
DIPLOMARBEIT

Zuglokalisierung im alpinen Raum unter Anwendung des Galileo High Accuracy Service

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Geodäsie und Geoinformation

eingereicht von

Gerald Bauer BSc

Matrikelnummer 01304857

ausgeführt im Forschungsbereich Höhere Geodäsie
der Fakultät für Mathematik und Geoinformation
der Technischen Universität Wien

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber

Wien, im August 2023

(Unterschrift Verfasser)

(Unterschrift Betreuer)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Im Sinne der Sicherheit, Planbarkeit und Kundenorientierung ist es für ein Eisenbahnunternehmen unerlässlich die Standorte seiner Triebfahrzeuge detailliert zu kennen und zu verfolgen. Die ÖBB Infrastruktur, als größtes Eisenbahninfrastrukturunternehmen Österreichs, setzen hierfür bereits heute, neben terrestrischen Methoden, auch GNSS-Verfahren ein. Im Rahmen des Projektes Greenlight wird die Zuglokalisierung durch das differenzielle Messverfahren RTK unterstützt. Nicht zuletzt deswegen ist die ÖBB Infrastruktur Teil und Mitgründer des größten privaten österreichischen RTK-Netzbetreibers EPOSA.

RTK-Messungen liefern hochpräzise Echtzeit-Positionsdaten, haben jedoch den Nachteil, dass das Betreiben eines solchen Referenznetzes Computer-, Netzwerk- und GNSS-Hardwareressourcen voraussetzt. Darüber hinaus decken diese Netze zu meist nur das Gebiet innerhalb der Landesgrenzen ab.

Mit der Methode der präzisen Einzelpunktbestimmung (PPP) können Referenznetze und deren Unannehmlichkeiten weitgehend außer Acht gelassen werden, sofern man gewisse Einschränkungen in der Positionierungsgenauigkeit und zeitlichen Verfügbarkeit hinnehmen kann. Für die Anwendbarkeit des PPP werden jedoch präzise Informationen über Satellitenuhren- und Bahnfehler, aber auch andere Abweichungen benötigt.

Am 24. Jänner 2023 wurde Phase 1 des Galileo High Accuracy Services (HAS) gestartet. Dieser ist in der Lage die benötigten Korrekturen direkt über das Satellitensignal zu übermitteln, wobei für die generelle Durchführbarkeit mindestens 1 und für die rasche Durchführbarkeit mindestens 4 das HAS-Signal aussendende Galileo-Satelliten sichtbar sein müssen.

Im Zuge dieser Arbeit werden mittels Multi-GNSS-1-Frequenzbeobachtungen (GPS und Glonass) von auf Triebfahrzeugen fixierten u-blox Empfängern und Simulationen des GIPSIE Signalsimulators potenzielle Sichtbarkeiten von Galileo-Satelliten auf topographisch anspruchsvollen Strecken analysiert.

Des Weiteren werden am Ende der Arbeit PPP-Lösungen basierend auf u-blox Beobachtungen hinsichtlich ihrer erzielten Genauigkeiten bzw. Abweichungen bei der Zuglokalisierung untersucht.

Abstract

In terms of safety, planning and customer orientation, it is essential for a railroad company to know and track the locations of its traction units in detail. Austria's largest railroad infrastructure company ÖBB Infrastruktur already uses GNSS methods for this purpose in addition to terrestrial methods. Within the scope of the Greenlight project, train localization is supported by the differential GNSS method RTK. This is one of the reasons why ÖBB Infrastruktur is part of and co-founder of the largest private Austrian RTK network operator EPOSA.

RTK measurements provide highly accurate real-time position data, but have the disadvantage that operating such a reference network requires computer, network and GNSS hardware resources. In addition, these networks mostly cover only the area within national boundaries.

On the other hand, taking advantage of the GNSS Precise Point Positioning (PPP) technique, reference networks and their inconveniences can be largely disregarded, provided that one can accept certain limitations in positioning accuracy and temporal availability. However, precise information on satellite clock and orbit errors, as well as other deviations, is needed for PPP applicability.

Phase 1 of the Galileo High Accuracy Service (HAS) was launched on January 24, 2023. This service is able to transmit the required corrections directly via the satellite signal. For general feasibility, at least 1 and for rapid feasibility at least 4 Galileo satellites transmitting the HAS signal must be visible.

In the course of this work, multi-GNSS-1 frequency observations (GPS and Glonass) of u-blox receivers fixed on traction units and simulations of the GIPSIE signal simulator are used to analyze potential visibility of Galileo satellites on topographically challenging routes.

Furthermore, at the end of the thesis, PPP solutions based on u-blox observations will be investigated with respect to their achieved deviations in train localization.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Die österreichische Eisenbahn	8
1.1.1	Internationaler Vergleich	11
1.1.2	Fahrgastzahlen	12
1.1.3	Tunnelprojekte	12
1.1.4	Sicherheit - ETCS	14
1.2	Motivation	15
1.3	Gliederung	16
2	Grundlagen	17
2.1	Greenlight	17
2.2	Punktbestimmung	20
3	Globale Satellitennavigationsdienste	23
3.1	Signale	24
3.2	Grundprinzip (Codestreckenmessung)	26
3.3	Fehlerquellen	28
3.3.1	Satellitenfehler	28
3.3.2	Signalausbreitungsfehler	29
3.3.3	Empfängerfehler	31
3.3.4	Gesamtfehlerhaushalt	31
3.3.5	Beobachtungsgleichung	32
3.4	Phasenmessung	33
3.5	Datenformate	34
3.6	Receiver	35
3.6.1	u-blox	35
3.6.2	Septentrio	36
4	Punktbestimmungsverfahren	37
4.1	Relative Punktbestimmung - DGNSS	37
4.2	RTK	38
4.2.1	Vernetztes RTK	39

4.2.2	Referenzstationsnetzbetreiber	41
4.3	Precise Point Positioning - PPP	43
5	High Accuracy Service	45
5.1	Entwicklung	45
5.2	Grundprinzip	47
6	GIPSIE RTX Signalsimulator	49
6.1	Signalsimulator	49
6.2	Signalgenerator	52
6.3	RTX Mode	52
7	Datenaufbereitung	53
7.1	Referenzstrecken	53
7.1.1	Tirol	53
7.1.2	Steiermark	55
7.2	Streckenbeobachtungen	56
7.2.1	Szenario I: Gesamtstrecke	58
7.2.2	Szenario II: Teilstrecken	60
7.2.3	Szenario III: Segmentierung	64
7.3	Signalsimulation	70
8	Visibilitätsanalyse	72
8.1	Tirol	72
8.1.1	Szenario I: Gesamtstrecke	72
8.1.2	Szenario II: Teilstrecken	80
8.1.3	Szenario III: Segmentierung	82
8.2	Steiermark	87
8.2.1	Charakteristika	88
8.2.2	Korrelation	91
8.2.3	Fahrtrichtung	93
9	Praxistauglichkeit	96
10	Feldversuch	104

11 Zusammenfassung und Ausblick	109
Abkürzungsverzeichnis	112
Abbildungsverzeichnis	117
Tabellenverzeichnis	118
Literaturverzeichnis	122

1 Einleitung

1.1 Die österreichische Eisenbahn

Um die Prozesse der Zuglokalisierung in Österreich analysieren zu können, ist es notwendig einen Einblick in die technische, zeitliche, aber auch organisatorische Beschaffenheit der österreichischen Eisenbahnen zu bekommen.

Entsprechend dem Jahresbericht der Schienen Control [2021] besitzt das österreichische Schienennetz im Jahr 2021 eine Gesamtlänge von 5646 Kilometern, wobei etwa 95% auf Normalspurbahnen (Spurweite 1435 mm \cong 4 Fuß 8.5 Zoll) entfallen. Der Rest sind Schmalspurbahnen mit Spurweiten von 760 oder 1000 Millimetern. Dabei gelten Haupt- und Nebenbahnen, touristisch genutzten Bahnen, U- und Straßenbahnen zu den öffentlichen Eisenbahnen gemäß Eisenbahngesetz. Das kleinste Streckennetz besitzt das Bundesland Vorarlberg mit 121 km, das größte Netz Niederösterreich mit 1746 km.

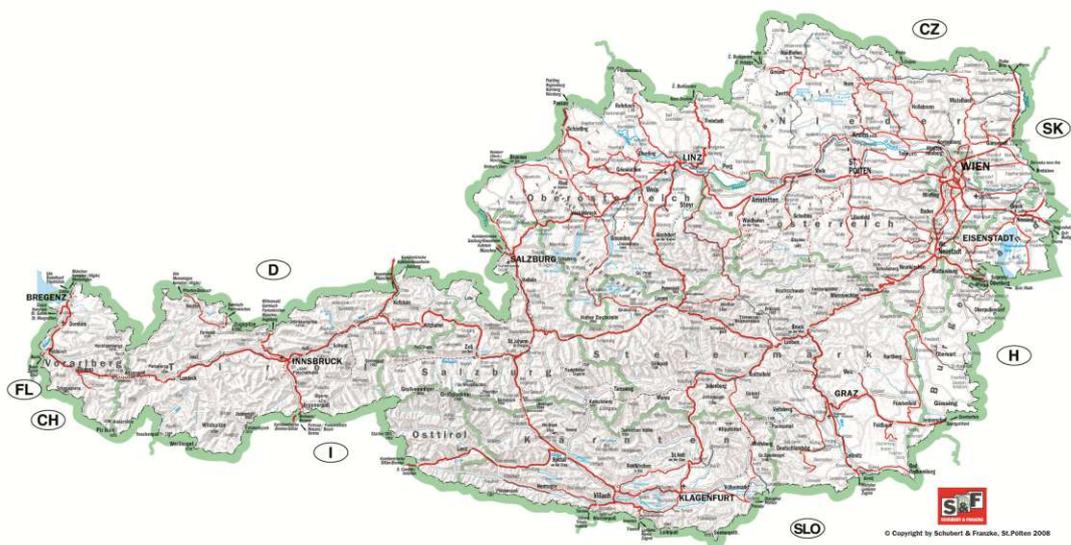


Abbildung 1.1: Österreichisches Eisenbahnnetz, [Erlebnis Bahn und Schiff Österreich, 2021]

Aufgrund der gebirgigen Topographie Österreichs ist das Eisenbahnnetz von Tunneln durchzogen: Insgesamt 251 Bahntunnel mit einer Gesamtlänge von 226 Kilometern gibt es auf dem Streckennetz der staatlichen ÖBB Infrastruktur [ÖBB Infrastruktur AG, 2020].

Rund drei Viertel aller Eisenbahnstrecken sind heute elektrifiziert, wobei Vorarlberg mit einer Quote von 100% Spitzenreiter ist, gefolgt von Wien mit einer Elektrifizierungsquote von 98%. Schlusslicht ist hier die Steiermark mit knapp 60%. Während die meisten Strecken in Österreich mit 16 2/3 Hz bei 15kV elektrifiziert sind, sticht das Burgenland mit einer hohen *anderweitigen* Elektrifizierungsquote hervor. Das liegt daran, dass die Strecken der Raaberbahn und der Neusiedler Seebahn durch die grenzüberschreitenden Streckenführungen mit Ungarn an dessen Netz angepasst sind und mit 50 Hz bei 25 kV betrieben werden [Schienen Control, 2021].

Im Jahr 2021 gibt es in Österreich 81 Eisenbahnunternehmen, die sich in 62 Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU, z.B. ÖBB-Personenverkehr AG), 8 Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU, z.B. ÖBB-Infrastruktur AG) und 11 integrierte Eisenbahnunternehmen (IntEU, z.B. Raaberbahn) unterteilen lassen.

Die ersten beiden beziehen sich dabei auf das Erbringen von Eisenbahnverkehrsleistungen (EVU) bzw. dem Bau und dem Betrieb (EIU) auf Hauptbahnen und vernetzten Nebenbahnen. Letztere (IntEU) sind sowohl als EVU und EIU tätig, beziehen sich aber i.d.R. *auch* auf nicht vernetzte öffentliche Eisenbahninfrastruktur.

Durch gewisse Ausschlussgründe (fehlende Sicherheitsbescheinigung, fehlender Infrastruktur-Nutzungsvertrag) gibt es Ende 2021 in Summe 62 Unternehmen (EVUs und IntEUs), die über die Berechtigung verfügen Züge im Netz der ÖBB zu führen.

Um auch die letzte Meile auf nicht elektrifizierten Strecken ohne Lokomotivwechsel absolvieren zu können, werden vermehrt Hybridlokomotiven herangezogen. Gab es 2017 erst 5 Hybridlokomotiven in Österreich, so sind es 2021 bereits 24 Stück. Generell kann über diesen Zeitraum ein Rückgang an dieselbetriebenen und elektrischen einsystembetriebenen Triebwägen und Lokomotiven beobachtet werden, während die Zahl der elektrischen Mehrsystemtrieb- und -lokomotiven stark zugenommen hat. Die Zahl aller Triebfahrzeuge erhöhte sich in diesem Zeitraum auf in Summe 2175 Stück.

Eisenbahnunternehmen in Österreich	
Eisenbahnverkehrsunternehmen	62
Eisenbahninfrastrukturunternehmen	8
integrierte Eisenbahnunternehmen	11
Σ Eisenbahnunternehmen	81
- davon ÖBB-Netz Nutzungsberechtigte	62
Streckennetz	
Normalspur	5339 km
- davon elektrifiziert	3738 km
Schmalspur	307 km
- davon elektrifiziert	112 km
Gesamtlänge	5646 km
- davon elektrifiziert	3850 km
Triebfahrzeuge	
Lokomotiven	1361
- davon Diesel	352
Triebwagen	725
- davon Diesel	197
Triebzüge	89
- davon Diesel	-
Σ Triebfahrzeuge	2175
International	
Grenzübergänge	28
- davon elektrifiziert	23

Tabelle 1: Auszug aus dem Jahresbericht 2021 der Schienen Control [2021]

Die wichtigsten Eckdaten des österreichischen Eisenbahnwesens sind in obiger Tabelle 1 angeführt. Für tiefergehende Informationen wird ein Blick in die Jahresabschlussberichte der österreichischen Regulierungsbehörde Schienen Control [2021], sowie in die Marktberichte des europäischen Regulatoren-Dachverbandes IRG-Rail [2022] empfohlen.

ÖBB Infrastruktur



Das mit Abstand größte Eisenbahninfrastrukturunternehmen Österreichs ist die ÖBB Infrastruktur AG. Für einen kurzen Überblick seien in untenstehender Tabelle ein paar Eckdaten dazu angeführt:

ÖBB Zahlen, Daten, Fakten	
4871	km Streckennetz
13258	Weichen
25398	Signale
1038	Bahnhöfe und Haltestellen
6605	Brücken
251	Tunnel
3035	Eisenbahnkreuzungen
9	Wasserkraftwerke

Tabelle 2: Zahlen-Daten-Fakten der ÖBB Infrastruktur AG [2021b]



1.1.1 Internationaler Vergleich

Trotz massiven pandemiebedingten Rückganges (-45%) konnte Österreich 2020, gemäß dem 10. Marktbeobachtungsbericht des Regulatoren-Dachverbandes IRG-Rail [2022], den ersten Platz bei den zurückgelegten Bahnkilometern pro Einwohner (832 km) innerhalb der Europäischen Union verteidigen - 2019 waren es noch 1507 zurückgelegte Kilometer. Auch gesamt-europaweit behält Österreich seinen Spitzenplatz und wird erneut nur von der Schweiz (1539 km) überboten. Zum Vergleich: Auch die Schweiz hatte im Jahr 2019 noch 2526 zurückgelegte Kilometer pro Einwohner und somit 2020 einen Rückgang von beinahe 40 Prozent zu verzeichnen [IRG-Rail, 2022].



1.1.2 Fahrgastzahlen

Durch die Einführung des Klimatickets im Oktober 2021 ist jedenfalls mit einer weiteren Erhöhung der Fahrgastzahlen zu rechnen. Verkauften sich bis Ende des Einführungsjahres 2021 bereits 130 000 Klimatickets, so erwarben mit Ende 2022 sogar 208 000 Personen ein österreichweites Klimaticket [BMK, 2022].

1.1.3 Tunnelprojekte

Infrastrukturseitig ist insbesondere durch die 3 Tunnelprojekte Koralmtunnel (KAT), Semmeringbasistunnel (SBT) und Brennerbasistunnel (BBT) mit weitreichenden Entwicklungen zu rechnen.

Koralmtunnel: Durch den KAT soll die Strecke zwischen den beiden Landeshauptstädten Graz und Klagenfurt ab 2025 innerhalb von 45 Minuten passiert werden können (derzeit 3 Stunden mit dem Railjet bzw. 2 Stunden mit dem Intercitybus). Die Strecke Wien-Klagenfurt würde mit dem KAT nur noch 3h20min dauern (derzeit etwa 4 Stunden). Sofern die globalen Lieferengpässe überwunden bleiben, dürften die Zielvorgaben der Fertigstellung im Jahr 2025 durchaus eingehalten werden [ÖBB Infrastruktur AG, 2021a], [ÖBB Infrastruktur AG, 2023c].

Semmeringbasistunnel: Im Gegensatz zum geologisch einfacheren KAT, lässt der SBT durch seine besondere Geologie mit zahlreichen Verzögerungen aufwarten. Nach mehreren Verzögerungen liegt der derzeitige Plan bei einer Inbetriebnahme im Jahr 2030. Die Fahrtzeit Wien-Klagenfurt soll sich dann um weitere 40min auf 2h40min reduzieren [ÖBB Infrastruktur AG, 2021a], [ÖBB Infrastruktur AG, 2023e].

Brennerbasistunnel: Von besonderer internationaler Relevanz für die Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene und dadurch auch die lokale Bevölkerung Tirols (Stichwort: Brennerautobahn-Europabrücke) ist das dritte große Tunnelprojekt BBT als Teil des rund 9.400 Kilometer langen Skandinavien-Mittelmeer Korridors. Bei Addition der unterirdischen Umfahrung Innsbrucks kann der BBT sogar als längste unterirdische Eisenbahnverbindung der Welt, mit einer Gesamtlänge von 64 Kilometern, bezeichnet werden. Der Haupttunnel hat dabei eine Länge von 55 Kilometern [ÖBB Infrastruktur AG, 2023a].

Eine vollständige Inbetriebnahme des Korridors liegt mit Stand heute noch in weiter Ferne. Selbst wenn es zu keinen weiteren Verspätungen mehr auf österreichisch-italienischer Seite kommen sollte, dürfte die Errichtung des Brenner-Nordzulaufs viele Jahre bis sogar Jahrzehnte länger, als die Fertigstellung des BBT selbst dauern. Aufgrund steter Veränderungen der trinationalen Rahmenbedingungen wird empfohlen, sich an aktuellen Medienberichten zu orientieren.

1.1.4 Sicherheit - ETCS

Das europäische Zugbeeinflussungssystem (European Train Control System, ETCS) bildet zusammen mit dem Zugfunk-System GSM-R und Teilen des Regelwerkes Technische Spezifikationen für Interoperabilität (TSI) das europäische Eisenbahnverkehrsleitsystem (European Rail Traffic Management System, ERTMS). Hauptziel ist dabei die Standardisierung des Zugverkehrs und Schaffung von Interoperabilität zwischen den einzelnen nationalen Bahninfrastrukturen, um einen reibungslosen internationalen Zugsverkehr zu ermöglichen und die Liberalisierung der Bahn voranzutreiben [ÖBB Infrastruktur AG, 2023b].

ETCS beschreibt dabei die Kommunikation zwischen Strecke und Triebfahrzeug, um zu wissen wann ein TFZ mit welcher Geschwindigkeit wo unterwegs ist. Während bei ETCS 1 die Kommunikationsverbindung noch unterbrochen sein kann, bleibt bei ETCS 2 die Verbindung zwischen TFZ und ETCS-Zentrale ununterbrochen aufrecht.

Bis 2030 sollen unter anderem die Wiener Schnellbahn-Stammstrecke zwischen Meidling und Floridsdorf, die Pottendorfer Linie, auf der Weststrecke der Abschnitt von St. Pölten bis Attnang-Puchheim, auf der Südbahn der Abschnitt Wien-Bruck/Mur-Spielfeld Straß, sowie die Neubaus Strecke der Koralmbahn mit ETCS2 ausgestattet sein (vgl. Abb. 1.2).

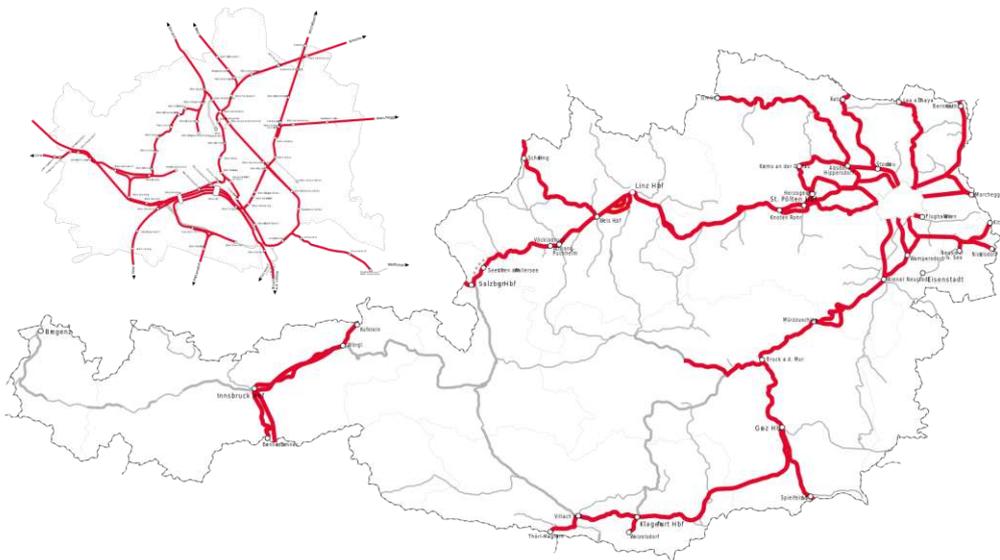


Abbildung 1.2: ETCS Ausbauplan bis 2030, [ÖBB Infrastruktur AG, 2023b]

1.2 Motivation

Für den reibungslosen Ablauf des Bahnverkehrs, unter anderem aus Aspekten der Sicherheit und der Trassenverdichtung, ist Kenntnis der jeweils aktuellen Positionen der Triebfahrzeuge (TFZ) essenziell, sind doch auch Geschwindigkeiten jenseits der 200 km/h keine Seltenheit mehr.

Bereits heute kommt für die TFZ-Lokalisierung neben terrestrischen Sensoren mitunter GNSS zum Einsatz. Ein aus Sicht der Satellitennavigation interessantes Projekt der ÖBB-Infrastruktur ist *Greenlight*, welches die TFZ-Lokalisierung durch Anwendung des präzisen relativen Positionsbestimmungsverfahrens *Real Time Kinematic* (RTK) unterstützt und im Rahmen dieser Arbeit noch näher beschrieben wird.

Der Betrieb von RTK-Referenznetzen ist aufwändig und deckt in der Regel nur ein regionales Gebiet ab. Zum Beispiel beschränken sich die beiden österreichweit agierenden Referenznetzbetreiber EPOSA und APOS auf das Bundesgebiet. Aus ökonomischer Sicht und sofern es die Anforderungen an Genauigkeit und Latenz erlauben ist es daher sinnvoll, insbesondere im internationalen Bahnverkehr, ein Verfahren anzuwenden, welches das Betreiben eines solchen Netzes nicht zentral benötigt und auch grenzüberschreitende Gültigkeit besitzt.

Der neu verfügbare Galileo High Accuracy Service (HAS) bietet die Möglichkeit, mittels des absoluten Positionsbestimmungsverfahrens der präzisen Einzelpunktbestimmung (PPP), horizontale Genauigkeiten von 20 Zentimetern zu erreichen, wobei hier weder auf ein terrestrisches Netz zurückgegriffen, noch Rücksicht auf Landesgrenzen genommen werden muss.

Für den Einsatz des HAS muss zumindest ein das HAS-Signal aussendender Satellit sichtbar sein. Für eine rasche Anwendung des HAS benötigt man sogar 4 Satelliten, wobei diesbezüglich aufgrund der besonders gebirgigen Topographie Österreichs mit Einschränkungen zu rechnen ist. Deswegen wird mittels einer Sichtbarkeitsanalyse im Rahmen dieser Arbeit untersucht, ob die grundsätzliche Anwendbarkeit des Galileo HAS auf das österreichische Schienennetz überhaupt gegeben sei.

1.3 Gliederung

Zu Beginn dieser Arbeit wird in Kapitel 2 das bestehende ÖBB-Projekt Greenlight und somit die derzeitige Rolle von GNSS in der TFZ-Lokalisierung beleuchtet. Weiters werden hier grundsätzliche Formvorschriften bei der Punktbestimmung präsentiert. In Kapitel 3 werden die Grundlagen globaler Satellitennavigationsysteme, inklusive mathematischer Modelle bei der Code- und Phasenmessung erläutert. In diesem Kontext werden auch potenzielle Fehlerquellen und deren Auswirkungen angeführt. Darauf folgend werden in Kapitel 4 relative und absolute Punktbestimmungsverfahren, deren Grundkonzepte, Vorzüge und Nachteile beschrieben, um in Kapitel 5 den Fokus auf den neuen Galileo High Accuracy Service zu legen. In Kapitel 6 wird mit dem GIPSIE Signalsimulator der Firma OHB ein Device präsentiert, welches Simulation von Satellitensignalen und Receiverpositionen ermöglicht. Kapitel 7 liefert die Verfahren zur Datenaufbereitung für die in Kapitel 8 durchgeführte Visibilitätsanalyse. In Kapitel 9 werden die erzielten Genauigkeiten der PPP-Lösungen evaluiert. Mit einem Feldversuch in Kapitel 10 wird untersucht, wie sich die Fahrtrichtung auf den Empfang von Galileo-Satelliten auswirkt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse, sowie einen Ausblick auf die Anwendbarkeit des HAS für die österreichische Eisenbahn schließen die Arbeit ab.

2 Grundlagen

2.1 Greenlight

Das Projekt Greenlight wird vom österreichischen EIU *ÖBB-Infrastruktur AG* betrieben und verfolgt unter anderem das Ziel der präzisen und sicheren Positionserfassung von Triebfahrzeugen (TFZ) mittels GNSS, der Zughalt- und Zugabfahrterkennung, aber auch des Detektierens von Energieeinsparmöglichkeiten.

Der folgende Abschnitt basiert weitestgehend auf einer annuellen, laufend adaptierten Präsentation von DI(FH) Manfred Stättner innerhalb der Vorlesungsreihe der Lehrveranstaltung Navigation an der TU Wien (Stand WS2022/23, vgl. TISS, [Stättner, 2022]).

Die in das Projekt integrierten TFZ sind mit einer GNSS-L1-Antenne und einer Energiezählerbox, der sogenannten *railpower box* (vgl. Abbildung 2.1) ausgestattet. Die wichtigsten Komponenten sind der Antennenanschluss, ein u-blox Chip 8p, eine SIM-Karte zur Datenübermittlung via GSM, sowie die Energiemessfunktion (EMF), welche unter anderem im Postprocessing Möglichkeiten des Energieeinsparens aufzeigt und somit wirtschaftlich und im Sinne der Nachhaltigkeit Mehrwert schafft [ÖBB Infrastruktur AG, 2023d].

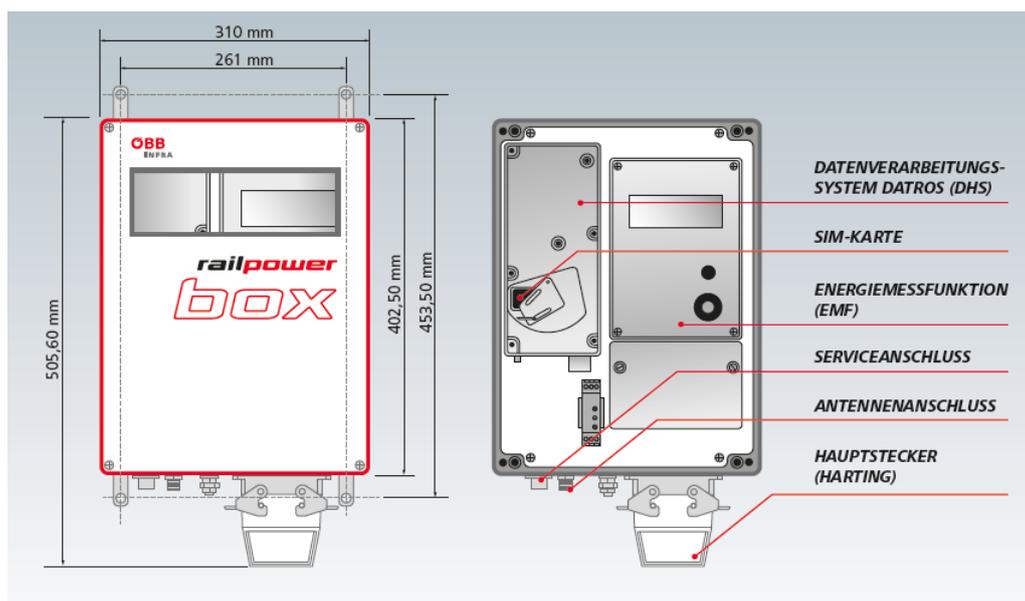


Abbildung 2.1: ÖBB railpower box [ÖBB Infrastruktur AG, 2023d]

Workflow: Die vom GNSS - Empfänger empfangenen genäherten Positionsdaten werden via GSM an die TEPOS-Zentrale (T-Kom Services Echtzeitpositionierung) übermittelt, welche aufgrund eines dahinter stehenden Netzes von Referenzstationen Korrekturdaten berechnen kann [Stättner, 2007]. Diese Korrekturdaten werden sodann im RTCM-Format via GSM dem Empfänger zugänglich gemacht, wodurch dieser seine Position auf ca. 30cm Genauigkeit bestimmen kann (vgl. Abschnitt 4.2). Dieses Genauigkeitsmaß ist notwendig, um eine GNSS-basierte gleisgenaue Zugortung zu ermöglichen und evtl. Gleiskonflikte zu detektieren. Die Verknüpfung von Gleisnetz mit den präzisen Positionsdaten erfolgt im sogenannten Greenlight Gateway [Stättner, 2022].

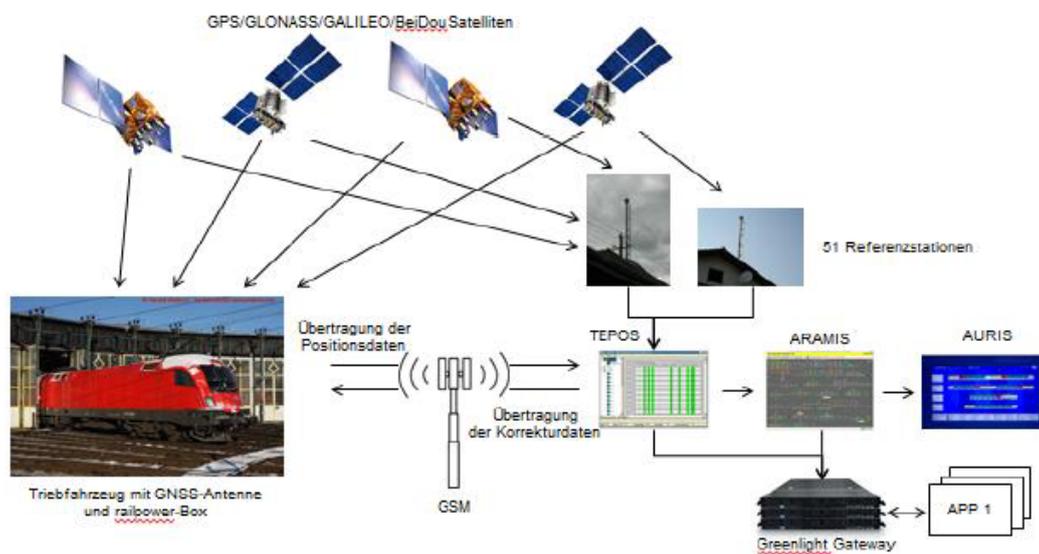


Abbildung 2.2: Greenlight Workflow - aus Präsentation Stättner [2022]

Die präzisen Informationsdaten werden von der TEPOS-Zentrale an ARAMIS (Advanced Railway Automation Management Information System) weitergeleitet. ARAMIS bietet die Möglichkeit des Verknüpfens von TFZ-Positionsdaten, Stellwerksinformationen, Fahrplänen, Signalen, Zugstammdaten, Plangleisen etc.

Das System AURIS (Automatisches Reisenden Informations System) bezieht die von ihm benötigten Informationen aus ARAMIS und bereitet diese dem Fahrgast benutzerfreundlich zum Beispiel mittels Bahnsteiganzeigen und Bahnsteigdurchsagen auf [Nieschlag, 2013].

Für das Bahnunternehmen bieten sich jedoch auch noch andere Anwendungsmöglichkeiten. So kann durch die präzisen TEPOS-TFZ-Positionsdaten auch eine Anfahrtserkennung durchgeführt

werden. Nach Rückfrage an ARAMIS kann festgestellt werden, ob ein Signal in Haltstellung überfahren wurde und mittels APP1 eine Warnung an das Tzfz-Tablet (TIM) ausgesandt werden. Die ÖBB versprechen sich davon eine Reduktion an Signalüberfahrungen um 60%.

Abgesehen von den Echtzeitinformationen lassen sich auch retrospektive (*Greenlight Replay*) und langfristige Erkenntnisse gewinnen, so zum Beispiel die Häufigkeit von Gleisnutzungen und daraus ableitbare Wartungsintervalle oder auch zusammen mit der EMF Empfehlungen zum energieeffizienten und ressourcenschonenden Fahren [Stättner, 2022].

2.2 Punktbestimmung

Um die unterschiedlichen Navigationsverfahren nachfolgend zu erläutern, müssen noch einige grundlegende Prinzipien der Punktbestimmung definiert werden. Eine Menge von Punkten, die gemeinsame Eigenschaften aufweisen, wie zum Beispiel den selben Abstand zu einem weiteren Punkt, heißen geometrische Örter und können durch Kurven in der Ebene oder auch Flächen im Raum dargestellt werden.

In der Vermessungstechnik erfolgt die Punktbestimmung durch Berechnung des Schnittpunktes mehrerer geometrischer Örter, welche durch die Wahl der Beobachtungsgrößen (vgl. Tabelle 3) festgelegt sind.

Ausgangspunkt	Beobachtungsgröße	Geometrischer Ort
bekannter Punkt	Winkel (orientierte Richtung)	Gerade
Neupunkt	Winkel	Peripheriekreis
bekannter Punkt	Strecke	Kreis
Neupunkt	Streckendifferenz (im Neupunkt)	Hyperbel

Tabelle 3: Geometrische Örter in der Ebene

In der terrestrischen Vermessung ist dabei eine Kombination unterschiedlicher Beobachtungsgrößen möglich, zulässig und üblich. In Bezugnahme auf die Satellitennavigation werden in Folge Szenarien der Punktbestimmung durch Streckenmessung erläutert.

Punktbestimmung in der Ebene: Eine Distanzmessung zu einem unbekanntem Neupunkt legt als geometrischen Ort einen Kreis fest, dessen Mittelpunkt der Standpunkt ist. Über die Position des Neupunktes ist dabei nur bekannt, dass dieser sich auf dem Kreis befindet. Der Neupunkt ist somit noch nicht eindeutig bestimmt. Eine weitere Distanzmessung an einem anderen Standpunkt definiert einen zweiten Kreis. Schneidet man die beiden Kreise miteinander, erhält man zwei Schnittpunkte und es herrscht noch immer keine Eindeutigkeit. Erst mit einer dritten Beobachtung an einem weiteren Standpunkt ist die Position des Neupunktes eindeutig bestimmbar (vgl. Abb. 2.3).

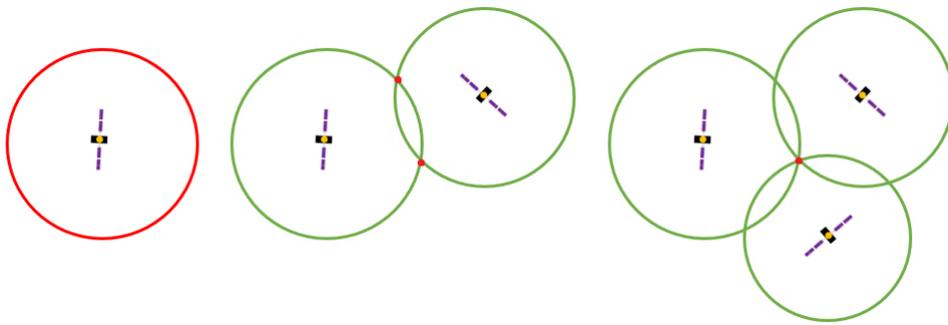


Abbildung 2.3: Positionsbestimmung durch Distanzmessung in der Ebene

Punktbestimmung im Raum: Durch die zusätzliche Dimension entspricht der geometrische Ort bei Distanzmessung im Raum einer Kugelschale. Der Vorgang läuft analog zur Punktbestimmung in der Ebene durch die Bestimmung von Schnittpunkten. Schneidet man zwei Kugelschalen miteinander, erhält man eine Schnittkurve. Schneidet man diese mit einer dritten Kugelschale erhält man zwei potentielle Neupunkte und erst mit der vierten Beobachtung kann die Position den Neupunktes eindeutig bestimmt werden.

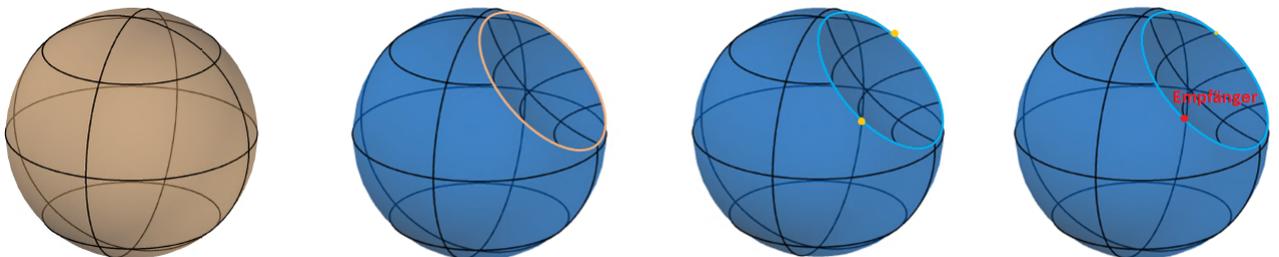


Abbildung 2.4: Positionsbestimmung durch Distanzmessung im Raum

Punktbestimmung in der Praxis: In der Vermessung sind Beobachtungen immer mit Unsicherheiten behaftet. So führen Abweichungen in der Distanzmessung dazu, dass der Schnittpunkt aus den Beobachtungen nicht mit dem tatsächlichen Standort übereinstimmt (vgl. Abb. 2.5). Diese Problematik besteht in Lage und Raum gleichermaßen und wird im Kontext der (Pseudo-)Streckenbeobachtungen in den Abschnitten 3.2 und 3.3 näher erläutert.

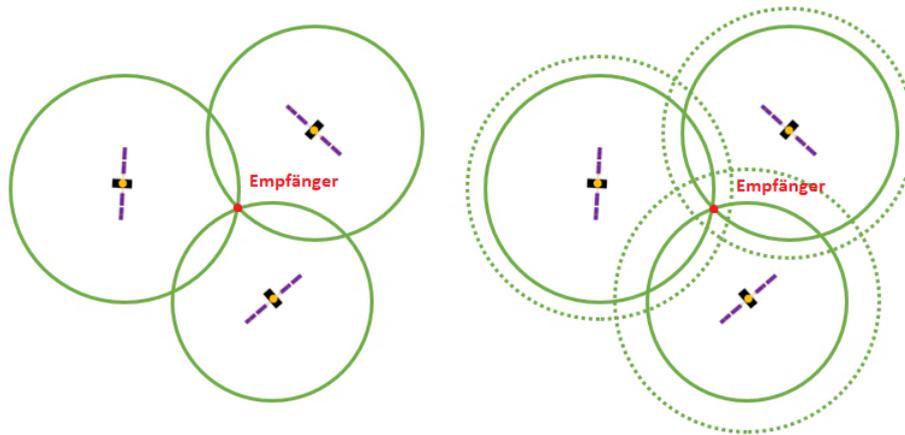


Abbildung 2.5: Unterschied fehlerfreier (links) und fehlerbehafteter (rechts) Beobachtungen

Dilution of Precision: Die Qualität der satellitenbasierten Punktbestimmung hängt weiters stark von der relativen Geometrie zwischen Empfänger und Satelliten ab. Eine schlechte Geometrie kann dabei zu einem *Schleifen* des Schnitts führen. Die Maßzahl für die Güte des Schnitts wird Dilution of Precision (DOP) genannt und geht in die Berechnung des Gesamtfehlerhaushaltes ein (Abschnitt 3.3.4). Die verschiedenen DOP-Faktoren sind in Tabelle 4 angeführt. Je höher die DOP-Zahl desto schlechter die Geometrie.

Abkürzung	Name	Beschreibung	Dimension
TDOP	Time Dilution of Precision	Zeit	1D
HDOP	Horizontal Dilution of Precision	Lage	1D
VDOP	Vertical Dilution of Precision	Höhe	2D
PDOP	Position Dilution of Precision	Position	3D
GDOP	Geometrical Dilution of Precision	Position und Zeit	4D

Tabelle 4: DOP - Faktoren

3 Globale Satellitennavigationsdienste

Zur Zeit gibt es neben den bereits aus dem Kalten Krieg bekannten globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) GPS (Global Positioning Service, USA) und GLONASS (Global Navigation Satellite System - Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, UDSSR später Russland) zwei weitere globale Systeme, nämlich das chinesische BEIDOU, sowie das europäische GALILEO. Unterstützt werden diese Systeme durch sogenannte Ergänzungssysteme SBAS (Satellite-based augmentation systems). Bekannteste Vertreter sind dabei das Amerikanische WAAS (Wide Area Augmentation System) und das europäische EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). Des Weiteren gibt es regionale Satellitennavigationssysteme, wie das indische IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) und das japanische QZSS (Quasi Zenith Satellite System), welche ebenfalls als Unterstützungssysteme, jedoch mit nationalem Hintergrund, betrachtet werden können.

Der Aufbau eines GNSS lässt sich am einfachsten durch 3 Komponenten beschreiben. Diese werden als Raum-, Kontroll- und Nutzersegment bezeichnet. Das Raumsegment besteht aus den Satelliten, die in einer gegen die Äquatorebene geneigten Bahnebene die Erde umlaufen. Das Kontrollsegment besteht aus einer Vielzahl an Bodenstationen, welche die Satelliten überwachen. Auch das Koordinatenreferenzsystem wird zum Kontrollsegment gezählt. Das Nutzersegment wiederum beschreibt die Ausrüstung des Vermessers und umfasst zumeist eine Antenne, sowie einen Empfänger mitsamt dazugehöriger Software.

Segment	Parameter	GPS	GLONASS	GALILEO
Raumsegment	Satelliten	32	26	22 (aktiv)
	Bahnebenen	6	3	3
	Inklination	55°	64.8°	56°
	Bahnhöhe	20200 km	19100 km	23260 km
	Umlaufzeit	11h 58min	11h 15.7min	14h 04min
Kontrollsegment	Koordinatensystem	WGS84	PZ-90-2	GTRF
	Monitoring Netzwerk	J	J	J
	Zeitsystem	GPST	GLONASST	GST
Nutzersegment	Receiver, Antenne, Software...			

Tabelle 5: GNSS Segmente

3.1 Signale

Von GPS werden 3 für die Vermessung relevante Trägerwellen ausgesendet, welche einem Vielfachen der Grundfrequenz $f_0=10.23\text{Hz}$ entsprechen.

Trägerwelle	Faktor	Frequenz	Wellenlänge
L1	154	1575.42 MHz	19.03 cm
L2	120	1227.60 MHz	24.42 cm
L5	115	1176.45 MHz	25.48 cm

Tabelle 6: GPS Signale

Die Identifikation des Satelliten läuft durch sogenanntes Pseudozufallsrauschen (Pseudo Random Noise, PRN). Ein vermeintlich zufälliger Code wird auf die Trägerphase aufmoduliert. Handelt es sich um einen freien Code, kann der selbe Code auch empfängerseitig erstellt werden. Mittels Autokorrelation kann der zeitliche Unterschied zwischen dem empfangenen und generierten Code bestimmt werden, wodurch die Signallaufzeit und in weiterer Folge die Entfernung zwischen Satellit und Empfänger bestimmt werden können. Bekanntester Vertreter der freien (zivilen) Codes ist der Coarse/Acquisition-Code (C/A-Code). Er besitzt eine Periode von 1023 Bits, sowie eine Übertragungsrate von 1.023 MBit/s. Es gibt weiters militärische Codes, die zivilen Nutzern nicht zu Verfügung stehen, wie die Precision-Codes P1(Y)-Code und P2(Y)-Code. Mittlerweile wurden die oben genannten Codes um die neueren zivilen Codes L1C, L2C und L5, sowie die neueren militärischen Codes L1M und L2M ergänzt. Über die dem Code aufmodulierte Navigationsnachricht erhält der Nutzer zusätzliche Informationen, wie Ephemeriden, GPST, PRNs, Almanach, ionosphärische Korrekturparameter und Uhrenparameter. Die Kombination aus Navigationsnachricht, Codes und Trägerwelle bilden das Signal.

Das europäische Galileo ähnelt GPS in diesen Belangen und besitzt sogar die gleiche Grundfrequenz f_0 . Als Besonderheit sei erwähnt, dass es sich bei GALILEO um das einzige GNSS ziviler Natur weltweit handelt. Das für diese Arbeit essenzielle HAS-Signal wird über die Trägerfrequenz E6, genauer E6-B ausgesendet.

Trägerwelle	Faktor	Frequenz	Wellenlänge
E1	154	1575.420 MHz	19.03 cm
E5a	115	1176.450 MHz	25.48 cm
E5b	118	1207.140 MHz	24.83 cm
E6	125	1278.750 MHz	23.44 cm

Tabelle 7: GALILEO Signale

Im Gegensatz zu den anderen beiden GNSS nutzt GLONASS zur Identifikation das FDMA-Verfahren (Frequency Division Multiple Access), wodurch das Signal eines jeden einzelnen GLONASS-Satelliten eine andere Frequenz aufweist. Seit 2014 wird jedoch im Sinne der Interoperabilität auch bei GLONASS eine Trägerwelle (L3) mit CDMA-Identifikation ausgesendet [GSSC, 2023b].

3.2 Grundprinzip (Codestreckenmessung)

Der folgende Abschnitt basiert weitgehend auf den Werken „GPS Theory and Practice“ von Hofmann-Wellenhof et al. [2001] und „Understanding GPS/GNSS Principles and Applications“ von Kaplan and Hegarty [2017].

Das Grundmodell der Positionsbestimmung mittels GNSS beruht auf dem Prinzip der Laufzeitmessungen und den daraus abgeleiteten geometrischen Distanzen ρ zwischen Empfänger und Satelliten. Dabei wird im Receiver eine Kopie des Satellitensignals generiert und mit dem empfangenen Satellitensignal (Code) korreliert. Durch Vergleich des Aussende- und Empfangzeitpunktes wird somit die Laufzeit berechnet. Der Index S bezieht sich nachfolgend auf die verschiedenen Satelliten, der Index R auf den Empfänger (Receiver).

$$\rho_R^S = c\Delta t_R^S = c(t_R - t^S) \quad (3.1)$$

Unter Annahme synchronisierter Zeitsysteme und einer Signalausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit entlang des gesamten Signalweges entspricht der zurückgelegte Weg eines Signals ρ_R^S (3.1) dem Produkt aus Lichtgeschwindigkeit und dem zeitlichen Abstand zwischen dem Aussenden und dem Empfang des Signals. Hierbei stehen die Parameter c für die Lichtgeschwindigkeit, Δt für die Ausbreitungsdauer und ρ_R^S für den dabei zurückgelegten Weg. Handelt es sich bei einer Beobachtungsgröße wie zum Beispiel ρ_R^S um eine Strecke, dann entspricht der geometrische Ort im Raum gemäß Abschnitt 2.2 einer Kugelschale (3.2).

$$\rho_R^S = |\mathbf{x}^S - \mathbf{x}_R| = \sqrt{(x^S - x_R)^2 + (y^S - y_R)^2 + (z^S - z_R)^2} \quad (3.2)$$

Gemäß 2.2 erhält man bei drei Beobachtungen im Raum und dem Schnitt der resultierenden Kugelschalen zwei Schnittpunkte und der Standpunkt ist geometrisch noch nicht eindeutig bestimmt. Auf der Erdoberfläche kann jedoch bei der Satellitennavigation stets vom näheren Schnittpunkt als Standpunkt ausgegangen werden, wodurch auch hier unter den theoretischen Idealbedingungen 3 Beobachtungen genügen [Kaplan and Hegarty, 2017].

Die Laufzeit ist in Gleichung (3.1) als Zeitspanne zwischen dem Senden und dem Empfan-

gen des Signals definiert. In der Theorie erfüllt das Bilden der Differenz von Eingangs- und Ausgangszeitpunkt diese Definition, in der Praxis sind jedoch Satelliten- und Empfängeruhren und somit auch die von diesen festgelegten Zeitpunkte fehlerbehaftet: Die Uhren laufen nicht synchron. Demzufolge muss sowohl dem Ausgangszeitpunkt am Satelliten t^S , als auch dem Eingangszeitpunkt am Empfänger t_R ein Fehlerterm δ hinzugefügt werden.

$$\Delta t_R^S + \Delta \delta_R^S = (t_R + \delta_R) - (t^S + \delta^S) \quad (3.3)$$

Ergänzt man nun die Ausgangsgleichung (3.1) um den Term des Uhrenfehlers $\Delta \delta_R^S$ erhält man nun die Beobachtungsgleichung für die Pseudostrecke r_R^S (3.4).

$$r_R^S = c(\Delta t_R^S + \Delta \delta_R^S) = \rho_R^S + c\Delta \delta_R^S \quad (3.4)$$

Gemäß 2.2 entsteht nun das Problem, dass die aus den Beobachtungen resultierenden geometrischen Örtler keinen gemeinsamen Schnittpunkt am Standort liefern können (vgl. Abb. 2.5). Das Problem lässt sich lösen, indem der Laufzeitfehler $\Delta \delta_R^S$ wieder in die Komponenten Satellitenuhrenfehler und Empfängeruhrfehler aufgeteilt wird.

$$\begin{aligned} r_R^S &= c(\Delta t_R^S + \Delta \delta_R^S) \\ &= \rho_R^S + c\Delta \delta_R^S \\ &= \rho_R^S + c\delta_R - c\delta^S \end{aligned} \quad (3.5)$$

Während der Empfängeruhrfehler δ_R zu einer Epoche für alle Beobachtungen gleich ist, variiert die Anzahl der Satellitenuhrenfehler δ^S gleichsam mit der Anzahl der Satelliten. Durch die Navigationsnachricht werden erste geschätzte polynomiale Satellitenuhrenkorrekturen übermittelt, empfängerseitig angebracht und in die Pseudostreckenberechnung einbezogen. Dabei verbleibt ein Restfehler, der *hier* zur Erklärung noch vernachlässigt sei. Für eine genauere Positionsbestimmung werden präzise Korrekturen benötigt, worauf noch in Abschnitt 4.3 näher eingegangen wird.

Fasst man nun die Gleichungen 3.2 und 3.5 zusammen, erhält man in jedem Standpunkt R eine Beobachtungsgleichung 3.6 mit 4 Unbekannten (3 Standpunktkoordinaten x_R, y_R, z_R und 1 Empfängeruhrfehler δ_R). Demzufolge ist pro Epoche und Standpunkt die Beobachtung zu jeweils mindestens 4 Satelliten notwendig, um das Gleichungssystem der Beobachtungsgleichungen lösen zu können [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

$$r_R^S = \sqrt{(x^S - x_R)^2 + (y^S - y_R)^2 + (z^S - z_R)^2} + c\delta_R \quad (3.6)$$

3.3 Fehlerquellen

Die im obigen Abschnitt beschriebene Beobachtungsgleichung genügt nur in einem stark vereinfachten Szenario der Signalausbreitung. Tatsächlich gibt es eine Vielzahl an nicht zu unterschätzenden Quellen, die Einfluss auf die Streckenbeobachtung nehmen. Ähnlich den Segmenten, können auch diese in drei Hauptgruppen eingeteilt werden.

3.3.1 Satellitenfehler

Zu dieser Kategorie gehören die *Ephemeridenfehler* und *Satellitenuhrenfehler*. Die Ephemeridenfehler beschreiben die Abweichungen der Satellitenkoordinaten zwischen tatsächlicher Position und übermittelter Ephemeriden in der Navigationsnachricht. Das Wirken einer falschen Position auf die Beobachtungsgleichung ist evident. Hauptursache für nur unzureichende Modellierung der Satellitenbahnen sind der Strahlungsdruck der Sonne, aber auch Gezeitenwirkungen durch die Schwerefelder von Mond und Sonne [Bauer, 2003].

Die Offsets zur GPS Time werden Uhrenfehler genannt und bewirken die Zuordnung von Koordinaten zu einem fehlerbehafteten Zeitpunkt. Die Satellitenuhren sind zwar fehlerbehaftet, besitzen aber bereits eine so hohe Genauigkeit, dass sogar *relativistische Effekte* berücksichtigt werden müssen. Möge die Frequenz eines Oszillators auf der Erdoberfläche 10.23 MHz betragen, erhöht sich diese um den Faktor $450 \cdot 10^{-12}$ in der GPS-Umlaufbahn. Diese Frequenzerhöhung bewirkt, dass die Satellitenuhr um $40 \mu s$ am Tage vorgeht. Um dem entgegen zu wirken, wird die Frequenz bereits auf der Erde auf 10.22999999545 MHz eingestellt, wodurch man im Orbit dem Sollwert sehr nahe kommt [Bauer, 2003] und [Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

3.3.2 Signalausbreitungsfehler

Die Signalausbreitung folgt dem Fermat'schen Prinzip, welches besagt, dass das Signal den Weg der höchsten Ausbreitungsgeschwindigkeit einschlägt (vgl. Gleichung 3.7).

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{c} \int_{P_1}^{P_2} n ds = \min \quad (3.7)$$

Der Brechungsindex n ist von der Frequenz des Signals und der Zusammensetzung des Mediums abhängig, da er das Verhältnis von Geschwindigkeit des Signals im Vakuum zur Geschwindigkeit im Medium beschreibt. In einem homogenen Medium ist der Brechungsindex konstant und der Ausbreitungsweg entspricht einer Geraden, wodurch das Signal zugleich den geometrisch kürzesten Weg einschlägt. Die Atmosphäre ist jedoch ein sehr inhomogenes Medium und verursacht so einen stark variierenden Brechungsindex. Dadurch verkommt der Ausbreitungsweg von einer Geraden zu einer Raumkurve, die nicht mehr dem geometrisch kürzesten Weg entspricht. Bei der Modellierung unterscheidet man innerhalb der Atmosphäre zwei Hauptgruppen, die Neutrosphäre, bestehend aus Troposphäre (Erdoberfläche bis $\sim 15\text{km}$), Stratosphäre ($\sim 15\text{km}$ bis 50km) und Mesosphäre (50km bis $\sim 80\text{km}$), sowie die Ionosphäre ($\sim 80\text{km}$ bis 1000km) [Bauer, 2003].

Innerhalb der Ionosphäre gibt es aufgrund der UV- und Röntgenstrahlung der Sonne einen sehr hohen Ionisierungsgrad, welcher in Abhängigkeit der Sonneneinstrahlung, und somit insbesondere zwischen Tag und Nacht, stark variiert. Ein wichtiger Parameter zur Berechnung des Laufzeitfehlers ist der Total Electron Content (TEC). Dieser beschreibt die Anzahl an freien Elektronen in einem gedachten Zylinder zwischen Sender und Empfänger mit einer Querschnittsfläche von 1 m^2 . Als Einheit fungieren TEC-Units, wobei 1 TECU 10^{16} Elektronen pro Quadratmeter entspricht. Der Terminus STEC (*slant TEC*) wird verwendet um zu unterstreichen, dass der gewählte Zylinder in der Verbindungslinie Satellit zu Empfänger liegt.

$$\Delta\rho_{ion}^{(gr)} = +\frac{40.3}{f^2} \cdot STEC \quad (3.8)$$

$$\Delta\rho_{ion}^{(ph)} = -\frac{40.3}{f^2} \cdot STEC \quad (3.9)$$

Bei der Signalausbreitung von Satellitensignalen im Mikrowellenbereich hängen die Laufzeitfehler erster Ordnung vom Elektronengehalt und der Frequenz ab und verhalten sich für Gruppen- und Phasengeschwindigkeit gegenläufig (vgl. Gleichung 3.8 bzw. 3.9). Somit entsprechen beim GPS-Signal L1 6.15 TECU, beim GPS-Signal L2 3.73 TECU bereits einer Abweichung von einem Meter [Böhm and Schuh, 2013].

Insgesamt können durch die Ionosphäre Streckenmessfehler von mehr als 50 Metern entstehen. Die Frequenzabhängigkeit zum Vorteil nutzend können aus Zwei- oder Mehrfrequenzmessungen durch Linearkombinationen ionosphärische Laufzeitkorrekturen gerechnet und der Fehler beinahe vollständig eliminiert werden. Für Einfrequenzmessungen können hingegen Modelle wie *NeQuick* oder *Klobuchar* genutzt werden. Bei mittlerer Breite ermöglicht die Anwendung des NeQuick G-Modells die Reduktion der ionosphärischen Abweichung um 70% und übertrifft damit das Klobuchar Modell, welches eine Fehlerreduktion um 50% ermöglicht [Hanna et al., 2023]. Die Parameter dieses Korrekturmodells können aus den Navigationsnachrichten des Satelliten entnommen werden [Kaplan and Hegarty, 2017].

Die beinahe vollständig elektronen- und ionenfreie Troposphäre verursacht bzgl. GNSS-Signalen frequenzunabhängige Laufzeitverzögerungen. Unkorrigiert führen die troposphärischen Einflüsse zu Abweichungen von ca. 2 Metern bei Satelliten im Zenit, bis sogar 25 Metern bei einer Elevation von nur 5°. Durch deren unterschiedliches Verhalten wird die Zusammensetzung der Troposphäre in einen feuchten (nicht-hydrostatischen) und einen hydrostatischen Anteil unterteilt. Der hydrostatische Effekt macht zwar 90% des Gesamteffektes aus, ist jedoch sehr leicht mit Hilfe des Drucks zu modellieren. Herausfordernder ist der feuchte Anteil, da der Wasserdampfgehalt räumlich und zeitlich stark variiert [Bauer, 2003]. Bekannte Modelle bei der Troposphärenkorrektur wie Saastamoinen und Hopfield seien hier nur kurz erwähnt. Für eine tiefgründigere Auseinandersetzung mit den atmosphärischen Einflüssen bzw. deren Korrektur wird auf die Literatur *Atmospheric Effects in Space Geodesy* von Böhm and Schuh [2013] verwiesen.

In bebautem Gebiet kann es zu Reflexionen und Signalbeugungen kommen. Signalbeugung tritt bei Sichtunterbrechungen zwischen Empfänger und Satelliten auf. Das Signal wird an einem Hindernis gebeugt und ist dadurch immer mit einer Verzögerung gegenüber dem echten Signal behaftet. Im Gegensatz dazu werden beim Mehrwegeeffekt (Multipath) sowohl die reflektierten (indirekten) Signale, als auch das direkte Signal empfangen. Dieser Mehrwegeeffekt führt zu einer Überlagerung der direkten und indirekten Signale, wodurch auch eine Frequenzabhängigkeit entsteht. Beide gemein haben, dass sie von der Umgebung abhängen und nicht durch relative Positionierungsverfahren (vgl. Kapitel 4.1) minimiert oder eliminiert werden können [Bauer, 2003]. Diese Effekte sind insbesondere auch im Eisenbahnwesen von nicht zu unterschätzender Relevanz. Bahnhöfe sind in der Regel in stark bebautem Gebiet vorzufinden und stellen auch selbst eine Quelle für Signalbeugungen und Signalreflexionen dar.

3.3.3 Empfängerfehler

Der theoretisch größte Fehler ist der Empfängeruhrfehler. Da man ihn jedoch als Unbekannte betrachtet, eliminiert man ihn mit einer zusätzlichen Beobachtung (siehe Gleichung 3.6). Die verbleibenden Empfängerfehler bestehen zum einen aus Messrauschen und zum anderen aus Hardwareverzögerungen. Während Messrauschen Zufallscharakter besitzt, handelt es sich bei der Hardwareverzögerung um einen systematischen Fehler [Bauer, 2003].

3.3.4 Gesamtfehlerhaushalt

Der mittlere Fehler der Positionsbestimmung auf Basis von in Echtzeit gemessenen Codestrecken kann als Produkt der Pseudostreckenfehler *User Equivalent Range Errors (UERE)* und der Satellitengeometrie *Geometrical Dilution of Precision (GDOP)* berechnet werden. Die Einzelfehlereinflüsse werden dabei generalisiert durch die Wurzel der Summe der (Abweichungs-)Quadrate der Restabweichungen (SQR) zu einem Gesamtfehler σ_{UERE} zusammengefasst, während die DOP-Werte die Güte der Geometrie beschreiben (Abschnitt 2.2). Die einzelnen (optimistischen) Auswirkungen der Störungseinflüsse auf 1- und 2-Frequenzempfänger nach Abzug der apriori Modelle werden in untenstehender Tabelle zusammengefasst [Kaplan and Hegarty, 2017].

Fehlerquelle	1σ Fehler [m]	
	1 - Frequenzempfänger	2 - Frequenzempfänger
(Gruppensegment)		
Satellitenuhr	0.4	0.4
Codegruppenverzögerung	0.15	-
Satellitenorbit	0.3	0.3
Ionosphäre	7.0	0.1
Troposphäre	0.2	0.2
Messrauschen	0.1	0.1
Mehrwegeeffekte	0.2	0.2
UERE (Gesamt SQR)	7.03	0.6

Tabelle 8: Typisches UERE Budget für GNSS 1- bzw. 2-Frequenzempfänger, Kaplan and Hegarty [2017]

3.3.5 Beobachtungsgleichung

Die Beobachtungsgleichung (3.6) muss somit aufgrund der oben angesprochenen Fehlerquellen entsprechend erweitert werden. Für die Codestreckenbeobachtung gilt (3.10).

$$r_R^S = \rho_R^S + c \cdot (\delta^S - \delta_R) + \Delta\rho_{R,Ion}^S + \Delta\rho_{R,Trop}^S + \Delta\rho_{Bahn}^S + \Delta\rho_{R,Rel}^S + \varepsilon_R^S \quad (3.10)$$

r_R^S	Pseudostrecke	$\Delta\rho_{R,Ion}^S$	Ionosphärische Laufzeitverzögerung
ρ_R^S	geometrische Distanz	$\Delta\rho_{R,Trop}^S$	Troposphärische Laufzeitverzögerung
$c \cdot \delta^S$	Satellitenuhrenfehler	$\Delta\rho_{Bahn}^S$	Bahnfehler
$c \cdot \delta_R$	Empfängeruhrfehler	$\Delta\rho_{R,Rel}^S$	relativistische Effekte
ε_R^S	Multipath, Signalbeugung, Empfängerrauschen etc.		

3.4 Phasenmessung

Neben der oben beschriebenen Codemessung liefern qualitativ höherwertige GNSS-Receiver auch Beobachtungen der Pseudophasenstrecken. Zur Modellierung werden die Wellenlängen λ der Trägersignale (z.B. GPS L1, L2, L5), die ganzzahlige Anzahl der Wellen N , als auch ein Phasenreststück $\Delta\phi$ herangezogen.

$$\rho = \Delta\phi + N \cdot \lambda \quad (3.11)$$

Während das Phasenreststück $\Delta\phi$ zwischen der Phasenlage des empfangenen Signals und einer im Receiver erzeugten Replica sehr genau gemessen werden kann, bleibt die Anzahl der Wellen N unbekannt. Den Parameter N nennt man Ambiguity (Mehrdeutigkeit), welcher durch gleichzeitige Beobachtungen von mindestens 5 Satelliten gelöst werden kann.

Ein zusätzliches Problem können sogenannte Cycle Slips (Phasensprünge) darstellen, welche aufgrund kurzer Signalverluste entstehen. Die Konsequenz sind ganzzahlige Sprünge in den Ambiguities. Diese können zwar zumeist detektiert werden, bei ungünstiger Konstellation kann aber auch eine Neuinitialisierung der Ambiguities notwendig werden [Kaplan and Hegarty, 2017].

Analog zur Beobachtungsgleichung der Codemessung lässt sich somit auch die Beobachtungsgleichung der Trägerphasenmessung darstellen:

$$\Phi_R^S = \rho_R^S + c \cdot (\delta^S - \delta_R) - \Delta\rho_{R,Ion}^S + \Delta\rho_{R,Trop}^S + \Delta\rho_{Bahn} + \Delta\rho_{R,Rel}^S + N \cdot \lambda + \varepsilon_R^S \quad (3.12)$$

Φ_R^S	Pseudostrecke	$\Delta\rho_{R,Ion}^S$	Ionosphärische Laufzeitverzögerung
ρ_R^S	geometrische Distanz	$\Delta\rho_{R,Trop}^S$	Troposphärische Laufzeitverzögerung
$c \cdot \delta^S$	Satellitenuhrenfehler	$\Delta\rho_{Bahn}$	Bahnfehler
$c \cdot \delta_R$	Empfängeruhrfehler	$\Delta\rho_{R,Rel}^S$	relativistische Effekte
$N \cdot \lambda$	Mehrdeutigkeiten	ε_R^S	Multipath, Signalbeugung, Empfängerrauschen etc.

3.5 Datenformate

Bevor in Abschnitt 4 die Punktbestimmungsverfahren diskutiert werden, sind noch ein paar grundlegende Datenformate und Übertragungsmethoden zu beschreiben.

RINEX steht für *Receiver Independent Exchange Format* und beschreibt jenes Dateiformat, welches dem interoperationellen Austausch von GNSS-Daten dient. Die aktuellste Version Rinex 4.0 wurde im Dezember 2021 publiziert. Die Messdaten dieser Arbeit stehen jedoch noch in Version 2.11, die Simulationsdaten in Version 3.04 zur Verfügung. Beispiele für Dateien im Rinex-Format sind Beobachtungsdateien, Navigationsdateien und RINEX Clocks.

IONEX steht für *IONosphere Map EXchange Format* und ermöglicht den Austausch von geographischen 2- und 3-dimensionalen TEC-Maps zur Reduktion des ionosphärischen Laufzeitfehlers.

ANTEX steht für *Antenna Exchange Format* und dient der Antennenkalibrierung. Es liefert unter anderem Informationen über die Phase Center Offsets (PCO) im Satellite Body Frame. PCOs beschreiben die Abweichungen vom Center of Mass (CoM) der Satellitenantenne und dem Phasenzentrum, aus welchem das Signal ausgesendet wird.

SP3 heißt Standard Protokoll 3 und entspricht jenen Dateien, die präzise Satellitenuhrkorrekturen und Satellitenbahninformationen im Earth Centered Earth Fixed Koordinatensystem (ECEF) enthalten. Die aktuelle Version ist SP3-c [GSSC, 2023a].

RTCM ist die Abkürzung für Radio Technical Commission for Maritime Services. Die Version RTCM-3 wird weltweit für die Übermittlung von Korrekturdaten beim DGNSS verwendet. Für das Streamen der Korrekturdaten wurde eigens das **NTRIP** (*Networked Transport for RTCM via Internet Protocol*) geschaffen. RTCM bietet auch die Möglichkeit zum Austausch von HAS-Korrekturdaten via Internet (vgl. Abschnitt 5), [GSSC, 2023a].

NMEA steht für National Marine Electronics Association und ist ebenfalls ein Standardformat. NMEA überträgt im ASCII-Format Zeichenketten mit Informationen wie Positionsdaten, Satelliten PRN, Navigationsinformationen oder auch den SNR der verarbeiteten GNSS-Streckenmessungen. Es findet zum Beispiel bei der Positionierung via APOS Einsatz, indem der Rover seine Näherungskordinaten im Standardformat NMEA an die Referenzzentrale überträgt (vgl. Abschnitt 4.2), [BEV, 2023a].

3.6 Receiver

Receiver gehören gemeinsam mit der dazugehörigen Software und angeschlossenen Antenne dem Nutzersegment an (vgl. Tabelle 5). Sie dienen als Bindeglied zwischen Vermesser und Satellitensignal. Bekannte Hersteller sind unter anderem Leica, Trimble, u-blox und Septentrio, wobei auf die beiden letzteren in dieser Arbeit noch Bezug genommen wird.

3.6.1 u-blox



Bei den für die Eingangsdaten (Abschnitt 7.2) dieser Arbeit genutzten Receivern handelt es sich um 1-Frequenzempfänger (1-Bandempfänger) der Schweizer Firma u-blox, die GLONASS und GPS Signale empfangen können. Diese Receiver werden bereits seit einigen Jahren im Rahmen des Greenlight-Programmes von den ÖBB für die Zuglokalisierung verwendet (Abschnitt 2.1).



Abbildung 3.1: Symbolbilder u-blox [2023] und Septentrio [2023]



3.6.2 Septentrio

Als besonders geeignet für die Nutzung des Galileo High Accuracy Services gilt heute der Septentrio PolaRx5. Dabei handelt es sich um einen Multiband- und Multi-GNSS-Receiver, der in der Lage ist das Galileo Signal E6-B zu empfangen und die hier aufmodulierten HAS-Messages zu detektieren. Er wurde bereits in der Testphase (Phase 0) der Entwicklung des HAS für Forschungszwecke genutzt [Fernandez-Hernandez et al., 2022] und [Septentrio, 2023].

4 Punktbestimmungsverfahren

4.1 Relative Punktbestimmung - DGNSS

Aufgrund der unter Abschnitt 3.3 aufgeführten Stör- bzw. Fehlereinflüsse sind bei der Einzelpunktbestimmung (Single Point Positioning, SPP) in Echtzeit nur Genauigkeiten von etwa ± 3 Metern zu erreichen. Für die geodätischen Anforderungen ist dies jedoch unzureichend, weswegen sich im Vermessungswesen sogenannte relative Messverfahren durchgesetzt haben. Ein Beispiel relativer Messverfahren ist das differenzielle GNSS (DGNSS), bei dem zwei (oder mehr) Empfänger genutzt werden. Der eine Empfänger wird als Referenzempfänger in der Mitte des Messgebietes positioniert, während mit dem anderen, dem *Rover*, die eigentlichen Punktbestimmungen durchgeführt werden.

Da man sich beim DGNSS die hohe räumliche und zeitliche Korrelation der Störfaktoren zu Nutze macht, hängt die Genauigkeit dieses Verfahrens von der Länge der Basislinie zwischen den beiden Receivern ab (vgl. Tabelle 9). Durch das Bilden von Differenzen (4.1) können die meisten Fehlereinflüsse eliminiert bzw. minimiert werden. Während bei Einfachdifferenzen der Satellitenuhrfehler und bei Doppeldifferenzen zusätzlich der Empfängeruhrfehler eliminiert werden kann, bleiben Mehrwegeeffekte aufgrund der Standortabhängigkeit selbst bei DGNSS bestehen und können sich sogar verstärken.

$$d_2 P_{R1,R2,i}^{S1,S2} = d_2 \rho_{R1,R2}^{S1,S2} + d_2 \varepsilon_{R1,R2,i}^{S1,S2} \quad (4.1)$$

Die Genauigkeit der Positionslösungen bewegt sich bei Codemessungen im Dezimeterbereich, wodurch signifikante, aber mitunter noch nicht ausreichende Verbesserungen erzielt werden.

Kombiniert man hingegen DGNSS mit Phasenmessungen, kann die Referenzstation Daten zum Lösen der Ambiguitäten übermitteln und man erhält Lösungen mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich. Dieses Verfahren heißt *Real Time Kinematic* (RTK).

Fehlerquelle	1σ Fehler [m]	
	SPP	lokales DGNS
(Gruppensegment)		
Satellitenuhr	0.4 m	∅ -
Satellitenorbit	0.3 m	0.1-0.6 mm/km*
Ionosphäre	7.0 m	20-40 mm/km*
Troposphäre	0.2 m	10-40 mm/km*
Messrauschen	0.1 m	0.1 m
Mehrwegeffekte	0.2 m	0.3 m
UERE (ges. SQR)	7.0 m	0.3 m + 1-6 cm/km*
*bzgl. Basislinie		

Tabelle 9: Fehlereinflüsse bei Positionierung mittels Einzelpunktbestimmung und differentiellen GNSS [Kaplan and Hegarty, 2017]

4.2 RTK

Wie bei DGNSS handelt es sich bei RTK um ein Basislinienverfahren, welches ebenso die räumliche Fehlerkorrelation nützt und auf der Bildung von Doppeldifferenzen basiert (4.2). Um die Phasenmessung zur Positionsbestimmung zu verwenden, müssen die Mehrdeutigkeiten gelöst werden. Dies erfolgt während der sogenannten Initialisierung, welche statisch, aber auch *on the fly* erfolgen kann. So lange der Kontakt zu den Satelliten besteht, bleiben die Ambiguitylösungen unverändert.

$$d_2\Phi_{R1,R2,i}^{S1,S2} = d_2\rho_{R1,R2}^{S1,S2} + \lambda_i \cdot d_2N_{R1,R2,i}^{S1,S2} + d_2\varepsilon_{R1,R2,i}^{S1,S2} \quad (4.2)$$

Die benötigte Ausrüstung bei der RTK-Messung besteht aus einem Rover, einer Referenzstation und einer Kommunikationshardware inkl. Software zum Datenaustausch zwischen Referenzstation und Rover.

Nun ist es aus finanzieller und organisatorischer Sicht natürlich suboptimal, bei jedem Messauftrag eine zweite Ausrüstung für die Referenzstation mitzunehmen. Diese Umstände führten dazu, dass sich kommerzielle Anbieter gefunden haben, die permanente Referenzstationen betreiben.

Bekanntlich hängen die erreichbaren Genauigkeiten bei DGNSS und RTK im Wesentlichen von der Basislinienlänge ab. Bei Basislängen von 10 oder mehr Kilometern verlängert sich die Initialisierung zur Mehrdeutigkeitslösung merklich, auch werden die Positionslösungen immer unzuverlässiger. Da eine Referenzstationsdichte von 10 Kilometern jedoch nicht wirtschaftlich zu betreiben wäre, wurden die Referenzstationen vernetzt.

4.2.1 Vernetztes RTK

Durch das Bilden eines Referenzstationsnetzes können die kommerziellen Anbieter die Streckenkorrekturdaten durch Interpolation flächendeckend an den Rover liefern. Der Abstand zwischen Rover und nächstgelegener Referenzstation kann dabei sogar zwischen 50 und 100 km betragen. Die Positionsbestimmung mittels vernetztem RTK kann nach unterschiedlichen Prinzipien erfolgen.

Beim Prinzip der *virtuellen Referenzstation* (VRS) sendet der Rover eine Näherungslösung seiner Position an die Zentrale. Diese rechnet die Korrekturen für diese genäherte Position und setzt dorthin *virtuell* eine fiktive Referenzstation. Dies führt dazu, dass die Basislinie zwischen Rover und virtueller Referenzstation und so auch die distanzabhängigen Fehlereinflüsse minimal werden (siehe Basislinienabhängigkeit in Tabelle 9). Nun kann der Rover seine Phasenambiguitäten lösen und seinen korrigierten Standort bestimmen. So lange es zu keiner Neuinitialisierung kommt oder sich der Rover um mehr als 2km von der VRS entfernt, bleibt diese dem Messvorgang erhalten [SAPOS, 2022].

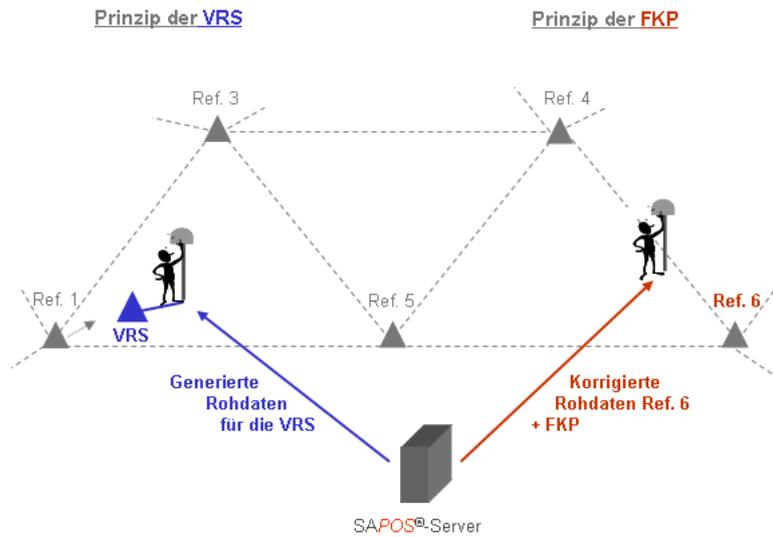


Abbildung 4.1: Prinzip der Virtuellen Referenzstation und der Flächenkorrekturparameter, Quelle: SAPOS [2022]

Das zweite mögliche Prinzip wird *Master-Auxilliary-Konzept* (MAC) genannt. Der Rover sendet seine Näherungsposition, woraufhin er von der nächstgelegenen Referenzstation, der sogenannten Master-Station, die korrigierten Rohdaten aller Satelliten und die Beobachtungsdifferenzen zwischen der Master-Station und den anderen umliegenden Stationen (Auxiliary-Stationen) erhält. Des Weiteren erhält er die Koordinatendifferenzen zwischen der Master-Station und den Auxillary-Stationen. Wesentliches Merkmal ist hier, dass der Rover selbst über die Wahl der Stationen und Art der Interpolation entscheidet, wodurch er hier das Groß der Rechenleistung übernimmt. Die dritte Möglichkeit der Vernetzungsrepräsentation, der Vollständigkeit wegen erwähnt, ist das Prinzip der Flächenkorrekturparameter (FKP) [SAPOS, 2022].

4.2.2 Referenzstationsnetzbetreiber

Die zwei größten Referenzstationsdienste Österreichs heißen *Austrian Positioning Service* (APOS) und *Echtzeit Positionierung Austria* (EPOSA). Mit Fokus auf ihre Unterschiede seien die beiden Systeme in Folge kurz umrissen.

APOS ist der Positionierungsdienst des österreichischen Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV) und nützt die Standorte seiner Vermessungsämter für den Aufbau eines Referenznetzes. Wesentlicher Vorteil ist die Einbindung externer Stationen in den Nachbarländern (Abb. 4.2). APOS berechnet Korrekturdaten für die Satellitensignale von GPS, GLONASS und GALILEO und übermittelt Lösungen im ETRS89. Man kann hierbei zwischen APOS-PP für Postprocessing und APOS-Realtime wählen, welches mit den oben erwähnten Verfahren Master Auxiliary Concept (MAC) und Virtuelle Referenzstation (VRS) Echtzeitanwendungen ermöglicht. Es gibt die 2 Genauigkeitsklassen APOS-DGPS mit Genauigkeiten im Submeterbereich und APOS-RTK. Letzteres liefert Genauigkeiten im Zentimeterbereich. Die Übertragung der Korrekturdaten erfolgt dabei im RTCM-Format (vgl. Abschnitt 3.5) via Mobilfunk [BEV, 2023b].

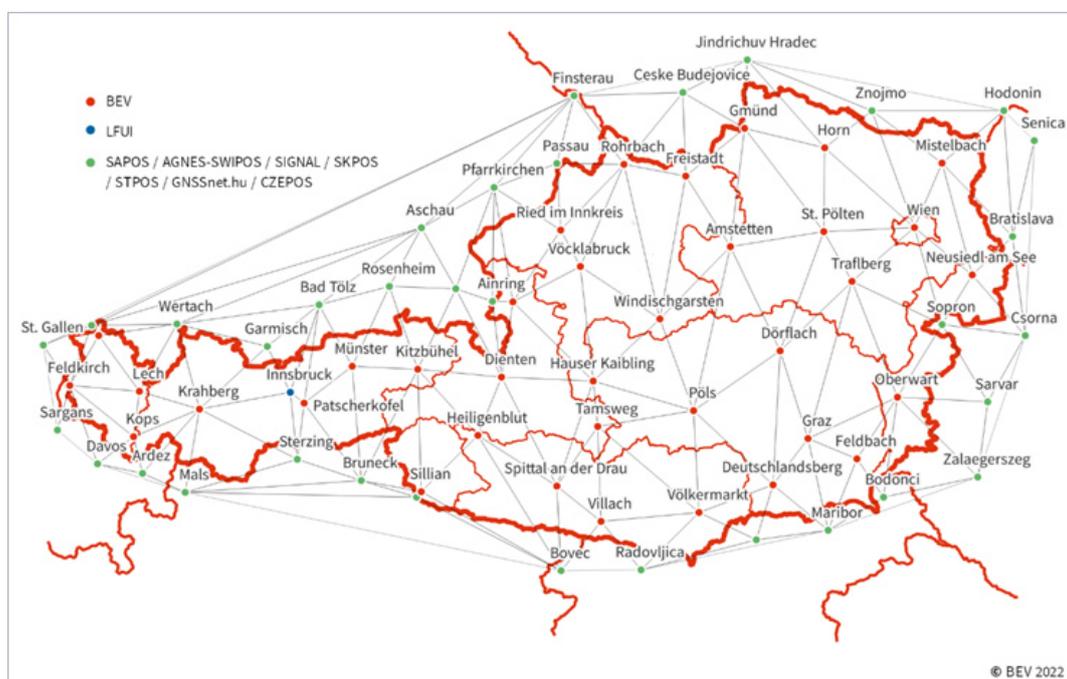


Abbildung 4.2: APOS Stationsnetzwerk, Quelle: BEV [2023b]

EPOSA ist ein privater Positionierungsdienst und steht in Konkurrenz zu APOS. Er entstand durch Zusammenschluss der Referenzstationen von ÖBB-Infra (T-Kom Services Echtzeitpositionierung, TEPOS), der Wien Energie¹ (Wienstrom Echtzeitpositionierung, WEP) und der Bewag² (Satellitenvermessung Burgenland, SATVB). EPOSA ähnelt dem Positionierungsdienst von APOS, weist aber einige Unterschiede auf: Neben den drei zuvor erwähnten Satellitennavigationssystemen GPS, GLONASS und GALILEO können zusätzlich Korrekturen für das vierte globale Satellitennavigationssystem Beidou ausgesendet werden. Die Positionsbestimmung mittels RTK erfolgt bei EPOSA zwingend über VRS. Der globale Referenzrahmen der Stationen ist das ITRF2014 mit der Epoche 2010.0, wobei ein baldiger Umstieg auf das ITRF2020 geplant ist. Umrechnungen in das lokale Koordinatensystem sind mit ähnlichen Genauigkeiten wie bei APOS möglich [EPOSA, 2023].



Abbildung 4.3: EPOSA Stationsnetzwerk, Quelle: EPOSA [2023]

¹mittlerweile Wiener Netze

²mittlerweile Burgenland Energie

4.3 Precise Point Positioning - PPP

Beim Precise Point Positioning, auch *präzise Einzelpunktbestimmung* genannt, werden im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen relativen Punktbestimmungsverfahren weder Referenznetze, noch einzelne Referenzstationen genutzt. Um dennoch präzise Lösungen zu erhalten, wird bei der Fehlerkorrektur das Fehlen zusätzlicher Referenzempfänger durch Modellierung von Fehlereinflüssen und Elimination durch Bildung von Linearkombinationen ersetzt. Ein Beispiel dafür ist die ionosphärenfreie Linearkombination, die zu den beiden Beobachtungsgleichungen (4.3) und (4.4) für Code und Phase führt.

$$r_R^S = \rho_R^S - c \cdot \delta_R + \Delta\rho_{R,Tropwet}^S + \varepsilon_R^S \quad (4.3)$$

$$\Phi_R^S = \rho_R^S - c \cdot \delta_R + \Delta\rho_{R,Tropwet}^S + N \cdot \lambda + \varepsilon_R^S \quad (4.4)$$

Die benötigten präzisen Satellitenephemeriden, Satellitenuhrenkorrekturen und Signal-Biases werden vom Internationalen GNSS Service (IGS) berechnet und in verschiedenen Genauigkeitsstufen zur Verfügung gestellt. Eine Auflistung der verschiedenen IGS-Produkte kann der untenstehenden Tabelle 10 entnommen werden.

Gab es früher nur GPS-PPP, ist es mittlerweile möglich Multi-GNSS-PPP zu betreiben. Daher gibt es ergänzend zu diesen für das GPS Satellitensystem gültigen IGS-Produkten seit einiger Zeit auch Multi-GNSS-Lösungen im Rahmen des Multi-GNSS Experiments (MGEX) des IGS.

Quellen für präzise Uhren und Ephemeriden multipler GNSS stellen wiederum die Analyse Center *Geoforschungszentrum Potsdam* (GFZ) oder *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) dar. Die Ionosphärische Laufzeitverzögerung wird durch das Messen auf mehreren Frequenzen und das Bilden von Linearkombinationen eliminiert. Im Gegensatz dazu gehen Empfängeruhrenfehler ($c \cdot \delta_R$) und feuchter Anteil der Troposphäre ($\rho_{R,Tropwet}^S$) als Parameter in den Filterprozess ein. Der hydrostatische Anteil der troposphärischen Verzögerung, relativistische Effekte, Gezeiteneffekte, und Phasenzentrumskorrekturen können wiederum modelliert werden. Größte Herausforderungen verbleiben beim Prinzip des PPP das Lösen der Phasen-Mehrdeutigkeiten und das Detektieren von Cycle-Slips.

Format		Genauigkeit	Latenz	Aktualisierung	Sample-Intervall
Broadcast	Orbits	~ 100 cm			
	Sat.	~ 5 ns RMS	Echtzeit	-	täglich
	Uhren	~ 2.5 σ			
Ultra-Rapid (predicted)	Orbits	~ 5 cm		03:00, 09:00,	
	Sat.	~ 3 ns RMS	Echtzeit	15:00, 21:00	15 min
	Uhren	~ 1.5 ns σ		Uhr (UTC)	
Ultra-Rapid (observed)	Orbits	~ 3 cm		03:00, 09:00,	
	Sat.	~ 150 ps RMS	3 - 9 h	15:00, 21:00	15 min
	Uhren	~ 50 ps σ		Uhr (UTC)	
Rapid	Orbits	~ 2.5 cm		Täglich um	15 min
	Sat. u. Stat.	~ 75 ps RMS	17 - 41h	17 Uhr	5 min
	Uhren	~ 25 ps σ		(UTC)	
Final	Orbits	~ 2.5 cm			15 min
	Sat. u. Stat.	~ 75 ps RMS	12 - 19 d	Freitags	Sat: 30s
	Uhren	~ 20 ps σ			Stat: 5min

Tabelle 10: IGS GPS-Produkte, Quelle: IGS [2023]

Trotz großen ökonomischen Reizes - keine Referenzstationen notwendig - ist PPP gegenüber RTK in Bezug auf die erzielten Genauigkeiten und der benötigten Koordinatenkonvergenzzeiten noch nicht konkurrenzfähig. Wesentliche Verbesserungen in der Performance von PPP verspricht man sich jedoch durch die Initialisierung des Galileo High Accuracy Services, worauf im nächsten Abschnitt tiefer eingegangen wird.

5 High Accuracy Service

Auf Initiative der Europäischen Kommission wurden in Zusammenarbeit der EUSPA (Agentur der Europäischen Union für das Weltraumprogramm) und der ESA (Europäische Weltraumorganisation) Pläne zu Errichtung eines High Accuracy Services (HAS), anfangs als kostenpflichtiger, dann als freier Service, gefasst [GSC, 2023], [EUSPA, 2023], [Fernandez-Hernandez et al., 2022].

Das Hauptziel war und ist dabei die Errichtung eines globalen PPP-Services. Durch die direkte satellitenbasierte Übertragung von präzisen Uhren- und Ephemeridenkorrekturen, sowie Code- und Phasenbiases von Galileo- und GPS-Satelliten, sollen Nahe-Echtzeit-PPP-Lösungen nach Konvergenz mit Genauigkeiten von 20 cm (horizontal) und 40 cm (vertikal) mit einer Wahrscheinlichkeit von $\geq 95\%$ ermöglicht werden [Fernandez-Hernandez et al., 2022].

5.1 Entwicklung

Die Entwicklung des High Accuracy Service ist in 3 sogenannte Phasen (*SIS Testung - Initial Service - Full Service*) gegliedert (Abb. 5.1, Tab. 11):

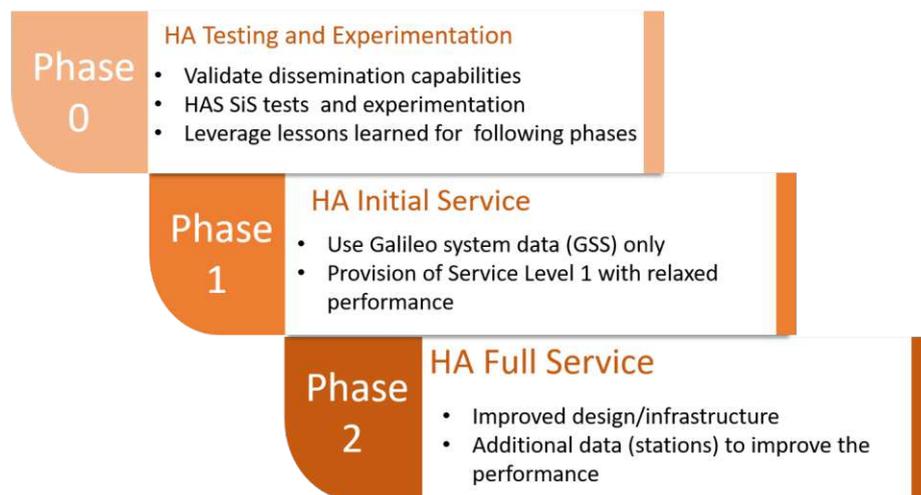


Abbildung 5.1: HAS Entwicklungsphasen, Quelle: GSC [2023]

Ursprünglich war geplant die Machbarkeitstests der Phase 0 im Jahr 2022 abzuschließen und Phase 1 zu starten [Fernandez-Hernandez et al., 2022]. Dieser Zeitplan konnte jedoch nicht

eingehalten werden. Somit wurde mit zeitlichem Verzug auf der 15. Europäischen Weltraumkonferenz (15th European Space Conference) am 24. Jänner 2023 mit breitem medialen Echo der Start des *HA Initial Services* (entspr. Phase 1) verkündet und der HAS als offiziell für Nutzer verfügbar erklärt [EUSPA, 2023], [ESA, 2023].

Ausschnitte der unterschiedlichen (geplanten) Performance der verschiedenen Phasen können aus Tabelle (11) entnommen werden [Fernandez-Hernandez et al., 2022].

	Phase 0	Phase 1	Phase 2
Abdeckung	EU +	EU +	Global
Uhren- und Ephemeridenkorrekturen	J	J	J
Codebias	J	J	J
Phasenbias	N	J	J
Korrigierte Signale			
Galileo	E1, E5a, E5b, E6	E1, E5a, E5b, E5, E6	E1, E5a, E5b, E5, E6
GPS	L1, L2P	L1, L2C	L1, L2C, L5
Horizontale Genauigkeit	N/A	> 20 cm	20cm
Vertikale Genauigkeit	N/A	> 40 cm	40cm
Konvergenzzeit	N/A	> 300s	300s
Geplanter Start	2020	2022	2024+

Tabelle 11: Performance der HAS-Phasen 0 bis 2 - Ausschnitt nach Fernandez-Hernandez et al. [2022]

5.2 Grundprinzip

Die folgenden Inhalte wurden dem Paper *Galileo high accuracy service: initial definition and performance* von Fernandez-Hernandez et al. [2022] entnommen, worauf auch für weitere Informationen verwiesen wird. Zum leichteren Verständnis können die folgenden Schritte aber auch aus der Abbildung 5.2 abgeleitet werden.

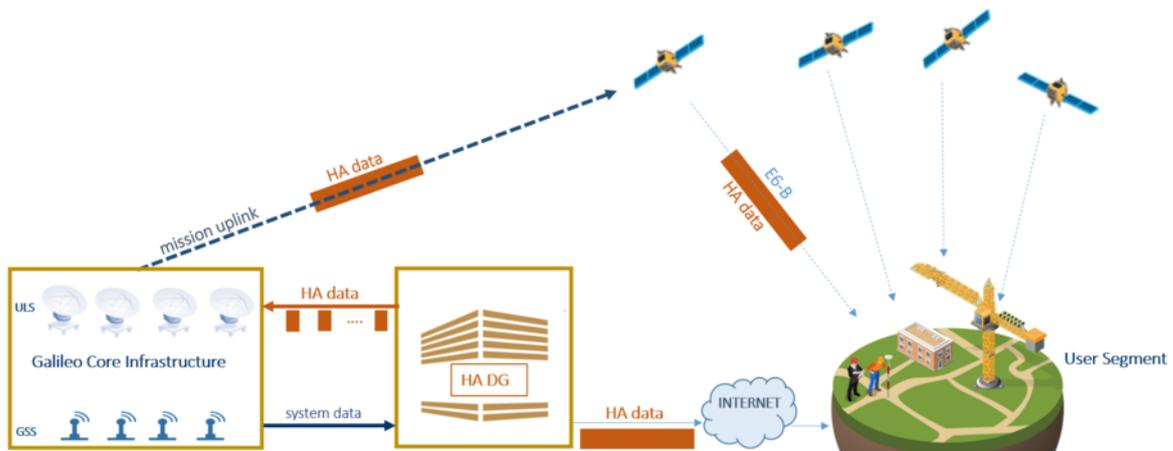


Abbildung 5.2: HAS Grundprinzip, Quelle: ESA [2023]

- In Phase 1 werden alle Messungen von Galileo- (E1, E5a, E5b, E5, E6), sowie GPS-Signalen (L1, L2C³) von 14 Galileo Sensor Stations (GSS) an den High Accuracy Data Generator (HADG) im Europäischen GNSS Service Centre (GSC) gesendet [Fernandez-Hernandez et al., 2022].
- Der HADG bestimmt für diese beiden GNSS Uhrenkorrekturen, Ephemeriden und Code-Biases und rechnet auch die entsprechenden Korrekturen zur aktuellen Broadcastinformation.
- Die Korrekturen werden zur HAS-Nachricht formatiert und über die derzeit 5 Up-Link-Stationen (ULS) an die Satelliten übertragen.
- Der Nutzer erhält die GPS und Galileo Signale mitsamt der Broadcast-Ephemeriden, aber auch der HAS Nachricht und kann die darin enthaltenen HAS Korrekturen in die PPP-Beobachtungsgleichungen einführen und seine Koordinatenlösung berechnen.

³Ab Phase 2 ist auch das GPS-Signal L5 geplant.

Service Levels: Ab Phase 2 wird der Galileo HAS in zwei verschiedenen Service Levels (SL1 und SL2) verfügbar sein. Die Eigenschaften des globalen SL1 können aus Tabelle 11 entnommen werden. Das SL2 liefert darüber hinaus atmosphärische Korrekturen und auch die Konvergenzzeit reduziert sich auf unter 100s. Einschränkend steht es jedoch nur in Europa zur Verfügung [GSC, 2020].

Ergänzungen: Das HAS-Signal E6-B wird mittels BPSK (vgl. Abschnitt 3.1) auf die Trägerfrequenz 1278.75 MHz (entspricht der Wellenlänge $\lambda = 23.44$ cm) aufmoduliert und mit dem verschlüsselten Pilotton E6-C zur Signalauthentifizierung übermittelt. Die HAS-Signal-Struktur kann wie folgt von unten nach oben dargestellt werden: HAS Message \subseteq HAS Page \subseteq C/NAV Page

Als Alternative zum direkten Empfang der Korrekturen über die HAS-Nachricht - zum Beispiel für Receiver, die das HAS-Signal E6-B nicht empfangen können - werden die Korrekturen vom GSC auch via Internet im RTCM-Format (vgl. Abschnitt 3.5) übermittelt.

Zur Zeit ist bereits der Erhalt von Galileo- und GPS-Ephemeriden- und Uhrenkorrekturen, aber auch Code-Biases möglich. Die Übertragung von Phasenbiases wurden laut Fernandez-Hernandez et al. [2022] noch nicht vom RTCM-Standard akzeptiert, soll aber ins Proposal für Version RTCM 10403.3 aufgenommen worden sein.

6 GIPSIE RTX Signalsimulator

Um die Anzahl der beobachtbaren Galileo-Satelliten an vorgegebenen Standpunkten abzuschätzen, werden mittels GIPSIE RTX Signalsimulators (GNSS multisystem performance simulation environment) der Grazer Firma OHB Digital Solutions GmbH Simulationen durchgeführt (vgl. Abschnitt 7.3).

Der GIPSIE RTX Signalsimulator kann im Wesentlichen in die zwei Hauptkomponenten und Hauptfunktionen Signalsimulation (IZT P1100) und Signalgenerierung (IZT S1000) unterteilt werden.



6.1 Signalsimulator

Die Kernsoftware des IZT P1100 wird ebenso GIPSIE genannt und ermöglicht das Simulieren von GNSS-Signalen, sowie die Erstellung von Zwischenfrequenzen in Form von Binärdateien (vgl. Abschnitt 6.2). Die gewünschten Einstellungen erfolgen über sogenannte Szenarios und können auf der grafischen Benutzeroberfläche (Abb. 6.1) oder direkt auf der dahinterstehenden Datei scenarioname.json vorgenommen werden.

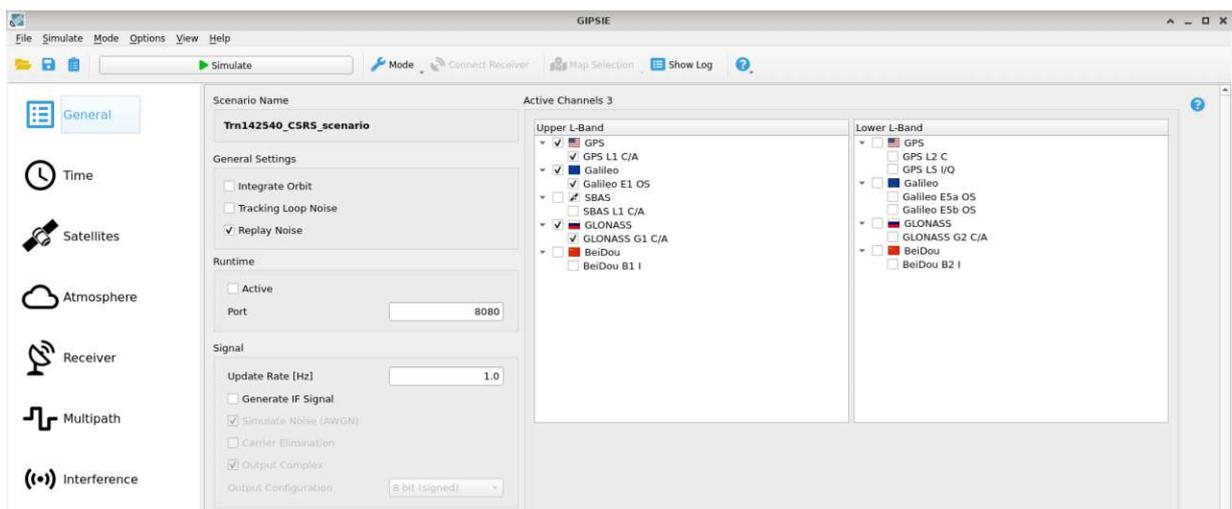


Abbildung 6.1: GIPSIE Benutzeroberfläche

Der Nutzer kann dabei einzelne oder mehrere Kanäle der globalen Satellitennavigationssysteme, aber auch der regionalen Ergänzungssysteme EGNOS, WAAS und MSAS wählen.

GNSS	Oberes L-Band	Unteres L-Band
GPS		L1 C/A
		L2 C
GALILEO		L5 I/Q
		E1 OS
		E5a OS
GLONASS		E5b OS
		G1 C/A
BeiDou	B1 I	G2 C/A
SBAS	L1 C/A	B2 I

Tabelle 12: Auswählbare Kanäle auf dem TU-eigenen GIPSIE Signalsimulator

Die Satellitenbahnen werden durch das Auslesen der Keplerelemente von RINEX - Navigationsnachrichten bestimmt. Man kann dabei entscheiden, ob man mehrere Zeitpunkte ausliest, oder die Satellitenpositionen ab dem Startzeitpunkt der Simulation über den gesamten Beobachtungszeitraum vorwärtsintegriert.

GIPSIE ermöglicht auch die Bestimmung von Fehler- und Störeinflüssen bzw. deren Auswirkungen auf die simulierte Positionsbestimmung. Hinsichtlich der ionosphärischen Verzögerung können IONEX TEC-Maps hochgeladen oder die Modelle Klobuchar und NeQuick angewandt werden, wobei die Parameter des Ionosphärenmodells auch hier durch das Einlesen der Navigationsnachricht eingespielt werden können. Die troposphärische Verzögerung kann GIPSIE über die Modelle Hopfield, Galileo Reference, GPT2w und Saastamoinen berücksichtigen. Weitere Effekte die GIPSIE auf Wunsch in die Simulation einfließen lässt sind Mehrwegeempfang oder auch die Auswirkungen von Spoofer und Jammer.

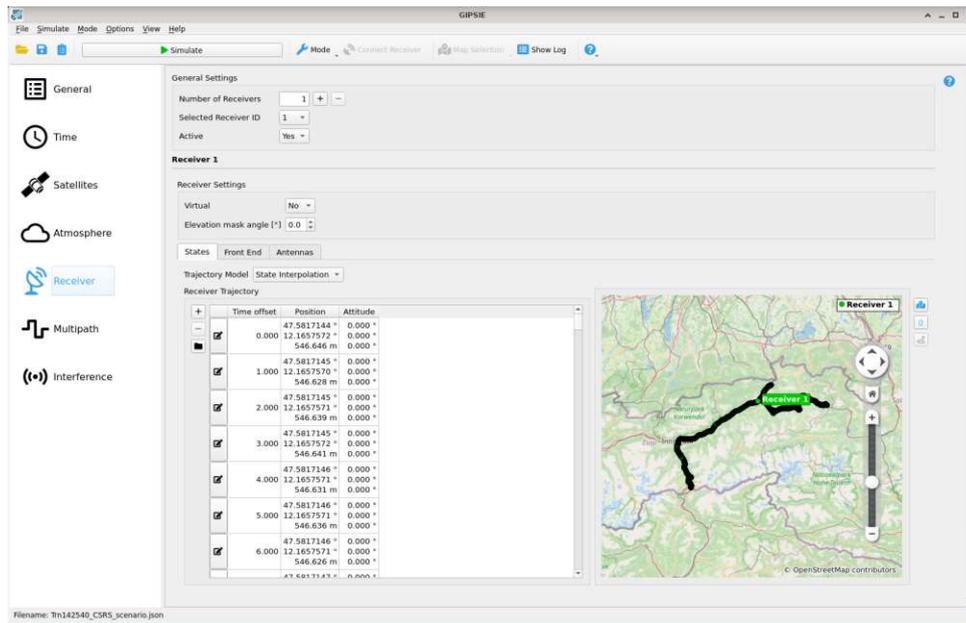


Abbildung 6.2: GIPSIE Receiversettings

Von besonderer Relevanz für diese Arbeit sind die Einstellungen bezüglich der GNSS Empfänger (vgl. Abb. 6.2). Mit GIPSIE ist es nämlich einerseits möglich eine beliebige Anzahl an Empfängern über ihre Position zu definieren, andererseits kann auch jeder dieser Empfänger als statisch oder kinematisch gesetzt werden. Das heißt, dass dem Empfänger - wie zum Beispiel einem TFZ - zu jedem Zeitpunkt $t = t + 1$ eine neue Position zugewiesen werden kann. Der Winkel der Elevationsmaske kann auch für jeden Receiver individuell gewählt werden.

Das Simulationsergebnis wird dem Nutzer durch eine Vielzahl an Dateien ausgegeben. Für diese Arbeit sind dabei die Beobachtungsdatei, das Positions- und das SKY-File von Interesse, da daraus die Sichtbarkeit der Galileo Satelliten abgeleitet werden kann.

Global	.json	Szenariofile
	.sp3	Satellitenorbit
Pro Receiver	.yn	Navigationsdatei
	.yyo	Beobachtungsdatei
	.pos	Positionsfile
	.sky	SKY-File
Pro Receiver und Pro Signal	.bin	Zwischenfrequenz (IF)

Tabelle 13: GIPSIE Ausgabedateien

Die Binärdatei *scenario.bin* enthält das IF-Signal einer Trägerfrequenz bezogen auf einen Receiver und wird für die Signalgenerierung benötigt.

6.2 Signalgenerator

Mit Hilfe des Signalgenerators können die mittels GIPSIE erstellte Binärdateien des IF-Signals auf Radiofrequenzen hochkonvertiert und ausgesandt werden. Dieses Feature kann unter anderem zum Testen von Receivern eingesetzt werden.

6.3 RTX Mode

Zu Schluss sei noch der *RTX Mode* erwähnt, der die Erstellung der Binärdatei überspringt und eine direkte Übertragung des IF-Signals von GIPSIE an den Signalgenerator IZT S1000 beschreibt, wodurch ein Livestreaming simulierter Signale ermöglicht wird.

Detaillierte Informationen zu den beiden Komponenten IZT S1000 und IZT P1100 können den User Guides des Signalsimulators auf der Webpage der Firma OHB entnommen werden [GIPSIE, 2023]. Des Weiteren liegt am Forschungsbereich Höhere Geodäsie eine kompakte Anleitung für den GIPSIE Signalsimulator auf [Bauer, 2022].

7 Datenaufbereitung

7.1 Referenzstrecken

Das Ziel dieser Arbeit ist das Prüfen der grundsätzlichen Eignung des High Accuracy Services für die Zuglokalisierung auf Strecken des österreichischen Schienennetzes. Da für die grundsätzliche Anwendbarkeit die Sichtbarkeit zu mindestens einem das HAS-Signal aussendenden Satelliten notwendig ist und für die rasche Nutzung mindestens 4 Galileo-Satelliten beobachtet werden müssen, liegt der Schwerpunkt bei der Frage nach Realisierbarkeit in einer Visibilitätsanalyse. Für deren Durchführung wurden aus dem österreichischen Eisenbahnnetz zwei Referenzstrecken ausgewählt, zu denen einerseits Messdaten (Abbildung 7.4) vorliegen, welche andererseits auch als Hauptkriterien über eine gebirgige Topographie, sowie eine hohe Befahrungsfrequenz verfügen. Dies berücksichtigend führte zu je einer Referenzstrecke im Bundesland Tirol und einer in der Steiermark.

7.1.1 Tirol

Der Tiroler Teststreckenabschnitt ist Teil der heutigen Westbahn und setzt sich aus den drei Bahnstrecken Brennerbahn (Innsbruck-Brenner), der Unterinntalbahn (Innsbruck-Kufstein) und der Salzburg-Tiroler-Bahn (St. Johann - Wörgl) zusammen.



Abbildung 7.1: Referenzstrecke Tirol

Der Abschnitt Unterinntalbahn von Kufstein bis Innsbruck (historisch Nordtiroler Bahn) ist eine der meistbefahrenen Strecken Österreichs [Schienen Control, 2021] und bedingt durch seine Tallage eine spannende Beobachtungsgeometrie. Die Brennerbahn ist eine 125 km lange Gebirgsbahn und geht von Innsbruck (582m) über das Silltal (Wipptal) bis zum Brenner (1370m) hinauf, um dann auf der Südtiroler Seite durch das Eisacktal bis Bozen auf 266m herabzuführen. Auf dem beobachteten österreichischen Abschnitt Innsbruck-Brenner werden auf einer Strecke von nur 36 Kilometern 788 Höhenmeter zurückgelegt (vgl. Abb. 7.2). Von der Gesamtstrecke befinden sich nur 8.4% in der Waagrechten und 47.7% Prozent sind in Bogen gehalten. Der Scheitelpunkt der Strecke liegt im (Grenz-)Bahnhof Brenner und ist zugleich der höchste Punkt des Normalspurnetzes der österreichischen Bundesbahnen [Röll, Freiherr von, 1912].

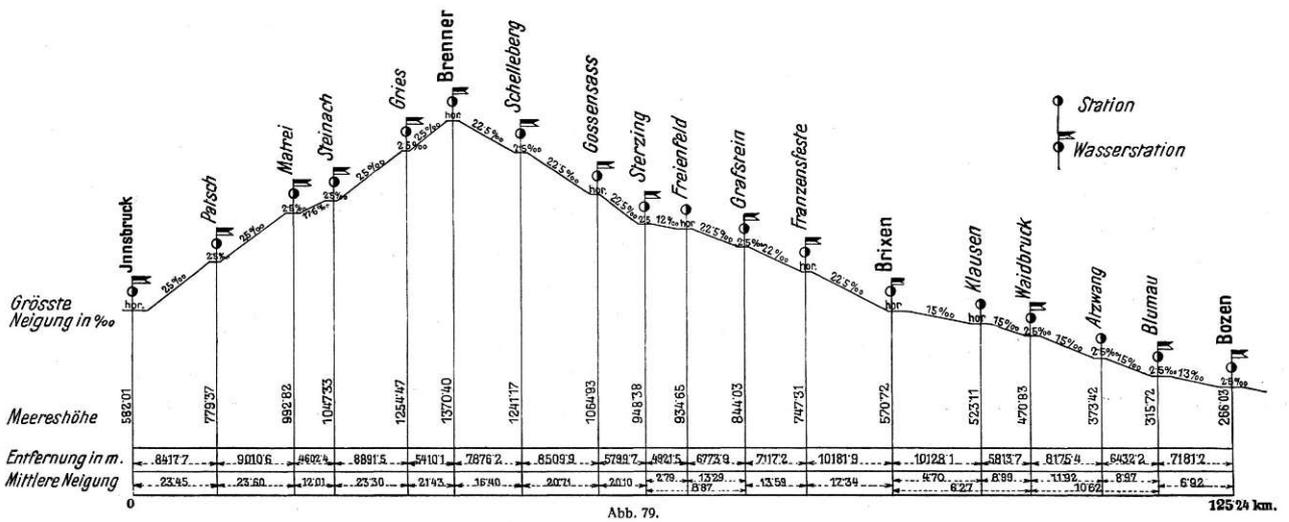


Abbildung 7.2: Höhenprofil der (historischen) Brennerbahn nach Röll, Freiherr von [1912]

7.1.2 Steiermark

Der steirische Abschnitt verläuft zwischen Graz und Bruck an der Mur und ist Teil der heutigen Südbahn. Von Süden aus betrachtet startet der Beobachtungsabschnitt auf einer Höhe von 364 m ü. A. bei Graz Hbf und endet nach ca. 50 Kilometern bei einer Höhe von 489 m ü. A. in Bruck/Mur. Dieser im Vergleich zur Tiroler Strecke kürzere Abschnitt ist, abgesehen von seiner Topographie und Befahrungsfrequenz, von besonderem Interesse, da er von den ÖBB generell für Testzwecke genutzt wird. Nachteilig ist jedoch, dass nur eine geringe Anzahl an Beobachtungen vorliegt (vgl. Abschnitt 8.2).

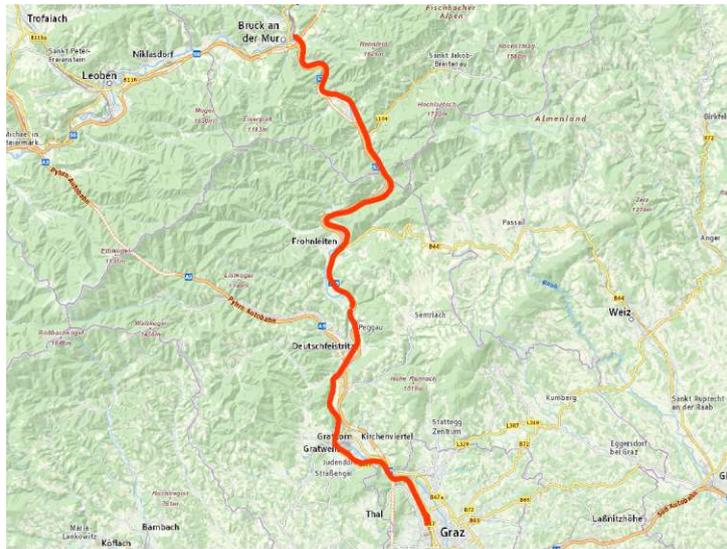


Abbildung 7.3: Referenzstrecke Steiermark

7.2 Streckenbeobachtungen

Für die Sichtbarkeitsanalyse der Galileo-Satelliten wurden Simulationen des GIPSIE Signalsimulators genutzt, wobei für eine korrekte Interpretation eine genaue Kenntnis über die realen Beobachtungen vorausgesetzt wurde. Daher wird sich dieser Abschnitt intensiv mit den durchgeführten Streckenbeobachtungen auseinandersetzen.

Die Eingangsdaten der Evaluierung stammen aus dem Projekt Greenlight (vgl. Abschnitt 2.1) der Österreichischen Bundesbahnen und wurden der Technischen Universität Wien im Rahmen des FFG-Projektes TRain (*GNSS Signals for Numerical Weather Prediction and Galileo HAS Train Positioning*) zwischen der ZAMG⁴ (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) und der TU Wien zur Verfügung gestellt.

⁴mittlerweile GeoSphere Austria

Es handelt sich dabei um Multi-GNSS-Beobachtungsdaten (GPS und GLONASS) auf der Trägerwelle L1, welche im Zeitraum von 9. September bis 16. Oktober 2021 (DOY 252:289) durch Messungen mittels u-blox 1-Frequenzempfängern (vgl. Abschnitt 3.6) bestimmt wurden. Zu diesem Zweck wurden 12 Receiver auf ebensoviele verschiedene Triebfahrzeuge montiert, welche über den Beobachtungszeitraum zumeist ähnliche Streckenabschnitte befuhren. Die Verfügbarkeit von vielen Messdaten für spezielle Abschnitte spielte bei der Referenzstreckenwahl eine wesentliche Rolle. Sämtliche Strecken die im Beobachtungszeitraum von den beobachteten TFZ zumindest einmal befahren wurden, werden in Abbildung 7.4 dargestellt.



Abbildung 7.4: FFG-Projekt TRain: Beobachtete Strecken

Die Beobachtungen liegen in Form von insgesamt 408 täglichen Rinex 2.11 Mixed- Beobachtungsfiles vor, wobei die Daten nach TFZ (ID) und Datum (DOY) sortiert sind. Oft liegt die Beobachtungsdauer bei vollen 24 Stunden, teilweise jedoch darunter, wobei die Beobachtungen sekundenweise erfolgten. Aufgrund der oben beschriebenen, zumindest regional gültigen *Streckentreue*, entspricht eine TFZ-Selektion auch einer gewissen räumlichen Selektion. Dadurch konnten als Beobachtungen für die Referenzstrecke Tirol 38 Befahrungen des TFZ-14, für die Referenzstrecke Steiermark je 2 Befahrungen des TFZ-18, sowie des TFZ-20 herangezogen werden.

Die Abbildungen der folgenden Szenarien beziehen sich, so nicht anders angegeben, auf die Ausarbeitungen der Tiroler Beobachtungspur, insbesondere der Tiroler Beobachtung Trn142540. Da diese größte Übereinstimmung mit ihrer Referenzstrecke aufweist und von 0 bis 24 Uhr Beobachtungen vorliegen, ist sie zur Veranschaulichung der nächsten Schritte bestens geeignet. Insgesamt liegen bei Trn142540 sogar für über 97.5% des Tages auch auswertbare Beobachtungen (vgl. Abb. 7.9) vor. Die Ausführungen zur steirischen Strecke werden am Ende gebündelt angeführt (vgl. Abschnitt 8.2).

7.2.1 Szenario I: Gesamtstrecke

Bei den Eingangsdaten handelt es sich, wie oben erwähnt, um Beobachtungsdateien (bezeichnet nach Schema Trn/IDDOY0.21O), welche für die Beobachtungsdauer sämtliche Beobachtungen zu den Satelliten enthalten. Dies ermöglicht das Erstellen von Zeitreihen der daraus abgeleiteten sichtbaren Satelliten über den gesamten Beobachtungszeitraum. Man kann einerseits alle sichtbaren Satelliten taxativ in Sichtbarkeitsdiagramme einzeichnen (Abb. 7.5), aber auch die Summen der nach GNSS klassifizierten Satelliten für jede Sekunde bilden (Abb. 7.6).

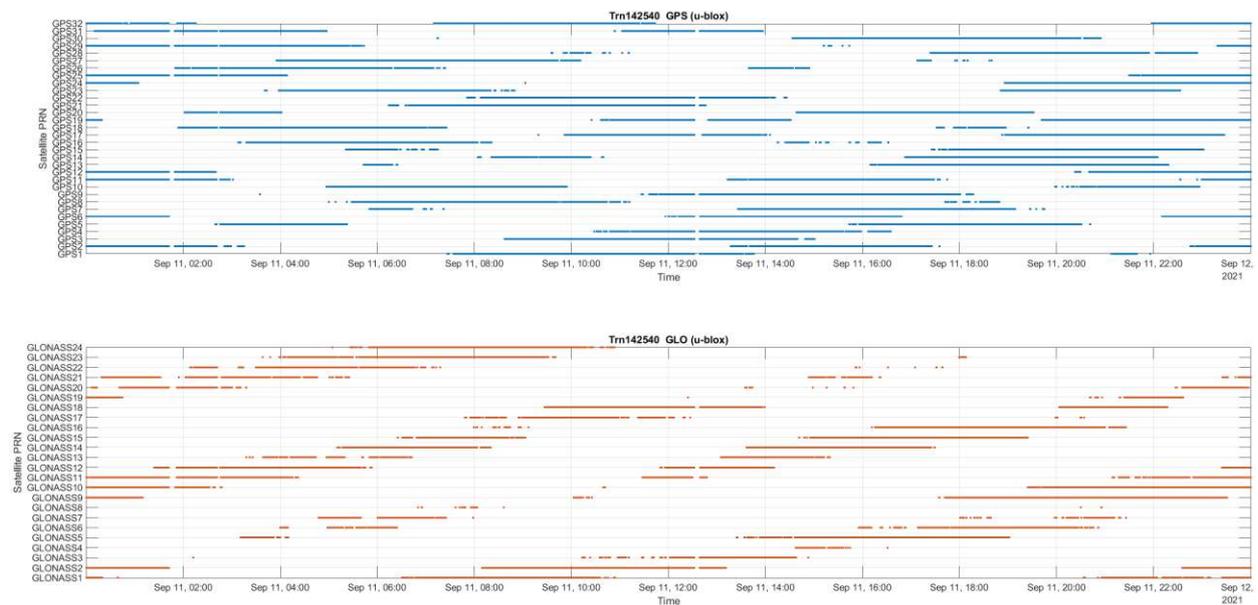


Abbildung 7.5: Zeitreihe sichtbarer GPS- und Glonass-Satelliten der Spur Trn142540

Wie man der obigen Abbildung entnehmen kann, gibt es durchaus Zeiträume, wie etwa hier zwischen 12 und 13 Uhr, an denen keinerlei Satelliten zu sehen waren (siehe auch insb. Abb. 7.9). Dies kann mitunter einem längeren Tunnel geschuldet sein. Da in dieser Arbeit primär die Konkurrenzfähigkeit von HAS-PPP gegenüber RTK hinterfragt wird, ist ein genereller Ausfall aller Satelliten *hier* nicht von primärer Relevanz, da bei Satellitenausfall kein GNSS-Verfahren Anwendung finden kann. In solchen Situationen müssen generell anderweitige terrestrische Sensoren für die Lokalisierung eingesetzt werden.

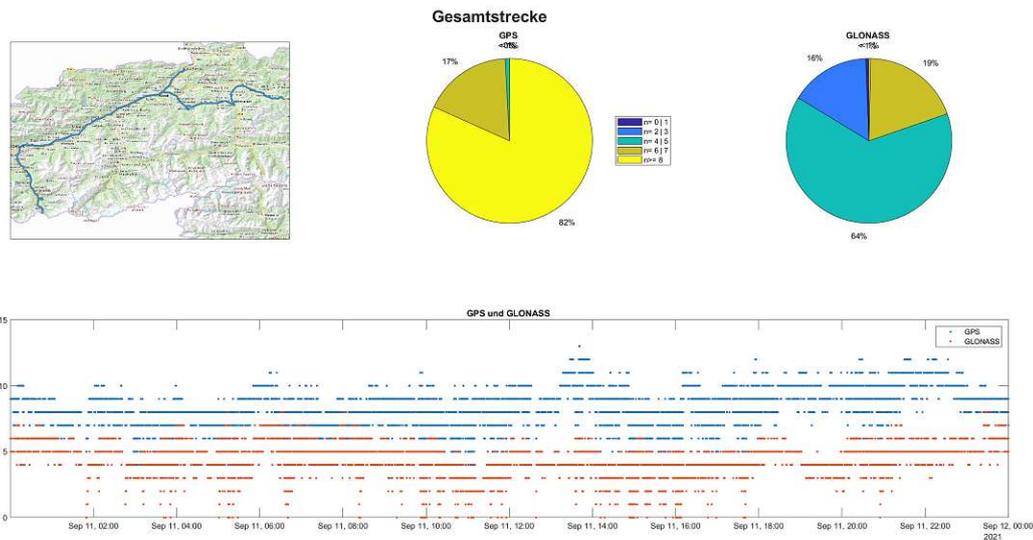


Abbildung 7.6: Zeitliche Verteilung und relative Häufigkeiten der Anzahl beobachteter GNSS-Satelliten (Spur Trn142540)

Die Zeitreihe aus obiger Abbildung 7.6 präsentiert die Anzahl sichtbarer Glonass bzw. GPS-Satelliten und erlaubt einen ersten Blick auf die Variabilität der Anzahl sichtbarer Satelliten. Es besteht hier bereits die Möglichkeit Rückschlüsse über die Sichtbarkeitsverteilungen zu ziehen. So sind in 99% aller Beobachtungsepochen 6 oder mehr GPS-Satelliten zugleich sichtbar. Nur aus dem Beobachtungsfile heraus ist jedoch noch kein Lagebezug herzustellen. Das führt zu dem Problem, dass man gute respektive schlechte Beobachtungen zwar zeitlich, aber nicht räumlich detektieren kann. Da das TFZ über den gesamten Beobachtungszeitraum nicht zwangsläufig zu selben Uhrzeiten dieselben Strecken befuhrt, kann diese Spur in weiterer Folge auch nur einzeln und nicht gemeinsam mit anderen Spuren ausgewertet werden. In den folgenden Abschnitten wird geschildert, wie man die beiden Probleme durch die Herstellung des Lagebezuges lösen konnte.

7.2.2 Szenario II: Teilstrecken

Mittels der Webapplikation des kanadischen *Canadian Spatial Reference System (CSRS) PPP services*⁵ wurden aus den gewählten Beobachtungsfiles PPP-Lösungen (vgl. 4.3) im ITRF2010 berechnet. Als Ergebnis erhält man eine Positionsdatei (Trn142540.pos), deren mit Zeitstempel versehenen Koordinaten analog zu den Beobachtungen im Sekundentakt vorliegen und somit bis zu 86400 Positionen am Tag beschreiben. Erst diese liefern Informationen über die zeitabhängigen Positionen des jeweiligen TFZ, welche in den zuvorigen (vgl. 7.4) und folgenden Abbildungen Eingang finden.



Abbildung 7.7: Räumliche Verteilung beobachteter GPS-Satelliten-Häufigkeiten

Mit den Positionsdateien ist es nun möglich Lage, Zeitpunkt und Sichtbarkeiten zu vereinen. Am Beispiel Trn142540 in Tirol erkennt man, dass auf der Brennerstrecke (Innsbruck-Brenner) weniger Satelliten sichtbar sind, als auf der Salzburg-Tiroler-Bahn (Wörgl-St.Johann). Aber auch im Inntal scheinen westlich von Wörgl weniger Satelliten sichtbar zu sein, als im Norden.

⁵<https://webapp.csrscs-nrcan-rncan.gc.ca/geod/tools-ouils/ppp.php>

Um diesem ersten Eindruck analytisch nachzugehen, wurde die Referenzstrecke in Teilstrecken unterteilt, wobei Innsbruck und Wörgl als Knoten fungieren. So erhält man insgesamt 4 Teilstrecken:

Brennerbahn:	Brenner	Innsbruck	IB
Unterinntalbahn:	Innsbruck	Wörgl	WI
Unterinntalbahn:	Wörgl	Kufstein	KW
Salzburg-Tiroler-Bahn:	Wörgl	St. Johann	JW

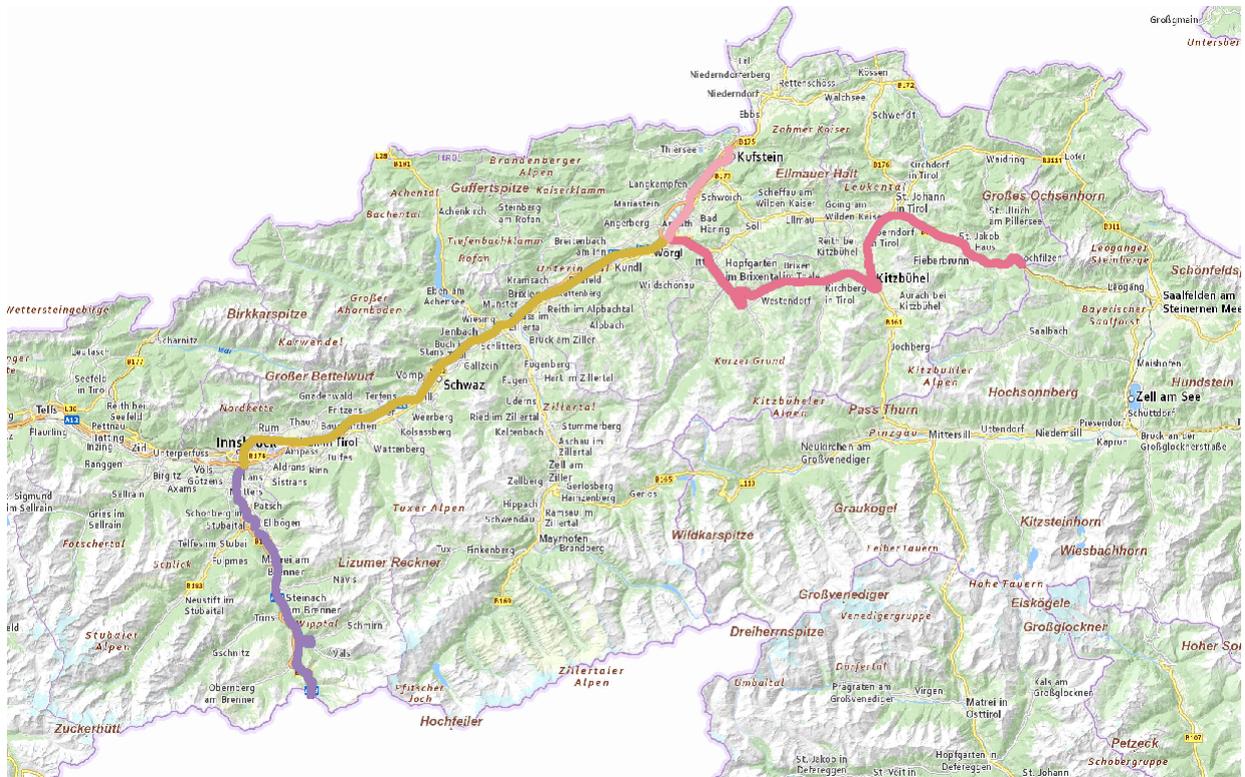


Abbildung 7.8: Unterteilung der Referenzstrecke Tirol

Die obige Kategorisierung lässt sich natürlich an den um Lageinformationen ergänzten Eingangsdaten anbringen, wodurch die Zeitreihen ebenso in die 4 Teilstrecken geschnitten werden können (vgl. Abb. 7.9). Dies erlaubt Rückschlüsse über die zeitliche Verteilung der Beobachtungen zu ziehen. Ebenso kann abgeleitet werden, wie oft eine Strecke befahren wurde. Bei obiger Abbildung kann zum Beispiel davon ausgegangen werden, dass am besagten Tag der Brenner zweimal befahren wurde.

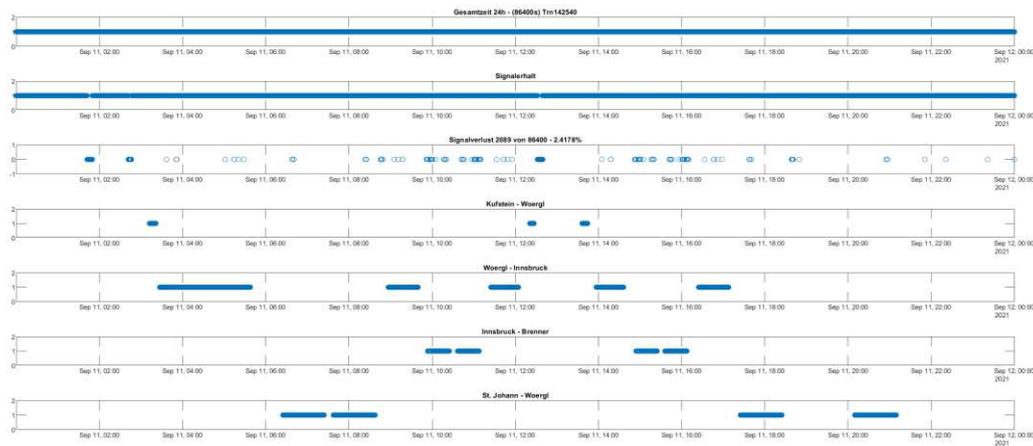


Abbildung 7.9: Streckenbefahrung nach Teilstrecken

Von wesentlich größerem Interesse, als die rein zeitliche Verteilung, ist für die Sichtbarkeitsanalyse jedoch lagebedingte Unterschiede in den Sichtbarkeiten festzustellen, welche man durch teilstreckenbezügliche Auswertung zum Ausdruck bringen kann. In Tabelle 14 wird teilstreckenweise aufgeschlüsselt, welchen Anteil [%] die auf die einzelnen Beobachtungen bezogenen Satellitensummen (0 bis 15) an der teilstreckenweisen Gesamtbeobachtungszahl einnehmen. Zum leichteren Verständnis wird Tabelle 14 am Ende des Abschnittes auch in den Abbildungen 7.10 und 7.11 zusammengefasst.

GPS																	
Σ_{sat}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ_{obs}
WI	0	0	0	0.01	0.07	0.6	4.16	19.01	41.01	27.73	6.98	0.42	0	0	0	0	100
IB	0	0	0	0.04	0.41	3.1	13.33	30.49	37.28	13.7	1.58	0.07	0	0	0	0	100
JW	0	0	0	0.01	0.04	0.48	4.47	14.47	32.09	28.77	15.93	3.54	0.2	0	0	0	100
KW	0	0	0	0	0	0.22	1.31	25.11	26.93	19.72	15.14	8.52	2.91	0.15	0	0	100

GLONASS																	
Σ_{sat}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ_{obs}
WI	0.46	0.49	2.98	17.52	38.72	29.8	9.19	0.79	0.05	0	0	0	0	0	0	0	100
IB	0.59	1.64	16.09	32.85	29.17	13.04	6.62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
JW	0.06	0.16	1.69	7.35	25.96	44.81	17.25	2.25	0.46	0	0	0	0	0	0	0	100
KW	0	0.22	0.44	6.04	43.23	38.28	11.79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Σ_{sat}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ_{obs}

Tabelle 14: Gesamter Sichtbarkeitsanteil aller GNSS-Satellitensummen

Nach diesem feinmaschigen Aufteilen der Zeitreihe nach Teilstrecken (Tab. 14) kommt man erneut zum Ergebnis, dass die zwei konträrsten Beispiele die Strecken Innsbruck-Brenner und St.Johann-Wörgl darstellen, wodurch sich die im vorhergehenden Abschnitt bereits optisch wahrgenommenen Unterschiede im Streckenverhalten bestätigen lassen.

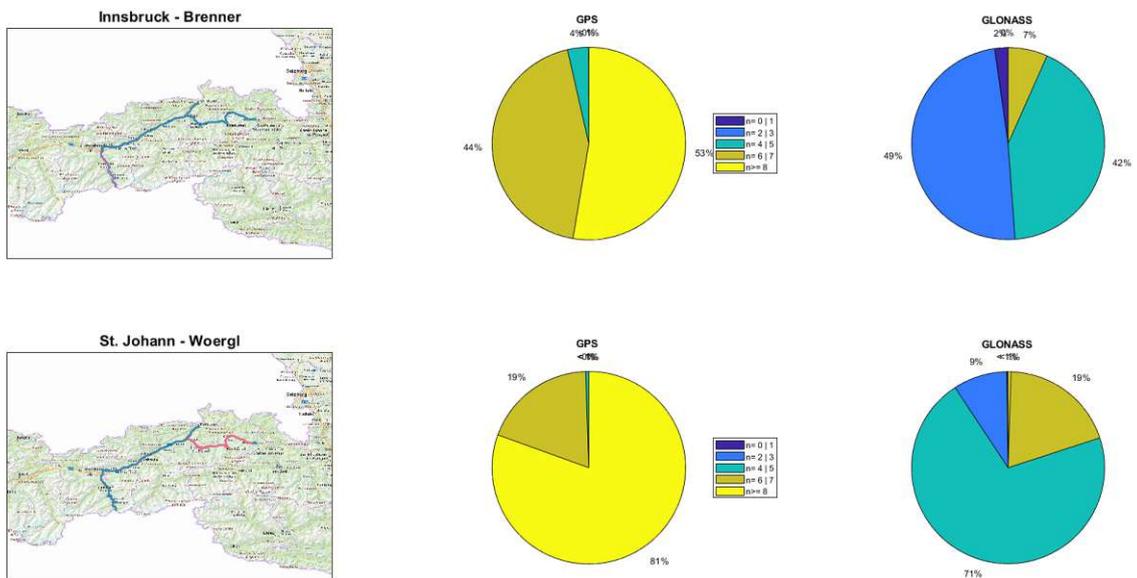


Abbildung 7.10: Sichtbarkeitsanteil klassifizierter GNSS-Satellitensummen nach Teilstrecken (I)

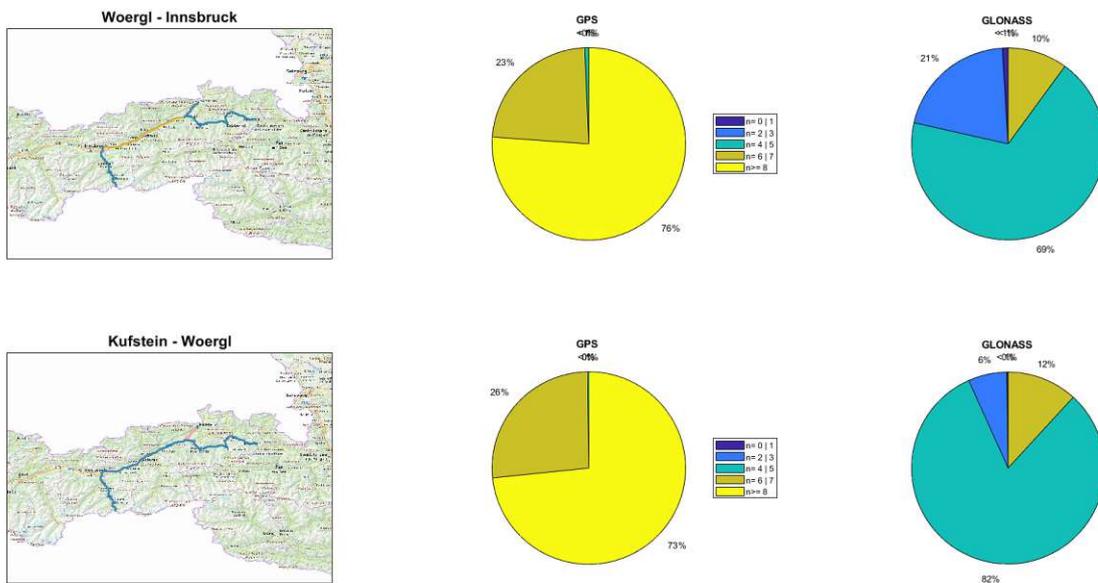


Abbildung 7.11: Sichtbarkeitsanteil klassifizierter GNSS-Satellitensummen nach Teilstrecken (II)

Es könnte jedoch verfrüht sein, bereits daraus absolute topographische Zusammenhänge abzuleiten, da ja die Elevationen und Azimute der Satelliten und somit deren Sichtbarkeit von genereller zeitlicher Variabilität ist. Es ist daher notwendig, eine Möglichkeit zu finden, nicht nur eine, sondern alle Beobachtungen in die Analyse einfließen zu lassen. Dies erfolgte durch eine weitaus feinere Segmentierung der Referenzstrecke und wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

7.2.3 Szenario III: Segmentierung

Durch eine engmaschige Regionalisierung des Interessensgebietes wurde die Möglichkeit geschaffen die Anzahl und Entwicklung der sichtbaren Satelliten über den gesamten Beobachtungszeitraum statistisch auszuwerten. Das besagte Gebiet wurde hierbei in 10x10 km² große Kacheln aufgeteilt. Die bereits mit ihrer errechneten Position verknüpften 38 Beobachtungen können nun in die jeweils 14 Zonen aufgeteilt werden, wodurch man als Ergebnis 532 Beobachtungssequenzen erhält.

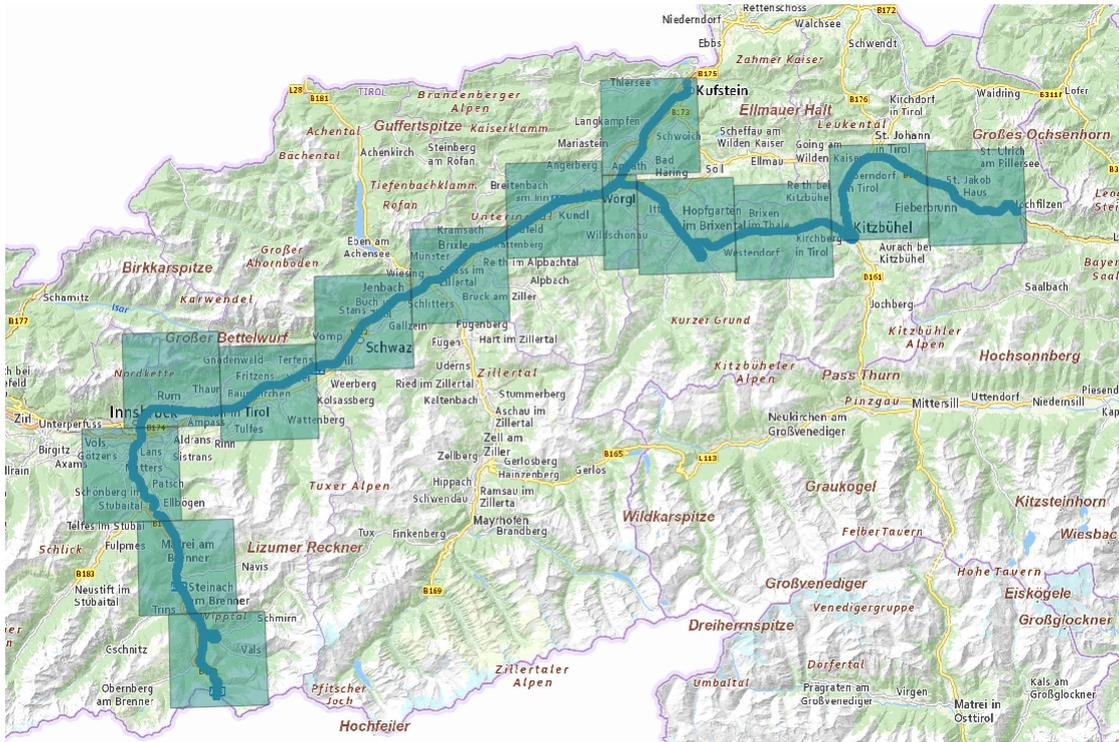


Abbildung 7.12: Zonengrenzen der Strecke Tirol

Die Segmentierung hat den wesentlichen Vorteil, dass sowohl das Beobachtungsverhalten, als auch dessen Veränderungen über den gesamten Zeitraum bestimmt und berücksichtigt werden können. Eine einfache Darstellungsweise kann dabei zonenweise mittels Histogrammen erfolgen (vgl. Abb. 7.13). Man erkennt hier leicht, welche Gebiete an welchen Tagen womöglich gar nicht befahren wurden oder umgekehrt, an welchen Tagen vermehrt Beobachtungen stattfanden. Dies kann einer Mehrfachbefahrung, aber auch einem längeren statischen Verharren zugrundeliegen.

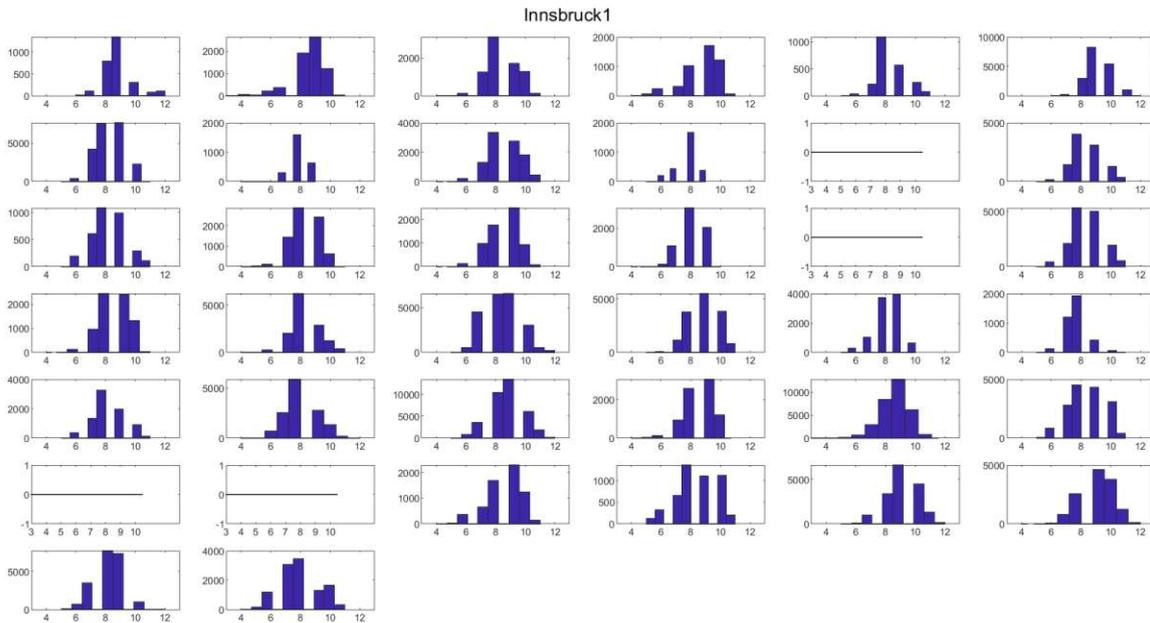


Abbildung 7.13: Satellitensummen (x-Achse) und Anzahl ihrer Beobachtungen (y-Achse) in Zone *Innsbruck1* über sämtliche DOY

Bereits aufgrund der absoluten Histogramme ist anzunehmen, dass das normierte Verhalten über den gesamten Zeitraum nur leicht variiert. Durch Überlagerung aller Tagesspuren innerhalb einer Zone ist jedenfalls festzustellen, dass sich die grundsätzlichen Sichtbarkeiten nicht allzu radikal verändern. (Die beiden Grafiken beziehen sich auf das Segment *Innsbruck I*, es ist jedoch auch bei den anderen Zonen ein relativ ähnliches Verhalten zu bemerken.)

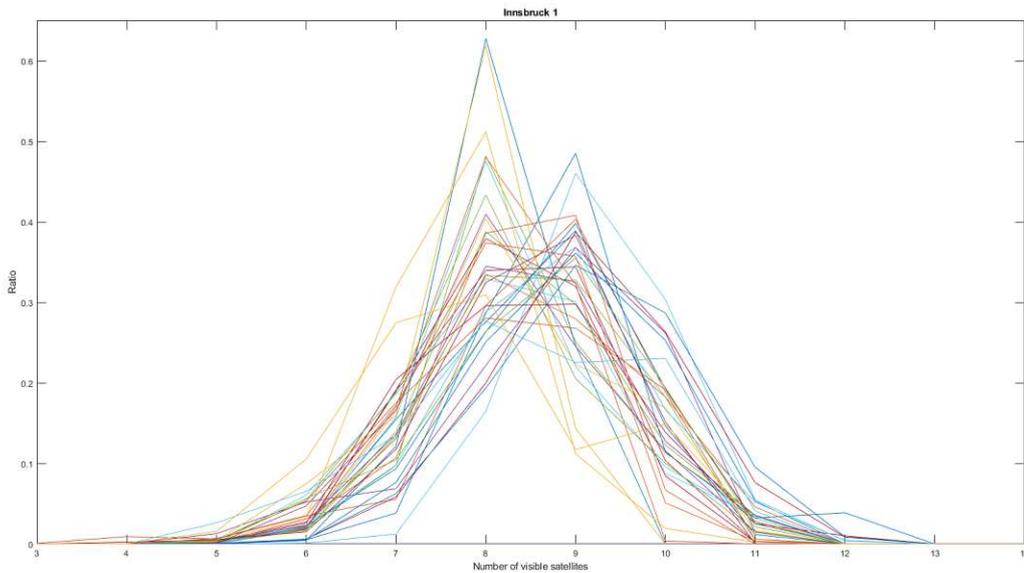


Abbildung 7.14: Überlagerung aller Satellitensummen über den gesamten Beobachtungszeitraum der Zone *Innsbruck1*

Um die Annahme einer Homogenität zu verifizieren oder gegebenenfalls falsifizieren zu können, wurden verschiedene Varianten durchgespielt, wobei als Hauptunterteilung eine kontinuierliche, sowie eine diurnale (tagesabhängige) Betrachtung fungieren:

- **Bei der kontinuierlichen Betrachtung** wurden alle Beobachtungen innerhalb einer Zone gleich gewichtet, aufsummiert und statistische Kennwerte daraus bestimmt.

- **Die diurnale Betrachtung** berücksichtigt die nach DOY variierenden Längen zonaler Beobachtungsperioden (zwischen ein paar Minuten und mehreren Stunden). Die Kennwerte werden zwar ebenso bestimmt, jedoch zonenweise und dann gemittelt. Dadurch erfahren die Beobachtungen eine Gewichtung, die jedem Tag die gleiche Wertigkeit zuspricht. Beobachtungsfreie Tage wurden dabei selbstverständlich ignoriert.

Zunächst wurden Versuche mit Streuungsparametern als statistische Kennwerte in Erwägung gezogen. Dabei wurden bei der Wahl der Eingangsparemeter zunächst verschiedene Selektionen durchgeführt, indem erst die originalen, dann über Intervalle von 30 Sekunden geglättete Zeitreihen herangezogen wurden.

Es erweist sich jedoch als sinnvoller, für die im Abschnitt 8 durchgeführte Korrelation Quantilen heranzuziehen. Da es sich dabei um Lageparameter handelt, werden kurzweilige Abweichungen ohnedies herausgefiltert und ein etwaiger Unterschied zwischen den originalen und geglätteten Datensätzen minimiert. Daher kann die Ermittlung mit den ungeglätteten Zeitreihen erfolgen. Um einen möglichst konservativen Ansatz beizubehalten, wurden neben dem 0.5er Quantil (Median) zur Orientierung, das 0.1er und das 0.05er Quantil bestimmt. Letztere beiden bestimmen die Mindestanzahl sichtbarer Satelliten, die in 90% bzw. 95% aller Beobachtungen der Zone sichtbar sind.

Die Ergebnisse bei reiner Betrachtung von GPS-Satelliten sind in untenstehender Tabelle angeführt:

Kontinuierlich				Diurnal			
Region	Quantil			Quantil			Region
	0.05	0.1	0.5	0.05	0.1	0.5	
Brenner1	5	5	6	5	5.5	6.5	Brenner1
Brenner2	6	6	8	5.6	5.9	7.4	Brenner2
Brenner3	6	7	9	6.3	6.7	8.3	Brenner3
Innsbruck1	7	7	9	6.8	7.1	8.4	Innsbruck1
Innsbruck2	7	7	8	6.9	7.2	8.5	Innsbruck2
Innsbruck3	7	7	9	6.8	7.1	8.5	Innsbruck3
Innsbruck4	6	7	8	6.3	6.8	8.2	Innsbruck4
Innsbruck5	7	8	9	7.2	7.8	8.7	Innsbruck5
Kufstein	7	7	9	6.8	7.2	8.6	Kufstein
Woergl1	6	7	8	6.2	6.8	8.2	Woergl1
Woergl2	7	7	9	6.8	7.3	8.5	Woergl2
Woergl3	7	7	9	6.7	7.1	8.7	Woergl3
Woergl4	7	7	9	7.2	7.6	8.8	Woergl4
WoerglBhf	8	8	9	7.5	7.8	9.1	WoerglBhf

Tabelle 15: Bestimmung der zonenweisen Quantilen bzgl. GPS

Man kann hier durchaus zur Annahme kommen, dass, mit Ausnahme des Brenners, kaum Unterschiede in den Sichtbarkeiten festzustellen sind. Welche Auswirkungen die Wahl der Quantilen jedoch auf Visibilitätsanalyse haben, wird im Abschnitt 8 sichtbar. Die in diesem Abschnitt 7.2 generierte Datenaufbereitung und damit gewonnenen Erkenntnisse über das Sichtbarkeitsverhalten im Großen, wie im Kleinen, konnten nun bei der Selektion und Generierung möglichst realitätskonformer Modelle angewandt werden.

7.3 Signalsimulation

Wie in Abschnitt 6 beschrieben, können die Einstellungen bei der Simulationserstellung am GIP-SIE Signalsimulator sowohl auf dem GUI, als auch direkt auf dem dahinterstehenden Scenario File vorgenommen werden. Die mittels CSRS berechneten PPP-Positionen (vgl. Abschnitt 7.2.2) wurden als hypothetische Receiverstandpunkte für die Simulation herangezogen (vgl. Abb. 6.2), wobei die Implementation aufgrund der großen Anzahl (bis zu 86400 virtuelle Standpunkte) via *python* direkt am Scenario-File vorgenommen wurde.

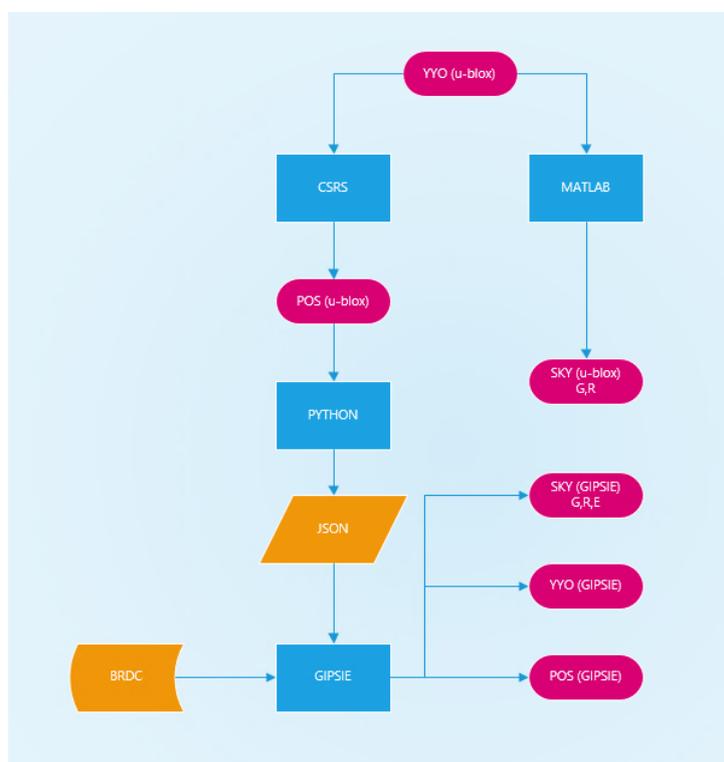


Abbildung 7.15: Workflow Signalsimulation

Aufgrund von gelegentlichen Beobachtungslücken, aber auch aufgrund weiterer Auslassungen bei der PPP-Berechnung mussten die Zeitpunkte der Eingangsdaten vermerkt werden. Das liegt daran, dass GIP-SIE nur ein durchgehende sekundengetaktete Simulation vorsieht und die aus den realen Beobachtungen stammenden Positionen danach gefiltert werden mussten.

Für die spätere Auswertung wurde neben den gemessenen Referenz-GNSS GPS und GLO-NASS auch Galileo simuliert, wobei neben der korrekten Simulationsperiode auch die Ephemeriden vorgegeben werden mussten. Letzteres erfolgte durch manuelles Einlesen der entsprechenden Navigationsnachrichten im GUI.

Da die Referenzstrecken eine Länge von mehreren Zehnerkilometern aufweisen (vgl. Abschnitt 7.1) und an einem DOY gelegentlich mehrfach befahren wurden, konnten für die Sichtbarkeitsanalyse *hier* fehlerbedingte Abweichungen der Positionsbestimmung in der Simulation vernachlässigt werden.

Es kann weiters bereits im Zuge der Simulation eine Elevationsmaske festgelegt werden. Dies erfolgte für diese Arbeit bei der Gesamtstreckenanalyse (Szenario I) über den gesamten Beobachtungszeitraum mit den Werten 0°, 5°, 10°, 15° und 20°. Hierbei wurden Beobachtungs- und Positionsfiles auf Basis der Elevationseinstellungen generiert. Im Zuge der Unterteilungen und Segmentierungen (Szenario III) wurde jedoch dazu übergegangen, auf die Präkonfiguration der Elevationsmaske zu verzichten und die SKY-Files zu verwenden, welche sämtliche Azimute und Elevationen sichtbarer und nicht sichtbarer Satelliten enthalten. Schlussendlich wurden aus den erstellten Ergebnisfiles (Tab. 13) die Dateien *.pos, *.YYO und *.sky für die Weiterverarbeitung herangezogen.

8 Visibilitätsanalyse

Das Hauptziel dieser Analyse ist weiterhin der Erhalt realistischer Galileo-Sichtbarkeitsszenarien für die ausgewählten Bahnstrecken. Dafür mussten vorerst die Simulationen mit den *wahren* Glonass- und GPS-Beobachtungen durch das Setzen unterschiedlicher Elevationsmasken in Einklang gebracht werden, wobei hier die Erläuterungen im Sinne der Kontinuität erneut auf Basis der in Abschnitt 7.2.1 vorgestellten Spur Trn142540 erfolgen.

8.1 Tirol

8.1.1 Szenario I: Gesamtstrecke

Genau wie bei der Auswertung des Beobachtungsfiles (vgl. Abschnitt 7.2) können auch bei der Simulation die sichtbaren Satelliten zu jedem Zeitpunkt aufsummiert und Zeitreihen erstellt werden. Zuvor wurden die Simulationen jedoch nach den 5 verschiedenen Elevationsmasken gefiltert und kategorisiert. Vergleicht man das Verhalten der Glonass und GPS-Satelliten, so muss festgestellt werden, dass ihre Sichtbarkeiten bezüglich der gesetzten Elevationsmasken stark divergieren. In Abbildung 8.1 wird dargestellt wie eng die Elevationsmasken gesetzt werden müssen, damit die simulierte Anzahl an Satelliten jener der beobachteten Satelliten entspricht.

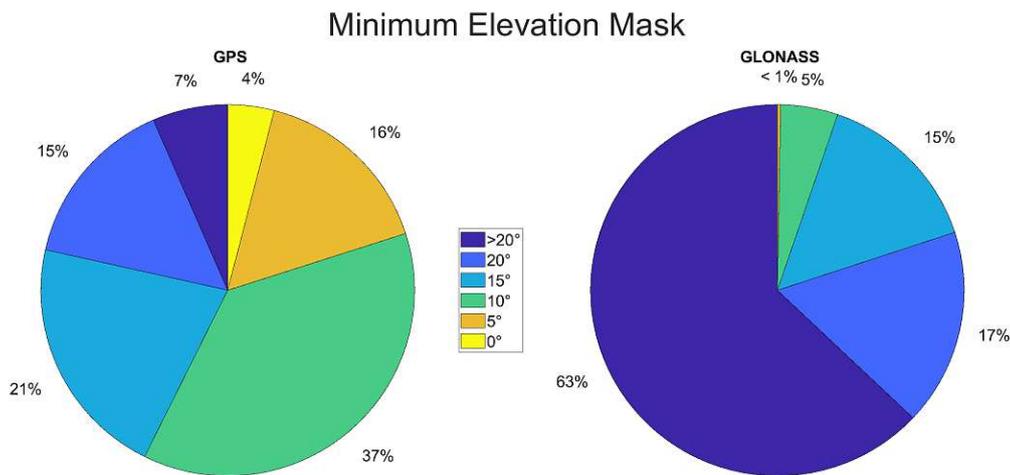


Abbildung 8.1: Grenzen der Elevationsmasken, die benötigt werden um simulierte und gemessene Beobachtungen in Einklang zu bringen, sowie deren relativer Anteil an der Gesamtbeobachtungszahl

Während bei mehr als der Hälfte aller Beobachtungen bereits beim Setzen einer Elevationsmaske bis 10° die beobachtete GPS-Satellitenanzahl erreicht werden kann, geben Glonass-Simulationen nach Anwendung von Elevationsmasken von 10° nur 5% aller Beobachtungen bzgl. der Glonass-Satellitensummen korrekt wieder. Dies lässt sich nicht nur an den relativen Werten obigen Diagrammes, sondern auch in der Zeitreihe leicht nachweisen. Da sich die Zahl sichtbarer Satelliten bei den durchgeführten u-blox-Beobachtungen sehr häufig und rasch ändert (vgl. Abb. 7.6) wird in den folgenden Zeitreihen zur Veranschaulichung eine Mittelung über eine Zeitspanne von jeweils 300 Sekunden vorgenommen. Man erkennt sofort, dass die gemittelten GLONASS-Sichtbarkeitssummen beinahe durchgehend geringer ausfallen, als die unter Anwendung einer Elevationsmaske von 20° simulierten GLONASS-Sichtbarkeitssummen.

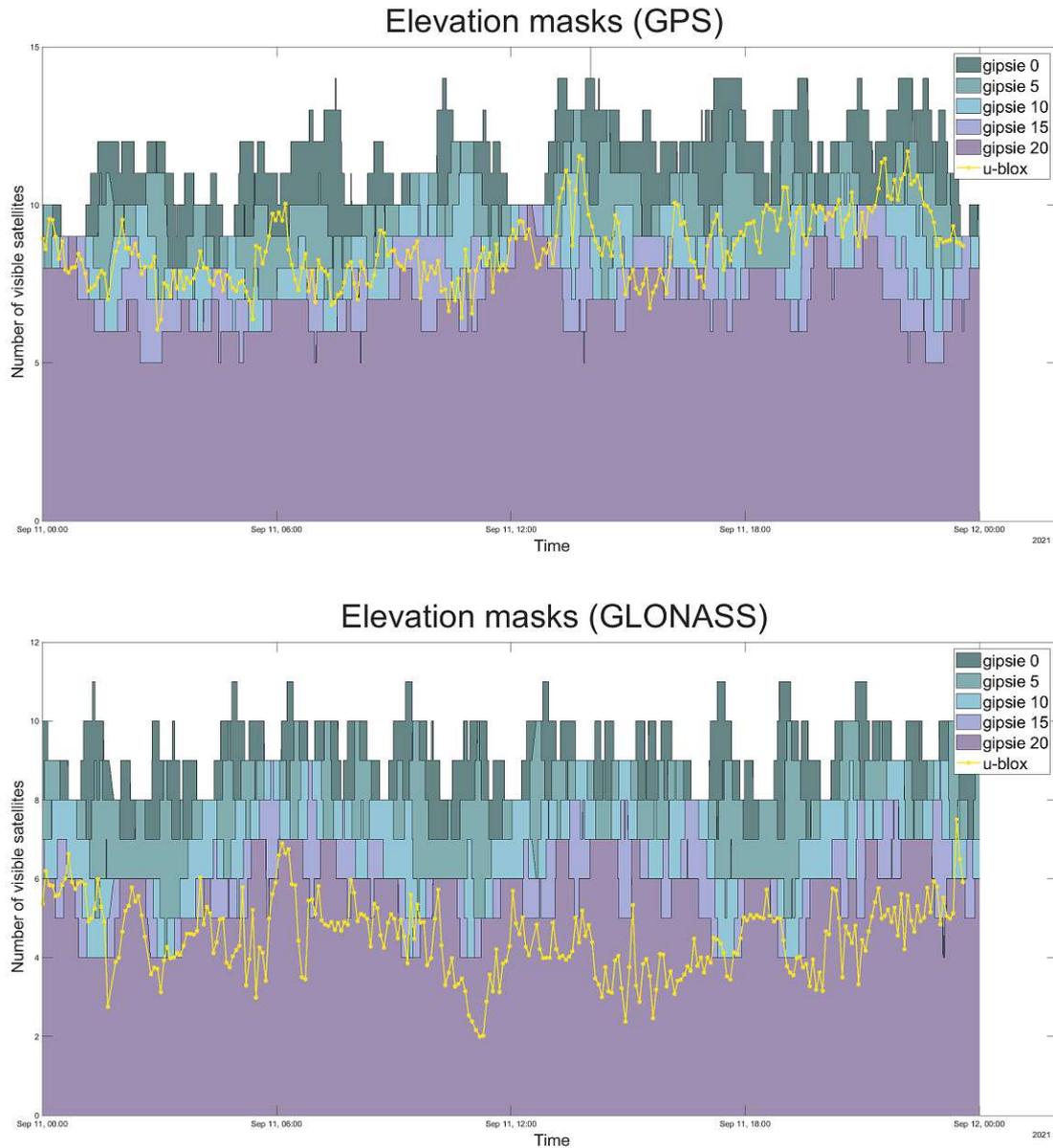


Abbildung 8.2: Gegenüberstellung der nach Elevationsmasken klassifizierten simulierten Satellitensichtbarkeitssummen (gipsie 0 bis 20) und der Summen tatsächlich beobachteter Satelliten (u-blox). Die beobachteten Summen sind jeweils über eine Zeitspanne von 300 Sekunden gemittelt.

Da insbesondere im alpinen Raum nicht auszuschließen ist, dass es sich um eine unglückliche Konstellation handelt, wurden die anderen Zeitspuren der Strecke analysiert. Diese führen zu sehr ähnlichen Ergebnissen, weswegen eine zusätzliche Strecke in der Südoststeiermark analysiert wurde, welche durch ihre weiträumige und ebenmäßige Topographie besteht.

So verläuft die Strecke von Feldbach nach Fehring (Teil der Steirischen Ostbahn) beinahe geradlinig und es werden auf den etwa 10 Kilometern Distanz keine 30 Höhenmeter zurückgelegt.



Abbildung 8.3: Kontrollstreckenabschnitt zwischen Feldbach und Fehring

Nichtsdestotrotz lässt sich beobachten, dass, obwohl die meisten bis alle (zeitabhängig) GPS-Satelliten, die laut Simulation sichtbar sein sollten, auch in die Messung Eingang finden, eine Vielzahl an Glonass-Satelliten nicht in den Messdaten aufscheinen. Laut der in Abbildung 8.4 dargestellten Situation, müssten, rein nach Elevation beurteilt, mindestens 2, wenn nicht sogar 4 zusätzliche Glonass Satelliten beobachtet werden. Aus der Praxis ist jedoch bekannt, dass oftmals nur Satelliten mit hohem S/N - Verhältnis in die Beobachtung Eingang finden und tendenziell eher Glonass- als GPS- oder Galileo-Satelliten damit ausscheiden. Dieser Effekt der fehlenden Glonassbeobachtungen sollte in Zukunft von ÖBB-Infra und der Firma u-blox abgeklärt werden. In weiterer Folge wird daher bei der Elevationsmaskenbestimmung der Fokus auf die Beobachtung von GPS-Satelliten gelegt. (Anm.: Deswegen entfällt auch in Szenario III (7.2.3) die Tabelle bzgl. der Glonass-Satelliten.)

Gegenüberstellung der simulierten und beobachteten Satelliten

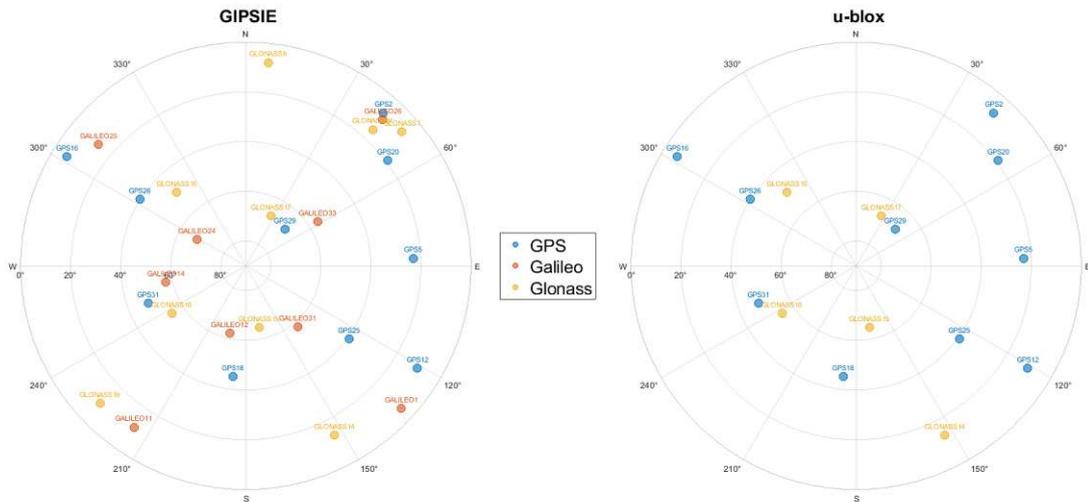


Abbildung 8.4: Skyplot einer Beobachtung des Kontrollstreckenabschnittes Feldbach-Fehring

Nimmt man nun die in Abbildung 8.1 dargestellten Elevationswerte bzgl. GPS als Basis, so erkennt man, dass die Wahl einer Elevationsmaske von 15° bei über 3/4 aller sekundenweise aufgenommenen Beobachtungen jedenfalls zu einer genügenden Übereinstimmung mit den u-blox Streckenbeobachtungen führt. Bei einer Elevationsmaske von 20° wären es sogar über 90%. Mit anderen Worten heißt das, dass in über 90% aller tatsächlich durchgeführten u-blox Beobachtungsepochen gleich viel oder mehr GPS-Satelliten beobachtet wurden, als durch die Elevationsmaskenwahl bei der Simulation zu erwarten wäre. Dieser konservative Ansatz dient dem Zweck eine untere Grenze an sichtbaren Satelliten festzustellen.

Sieht man sich nun die dazugehörigen Simulationen der Galileo-Beobachtungen an (vgl. Abbildungen 8.5 und 8.6), dann erkennt man, dass in beiden Fällen eine beinahe durchgängige Sichtbarkeit von Galileo-Satelliten zu erwarten ist und immer noch über 90 Prozent aller Beobachtungen sogar eine für die rasche Anwendbarkeit genügende Anzahl (mindestens 4) an Satelliten erwarten lassen. Gemäß den Simulationen sind etwa in der Hälfte bis 2/3 der Zeit mehr als 6 Galileo-Satelliten zu erwarten, wodurch auch eine ausreichende Redundanz als gegeben betrachtet werden kann.

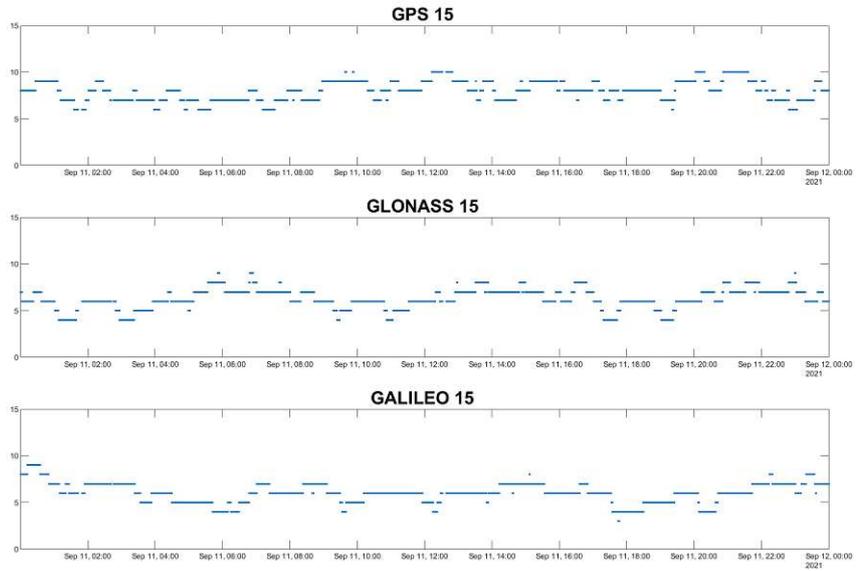
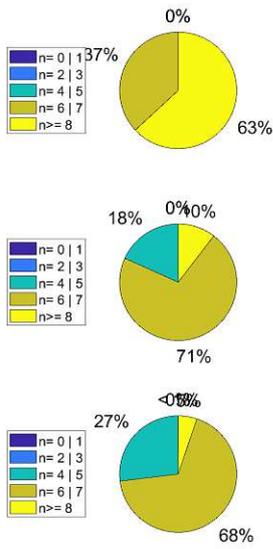


Abbildung 8.5: Simulierte Sichtbarkeiten der Gesamtstrecke nach Anwendung der Elevationsmaske 15°

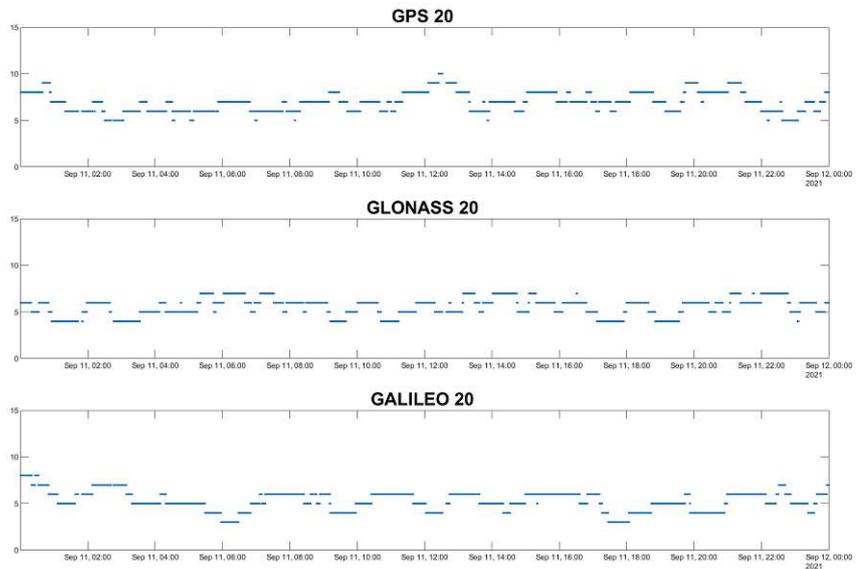
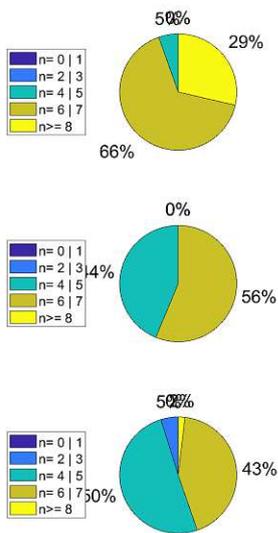


Abbildung 8.6: Simulierte Sichtbarkeiten der Gesamtstrecke nach Anwendung der Elevationsmaske 20°

Zieht man experimentell anstatt der einzelnen sekundenweisen Beobachtungen, über zum Beispiel 300 Sekunden gemittelte Beobachtungen heran, so erkennt man, dass sich diese nahezu in der gesamten Bandbreite mit den Lösungen der ebenso gemittelten, mit 10° maskierten Si-

mulationen decken (Abb. 8.7). Simulationen mit einer Elevationsmaske von nur 10° ließen mit Sichtbarkeiten von mindestens 6 Satelliten in über 80 Prozent aller Beobachtungen auf eine sehr gute Eignung für die Nutzung von HAS schließen.

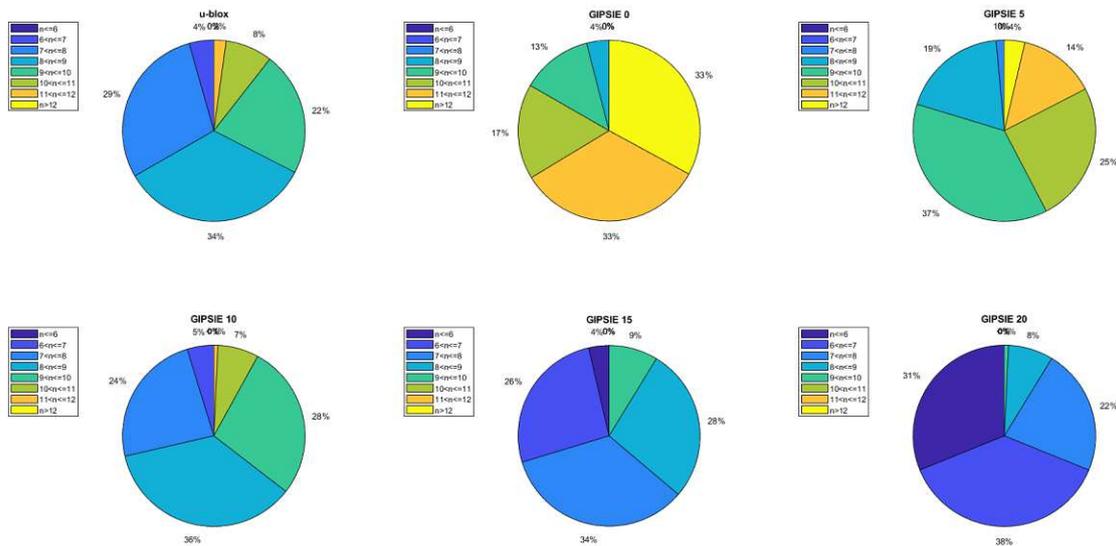


Abbildung 8.7: Gegenüberstellung durchgeführter und simulierter Sichtbarkeiten geglätteter Beobachtungen der Gesamtstrecke

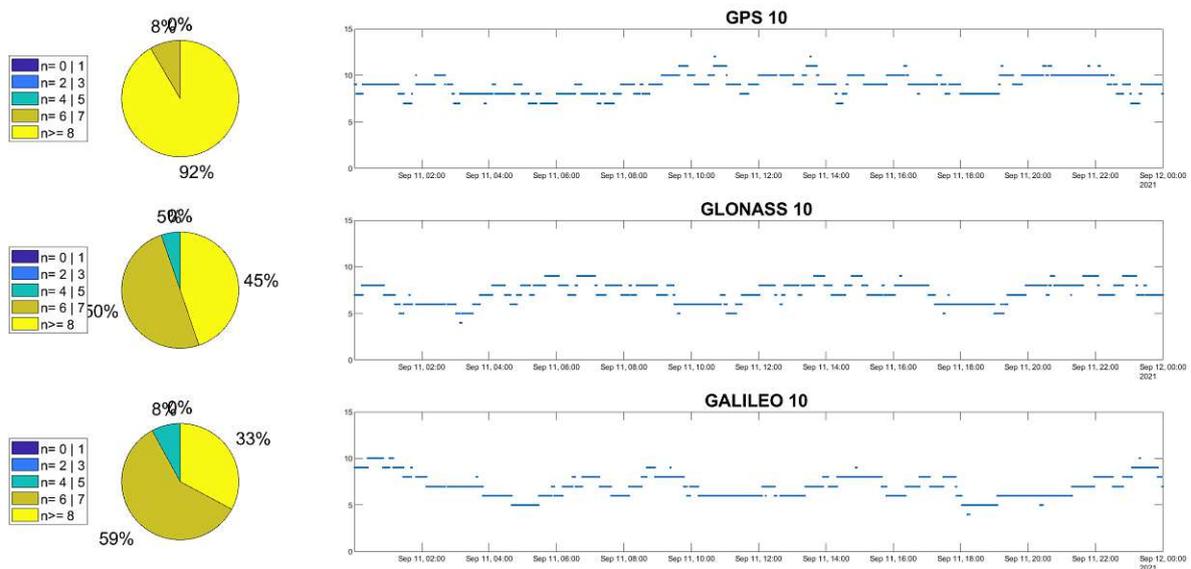


Abbildung 8.8: Simulierte Sichtbarkeiten der Gesamtstrecke nach Anwendung der Elevationsmaske 10°

Untersucht man die simulierten Beobachtungen satellitenweise, lassen sich kontinuierliche parallele Beobachtungen mit ausreichender Überzahl an Galileo-Satelliten erwarten.

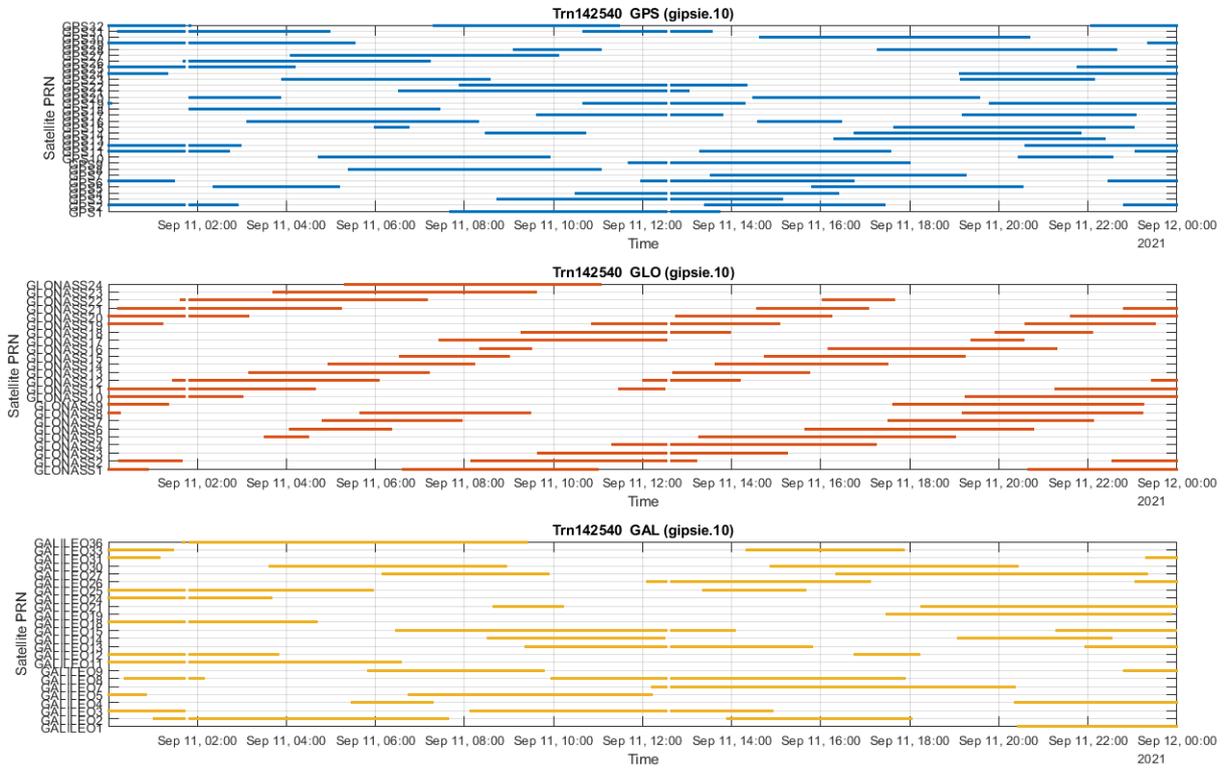


Abbildung 8.9: Taxative Sichtbarkeiten der einzelnen GNSS-Satelliten bezüglich der Gesamtstrecke

8.1.2 Szenario II: Teilstrecken

Die gleiche Methode lässt sich auch auf die 7.2.2 erstellten Teilstrecken anwenden, wodurch für jede Teilstrecke eine eigene Elevationsmaske bestimmt und die Auswertung engmaschiger wird. Auch hier wurden stets die restriktiven Annahmen getroffen, dass die mit Elevationsmasken versehenen Simulationen den Messungen jedenfalls genügen müssen. Es bestätigen sich hier die Beobachtungen aus 7.2.1, dass bei der Brennerbahn als Gebirgsbahn mit höheren Abschattungen zu rechnen ist. Doch selbst diese Einschränkungen lassen weiterhin eine ausreichend hohe beobachtbare Satellitenzahl erwarten. In Abbildung 8.10 sind die Original-GPS-Beobachtungen mit deren simulierten Pendants und ebenso die dazugehörigen simulierten Galileo-Sichtbarkeiten dargestellt. Alle Teilstrecken haben gemein, dass in über 70 Prozent aller beobachteten Epochen mindestens 6 und in den restlichen Epochen jedenfalls nicht weniger als 4 sichtbare Satelliten zu erwarten sind.

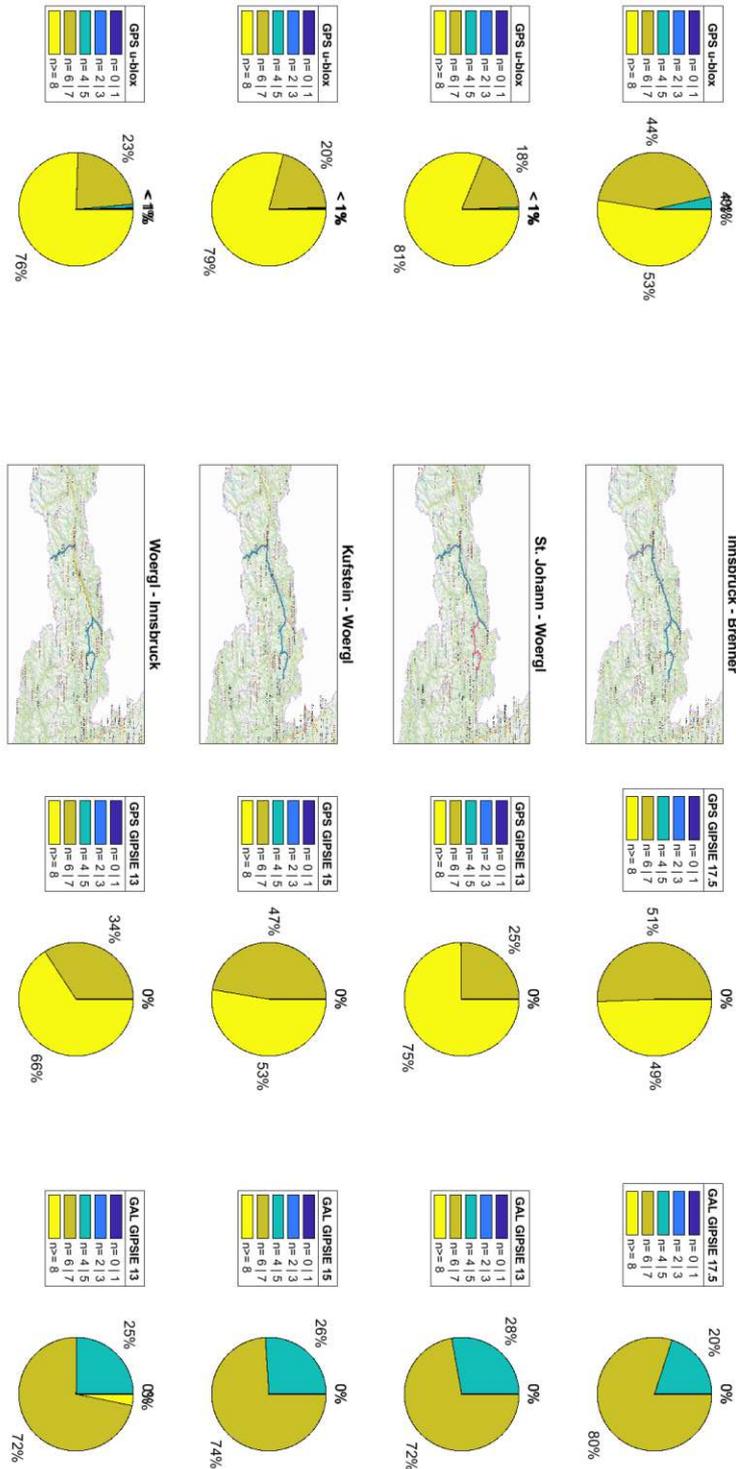


Abbildung 8.10: Ergebnis der Galileo und GPS-Sichtbarkeiten nach Bestimmung der korrekten Elevationsmaske

8.1.3 Szenario III: Segmentierung

Für die Auswertung der Segmentierung wurden die in Abschnitt (7.2.3) erstellten Zonen als eigenständige Receiver in GIPSIE implementiert und eine simultane 24-stündige Beobachtungssession aller Zonen modelliert.

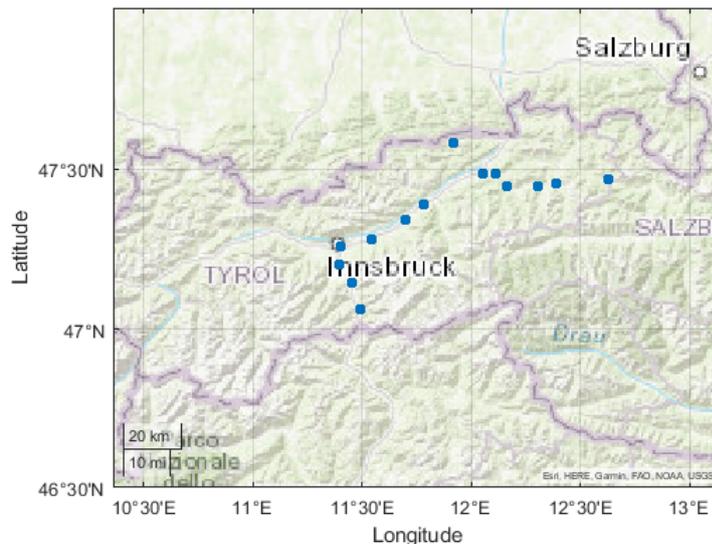


Abbildung 8.11: Simulierte Receiverstandorte bzw. Zonen

Dadurch erhielt man für jede Zone ein eigenes SKY-File mit den sekundenweise abgespeicherten Azimuten und Elevationen zu jedem Satelliten. Dieses kann in Kombination mit den Lösungen aus Abschnitt (7.2.3) Tabelle 15 ausgewertet werden, indem in 1°-Schritten die größtmögliche Elevationsmaske bestimmt wird, mit der ein Erfüllen der Quantillösungen gerade noch möglich ist. Die ermittelten Elevationsgrenzen sind in Tabelle 16 angeführt.

Region	Elevationsmaske	
Brenner1	24	25
Brenner2	19	20
Brenner3	19	15
Innsbruck1	14	15
Innsbruck2	14	15
Innsbruck3	14	15
Innsbruck4	19	15
Innsbruck5	14	10
Kufstein	14	16
Woergl1	19	16
Woergl2	14	16
Woergl3	14	16
Woergl4	14	16
WoerglBhf	9	10
Quantil	0.05	0.1

Tabelle 16: Quantilenbasierte zonale Elevationsmasken

Entgegen anfänglicher Erwartung, haben die engen Werte der Quantilen in Abschnitt 7.2.3 durchaus zu bemerkbaren Unterschieden in den bestimmten Elevationsmasken geführt. Das sei nun anhand der Region Innsbruck4 kurz erläutert: Aus Tabelle 15 ist zu entnehmen, dass mindestens 95% aller u-blox Beobachtungen in der Region Innsbruck4 mindestens 7 GPS-Satelliten erfassen. Bei der Simulation hat die größtmögliche Elevationsmaske, die dieses Ziel gerade noch erreicht, den Wert 19° (Tabelle 16). Bezogen auf das 0.1-er Quantil reicht der Simulation bereits eine Elevationsmaske von 15° um das 0.1er Quantil der Beobachtung zu erreichen.

Wendet man dieses Prinzip über alle Regionen an, so erhält man für jede Zone genau jenen Grenzwert der Elevationsmaske, der das entsprechende beobachtungsbasierte Quantil gerade noch erfüllt. Mit diesen, auf GPS-Beobachtungen basierenden, regionalen und restriktiven Elevationswerten können nun die zu erwartenden regionalen Galileo-Sichtbarkeiten simuliert werden (siehe Abbildungen 8.13 und 8.14). Man kann diese Segmente aber auch wieder zusammenführen und die Gesamtstrecke abbilden (vgl Abbildung 8.12).

Es zeigt sich, dass die auf den Segmenten basierenden Sichtbarkeitssummen in etwa gleich verteilt sind, wie jene der Gesamtstrecke, bei einer durchgängigen Elevationsmaske von 15°. Dass diese jedoch aus regional sehr unterschiedlichen Elevationen resultiert zeigt sich in den Abbildungen 8.13 und 8.14.

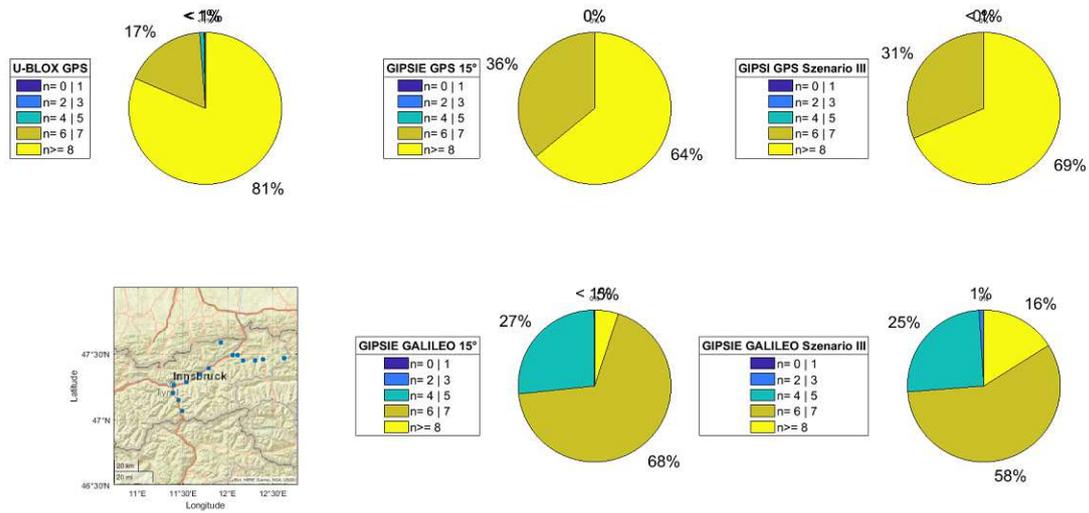
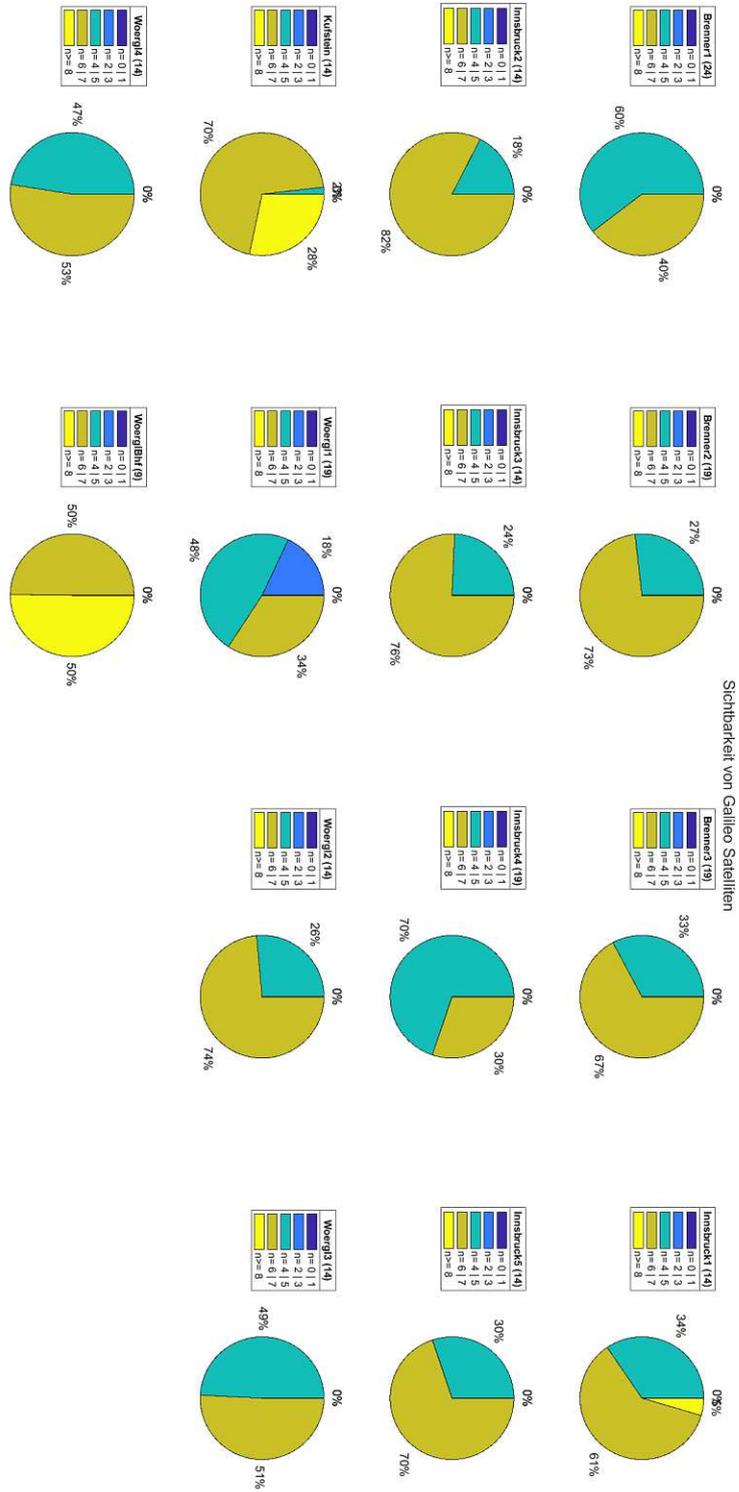


Abbildung 8.12: Vergleich von Messung, Szenario I und Szenario III (Quantile 0.05)

Abbildung 8.13: Zonale Lösungen der Quantilenwahl 0.05



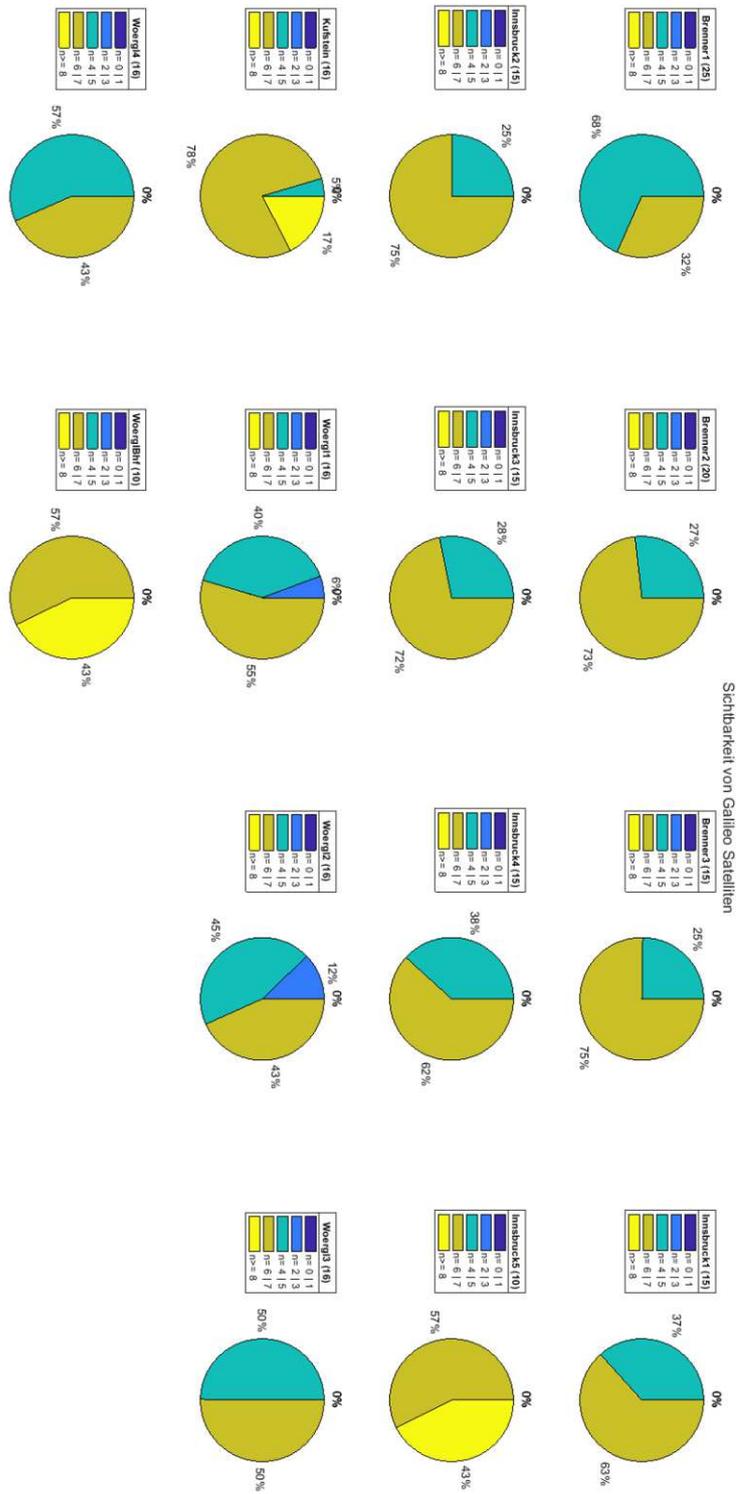


Abbildung 8.14: Zonale Lösungen der Quantilenwahl 0.1

8.2 Steiermark

Die steirische Referenzstrecke zwischen Graz und Bruck/Mur wurde im vorliegenden Datenzeitraum von zwei verschiedenen TFZ je zweimal befahren. In Ermangelung an Beobachtungen (annähernd) gleicher Trassenführungen liegt dieser Abschnitt im Gegensatz zu der Tiroler Strecke nicht als Gesamtstrecke vor. Vielmehr handelt es sich um 4 umfassendere Befahrungen (Abb. 8.15), die teils bis Villach im Südwesten, teils bis Wiener Neustadt im Norden und teils bis Jennersdorf/Gyanafalva bzw. St. Gotthard/Szentgotthárd (HU) im Osten gehen.



Abbildung 8.15: Untersuchungsgebiet (grün) als Subset umfassenderer Beobachtungen (rot)

Die Spuren wurden analog zu den in Szenario II (7.2.2) erstellten Teilstrecken gegliedert und der gesuchte Referenzabschnitt zwischen Graz und Bruck durch Filtern extrahiert, woraus neue Datensätze mit jeweils einigen Tausend Positionen resultieren. Dabei wurden die Filtergrenzen so gewählt, dass die mit längeren Aufenthalten gezeichneten Endbahnhöfe des Interessensgebietes selbst außerhalb liegen (vgl. Abb. 8.15). Die Eckdaten der resultierenden Teilstrecken sind in Tabelle 17 angeführt.

Beobachtungsfile	Beobachtungen	G →	→ G	→ BM	BM →
ST-Trn182530	4717	04:07:25	06:27:54	04:47:58	05:45:59
<i>ST-Trn182580</i>	<i>2993</i>	<i>07:15:31</i>	-	<i>08:07:28</i>	-
ST-Trn202560	4805	04:07:02	06:28:26	04:48:45	05:47:48
ST-Trn202880	4708	04:07:18	06:28:48	04:48:48	05:46:21

Tabelle 17: Eckdaten der resultierenden gefilterten Beobachtungen

8.2.1 Charakteristika

Mit Ausnahme der gefilterten Strecke *ST-Trn182580* begannen und endeten alle resultierenden Strecken in Graz, wobei sie in der Zwischenzeit den Bahnhof Bruck an der Mur anfuhrten. Es handelt sich bei diesen 3 Strecken um kurze Beobachtungsreihen mit einer Dauer von jeweils etwas mehr als 2 Stunden. In weiterer Folge wird die Analyse mit diesen drei Datensätzen fortgesetzt, welche durch einen kurzen Blick auf obige Tabelle auch eine zeitliche Korrelation erahnen lassen. Die Zeitreihe der beobachteten GPS-Satelliten verifiziert diese Korrelation, indem aus der über die Spuren gleichgewandte räumlichen Filterung auch eine gleichwirkende zeitliche Filterung entsteht.

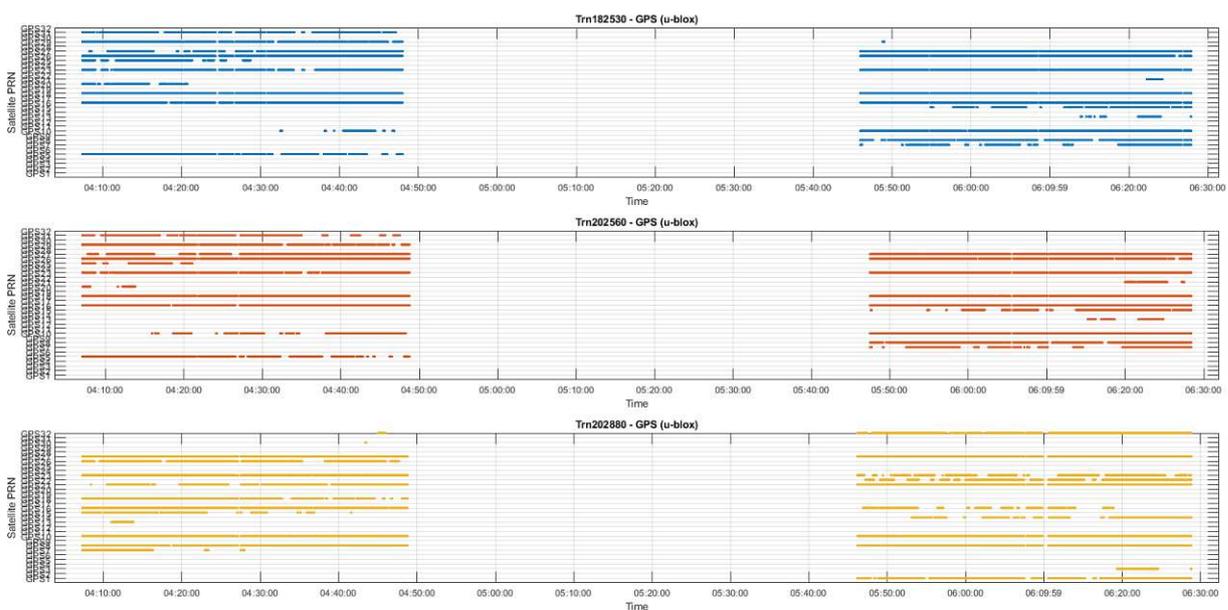


Abbildung 8.16: Beobachtete GPS-Satelliten der 3 räumlich gefilterten Befahrungen der Strecke Bruck an der Mur - Graz

Versucht man dieser Synchronität auf den Grund zu gehen, so kann man mittels der in Grafik 8.17 gezeigten Visualisierung, welche die ersten 10 Sekunden der resultierenden Beobachtungen repräsentiert, erkennen, dass eben 3 der TFZ zur etwa selben Zeit von Graz in Richtung Bruck unterwegs waren. Wie in Tabelle 17 ebenfalls angeführt, erreichten die Züge auch beinahe zur gleichen Zeit (an verschiedenen DOY wohlgermerkt) den Bahnhof Bruck an der Mur - genauer gesagt, das Ende der Filterungsmaske kurz vor Bruck an der Mur. Um den Ansatz der Synchronität über die gesamte Strecke zu verifizieren, wurden die Positionen der 3 Spuren in Zeitreihen übereinandergelegt. Dies bestätigt, dass, auf die gesamte Beobachtungsstrecke bezogen, nur kleine Latenzen zwischen den einzelnen Spuren liegen.



Abbildung 8.17: Beobachtungsstart mit den ersten 10 Beobachtungen aller Spuren

Wenn man nun analog zu Abschnitt 7.2.2 den relativen Anteil der unterschiedlichen GNSS-Satellitensummen der einzelnen Spuren vergleicht, erkennt man eine, trotz durchaus wahrnehmbarer Volatilität in den Glonass-Satellitensummen, relativ gleichbleibende Verteilung der GPS-Satellitensummen (Abb. 8.18).

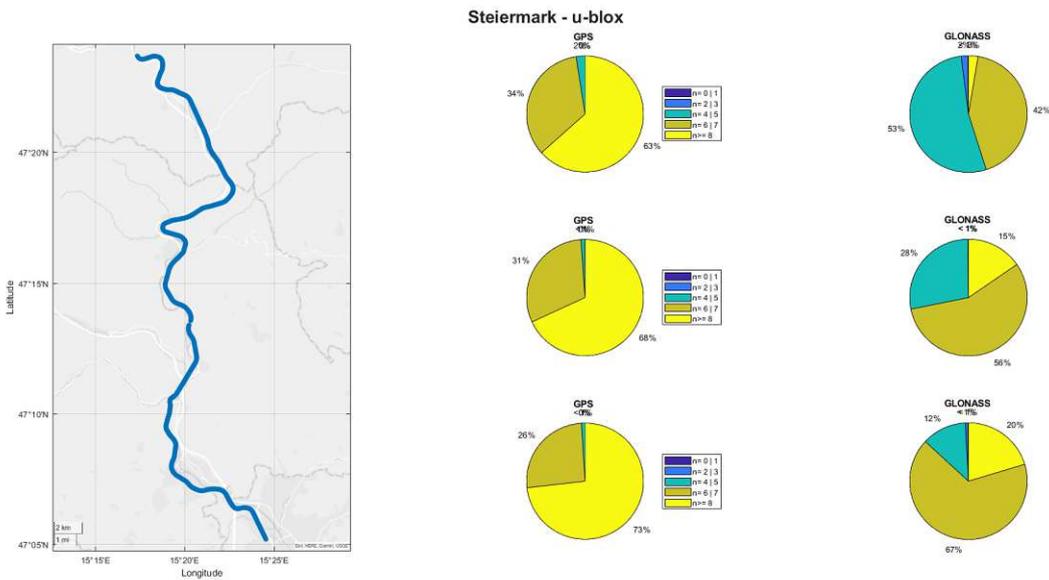


Abbildung 8.18: Anteil unterschiedlicher GNSS-Satellitensummen der Datensätze Trn182530, Trn202560 und Trn202880 (v.o.). Blautöne beschreiben Summen bis zu 5, Gelbtöne beschreiben Summen größer gleich 6 Satelliten.

Während aus obiger Darstellung relative Ähnlichkeiten zwischen den einzelnen Spuren abzulesen sind, folgt aus Abbildung 8.19 eine Gegenüberstellung räumlicher Sichtbarkeiten zu unterschiedlichen DOYs. Bei genauem Betrachten lassen sich so zwar keine gravierenden, aber dennoch wahrnehmbare Variationen auffinden.

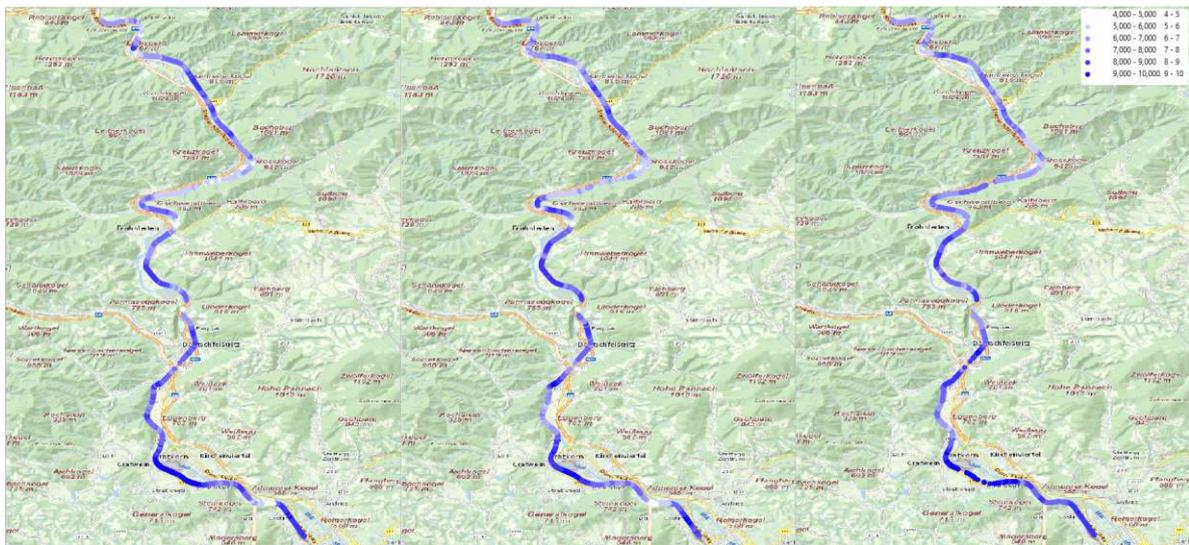


Abbildung 8.19: Anzahl der beobachteten GPS-Satelliten in den Datensätzen Trn182530, Trn202560 und Trn202880 (v.l.). Je dunkler die Spur, desto mehr Satelliten wurden auf der Strecke beobachtet.

8.2.2 Korrelation

All diese Informationen verbindend wurde versucht eine ideale Repräsentantin der Strecke zu kreieren, indem in QGIS mittels Nearest-Neighbouring der Strecke Trn182530 die beiden anderen Strecken angehängt wurden. Dabei wurde eine geometrische Grenze bzw. maximale Distanz von 20 Metern eingezogen. Das bedeutet, dass Punkte, bei denen nicht Beobachtungen aller 3 Spuren in einem Umkreis von 20 Metern liegen, ignoriert wurden. Nun konnten für die verbliebenen erweiterten Punkte jeweils die Mittelwerte aus den drei Spuren berechnet werden. Die Simulation baut nun ebenso auf den hypothetischen Receiverstandorten der Spur Trn182530 auf. Das Ergebnis, analog zur Gesamtstrecke Tirols erstellt, ist unten angeführt.

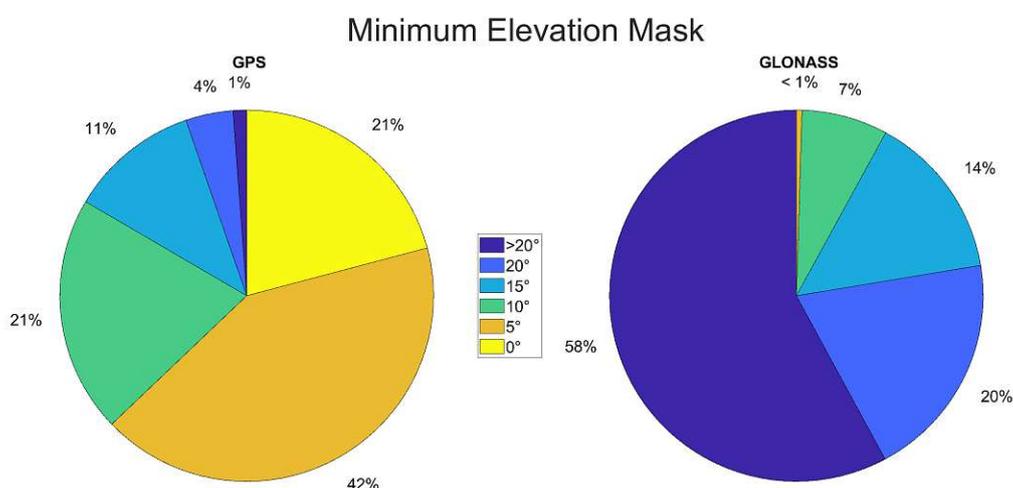


Abbildung 8.20: Konservative Elevationsmaskengrenzen zur Herstellung der Konformität zwischen Beobachtung und Simulation (vgl. Abschnitt 8.1.1)

Es wurden zur Kontrolle auch die Einzellösungen der Spuren verglichen, wobei sich die Abweichungen im Bereich von maximal 5 Prozentpunkten (bei GPS) bewegen. Man erkennt auch hier sofort, dass beim Heranziehen gemittelter Beobachtungen eine weitaus geringere Elevationsmaske eingefordert wird. Es herrscht nämlich beinahe Deckungsgleichheit mit den Lösungen aus den Simulationen mit einer Elevationsmaske von 5°. Dies ist wohl der sehr hohen Variabilität der einzelnen sekundenweisen Beobachtungen geschuldet.

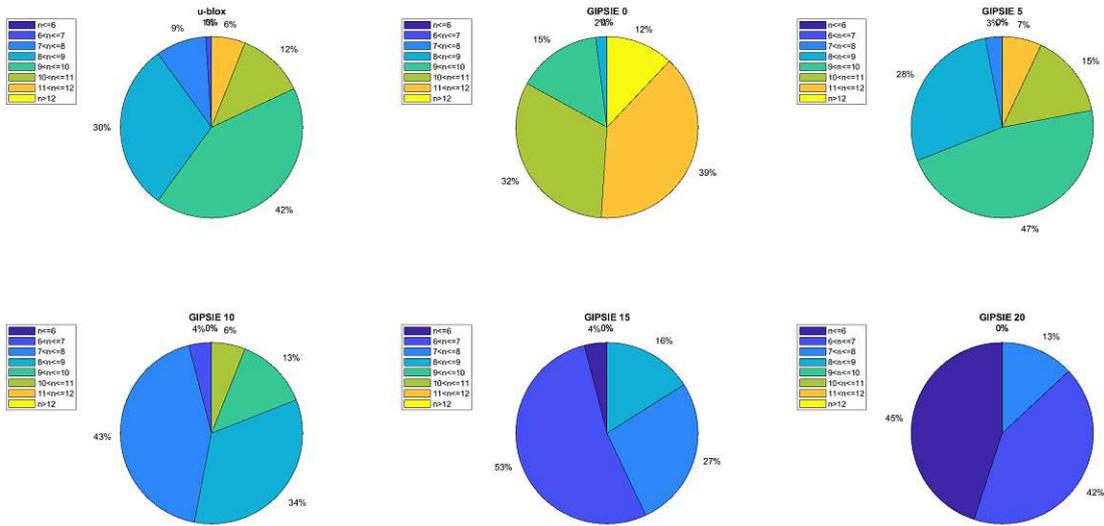


Abbildung 8.21: Geglätteter Gegenüberstellung von Beobachtungen und Simulationen

Um nicht zu viel Redundanz in den Erläuterungen zu schaffen, sei hier ein etwas konservativerer Ansatz mit einer Elevationsmaske von 15° einem etwas ambitionierteren Ansatz von etwa 10° gegenübergestellt. Selbst beim konservativeren Ansatz sollten die notwendigen Sichtbarkeitsgrenzen für den Galileo-HAS eingehalten werden können, wobei doch ein nicht unwesentlicher Zeitraum in diesem Fall nur 4-5 Satelliten erwarten lässt.

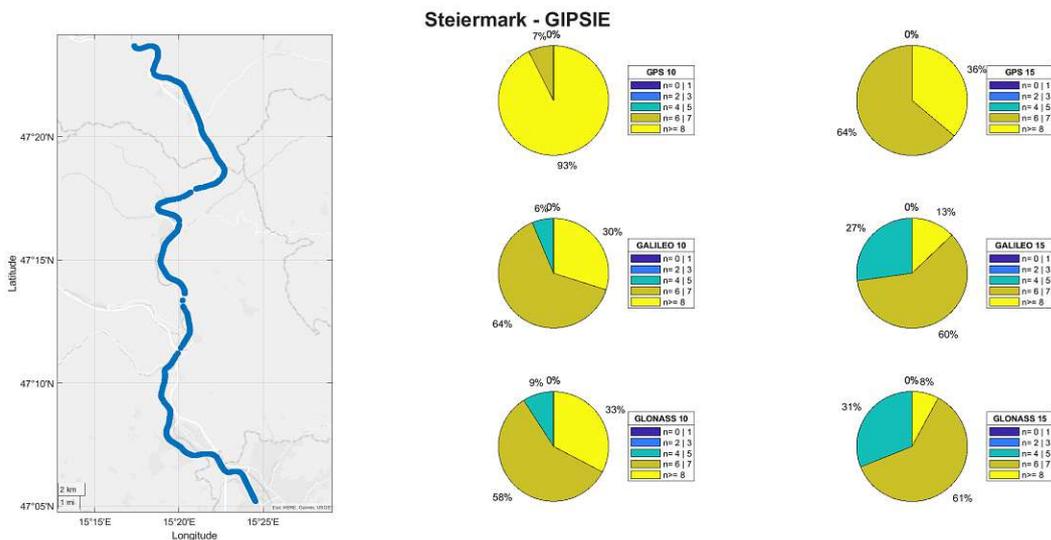


Abbildung 8.22: Simulierte Sichtbarkeiten bei Elevationsmasken 10° und 15°

8.2.3 Fahrtrichtung

Die im obigen Abschnitt, besonders in Tabelle 17 und Abbildung 8.17, präsentierte Synchronität der drei Strecken nutzend, wird der Versuch angestellt, zu analysieren, ob aus den Fahrtrichtungen Abweichungen in der Sichtbarkeit resultieren.



Abbildung 8.23: Die 2 Farbgruppen repräsentieren jeweils die 3 Spuren in eine Richtung (Grüntöne in Richtung Bruck/Mur, Violettöne in Richtung Graz)

Dafür wurden die Spuren zu den in Tabelle 17 rechts dargestellten Uhrzeiten geschnitten und getrennt ausgewertet, wodurch man pro Spur zwei räumlich nahe beieinander liegende Beobachtungsreihen erhielt (Abb. 8.23).

Stellt man nun die Zeitreihen der Richtung Graz-Bruck und die gespiegelte Zeitreihe (um ungefähre Koordinatengleichheit zu erhalten) der Strecke Bruck-Graz spurweise gegenüber und bildet daraus die Differenzen, so kann man erkennen, dass es durchaus zu Variationen in den Sichtbarkeiten kommt (vgl. Abbildung 8.24).

Es lässt sich jedoch nur schwer ableiten, wie viel dem Zeitunterschied, der generellen Variabilität oder aber der Topographie geschuldet ist. Da sich über die gesamte Beobachtungsdauer die Differenzen beinahe aufheben wäre man geneigt, diese Effekte zu ignorieren.



Abbildung 8.24: Gegenüberstellung der Satellitensummen beobachteter GPS-Satelliten pro Fahrrichtung, inkl. Differenzenbildung

In Frohnleiten im Bezirk Graz-Umgebung erkennt man bei einzelner Analyse der Fahrrichtungen sehr wohl, dass *hier* weitaus mehr Satelliten in Richtung Graz, als in die Gegenrichtung zu sehen sind (vgl. Abbildung 8.25). Die Bahn fährt dabei dem Hang folgend von Süden kommend einen Bogen nach Westennordwest, um bei Peugen wieder noch Ostnordost zu schwenken. Dabei liegt der unmittelbar am Trassenrand in die Höhe steigende Gschwendtberg östlich der Strecke. Ohne Detailkenntnisse über die örtlichen Gegebenheiten bzw. Bauweisen könnte rein aus den vorliegenden Informationen im konkreten Fall die enge Trassenführung am Hang des Gschwendtberges Ursache sein. Da in diesem Teil der Südbahn noch Linksverkehr herrscht, könnten sich auch die wenigen Meter zusätzliche Distanz zum östlich liegenden Hang positiv auf das Messergebnis bei Befahren in Nordrichtung auswirken. Eine weitere Ursache könnte bei schlechter Lage der Antenne am Zug eine doppelte Abschattung vom Berg davor und dem Zug dahinter sein. Generell könnte eine richtungsabhängige Sichtbarkeit aber auch durch die speziell im alpinen Gelände häufig auftretende Verkehrsbauweise der Galerie bedingt sein.

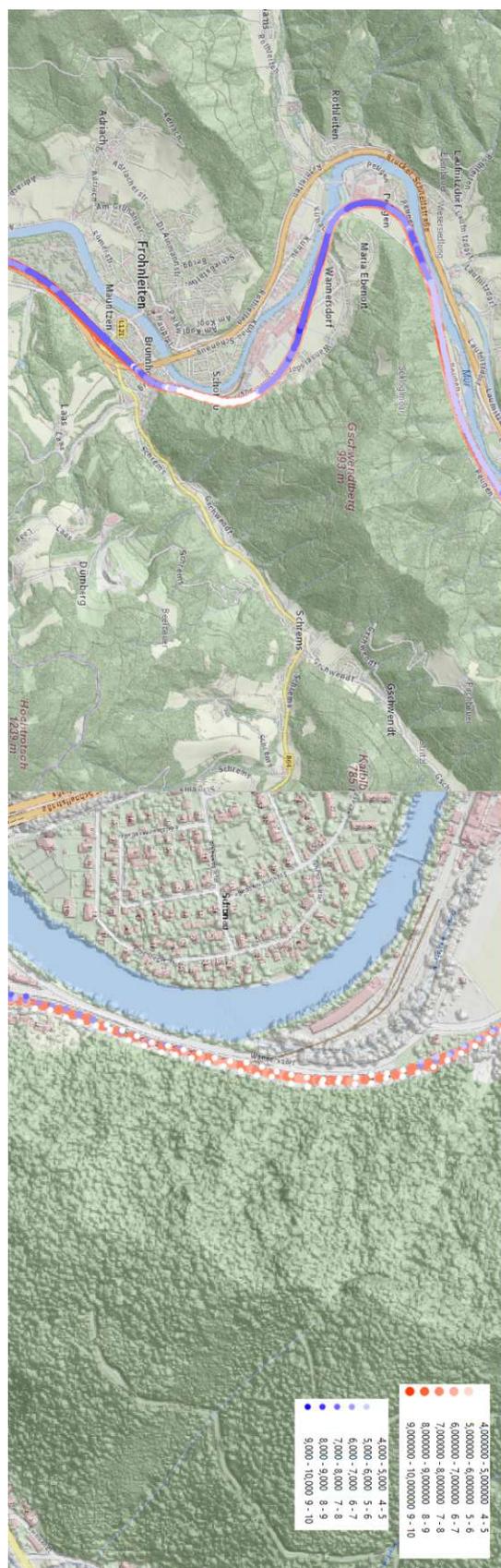


Abbildung 8.25: Extrembeispiel Frohnleiten (Gschwendtberg)
Klassifizierung nach Sichtbarkeiten: Rot (BM-G), Blau (G-BM)

9 Praxistauglichkeit

Im Abschnitt *Greenlight* (2.1) wurde erläutert, dass eine Positionierungsgenauigkeit von etwa 30 Zentimetern notwendig ist, um eine gleisgenaue Zugortung zu ermöglichen. Nachfolgend wurde im Kapitel High Accuracy Service (5) eröffnet, dass mit dem HAS spätestens ab Phase 2 (HA Full Service) horizontale Genauigkeiten von 20 Zentimetern in quasi-Echtzeit erreichbar sein sollen.

Zur Zeit stehen der TU Wien keine HAS-empfangsfähigen Receiver (z.B. Septentrio PolaRx5, vgl. 3.6) zur Verfügung, wodurch die in der aktuellen Phase *HA Initial Service* erzielbaren Genauigkeiten zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit leider nicht direkt überprüft werden können. Es besteht jedoch die Möglichkeit PPP-Beobachtungen als solche zu analysieren und zu bewerten.

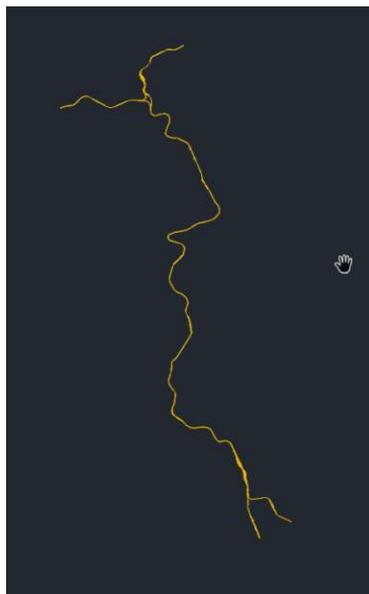


Abbildung 9.1: Kombiniertes DWG-File der Bahntrassensegmente der steirischen Südbahn

Im Zuge der Anwendbarkeitsanalyse des HAS wurden bei der Datenaufbereitung (7.2) u-blox Multi-GNSS-L1-Beobachtungen der beiden GNSS GPS und GLONASS erwähnt, aus welchen u.a. für die Teilstreckenanalyse (7.2.2) mittels der kanadischen Webapplikation CSRS PPP-Lösungen im ITRF berechnet wurden. Zur folgenden Überprüfung der erzielten Genauigkeiten werden die in Abschnitt 8.2.3 nach Fahrtrichtung gefilterten Beobachtungen (von Graz nach Bruck an der Mur) herangezogen.

Durch das Projekt TRain wurden dem Autor nicht nur die Beobachtungen, sondern auch die *wahren* Bahnstrecken der steirischen Südbahn bzw. deren Lage in Gauß-Krüger Koordinaten (konkret im MGI/Austria-GK-East, EPSG:31256) in Form von DWG-Files (einem proprietären CAD-Format) zur Verfügung gestellt (Abb. 9.1). Es sei hierbei für später angemerkt, dass die zur Verfügung gestellten Dateien jeweils die Bahnachsen bzw. Bahnmittellinien der einzelnen (!) Gleise repräsentieren. Abbildung (9.2) zeigt beispielsweise die Bahnmittellinien innerhalb eines Bahnhofes.

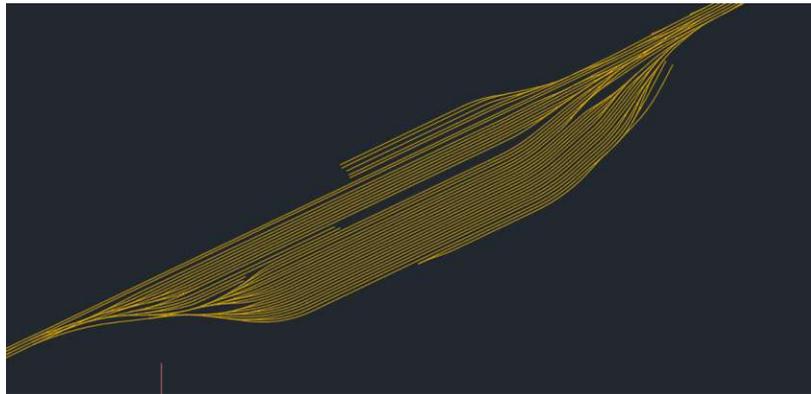


Abbildung 9.2: Bahnmittellinien des Grazer Hauptbahnhofs

Unter Benützung der Geoinformationssoftware QGIS werden diese Polylinien in ihre einzelnen Liniensegmente unterteilt, um daraus Punkte im 10 Zentimeterabstand zu extrahieren bzw. zwischen geraden Streckenelementen zu generieren und mit dem Interessensgebiet (vgl. 8.2) zu maskieren. Zugleich werden die mittels der PPP-Software CSRS ausgewerteten Beobachtungsreihen von (Graz nach Bruck) mittels der Koordinatentransformationssoftware TRANS2010 vom ITRF2014 in MGI-Koordinaten transformiert, mittels der Gauß-Krüger Projektion verebnet und erneut in QGIS geladen (Abb. 9.3).



Abbildung 9.3: Ausschnitt aus Beobachtungen und Gleisverlauf

Nun können die lateralen Genauigkeiten zwischen den Beobachtungen und den *wahren* Strecken analysiert werden, indem die Minimalabstände zwischen beiden bestimmt und den einzelnen Beobachtungen zugewiesen werden. Grafisch werden diese Abstände innerhalb von QGIS mittels kurzer Linien dargestellt (vgl. Abbildung 9.4).

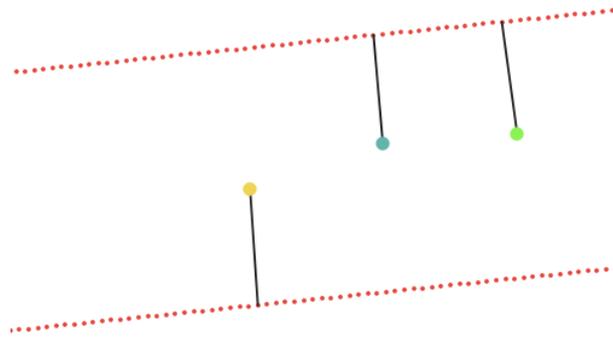


Abbildung 9.4: Beispiellösung der Distanzbestimmung zwischen den ausgewerteten u-blox Beobachtungen und der *wahren* Strecke, welche durch rote Punkten im 10 cm - Abstand dargestellt wird.

Auch wenn die Beobachtungen den Gleisen relativ gut folgen, erkennt man (vgl. Abbildung 9.5), dass die aus den Beobachtungen gewonnenen Koordinatenlösungen beim Anvisieren des nächsten *wahren* Streckenpunktes, zeitweise zwischen den einzelnen Bahnmittellinien 'hüpfen.' Das sollte aufgrund der Selektion einer einzelnen Fahrt in eine bestimmte Fahrtrichtung nicht möglich sein, weswegen auch belegt ist, dass keine gleisgenaue Zuglokalisierung möglich ist.



Abbildung 9.5: Gleisgenauigkeit der 3 Befahrungen von Graz nach Bruck/Mur. Farben kennzeichnen jeweilige Befahrung: Trn182530 (Hellgrün), Trn202560 (Türkisgrün), Trn202880 (Gold)

Quantitativ lässt sich die Aussage treffen, dass zwischen 70 und 80 Prozent der Beobachtungen Abweichungen unter 2 Metern aufweisen und etwa ein Drittel unter einem Meter (Abbildung 9.6). Nun ist nicht bekannt, ob der Receiver selbst mittig am Zug (über der Bahnmittellinie) oder seitlich angebracht ist. Das wäre bei möglichen Lokomotivbreiten von 3 Metern nicht unwesentlich, dürfte jedoch nur zu einer konstanten Verschiebung und keinem wechselnden Springen zwischen den einzelnen Geleisen führen (Abbildung 9.7).

Querabweichungen zwischen Beobachtungen und 'wahrer' Strecke

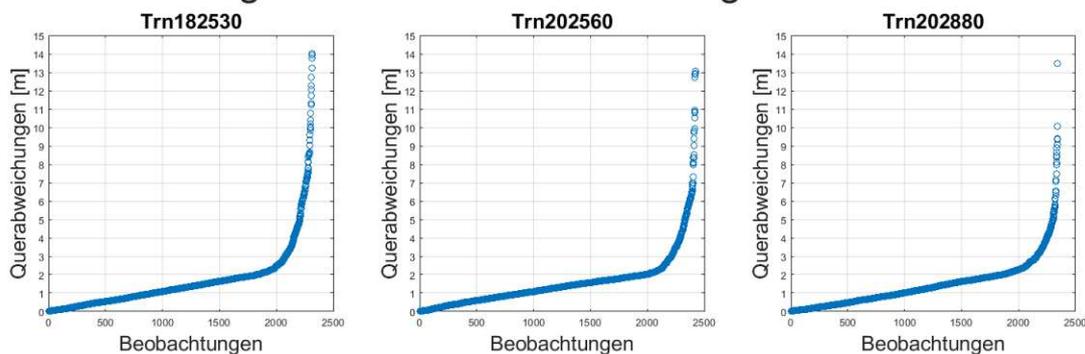


Abbildung 9.6: Verteilung der absoluten Abweichungen

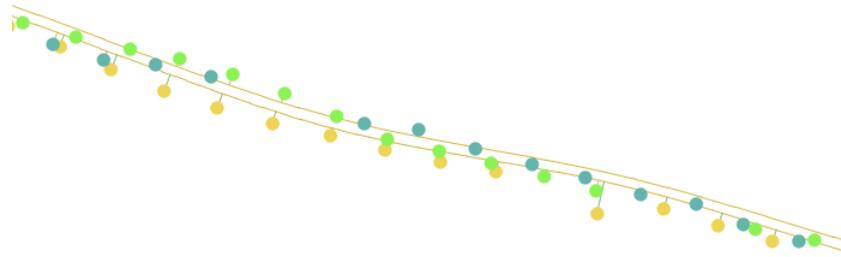
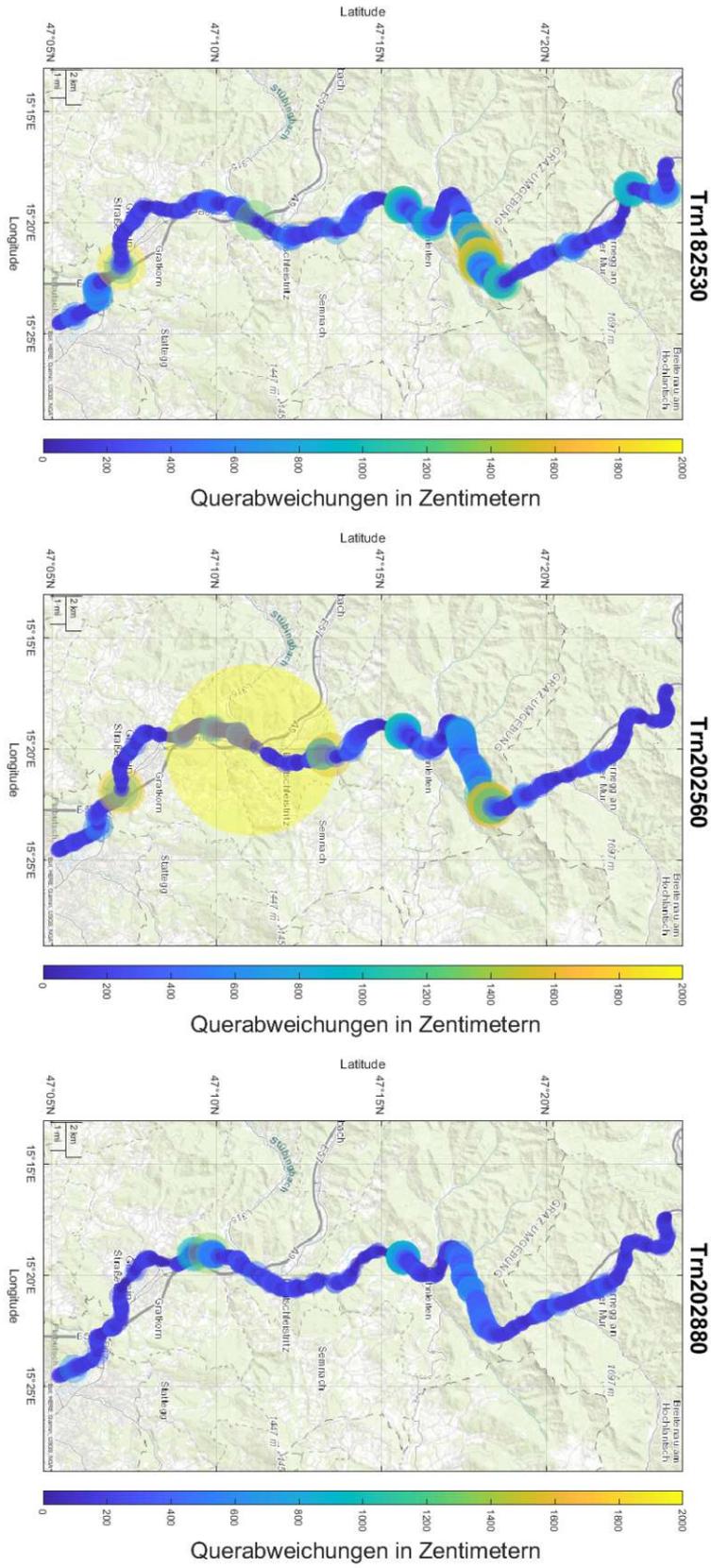


Abbildung 9.7: Gleiswechselsprünge der 3 Befahrungen von Graz nach Bruck/Mur. Farben kennzeichnen jeweilige Befahrung: Trn182530 (Hellgrün), Trn202560 (Türkisgrün), Trn202880 (Gold)

Geographisch gesehen decken sich die erzielten Genauigkeiten (vergleiche Abbildung 9.9) weitestgehend mit den Satellitensichtbarkeiten aus Kapitel 8.2.1 Abbildung (8.19). Neben regionalen Aspekten gibt es vereinzelte lokale Ausreißer, wie zum Beispiel die eindeutig größte Abweichung in Spur Trn202560 (Abb. 9.8 und 9.9), die im Zuge einer Tunneldurchfahrung entstanden ist und herausgefiltert werden könnte.



Abbildung 9.8: Ausreißer durch Tunneldurchschreitung



Querabweichungen zwischen Beobachtungen und wahrer Strecke

Abbildung 9.9: Querabweichungen zwischen PPP-Lösungen und *wahrer Strecke*

Die Auswirkungen der Topographie und der damit einhergehenden mangelnden Sichtbarkeiten auf die Positionsbestimmung kann man beim bereits im vorangegangenen Kapitel herangezogenen Beispiel Frohnleiten (Gschwendtberg, 8.25) gut erkennen. So ist die grüne Spur (Trn182530) von Abweichungen im Bereich von etwa 10 Metern gezeichnet, während die gelbe Spur (Trn202880) sogar das Signal zu den Satelliten verliert.

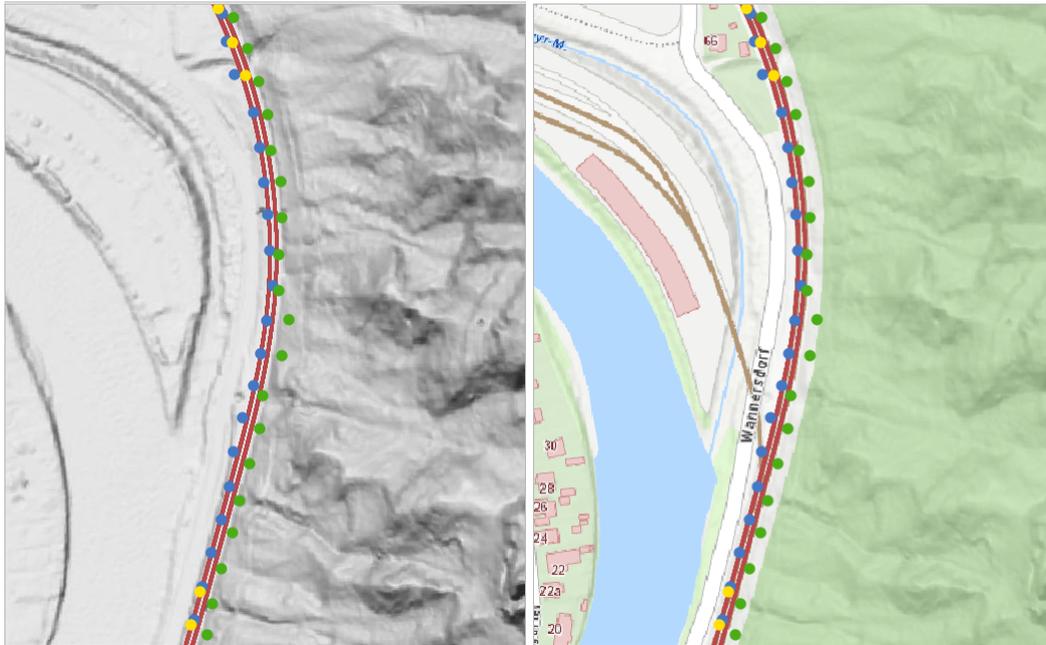


Abbildung 9.10: Abweichungen im Bereich Frohnleiten, Gschwendtberg inklusive Signalverlust bei Trn202880 (gelb)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass, trotz der teilweise durchaus anspruchsvollen Topographie, zu etwa 95% der Beobachtungsperiode Positionslösungen vorliegen (vgl. Tabelle 18).

	Beobachtungsperiode	Positionslösungen	Anteil
Trn182530	2434	2320	95.3 %
Trn202560	2504	2426	96.9 %
Trn202880	2491	2342	94.0 %

Tabelle 18: Absoluter und relativer Anteil der Positionslösungen bzgl. der gesamten Beobachtungsperiode der Befahrung Graz - Bruck/Mur

Die mittels Precise Point Positioning ermittelten Koordinaten weisen für die 3 Beobachtungsperioden sehr ähnliche Querabweichungen auf (Abb. 9.11). Etwa 80% der Positionslösungen weichen weniger als 2 Meter von der Bahnmittellinie ab. 40% der Positionslösungen sogar weniger als 1 Meter. Berücksichtigt man zusätzlich die zuvor bestimmten Positionslösungsanteile (Tabelle 18), so ergibt sich, dass zu 85% der Fahrdauer von Graz nach Bruck an der Mur Koordinatenlösungen vorliegen, deren Querabweichungen weniger als 3 Meter betragen.

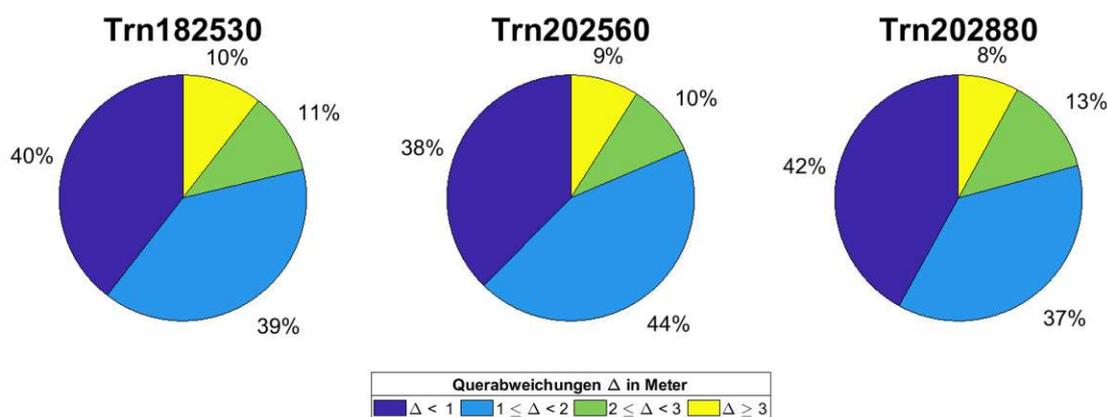


Abbildung 9.11: Verteilung der Querabweichungen zwischen *wahrer* Strecke und Positionslösungen der Befahrung Graz - Bruck/Mur

10 Feldversuch

Um die in den vorangehenden Kapiteln angestregten theoretischen Überlegungen in die Praxis zu führen, wurde im Sommer 2023 ein Feldversuch gestartet. Als Teststrecke wurde die Strecke Bruck an der Mur - Graz ausgewählt und in beide Richtungen jeweils einmal befahren. Aufgrund des in Kapitel 9 erwähnten Fehlens eines HAS-empfangsfähigen Receivers wurde ein gänzlich anderer Ansatz gewählt und auf ein handelsübliches Smartphone zurückgegriffen. Dabei wurden mittels der Android Applikation RINEX Logger der deutschen Firma Geo++ Multi-GNSS-Beobachtungen durchgeführt. In den folgenden beiden Abbildungen wird in Zeitreihen die beobachtete Satellitenanzahl präsentiert.

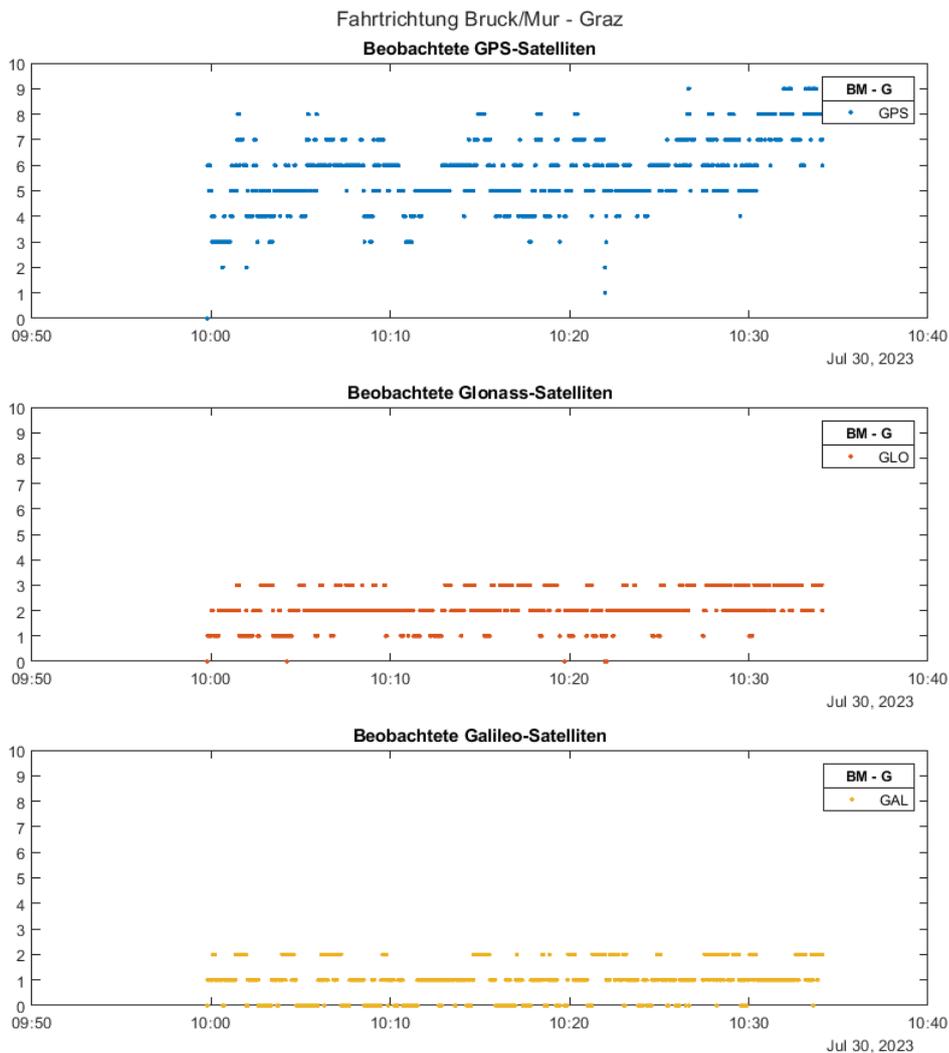


Abbildung 10.1: Beobachtete Satelliten auf der Fahrt von Bruck an der Mur nach Graz

Wie man Abbildung 10.1 entnehmen kann, gab es auf der Fahrt von Graz nach Bruck an der Mur kaum Signalunterbrechungen. Eine nicht unwesentliche Anzahl an Beobachtungen erfolgte jedoch ohne Galileo-Satelliten.

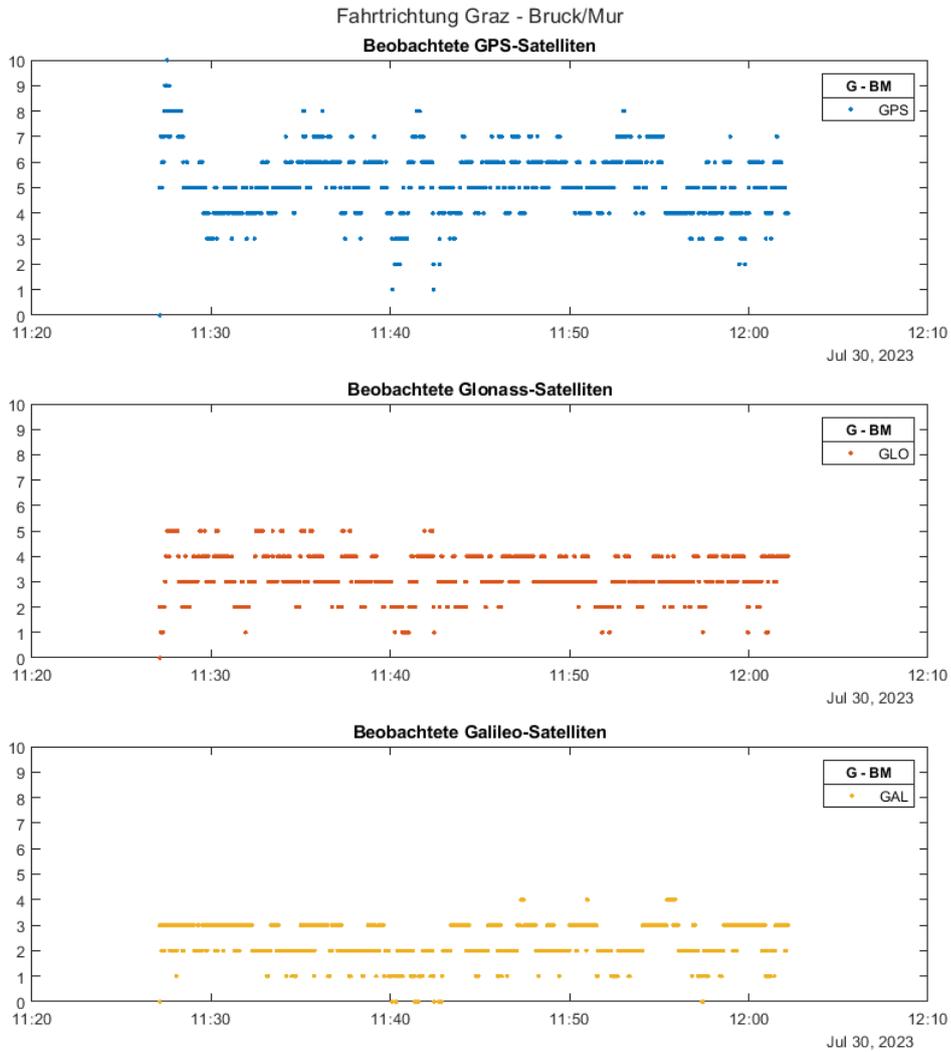


Abbildung 10.2: Beobachtete Satelliten auf der Fahrt von Graz nach Bruck an der Mur

In die Gegenrichtung (Abbildung 10.2) gab es ebenso kaum Signalunterbrechungen, vielmehr wurde beinahe über den gesamten Zeitraum mindestens ein Galileo-Satellit auf der Fahrt von Graz nach Bruck an der Mur beobachtet. Auch die Zahl der beobachteten Glonass-Satelliten ist wesentlich höher als bei der Fahrt zuvor. Die Schlüsselinformationen aus den Zeitreihen lassen sich in folgender Tabelle zusammenfassen:

Richtung	Beobachtungsperiode	Beobachtungen	≥ 1 Galileo	
G - BM	2104	2079	2046	Sekunden
BM - G	2060	2017	1523	Sekunden

Tabelle 19: Anzahl der generellen und Galileo-Beobachtungen innerhalb der Beobachtungsperiode unterteilt nach Fahrtrichtung

Gemäß obiger Tabelle betragen die Signalverluste in beide Richtungen auf der etwa 35 minütigen Fahrt weniger als 1 Minute. Bei der Anzahl beobachteter Galileo-Satelliten lässt sich jedoch ein großer Unterschied zwischen den beiden Fahrten feststellen.

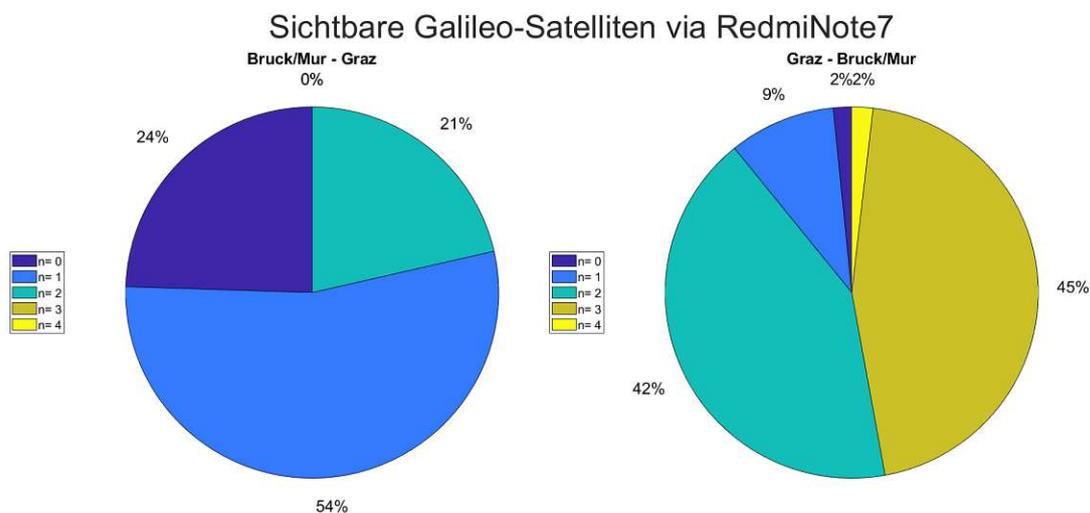


Abbildung 10.3: Anzahl beobachteter Galileo-Satelliten innerhalb der Beobachtungsperiode

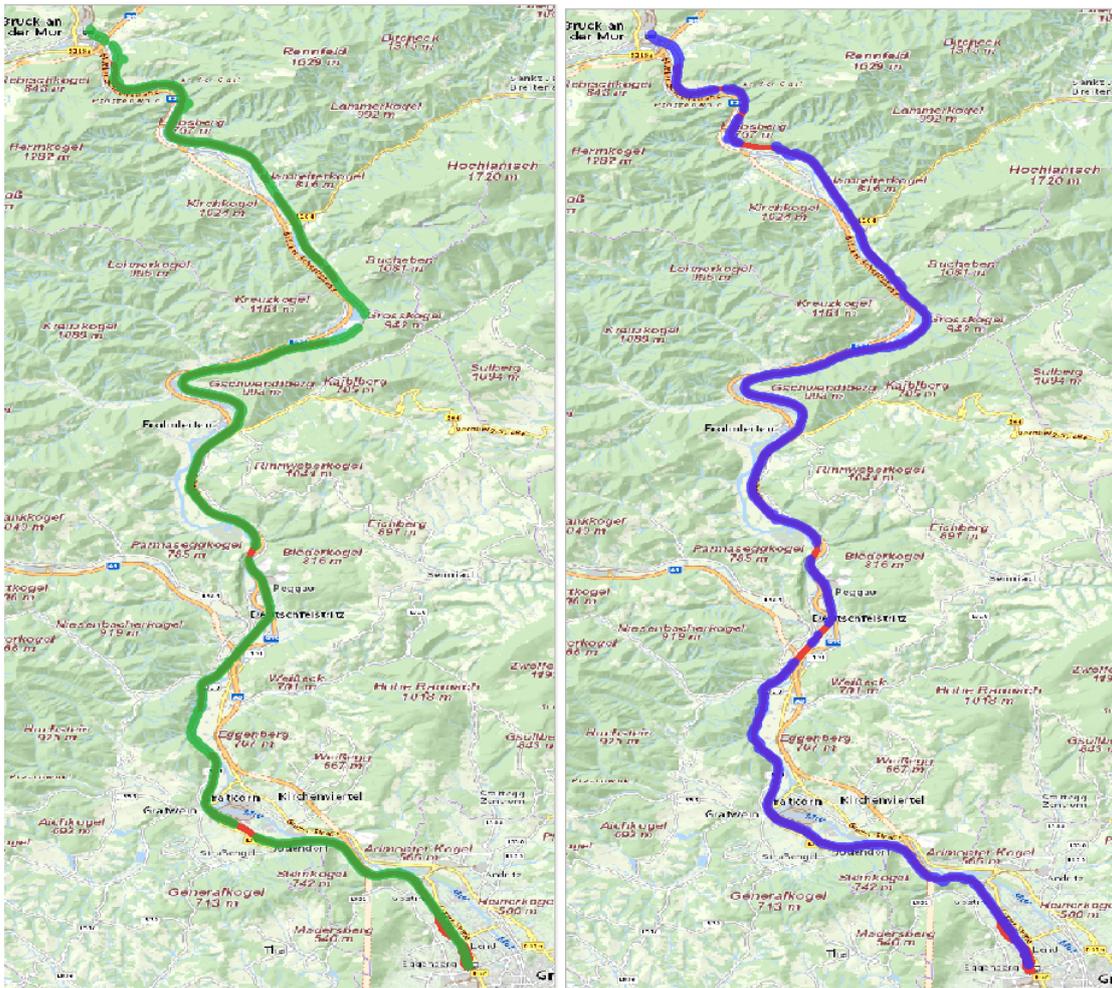


Abbildung 10.4: Gegenüberstellung der PPP-Lösungen beider Fahrtrichtungen BM-G (Grün) und G-BM (Blau)

Aus Abbildung 10.4 lässt sich entnehmen, dass sich die in Tabelle 19 beschriebenen Signalverluste nicht nur quantitativ, sondern auch in der Lage unterscheiden. So scheinen die Signalverluste durchaus an unterschiedlichen Orten aufzutreten. Des Weiteren wurden die Messungen aus dem Inneren des TFZ durchgeführt, wodurch auch mit gravierenden Abschattungen und Signalbeugungen zu rechnen war. Nicht zuletzt sei noch erwähnt, dass es zwar erfreulich ist, dass auch mit Smartphones eine solide Anzahl an Satelliten beobachtet werden kann. Man sollte jedoch beachten, dass die Qualität selbstverständlich nicht mit professionellen Empfängern mithalten kann und viele Signale bei letzteren, aufgrund niedriger S/N-Verhältnisse, herausgefiltert würden. Um den Qualitätsunterschied zu verdeutlichen, wird in Abbildung 10.5 ein Beispiel stark divergierender PPP-Lösungen präsentiert, indem die PPP-Lösungen der Smartphone-Beobachtungen jenen der u-blox-Beobachtungen gegenübergestellt sind.

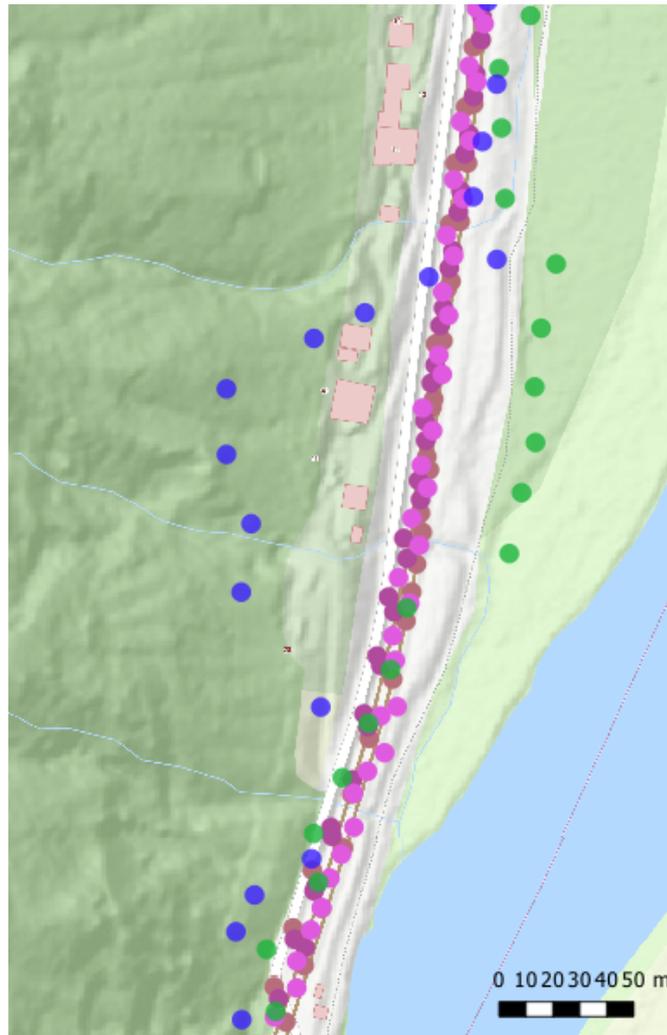


Abbildung 10.5: Gegenüberstellung der PPP-Lösungen der u-blox- (Violettöne) und Smartphonebeobachtungen (Grün und Blau)

11 Zusammenfassung und Ausblick

Bereits heute werden in Österreich seitens der ÖBB-Infrastruktur AG GNSS-Verfahren für die Zuglokalisierung genutzt. In Kapitel 2.1 wurde auf das damit verbundene Projekt *Greenlight* näher eingegangen, welches für die Positionsbestimmung auf RTK-Messungen und das Referenzstationsnetzwerk TEPOS der ÖBB-Infra zurückgreift.

In weiterer Folge wurden in Kapitel 4 Vor- und Nachteile relativer und absoluter präziser Punktbestimmungsverfahren analysiert. So kann man mittels vernetztem RTK bereits heute präzise Echtzeitpositionen mit Zentimetergenauigkeit bestimmen. Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, dass der Erhalt und Betrieb eines Referenzstationsnetzwerkes (zB. EPOSA) nötig ist. Für das absolute Positionsbestimmungsverfahren PPP wird kein solches Stationsnetzwerk benötigt, jedoch sind die erreichten Genauigkeiten noch unbefriedigend und es müssen generell in Ermangelung standortbasierter Differenzenbildungsmöglichkeiten hochpräzise Korrekturdaten zur Verfügung stehen.

Hier kommt der in Kapitel 5 beschriebene Galileo High Accuracy Service ins Spiel, welcher Korrekturdaten zu Broadcast-Satellitenuhren und -bahnen, sowie Code- und Phasenbias direkt über das Satellitensignal E6-B an den Receiver übermitteln kann. Nutzer, deren Receiver das E6-B Signal nicht empfangen können, haben weiterhin die Möglichkeit die Korrekturen via Internet in Form von RTCM-Nachrichten zu erhalten. Zur Zeit befindet sich der Galileo HAS noch in Phase 1, jedoch sollen spätestens mit Phase 2 horizontale Genauigkeiten im Bereich von 20 Zentimetern und vertikale Genauigkeiten von 40 Zentimetern erreicht werden können. In Europa sollen darüber hinaus atmosphärische Korrekturen übermittelt werden und damit die Konvergenzzeit der Positionslösung unter 100 Sekunden betragen. Die hier angesprochene Genauigkeit ist jedenfalls höher, als derzeit mit EGNOS zu erreichen ist.

Diese Entwicklungen machen Positionsbestimmungen via PPP natürlich auch für die Zuglokalisierung interessant. Deswegen wurde mittels Simulationen festzustellen versucht, ob eine grundsätzliche Anwendbarkeit des Galileo-High Accuracy Services gegeben sei, indem die potenzielle Sichtbarkeit einer ausreichenden Zahl an Galileo-Satelliten analysiert wurde.

GPS- und Glonass-Beobachtungen aus dem Projekt TRain wurden in den Kapiteln 7 und 8 Simulationen des GIPSIE-Signalsimulators der Firma OHB gegenübergestellt. Da in topographisch anspruchsvollem Gebiet vermehrt Abschattungen auftreten, wurden zwei alpine Strecken in Tirol und der Steiermark als Referenzstrecken gewählt. Es ist davon auszugehen, dass die dort erreichbaren Sichtbarkeiten auf Bahnstrecken in der Ebene, wie der Parndorfer Platte, nicht nur Gültigkeit besitzen, sondern auch übertroffen werden können. Durch das Setzen von Elevationsmasken wurden die Strecken auf unterschiedliche Art, wie den Gesamtstrecken- und Teilstreckenanalysen, auf ihre Tauglichkeit bzgl. Satellitensichtbarkeit und PPP geprüft (Abschnitte 7.2.1 und 7.2.2). Mit dem Segmentieren in kleinere Beobachtungszonen (7.2.3) wurde neben der räumlichen, auch die zeitliche Komponente herangezogen, indem der gesamte Projektbeobachtungszeitraum (38 Tage) in die Analyse einfluss.

Abgesehen von den in der Arbeit publizierten Verfahren gab es im Rahmen dieser Arbeit darüber hinaus Versuche Elevationsmasken aus digitalen Oberflächenmodellen zu generieren, die jedoch aufgrund der zu hohen Datenmenge abgebrochen werden mussten.

In Summe lässt sich feststellen, dass zwar über weite Strecken, im räumlichen wie im zeitlichen Sinne, kein Problem beim Empfang einer ausreichenden Anzahl an Galileo-Satelliten gegeben ist. Mögliche Lücken durften jedoch nicht vernachlässigt werden. Insbesondere bei der Brennerbahn und dem steirischen Beispiel getrennter Fahrtrichtungen (Frohnleiten, Gschwendtberg) kann man erkennen, dass Hochgebirge und Hangnähe durchaus zu Signalreduktionen bis Ausfällen führen kann. Dahingehend sei noch erwähnt, dass diese Gegenüberstellung auf real durchgeführte GNSS-Beobachtungen basiert, wodurch die Analyse der Anwendbarkeit generell auf ein Gebiet beschränkt ist, welches Satellitenbeobachtungen als solche zulässt. Es konnte weiters gezeigt werden, dass eine Vielzahl an eigentlich Sichtbaren Glonass-Satelliten nicht in die u-blox-Beobachtungen einfluss, wobei dies eventuell mit der Qualität der verwendeten Receiver-Antennen-Kombination zusammenhängen könnte.

Ein mittels Galileo-empfangsfähigem Smartphone durchgeführter Feldversuch (Kapitel 10) auf der Strecke Graz-Bruck konnte einen weiteren Nachweis bringen, dass nicht nur die Streckenführung, sondern auch die Fahrtrichtung Auswirkungen auf die Sichtbarkeiten und Qualität der Messung hat. So wurden in Fahrtrichtung Graz beinahe durchgehend zwischen 1 und 4 Galileo-Satelliten empfangen, während bei der Fahrt in die Gegenrichtung bei 25% der Beobachtungen kein Galileo-Satellitensignal empfangen wurde.

Gerade die österreichische Schieneninfrastruktur mit ihrer Vielzahl an Tunnel und Galerien lässt eine rein GNSS-basierte Zuglokalisierung nicht zu. Als redundantes und/oder Ergänzungssystem dürfte Zuglokalisierung via PPP und Nutzung des Galileo High Accuracy Services in Zukunft im Betrieb jedoch eine kostengünstige Alternative zu RTK-Messungen darstellen.

Offene Fragen bleiben jedoch die Anschaffungskosten HAS-fähiger Receiver und die Klärung der jeweiligen Ansprüche an die Genauigkeiten. So reicht u.a. in der Kommunikation zu den Fahrgästen bzgl. Verspätungen eine weitaus geringere Positionsgenauigkeit, als z.B. für die Zughalterkennung.

Zusammenfassend lässt sich mit den im praxisbezogenen Kapitel 9 bestimmten Genauigkeiten zum Status quo festhalten, dass die derzeitig erzielbaren Genauigkeiten mittels PPP keine korrekte Gleiszuweisung ermöglichen, wodurch sicherheitsrelevante Einsätze allein basierend auf HAS-PPP dezidiert wegfallen. Bei der Untersuchung der Strecke Graz-Bruck konnte zwar festgestellt werden, dass etwa 80% der Beobachtungen eine Querabweichung zu den Bahnmittellinien von unter 2 Metern aufwiesen, jedoch benötigt man zur Annäherung an die Genauigkeitsanforderungen eine bessere Kenntnis über die Geometrie der GNSS-Antenne am Triebfahrzeug.

Aber selbst bei Erreichen der geforderten Genauigkeiten bliebe die Latenzzeit für den Einsatz von PPP-Lösungen eine Herausforderung. Einen möglichen Einsatzbereich sieht der Autor aber mitunter im grenzüberschreitenden Bahnverkehr, indem bereits außerhalb der Bundesgrenzen ausreichend genäherte Bahnpositionen bestimmt werden können, um den Fahrgast über potenzielle Verspätungen zu informieren.

Abkürzungsverzeichnis

APOS	..... Austrian Positioning Service
ARAMIS	..... Advanced Railway Automation Management Information System
AURIS	..... Automatisches Reisenden Informations System
BBT	..... Brennerbasistunnel
BMK	..... Bundesministerium für Klimaschutz
DGNSS	..... Differential GNSS
DOP	..... Dilution of Precision
DOY	..... Day Of Year
EGNOS	..... European Geostationary Navigation Overlay Service
EIU	..... Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EMF	..... Energiemessfunktion
EPOSA	..... Echtzeit-Positionierung Austria
ERTMS	..... European Rail Traffic Management System
ESA	..... European Space Agency
ETCS	..... European Train Control System
ETRS89	..... Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
EUSPA	..... EU Agency for the Space Programme
EVU	..... Eisenbahnverkehrsunternehmen
GIPSIE	..... GNSS Multisystem Performance Simulation Environment
GLONASS	..... Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema
GLONASST	..... GLONASS Time
GNSS	..... Global Navigation Satellite System
GPS	..... Global Positioning Service
GPST	..... GPS Time
GSC	..... European GNSS Service Centre
GST	..... Galileo System Time
HADG	..... High Accuracy Data Generator
HAS	..... High Accuracy Service
IGS	..... International GNSS Service
IntEU	..... Integrierte Eisenbahnunternehmen
IRG - Rail	..... Independent Regulator's Group - Rail

ITRF	International Terrestrial Reference Frame
KAT	Koralmtunnel
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
ÖBB - Infra	ÖBB-Infrastruktur Aktiengesellschaft
PDGNSS	Precise Differential GNSS
PPP	Precise Point Positioning
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SBAS	Satellite Based Augmentation System
TEPOS	T-Kom Services Echtzeitpositionierung
TFZ	Triebfahrzeug
Tfzf	Triebfahrzeugführer
TSI	Technische Spezifikationen für Interoperabilität
ULS	Up-Link-Station
WAAS	Wide Area Augmentation System
ZAMG⁶	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

⁶mittlerweile GeoSphere Austria

Abbildungsverzeichnis

1.1	Österreichisches Eisenbahnnetz, [Erlebnis Bahn und Schiff Österreich, 2021]	8
1.2	ETCS Ausbauplan bis 2030, [ÖBB Infrastruktur AG, 2023b]	14
2.1	ÖBB railpower box [ÖBB Infrastruktur AG, 2023d]	17
2.2	Greenlight Workflow - aus Präsentation Stättner [2022]	18
2.3	Positionsbestimmung durch Distanzmessung in der Ebene	21
2.4	Positionsbestimmung durch Distanzmessung im Raum	21
2.5	Unterschied fehlerfreier (links) und fehlerbehafteter (rechts) Beobachtungen	22
3.1	Symbolbilder u-blox [2023] und Septentrio [2023]	35
4.1	Prinzip der Virtuellen Referenzstation und der Flächenkorrekturparameter, Quelle: SAPOS [2022]	40
4.2	APOS Stationsnetzwerk, Quelle: BEV [2023b]	41
4.3	EPOSA Stationsnetzwerk, Quelle: EPOSA [2023]	42
5.1	HAS Entwicklungsphasen, Quelle: GSC [2023]	45
5.2	HAS Grundprinzip, Quelle: ESA [2023]	47
6.1	GIPSIE Benutzeroberfläche	49
6.2	GIPSIE Receiversettings	51
7.1	Referenzstrecke Tirol	54
7.2	Höhenprofil der (historischen) Brennerbahn nach Röll, Freiherr von [1912]	55
7.3	Referenzstrecke Steiermark	56
7.4	FFG-Projekt TRain: Beobachtete Strecken	57
7.5	Zeitreihe sichtbarer GPS- und Glonass-Satelliten der Spur Trn142540	58
7.6	Zeitliche Verteilung und relative Häufigkeiten der Anzahl beobachteter GNSS-Satelliten (Spur Trn142540)	59
7.7	Räumliche Verteilung beobachteter GPS-Satelliten-Häufigkeiten	60
7.8	Unterteilung der Referenzstrecke Tirol	61
7.9	Streckenbefahrung nach Teilstrecken	62
7.10	Sichtbarkeitsanteil klassifizierter GNSS-Satellitensummen nach Teilstrecken (I) . .	63
7.11	Sichtbarkeitsanteil klassifizierter GNSS-Satellitensummen nach Teilstrecken (II) . .	64
7.12	Zonengrenzen der Strecke Tirol	65
7.13	Satellitensummen (x-Achse) und Anzahl ihrer Beobachtungen (y-Achse) in Zone Innsbruck1 über sämtliche DOY	66

7.14 Überlagerung aller Satellitensummen über den gesamten Beobachtungszeitraum der Zone <i>Innsbruck1</i>	67
7.15 Workflow Signalsimulation	70
8.1 Grenzen der Elevationsmasken, die benötigt werden um simulierte und gemessene Beobachtungen in Einklang zu bringen, sowie deren relativer Anteil an der Gesamtbeobachtungszahl	73
8.2 Gegenüberstellung der nach Elevationsmasken klassifizierten simulierten Satellitensichtbarkeitssummen (gipsie 0 bis 20) und der Summen tatsächlich beobachteter Satelliten (u-blox). Die beobachteten Summen sind jeweils über eine Zeitspanne von 300 Sekunden gemittelt.	74
8.3 Kontrollstreckenabschnitt zwischen Feldbach und Fehring	75
8.4 Skyplot einer Beobachtung des Kontrollstreckenabschnittes Feldbach-Fehring	76
8.5 Simulierte Sichtbarkeiten der Gesamtstrecke nach Anwendung der Elevationsmaske 15°.	77
8.6 Simulierte Sichtbarkeiten der Gesamtstrecke nach Anwendung der Elevationsmaske 20°.	77
8.7 Gegenüberstellung durchgeführter und simulierter Sichtbarkeiten geglätteter Beobachtungen der Gesamtstrecke	78
8.8 Simulierte Sichtbarkeiten der Gesamtstrecke nach Anwendung der Elevationsmaske 10°.	78
8.9 Taxative Sichtbarkeiten der einzelnen GNSS-Satelliten bezüglich der Gesamtstrecke	79
8.10 Ergebnis der Galileo und GPS-Sichtbarkeiten nach Bestimmung der korrekten Elevationsmaske	81
8.11 Simulierte Receiverstandorte bzw. Zonen	82
8.12 Vergleich von Messung, Szenario I und Szenario III (Quantile 0.05)	84
8.13 Zonale Lösungen der Quantilenwahl 0.05	85
8.14 Zonale Lösungen der Quantilenwahl 0.1	86
8.15 Untersuchungsgebiet (grün) als Subset umfassenderer Beobachtungen (rot)	87
8.16 Beobachtete GPS-Satelliten der 3 räumlich gefilterten Befahrungen der Strecke Bruck an der Mur - Graz	88
8.17 Beobachtungsstart mit den ersten 10 Beobachtungen aller Spuren	89

8.18 Anteil unterschiedlicher GNSS-Satellitensummen der Datensätze Trn182530, Trn202560 und Trn202880 (v.o.). Blautöne beschreiben Summen bis zu 5, Gelbtöne beschreiben Summen größer gleich 6 Satelliten.	90
8.19 Anzahl der beobachteten GPS-Satelliten in den Datensätzen Trn182530, Trn202560 und Trn202880 (v.l.). Je dunkler die Spur, desto mehr Satelliten wurden auf der Strecke beobachtet.	90
8.20 Konservative Elevationsmaskengrenzen zur Herstellung der Konformität zwischen Beobachtung und Simulation (vgl. Abschnitt 8.1.1)	91
8.21 Geglätteter Gegenüberstellung von Beobachtungen und Simulationen	92
8.22 Simulierte Sichtbarkeiten bei Elevationsmasken 10° und 15°	92
8.23 Die 2 Farbgruppen repräsentieren jeweils die 3 Spuren in eine Richtung (Grüntöne in Richtung Bruck/Mur, Violetttöne in Richtung Graz)	93
8.24 Gegenüberstellung der Satellitensummen beobachteter GPS-Satelliten pro Fahrtrichtung, inkl. Differenzenbildung	94
8.25 Extrembeispiel Frohnleiten (Gschwendtberg) Klassifizierung nach Sichtbarkeiten: Rot (BM-G), Blau (G-BM)	95
9.1 Kombiniertes DWG-File der Bahntrassensegmente der steirischen Südbahn	96
9.2 Bahnmittellinien des Grazer Hauptbahnhofs	97
9.3 Ausschnitt aus Beobachtungen und Gleisverlauf	98
9.4 Beispiellösung der Distanzbestimmung zwischen den ausgewerteten u-blox Beobachtungen und der <i>wahren</i> Strecke, welche durch rote Punkten im 10 cm - Abstand dargestellt wird.	98
9.5 Gleisgenauigkeit der 3 Befahrungen von Graz nach Bruck/Mur. Farben kennzeichnen jeweilige Befahrung: Trn182530 (Hellgrün), Trn202560 (Türkisgrün), Trn202880 (Gold)	99
9.6 Verteilung der absoluten Abweichungen	99
9.7 Gleiswechselsprünge der 3 Befahrungen von Graz nach Bruck/Mur. Farben kennzeichnen jeweilige Befahrung: Trn182530 (Hellgrün), Trn202560 (Türkisgrün), Trn202880 (Gold)	100
9.8 Ausreißer durch Tunneldurchschreitung	100
9.9 Querabweichungen zwischen PPP-Lösungen und <i>wahrer Strecke</i>	101
9.10 Abweichungen im Bereich Frohnleiten, Gschwendtberg inklusive Signalverlust bei Trn202880 (gelb)	102

9.11 Verteilung der Querabweichungen zwischen <i>wahrer</i> Strecke und Positionslösungen der Befahrung Graz - Bruck/Mur	103
10.1 Beobachtete Satelliten auf der Fahrt von Bruck an der Mur nach Graz	104
10.2 Beobachtete Satelliten auf der Fahrt von Graz nach Bruck an der Mur	105
10.3 Anzahl beobachteter Galileo-Satelliten innerhalb der Beobachtungsperiode	106
10.4 Gegenüberstellung der PPP-Lösungen beider Fahrtrichtungen BM-G (Grün) und G-BM (Blau)	107
10.5 Gegenüberstellung der PPP-Lösungen der u-blox- (Violettöne) und Smartphonebeobachtungen (Grün und Blau)	108

Tabellenverzeichnis

1	Auszug aus dem Jahresbericht 2021 der Schienen Control [2021]	10
2	Zahlen-Daten-Fakten der ÖBB Infrastruktur AG [2021b]	11
3	Geometrische Örter in der Ebene	20
4	DOP - Faktoren	22
5	GNSS Segmente	23
6	GPS Signale	24
7	GALILEO Signale	25
8	Typisches UERE Budget für GNSS 1- bzw. 2-Frequenzempfänger, Kaplan and Hegarty [2017]	32
9	Fehlereinflüsse bei Positionierung mittels Einzelpunktbestimmung und differenti- ellen GNSS [Kaplan and Hegarty, 2017]	38
10	IGS GPS-Produkte, Quelle: IGS [2023]	44
11	Performance der HAS-Phasen 0 bis 2 - Ausschnitt nach Fernandez-Hernandez et al. [2022]	46
12	Auswählbare Kanäle auf dem TU-eigenen GIPSIE Signalsimulator	50
13	GIPSIE Ausgabedateien	52
14	Gesamter Sichtbarkeitsanteil aller GNSS-Satellitensummen	63
15	Bestimmung der zonenweisen Quantilen bzgl. GPS	68
16	Quantilenbasierte zonale Elevationsmasken	83
17	Eckdaten der resultierenden gefilterten Beobachtungen	88
18	Absoluter und relativer Anteil der Positionslösungen bzgl. der gesamten Beobach- tungsperiode der Befahrung Graz - Bruck/Mur	103
19	Anzahl der generellen und Galileo-Beobachtungen innerhalb der Beobachtungs- periode unterteilt nach Fahrtrichtung	106

Literatur

Bauer, G. (2022). *GIPSIE RTX Real Time GNSS-Signalsimulator*. TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Fachbereich Höhere Geodäsie.

Bauer, M. (2003). *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. Wichmann Herbert.

BEV (2023a). *3D Referenzsysteme in Österreich*. https://www.bev.gv.at/dam/jcr:3dc49583-f1f5-47c6-89c0-52c8d5f576d1/Systeme_Landesvermessung_2015.pdf [Online; Stand: 28. März 2023].

BEV (2023b). *BEV - Austrian Positioning Service*. <https://www.bev.gv.at/Services/Produkte/Grundlagenvermessung/APOS.html> [Online; Stand: 28. März 2023].

BMK (2022). *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie - Pressemeldung*. <https://www.bmk.gv.at/> [Online; Stand: 11. März 2023].

Böhm, J. and Schuh, H. (2013). *Atmospheric effects in space geodesy*. Springer.

EPOSA (2023). *EPOSA - Echtzeit Positionierung Austrian*. <https://www.eposa.at/infrastruktur> [Online; Stand: 28. März 2023].

Erlebnis Bahn und Schiff Österreich (2021). <http://www.erlebnis-bahn-schiff.at/ebs/> [Online; Stand: 18. März 2023].

ESA (2023). *New Galileo service set to deliver 20 cm accuracy*. https://www.esa.int/Applications/Navigation/New_Galileo_service_set_to_deliver_20_cm_accuracy [Online; Stand: 1. März 2023].

EUSPA (2023). *Galileo High Accuracy Service (HAS)*. <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has> [Online; Stand: 1. März 2023].

Fernandez-Hernandez, I., Chamorro-Moreno, A., Cancela-Diaz, S., Calle-Calle, J. D., Zoccarato, P., Blonski, D., Senni, T., de Blas, F. J., Hernández, C., Simón, J., and Mozo, A. (2022). Galileo high accuracy service: initial definition and performance. *GPS Solutions*, 26(3).

GIPSIE (2023). *GIPSIE User Manual*. OHB Digital Solutions (OHB), Graz, Austria. <https://gipsie.ohb-digital.at/> [Online; Stand: 22. Jänner 2023].

GSC (2020). *Galileo HAS Info Note*. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_HAS_Info_Note.pdf [Online; Stand: 30. März 2023].

GSC (2023). *Galileo HAS Internet Data Distribution*. <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has/internet-data-distribution> [Online; Stand: 1. März 2023].

GSSC (2023a). *Interfaces and Protocols*. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Interfaces_and_Protocols [Online; Stand: 29. März 2023].

GSSC (2023b). *Navipedia: CDMA FDMA Techniques*. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/CDMA_FDMA_Techniques [Online; Stand: 2. Feber 2023].

Hanna, N., Halilovic, D., and Weber, R. (2023). Leistung des NeQuick G-Modells für Single-Frequency-Benutzer. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (vgi)*. Heft 2/2023. Seite 61-66.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (2001). *Global Positioning System*. Springer Vienna.

IGS (2023). *Products*. <https://igs.org/products/> [Online; Stand: 06. Mai 2023].

IRG-Rail (2022). *10th Market Monitoring Report*. <https://www.irk-rail.eu/> [Online; Stand: 20. März 2023].

Kaplan, E. and Hegarty, C. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications*. GNSS technology and applications series. Artech House.

Nieschlag, R. (2013). *Präsentation OeVG Symposium: Automatisierung der Fahrgastinformation zur Steigerung der Kundenzufriedenheit*. https://www.oevg.at/fileadmin/user_upload/Editor/Dokumente/Veranstaltungen/2013/Moderne_Betriebesfuehrungskonzepte/nieschlag.pdf [Online; Stand: 14. Jänner 2023].

Röll, Freiherr von (1912). *Enzyklopädie des Eisenbahnwesens, Band 3. Berlin, Wien 1912, S. 62-65.*

SAPOS (2022). *SAPOS - Messverfahren.* <https://www.sapos-bw.de/messverfahren.php> [Online; Stand: 16. November 2022].

Schienen Control (2021). *Jahresbericht der Schienen-Control 2021.* <https://www.schienencontrol.gv.at/de/> [Online; Stand: 17. März 2023].

Septentrio (2023). <https://www.septentrio.com/en> [Online; Stand: 20. März 2023].

Stättner, M. (2007). *TEPOS - T-Kom Services Echtzeitpositionierung.* <https://www4.ffg.at/veranstaltungen/Downloads/7C05CBB0.pdf> [Online; Stand: 14. Jänner 2023].

Stättner, M. (2022). *ATTC – Info-Abend Sichere, hochgenaue und verfügbare Lokalisierung.* <https://tiss.tuwien.ac.at/course/courseDetails.xhtml?dswid=5131&dssid=775&courseNr=124344&semester=2022> [Online; Stand: 14. Jänner 2023].

u-blox (2023). <https://www.u-blox.com/en/> [Online; Stand: 20. März 2023].

ÖBB Infrastruktur AG (2020). *Behind the Schiens.* <https://infrastruktur.oebb.at/de/unternehmen/zahlen-daten-fakten/behind-the-schiens/> [Online; Stand: 20. März 2023].

ÖBB Infrastruktur AG (2021a). *Südstrecke - Mehr Erfahren.* https://suedstrecke.oebb.at/de/dam/jcr:f20d2e67-a07d-4115-a79f-c45a087653f8/Infra-Folder_Suedstrecke_DE_2021_Auflage_7.pdf.

ÖBB Infrastruktur AG (2021b). *Zahlen, Daten, Fakten.* <https://infrastruktur.oebb.at/de/unternehmen/zahlen-daten-fakten/> [Online; Stand: 20. März 2023].

ÖBB Infrastruktur AG (2023a). *Brenner Basistunnel.* <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/brennerstrecke-kufstein-brenner> [Online; Stand: 20. März 2023].

ÖBB Infrastruktur AG (2023b). *ETCS Ausbau.* <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/etcs-ausbau>

oebb.at/de/geschaeftspartner/schienennetz/dokumente-und-daten/
etcs-zugbeeinflussung/etcs-ausbau [Online; Stand: 20. März 2023].

ÖBB Infrastruktur AG (2023c). *Koralmbahn*. <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/koralmbahn/> [Online; Stand: 05. Mai 2023].

ÖBB Infrastruktur AG (2023d). *Railpower Box*. <https://infrastruktur.oebb.at/de/geschaeftspartner/energieversorgung/bahnstrom/railpower-box/railpower-box.pdf> [Online; Stand: 22. Feber 2023].

ÖBB Infrastruktur AG (2023e). *Semmering Basistunnel*. <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/semmering-basistunnel/> [Online; Stand: 05. Mai 2023].