

ABSCHLUSSBERICHT

Mobilfunk-Messungen entlang von Bundesstraßen sowie fahrgaststarken Bahnstrecken in Bayern

Dr. Michael Lorenz
Customer Success Manager

Said Mehira
Projektleiter

Rohde & Schwarz International GmbH
MNT Network Analytics Services
Mühldorfstraße 15
81671 München

Dezember 2022

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



Inhalt

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 3 |
| 2 | Projektbeschreibung | 5 |
| 3 | Methodik..... | 6 |
| 3.1 | Messaufbau | 6 |
| 3.1.1 | Messsystem 1 – Bundesstraßen | 6 |
| 3.1.2 | Messsystem 2 – Bahnstrecken | 7 |
| 3.2 | Messkonfiguration | 7 |
| 3.2.1 | Netzwerkscanner..... | 8 |
| 3.2.2 | Endgeräte..... | 9 |
| 3.3 | Berechnungsgrundlagen von Datenraten..... | 10 |
| 3.3.1 | 4G Korrelationen | 10 |
| 3.3.2 | 5G Korrelationen | 12 |
| 3.3.3 | Verdichtung | 13 |
| 4 | Ergebnisse | 15 |
| 4.1 | Fahrtstrecken | 15 |
| 4.2 | Zugdämpfung | 16 |
| 4.3 | Messungen in Tunneln und Zügen allgemein..... | 16 |
| 4.4 | Frequenznutzung der Mobilfunkbetreiber..... | 17 |
| 4.5 | Ergebnisse – LTE | 18 |
| 4.5.1 | Statistische Zusammenfassung | 18 |
| 4.5.2 | Geographische Darstellung | 18 |
| 4.6 | Ergebnisse – 5G ENDC (LTE + 5G)..... | 27 |
| 4.6.1 | Statistische Zusammenfassung | 27 |
| 4.6.2 | Einzelrouten Ergebnisse | 27 |
| 4.6.3 | Geographische Darstellung | 29 |
| 4.7 | Ergebnisse – 5G SA (5G)..... | 38 |
| 4.7.1 | Statistische Zusammenfassung | 38 |
| 4.7.2 | Geographische Darstellung | 38 |
| 4.8 | Kundenerfahrungen | 47 |
| 4.8.1 | Sprachdienst | 47 |
| 4.8.2 | Datendienste..... | 49 |
| 5 | Fazit | 54 |
| | Abkürzungsverzeichnis | 55 |

1 Zusammenfassung

Zielsetzung des Projektes war es, die Versorgungsaufgaben an die Netzbetreiber durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) zu verifizieren. Diese fordert eine Mindestdatenrate von 100 Mbps (Megabit pro Sekunde) in der Abwärtsstrecke (Downlink) auf bestimmten Straßen und Schienenwegen bis zum Stichtag 31. Dezember 2022.

Die Evaluierung der möglichen Datenraten in den Mobilfunknetzen der drei deutschen Netzbetreiber Deutsche Telekom (kurz Telekom), Telefónica und Vodafone basiert auf Messungen der LTE- und 5G-Empfangspegel. Diese wurden mittels Netzwerkscanner auf den zu untersuchenden und ausgewählten Bundesstraßen der Versorgungsklassen 0 und 1 als auch auf fahrgaststarken Bahnstrecken (mehr als 2.000 Fahrgäste) gemessen. Dabei wurden insgesamt mehr als 3.600 km Schienenweg untersucht. Während bei den Messungen auf den Bundesstraßen geeignete Außenantennen für die Netzwerkscanner genutzt werden konnten, war dies technisch auf den Bahnstrecken nicht möglich. Die dadurch auftretende zusätzliche Dämpfung von 8 dB ($f < 1.500$ MHz), bzw. 12 dB ($f > 1.500$ MHz) wurde dementsprechend berücksichtigt und um diese korrigiert.

Die Transformation der Versorgungspegel beruht für LTE auf vorgegebenen technischen Parametern der BNetzA. Diese liegen noch nicht für 5G vor und wurden im Rahmen dieser Studie empirisch ermittelt.

Bei der Auswertung wurde unterschieden, welche Datenraten ein konventionelles LTE Endgerät, aber auch ein modernes 5G-fähiges Endgerät erreichen könnte. Grundlage für die Berechnungen sind die linear gemittelten Pegelwerte einer 100×100 m² Versorgungskachel, die in eine Datenrate transformiert wurde. Die prozentuale Erfüllung der Versorgungsaufgabe ergibt sich aus dem Verhältnis der Summen von erfüllten zu nicht erfüllten Versorgungskacheln.

Zusammengefasst erreicht keiner der drei Netzbetreiber eine durchgängige Versorgung mit mindestens 100 Mbps. Dies ist ein gewichtiges Indiz dafür, dass die Versorgungsaufgaben nicht erfüllt werden. Gleichwohl kann nur die Bundesnetzagentur mit ihren eigenen Messungen eine abschließende Aussage hierüber treffen und insbesondere überprüfen, ob in Einzelfällen rechtliche und tatsächliche Gründe dem vollständigen Ausbau entgegenstehen.

Kunden mit einem 5G-fähigen Endgerät und geeignetem Tarif können in den Netzen von Telekom und Vodafone auf den Bundesstraßen in 90 % der Strecke eine Datenrate von 100 Mbps oder mehr erwarten. Telefónica-Kunden erwartet dieses Erlebnis auf immerhin 82 % der untersuchten Bundesstraßen. Die gemeinsame Betrachtung aller drei Netzbetreiber zeigt, dass 98,4 % das vorgegebene Kriterium erfüllen. Dass der 5G-Netzausbau sich bereits heute positiv auf das Ergebnis auswirkt, wird durch das etwas schlechtere Ergebnis für reine LTE Endgeräte sichtbar. Telekom und Vodafone verlieren fünf Prozentpunkte und erreichen eine Abdeckung von knappen 85 % mit der geforderten Datenrate in der Abwärtsstrecke. Das Delta ist bei Telefónica mit 14 Prozentpunkten größer, was demzufolge bedeutet, dass hier der 5G Netzausbau einen größeren Gewinn bringt als bei den andern beiden Netzbetreibern mit einem besseren LTE-Netz.

Die Ergebnisse der Bahnstreckenmessungen sind vergleichbar mit denen auf den Bundesstraßen. Obwohl Messungen im Falle eines ICEs in Abteilen mit Repeater-Lösungen durchgeführt wurden, kann keinerlei Aussage über deren Funktionsfähigkeit getroffen werden. Die bestimmte Zugdämpfung eines ICEs liegt in derselben Größenordnung wie die für eine Regionalbahn (RB). Die beste Versorgungslage für konventionelle LTE-Endgeräte bietet aktuell Telekom ihren Kunden. Auf 88 % der untersuchten Bahnstrecken wurde eine mögliche Datenrate von 100 Mbps oder mehr ermittelt und schlägt sogar das Ergebnis auf den Bundesstraßen für diesen Anbieter. Vodafone und Telefónica liegen mit knapp 80 % und guten 70 % deutlich dahinter. Insgesamt erfüllen aber etwa 95 % der Bahnstrecken das vorgegebene Kriterium, wenn alle drei Netzbetreiber gemeinsam betrachtet werden. Der 5G-Netzausbau wirkt sich auch positiv auf die Versorgung der Bahnstrecken aus. Telefónica steigert den Erfüllungsgrad auf 79 %, Vodafone auf 82 % und Telekom auf 90 %. Die Versorgungslage über alle Netzbetreiber liegt für 5G-fähige Endgeräte bei über 96 %.

Eine zusätzliche Analyse betrachtet ausschließlich die reine 5G Versorgung (ohne LTE) und gibt einen Einblick in den aktuellen 5G-Netzausbau auf Bundesstraßen und Bahnstrecken. Für dasselbe Kriterium der Datenrate von mindestens 100 Mbps in der Abwärtsstrecke erreicht Telekom zum Zeitpunkt der Messungen bereits eine

Abdeckung auf den gemessenen Bundesstraßen von 58 %, gefolgt von Vodafone mit 41 %. Telefónica erreicht nur knapp 20 %, begründet in der vermuteten aktuellen Ausbaustrategie, die sich auf Städte konzentriert. Für Telekom und Vodafone ist hingegen eine 5G-Versorgung auch auf den Verbindungen zwischen den Städten nachzuweisen. Gute Synergien ergeben sich bei gemeinsamer Betrachtung aller drei Netzbetreiber mit einem Erfüllungsgrad von 72 % auf den Bundesstraßen. Auf Bahnstrecken ist die Situation ähnlich. Telekom kann heute bereits 67 %, Vodafone 44 % und Telefónica etwa 14 % der gemessenen Bahnstrecken mit einer 5G-Datenrate größer 100 Mbps offerieren. Bei der 5G Analyse wurden die Kanäle mit der größten Bandbreite jeweils herangezogen. Diese liegen oftmals im hohen Frequenzbereich um die 3,6 GHz, was eine höhere Dämpfung zur Folge hat als diese bei Frequenzen unterhalb von 3 GHz. Ebenso bleibt die Frage unbeantwortet, ob die verbaute Verstärkertechnologie in den ICEs der Deutschen Bahn dieses Spektrum unterstützt.

Neben den Netzwerkscanner-Messungen zur Ermittlung der möglichen Datenraten kamen auch handelsübliche Smartphones vom Typ „Samsung Galaxy S22+ 5G“ zum Einsatz. Damit wurde die tatsächliche Kundenerfahrung für die Sprach- und Datendienste untersucht. Die Endgeräte befanden sich jeweils im Innenraum des Fahrzeuges, bzw. Zuges ohne Außenantennen. Alle aufgezeigten Ergebnisse wurden zusätzlich zu der eigentlichen Fragestellung der 100 Mbps Versorgung erarbeitet und konzentrieren sich auf die für die Dienste jeweils wichtigsten Leistungskenngößen (Key Performance Indicator – KPI).

Beim Sprachdienst zeigt Telekom das beste Ergebnis in Bezug auf erfolgreiche Gespräche. Auf Bundesstraßen lag die Erfolgsrate bei 98 % und auf Bahnstrecken bei 92 %. Insgesamt fallen die schlechteren Ergebnisse auf den Bahnstrecken für alle drei Netzbetreiber auf. Vodafones Gesprächserfolgsrate liegt auf Bundesstraßen bei 95 % und Bahnstrecken bei 84 %. Telefónica erreicht auf den Bundesstraßen eine Erfolgsquote von 94 % und auf den Bahnstrecken von 85 %.

Von allen getesteten Datendiensten ist für dieses Projekt der sogenannte Kapazitätstest am wichtigsten. Dieser Test stellt die höchsten Anforderungen an ein Mobilfunknetz dar und fordert die höchsten Datenraten an. Betrachtet man pro Netzbetreiber die gemittelten Ergebnisse der über 450 Kapazitätstest auf den Bundesstraßen, bzw. 1300 Tests auf den Bahnstrecken, so erreichte Telekom auf den gemessenen Bundesstraßen im Mittel 112 Mbps und auf den Bahnstrecken 99 Mbps. Telefónica kam auf 73 Mbps und 69 Mbps auf der Straße, bzw. Schiene. Vodafone erreichte 68 Mbps auf den Bundesstraßen und 79 Mbps auf den Bahnstrecken.

2 Projektbeschreibung

Im Rahmen des Projektes „*Mobilfunk-Messungen entlang von Bundesstraßen sowie fahrgaststarken Bahnstrecken in Bayern*“ wurde die Einhaltung der Versorgungsaufgaben der deutschen Mobilfunknetzbetreiber untersucht. Die Beauftragung erfolgte über eine öffentliche Ausschreibung (UVgO) vom Freistaat Bayern, vertreten durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi). Die Bundesnetzagentur, kurz BNetzA, formuliert verpflichtende Ausbauziele für die Netzbetreiber, um eine Netzabdeckung mit vorgegebener Diensteverfügbarkeit und Qualität dem Endverbraucher zuzusichern.

Durch geeignete Messungen sollte überprüft werden, ob die zu untersuchenden Bundesstraßen und Bahnstrecken mit mehr als 2.000 Fahrgästen eine Datenrate von mindestens 100 Mbps in der Abwärtsstrecke (Downlink) aufweisen. Dieses Kriterium entspricht den Vorgaben der BNetzA und ist bis zum 31. Dezember 2022 durch die Lizenznehmer, den Mobilfunkbetreibern, zu erfüllen. Die zu überprüfenden Bundesstraßen der Verbindungsfunktionsstufen 0 und 1, als auch die fahrgaststarken Bahnstreckenabschnitte wurden im Vorfeld mit dem StMWi abgestimmt.

Die in der Leistungsbeschreibung geforderte Technologie 2G wurde unter Zustimmung des StMWi zu Gunsten einer höheren Messgeschwindigkeit von 4G und 5G aus den zu messenden Technologien entfernt. 2G kann rein technisch die Anforderung an 100 Mbps nicht erfüllen und wurde ausgesetzt. Dies bezieht sich allerdings rein auf Netzwerkscanner-Messungen, deren Ergebnisse die Grundlage zur Datenratenerfüllung bilden. Die handelsüblichen Endgeräte (Smartphones) erfassen diese Alttechnologie falls weder 4G noch 5G verfügbar sein sollten.

Zu messen waren die drei Mobilfunknetzbetreiber Deutsche Telekom, Telefónica und Vodafone mit Hilfe geeigneter Netzwerkscanner und handelsüblichen Endgeräten (Smartphones).

Die Dämpfung des Zuges sowie eine eventuell eingesetzte Verstärkertechnik im Zug (Repeater) sollten nach Möglichkeit ermittelt und dokumentiert werden.

Grundlage zur Evaluierung der möglichen Datenrate im Downlink bildeten die gemessenen Versorgungspegel. Diese konnten mittels durch die BNetzA vorgegebener technischer Parameter in mögliche Datenraten umgewandelt werden. Die jeweiligen Bandbreiten der einzelnen LTE-Träger wurden dabei gemäß dieser Vorgabe berücksichtigt.

Eine entsprechende Parameterzuweisung für 5G lag nicht vor und konnte auch auf Anfrage bei der BNetzA nicht geliefert werden. Um die notwendige Transformation von Empfangspegeln nach Datenraten durchführen zu können, wurden basierend auf den Messungen aus diesem Projekt die entsprechende Zuweisung in Abhängigkeit der jeweiligen Bandbreite des 5G Kanals empirisch ermittelt.

Die Messungen wurden zwischen dem 12. November und 3. Dezember durchgeführt.

3 Methodik

Zur Erfassung der Empfangspegel (Signalstärke) von Mobilfunknetzen bieten sich sogenannte Netzwerkscanner an. Ein Netzwerkscanner ist ein passives Messgerät mit hoher Messgenauigkeit und Messgeschwindigkeit. „Passiv“ bezieht sich darauf, dass ein solches Gerät ohne SIM Karte unterschiedliche Technologien und verschiedene Frequenzen quasi simultan messen kann. Durch Dekodierung der gemessenen Signale ist eine eindeutige Zuweisung des jeweils empfangenen Signals auf den Netzbetreiber, die Technologie, Funkkanal sowie weitere Details möglich. Ein Netzwerkscanner kann jedoch keine Dienste, wie Sprache oder Daten, erfassen.

Endgeräte (UE – User Equipment) benötigen immer eine SIM Karte und können die Dienste Sprache und Daten erfassen. Jedoch gilt hier die strikte Limitierung auf den Netzbetreiber (durch die SIM Karte vorgegeben) und auch nur in der Regel eine Technologie, also 2G, 4G oder 5G. Einzige Ausnahme bildet die erste Ausbaustufe von 5G, welche als „5G Non-Stand-Alone – 5G NSA“ bezeichnet wird. In dieser Ausbaustufe besteht die Verbindung sowohl zu 4G als auch 5G. 4G spielt dabei noch die entscheidende Rolle über die die notwendige Signalisierung erfolgt. Nutzerdaten können aber parallel über 4G und 5G gesendet werden.

Gemäß der Leistungsbeschreibung wurden die 4G und 5G Netze der drei Netzbetreiber mittels Netzwerkscanner gemessen und die empfangenen Signalstärken jeweils in eine mögliche Datenrate pro Netzbetreiber, Technologie und Kanal umgerechnet. Eine mögliche Aggregation von mehreren Funkkanälen wurde dabei berücksichtigt.

3.1 Messaufbau

Die Messungen auf den Bundesstraßen und den Bahnstrecken erfolgte durch zwei Messteams. Zum Einsatz kamen jeweils Messtechnik der Fa. Rohde & Schwarz. Die wesentlichen Bestandteile eines Messsystems beinhaltet zwei ultrakompakte Netzwerkscannern des Typs R&S® TSME6 (350 MHz – 6000 MHz) und pro Netzbetreiber drei Smartphones des Typs Samsung Galaxy S22+ (SM-S906B) mit spezieller Software R&S SwissQual AG® QualiPoc zur Erfassung and Aufzeichnung der Messwerte.

3.1.1 Messsystem 1 – Bundesstraßen

Das Messsystem R&S SwissQual AG® SmartBenchmarker ist für den Einsatz in Fahrzeugen (KFZ) konzipiert und wird fest im Fahrzeug verbaut. Die HF-Antennen der Scanner und die GPS-Antenne wurden auf dem Fahrzeugdach platziert. Die Endgeräte waren in der Fahrgastzelle an festen Positionen auf einer sogenannten *Phone Mounting Wall (PMW)* montiert.



Abbildung 1: R&S SwissQual AG® SmartBenchmarker - Symbolbild.

Die Steuerung der Messgeräte geschieht über einen zentralen Rechner und erlaubt das Starten und Stoppen der Messungen auf einfache Weise. Alle Messungen, sowohl für die Endgeräte als auch den Netzwerkscannern, laufen vollständig automatisiert.

3.1.2 Messsystem 2 – Bahnstrecken

Die Anforderungen an ein Messsystem für den Einsatz in Zügen weichen von denen in Fahrzeugen ab. Hier ist eine kompaktere Bauweise gefordert, die einen Standortwechsel des Einsatzgebietes erleichtert und Rüstzeiten minimiert. Des Weiteren können bei Zugmessungen weder die HF-Antennen noch die GPS-Antenne außerhalb des Zuges positioniert werden und sollten daher im Messsystem mit verbaut sein.

Zum Einsatz für die Bahnstrecken kam die Rucksacklösung R&S SwissQual AG® FreeRider4, zusätzlich mit einer speziellen GPS Antenne vom Typ Locosystem LS2303x-UDG mit GNSS+DR Unterstützung.



Abbildung 2: R&S SwissQual AG® FreeRider4 - Symbolbild.

Die zentrale Steuerung der Endgeräte und Netzwerkscanner erfolgte über ein Tablet. Ähnlich zum SmartBenchmarker werden die Messungen für alle Messgeräte zentral gesteuert. Während der Messung können bei Bedarf bereits Details der Messungen auf dem Tablet beobachtet werden.

3.2 Messkonfiguration

Beide Messsysteme wurden identisch in Bezug auf die zu messenden Frequenzen und Dienste konfiguriert.

3.2.1 Netzwerkscanner

Basierend auf der offiziellen Spektrumzuweisung durch die Bundesnetzagentur wurden die Netzwerkscanner konfiguriert. Die einzelnen Frequenzbereiche sind nicht technologiegebunden, so dass in ein und demselben Band sowohl 4G als auch 5G auftreten kann. Dadurch liegt eine hohe Anzahl von Frequenzbereichen vor, die den Einsatz von zwei Netzwerkscannern empfiehlt. Durch die Aufspaltung der zu berücksichtigenden Bänder und Technologien auf zwei Empfänger kann eine ausreichende Messgeschwindigkeit erreicht werden. Dabei werden typischerweise die niedrigen Frequenzbereiche Scanner 1 und die hohen Frequenzbereiche Scanner 2 zugeordnet.

| | niedriger Frequenzbereich | | | | | | hoher Frequenzbereich | | | |
|-----------|---------------------------|---------|----------|--------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|----------|
| Scanner 1 | 4G | Band 20 | Band 28 | Band 8 | Band 32 | Band 3 | | | | |
| | 5G | | Band n28 | | | Band n3 | | | | |
| Scanner 2 | 4G | | | | | | Band 1 | Band 38 | Band 7 | |
| | 5G | | | | | | Band n1 | | Band n7 | Band n78 |

Tabelle 1: Konfiguration Netzwerkscanner pro Band und Technologie.

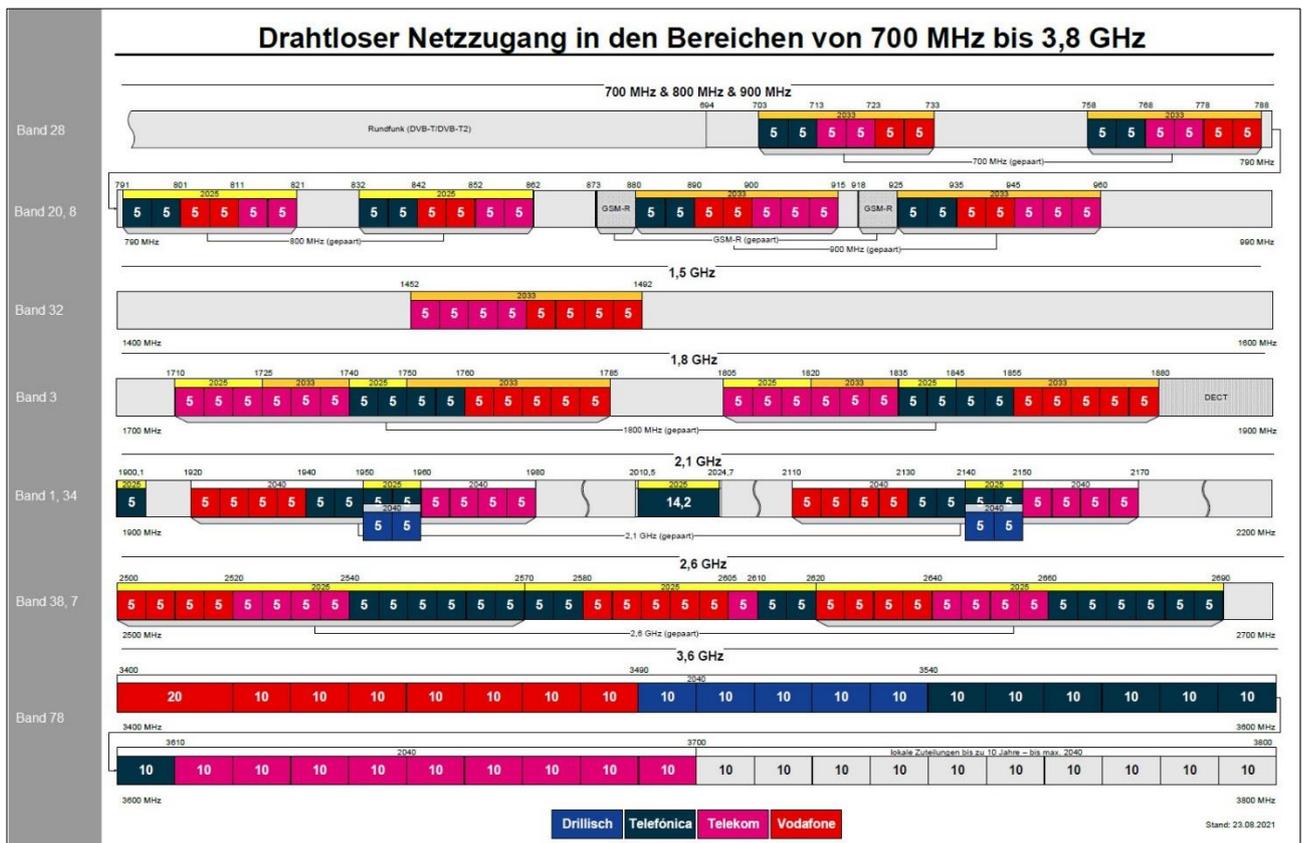


Abbildung 3: Spektrumzuweisung für die deutschen Mobilfunknetzbetreiber (Quelle: BNetzA).

Ein wesentlicher Vorteil des Netzwerkscanners R&S® TSME6 ist der Messmodus *Automatic Channel Detection (ACD)*. In diesem werden dem Scanner lediglich die zu messenden Bänder und Technologien mitgeteilt. Durch Analyse und Dekodierung der empfangenen Signale ermittelt der Netzwerkscanner die verwendete Technologie, identifiziert den dazugehörigen Netzbetreiber, sowie weitere wichtige zellspezifische Informationen (Frequenz, Bandbreite, Physikalische ID, usw.).

3.2.2 Endgeräte

Die handelsüblichen Endgeräte Samsung Galaxy S22+ wurden alle im sogenannten *Freerun* Modus betrieben. Dies bedeutet, das Endgerät wird nicht auf eine bevorzugte Technologie gezwungen, sondern kann alle unterstützten Technologien verwenden, die durch das Mobilfunknetz gesteuert und vorgegeben werden.

Damit pro Netzbetreiber die gleiche Anzahl an Diensten (Sprache und Daten) getestet wird, sind alle neun Endgeräte untereinander synchronisiert. Telefonie (Sprache) wird grundsätzlich nur innerhalb desselben Netzbetreibers durchgeführt und nicht zwischen den Netzbetreiber. Dies ist eine gängige Vorgehensweise bei Netzvergleichsmessungen, um die Bewertung rein für einen Netzbetreiber zu erzielen.

Im Folgenden werden die verwendeten Sequenzen für Sprach- und Datendienste aufgezeigt.

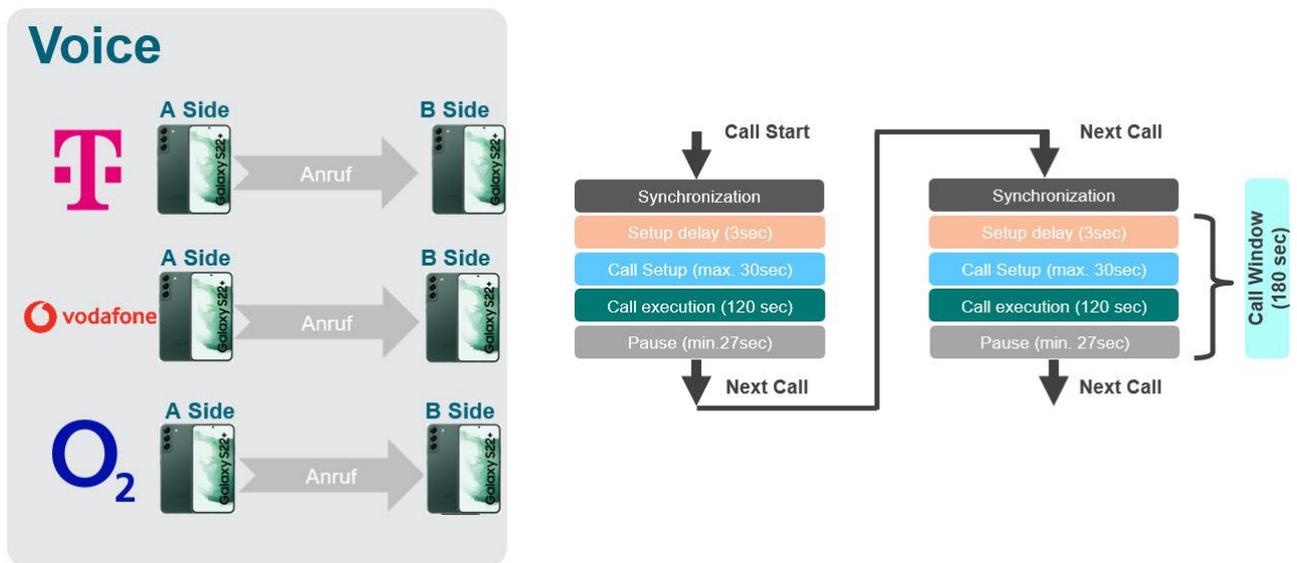


Abbildung 4: Sequenz für Telefonie (Sprache).

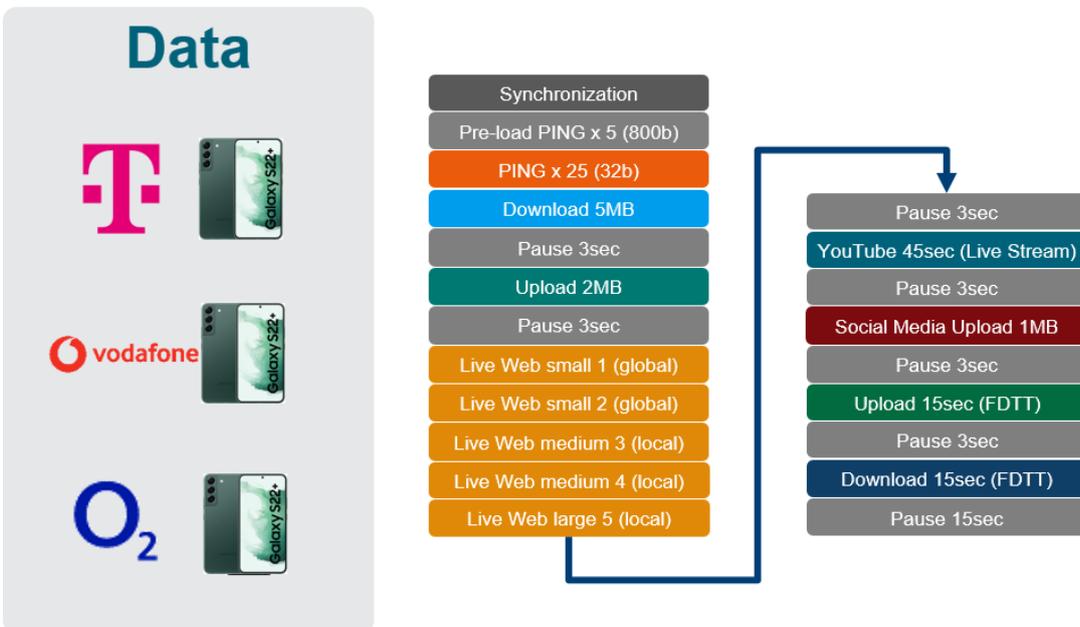


Abbildung 5: Sequenz für Datendienste.

Die verwendeten Websites wurden nach unterschiedlichen Größen, aber auch nach der Beliebtheit bzw. Nutzung der Kunden ausgewählt. Im Detail wurden folgende Websites getestet:

- https://www.google.com/?gws_rd=ssl
- <https://www.wikipedia.org/>
- <https://m.focus.de/>
- <https://www.bahn.de/>
- <https://www.spiegel.de/>
- <https://www.zdf.de/>
- <https://www.dhl.de/de/geschaeftskunden.html>
- <https://www.tagesschau.de/>
- <https://www.bild.de/>
- <https://m.ebay-kleinanzeigen.de/>
- <https://m.faz.net/aktuell/>

3.3 Berechnungsgrundlagen von Datenraten

Ziel dieses Projektes ist die Transformation der gemessenen Signalpegel in eine mögliche Datenrate. Diese Berechnung ist für jeden Netzbetreiber nach Technologie, Frequenz und Bandbreite vorzunehmen. Mögliche Aggregationen von 4G Trägern, aber auch 5G Trägern ist dabei zu berücksichtigen.

Grundlage für die Berechnung sind die linear gemittelten Pegelwerte einer 100x100 m² Versorgungskachel, die in eine Datenrate zu transformieren sind.

3.3.1 4G Korrelationen

Die BNetzA hat eine Korrelation von gemessenen LTE (4G) Pegelwerten RSRP [dBm] zu den zu erwartenden Datenraten bereitgestellt. RSRP (*Reference Signal Received Power*) ist eine Messgröße für den LTE-spezifischen Empfangspegel, gemessen in Dezibel Milliwatt (dBm). Die Ergebnisse stützen sich auf empirische Untersuchungen, sowie theoretische Berechnungen. Demnach müssen RSRP Mindestpegel für die Erreichung einer LTE Datendate in Abhängigkeit der Bandbreite (BB) des LTE Kanals erreicht werden.

Für die Abbildung der gemittelten RSRP-Werte pro Versorgungskachel in eine entsprechende Datenrate, wurden lineare Funktionen pro Bandbreite ermittelt. Somit war eine genaue Zuweisung möglich, die auch RSRP Werte oberhalb der in der Tabelle angegebenen Werte berücksichtigt.

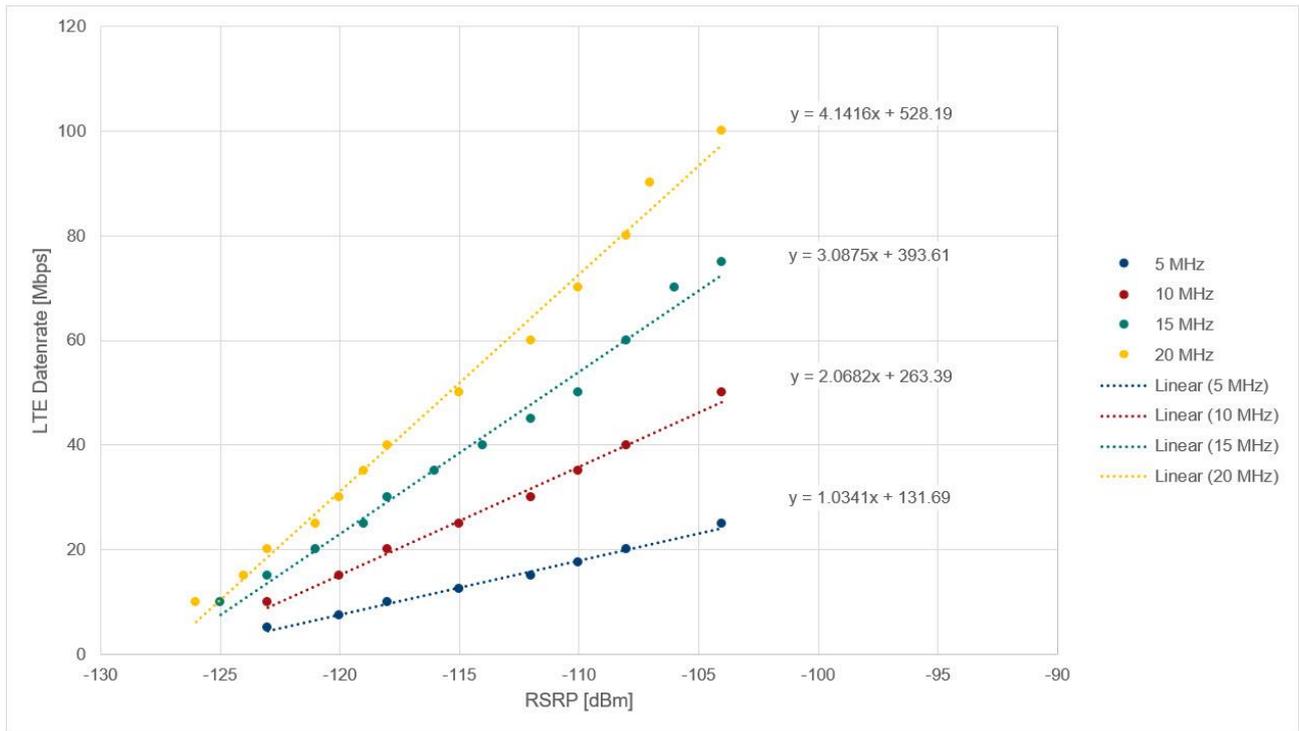


Abbildung 6: Lineare Interpolation der korrelierten LTE Datenraten der BNetzA.

Die bereitgestellten Werte der BNetzA beziehen sich auf eine 2x2 MIMO Konfiguration mit einer 16QAM Modulation und beschreiben deren maximalen Datendurchsatzwerte. Dies spiegelt aber nicht unbedingt den heutigen Netzausbau wieder, in denen höhere Modulationen von bis zu 256QAM möglich sind und gerade in höheren Frequenzen seit langem 4x4 MIMO Technologie zum Einsatz kommt.

Basierend auf dem in diesem Projekt gesammelten Messergebnissen wurde die Korrelation von RSRP zur Datenrate ebenfalls untersucht und mit denen der BNetzA verglichen. Die Steigungen pro Bandbreite sind vergleichbar, jedoch wurden absolut höhere Datenraten erzielt, die gerade auf eine höhere Modulation und MIMO Klasse (4x4) zurückzuführen sind. Eine statistische Auswertung belegt diese Verwendung.

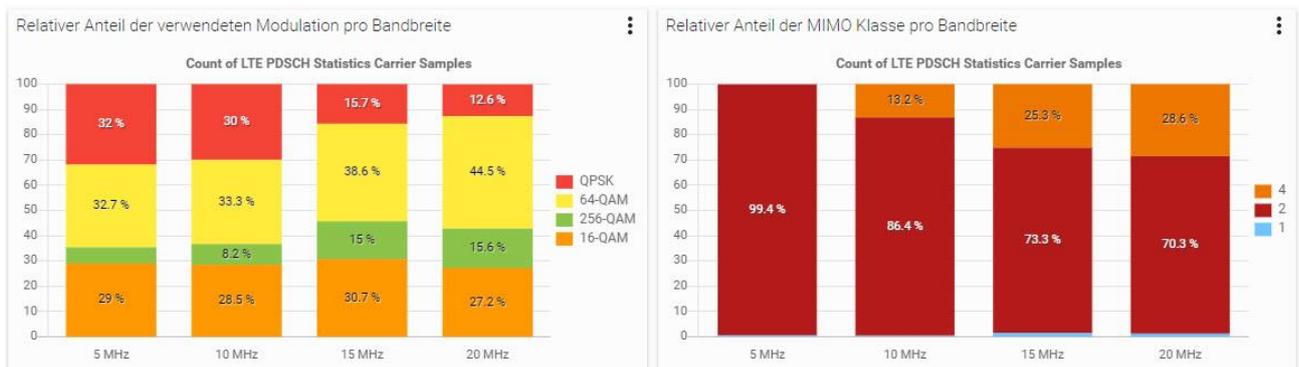


Abbildung 7: Relativer Anteil der verwendeten Modulation (links) und MIMO Klasse (rechts) pro Bandbreite.

Unter dieser Berücksichtigung wurden die maximal zu erreichenden Datenraten denen für eine 2x2 MIMO plus 64QAM Modulation gleichgesetzt und sind als eher konservativ oder pessimistisch zu werten.

| | 2x2 MIMO | 2x2 MIMO | 4x4 MIMO | 4x4 MIMO |
|----|----------|----------|----------|----------|
| BW | 64QAM | 256 QAM | 64QAM | 256 QAM |
| 5 | 37.5 | 49 | 75 | 98 |
| 10 | 75 | 98 | 150 | 196 |
| 15 | 112.5 | 147 | 225 | 294 |
| 20 | 150 | 196 | 300 | 392 |

Tabelle 2: Theoretisch maximaler Datendurchsatz in Abhängigkeit von MIMO Klasse, Modulation und Bandbreite.

3.3.2 5G Korrelationen

Bislang wurden von Seiten der BNetzA noch keine vergleichbaren Korrelationen von 5G Empfangspegeln (SS-RSRP) bereitgestellt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen einer empirischen Untersuchung, gestützt auf den Messergebnissen dieses Projektes, ein solcher Zusammenhang ermittelt.

Ausgangspunkt sind die Messungen mit den Endgeräten. Es wurden nur die Datenraten aus 5G betrachtet und dabei auch nur diese zum „Capacity DL“ Test, der die größte Datenraten in einem Mobilfunknetz anfordert.

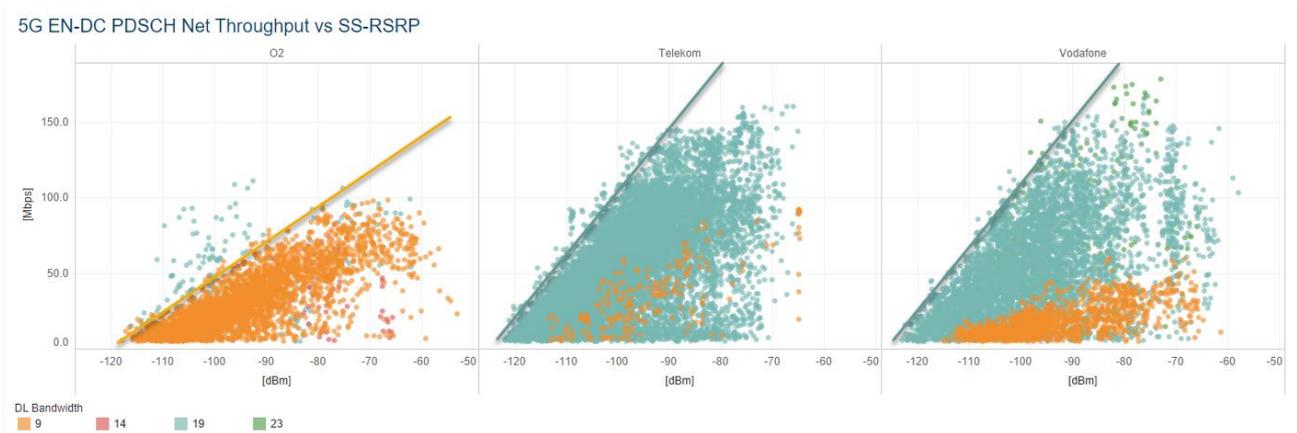


Abbildung 8: 5G PDSCH Datendurchsatz vs. SS-RSRP in Abhängigkeit der Bandbreiten 9, 14, 19 und 23 MHz.

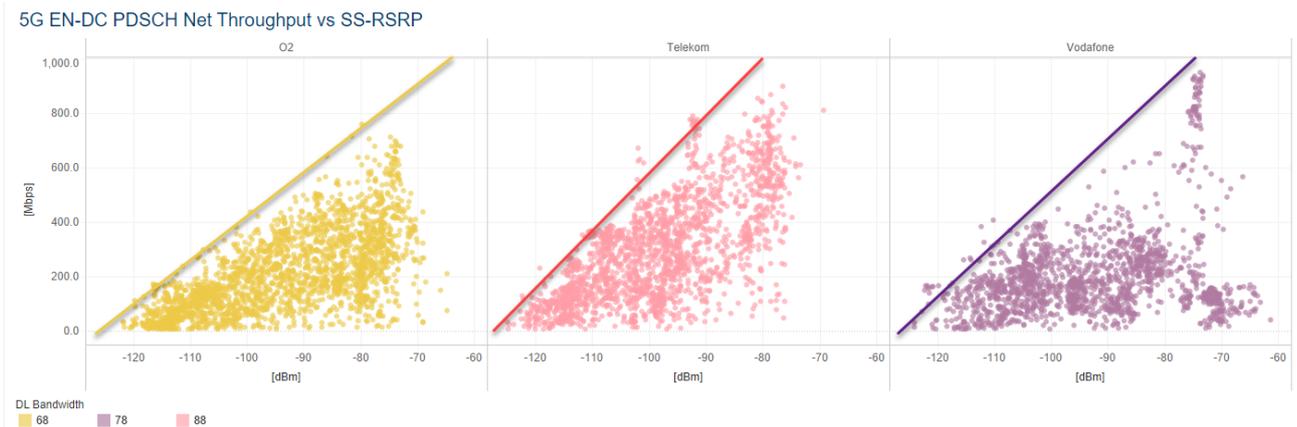


Abbildung 9: 5G PDSCH Datendurchsatz vs. SS-RSRP in Abhängigkeit der Bandbreiten 68, 78 und 88 MHz.

Die Graphen zeigen die Korrelation zwischen 5G Datendurchsatz zum 5G Pegel (SS-RSRP) in Abhängigkeit der jeweiligen Bandbreiten. Die Aufteilung auf den Netzbetreiber spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle. Die Linien deuten die maximale Datenrate als Funktion des Pegels an und wurden mathematisch bestimmt und auch mit theoretischen Berechnungen abgeglichen.

Die Datensätze für 9 MHz und 23 MHz boten nicht ausreichend Datenpunkte zu einer genauen Geradenbestimmung. Diese wurden anhand der übrigen Ergebnisse und weiteren theoretischen Berechnungen interpoliert. Daraus resultieren insgesamt die folgenden empirischen Berechnungsvorschriften, basierend auf einer linearen Gleichung $f(x) = mx + b$.

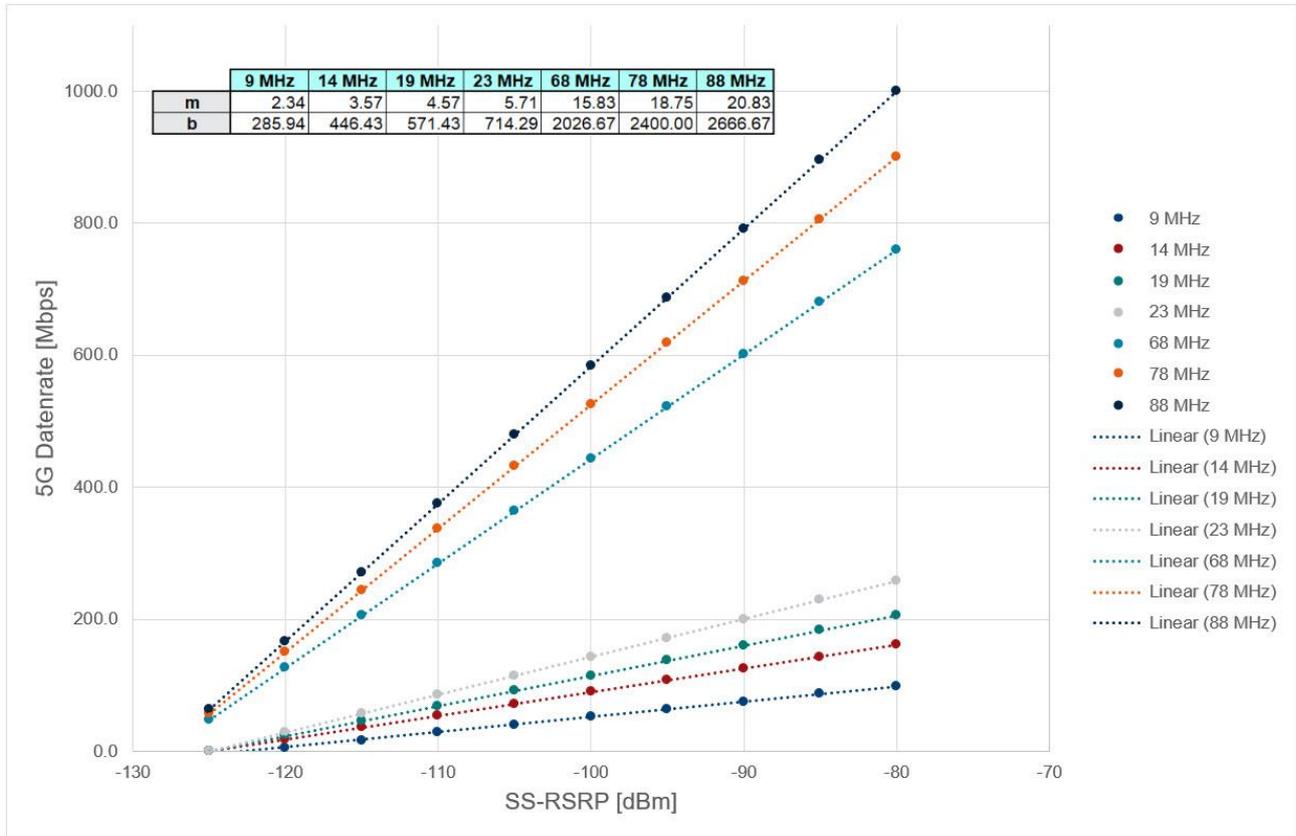


Abbildung 10: Empirisch ermittelte Korrelation 5G Datenrate zu SS-RSRP.

3.3.3 Verdichtung

Zur Auswertung der Messdaten wurden diese in Versorgungskacheln der Größe 100x100 m² verdichtet. Dies bedeutet, es wurden alle Messwerte pro Netzbetreiber und pro LTE-Kanal (EARFCN) bzw. 5G-Kanal (SS-NR-ARFCN) linear gemittelt und der geographischen Kachel zugeordnet. Mit der oben beschriebenen Berechnungsvorschrift wurde diese gemittelten Empfangspegel in eine entsprechende Datenrate pro LTE und 5G Kanal transferiert.

Ziel war es die Pegelwerte der sogenannten breitbandigen Messungen (WB-RSRP) zu verwenden, da diese die entscheidende Messgröße darstellen. Unter gewissen Umständen kann es vorkommen, dass der Netzwerkscanner kein WB-RSRP dekodieren kann. Dies ist der Fall, wenn die empfangene Signalstärke sehr klein ist und das entscheidende Qualitätskriterium zur Dekodierung nicht erfüllt wird. In diesen Fällen wurden die schmallbandigen Signale (NB-RSRP) herangezogen und in den entsprechenden breitbandigen Wert umgerechnet.

Ferner wurde bei der Berechnung der theoretisch zu erwartenden Datenraten eine Aggregation bis zu vier LTE Trägern zugelassen. Grundlage für die Zuordnung sind die durch die Netzbetreiber definierten Prioritäten der jeweiligen LTE Kanäle. Alle drei untersuchten Netzbetreiber, Telefónica, Telekom und Vodafone, haben neben ihren LTE-Netzen auch 5G-Netze etabliert. Keiner der Netzbetreiber bot die Möglichkeit während der Messkampagne das sogenannte „Stand-Alone“ 5G Netz anzubieten, welches ein eigenständiges 5G Core

voraussetzt. Zusätzlich zu den LTE Datenraten wurden im Rahmen dieser Untersuchung auch die zu erwartenden Datenraten unter Hinzunahme eines 5G Kanals ermittelt. Dabei wurde der 5G Kanal mit der größten Bandbreite berücksichtigt. Ebenso zusätzlich wurde eine mögliche Versorgung und damit verbundene Datenrate für ein reines 5G Endgerät ermittelt. Dabei wurde nur der 5G Träger mit der größten Bandbreite berücksichtigt.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse pro Kategorie (Bahnstrecken und Bundesstraßen) und Netzbetreiber aufgezeigt. Die Überlagerung spiegelt das kumulierte Resultat aller Netzbetreiber wieder, dem sogenannten „Best Operator“, also eine netzbetreiberunabhängige Betrachtung. Neben den berechneten LTE Datenraten wurden ebenso diese unter Hinzunahme des jeweils besten 5G Kanals (5G ENDC) und für ein reines 5G Endgerät berechnet.

4.1 Fahrtstrecken

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden folgende fahrgaststarken Zugstrecken und Bundesstraßen mit der Verbindungsfunktion 0 und 1 untersucht.

| Zugstrecken | | | Bundesstraßen | |
|---|--------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Route | Zug | Distanz [km] | Route | Distanz [km] |
| München Ost-Passau Hbf (via Muhlendorf) | RB40, RB46 | 186 | B13 | 17 |
| Passau Hbf to München Hbf | RE3 | 190 | B15 | 102 |
| München Ost-Freilassing | BRB RE5 | 136 | B15N | 52 |
| Freilassing-München Ostbahnhof (via Muhlendorf) | RB 45, RB 40 | 139 | B16 | 41 |
| München HBF-Kochel | RB66 | 75 | B11 | 62 |
| München HBF to Griesen | RB60 | 113 | B85 | 196 |
| München HBF-Rosenheim (Via Holzkirchen) | BRB RB55, BRB RB58 | 73 | B303 | 58 |
| München Hbf Gl.27-36 to Fuessen | BRB RB68 | 130 | B173 | 71 |
| Buchloe-Oberstdorf | RE17 | 103 | B505 | 22 |
| Lindau-Reutin - Ulm Hbf | RE7, RE75 | 175 | B4R | 10 |
| Ulm Hauptbahnhof to Augsburg Hbf | ICE699 | 86 | B25 | 34 |
| Augsburg Hbf - Memmingen | RE71 | 86 | B2 Augsburg-Nürnberg | 128 |
| Ulm Hbf - Ingolstadt Hbf | ag RB15, ag RB15 | 128 | B300 | 51 |
| Ingolstadt Hbf - Augsburg Hbf | BRB RB13 | 67 | B17 | 47 |
| Augsburg Hbf - Schongau | BRB RB67 | 94 | B12 Kempten Ost | 57 |
| Landsberg (Lech) - Augsburg Hbf | BRB RB69, BRB RB69 | 40 | B12 Kempten West | 61 |
| Augsburg Hbf - Nürnberg Hbf | ICE 802 | 137 | B31 | 10 |
| Nürnberg Hbf - München Hbf | ICE 985 | 170 | B23 | 19 |
| München Hbf -Augsburg Hbf | ICE 692 | 62 | B2 Garmisch | 44 |
| Ingolstadt Hbf - Plattling | ag RB17 | 138 | B20 | 230 |
| Plattling - Bayerisch Eisenstein | WBA RB35 | 63 | B12 Passau | 61 |
| Regensburg Hbf - Furth im Wald | ALX RE25 | 109 | Total | 1373 |
| Schwandorf - Nürnberg Hbf | RE43 | 94 | | |
| Nürnberg Hbf-Würzburg Hbf | ICE886 | 102 | | |
| Würzburg Hbf - Treuchtlingen | RB80 | 140 | | |
| Treuchtlingen - Ingolstadt Hbf | RB16 | 52 | | |
| Landshut(Bay)Hbf - Nürnberg Hbf | RE50 | 162 | | |
| Nürnberg Hbf - Hof Hbf | RE30 | 164 | | |
| Hof Hbf - Bayreuth Hbf | ag RB24 | 90 | | |
| Bayreuth Hbf - Bad Rodach | ag RB24, ag RB18 | 101 | | |
| Lichtenfels - Bamberg | RE35 | 32 | | |
| Würzburg HBF - Kahl (Main) | RE54 | 94 | | |
| Nürnberg Hbf - Schnelldorf | RE90 | 78 | | |
| Regensburg - Plattling | RB51 | 62 | | |
| Total | | 3671 | | |

Tabelle 3: Untersuchte Zugstrecken und Bundesstraßen.

4.2 Zugdämpfung

Im Gegensatz zu den Messungen auf den Bundesstraßen befanden sich die HF Antennen der beiden Netzwerkscanner nicht außerhalb des Fahrzeuges, sondern im Zug. Die Zugdämpfung wurde ermittelt, indem Messungen auf dem Bahnsteig vor dem Einsteigen und direkt nach dem Einsteigen im Zug am ausgewählten Sitzplatz durchgeführt wurden. Ein Vergleich der Signalstärken unter Berücksichtigung derselben Zelle lässt auf die Zugdämpfung rückschließen.

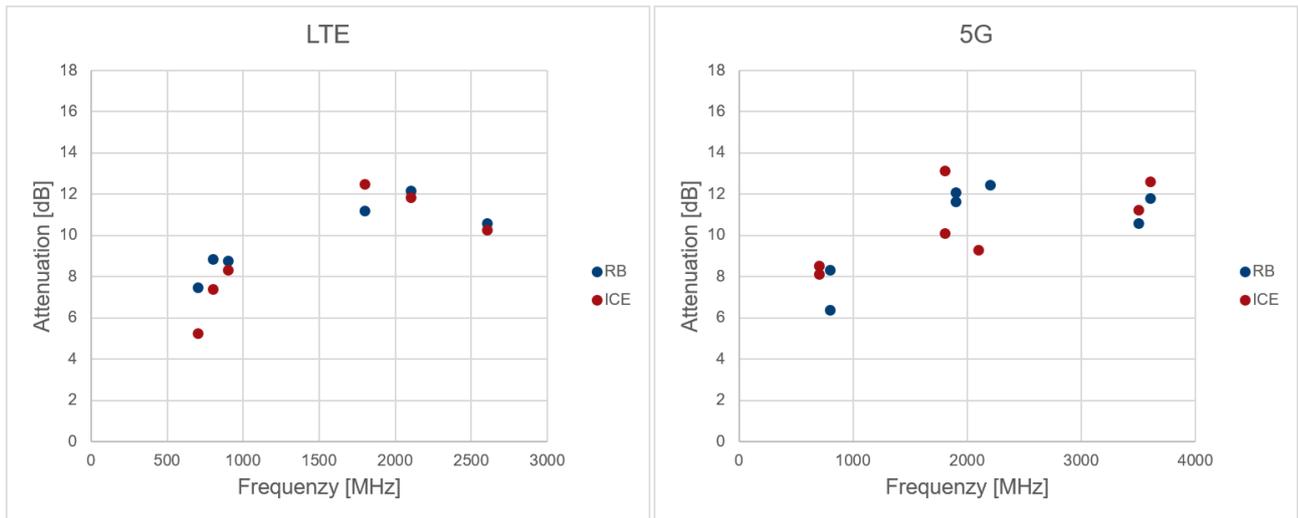


Abbildung 11: Zugdämpfung. LTE (links) und 5G (rechts) für Zugtyp RB und ICE.

Die Dämpfung ist erwartungsgemäß frequenzabhängig und beträgt bei Frequenzen kleiner 1500 MHz etwa 8 dB und oberhalb dieser Schwelle rund 12 dB. Eine Abhängigkeit von der Technologie (LTE oder 5G) lässt sich ebenso wenig nachweisen, wie eine vom Zugtyp (RB oder ICE). Die Messungen wurden im Falle einer ICE Nutzung in den entsprechenden Abteilen mit Repeatertechnik durchgeführt. Jedoch kann keine Aussage über die tatsächliche Verbauung solcher Verstärker, noch deren einwandfreie Funktionsweise getroffen werden.

Bei der Auswertung wurden diese Dämpfungswerte rechnerisch korrigiert, um eine realistischere Aussage über die geforderte Versorgungslage treffen zu können.

4.3 Messungen in Tunneln und Zügen allgemein

Eine große Herausforderung an ein Messsystem stellen Messungen in Tunneln dar, da hier keine GNSS Signale empfangen werden können. Zwar verfügt der gewählte GNSS-Empfänger über eine sogenannte *Dead Recognition* Funktionalität, diese lieferte aber gerade in Zugtunneln nur selten verwertbare Ergebnisse.

Eine weitere Hürde für Zugmessungen ist die hohe Anzahl von Fahrgästen im Zug, bzw. speziell dem Wagon, wo sich das Messsystem auch befand. Gerade in schlecht versorgten Gebieten führt dies dazu, dass die Endgeräte ihre maximaler Sendeleistung nutzen. In der Summe der Endgeräte führt dies zu einer hohen Leistung, welche den empfindlichen Empfänger des Netzwerkscanners stört. Dem zufolge kann der Scanner nicht mehr korrekt messen und liefert keinen validen Messwert. Dies erklärt die teilweise auftretenden Lücken bei den Bahnstreckenmessungen.

4.4 Frequenznutzung der Mobilfunkbetreiber

Die Nutzung der zugeteilten Frequenzen für die Technologie LTE zeigt die folgende Übersicht.

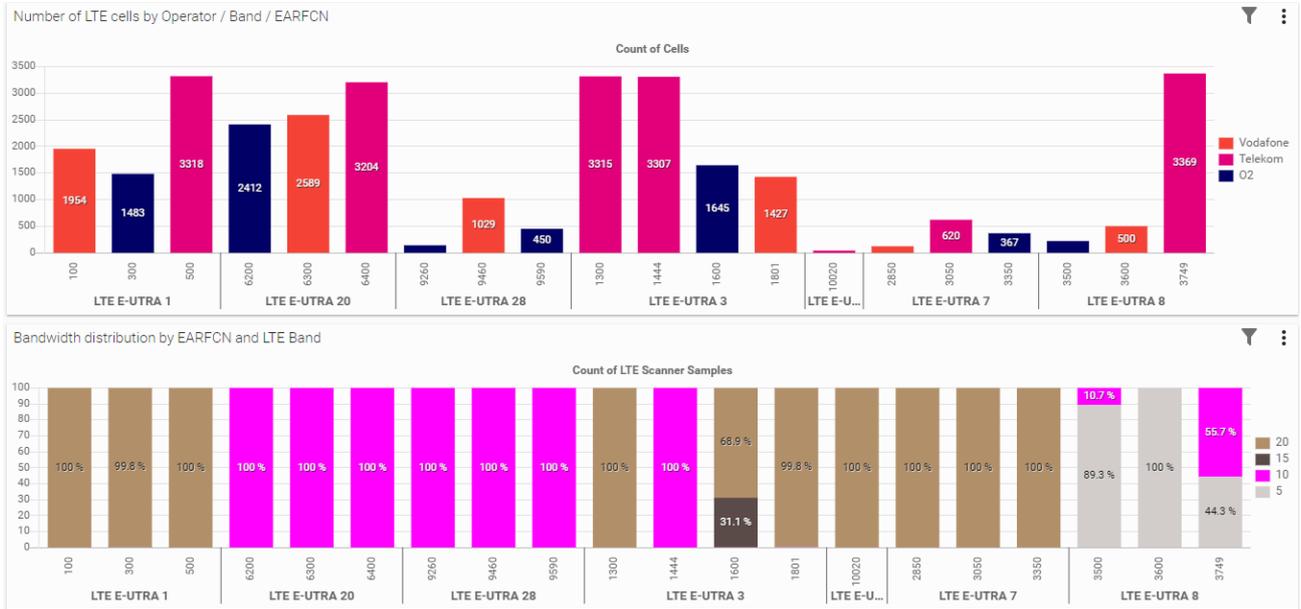


Abbildung 12: LTE Frequenznutzung. Oben: Dekodierte LTE Zellen pro EARFCN, Band und Netzbetreiber. Unten: Genutzte Bandbreiten pro EARFCN und Band.

Das obere Bild zeigt ebenso die Anzahl der mit dem Netzwerkscanner dekodierten LTE Zellen auf der Basis der ausgelesenen CGIs (*Cell Global Identifier*) und gibt einen indirekten Einblick über die Zelldichte. Telekom hat alles in allem die größte Anzahl an verbauten LTE Zellen, gefolgt von Vodafone und Telefónica. Der EARFCN 9590 in Band 28 für Telefónica entspricht dem EARFCN 6200 in Band 20. Beide Kanäle haben dieselbe Frequenz 796,0 MHz. Beide EARFCNs sind denselben Zellen zugeordnet. Das untere Bild zeigt die relative Bandbreitenkonfiguration pro EARFCN auf.

Die neue 5G Technologie wurde neben dem neuen Band n78 ebenso in den Bändern n28, n1 und n3 nachgewiesen. Dabei ist eine Nutzung beider Technologien, LTE und 5G, in denselben Frequenzbereichen durch den Einsatz von *Dynamic Spectrum Sharing* (DSS) möglich.

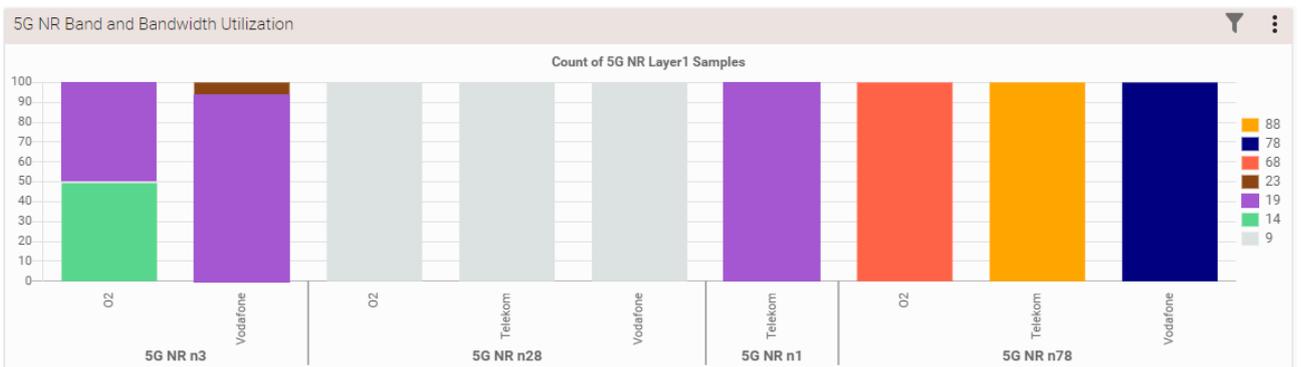


Abbildung 13: 5G Frequenznutzung pro Netzbetreiber, Band und Bandbreite.

Eine Auflistung pro SSB-NR-ARFCN wurde nicht vorgenommen, da dieser im Gegensatz zu LTE dynamisch von der gNodeB (5G Basisstation) vergeben wird.

4.5 Ergebnisse – LTE

4.5.1 Statistische Zusammenfassung

Die Auswertung der Messungen zeigt, dass sowohl Vodafone als auch Telekom zu knapp 85 % eine Datenrate von mindestens 100 Mbps seinen Kunden auf den gemessenen Bundesstraßen bereitstellt. Telefónica liegt mit etwas mehr als 70 % hinter der Führungsspitze. Für die Netzbetreiber übergreifende Überlagerung liegt der Wert sogar bei 96 Prozent. Mit anderen Worten erfüllen nur knapp 4 % der gemessenen Bundesstraßen nicht das geforderte Kriterium.

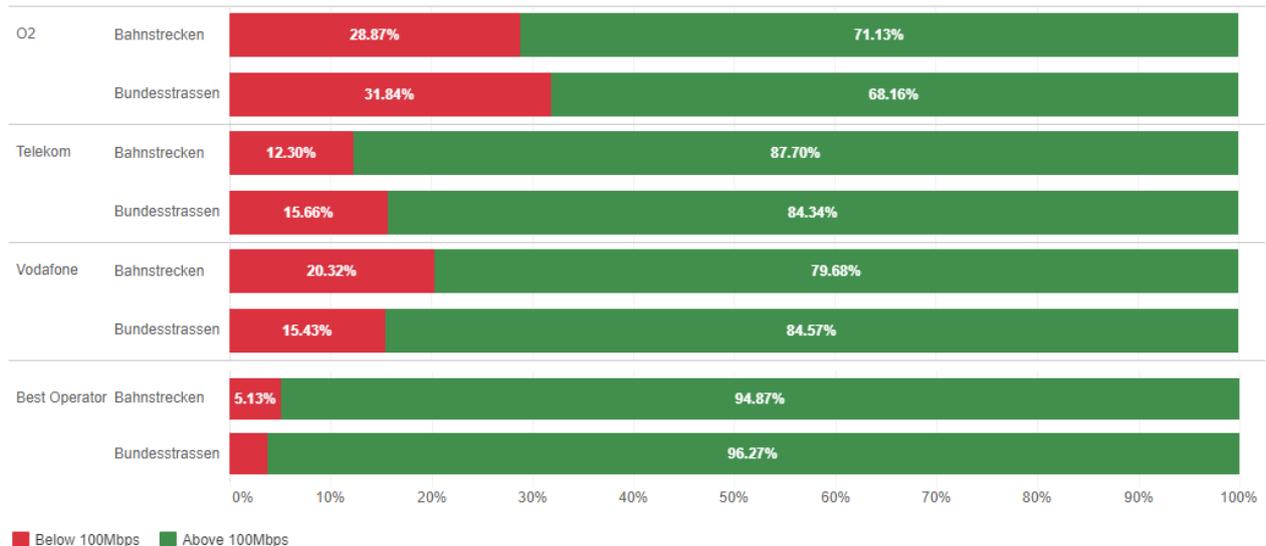


Abbildung 14: Erfüllungsgrad der 100 Mbps Datenraten pro Netzbetreiber und Kategorie im Falle von LTE Endgeräten.

Anders stellt sich das Ergebnis in den Zügen dar. Generell ist dabei zu beachten, dass wie bereits beschrieben, keine Außenantennen für die Netzwerkscanner zum Einsatz kommen konnten, die gemessenen Signalpegel aber um die bestimmte Zugdämpfung frequenzabhängig korrigiert wurde.

Telekom zeigt auf fast 88 % der Bahnstrecken eine Datenrate größer 100 Mbps und ist damit sogar noch etwas besser als auf den Bundesstraßen. Vodafone erzielt mit knapp 80 % ebenso ein gutes Ergebnis, hat aber auf der Schiene ein schlechteres Ergebnis im Vergleich zur Straße. Telefónica zeigt mit 71 % der Bahnstrecken mit mindestens 100 Mbps ein leicht besseres Resultat, als auf den Bundesstraßen.

Alle drei Netzbetreiber zusammen betrachtet erfüllen die geforderte Datenrate auf bereits 95 % der gemessenen Bahnstrecken.

4.5.2 Geographische Darstellung

Die statistischen Ergebnisse werden im Folgenden auf Karten pro Netzbetreiber und Kategorie (Bahnstrecken / Bundesstraßen) dargestellt.

Bahnstrecken

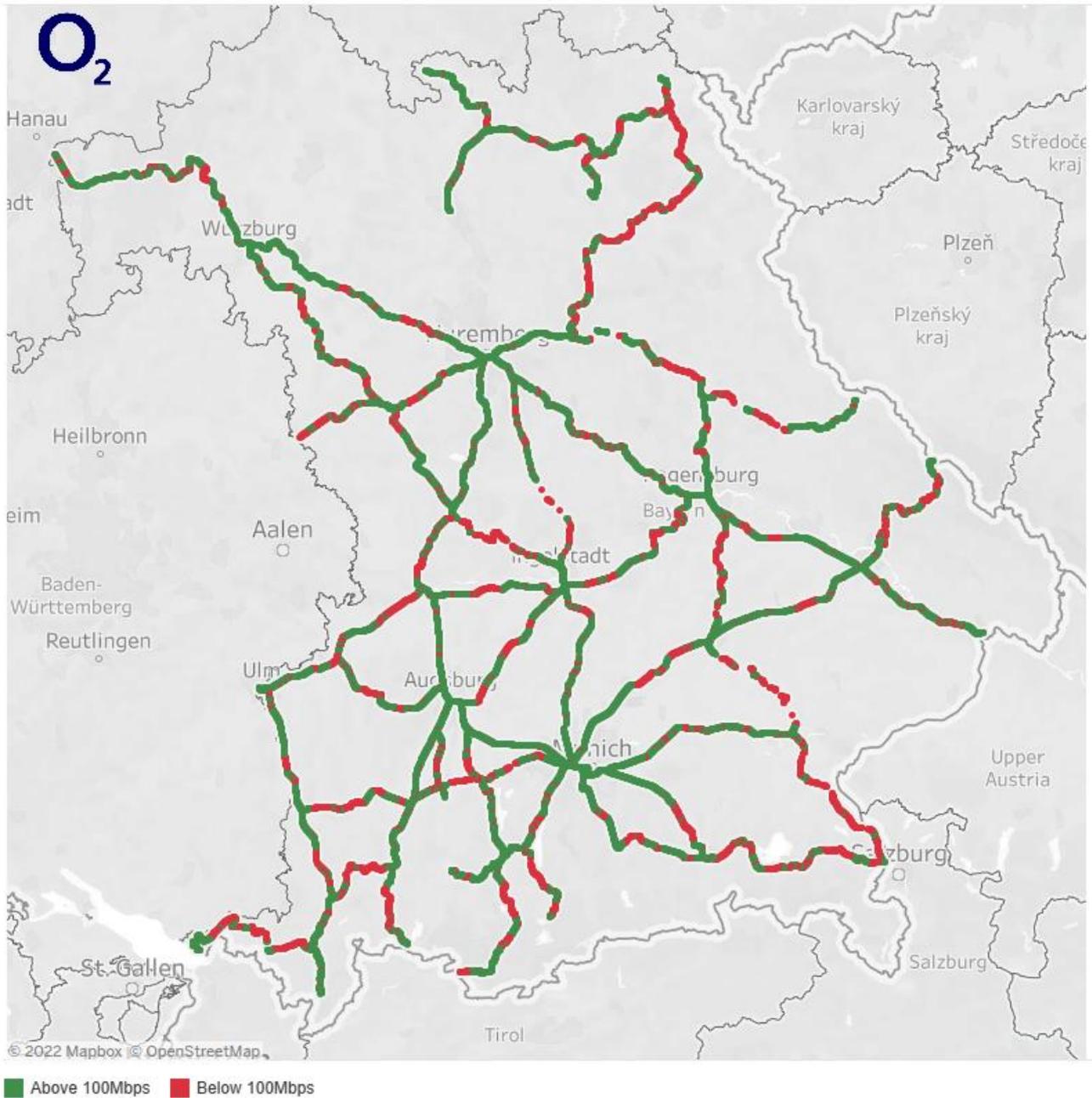


Abbildung 15: Bahnstrecken: LTE Datenraten - Telefónica.

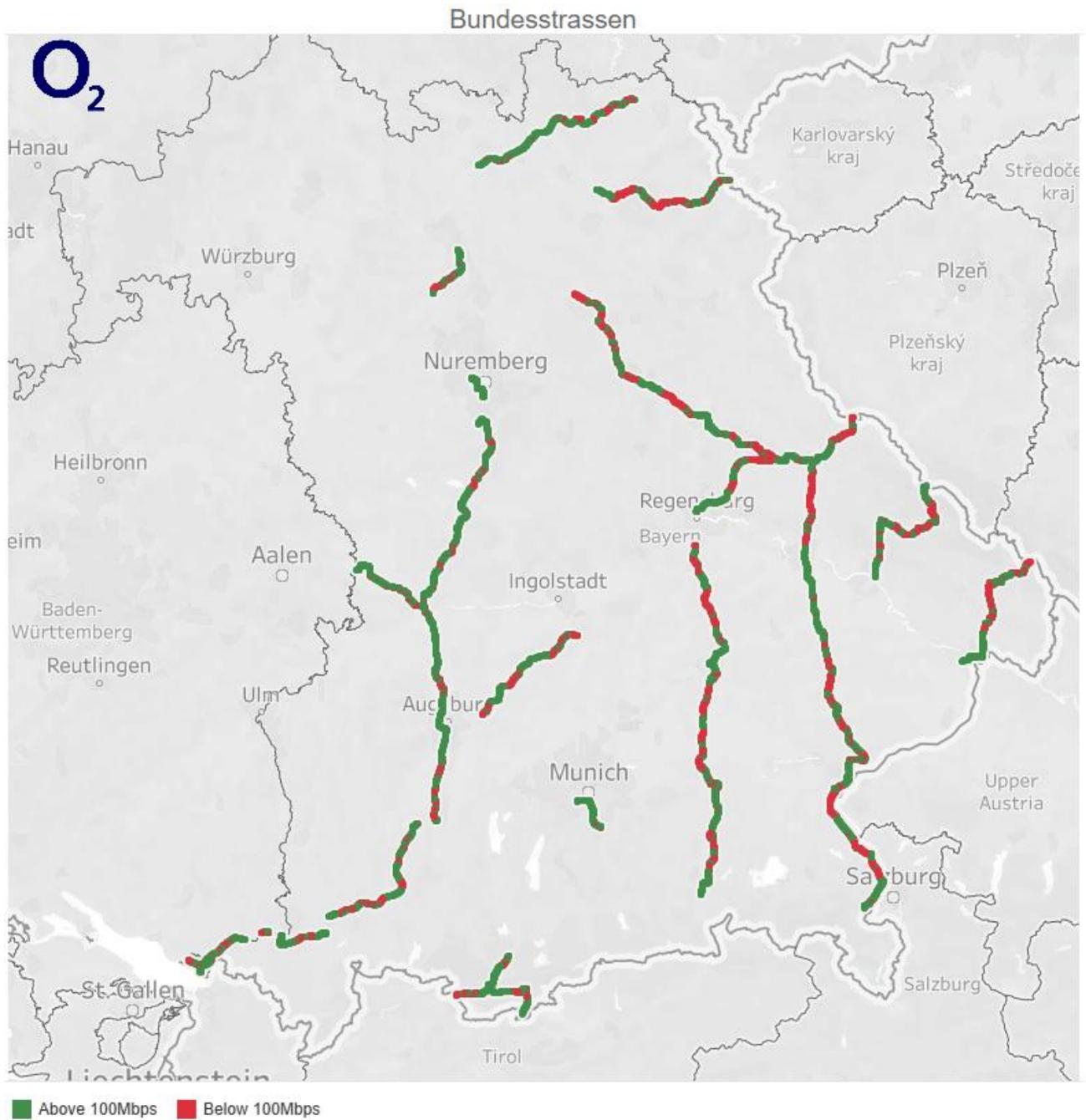


Abbildung 16: Bundesstrassen: LTE Datenraten - Telefónica.

Bahnstrecken

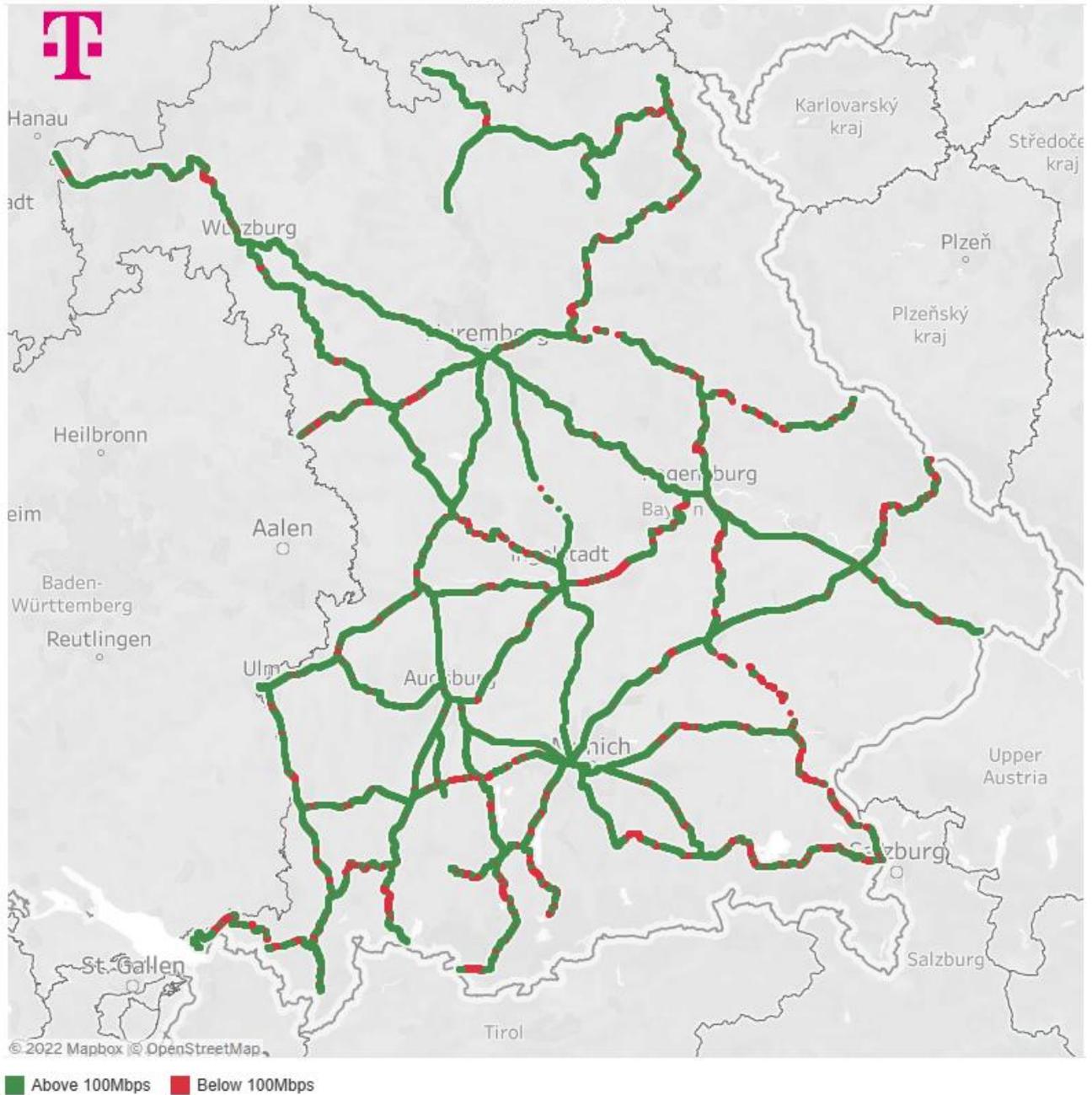


Abbildung 17: Bahnstrecken: LTE Datenraten - Telekom.

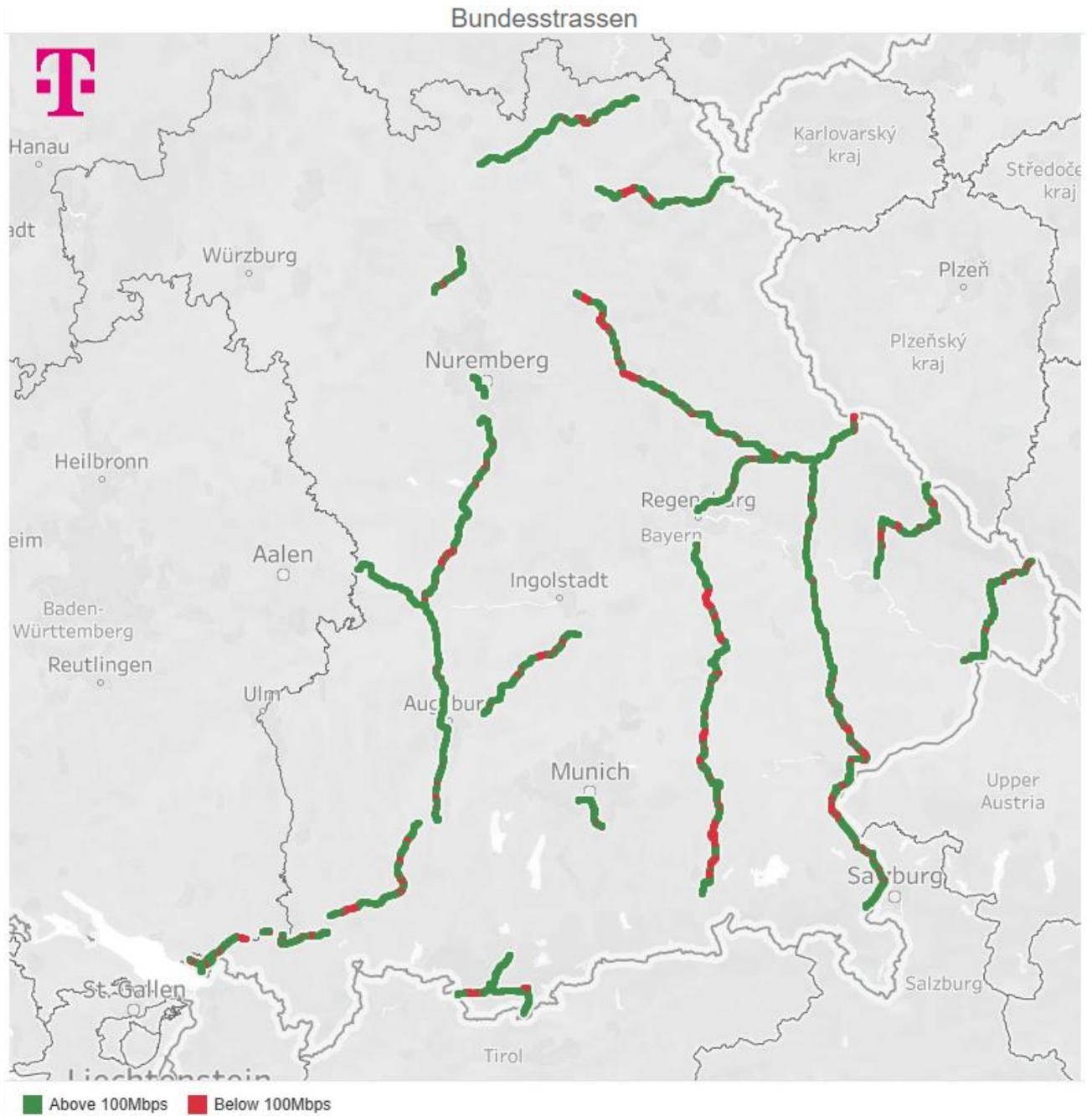


Abbildung 18: Bundesstrassen: LTE Datenraten - Telekom.

Bahnstrecken

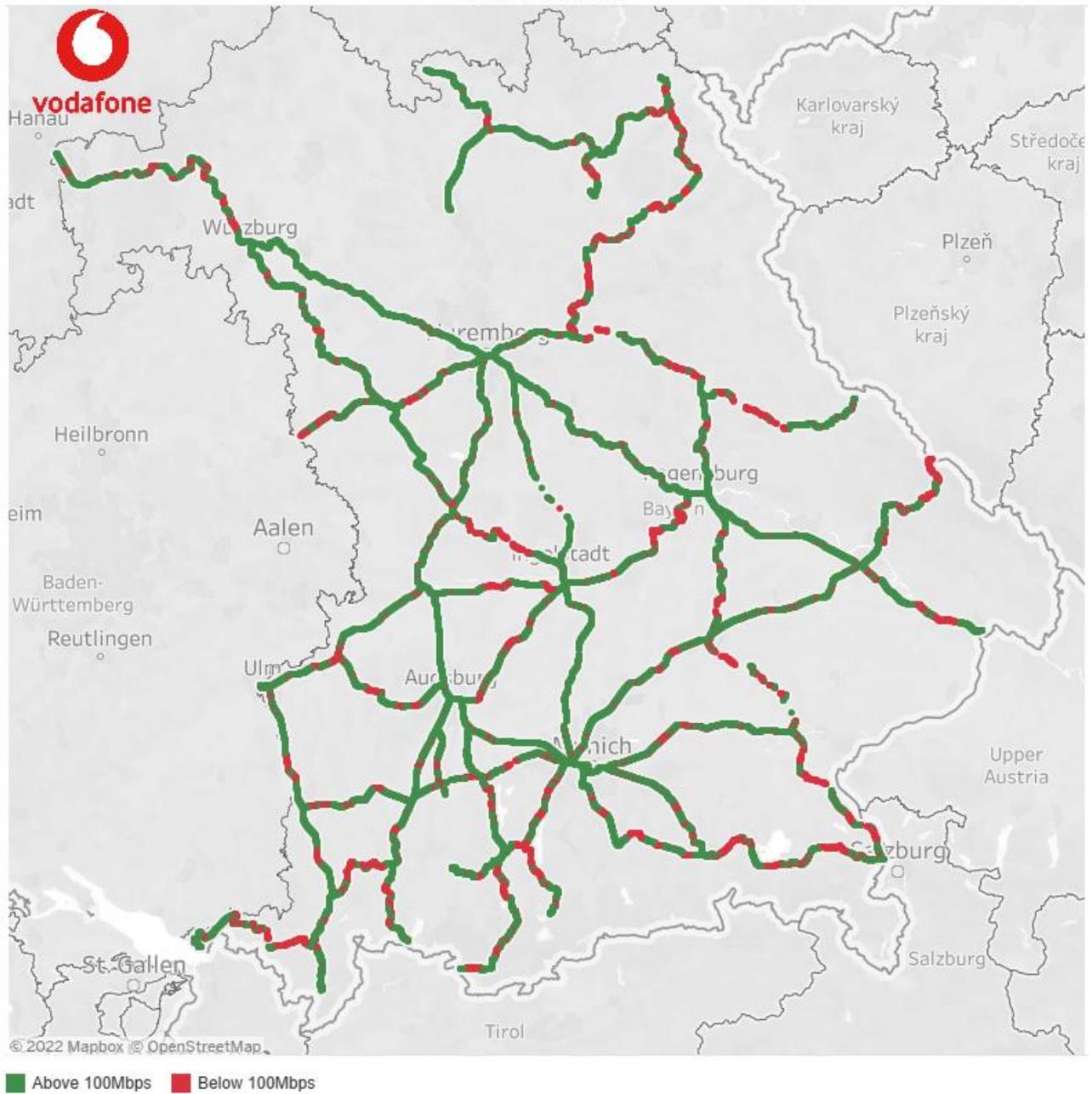


Abbildung 19: Bahnstrecken: LTE Datenraten - Vodafone.

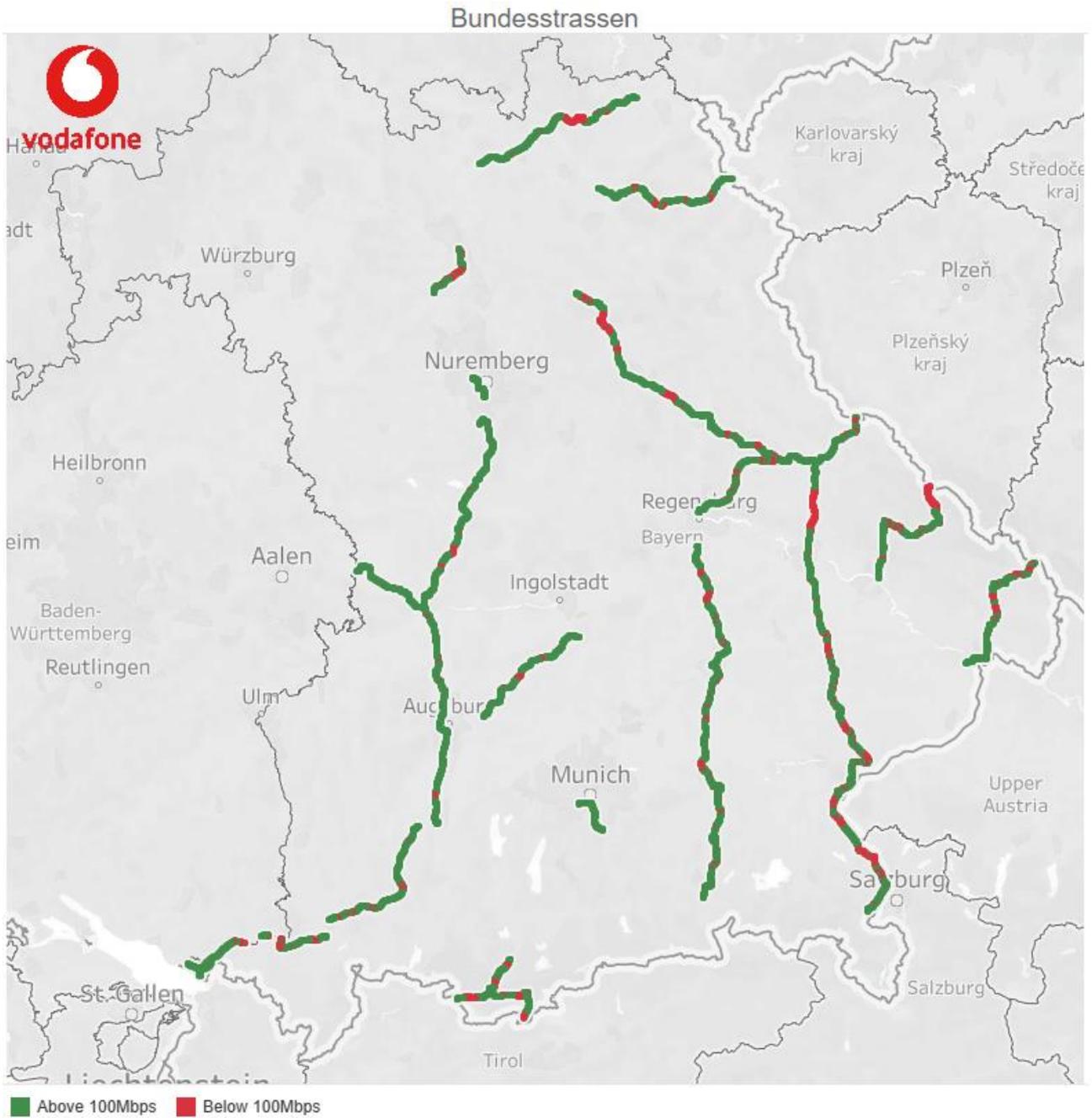


Abbildung 20: Bundesstraßen: LTE Datenraten - Vodafone.

Bahnstrecken

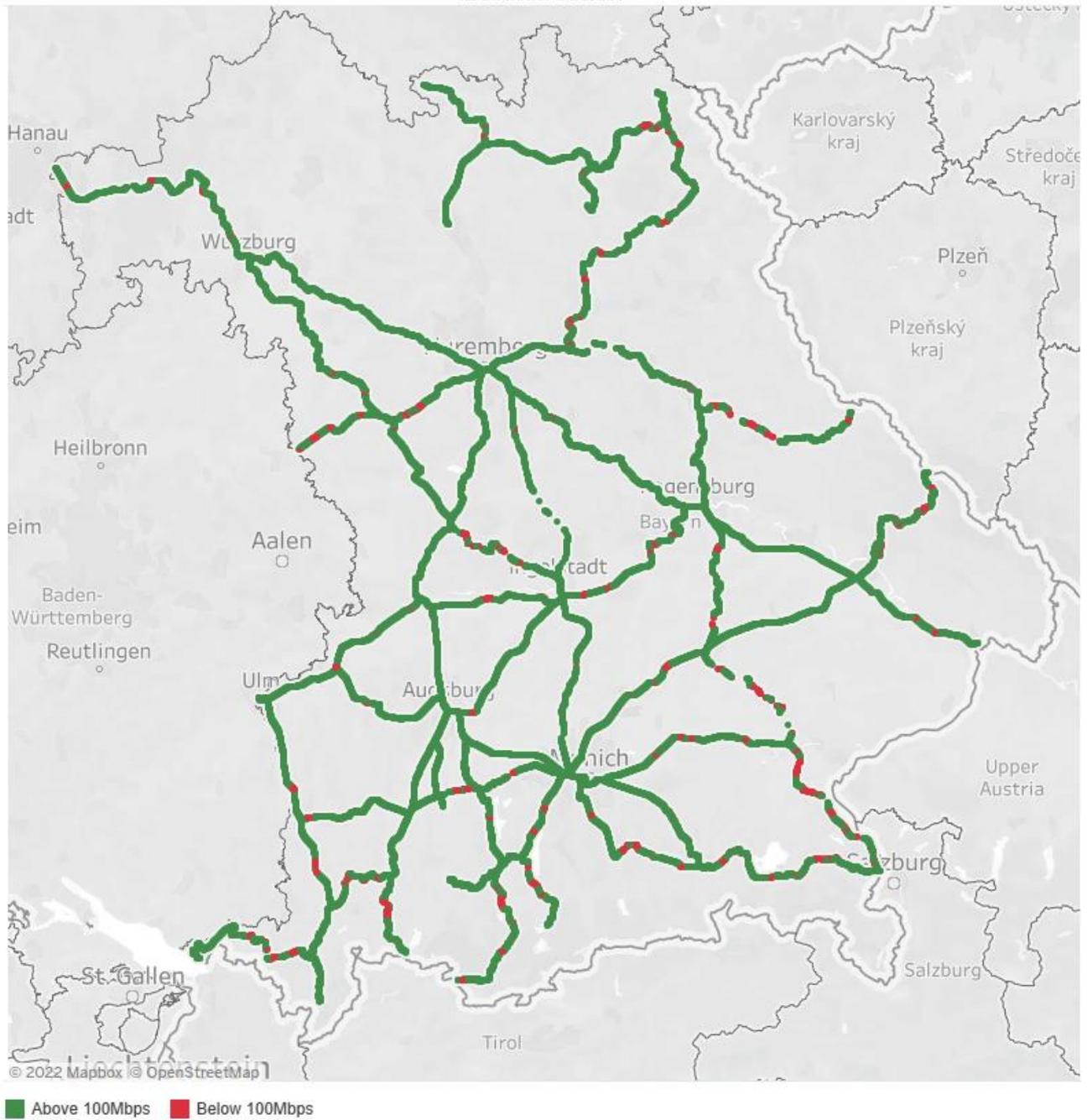


Abbildung 21: Bahnstrecken: LTE Datenraten - alle Netzbetreiber.

Bundesstrassen

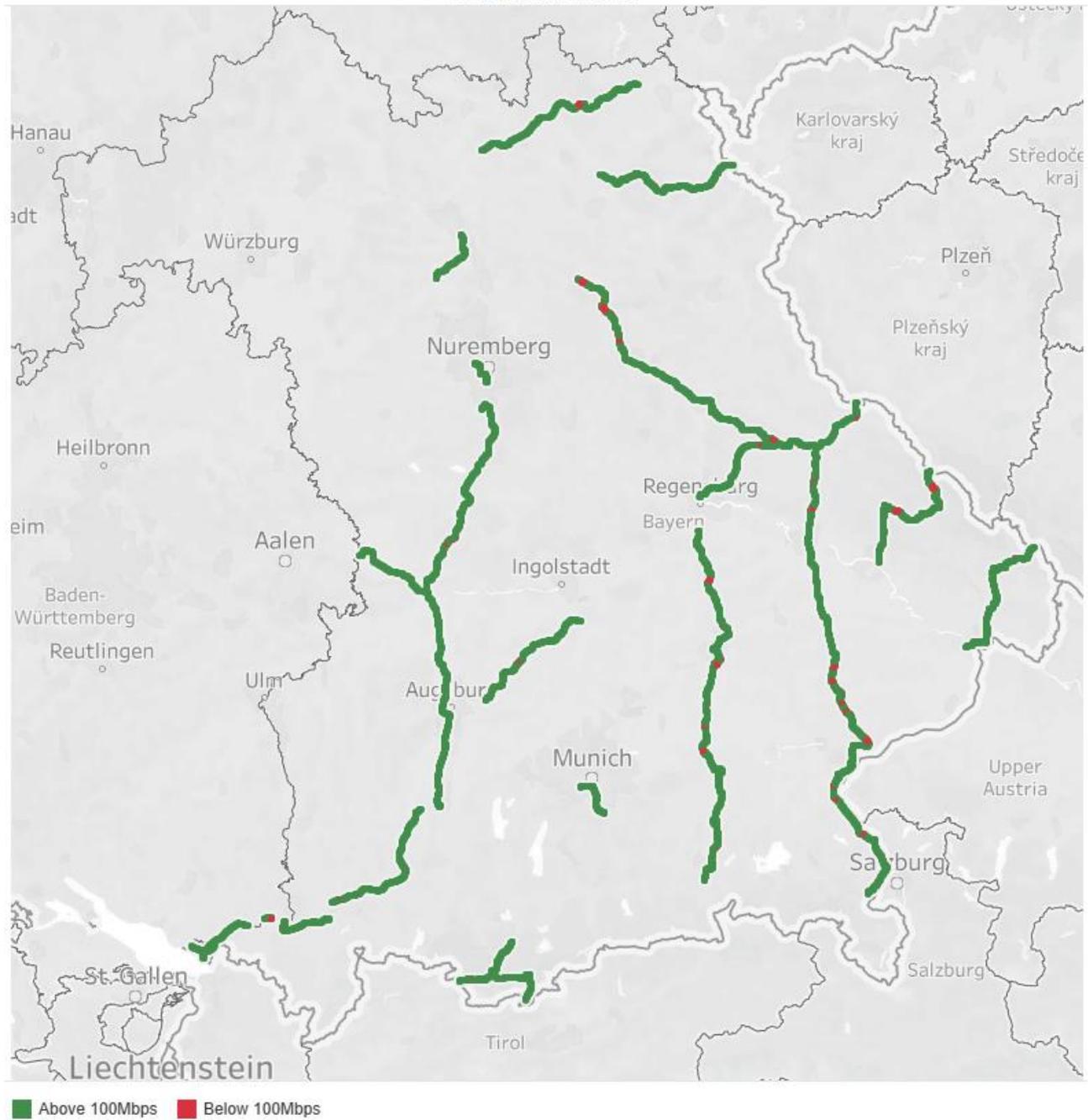


Abbildung 22: Bundesstrassen: LTE Datenraten - alle Netzbetreiber.

4.6 Ergebnisse – 5G ENDC (LTE + 5G)

4.6.1 Statistische Zusammenfassung

Die Möglichkeit einen 5G Träger zu den LTE Trägern zusätzlich hinzufügen steigert den Erfüllungsgrad der 100 Mbps Grenze auf Bundesstraßen für alle Netzbetreiber. Telekom und Vodafone sind beide gleichauf mit einer Abdeckung von etwa 90 %, was einen Zuwachs von fünf Prozentpunkten entspricht. Telefónica kann durch die Hinzunahme eines 5G Trägers mehr als 14 Prozentpunkte gewinnen und erreicht somit eine gute Abdeckung von 82 %. Alle Netzbetreiber zusammen betrachtet sind die gemessenen Bundesstraßen sogar mit 98.4 % mit einer Datenrate größer 100 Mbps versorgt.

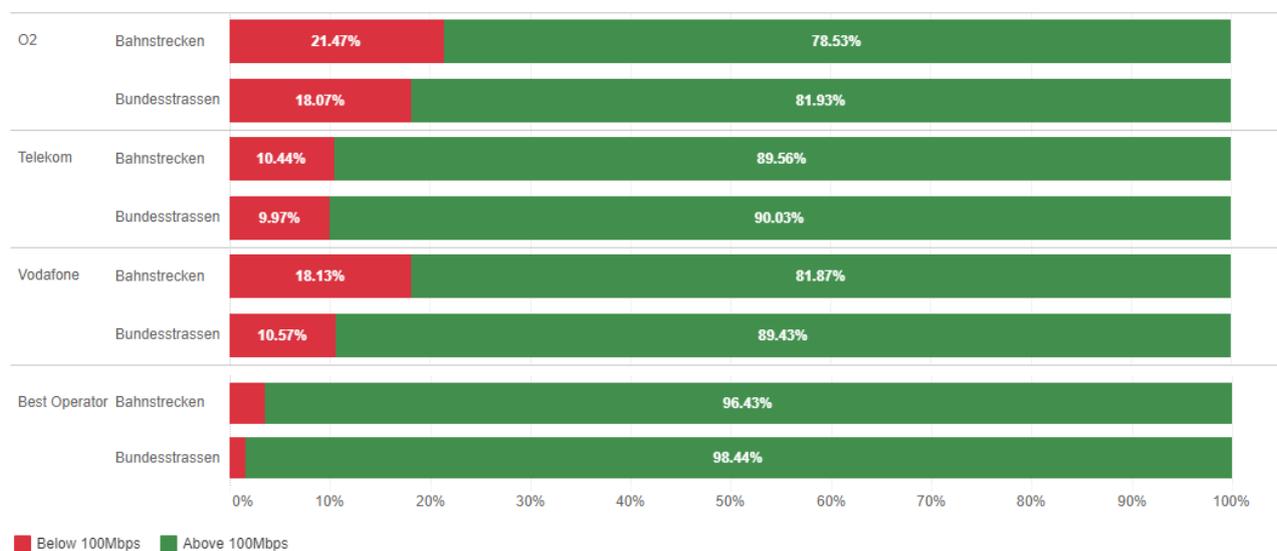


Abbildung 23: Erfüllungsgrad der 100 Mbps Datenraten pro Netzbetreiber und Kategorie im Falle von 5G ENDC Endgeräten.

Auch auf den Bahnstrecken wirkt sich die Hinzunahme eines 5G Trägers positiv auf das Ergebnis aus. Grundsätzlich ist der Gewinn für vorher schlechte Ergebnisse größer als der für bereits gute Versorgungserfüllung. Während Telefónica 7 % Verbesserung erreicht, verbessern sich Telekom und Vodafone um nur 2 %. Über alle Netzbetreiber ist der Gewinn sogar kleiner als 2 Prozentpunkte, mit einer Versorgungserfüllung von guten 96 %.

4.6.2 Einzelrouten Ergebnisse

Die wichtigsten Ergebnisse für diesen Report basieren auf der Analyse der möglichen Datenrate für moderne Endgeräte, die eine Kombination von LTE und 5G Netzen erlauben. Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Ergebnisse werden im Folgenden auf die jeweiligen gefahrenen Routen auf den Bundesstraßen, bzw. Bahnstrecken heruntergebrochen. Dies ermöglicht einen detaillierten Einblick welche Streckenabschnitte durch welchen Netzbetreiber mit dem 100 Mbps Kriterium zu welchem Grad erfüllt sind.

| | Route | Netzbetreiber | | |
|-----------------------|------------------|---------------|---------|----------|
| | | Telefónica | Telekom | Vodafone |
| Bundesstrassen | B2 | 94.2% | 94.1% | 97.0% |
| | B2 Garmisch | 91.2% | 96.7% | 82.6% |
| | B4R | 100.0% | 100.0% | 99.2% |
| | B11 | 88.1% | 90.2% | 79.0% |
| | B12 Kempten east | 89.5% | 89.8% | 92.2% |
| | B12 Kempten west | 83.6% | 86.8% | 88.2% |
| | B13 | 99.0% | 98.5% | 99.0% |
| | B15 | 72.5% | 79.2% | 95.0% |
| | B15n | 67.4% | 76.9% | 95.2% |
| | B16 | 82.3% | 97.2% | 87.6% |
| | B17 | 91.3% | 99.4% | 99.4% |
| | B20 | 71.6% | 89.8% | 83.5% |
| | B23 | 70.0% | 74.9% | 75.9% |
| | B25 | 95.9% | 100.0% | 99.5% |
| | B31 | 95.2% | 90.3% | 99.2% |
| | B85 | 78.3% | 85.7% | 84.9% |
| | B173 | 89.5% | 93.6% | 86.8% |
| | B300 | 85.6% | 92.2% | 96.5% |
| | B303 | 76.4% | 90.4% | 94.2% |
| B505 | 94.4% | 95.8% | 83.5% | |
| P12 Passau | 78.5% | 95.4% | 86.5% | |

Abbildung 24: Erfüllung des 100 Mbps Kriteriums auf Bundesstraßen der Versorgungsklassen 0 und 1 pro Netzbetreiber in Prozent.

| | Route | Netzbetreiber | | |
|------------------------------|--|---------------|---------|----------|
| | | Telefónica | Telekom | Vodafone |
| Bahnstrecken | Augsburg Hbf - Memmingen | 72.1% | 95.2% | 86.9% |
| | Augsburg Hbf - Nürnberg Hbf | 87.1% | 97.7% | 94.3% |
| | Augsburg Hbf - Schongau | 92.9% | 90.8% | 90.3% |
| | Bayreuth Hbf - Bad Rodach | 85.9% | 98.5% | 92.1% |
| | Buchloe-Oberstdorf | 84.1% | 92.7% | 79.0% |
| | Freilassing-München Ostbahnhof(via Muhlendorf) | 73.1% | 77.1% | 74.0% |
| | Hof Hbf - Bayreuth Hbf | 76.6% | 91.2% | 87.5% |
| | Ingolstadt Hbf - Augsburg Hbf | 94.2% | 96.7% | 81.1% |
| | Ingolstadt Hbf - Plattling | 81.1% | 83.8% | 87.0% |
| | Landsberg(Lech) - Augsburg Hbf | 94.0% | 98.3% | 92.0% |
| | Landshut(Bay)Hbf - Nürnberg Hbf | 89.6% | 92.9% | 91.6% |
| | Lichtenfels - Bamberg | 94.6% | 99.7% | 98.7% |
| | Lindau-Reutin - Ulm Hbf | 67.0% | 85.2% | 76.5% |
| | München Hbf to Fuessen | 79.3% | 84.3% | 82.4% |
| | München -Griesen | 76.4% | 81.4% | 73.6% |
| | München Hbf -Augsburg Hbf | 98.4% | 98.9% | 96.6% |
| | München HBF-Kochel | 73.5% | 85.5% | 73.3% |
| | München HBF-Rosenheim(Via Holzkirchen) | 82.3% | 88.1% | 83.6% |
| | München Ost-Freilassing | 62.3% | 85.5% | 72.7% |
| | München Ost-Passau Hbf(via Muhlendorf) | 89.2% | 92.1% | 83.3% |
| | Nürnberg - Regensburg | 89.7% | 97.7% | 89.2% |
| | Nürnberg Hbf - Hof Hbf | 64.9% | 88.8% | 65.6% |
| | Nürnberg Hbf - München Hbf | 83.5% | 98.1% | 96.9% |
| | Nürnberg Hbf - Schnellendorf | 74.2% | 82.8% | 79.8% |
| | Nürnberg Hbf-Würzburg Hbf | 83.6% | 99.4% | 98.7% |
| | Passau Hbf to München Hbf | 82.6% | 94.6% | 86.5% |
| | Plattling - Bayerisch Eisenstein | 72.1% | 75.4% | 66.7% |
| | Regensburg - Plattling | 92.4% | 86.4% | 88.1% |
| | Regensburg Hbf - Furth im Wald | 74.1% | 84.5% | 79.6% |
| | Rosenheim to München | 79.8% | 97.0% | 91.9% |
| | Schwandorf - Nürnberg Hbf | 83.5% | 93.0% | 77.6% |
| | Treuchtlingen - Ingolstadt Hbf | 71.5% | 82.2% | 77.7% |
| | Ulm Hauptbahnhof to Augsburg Hbf | 78.2% | 97.3% | 78.1% |
| Ulm Hbf - Ingolstadt Hbf | 83.4% | 92.8% | 80.7% | |
| Würzburg Hbf - Kahl(Main) | 76.8% | 92.8% | 75.5% | |
| Würzburg Hbf - Treuchtlingen | 87.0% | 96.2% | 91.8% | |

Abbildung 25: Erfüllung des 100 Mbps Kriteriums auf Bundesstraßen der fahrgaststarken Bahnstrecken pro Netzbetreiber in Prozent.

4.6.3 Geographische Darstellung

Die statistischen Ergebnisse werden im Folgenden auf Karten pro Netzbetreiber und Kategorie dargestellt.

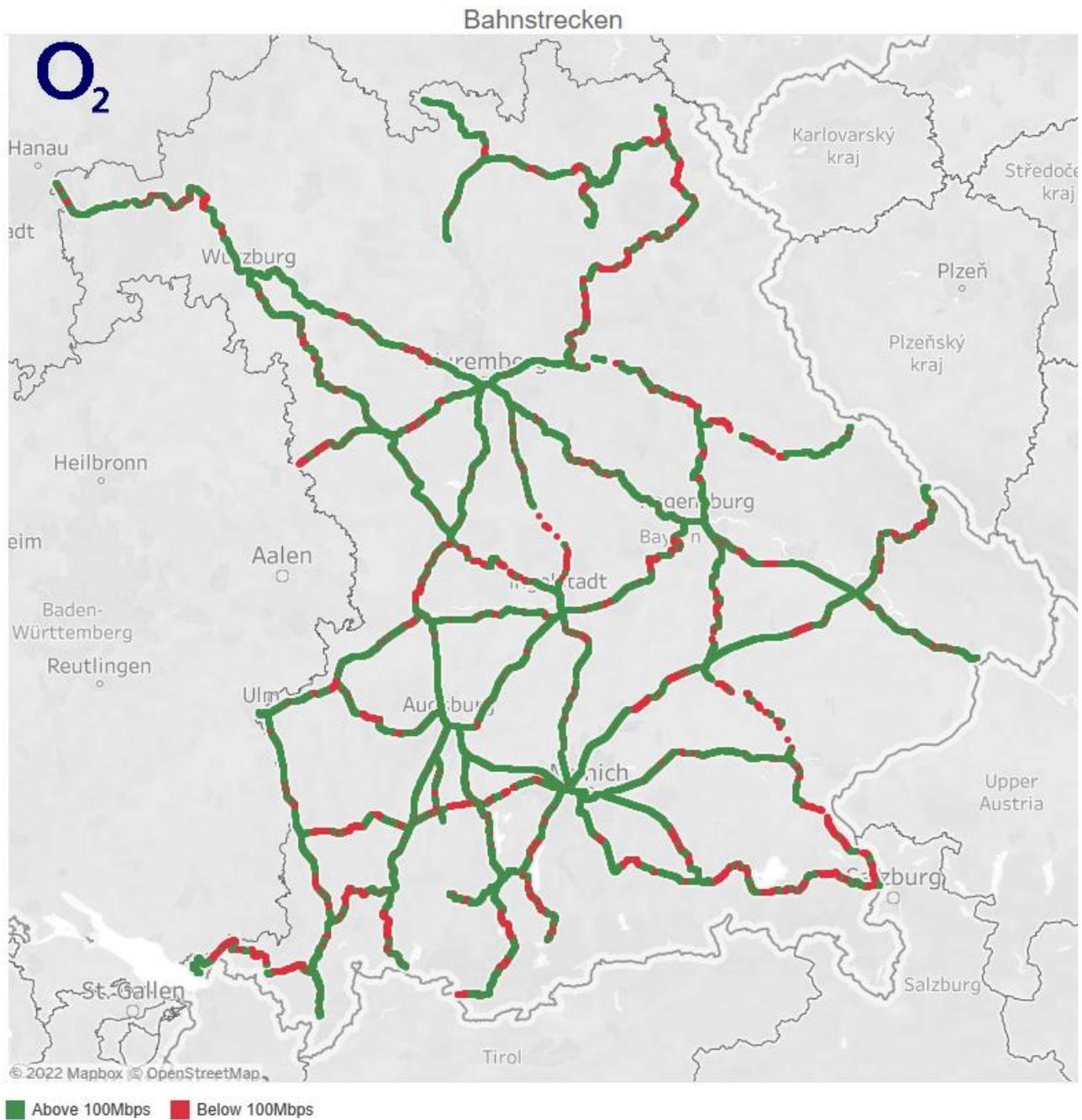


Abbildung 26: Bahnstrecken: 5G ENDC Datenraten - Telefónica.

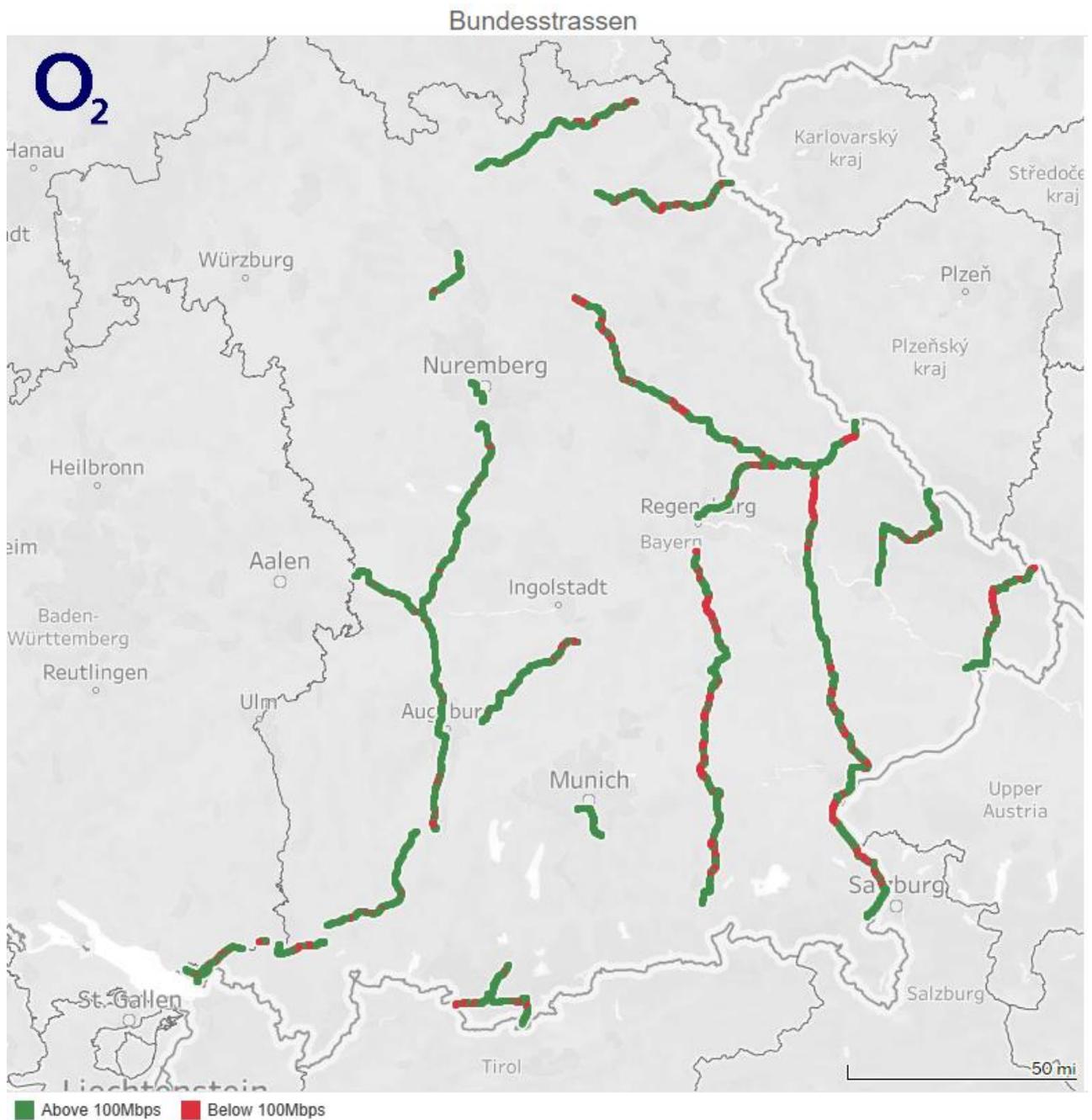


Abbildung 27: Bundesstraßen: 5G ENDC Datenraten - Telefónica.

Bahnstrecken

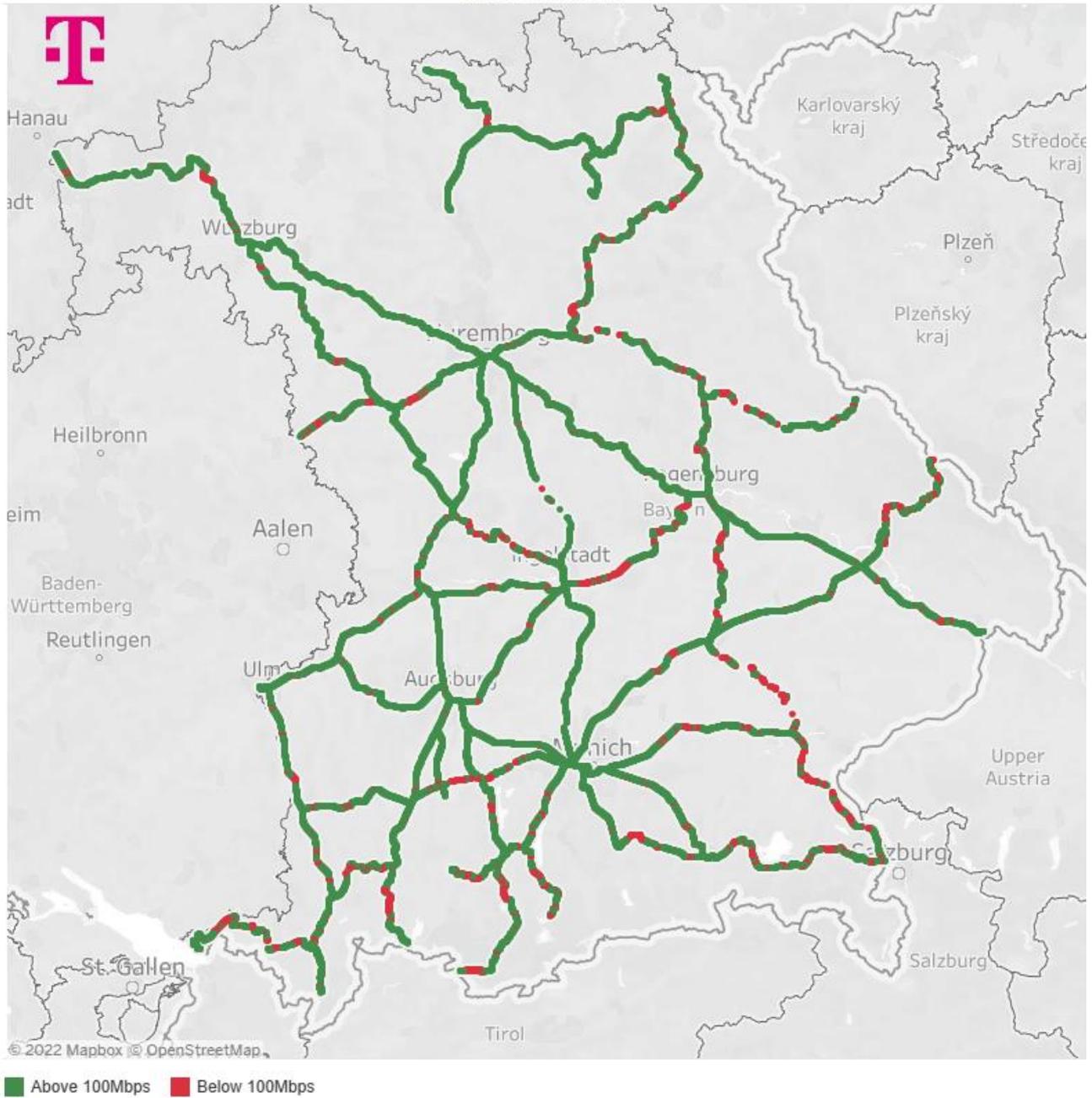


Abbildung 28: Bahnstrecken: 5G ENDC Datenraten - Telefónica.

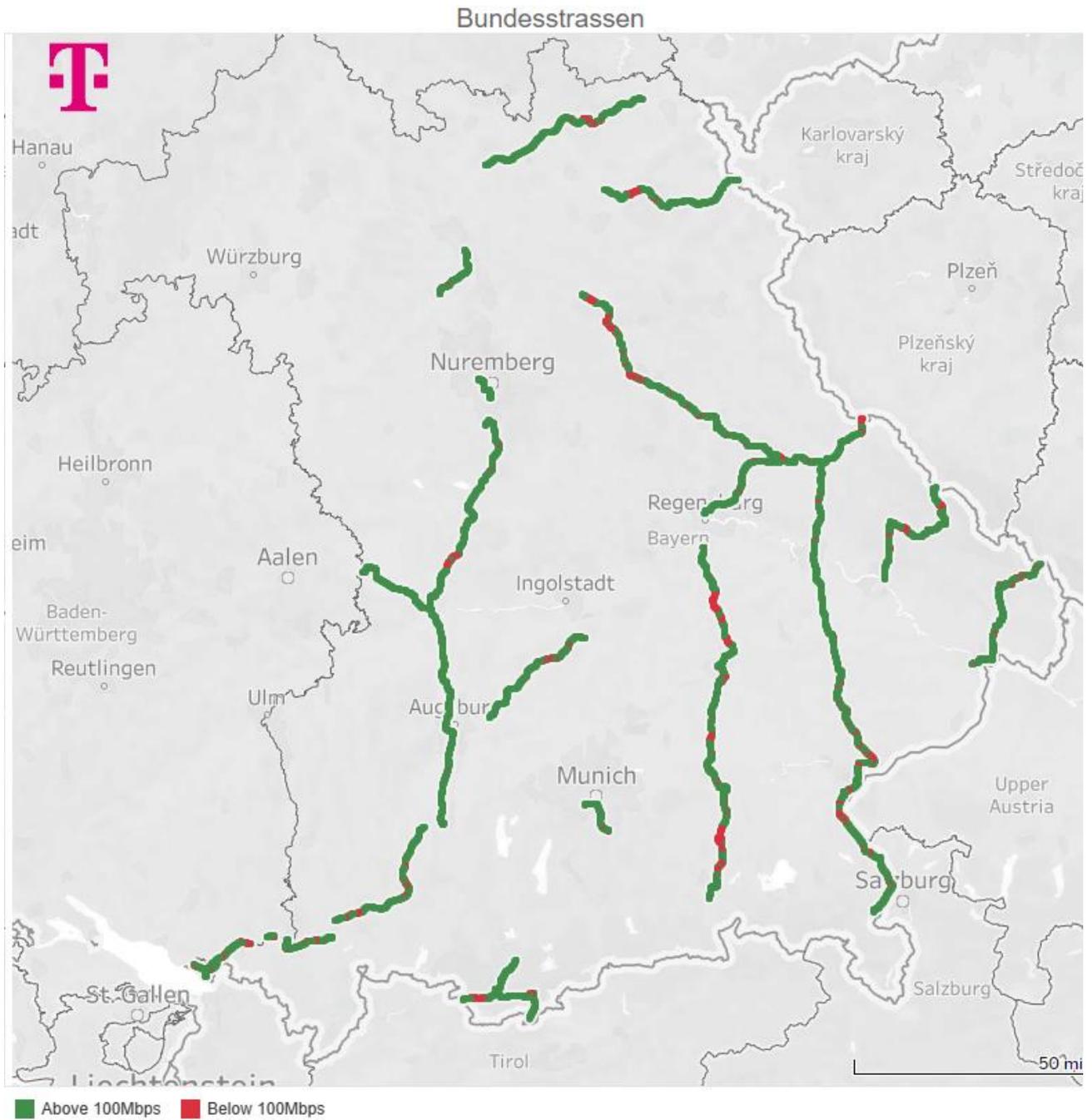


Abbildung 29: Bundesstraßen: 5G ENDC Datenraten - Telekom.

Bahnstrecken

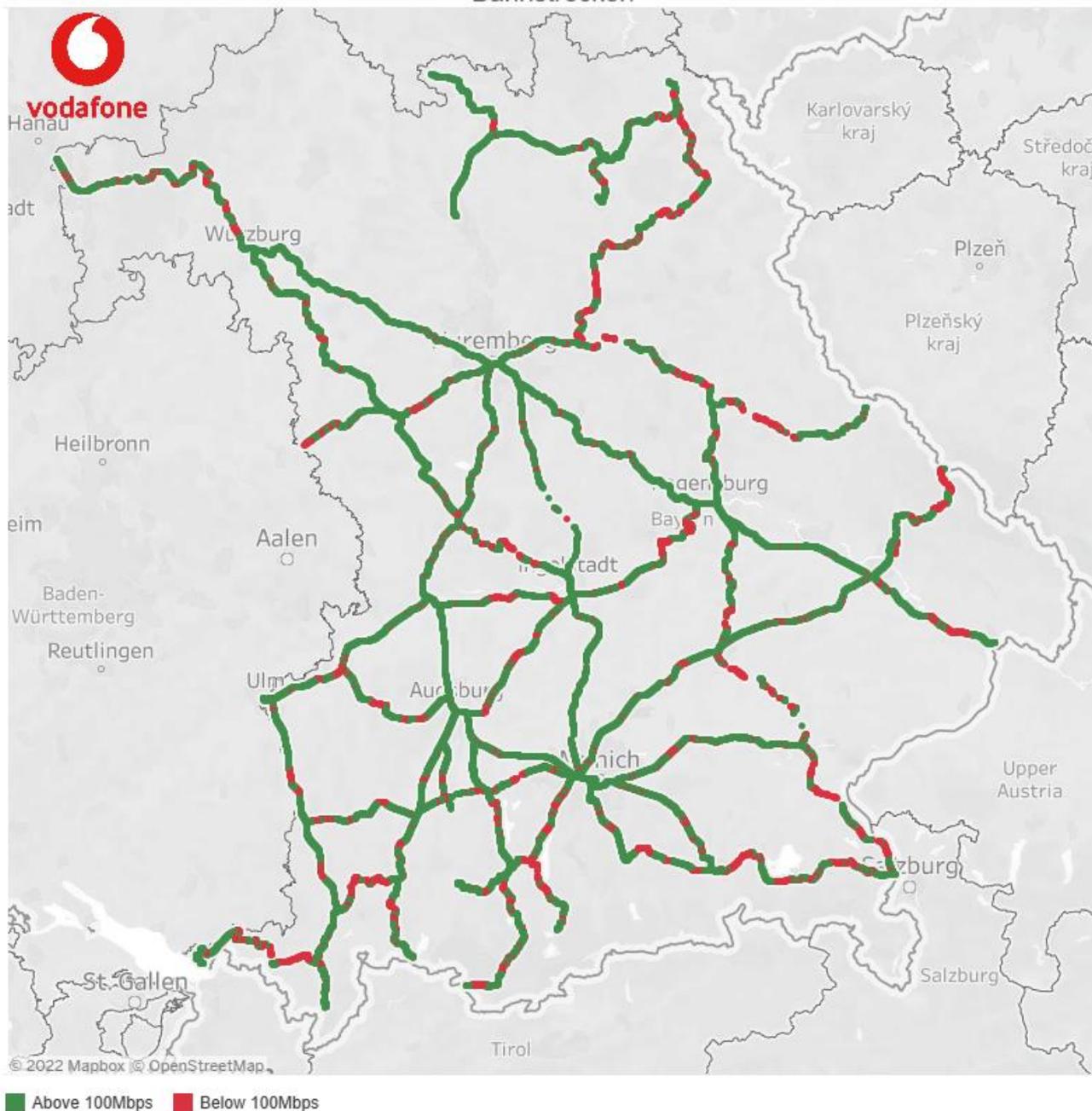


Abbildung 30: Bahnstrecken: 5G ENDC Datenraten - Vodafone.

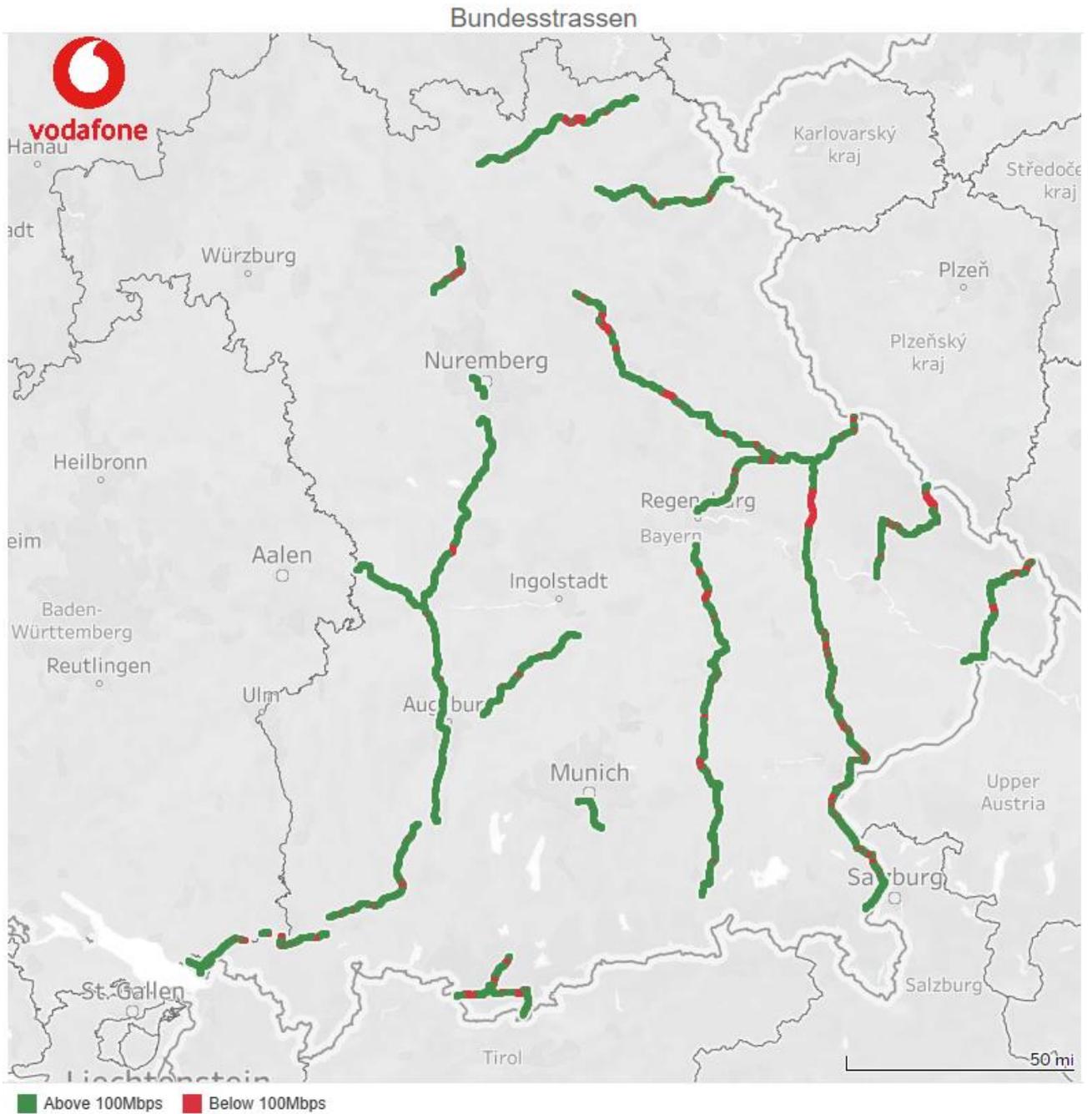


Abbildung 31: Bundesstraßen: 5G ENDC Datenraten - Vodafone.

Bahnstrecken

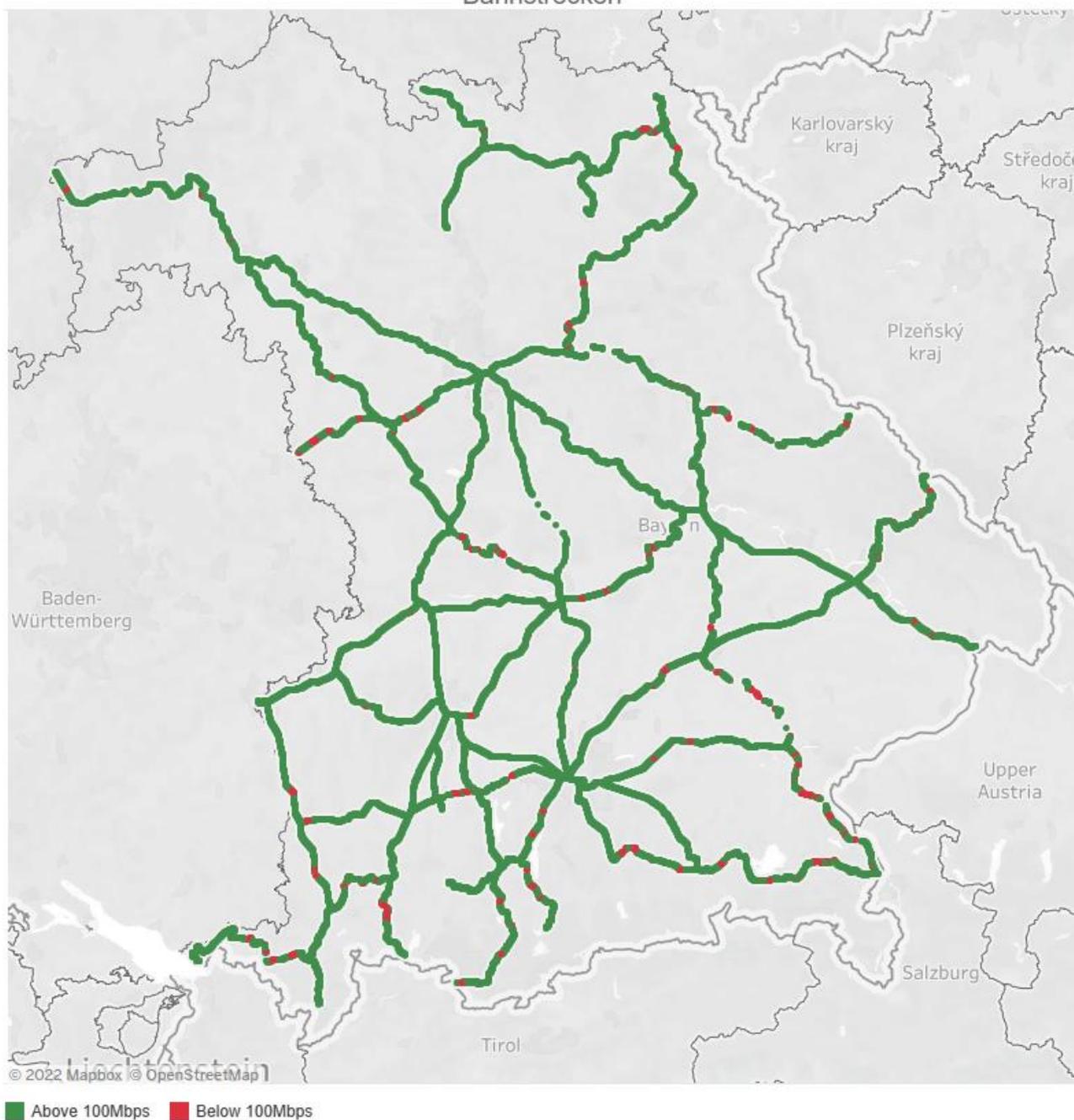


Abbildung 32: Bahnstrecken: 5G ENDC Datenraten – alle Netzbetreiber.

Bundesstraßen

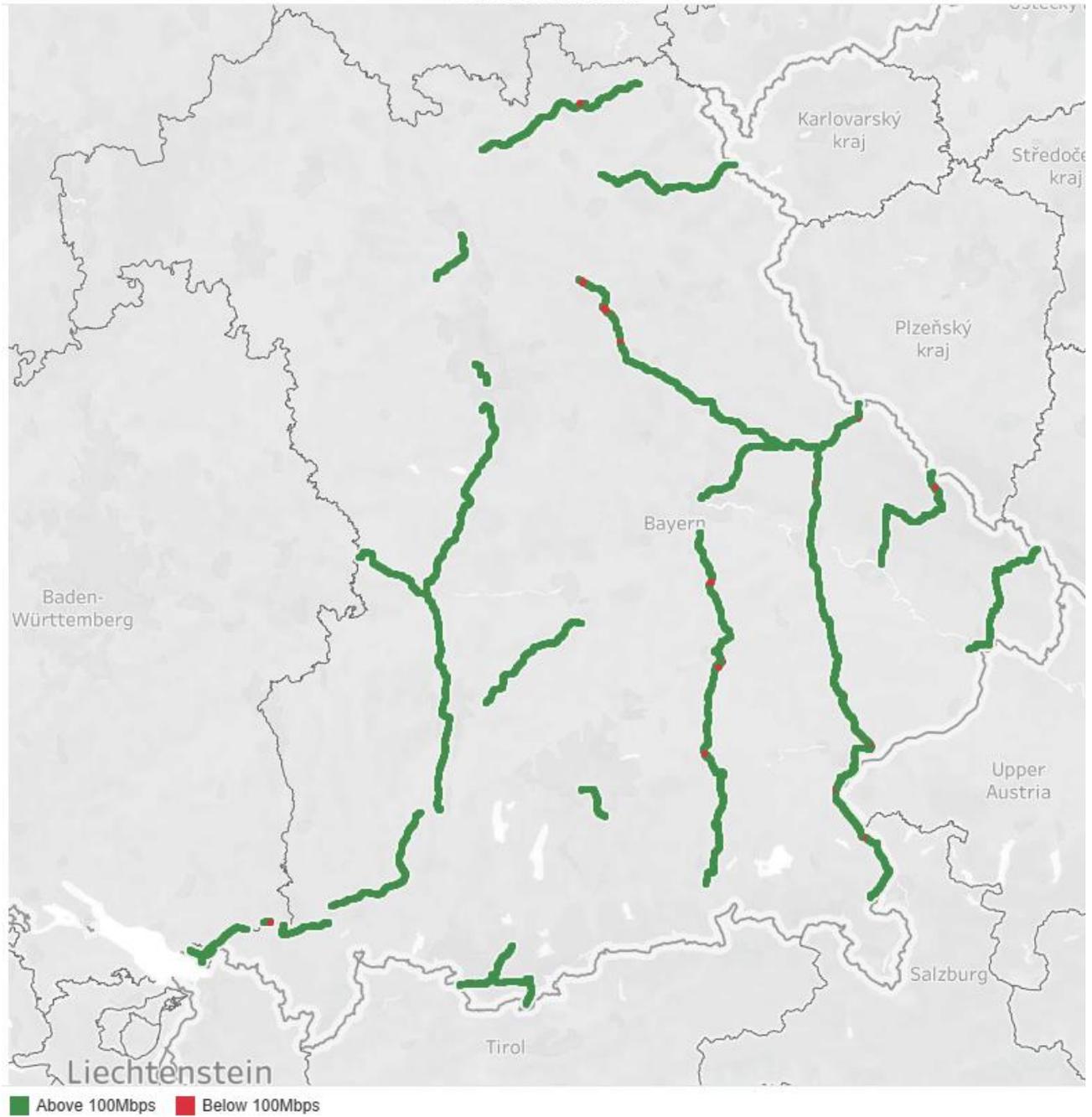


Abbildung 33: Bundesstraßen: 5G ENDC Datenraten – alle Netzbetreiber.

4.7 Ergebnisse – 5G SA (5G)

4.7.1 Statistische Zusammenfassung

Betrachtung des reinen 5G Netzes zeigt, dass alle Netzbetreiber noch in der Ausbauphase sind. Auf den Bundesstraßen der Versorgungsklasse 0 und 1 beansprucht Telekom mit knapp 58 % die klare Führungsposition. Vodafone liegt mit 41 % im Mittelfeld und klar abgeschlagen ist Telefónica mit nur 21 %.

Während Telefónica bislang den 5G Ausbau auf städtisches Gebiet konzentriert, versorgen Telekom und Vodafone stellenweise auch bereits deren Verbindungswege.

Gute Synergien ergeben sich für die Betrachtung aller Netzbetreiber, wo die Überlagerung eine Abdeckung von mindestens 100 Mbps auf mehr als 70 % der gemessenen Bundesstraßen aufzeigt.

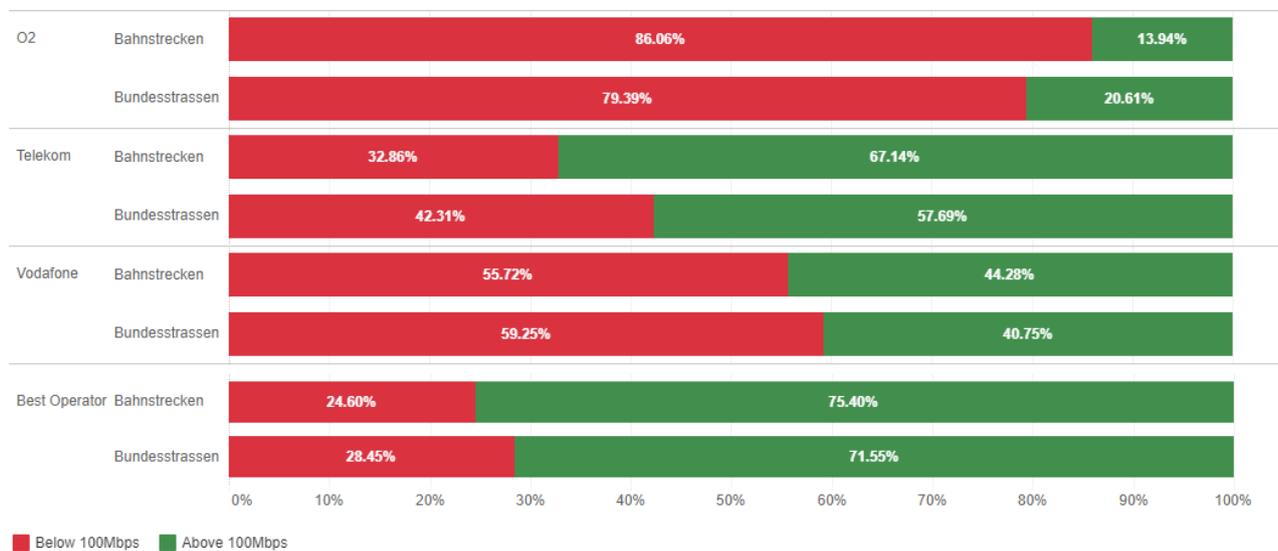


Abbildung 34: Erfüllungsgrad der 100 Mbps Datenraten pro Netzbetreiber und Kategorie im Falle von 5G Endgeräten unter Ausnutzung nur der 5G Technologie.

Die 5G Versorgung mit vorgegebener Datenrate in Zügen liegt für Telefónica bei unter 15 %. Hingegen weisen Vodafone mit 44 % und Telekom mit 67 % deutlich bessere Ergebnisse auf. Die netzbetreiberunabhängige Versorgung liegt mit knapp 75 % sogar über dem Ergebnis auf den gemessenen Bundesstraßen.

4.7.2 Geographische Darstellung

Die statistischen Ergebnisse werden im Folgenden auf Karten pro Netzbetreiber und Kategorie dargestellt.

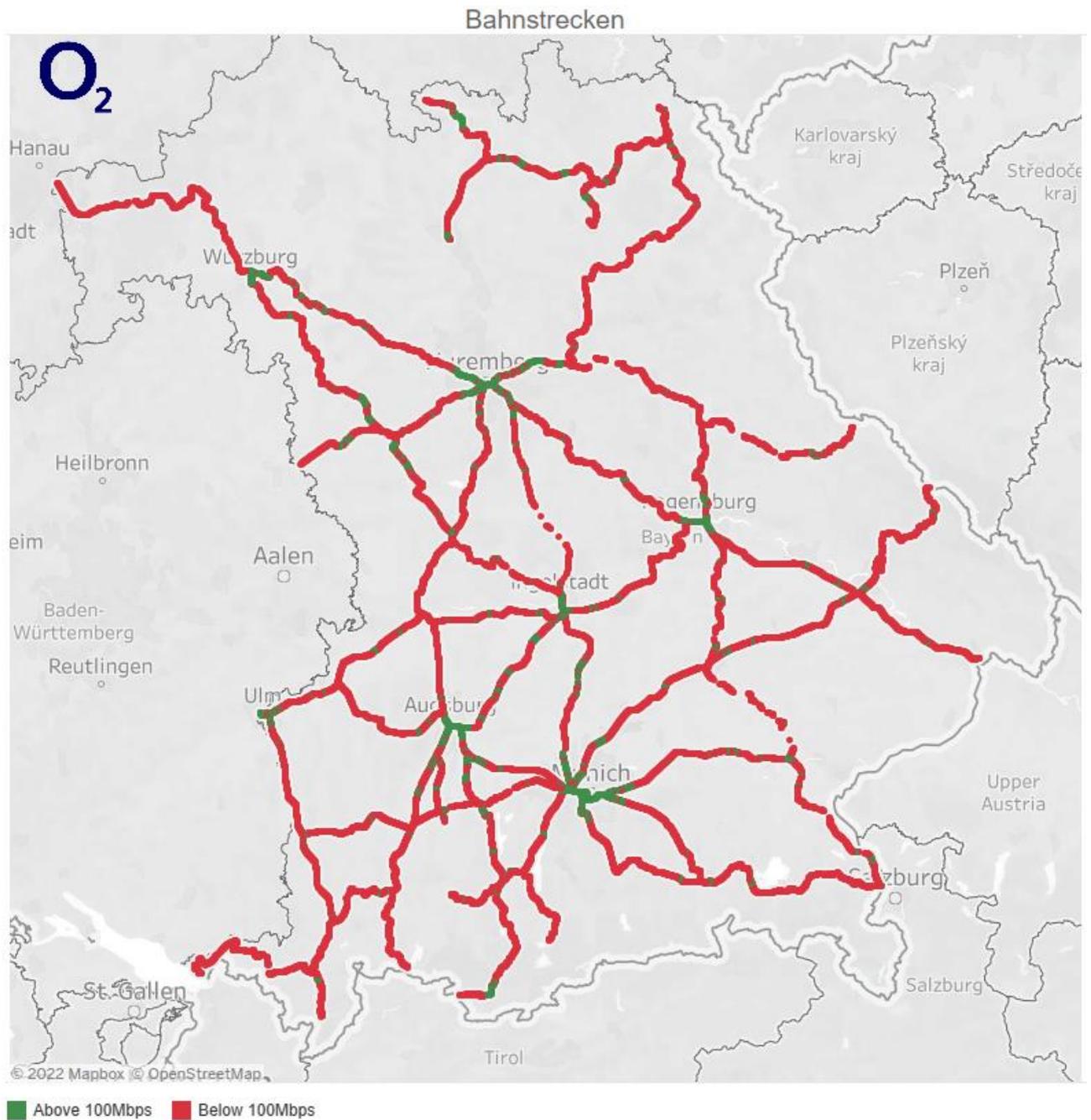


Abbildung 35: Bahnstrecken: 5G SA Datenraten – Telefónica.

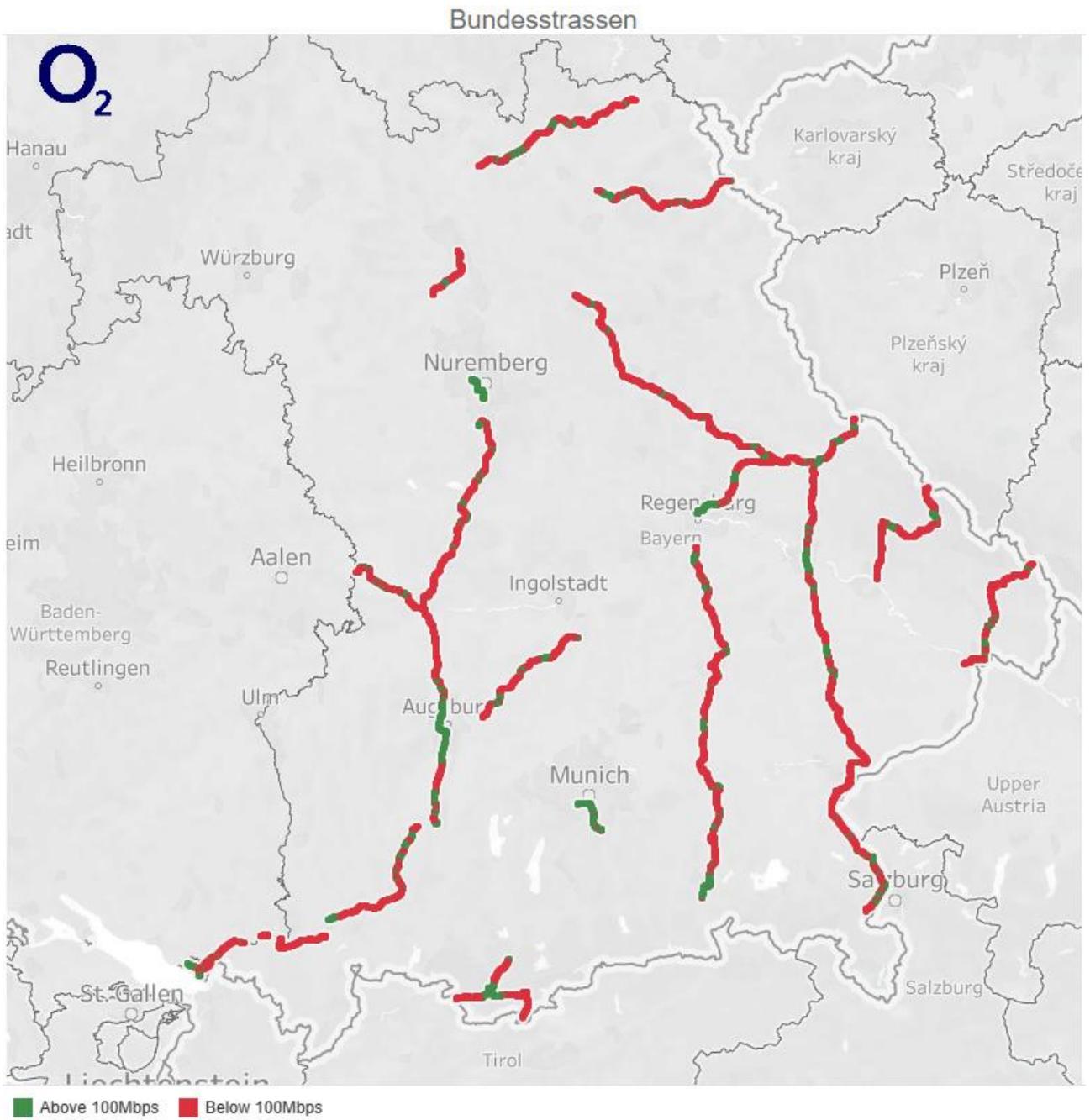


Abbildung 36: Bundesstraßen: 5G SA Datenraten - Telefónica.

Bahnstrecken

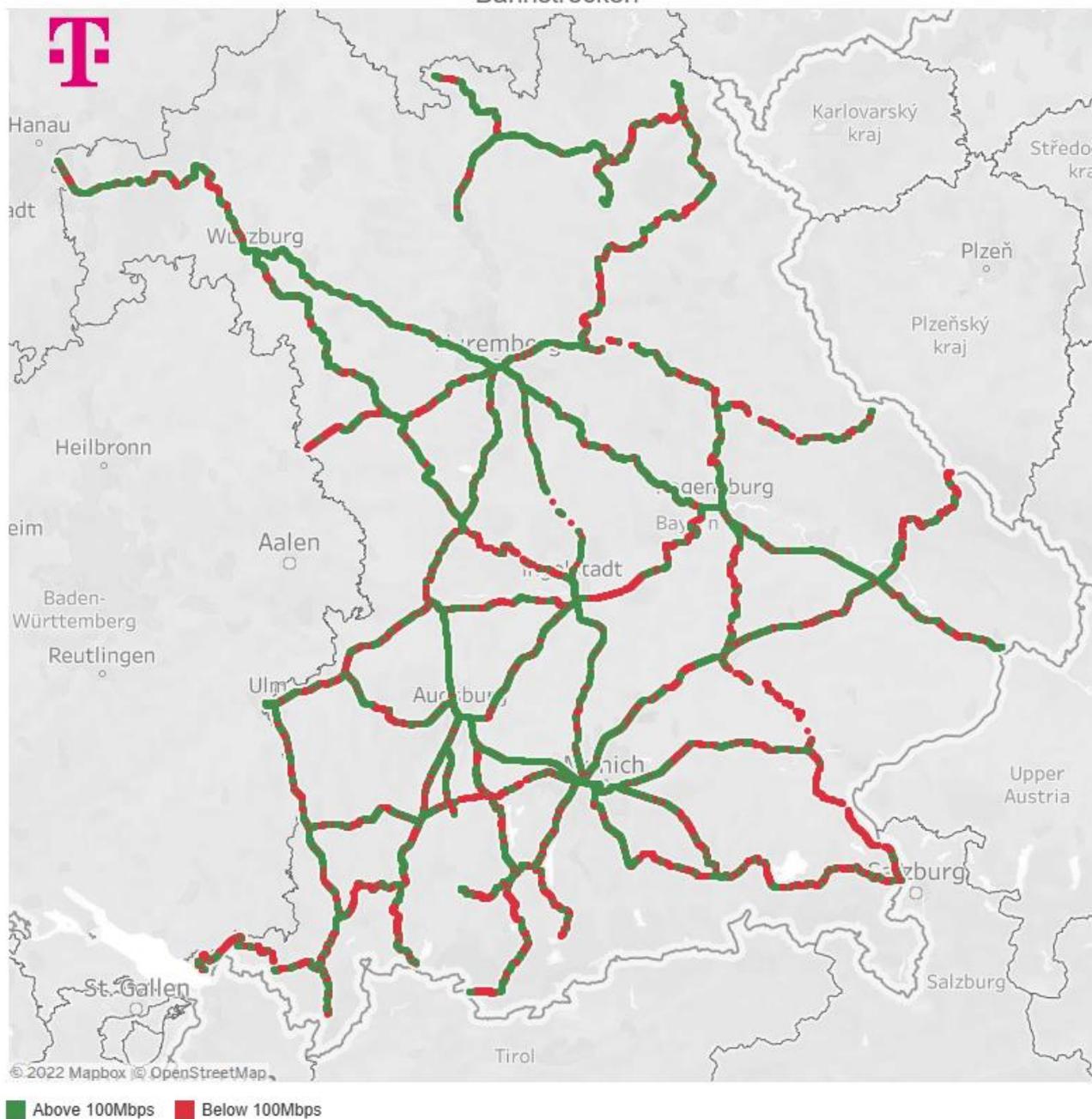


Abbildung 37: Bahnstrecken: 5G SA Datenraten – Telekom.

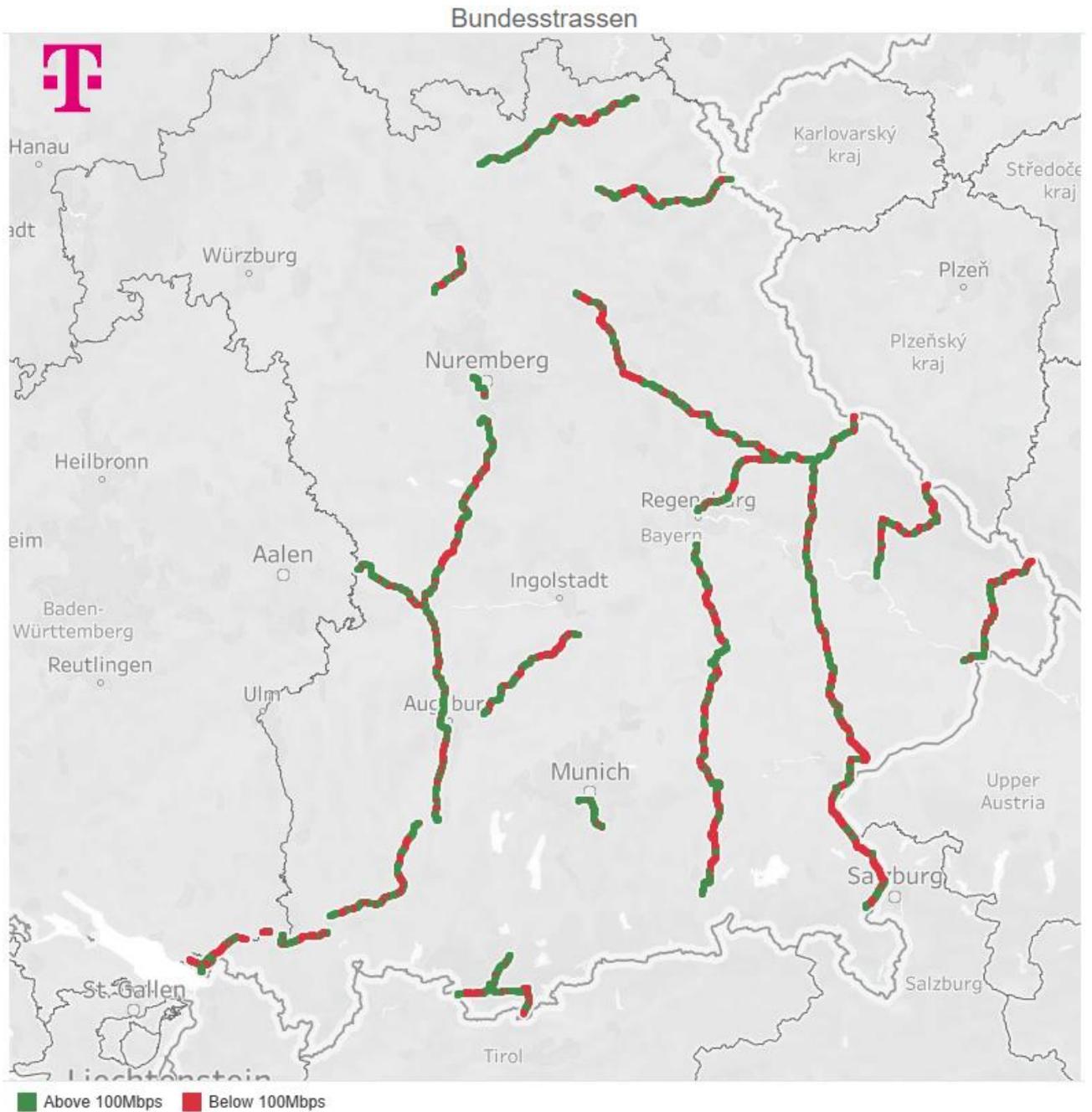


Abbildung 38: Bundesstrassen: 5G SA Datenraten - Telekom.

Bahnstrecken

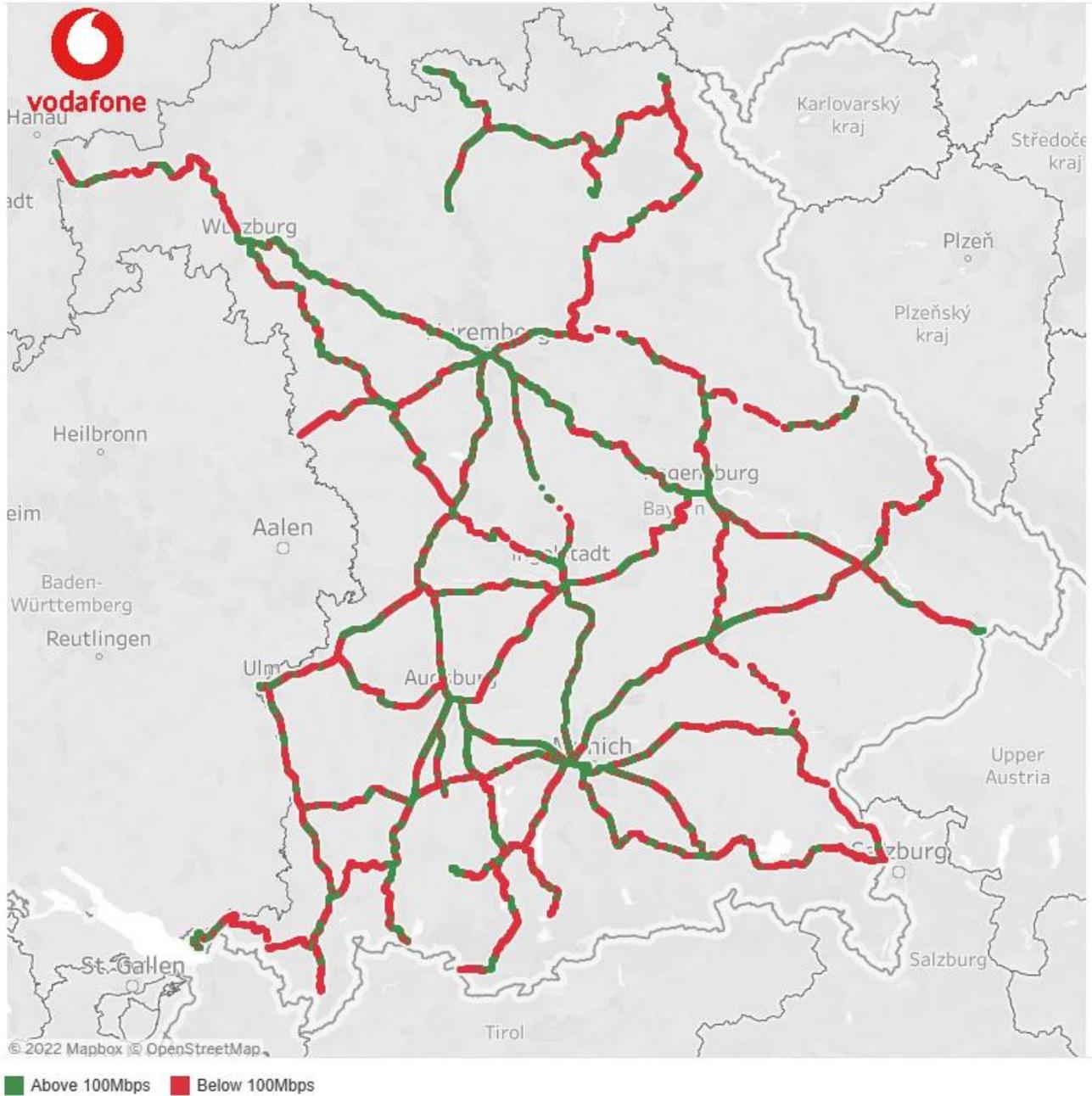


Abbildung 39: Bahnstrecken: 5G SA Datenraten – Vodafone.

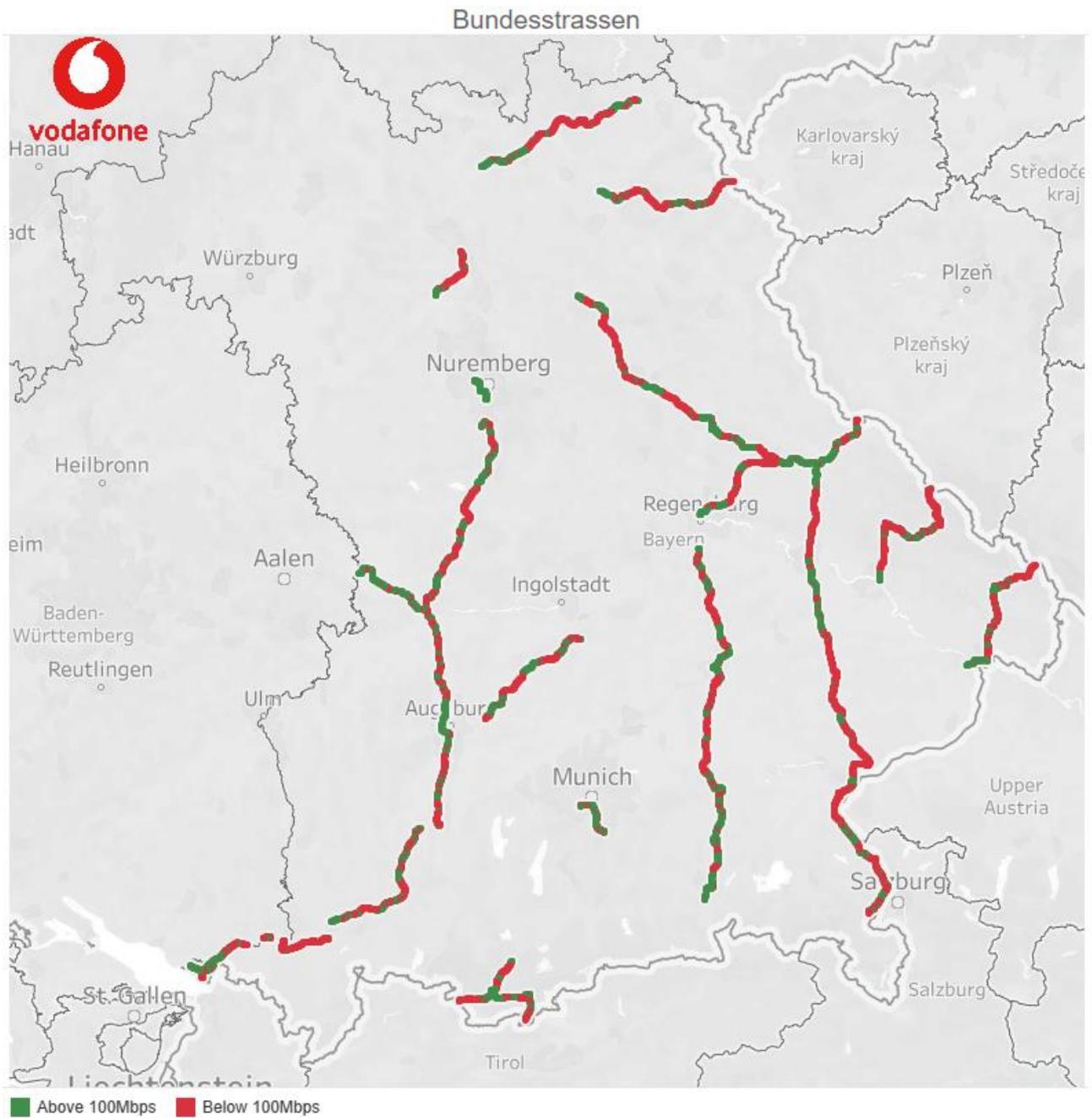


Abbildung 40: Bundesstraßen: 5G SA Datenraten – Vodafone.

Bahnstrecken

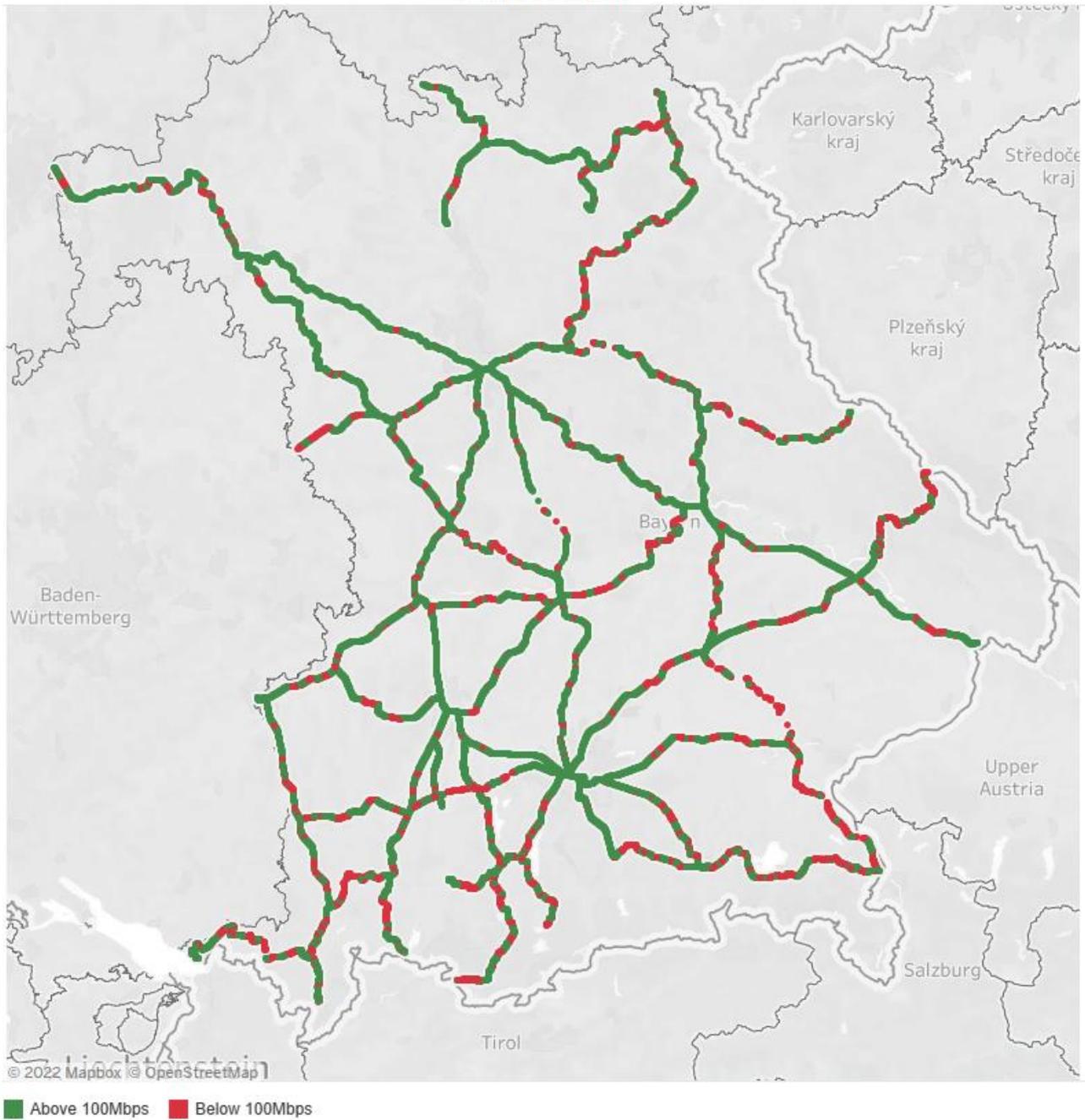


Abbildung 41: Bahnstrecken: 5G SA Datenraten - alle Netzbetreiber.

Bundesstrassen

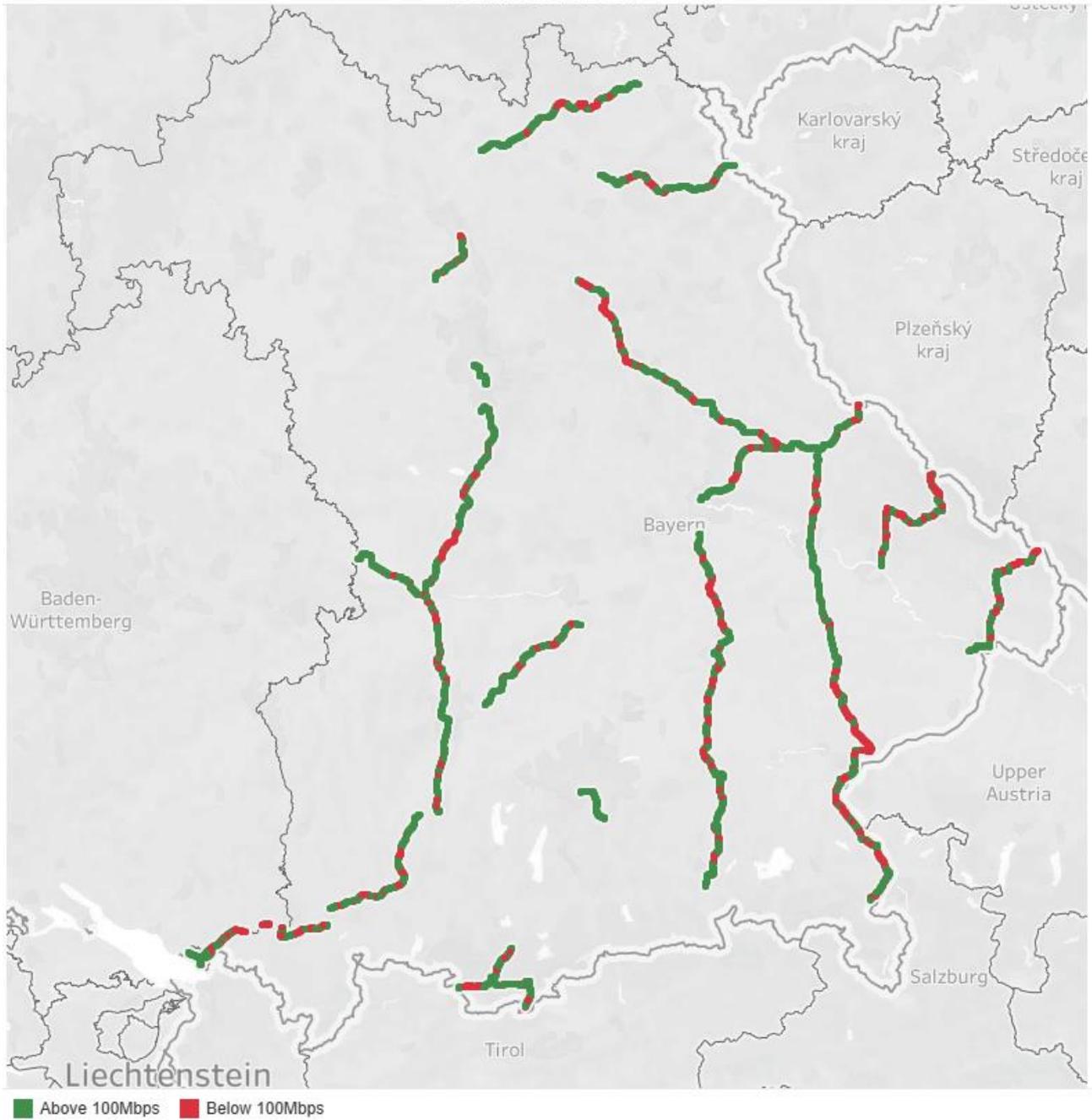


Abbildung 42: Bundesstrassen: 5G SA Datenraten - alle Netzbetreiber.

4.8 Kundenerfahrungen

Neben den Netzwerkscanner-Messungen zur Bestimmung der möglichen Datenraten wurden die Kundenerfahrungen für die Dienste Sprache und Daten ermittelt. Die handelsüblichen Endgeräte Samsung Galaxy S22+ haben dabei kontinuierliche Sprachverbindungen, beziehungsweise unterschiedliche Datendienste innerhalb des jeweiligen Mobilfunknetzes aufgebaut.

4.8.1 Sprachdienst

Die wichtigsten KPIs (*Key Performance Indicator* – Leistungskenngröße) sind:

- Call Setup Success Rate – Erfolgsrate Gesprächsaufbau
- Call Drop Rate – Gesprächsabbruchrate
- Call Success Rate – Gesprächserfolgsrate

Die Gesprächserfolgsrate beinhaltet alle Gespräche, angefangen vom Aufbau bis hin zum erfolgreichen Gesprächsende oder vorzeitigen Abbruch.

Auf den gemessenen Bundesbahnstraßen der Versorgungsklasse 0 und 1. Sowie den fahrgaststarken Zugstrecken ergab sich folgendes Bild.

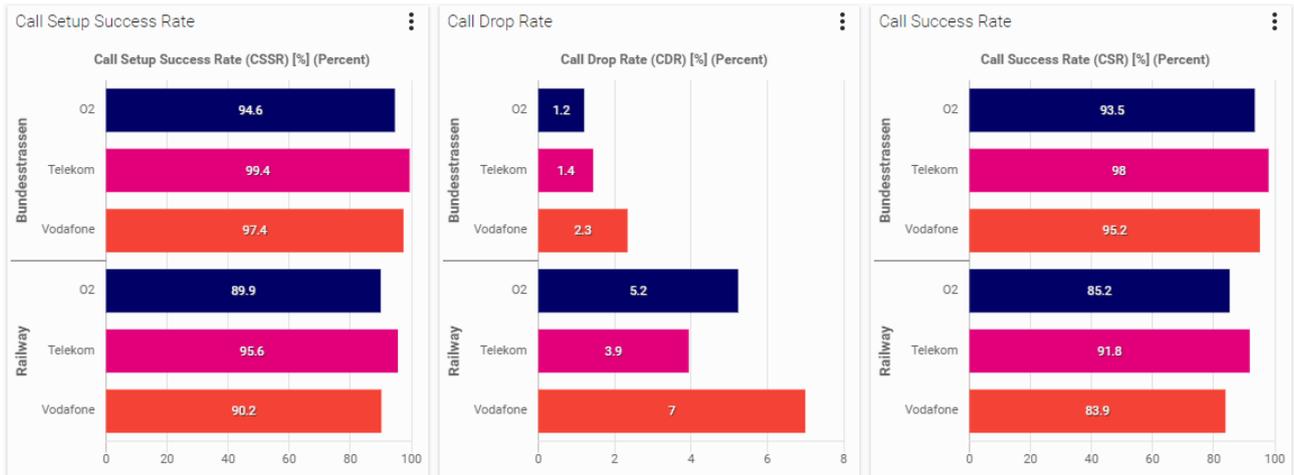


Abbildung 43: Sprachdienst KPIs pro Netzbetreiber und Kategorie.

Telekom zeigte sowohl auf den Bundesstraßen als auch auf den Bahnstrecken die größte Gesprächserfolgsrate mit 98 % auf den Bundesstraßen und knapp 92 % auf den Bahnstrecken. Insgesamt ist eine deutliche schlechtere Erfolgsrate für alle Netzbetreiber auf den Bahnstrecken für alle drei betrachteten KPIs zu beobachten.

Dieser Statistik liegen 350 Sprachanrufe auf den Bundesstraßen und 1080 Sprachanrufe auf den Bahnstrecken pro Netzbetreiber zugrunde.

Neben den beschriebenen KPIs stellt die Gesprächsaufbauzeit eine weitere wichtige Kenngröße für das Kundenerfunden dar. Die Unterschiede für die mittlere Gesprächsaufbauzeit auf den Bundesstraßen oder Bahnstrecken sind für alle drei Netzbetreiber nicht sehr groß. Während Telefónica die geringsten Zeiten beim zehnten Perzentil aufweist, sind es hingegen die längsten Zeiten beim statistischen neunzigsten Perzentil, was unter dem Strich der größten Streuung für den Kunden entspricht. Einzig allein kann sich Telekom auch auf den Bahnstrecken für das neunzigste Perzentil deutlich von den Mitbewerbern distanzieren.



Abbildung 44: Gesprächsaufbauzeiten pro Netzbetreiber und Kategorie.

Die geografische Zuordnung der fehlgeschlagenen Gesprächsaufbauten (Failed) und vorzeitigen Gesprächsabbrüchen (Dropped) nach erfolgreichem Aufbau können den folgenden Abbildungen entnommen werden.

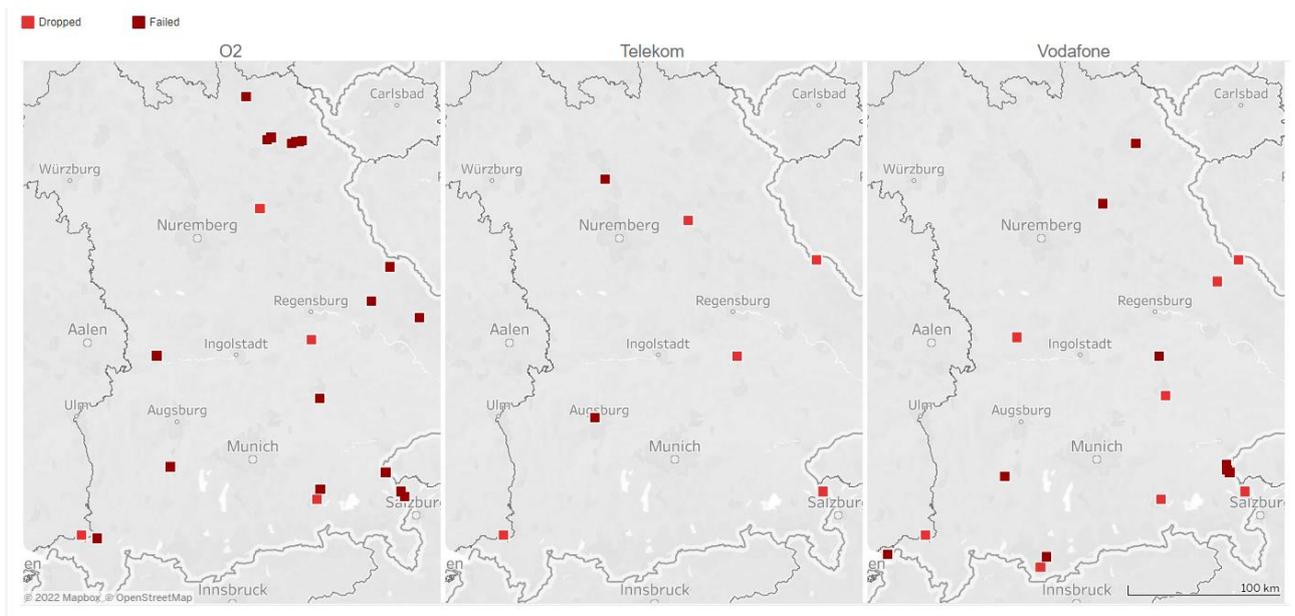


Abbildung 45: Fehlgeschlagene Gesprächsaufbauten und Gesprächsabbrüche pro Netzbetreiber - Bundesstraßen.

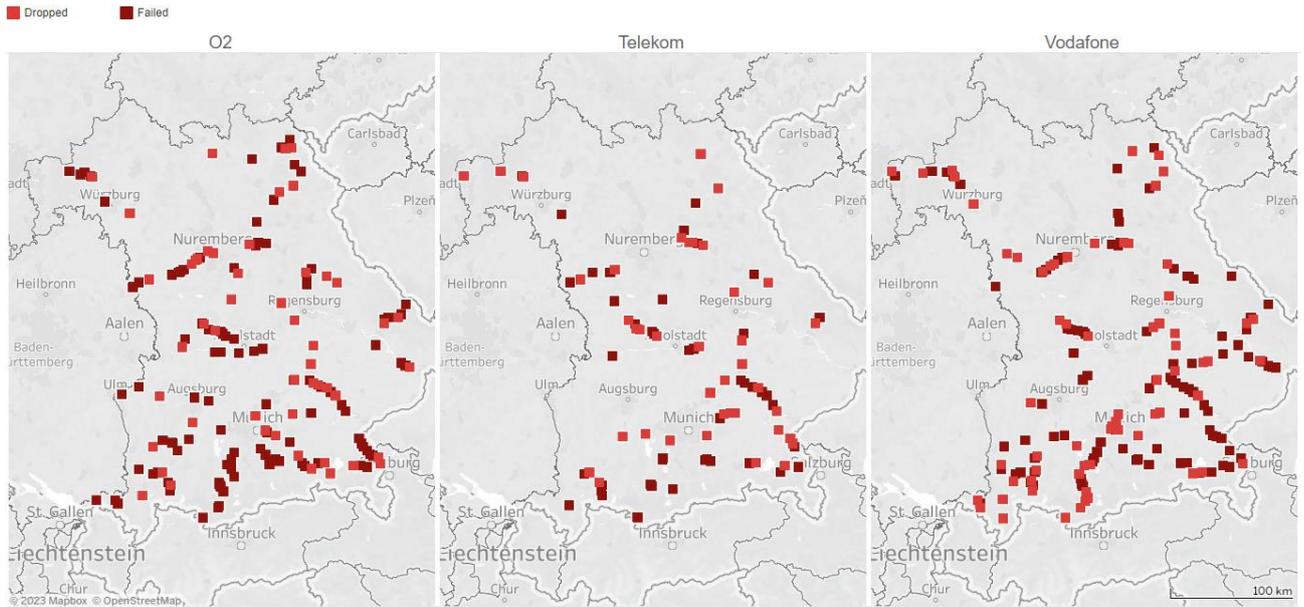


Abbildung 46: Fehlgeschlagene Gesprächsaufbauten und Gesprächsabbrüche pro Netzbetreiber - Bahnstrecken.

4.8.2 Datendienste

Während der Messkampagne wurden verschiedene Datendienste getestet. Der wohl wichtigste Test für dieses Projekt ist der sogenannte Kapazitätstest (Capacity DL Test), der die höchste Anforderung an die Mobilfunknetze bezüglich Datenrate in der Abwärtsstrecke darstellt. Da die verwendeten Endgeräte alle 5G unterstützen, wurden während der Messungen die Daten sowohl via LTE als auch parallel über 5G übertragen, wenn die Voraussetzungen einer 5G Versorgung gegeben war. Keine der verwendeten kommerziellen SIM Karten unterstützte die alleinige Verbindung zu einem 5G Netz. Für alle drei Netzbetreiber war ein LTE-Ankernetz notwendig, um die Ressourcen der neuen Technologie nutzen zu können.

In allen Mobilfunknetzen werden bei Datenverbindungen eine Anlaufphase beobachtet, in der die Datenrate von Null auf das Maximum anwächst. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass die Hinzunahme von weiteren Trägern (LTE oder 5G) für die Bündelung von mehreren Trägern (Carrier Aggregation) endliche Zeit benötigt. Diese Anlaufphase wurde durch die genutzte Auswertesoftware herausgerechnet, um eine Reduzierung der eigentlichen Datenrate zu verhindern.

Für den Kunden mit einem 5G fähigen Endgerät ergab sich folgendes Bild (links: 10. Perzentil, Mitte: Mittelwert, rechts: 90. Perzentil), aufgeteilt pro Netzbetreiber und der Kategorien Bundesstraßen und Bahnstrecken.

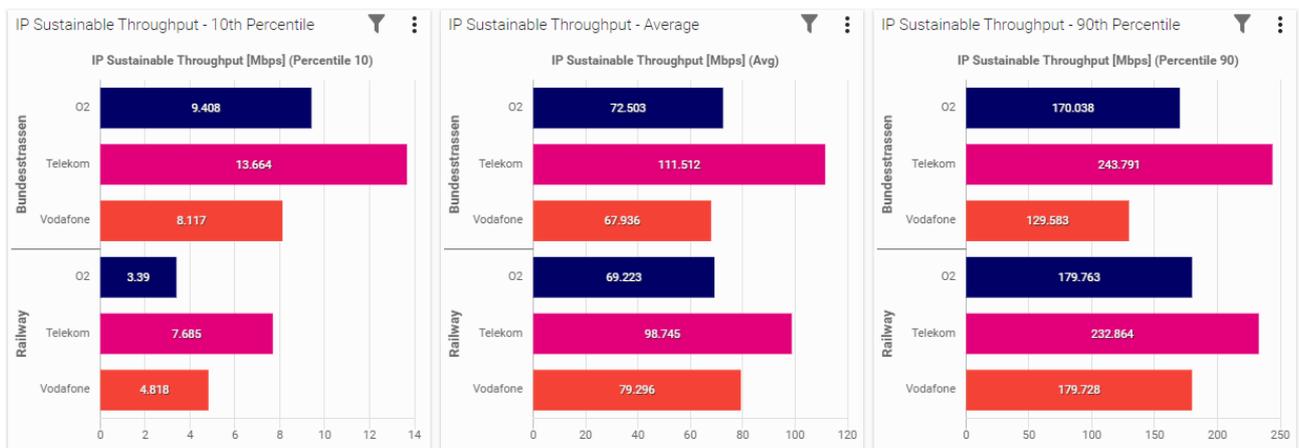


Abbildung 47: Datenrate in der Abwärtsstrecke für 5G fähige Endgeräte mit korrigierter Anlaufphase pro Netzbetreiber und Kategorie.

Der Statistik liegen rund 450 Datentest auf den Bundesstraßen und gut 1300 Test auf den Bahnstrecken zu- grunde. Der einzelne Test dauerte 15 Sekunden.

Zusätzlich zu bemerken ist, dass die Endgeräte sich jeweils im Fahrzeuginnenraum befanden und gerade bei den Messungen der Bundesstraßen eine Fahrzeugdämpfung der Größenordnung 10 dB vorlag. Dennoch er- füllt der mittlere Datendurchsatz im Telekom Netz die Anforderung von 100 Mbps auf den Bundesstraßen und kratzt hauchdünn an dieser Marke auf den Bahnstrecken mit knapp 99 Mbps. Die Erfüllung ist weder für Vo- dafone noch Telefónica gegeben. Während Telefónica ähnliche Ergebnisse in beiden Kategorien mit um die 70 Mbps erzielt, ist das Ergebnis für Vodafone auf den Bahnstrecken mit etwa 80 Mbps besser als auf den Bundesstraßen mit nur 68 Mbps.

An dieser Stelle sein bemerkt, dass die Datenrate auch von der Last in einer Zelle abhängt. Sind mehrere Nutzer gleichzeitig aktiv, so teilt die Basisstation die maximal zur Verfügung stehende Datenrate nach einem eigenen und internen Algorithmus auf. Daher geben solche Messungen mit Hilfe von Endgeräten (Smartpho- nes) immer nur eine Momentaufnahme des Netzes wieder. Zu einem anderen Zeitpunkt an gleicher Stelle können die Ergebnisse sowohl nach oben, als auch nach unten abweichen.

Ebenso ist es möglich die Beiträge von LTE und 5G auf physikalischer Ebene aufzuspalten. Im Gegensatz zu den eben gezeigten Ergebnissen erfolgte keine Korrektur der Anlaufphase, so dass gerade das zehnte Perzentil niedrigere Werte widerspiegelt.



Abbildung 48: Aufteilung der Beiträge aus LTE (oben) und 5G (unten) pro Netzbetreiber und Kategorie.

Es ist rein die Aufgabe der Steuerungseinheit der LTE und 5G Basisstationen, wie viele Ressourcen den Nutzer zugewiesen werden. Insbesondere bei 5G ENDC Verbindungen kommt es vor, dass obwohl eine Verbindung zu beiden Technologie besteht nur Daten über eine der beiden von den Basisstationen abgesendet werden.

Die ermittelten Datenraten in der Aufwärtsstrecke betragen nach der Korrektur der Anlaufphase für die 5G fähigen Endgeräte folgende Werte. Die Anzahl der Tests ist gleich denen der Abwärtsstrecke.

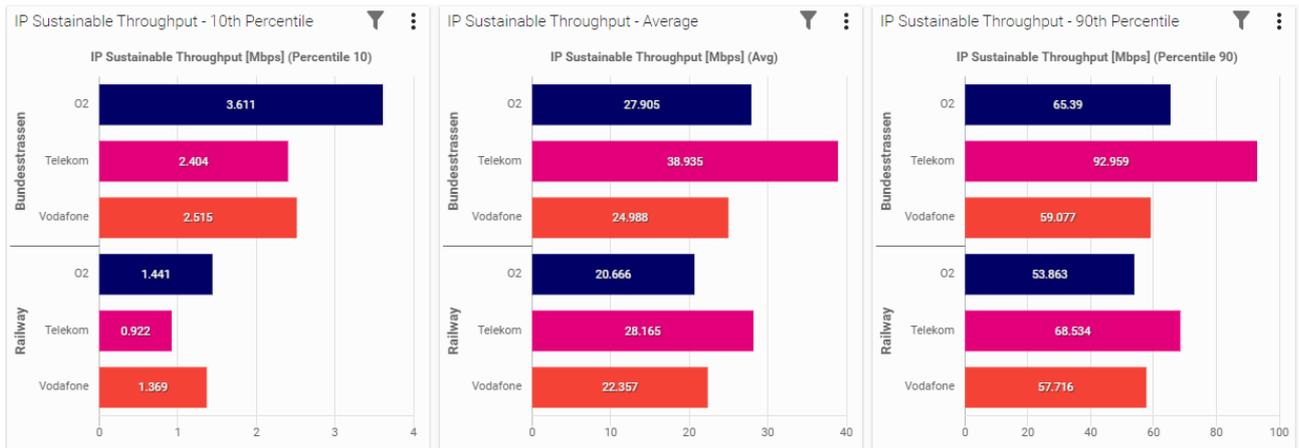


Abbildung 49: Datenrate in der Aufwärtsstrecke für 5G fähige Endgeräte mit korrigierter Anlaufphase pro Netzbetreiber und Kategorie. Dem entsprechend können die physikalischen Beiträge wieder nach LTE und 5G aufgespalten werden.



Abbildung 50: Aufteilung der Beiträge aus LTE (oben) und 5G (unten) pro Netzbetreiber und Kategorie.

Als weiterer Tests wurden das Herunterladen einer 5 MB, bzw. Hochladen einer 2 MB großen Datei untersucht. Neben der Erfolgsrate (Success Rate) wurde ebenso die mittlere Datenrate im Abwärts-, bzw. Aufwärtspfad

ermittelt. Insgesamt wurden rund 460 Einzeldateien auf Bundesstraßen und 1370 Dateien auf Bahnstrecken jeweils im Abwärts-, bzw. Aufwärtspfad gemessen.



Abbildung 51: HTTP Transfer einer einzelnen Datei der Größe 5 MB (DL - oben), bzw. 2 MB (UL - unten).

Das Durchstöbern des Internets hatte für alle Netzbetreiber eine um etwa 10 Prozent höhere Erfolgsrate als auf den Bahnstrecken. Die durchschnittliche Webseite wurde für alle Netzbetreiber in beiden Kategorien innerhalb von (2 ± 0.1) sec aufgebaut. Dabei betrug die durchschnittliche Webseitengröße etwa 680 kByte. Die wesentlichen KPIs für Internetstößen werden im Folgenden dargestellt. Dem zugrunde lagen 2280 Webseitenaufrufe auf den Bundesstraßen, bzw. 6800 Aufrufe auf den Bahnstrecken.



Abbildung 52: Web-Browsing KPIs pro Netzbetreiber und Kategorie.

5 Fazit

Zum Zeitpunkt der Messungen (12. November bis 3. Dezember 2022) erreicht kein Netzbetreiber eine durchgehende Versorgung mit 100 Mbps. Dies ist ein gewichtiges Indiz dafür, dass die Versorgungsaufgaben nicht vollständig erfüllt werden. Gleichwohl kann nur die Bundesnetzagentur mit ihren eigenen Messungen eine abschließende Aussage hierüber treffen und insbesondere überprüfen, ob in Einzelfällen rechtliche und tatsächliche Gründe dem vollständigen Ausbau entgegenstehen.

Diese Aussage bezieht sich sowohl auf die gemessenen Bundesstraßen der Versorgungsklasse 0 und 1, als auch die fahrgaststarken Bahnstrecken mit mehr als 2.000 Fahrgästen pro Tag. Bewertet wurden die zu erwartenden Datenraten für ein modernes Endgerät, welches neben LTE auch den neusten Mobilfunkstandard 5G unterstützt. Die Messungen stützen sich auf die von Netzwerkscannern gemessenen Empfangspegel und sind somit lastunabhängig, in dem Sinne von Anzahl aktiver Teilnehmer in den zu betrachtenden Zellen.

Anzumerken ist, dass die gemessenen Pegelwerte auf den Bahnstrecken um die frequenzabhängigen mittleren Zugdämpfung nachträglich korrigiert wurden. Dies war notwendig, um eine Außenantenne zu simulieren, da diese nicht außen am Zug befestigt werden dürfen.

Die besten Ergebnisse erzielte die Deutsche Telekom auf den Bundesstraßen und Bahnstrecken, sowie Vodafone auf den Bundesstraßen mit einer nachgewiesenen Abdeckung von jeweils rund 90 %. Alle anderen Ergebnisse von Vodafone auf den Bahnstrecken, Telefónica auf den Bundesstraßen und Bahnstrecken weisen eine Abdeckung von jeweils etwa 80 % auf. Betrachtet man die Ergebnisse aller drei Netzbetreiber zusammen, liefert dies eine Erfüllung des 100 Mbps Kriteriums von 98 % auf den gemessenen Bundesstraßen, sowie 96 % auf den Bahnstrecken.

Abkürzungsverzeichnis

Im Folgenden werden die verwendeten Abkürzungen in Stichworten erklärt:

| | |
|-------------|---|
| 16QAM | QuadraturAmplitudenModulation mit 16 Symbolen |
| 256QAM | QuadraturAmplitudenModulation mit 256 Symbolen |
| 2G | Mobilfunktechnologie der 2. Generation auch bekannt als GSM |
| 4G | Mobilfunktechnologie der 4. Generation auch bekannt als LTE |
| 5G | Mobilfunktechnologie der 5. Generation auch bekannt als NR (New Radio) |
| 5G NSA | 5G (Non-Stand-Alone) Mobilfunk der 5. Generation mit 4G AnkerNetz |
| ACD | (Automatic Channel Detection) automatische Kanalerkennung |
| BB | BandBreite |
| BNetzA | Bundesnetzagentur |
| dBm | Dezibel Milliwatt |
| DL | (DownLink) Übertragung in Abwärtsrichtung |
| DR | (Dead Recognition) Koppelnavigation aufgrund von Kurs und Geschwindigkeit |
| EARFCN | (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number) 4G Kanalnummer |
| GHz | GigaHertz |
| GNSS | Globales NavigationsSatellitenSystem |
| HF | HochFrequenz |
| ICE | InterCity-Express |
| ID | IdentifikationsNummer |
| KFZ | KraftFahrZeug |
| KPI | (Key Performance Indicator) Haupt-Erfolgsindikator |
| LTE | Mobilfunktechnologie der 4. Generation |
| Mbps | Megabit pro Sekunde |
| MHz | MegaHerz |
| MIMO | (Multiple Input Multiple Output) Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen |
| NB-RSRP | (Narrow Band RSRP) Schmalband RSRP |
| PDSCH | (Packet Data Shared Channel) Logischer Datenkanal in 4G und 5G |
| RSRP | (Reference Signal Received Power) Signalstärke des Referenzsignals |
| SS-NR-ARFCN | (Synch Signal New Radio ARFCN) Kanalnummer des Synchronisationssignals |
| SS-RSRP | (Synch Signal RSRP) Signalstärke des Synchronisationssignals |
| StMWi | Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie |
| UE | (User Equipment) mobiles Endgerät |
| UVgO | (Unterschwelvenvergabeordnung) Öffentliche Ausschreibung |
| WB-RSRP | (Wide Band RSRP) Breitband RSRP |