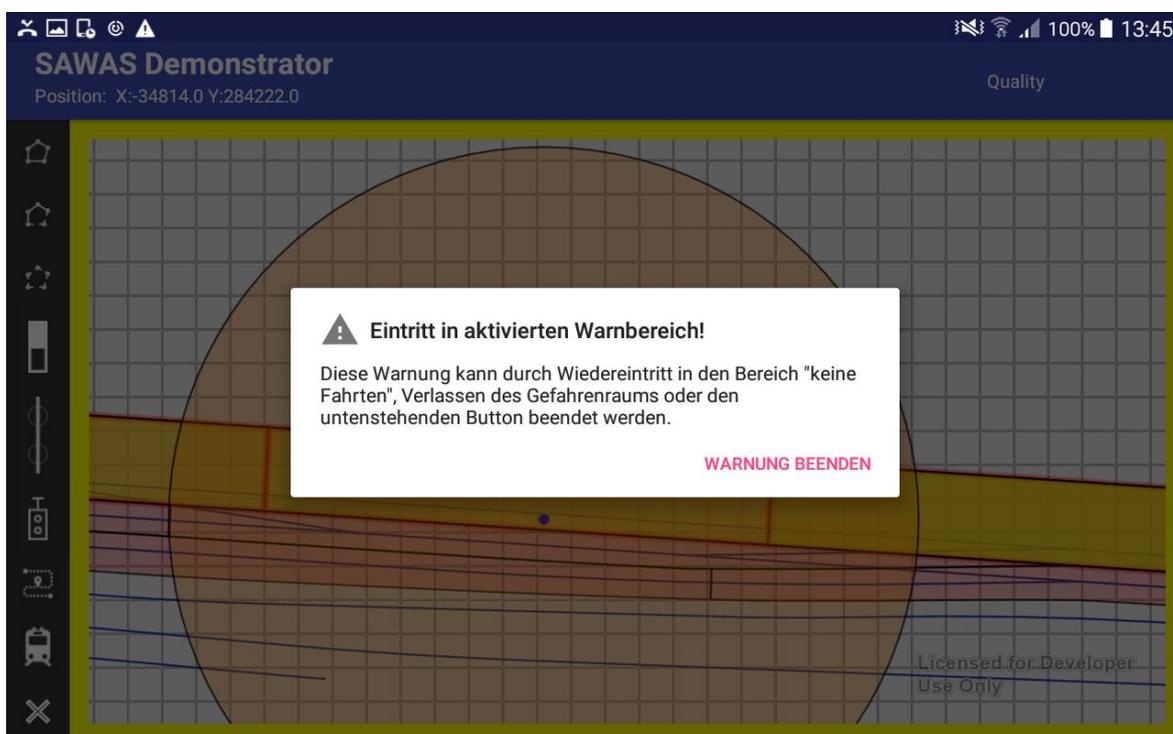


Abbildung 28: Eintritt in aktivierten dynamischen Warnbereich

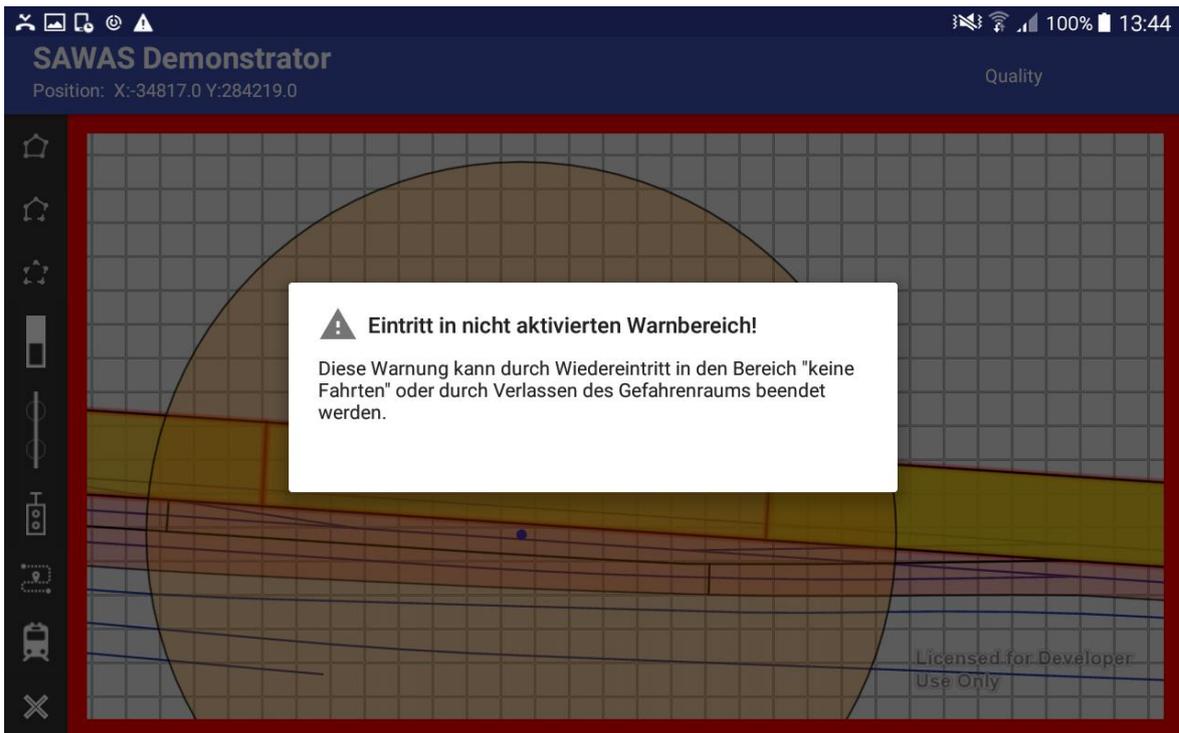


Abbildung 29: Eintritt in nicht aktivierten Sub-Warnbereich



Abbildung 30: Dialog zur Simulation von Zugfahrten in der Betriebsform „dynamische Warnbereiche“

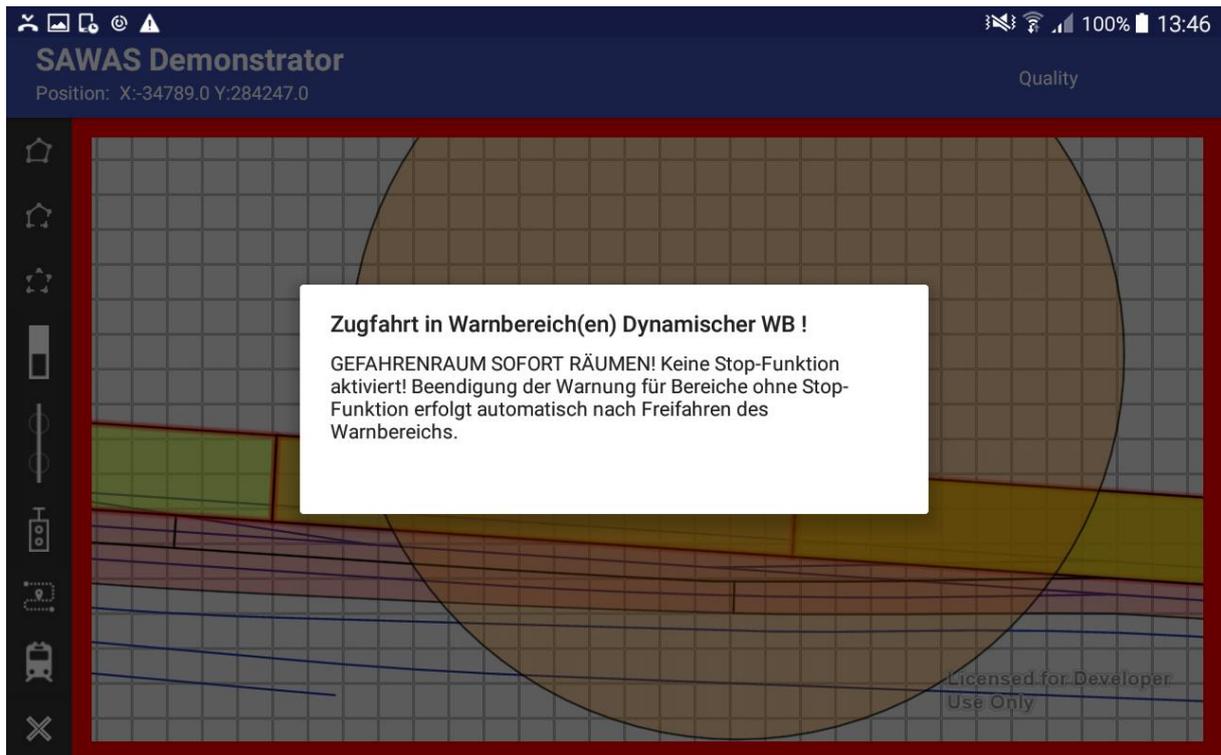


Abbildung 31: Fahrt in dynamischen Warnbereich ohne aktiven Fahrtrückhalt

Unabhängig von der Betriebsform können über die entsprechenden Icons der Menüleiste relevante Infrastrukturelemente im grafischen Ausschnitt der Infrastrukturdaten eingeblendet werden. Die Infrastrukturelemente (Kilometersteine, Achszähler und Signale) und deren Bezeichnung dienen dem Bediener des Demonstrators zur besseren Orientierung vor Ort an der Arbeitsstelle (Abbildung 32). Die dritte Schaltfläche von unten (über dem Zug-Icon) dient der Auswahl eines Bewegungsmusters und dem Starten der Simulation von Positionsdaten, sofern die SAWAS Demonstrator App zu Testzwecken ohne GNSS Empfänger betrieben wird. Weiters sind, sofern nicht gerade ein Dialogfenster angezeigt wird, jederzeit eine Verschieben- und Zoom-Funktionalität für den grafischen Ausschnitt der Infrastrukturdaten verfügbar, die über Touch Input bedient werden.

Grafische Darstellung, Menüführung und verfügbare Funktionen an der grafischen Bedienoberfläche der SAWAS Demonstrator App wurden laufend mit den ÖBB abgestimmt und iterativ überarbeitet.

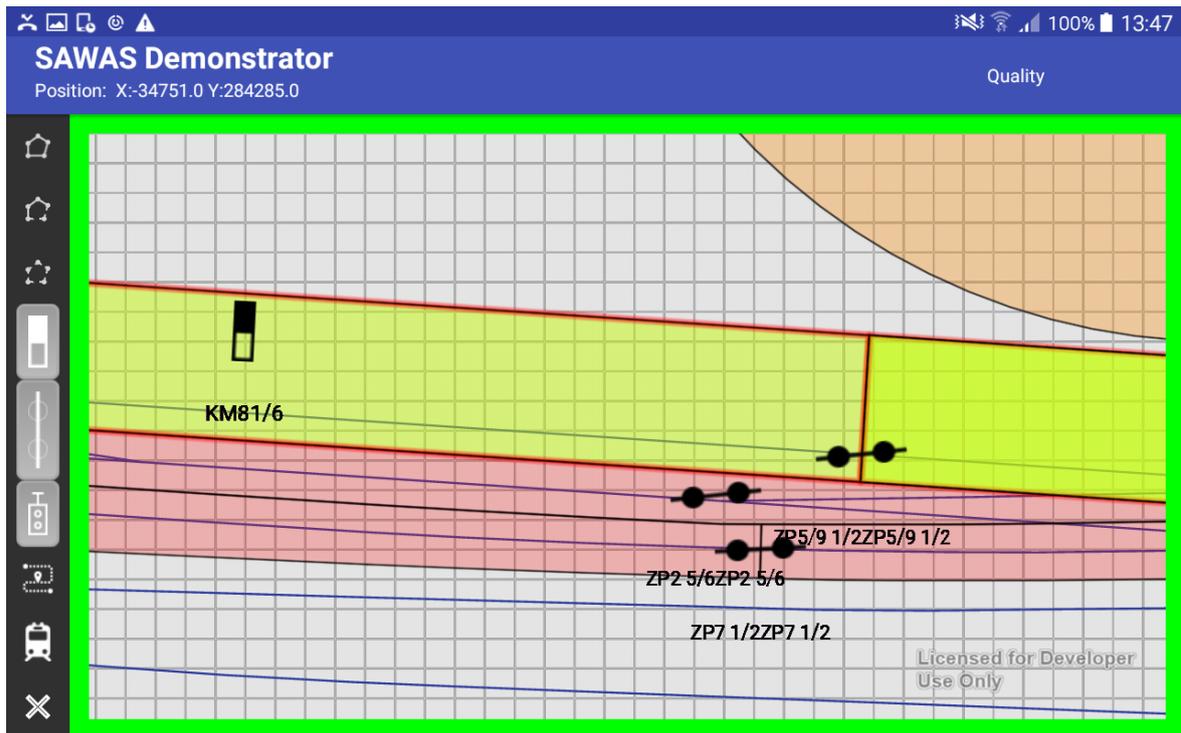


Abbildung 32: Darstellung von Infrastrukturelementen

4 FELDTTESTS

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Abbildung 3 dargestellten Phase der Feldtests vorgestellt.

4.1 Testplanung

Als Testbereich wurde der Bereich des Bahnhofs Payerbach-Reichenau gewählt, für den die relevanten Infrastrukturdaten durch die ÖBB schon im Zuge der Entwicklung des Demonstrators (siehe Abschnitt 3.2) zur Verfügung gestellt wurden. In einem gemeinsamen Workshop mit den ÖBB und den Experten der TU Wien wurden die örtlichen Gegebenheiten vor allem in Bezug auf die Aspekte Abschattungen, Mehrwegeausbreitung und Gleistopologien analysiert und konkrete Testfelder definiert (siehe Abbildung 33).

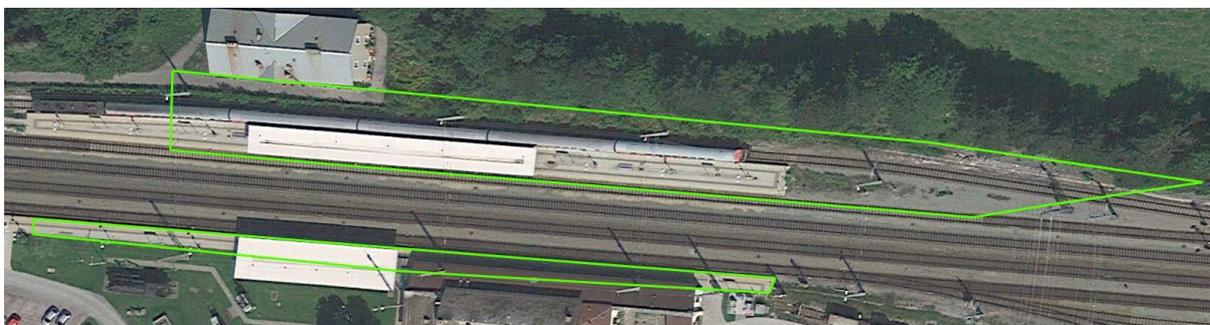


Abbildung 33: Testfelder am Bahnhof Payerbach-Reichenau (Satellitenbild: Google Maps)

Weiters wurden die zu testenden funktionalen Anforderungen der SAWAS Demonstrator App in der Testspezifikation zu Testszenarien mit konkreten Abläufen zusammengefasst. Die Anforderungen an die Testauswertungen und die dafür zu erhebenden Daten und zugehörigen Datenformate wurden ebenfalls mit der TU Wien abgestimmt.

4.2 Datenerhebung

Um die prinzipielle Machbarkeit der im Rahmen des Projekts definierten Use Cases zu untersuchen, wurden Applikationsdaten der SAWAS Demonstrator App aufgezeichnet. Diese umfassen unter anderem:

- Eingaben durch Bediener mit Zeitstempel (An-/Abmeldung, gewählte Betriebsform, gewählter Warnmodus);
- Erstellte Polygone mit Zeitstempel und zugehörigen Attributen;
- Ausgegebene Hinweise und Warnungen (Tracing und Zugfahrten) mit Zeitstempel.

Andererseits wurden durch den GNSS-Empfänger und den EPOSA Referenzdienst generierte Daten aufgezeichnet, die Aussagen zur Genauigkeit und Integrität der erhobenen Positionsdaten erlauben. Diese umfassen unter anderem:

- Durch den EPOSA Referenzdienst korrigierte Positionsdaten.
- „Fix Quality“ Parameter der NMEA GGA sentences: Mögliche Werte für diesen Parameter sind nach der entsprechenden Konfiguration des GNSS-Empfängers folgende: NO_FIX, DGPS_FIX, RTK_FLOAT, RTK_FIXED. Die höchste Genauigkeit in der Positionsbestimmung wird dabei durch den Wert RTK_FIXED signalisiert. Das RTK-Verfahren basiert auf der Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten zwischen einer reellen oder einer virtuellen Referenzstation und dem mobilen Empfänger. Können diese Mehrdeutigkeiten auf Integer-Niveau gelöst werden, so wird der Wert RTK_FIX ausgegeben, der die für die Positionsbestimmung höchste erzielbare Genauigkeit signalisiert. Können die Phasenmehrdeutigkeiten nur als Gleitkommazahl (en: *float*) abgeschätzt werden, so wird der Wert RTK_FLOAT ausgegeben. Der Wert DGPS_FIX bezeichnet Korrekturen auf Basis von Codemessungen, der Wert NO_FIX gibt an, dass keine Korrekturen in die absolute Positionsbestimmung eingeflossen sind [1].
- DOP Parameter in weiteren NMEA sentences: Die DOP (*dilution of precision*) Werte der NMEA sentences sind ein geometrisches Maß für die Schnittgüte der Satellitensignale, wobei sich niedrige DOP Werte günstig auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung auswirken [2].
- Binäre Rohdaten des GNSS-Empfängers im RINEX-Format (Receiver Independent Exchange Format) für Nachbearbeitung zur Berechnung von Referenztrajektorien.

Als GNSS-Empfänger für die Feldtests wurde den Modell 10xx der Firma ppm Precise Positioning Management GmbH⁵ verwendet. Auf dem GNSS-Empfänger waren für die Feldtests folgende Optionen konfiguriert:

- GPS+GLONASS,
- L1/L2,
- SBAS,

⁵ <https://ppmgmbh.com/>

- DGPS,
- NovAtel CORRECT RT-2 Base/Rover,
- GLIDE/RAIM, 20 Hz Measurements,
- 20 Hz Positions.

4.3 Testdurchführung

4.3.1 Testszenarios

Für folgende Testszenarios wurden konkrete Abläufe definiert, die im Rahmen der Feldtests durchlaufen wurden:

- Erhebung der Genauigkeit und Integrität der Positionsbestimmung an unterschiedlichen Orten: Über den Zeitraum mehrerer Minuten wurden sowohl stationäre (fixer Standort des Demonstrators), als auch kinematische Messungen (Bewegung des Demonstrators) durchgeführt. Bei den kinematischen Messungen wurden auf Basis der Umgebungsbedingungen (Abschattungen, Mehrwegeausbreitung) unterschiedliche Bewegungsmuster angewandt.
- Test des „Pendelns“ an der Warnbereichsgrenze (periodischer Ein- und Austritt in den Warnbereich) mit aktiver Tracing-Funktion: Hier wurden unterschiedliche Bewegungsmuster (Längsbewegungen zur Gleisachse, Querbewegungen zur Gleisachse, Überschreitung der Warnbereichsgrenzen in Winkeln von annähernd 45°, unterschiedliche Geschwindigkeiten) insbesondere zur späteren Auswertung der Eindringtiefe zum Zeitpunkt der Ausgabe des Hinweissignals angewandt.
- Bildung dynamischer Warnbereiche und Warnbereichsumschaltung: In diesem Szenario wurde die Umschaltung dynamischer Warnbereiche sowie die korrekte und zeitgerechte Ausgabe von Warnungen auf Basis realer Bewegungsmuster untersucht.

4.3.2 Testverlauf

Im Folgenden werden die tatsächlichen Abläufe während der Feldtests dokumentiert. Die hier dargestellten Abläufe decken die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Szenarios und somit die in der Testspezifikation definierten Testfälle ab.

Die Mehrzahl an Tests wurde im sicheren Bereich des Bahnsteigs durchgeführt. Nur für die Positionierung hinter der Zugsgarnitur und die Bewegung im statischen Warnbereich wurde der Gleisbereich betreten.

4.3.2.1 Starten der SAWAS Demonstrator App und Warten auf höchste Positionsgenauigkeit

Ein für die praktische Anwendung wesentlicher Aspekt ist die Dauer der Initialisierungsphase und Beeinträchtigung der Initialisierung durch die vorhandene Infrastruktur (Bauwerke, Stromleitungen, Züge). Daher wurde die Anwendung zwei Mal am Ende des Bahnsteigs gestartet. Die Initialisierung funktionierte problemlos. Abschattung der Satellitensignale war weder durch Gebäude noch durch die Topographie oder Bewuchs gegeben. Anschließend wurde dieselbe Prozedur unter dem Bahnsteigdach durchgeführt. Hier war eine Initialisierung nicht erfolgreich. Schließlich wurde dasselbe Experiment auch zwischen einer abgestellten Zugsgarnitur und der Böschung durchgeführt (siehe Abbildung 34). Dabei traten keine Probleme auf. Zur Untersuchung der Empfindlichkeit auf Züge wurde abschließend noch eine weitere Iteration bei Einfahrt eines Zuges am Nachbargleis durchgeführt, die Initialisierung erfolgte hier ebenfalls problemlos.



Abbildung 34: Positionierung zwischen Zugsgarnitur und Böschung

4.3.2.2 Bewegung des Empfängers entlang einer geraden Linie parallel zur Bahnsteigkante

Um die Genauigkeit der Positionsbestimmung bei Bewegung des Empfängers zu untersuchen, wurde dieser parallel zur Bahnsteigkante mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Im ersten Abschnitt war kein Bahnsteigdach vorhanden (vgl. Abbildung 35). Dieser Teil zeigt somit die Längs- und Quergenauigkeit bei bewegtem Empfänger (siehe Datenauswertung in Kapitel 5.1.1). Der zweite Teil des Weges verlief unter dem

Bahnsteigdach und sollte zeigen, wie sich die Anwendung bei Verlust der durch den Referenzdienst EPOSA erzielten, hohen Positionsgenauigkeit verhält.



Abbildung 35: Messung bei Bewegung entlang des Bahnsteigs, im Hintergrund ist das Bahnsteigdach sichtbar

4.3.2.3 Bewegung des Demonstrators innerhalb eines statischen Warnbereichs und Verlassen des Bereichs in Längsrichtung der Gleisachse

Im nächsten Schritt wurde in der SAWAS Demonstrator App ein statischer Warnbereich aktiviert und der Empfänger in diesen Warnbereich bewegt. Die weitere Bewegung erfolgte langsam in Richtung der Gleisachse bis zum Ende des Warnbereichs und darüber hinaus. Wie vorgesehen erfolgte die Ausgabe eines akustischen und optischen Signals, um den Bediener vor dem Verlassen des sicheren Bereichs zu warnen. Nach Bewegung in den sicheren Bereich konnte die Warnung wieder deaktiviert werden. Dies erfolgte mehrfach, um Rückschlüsse auf die Genauigkeit des Warnanstoßes ziehen zu können.

4.3.2.4 Bewegung innerhalb eines statischen Warnbereichs und Verlassen des Bereichs in Querrichtung der Gleisachse

Nach dem Test mit Bewegung des Demonstrators in Längsrichtung der Gleisachse erfolgte derselbe Test auch in Querrichtung. Dabei wurden mehrere Übertritte exakt quer zur Gleisachse durchgeführt und mehrere in einem 45°-Winkel. Die Übertritte erfolgten wieder in langsamer Gehbewegung (normale Schrittgeschwindigkeit).

4.3.2.5 Schnelle Bewegung entlang der Grenze des Warnbereichs mit mehrfachem Verlassen des Warnbereichs

In diesem Szenario wurde eine schnelle Bewegung (laufend) entlang der Gleisachse ausgeführt. Dabei wurde der Warnbereich in Querrichtung der Gleise immer wieder verlassen.

4.3.3 Protokollierung

Die Testdaten wurden während der Feldtests in mehreren Dateien und Datenformaten erfasst:

- Aufzeichnung durch GNSS Commander App:
 - NMEA Daten im ASCII Format,
 - Rohdaten der Satellitensignale im Binärformat zur späteren Umwandlung in das RINEX Format.
- Aufzeichnung durch SAWAS Demonstrator App:
 - Applikationsdaten wie EPOSA-korrigierte Positionen und zugehöriger Indikator für die Integrität der Positionen (NO_FIX, DGPS_FIX, RTK_FLOAT, RTK_FIXED), errechnete Polygone für Warnbereiche, Input des Bedieners, Statusmeldungen, Zeitpunkte von Warnausgaben, Zeitstempel, usw. in Form einer Textdatei.

5 EVALUIERUNG / VERWERTUNG

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Abbildung 3 dargestellten Phase der Evaluierung / Verwertung vorgestellt.

5.1 Datenauswertung

Ziel des Projekts SAWAS war die Untersuchung der prinzipiellen Machbarkeit der erarbeiteten Anwendungsfälle anhand des Demonstrators, aus dem Erkenntnisse für eine Empfehlung zur tatsächlichen Umsetzung abgeleitet wurden.

Zur Analyse der erhobenen Daten und der Ermittlung statistischer Kenngrößen soll einschränkend festgehalten werden, dass die Menge an erhobenen Daten für eine verlässliche statistische Analyse bei Weitem nicht ausreicht. Die Berechnung der Streuung eines Parameters (z.B. der Standardabweichung) benötigt eine Vielzahl an unabhängigen Versuchen. Jeder dieser Versuche liefert einen Wert für den Parameter und daraus wird die Standardabweichung abgeleitet. Da die Ergebnisse der Versuche streuen, werden auch die berechneten Standardabweichungen bei unabhängig durchgeführten Versuchen variieren. Mithilfe des Konfidenzintervalls kann beschrieben werden, in welchem Bereich der korrekte Wert mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit liegt. Die Aussage wäre dann beispielsweise: „Die Standardabweichung liegt mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % im Bereich zwischen 5 und 8 cm.“ Das lässt aber immer noch eine Chance von 1 %, dass die Standardabweichung größer als 8 cm oder kleiner als 5 cm ist. Die Breite des Konfidenzintervalls für die Standardabweichung kann allgemein grob in Abhängigkeit von der Anzahl der Versuche angegeben werden. Bei Anwendungen des Vermessungswesens ist das Intervall bei zehn Versuchen etwa so breit wie die berechnete Standardabweichung. Bei einer Erhöhung der Anzahl der Versuche schrumpft die Breite nur sehr langsam und ist erst bei 20 bis 25 Versuchen auf die Hälfte der Standardabweichung reduziert. Diese Tatsache sollte man immer beachten, wenn man statistische Aussagen über die Standardabweichung treffen will [3].

5.1.1 Applikationsdaten und NMEA-Daten

5.1.1.1 Überschreiten einer Warnbereichsgrenze in Längsrichtung der Gleisachse

Bei diesem Test wurde die Warnbereichsgrenze sieben Mal überschritten. Zunächst erfolgte eine Abschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit, um die Homogenität der Messungen zu beurteilen. Da die Koordinaten im Sekundentakt aufgezeichnet wurden,

ergibt sich aus dem Abstand zweier hintereinander erfasster Positionen die Geschwindigkeit in m/s. Diese bewegt sich zwischen 0,81 m/s und 0,94 m/s bzw. zwischen 2,9 km/h und 3,4 km/h. Die Stichprobe ist somit ausreichend homogen und entspricht Schrittgeschwindigkeit. Die Eindringtiefe in den Gefahrenbereich (der Abstand des Alarmierungspunktes von der quer zur Gleisachse liegenden Warnbereichsgrenze) beträgt dabei bis zu 37 cm. Theoretisch wären aufgrund der Rate, mit der neue Koordinatenwerte bestimmt werden, Eindringtiefen bis zu dem Wert möglich, der in einer Sekunde zurückgelegt wird (hier also knapp 1 m). Die Eindringtiefe wächst mit der Bewegungsgeschwindigkeit. Allerdings sinkt sie, wenn die Bewegung nicht exakt im rechten Winkel zur Grenze erfolgt. Die Details zu Geschwindigkeiten und Eindringtiefen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Versuch	Geschwindigkeit [m/s]	Eindringtiefe [cm]
1	0,81	37
2	0,89	28
3	0,89	8
4	0,94	13
5	0,86	1
6	0,84	23
7	0,88	2

Tabelle 1: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in Längsrichtung der Gleisachse

Die mittlere gemessene Eindringtiefe beträgt 16 cm bei langsamer Schrittgeschwindigkeit.

5.1.1.2 Überschreiten einer Warnbereichsgrenze in Querrichtung

Bei diesem Test wurde die Warnbereichsgrenze sieben Mal überschritten. Zunächst erfolgte eine Abschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit, um die Homogenität der Messungen zu beurteilen. Diese erfolgte analog der Vorgangsweise in 5.1.1.1. Die Bewegungsgeschwindigkeit bewegt sich zwischen 1,39 m/s und 1,83 m/s bzw. zwischen 5,0 km/h und 6,6 km/h. Die Stichprobe ist somit weniger homogen als die erste Stichprobe. Sie entspricht schneller Schrittgeschwindigkeit. Die Eindringtiefe in den Gefahrenbereich (der Abstand des Alarmierungspunktes von der parallel zur Gleisachse liegenden Warnbereichsgrenze) beträgt dabei bis zu 169 cm (bei einer Geschwindigkeit von 1,82 m/s oder 6,5 km/h). Die Details zu Geschwindigkeiten und Eindringtiefen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Versuch	Geschwindigkeit [m/s]	Eindringtiefe [cm]
1	1,48	110
2	1,39	26
3	1,62	23
4	1,67	72
5	1,66	43
6	1,83	1
7	1,82	169

Tabelle 2: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim schnellen Verlassen des Warnbereichs quer zur Gleisachse

Die mittlere gemessene Eindringtiefe beträgt 63 cm bei schneller Schrittgeschwindigkeit.

5.1.1.3 Überschreiten einer (Längs-)Warnbereichsgrenze im 45° Winkel

Bei diesem Test wurde die Warnbereichsgrenze neun Mal unter einem Winkel von annähernd 45° überschritten. Zunächst erfolgte eine Abschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit, um die Homogenität der Messungen zu beurteilen. Diese erfolgt analog der Vorgangsweise in Abschnitt 5.1.1.1. Die Bewegungsgeschwindigkeit bewegt sich zwischen 1,23 m/s und 1,39 m/s bzw. zwischen 4,4 km/h und 5,0 km/h. Ein Ausreißer in der Bewegungsgeschwindigkeit (2,54 m/s bzw. 9,2 km/h) wurde eliminiert, um eine einheitliche Geschwindigkeit der Tests zu erhalten. Die Stichprobe ist somit homogen und entspricht Schrittgeschwindigkeit. Die Eindringtiefe in den Gefahrenbereich (der Abstand des Alarmierungspunktes von der parallel zur Gleisachse liegenden Warnbereichsgrenze) beträgt dabei bis zu 70 cm (bei einer Geschwindigkeit von 1,31 m/s oder 4,7 km/h). Als Maximum war bei diesem Winkel das 0,7-fache des in einer Sekunde zurückgelegten Weges möglich. Somit wären Eindringtiefen bis zu 98 cm plausibel. Die Details zu Geschwindigkeiten und Eindringtiefen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Versuch	Geschwindigkeit [m/s]	Eindringtiefe [cm]
1	1,24	48
2	1,33	19
3	1,27	62
4	1,38	7
5	1,23	5
6	1,33	44
7	1,30	47
8	1,31	70
9	1,39	11

Tabelle 3: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in einem Winkel von annähernd 45° zur Gleisachse

Die mittlere gemessene Eindringtiefe beträgt 35 cm bei Schrittgeschwindigkeit.

5.1.1.4 (Langsame) Bewegung entlang Warnbereichsgrenze

Bei diesem Test erfolgte die Bewegung langsam entlang der Warnbereichsgrenze. Diese wurde sechs Mal überschritten. Zunächst erfolgte wieder eine Abschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit analog der Vorgangsweise in Abschnitt 5.1.1.1. Die Bewegungsgeschwindigkeit bewegt sich zwischen 0,69 m/s und 1,47 m/s bzw. zwischen 2,5 km/h und 5,3 km/h. Die Stichprobe entspricht Schrittgeschwindigkeit. Die Eindringtiefe in den Gefahrenbereich (der Abstand des Alarmierungspunktes von der parallel zur Gleisachse liegenden Warnbereichsgrenze) beträgt dabei maximal 33 cm (bei einer Geschwindigkeit von 1,47 m/s oder 5,3 km/h). Die übrigen Werte waren jedoch alle wesentlich geringer. Die Details zu Geschwindigkeiten und Eindringtiefen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Versuch	Geschwindigkeit [m/s]	Eindringtiefe [cm]
1	0,69	0
2	1,21	7
3	1,23	5
4	1,41	6
5	1,47	33
6	1,26	5

Tabelle 4: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in einem Winkel von annähernd 45° zur Gleisachse

Die mittlere gemessene Eindringtiefe beträgt 9 cm bei Schrittgeschwindigkeit.

5.1.1.5 (Schnelle) Bewegung entlang Warnbereichsgrenze (Laufen)

Bei diesem Test erfolgte eine laufende Bewegung entlang der Warnbereichsgrenze. Diese wurde fünf Mal überschritten. Bei den Tests gab es immer wieder einen Verlust der höchsten Positionierungsgenauigkeit (RTK_FIX), was zu dieser geringen Anzahl an Wiederholungen beigetragen hat. Zunächst erfolgte wieder eine Abschätzung der Bewegungsgeschwindigkeit analog der Vorgangsweise in Abschnitt 5.1.1.1. Die Bewegungsgeschwindigkeit bewegt sich zwischen 2,59 m/s und 3,39 m/s bzw. zwischen 9,3 km/h und 12,2 km/h. Das entspricht mittlerem Lauftempo. Die Eindringtiefe in den Gefahrenbereich (der Abstand des Alarmierungspunktes von der parallel zur Gleisachse liegenden Warnbereichsgrenze) beträgt dabei maximal 107 cm (bei einer Geschwindigkeit von 2,94 m/s oder 10,6 km/h). Die Details zu Geschwindigkeiten und Eindringtiefen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Versuch	Geschwindigkeit [m/s]	Eindringtiefe [cm]
1	2,71	37
2	2,94	107
3	2,65	25
4	2,59	31
5	3,39	21

Tabelle 5: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in einem Winkel von annähernd 45° zur Gleisachse

Die mittlere gemessene Eindringtiefe beträgt 44 cm beim Laufen entlang der Warnbereichsgrenze.

5.1.1.6 Initialisierungszeiten bis RTK_FIX

In mehreren Testanordnungen wurde die Dauer bis zur initialen Fixierung der Phasenmehrdeutigkeiten der Satellitensignale und die Beeinträchtigung dieser Dauer durch die vorhandene Infrastruktur (Bauwerke, Stromleitungen, Züge) erhoben. Die Initialisierung bei Standort des Demonstrators am Ende des Bahnsteigs ohne in der Nähe befindliche Objekte lag im Bereich von 73 s bis 177 s. Bei der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten zwischen Zug und Böschung wurde eine Dauer von 274 s beobachtet. Beim Versuch der Fixierung der Phasenmehrdeutigkeiten unter dem Bahnsteigdach konnten die Phasenmehrdeutigkeiten nicht in einem akzeptablen Zeitraum gelöst werden.

Weiters wurde das Verhalten des Demonstrators bei Bewegung unter das Bahnsteigdach in mehreren Iterationen analysiert. Erst sobald sich die Position des Demonstrators unter dem Bahnsteigdach befand, wurde ein Verlust der hohen Positionsgenauigkeit auf Basis der Trägerphasenmessungen beobachtet. In allen weiteren Szenarien war bei erfolgter initialer Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten kein Verlust der hohen Positionsgenauigkeit zu beobachten.

5.1.2 RINEX-Daten

Zusätzlich zu den in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Auswertungen, die auf der Positionsbestimmung durch den Demonstrator vor Ort basieren, wurden während der Feldtests die Rohdaten der Satellitensignale in Form von Binärdaten aufgezeichnet. Diese Rohdaten wurden in das RINEX-Format konvertiert, um eine spätere Auswertung zu ermöglichen.

Das Nachbearbeiten der Daten wurde von der TU Wien unter Verwendung der Softwarepakete Leica Infinity [4] und RTKlib [5] durchgeführt.

Die Auswertung der aufgezeichneten Rohdaten der Satellitensignale erfolgte für das erste in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Szenario (Erhebung der Genauigkeit und Integrität der Positionsbestimmung für stationäre und kinematische Messungen). Dabei erfolgte eine weitere Unterteilung des Szenarios in die in Abbildung 36 dargestellten Teilszenarien:

- A. Stationäre Messung mit Fixierung der Phasenmehrdeutigkeiten im offenen Feld;
- B. Bewegung aus offenem Feld mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten in Richtung abgeschatteter Bereich (Bahnhofsdach) bis zum Verlust der fixierten Phasenmehrdeutigkeiten;

- C. Messung bei einfahrendem Zug mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten;
- D. Stationäre Messung mit Fixierung der Phasenmehrdeutigkeiten zwischen Zug und Böschung.



Abbildung 36: Teilszenarien A bis D für Nachbearbeiten (Satellitenbild: Google Maps)

Im Folgenden werden die wesentlichen, für das Nachbearbeiten relevanten Aufnahmedaten der Messungen gelistet:

- Messsystem: GPS + GLONASS;
- Frequenzen: L1 + L2;
- Abtastrate: 0,1 Hz bzw. 1 Hz für ausgewählte Szenarien;
- Messzeitpunkt: 04.05.2018 bzw. 28.05.2018;
- Referenzstation: Müzzzuschlag von EPOSA, Entfernung: ca. 17 km.

Für Messungen mit einer Abtastrate von 0,1 Hz konnte die Position im Nachbearbeiten grundsätzlich nur mittels Widelane-Kombination fixiert werden, so zum Beispiel für Szenario C. Für Szenario D war vermutlich aufgrund der Abtastrate und aufgrund der Fehler durch Mehrwegeausbreitung keine Fixierung der Phasenmehrdeutigkeiten möglich. Die Phasenmehrdeutigkeiten der Daten, welche mit einer 1 Hz Abtastrate aufgezeichnet wurden, konnten fixiert werden.

Entscheidend für die Fixierung der Phasenmehrdeutigkeiten ist neben der Abtastrate auch der „cut-off“-Winkel, da die Signale von Satelliten mit geringem Elevationswinkel grundsätzlich höhere Fehler durch Mehrwegeausbreitung aufweisen, die die Positionslösung verschlechtern. Aus diesem Grund wurde der „cut-off“-Winkel auf 15° gesetzt.

Abbildung 37 zeigt die ausgewerteten Daten zweier Messepochen für die Szenarien A und B mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten. Abbildung 38 zeigt die ausgewerteten Daten einer

Messepoche für dieselben Szenarien (A und B), jedoch konnte die Phasenmehrdeutigkeit hier nur auf Basis der Widelane-Kombination (aus Phasenbeobachtungen der Satellitensignale gebildete Linearkombination mit großer Wellenlänge, siehe [6]) gelöst werden, was in der Abtaste begründet liegt. Für diese Messepoche wurden im Rahmen der Nachbearbeitung somit etwas höhere formale Fehler der GNSS-Messungen errechnet, wie aus Tabelle 6 und Tabelle 7 ersichtlich ist.

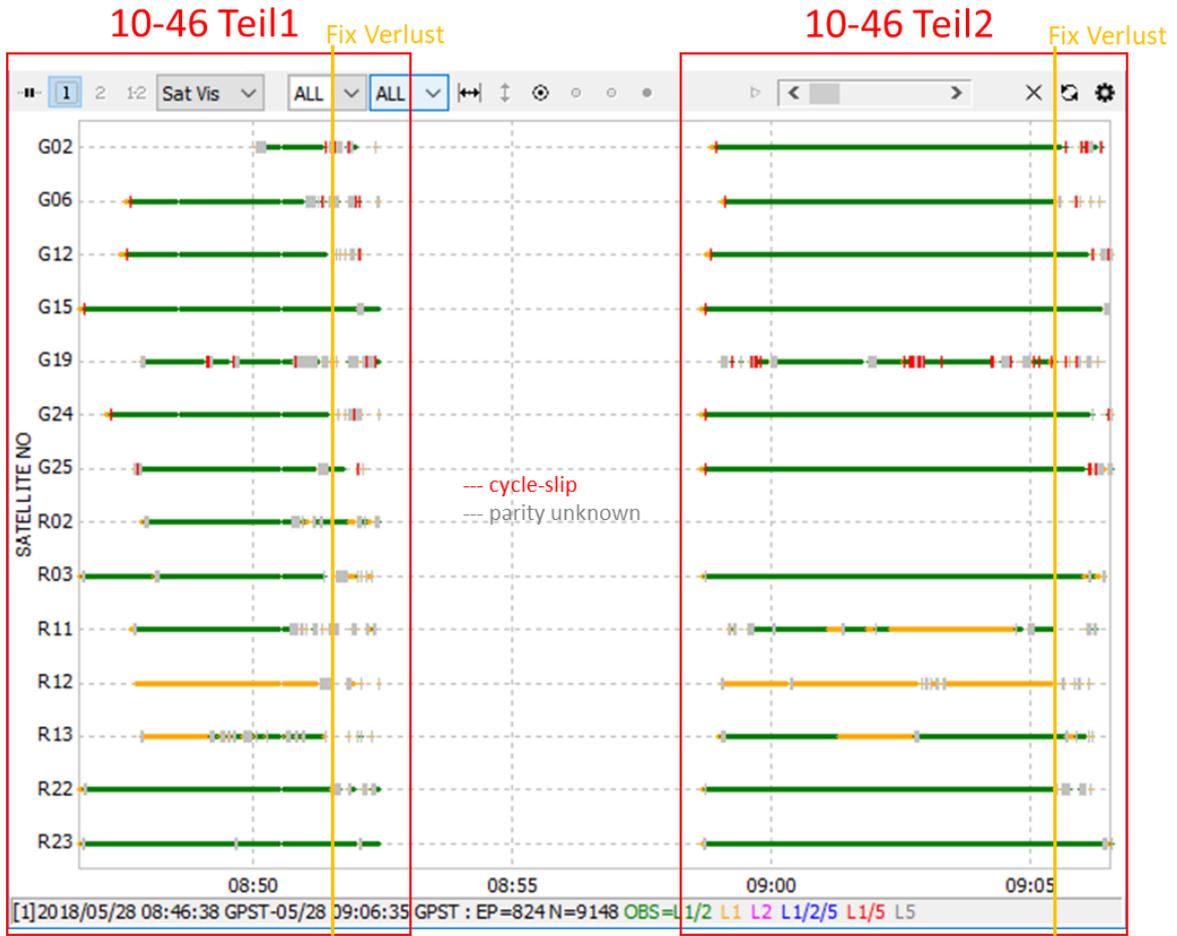


Abbildung 37: Darstellung ausgewerteter Daten zweier Messepochen für die Szenarien A und B mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten

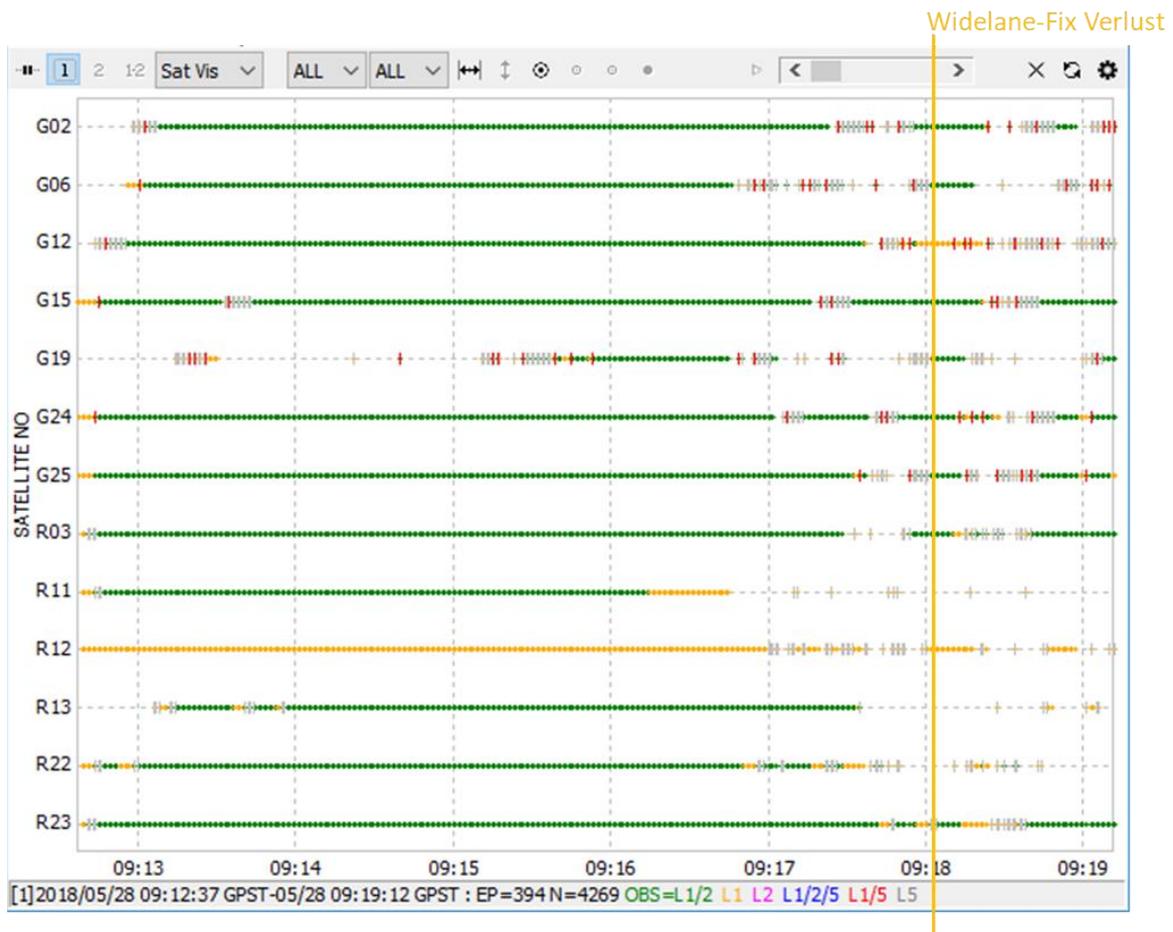


Abbildung 38: Darstellung ausgewerteter Daten einer Messepoche für die Szenarien A und B mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten auf Basis der Widelane-Kombination

Tabelle 6 zeigt die Parameter für die Auswertung der Daten für Szenario A sowie die im Rahmen des Post-Processing für dieses Szenario erhobene Koordinatenqualität. Die angegebene Koordinatenqualität entspricht dabei den formalen Fehlern (tatsächlich aus Beobachtungen und geometrischer Konfiguration erhaltene Genauigkeit).

	Fixierte Phasen 1 (10-46 Teil1)	Fixierte Phasen 2 (10-46 Teil2)	WideLane – Fix (11-11)
Auswertzeit	10:46:20 – 10:48:21	10:58:19 - 11:00:19	11:12:19 -11:14:18
Cut-off Winkel [°]	15		10
Troposphärenmodell	VMF mit GPT2-Modell		
Ionosphärenmodell	Berechnet		
Koordinatenqualität* 2D [m]	0,006	0,014	0,145
Koordinatenqualität 3D [m]	0,008	0,026	0,216

Tabelle 6: Parameter und Koordinatenqualität für stationäre Messungen

Tabelle 7 zeigt die Parameter für die Auswertung der Daten für Szenario B sowie die im Rahmen des Post-Processing für dieses Szenario erhobene Koordinatenqualität.

	Fixierte Phasen 1 (10-46 Teil1)		Fixierte Phasen 2 (10-46 Teil2)		WideLane – Fix (11-11)	
Auswertzeit	10:48:22 - 10:51:54		11:00:20 - 11:05:54		11:14:19 - 11:18:54	
Cut-off Winkel [°]	15				10	
Troposphärenmodell	VMF mit GPT2-Modell					
Ionosphärenmodell	Berechnet					
Phasen fixiert [%]	71,4		91,3		40,7	
Fehlende Epochen [%]	11,3		0		6,5	
	KQ 2D	KQ 3D	KQ 2D	KQ 3D	KQ 2D	KQ 3D
Mittelwert (fix/code) [m]	0,041/2,970	0,062/5,774	0,030/1,914	0,045/3,388	0,364/3,256	0,611/4,933

Tabelle 7: Parameter und Koordinatenqualität für kinematische Messungen

Die Positionen mit im Rahmen des Post-Processing fixierten Phasenmehrdeutigkeiten sind der Übersicht halber für die jeweilige Messepoche in Abbildung 39 bis Abbildung 41 grün dargestellt.



Abbildung 39: Positionen mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten für Messepoche „10-46 Teil1“ (Satellitenbild: Google Maps)



Abbildung 40: Positionen mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten für Messepoche „10-46 Teil2“ (Satellitenbild: Google Maps)



Abbildung 41: Positionen mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten für Messepoche „11-11“ (Satellitenbild: Google Maps)

Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Auswertung der Daten in der Nachbearbeitung sind folgende:

- Das Ergebnis der Nachbearbeitung ist von den implementierten Algorithmen in der Auswertesoftware abhängig. Aus diesem Grund können die im Feld aufgezeichneten Daten eine höhere Anzahl an fixierten Positionen aufweisen, als die in der Nachbearbeitung generierten Lösungen. Auf Basis der Rohdaten konnte durch den GNSS-Empfänger im Verlauf der Feldtests vor Ort ein weit höherer Prozentsatz an Phasenmehrdeutigkeiten fixiert werden als im Rahmen der Nachbearbeitung (in Abbildung 39 bis Abbildung 41 würde die Reihe der grün dargestellten Positionen jeweils bis unter das Bahnhofsdach reichen).

- Eine weitgehend zuverlässige Bestimmung von Phasenmehrdeutigkeiten ist nur mit einer niedrigen Abtastrate im Bereich von 1 Hz möglich.
- Durch den entstehenden Mehrwegeffekt sollten Signale von Satelliten mit einem Elevationswinkel unter 15° nicht berücksichtigt werden.
- Wie erwartet kann mit formalen Fehlern für die Positionsbestimmung im Bereich von 1–3 cm für Positionen auf Basis fixierter Phasenmehrdeutigkeiten (RTK_FIX), im Bereich von 2–3 dm für Positionen auf Basis geschätzter Phasenmehrdeutigkeiten (RTK_FLOAT) und im Bereich von 2–3 m auf Basis von Codelösungen (DGPS_FIX) gerechnet werden.
- Sowohl die im Rahmen der Feldtests, als auch die im Rahmen der Nachbearbeitung erhobenen Positionsdaten lassen darauf schließen, dass die von den ÖBB zur Verfügung gestellten Infrastrukturdaten für den Bereich Payerbach-Reichenau und Umgebung für die angestrebten Anwendungsfälle die notwendigen Qualitätsanforderungen grundsätzlich erfüllen. Der Koordinatenrahmen der Infrastrukturdaten wird durch einen bestmöglich spannungsfreien Anschluss an das amtliche Festpunktfeld (GK M34, MGI) realisiert.

5.2 Umsetzungsempfehlung

5.2.1 Aufbau der Umsetzungsempfehlung

Im Rahmen des Projekts SAWAS wurde eine abschließende Umsetzungsempfehlung für ein GNSS-gestütztes AWS erstellt. Dieses Dokument orientiert sich an den für die Umsetzung sicherheitskritischer Anwendungen im Bereich des Eisenbahnwesens relevanten Normen und Vorschriften, insbesondere an den Normen [7], [8] und [9] des Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC)⁶, und enthält folgende wesentliche Punkte:

- Es werden die Voraussetzungen für die Umsetzung eines GNSS-gestützten AWS und damit verbundene Herausforderungen beschrieben: Dabei wird in einer umfassenden Recherche zum Stand der Technik bei sicherheitskritischen GNSS-Anwendungen vor allem auf die Performance-Parameter unterschiedlicher Technologien zur Positionsbestimmung eingegangen. Vor allem die Punkte der Positionierungsgenauigkeit und Integrität der Positionsdaten werden näher

⁶ <https://www.cenelec.eu/>

ausgeführt und es werden auf Basis aktueller wissenschaftlicher Literatur und Abstimmung mit den Experten der TU Wien plausible Werte für die Beurteilung der Machbarkeit der einzelnen Anwendungsfälle in ihrem spezifischen Anwendungskontext bestimmt.

- Weiters werden für die einzelnen Anwendungsfälle Konzepte / Lösungsansätze für eine mögliche Umsetzung und Integration in das bestehende AWS diskutiert. Dabei fließen vor allem Erkenntnisse aus der Recherche zum Stand der Technik der zugrunde liegenden und in naher Zukunft etablierten Technologien zur Positionsbestimmung, Erkenntnisse aus der Implementierung des Demonstrators und den durchgeführten Feldtests sowie deren ausgewertete Testdaten ein.
- Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Empfehlungen sowie Vorschläge für weiter zu untersuchende Punkte im Rahmen zukünftiger Projekte.

Für die Untersuchung der Umsetzung der Anwendungsfälle aus Abschnitt 2.1 im Rahmen der Umsetzungsempfehlung wurden diese teilweise zusammengefasst. Die wesentlichen Erkenntnisse und Empfehlungen wurden auf folgende drei Anwendungsfälle bezogen:

- Substitution des RFID-basierten Anmeldeprozesses: Dieser Anwendungsfall bezieht sich auf den Anmeldeprozess basierend auf GNSS-gestützter Ortung des Warngeräts (Anmeldung und Positionierung Warngerät).
- Dynamische Warnbereiche: In diesem Anwendungsfall sind implizit die Positionierung und Positionsänderung des Warngeräts enthalten.
- Tracing-Funktion: Auch dieser Anwendungsfall beinhaltet die Positionierung und Positionsänderung des Warngeräts.

Die Generierung von Warnungen sowie die Abmeldung des Warngeräts wurden im Rahmen der Feldtests demonstriert und deren prinzipielle Machbarkeit wurde auf Basis des Demonstrators nachgewiesen.

5.2.2 Positionierungsgenauigkeit

Zur Positionierungsgenauigkeit kann grundsätzlich festgehalten werden, dass im schlechtesten Fall (Abschattungen) ohne die Verwendung zusätzlicher Technologien keine Positionierung möglich ist.

Eine Mindestgenauigkeit kann ohne die Verwendung zusätzlicher Technologien nicht garantiert werden, da die lokalen GNSS-Fehler (Mehrwegeausbreitung, LOS und NLOS)

nicht eingegrenzt werden können. Aus diesem Grund wurden die Funktion des GNSS-basierten Anmeldeprozesses von Warnanlagen und die Tracing-Funktion als nicht sicherheitsrelevante Hilfsfunktionen (kein Nachweis einer Sicherheitsintegrität erforderlich) betrachtet.

Für den GNSS-basierten Anmeldeprozess ist das grundsätzlich möglich, da auch die derzeit verwendeten RFID-Tags nur eine Hilfsfunktion darstellen. Für die Umsetzung des GNSS-basierten Anmeldeprozesses muss lediglich sichergestellt sein, dass sich zumindest keine Verschlechterung der Gesamtfehlerrate ergibt, was auf Basis der detaillierten Gegenüberstellung der beiden Prozesse in der Umsetzungsempfehlung erreichbar scheint.

Auch die Umsetzung der Tracing-Funktion wird als nicht sicherheitsrelevante Hilfsfunktion empfohlen. Die Erreichung der Gleiselektivität erscheint selbst bei Einbindung zusätzlicher Sensorik derzeit nicht machbar bzw. nicht nachweisbar (man geht zum Beispiel auch beim Leuchtturmprojekt SmartRail 4.0 der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) derzeit nicht von einer Erreichung der Gleiselektivität aus [10]). Die Genauigkeiten reichen grundsätzlich für einen zusätzlichen Mehrwert (wobei der tatsächliche Mehrwert im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse zu untersuchen ist, in deren Rahmen auch die Auswirkungen von False Positives bei der Ausgabe von Hinweissignalen weiter untersucht werden müssen), eine entsprechende Sicherheitsintegrität kann jedoch bestenfalls für das Verlassen einer Warnbereichsgrenze in Längsrichtung mit entsprechend großen Toleranzen nachgewiesen werden.

An dieser Stelle soll nochmals festgehalten werden, dass nur ein Wert für die Mindestgenauigkeit der Positionierung allein keine Aussagekraft hat. Es muss immer mit angegeben werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Genauigkeit eingehalten werden kann.

Für die Berechnungen in der Umsetzungsempfehlung wurde bei EPOSA-korrigierter Positionsbestimmung von horizontal 0,015 m (RTK_FIX) bzw. 0,15 m (RTK_FLOAT) aus der Standardabweichung einer Normalverteilung ausgegangen (68,27 % aller Messwerte weichen nicht weiter als 0,015 m bzw. 0,15 m von der tatsächlichen Position ab).

5.2.3 Sekundäre Technologien zur Positionsbestimmung

Zusammenfassend ist eine der wesentlichen Erkenntnisse aus den Untersuchungen der aktuellen Integritätsparameter der verschiedenen GNSS-Technologien, dass Garantien nur für Fehler gegeben werden können, die unter dem Einfluss des jeweiligen Betreibers liegen

(SIS Integrität). Lokale Fehler wie die Mehrwegeausbreitung (und hier im Speziellen NLOS Effekte) oder empfängerbedingte Fehler können nur abgeschätzt und durch Simulationen und Feldtests für unterschiedliche Umgebungen plausibilisiert werden. Durch GNSS bestimmte Positionen dürfen somit nicht direkt als Eingangsparameter für sicherheitskritische Funktionen gemäß CENELEC-Normen verwendet werden, sondern müssen immer durch zusätzliche Sensorik (zum Beispiel Odometrie, Trägheitsnavigation) oder durch die Integration mit anderen Technologien wie Lageplänen bei spurgeführten Entitäten plausibilisiert werden. Selbst hochgenaue Korrekturdatendienste wie EPOSA erlauben keine nachweisbare Eingrenzung des Positionsfehlers [11].

Zur Erhöhung der Genauigkeit und Verfügbarkeit der durch GNSS bestimmten Positionen kann eine Reihe von Korrektursignalen herangezogen werden. Aufgrund der komplementären Eigenschaften bietet sich hier zum Beispiel eine inertielle Messeinheit (engl.: Inertial Measurement Unit, IMU) zusätzlich zu EPOSA an, jedoch ist GNSS immer die Grundlage für die Positionsbestimmung. Lokale GNSS-Fehler wie Mehrwegeeffekte können hier nur bedingt minimiert werden. Auf Basis aktueller Literatur sollte daher zur Erreichung der Sicherheitsintegrität immer zumindest ein zweiter, unabhängiger Kanal zur Plausibilisierung der Positionen eingebunden werden.

Um in einem zweiten Kanal absolute Positionen zur Plausibilisierung der GNSS-Positionen bestimmen zu können, wäre zum Beispiel eine Lokalisierung mittels 5G denkbar. Diese bietet entsprechende Referenzpunkte in Form von Basisstationen, die Voraussetzung für eine absolute Positionierung sind. Weitere Technologien zur Bestimmung absoluter Positionen sind zum Beispiel RFID, WLAN, oder Signallaufzeitmessungen generell. Diese widersprechen jedoch der im Projekt SAWAS definierten Anforderung zur Reduktion streckenseitiger Infrastruktur. Weitere sekundäre Technologien zur Positionsbestimmung (Odometrie, Bodenradar, etc.) können nicht eingesetzt werden, da für die vorliegenden Funktionen nicht-spurgeführte Entitäten betrachtet werden.

Sollte zum Beispiel die Lokalisierung mittels 5G eingebunden werden, so sind auch hier lokale Effekte und vor allem auch systematische Fehlereinflüsse im Vergleich zu GNSS in einer umfassenden Gefährdungsanalyse zu betrachten.

Ganz generell stellt sich für die Zulassung von GNSS Empfängern für sicherheitskritische Anwendungen weiters noch die Herausforderung der Zertifizierung. Bis dato existieren dafür immer noch keine standardisierten Prüf- und Zulassungsprozesse.

5.2.4 Infrastrukturdaten

Die Genauigkeitsanforderungen an die Lagepläne für die Substitution des RFID-Anmeldeprozesses und die Tracing-Funktion wurden in der Umsetzungsempfehlung auf Basis der in den Feldtests erhobenen Daten und aktueller Fachliteratur abgeschätzt.

Da für die Umsetzung der dynamischen Warnbereiche im Sinne einer sicherheitskritischen Anwendung sehr hohe Anforderungen an die Integrität gestellt werden, müsste für diesen Anwendungsfall ein genauer Wert unter Berücksichtigung und Argumentation der passenden Wahrscheinlichkeitsverteilung im Rahmen einer umfassenden Gefährdungsanalyse ermittelt werden.

Weiters muss für die Infrastrukturdaten ein umfassender Datenmanagementprozess etabliert werden. Dieser Prozess der Datenerhebung, deren Dokumentation sowie der Speicherung und Bereitstellung der Daten muss als Grundlage für die spezifische Ausprägung des nach EN 50126 [7] als sicherheitsrelevant klassifizierten Systems SAWAS dienen. Unter anderem müssen folgende Anforderungen für die relevanten Objekte (Gleisachsen, Warnbereiche, etc.) spezifiziert sein (diese sollten weitestgehend auch für die anderen beiden Anwendungsfälle spezifiziert werden):

- Vollständigkeit,
- Integrität,
- Konformität,
- Logische Konsistenz (in Bezug auf vordefinierte Regeln; zum Beispiel Elemente, die sich physisch nicht an der gleichen Position befinden können),
- Aktualität (muss über die Dauer der Anwendung zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein),
- Weitere Metadaten (zum Beispiel angelehnt an die im ISO Standard 19157 [12] beschriebenen Qualitätsparameter) zur Einbindung in den Datenmanagementprozess.

5.2.5 Realisierbarkeit der Anwendungsfälle

Den vergleichsweise größten Unsicherheitsfaktor für im System AWS zu berücksichtigende Toleranzen stellt die Positionsbestimmung selbst dar. Bei Verwendung entsprechender Methoden in der Vermessung ist die Genauigkeit der Lagepläne demgegenüber weitestgehend vernachlässigbar. Weiters spielen Verzögerungen in der Frequenz der

Positionsbestimmung durch den GNSS-Empfänger, sowie Verzögerungen durch die Algorithmen und Übertragungszeiten eine Rolle. Diese Verzögerungen wurden in den Betrachtungen im Rahmen der Umsetzungsempfehlung abgeschätzt und berücksichtigt:

- Für die Tracing-Funktion erscheint die Umsetzung nur unter der Prämisse sinnvoll, dass die Infrastrukturdaten lokal am Endgerät vorliegen und die Algorithmen dort ausgeführt werden, es sei denn der angenommene Durchschnittswert einer Verzögerung von 2,5 s über das GSM-R Mobilfunknetz kann in Zukunft entscheidend minimiert werden.
- Für die Funktion der dynamischen Warnbereiche müssen alle genannten Verzögerungen sowie die Unsicherheit in der Positionierung in die technische Vorwarnzeit einfließen.

Für die drei diskutierten Anwendungsfälle ergeben sich somit auf Basis der untersuchten Technologien, Projekte und wissenschaftlichen Arbeiten folgende Einschätzungen einer Realisierbarkeit unter in der Umsetzungsempfehlung jeweils detailliert festgehaltenen Voraussetzungen:

- Substitution des RFID-basierten Anmeldeprozesses: Eine Umsetzung der GNSS-Ortung der Warngeräte als nicht sicherheitsrelevante Hilfsfunktion scheint auf Basis der beschriebenen Gegenüberstellung zum derzeitigen Prozess eine Verbesserung hinsichtlich der Sicherheit und jedenfalls auch eine Optimierung des gesamten Prozesses im Hinblick auf Bedienhandlungen und Wartungsarbeiten an den RFID-Tags zu bedeuten. Eine Umsetzung als nicht sicherheitsrelevante Hilfsfunktion wird empfohlen.
- Dynamische Warnbereiche: Soll keine streckenseitige Infrastruktur zum Einsatz kommen, so scheint eine erfolgreiche Nachweisführung mit dem Sicherheitsziel SIL3 auf Basis der hohen Anforderungen an die Integrität der Positionsdaten derzeit nicht möglich.
- Tracing-Funktion: Eine Umsetzung der Tracing-Funktion als nicht sicherheitsrelevante Hilfsfunktion scheint unter den in der Umsetzungsempfehlung beschriebenen Voraussetzungen ebenfalls möglich.

Da für die Tracing-Funktion und für die Substituierung des RFID-basierten Anmeldeprozesses die gleichen Positionierungsgenauigkeiten erforderlich sind, würden sich bei einer Umsetzung beider Funktionen Synergien in der Beschaffung der Empfänger,

in der Integration in das derzeit bestehende AWS, in der Herstellung der benötigten Genauigkeit der Infrastrukturdaten, sowie in den notwendigen Prozessen zur Adaptierung und Projektierung von Infrastrukturdaten (zum Beispiel Erstellung von Polygonen für Warnbereiche und Warnsektoren, wobei Warnsektoren als Summe von Warnbereichen gebildet werden können) ergeben.

5.3 Ausblick

Die Einbindung von Korrekturdatendiensten wie EPOSA stellt für viele GNSS-basierte Anwendungen im Eisenbahnwesen eine Voraussetzung für die Erreichbarkeit der Anforderungen an die Genauigkeit der Positionierung dar. Für die erzielbare Positionierungsgenauigkeit im Zentimeterbereich wird von solchen Diensten jedoch keine Aussage über die Integrität der Daten zur Verfügung gestellt. Werden die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasen als Integer-Werte fixiert, so kann der Fehler in der Pseudorange eines Satelliten auf einen theoretischen Maximalwert von 4,8 cm für die GPS L1-Frequenz und 6,1 cm für die GPS L2-Frequenz eingegrenzt werden [13]. Umgelegt auf eine RTK-Basisliniengenauigkeit bedeutet dies im besten Fall eine horizontale Positionsgenauigkeit von $\pm 1,5$ cm.

Jedoch ergeben sich je nach verwendetem Algorithmus und je nachdem, ob statische oder kinematische Positionsbestimmungen durchgeführt werden, in der Praxis unterschiedliche Werte für den Prozentsatz an falsch fixierten Phasenmehrdeutigkeiten. Eine Aussage darüber, wie hoch dieser Prozentsatz in Abhängigkeit vom verwendeten Algorithmus bzw. Empfänger und der für den jeweiligen Anwendungsfall relevanten Geschwindigkeit liegt, würde somit zu einer Aussage über die Integrität der Positionsdaten führen. Eine tiefgehende Analyse der Algorithmen und Verfahren in Form theoretischer Betrachtungen und Simulationen könnte weiters zu einer Aussage diesbezüglich führen, in welchem Fehlerbereich falsch fixierte Integer-Mehrdeutigkeiten liegen und somit ebenfalls zur Ableitung von Integritätswerten beitragen. Abgeleitete Erkenntnisse müssten gegebenenfalls durch unter realen Bedingungen erhobene Daten gestützt werden.

Ein weiterer, zukünftig zu untersuchender Punkt ist die Charakterisierung und Klassifizierung unterschiedlicher Umgebungen in Bezug auf Fehler der Mehrwegeausbreitung (insbesondere NLOS) und das Ableiten von Anwendungsbedingungen. Zu diesem Punkt wurden im Rahmen von Projekten bereits eine Reihe von Untersuchungen durchgeführt, wobei der Fokus aber zumeist auf eine Analyse

der Fehler für spurgeführte Entitäten gerichtet war [14]. Für die im Rahmen des Projekts untersuchten Anwendungsfälle trifft diese Annahme jedoch nicht zu.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bezeichnung
AS	Arbeitsstelle
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AWS	Automatisches Warnsystem
BFZ	Betriebsführungszentrale
DOP	Dilution Of Precision
EPOSA	Echtzeit-Positionierung Austria (von ÖBB mitentwickelter und genutzter Referenzdienst zur genauen Positionierung mittels GNSS)
ESA	Eisenbahnsicherungsanlage
FRS	Spezifikation funktionaler Anforderungen (engl.: Functional Requirements Specification, FRS)
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GSM-R	GSM-Railway
HMI	Human Machine Interface
IMU	Inertiale Messeinheit (engl.: inertial measurement unit, IMU): Eine räumliche Kombination mehrerer Inertialsensoren wie Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren. Sie stellt die sensorische Messeinheit eines Trägheitsnavigationssystems (englisch Inertial Navigation System, INS) dar.
INS	Trägheitsnavigationssystem oder inertiales Navigationssystem (engl.: Inertial Navigation System): Ein 3-D-Messsystem mit einer inertialen Messeinheit (engl. Inertial Measurement Unit, IMU) als zentraler Sensoreinheit mit mehreren Beschleunigungs- und Drehratensensoren.
IPC	Interprozesskommunikation (engl.: Interprocess Communication, IPC)
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LOS	Line-Of-Sight (dt.: „direkte Sichtverbindung“)
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LTE	Long Term Evolution: Eine Bezeichnung für den Mobilfunkstandard der dritten Generation.
MGI	Amtliche Kurzbezeichnung für das geodätische Datum von Österreich (steht für Militärgeographisches Institut).

NLOS	Non-Line-Of-Sight: (dt.: „nicht direkte Sichtverbindung“): Begriff in der Nachrichtentechnik für eine Funkübertragung ohne direkten Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger.
NMEA	NMEA 0183 ist ein Standard für die Kommunikation zwischen Navigationsgeräten auf Schiffen, der von der National Marine Electronics Association (NMEA) definiert wurde und auch für die Kommunikation zwischen GPS-Empfänger und PCs sowie mobilen Endgeräten genutzt wird.
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
RBC	Radio Block Center
RFID	Radio Frequency Identification
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services: Eine US-amerikanische Organisation, die 1947 mit dem Ziel, Grundlagen und Normungen der maritimen Telekommunikation zu schaffen, gegründet wurde. RTCM stellt heute den offenen Standard für den Austausch für GNSS-Daten in Echtzeit dar.
RTK	Echtzeitkinematik (engl.: Real-Time Kinematics)
SCWS	Stellwerkgebundenes Warnsystem (en: Signal Controlled Warning System)
SDK	Software Development Kit
SIS	Signal-in-Space: Von Satelliten an das Nutzersegment ausgestrahlte Signale
TEPOS	T-Kom Services Echtzeitpositionierung
UML	Unified Modeling Language
Vorwarnzeit	Als Vorwarnzeit wird jener Zeitraum betrachtet, welcher mit der Warnausgabe einer Warnung beginnt und mit dem Eintreffen eines Schienenfahrzeugs an der zu betrachtenden Stelle endet.
WB	Warnbereich: Ein Warnbereich ist ein in seiner topologischen Ausdehnung definierter Bereich im Gleisbereich. Diesem Bereich werden unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Geschwindigkeit einer Strecke jene Argumente bzw. Anstoßkriterien einer Eisenbahnsicherungsanlage dynamisch und individuell zugeordnet, welche benötigt werden, um eine Warnung vor bzw. spätestens ab Beginn der Mindestvorwarnzeit vor einem herannahenden Zug an die Personen im Gleisbereich auszugeben.
ZPW	Zöllner Personen Warngerät: Ein Funkwarngerät zur Warnung von Personal im Gleisbereich.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Generische Architektur eines SCWS.....	6
Abbildung 2: Grundarchitektur des AWS der ÖBB	8
Abbildung 3: Methodischer Ansatz für den Workflow im Projekt SAWAS	13
Abbildung 4: SAWAS Systemarchitektur.....	18
Abbildung 5: Schnittstellen und Umsysteme der SAWAS Demonstrator App.....	19
Abbildung 6: SAWAS Demonstrator mit GNSS-Empfänger.....	21
Abbildung 7: Erstellen von Polygonen für Warnbereiche und Sub-Warnbereiche in AutoCAD.....	23
Abbildung 8: Dateistruktur der SAWAS Demonstrator App	24
Abbildung 9: Auswahl für den Bereich „keine Fahrten“.....	25
Abbildung 10: Auswahl von zu aktivierenden Warnbereichen	26
Abbildung 11: Dialog zur Aktivierung von Fahrtrückhalt für Warnbereiche	27
Abbildung 12: Aktivierte statische Warnbereiche	28
Abbildung 13: Dialog zur Festlegung relevanter Polygone	29
Abbildung 14: Auswahl für Bereich „keine Fahrten“ aus Liste	30
Abbildung 15: Auswahl von zu aktivierenden Warnbereichen aus Liste	30
Abbildung 16: Eintritt in aktivierten Warnbereich	31
Abbildung 17: Eintritt in nicht aktivierten Warnbereich.....	31
Abbildung 18: Dialog zur Simulation von Zugfahrten.....	32
Abbildung 19: Fahrt in Bereich ohne aktiven Fahrtrückhalt	33
Abbildung 20: Fahrt in Warnbereich mit aktivem Fahrtrückhalt	33
Abbildung 21: Warnung bis Freifahren des Warnbereichs	34
Abbildung 22: Warnbereiche vs. Sub-Warnbereiche	34
Abbildung 23: Auswahl zusammenhängender Sub-Warnbereiche	35
Abbildung 24: Auswahl nicht zusammenhängender Sub-Warnbereiche.....	36
Abbildung 25: Ablehnung nicht zusammenhängender Sub-Warnbereiche	36
Abbildung 26: Markierte Sub-Warnbereiche zur Bildung eines dynamischen Warnbereichs	37
Abbildung 27: Prinzip der Bildung eines dynamischen Warnbereichs	38
Abbildung 28: Eintritt in aktivierten dynamischen Warnbereich	38
Abbildung 29: Eintritt in nicht aktivierten Sub-Warnbereich	39

Abbildung 30: Dialog zur Simulation von Zugfahrten in der Betriebsform „dynamische Warnbereiche“	39
Abbildung 31: Fahrt in dynamischen Warnbereich ohne aktiven Fahrtrückhalt.....	40
Abbildung 32: Darstellung von Infrastrukturelementen	41
Abbildung 33: Testfelder am Bahnhof Payerbach-Reichenau (Satellitenbild: Google Maps)	42
Abbildung 34: Positionierung zwischen Zugsgarnitur und Böschung.....	45
Abbildung 35: Messung bei Bewegung entlang des Bahnsteigs, im Hintergrund ist das Bahnsteigdach sichtbar.....	46
Abbildung 36: Teilszenarien A bis D für Nachbearbeiten (Satellitenbild: Google Maps) ...	54
Abbildung 37: Darstellung ausgewerteter Daten zweier Messepochen für die Szenarien A und B mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten	55
Abbildung 38: Darstellung ausgewerteter Daten einer Messepoche für die Szenarien A und B mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten auf Basis der Widelane-Kombination	56
Abbildung 39: Positionen mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten für Messepoche „10-46 Teil1“ (Satellitenbild: Google Maps)	57
Abbildung 40: Positionen mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten für Messepoche „10-46 Teil2“ (Satellitenbild: Google Maps)	58
Abbildung 41: Positionen mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten für Messepoche „11-11“ (Satellitenbild: Google Maps)	58

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in Längsrichtung der Gleisachse.....	49
Tabelle 2: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim schnellen Verlassen des Warnbereichs quer zur Gleisachse	50
Tabelle 3: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in einem Winkel von annähernd 45° zur Gleisachse	51
Tabelle 4: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in einem Winkel von annähernd 45° zur Gleisachse	52
Tabelle 5: Geschwindigkeiten und Eindringtiefen beim Verlassen des Warnbereichs in einem Winkel von annähernd 45° zur Gleisachse	52
Tabelle 6: Parameter und Koordinatenqualität für stationäre Messungen	56
Tabelle 7: Parameter und Koordinatenqualität für kinematische Messungen	57

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Novatel, „GPGGA, GPS fix data and undulation,“ 2018. [Online]. Available: <https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/GPGGA.htm>. [Zugriff am 01 2019].
- [2] US Department of Defense, GPS SPS Performance Standard, Washington DC, 2008.
- [3] K. Marzahn, „Statistische Methoden im Vermessungswesen,“ *Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV) no. 12*, pp. 512-522, 1970.
- [4] „Leica Geosystems,“ [Online]. Available: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/software/leica-infinity>. [Zugriff am 07 2018].
- [5] „RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning,“ [Online]. Available: <http://www.rtklib.com/>. [Zugriff am 07 2018].
- [6] M. F. Glaner, Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von GPS und Galileo Signal-Linearkombinationen, Wien: Technische Universität Wien, 2017.
- [7] Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC), EN 50126: Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS), 1999.
- [8] Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC), EN 50128: Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme, 2011.
- [9] Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC), EN 50129: Bahnanwendungen - Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme - Sicherheitsrelevante elektronische Systeme für Signaltechnik, 2003.
- [10] M. Messerli, „SmartRail 4.0 auf dem Weg,“ [Online]. Available: http://watt.verkehr.bauing.tu-darmstadt.de/SRSS/Vortraege/SRSS_02_Messerli.pdf. [Zugriff am 11 2018].
- [11] Novatel, „AdVance RTK Competitive Analysis,“ [Online]. Available: https://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/AdVance_RTK_Competitive_Analysis.pdf. [Zugriff am 07 2018].
- [12] International Organization for Standardization (ISO), ISO 19157: Geographic Information - Data Quality, 2013.
- [13] C. Rost und L. Wanninger, „Carrier phase multipath corrections based on GNSS signal quality measurements,“ *Journal of Applied Geodesy* 3, pp. 1-8, 2009.
- [14] J. Marais, A.-B. Toma, P. Gurnik, F. Rispoli und J. Beugin, „State of the art of EGNSS projects for the rail applications (STARS Project),“ 2017.