



universität  
wien

# MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

## „MOBILE NETWORK PREDICTION ANALYSIS“

Eine räumliche Methode zur verbesserten Darstellung der Netzabdeckung durch  
DriveTest kalibrierte HCM Daten mit Hilfe der ArcGIS Erweiterung - Cellular  
Experts

verfasst von / submitted by  
Pino Philipp Feichtinger, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Science (MSc)

Wien, 2021 / Vienna, 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt/  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Masterstudium Kartographie und Geoinformation

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof.Mag.Dr. Andreas Riedl

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung . . . . .	5
Danksagungen . . . . .	6
Zusammenfassung . . . . .	7
Glossar . . . . .	9
<b>1 Einleitung</b>	<b>10</b>
1.1 Ausgangssituation . . . . .	10
1.2 Problemstellung . . . . .	14
1.3 Zielsetzung . . . . .	15
1.4 Relevanz der Arbeit . . . . .	16
1.5 Stand der Forschung . . . . .	17
1.6 Forschungsfrage . . . . .	18
1.7 Methode . . . . .	19
1.8 Zu erwartende Resultate . . . . .	20
1.9 Struktur der Arbeit . . . . .	21
<b>2 Grundlagen von Mobilfunk</b>	<b>22</b>
2.1 Frequenzen . . . . .	22
2.2 Signalausbreitung . . . . .	24
2.2.1 Mehrwegausbreitung . . . . .	26
2.2.2 Laufzeitdispersion . . . . .	27
2.2.3 Intersymbolinterferenz . . . . .	28
2.2.4 Fading . . . . .	28
2.2.5 Freiraumdämpfung . . . . .	29
2.3 Pfadverlust-Prognosemodelle . . . . .	32
2.4 Basisstation und Mobilstation . . . . .	36
2.5 Antennen und Sektoren . . . . .	40
2.6 Multiplex Verfahren . . . . .	42
2.6.1 Frequenzmultiplex . . . . .	42
2.6.1.1 Frequency Division Duplex . . . . .	44
2.6.1.2 Orthogonal Frequency Division Multiplex . . . . .	44
2.6.2 Zeitmultiplex . . . . .	44
2.6.3 Codemultiplex . . . . .	45
2.7 Modulations- und Codierungsschemata . . . . .	46
2.7.1 Quadratur-Amplituden-Modulation . . . . .	47
2.8 Referenzsignale . . . . .	48
2.8.1 RSRP . . . . .	48
2.8.2 RSRQ . . . . .	49
2.8.3 SINR . . . . .	50
2.8.4 SNR . . . . .	51



2.9	Dezibel die Einheit der Funktechnik . . . . .	51
2.10	Maximal generierbarer Datendurchsatz . . . . .	52
2.11	Handover . . . . .	52
2.12	Ein Rückblick zu 2G und 3G . . . . .	54
2.13	Der Mobilfunkstandard 4G . . . . .	54
2.13.1	OFDM die Stärke von LTE . . . . .	55
2.14	Der Mobilfunkstandard 5G . . . . .	57
2.14.1	Carrier Aggregation . . . . .	58
2.14.2	MIMO . . . . .	59
2.14.3	Beamforming . . . . .	59
2.14.4	Networkslicing . . . . .	60
2.14.5	Mobile Edge Computing . . . . .	60
2.15	Gerätekatoren - CAT . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Analyse mit Cellular Experts</b>	<b>63</b>
3.1	Mobilfunkmodelle der Privatwirtschaft . . . . .	64
3.2	Das Mobilfunk Modell - MoNGA . . . . .	66
3.3	Landschaftsklassifizierung . . . . .	67
3.3.1	Corine Landcover . . . . .	67
3.3.1.1	Reklassifizierung Corine Landcover . . . . .	70
3.3.2	Digitales Geländemodell . . . . .	74
3.3.3	Neigungsvariabilitätsindex (SV) . . . . .	79
3.3.4	Rauhigkeitsindex (TRI) . . . . .	81
3.3.5	Kombination der Datensätze und Bezugsgröße . . . . .	84
3.3.6	Test Kombination Neigungsvariabilität und Landnutzung . . . . .	84
3.3.6.1	Aggregation an Puffer . . . . .	85
3.3.6.2	Aggregation an Gemeindegrenzen . . . . .	87
3.3.7	Kombination Dämpfungsklassen und Rauhigkeitsindex . . . . .	88
3.3.7.1	Aggregation an Rastern . . . . .	89
3.4	Drive Test . . . . .	97
3.5	HCM Daten . . . . .	99
3.6	Verknüpfung HCM Daten mit Drive-Test . . . . .	100
3.7	Mobilfunkanalysen . . . . .	102
3.7.1	Untersuchungsgebiete . . . . .	103
3.7.2	Cellular Experts Modelleinstellungen . . . . .	104
3.7.3	ESRI Grid-Raster . . . . .	108
3.7.4	Vorbereitung der Daten . . . . .	109
3.7.5	Analyse Gebiet-H . . . . .	113
3.7.5.1	800 MHz Vergleich . . . . .	113
3.7.5.1.1	RSRP . . . . .	113
3.7.5.1.2	RSRQ . . . . .	122
3.7.5.1.3	SINR . . . . .	123
3.7.5.2	1800 MHz Vergleich . . . . .	125
3.7.5.2.1	RSRP . . . . .	125
3.7.5.2.2	RSRQ . . . . .	132
3.7.5.2.3	SINR . . . . .	134

3.7.5.3	2100 MHz Vergleich . . . . .	135
3.7.5.3.1	RSRP . . . . .	135
3.7.5.3.2	RSRQ . . . . .	143
3.7.5.3.3	SINR . . . . .	145
3.7.6	Analyse Gebiet-V . . . . .	147
3.7.6.1	Gebäude Vergleich . . . . .	153
3.7.6.2	Basisstations Überlagerung . . . . .	153
3.7.7	Kreuzvalidierung Gebiet-H und Gebiet-V . . . . .	154
3.7.7.1	Gebiet-H Kreuzkalibriert Gebiet-V . . . . .	156
3.7.7.2	Gebiet-V Kreuzkalibriert Gebiet-H . . . . .	162
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>167</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>172</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>175</b>
	Anhang . . . . .	176

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Ich habe mich bemüht, sämtliche Inhaber der Bildrechte ausfindig zu machen und ihre Zustimmung zur Verwendung der Bilder in dieser Arbeit eingeholt. Sollte dennoch eine Urheberrechtsverletzung bekannt werden, ersuche ich um Meldung bei mir. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keinem anderem Prüfungsgremium vorgelegen.

Datum: **25.09.2021**

Unterschrift: *P. Feichling*

## Danksagungen

Diese Masterarbeit war ein ganz besonderer Meilenstein in meinem Leben, die mich nicht nur fachlich sondern auch persönlich sehr gefordert hat, aber letzten Endes selbstbewusster und stärker werden lies. Um diesen schwierigen Weg vollenden zu können, haben mir eine Reihe von Personen mit ihrer Hilfe und Zeit die nötige Unterstützung geliefert.

Als erstes möchte ich von ganzem Herzen meiner Freundin Frau Dr. Nina Sonja Sarah Bachl danken mich selbst in den dunkelsten Zeiten, stets motiviert und aufgebaut zu haben, um weiter zu machen und nicht aufzugeben. Auch ihre fachlichen Ratschläge und persönlichen Meinungen haben mir den nötigen Antrieb gegeben, dieses große Projekt abzuschließen.

Ich möchte meiner Tante in Italien Frau Mag. Carmen Piergovanni ganz besonders danken, dass sie äußerst professionell und genau, trotz einer schweren Fußverletzung, große Teile meiner Masterarbeit korrigiert hat. Auch meiner lieben Mutter Frau Dipl.-Päd Claudia Feichtinger möchte ich ebenfalls ganz besonders danken, für ihre großen Mühen, meine Arbeit Korrektur zu lesen und mich persönlich immer unterstützt zu haben mit allem was notwendig war!

An meinen Betreuer dieser Arbeit Herrn Ass.-Prof.Mag.Dr. Andreas Riedl möchte ich ein großes Dankeschön richten, dass er mich immer professionell unterstützt hat, damit ich diese Masterarbeit gut und zügig abzuschließen konnte. Er war mir stets mit Rat und Tat zur Seite und ich konnte mich immer auf ihn verlassen die nötige Unterstützung zu erhalten.

Auch an meinen Mitbetreuer Dipl.Ing Erwin Grabler, vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, möchte ich einen großen Dank aussprechen, da dieser mir die Masterarbeit überhaupt erst ermöglicht hat. Die Daten und den Rahmen dieser Arbeit konnte ich mit ihm besprechen und organisieren.

Ich möchte mich ganz besonders bei meinem ehemaligen Arbeitskollegen Dipl.Ing Gerold Hepp, vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, bedanken, da er mir immer mit seiner äußerst professionellen Meinung und Fachwissen zur Seite gestanden ist und mir dadurch in vielen schwierigen Situationen weitergeholfen hat. Er war in dieser Zeit nicht nur ein Fachkollege für mich, sondern auch ein Freund auf den immer Verlass war.

Herrn Mag. Thomas Maier von der Magenta Telekom möchte ich ebenfalls sehr herzlich Danken, da er mir Fachinformationen zu seinem Unternehmen, mit großer Hilfsbereitschaft, zur Verfügung gestellt hat. So konnte ich in einem Kapitel die Situation in der Privatwirtschaft beleuchten.

Meinem Vater Herrn Lukas Feichtinger möchte ich ebenfalls danken, mich immer auf allen Wegen unterstützt und begleitet zu haben. Auch meinem Großvater Herr Ing. Alfred Fenz sowie meiner Großmutter Frau Erika Fenz möchte ich von Herzen danken für ihre ständige Unterstützung und Großzügigkeit.

Am Ende will ich auch Frau Getrude Wieshofer sehr herzlich danken, mir in dieser schwierigen Zeit immer mit ihrer charmanten Art zur Seite gestanden ist. Ihre Kochkünste und die sehr amüsanten Unterhaltungen haben die Schreibarbeit in dieser Zeit zu einem Erlebnis gemacht.

## Zusammenfassung

Mobile Kommunikation findet sich heutzutage in jeden Teilbereich unseres Lebens. Die Analyse von Mobilfunkdaten in Geographischen Informationssystemen sowie die Vorhersage von Signalstärken und Qualitätskriterien gehören zu den entscheidenden Merkmalen um moderne Mobilfunknetze zu planen. Damit solche Mobilfunkvorhersagen verbessert werden können, wurden in dieser Masterarbeit, mithilfe von im Gelände gemessenen DriveTest Daten, Mobilfunkdaten im HCM Format analysiert, Karten erstellt sowie statistisch ausgewertet. Es sollte die Frage beantwortet werden, ob mit *DriveTest Daten eines Untersuchungsgebietes mit spezifischer Charakteristik zur Kalibrierung der HCM Mobilfunkdaten eines zweiten Untersuchungsgebietes vergleichbarer Landschaftscharakteristik angewendet werden kann?*

Hierfür musste zuerst die Charakteristik der Landschaft im Bundesland Niederösterreich anhand von verschiedensten Kriterien bewertet und in ein für GIS Programme auswertbares Schema gebracht werden. Es wurden sowohl Höhen- als auch Landnutzungsdaten herangezogen, welche die Landschaft anhand von Höhenunterschieden sowie unterschiedlichen Landnutzungen beschreiben sollten. Aus den Höhendaten wurden Neigungen als auch ein sogenannter Rauigkeitsindex abgeleitet, um geeignetere Gruppierungsmerkmale zu finden. Aus den CORINE Landnutzungsdaten wurden Dämpfungsklassen laut Vorgaben der ITU, abgeleitet. Auch Gebäudedaten aus der OpenStreetMap wurden für die Modellierung von Abschattungseffekten verwendet. Mithilfe der Kombination des Rauigkeitsindex mit den Dämpfungsklassen konnte somit erfolgreich eine Landschaftsklassifizierung für Niederösterreich erzeugt werden, die anschließend die Basis für die Mobilfunkanalysen bildete.

Weitere Arbeitsfragen beschäftigen sich mit der Auswertung und Analyse der HCM Mobilfunkdaten. Hierbei konnte gezeigt werden wie die Referenzsignale RSRP, RSRQ sowie SINR aus HCM Daten ausgewertet und in Form von Karten als auch Statistiken dargestellt und analysiert werden können. Besonders die Auswertung von ESRI GRID Rasterdaten machte es notwendig auf speziell zugeschnittene Pakete der Programmiersprache R zurückzugreifen. Die automatische Auswertung von Statistiken mittels R Code wird in allen Analysen angewandt. Es konnte gezeigt werden, wo die Unterschiede in den einzelnen Referenzsignalen liegen, wenn ein Gebiet mit DriveTest Messungen im Gelände entweder kalibriert oder nicht kalibriert wurde. Schließlich werden die drei häufigsten in der Praxis verwendeten Frequenzen 800 MHz, 1800 MHz und 2100 MHz anhand von zwei Testgebieten H und V, jeweils mit und ohne Kalibrierung ausgewertet und dargestellt.

Die Analysen der HCM Daten sowie die Vergleiche mit und ohne Kalibrierung von Antennen hat größtenteils gezeigt, dass es doch zu deutlichen besseren Ergebnissen, was die Referenzsignale RSRP, RSRQ und SINR betrifft, kommt, wenn eine Kalibrierung, eines zu analysierenden Standortes, durchgeführt wird.

Die Hauptfragestellung ob eine Kreuzkalibrierung von DriveTest Messungen auf ein anderes Gebiet ähnlicher Landschaftscharakteristik zu ähnlichen Ergebnissen führt wie eine originale Kalibrierung, wurde anhand von Gebiet-H und V getestet. Hierbei konnte anhand der zwei Testgebiete gezeigt werden, dass die RSRP sich in ihren Abdeckungsflächen deutlich mit den originalen Analysen deckt, jedoch es zu Abweichungen bzgl. der Signalstärke kommt. Es wurde in Gebiet-H welches kreuzkalibriert mit Gebiet-V wurde, festgestellt, dass durch die

Kreuzkalibrierung, zu optimistische Signalstärke Werte berechnet werden. Die Kreuzkalibrierung von Gebiet-V zeigte ebenfalls, dass es zu ähnlichen Gebietsabdeckungen durch die Signalstärke RSRP kommt, jedoch eine zu starke Dämpfung und somit schwache RSRP Werte im Vergleich mit originaler Kalibrierung, entstehen.

## Abstract

Mobile telecommunications are found today in every part of our lives. The analysis of mobile radio data with geographical informationsystems (GIS) and the prediction of signal strength and other quality measurements are one of the most ambitious planing tasks. To improve the predictions of such data, this master thesis has worked out concepts to analyse this data, create maps and statistics of DriveTest Data measured in the field and mobile radio data in the HCM format. The question should be answered, whether *a calibration with DriveTest data of one region with specific landscape characteristic can be transfered to another region of similar landscape characteristic. The assumption is that in such analysis of the HCM mobile radio data similar prediction results as if the calibration would have been done in the region itself would be received.*

Therefor the landscape characteristic of the region of lower austria has to be analyzed to transfer the data into a schema which can be read with GIS programmes. Both height and landcover data where included in the analysis to show the effects of this characteristics. The height data was transformed to slope data and were also used to compute the terrain ruggedness index to find similar groups in the data. From the CORINE landcover data the clutter classes where created which were defined from the ITU. Also building data from the OpenStreetMap project was used for the modelling of shadowing effects. With the combination of the terrain ruggedness index and the clutter classes, the landscape categorisation for lower austria could be computed, which was the basis for the mobile radio analysis.

Further research questions handle the evaluation and analysis of the HCM mobile radio data. Therefor it could be shown how the referenz signals RSRP, RSRQ and the SINR can be evaluated and visualized with maps and statistics. Especially the evaluation of ESRI GRID raster made it necessary to use special packages from the programming language R to process the data. It could be shown where the differences of the reference signals are, if a region were measured with or without DriveTest calibration data. Finally the most common used frequencies 800 MHz, 1800 MHz and 2100 MHz where analyzed on the test regions H and V with and without a calibration.

The analysis of the HCM data and the comparison with and without calibration of antennas has shown that better results of the referencesignals RSRP, RSRQ and SINR can be expected if calibration data is used.

The main research question, if a crosscalibration of drivetest data on another region with similar landscape characteristics leads to similar results as an original calibration, was tested on region H and V. It could be shown on this two test areas, that the RSRP coverage area are similar to the original calibration analysis but some variation of the signal strength could be observed. In the region H, which was crosscalibrated with region V, could be observed that the crosscalibration leads to very optimistic results. The crosscalibration of region V computed similar coverage areas for the RSRP, but has shown a too strong Pathloss for the RSRP in comparison with an original calibration.

## Glossar

TRI ..... Terrain Ruggedness Index

DGM ..... digitales Geländemodell

Hata .... Funkwellenausbreitungsmodell

Hata9999. kalibrierbares Funkwellenausbreitungsmodell

HCM ..... Mobilfunkdaten im EU Standard

RMSE..... Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (Root Mean Square Error)

MGI ..... Militärgeographischen Instituts

Std ..... Standardabweichung (Kennwert der Eignung einer DriveTest Kalibrierung)

NR ..... New Radio (5. Mobilfunkgeneration - kurz 5G)

CLC ..... Corine Landcover (Landnutzungsklassifizierung aus Satellitenbilddaten der ESA)

# 1 Einleitung

„Das Internet ist wie eine Welle: Entweder man lernt, auf ihr zu schwimmen, oder man geht unter.“

Bill Gates, Microsoft Gründer

Das Internet hat in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung gewonnen und stellt für Volkswirtschaften einen wichtigen Wettbewerbsfaktor dar. So zeigen Studien, dass ein höherer Grad an Digitalisierung ein höheres Wirtschaftswachstum sowie weniger Arbeitslosigkeit und mehr Innovationsmöglichkeiten bietet. Um die zunehmende Internetnutzung bewältigen zu können, bedarf es einer stetigen Erhöhung der benötigten Bandbreite. Die Europäische Kommission hat zur Erfüllung der Digitalisierungsziele die Zielstrategie *Digitale Agenda 2020*, die sich mit dem flächendeckenden Internetausbau in Europa beschäftigt, entwickelt. Auch Österreich hat sich zum Ziel gesetzt sich zu einer der führenden Digitalnationen zu entwickeln, um Wohlstand, Arbeitsplätze und Lebensqualität langfristig zu sichern. [Breitbandbüro, 2020, vgl. S.41f]

## 1.1 Ausgangssituation

Bei Telekommunikationstechnologien unterscheidet man zwischen Festnetz- und Mobilfunktechnologien. Mobilfunk kommt vor allem im ländlichen Raum eine besondere Bedeutung zu, da aufgrund von regionalen Gegebenheiten ein kabelgebundener Breitbandausbau nicht möglich ist.

Der Breitbandatlas des BMLRT dient zur Darstellung der aktuell verfügbaren Downloadbandbreiten je 100 Meter Rasterzelle - zur Verfügung gestellt durch die österreichischen Internetprovider. Damit wird jedem Bürger ermöglicht, die aktuellen Downloadbandbreiten seines Wohnortes einzusehen.

Abbildung 1.1 zeigt die Festnetzversorgung des Breitbandatlas zum Stand Mai 2019. Die dunkelbraunen Zonen zeigen Bereiche mit hohen Bandbreiten im Download von mehr als 100 Mbit/s, die in den dicht besiedelten Regionen wie Salzburg, Linz, Innsbruck und Bregenz, aber auch in kleineren Gemeinden von Ost-Tirol bis Vorarlberg vorkommen. Die gelblichen Bereiche zeigen Regionen, die mit Bandbreiten im Download von weniger als 100 Mbit/s versorgt sind.

Die Mobilfunkversorgung des Breitbandatlas in Abbildung 1.2 (Stand Mai 2019) zeigt hingegen ein komplett anderes Bild. Es ist ersichtlich, dass weite Teile Österreichs in der höchsten Kategorie mit größer als 100 Mbit/s Downloadbandbreite dargestellt werden. Dies entsteht da, die Mobilfunkbetreiber *Best Effort* Werte, die normalerweise nur unter optimalen Voraussetzungen zu erreichen sind, an das BMLRT melden.



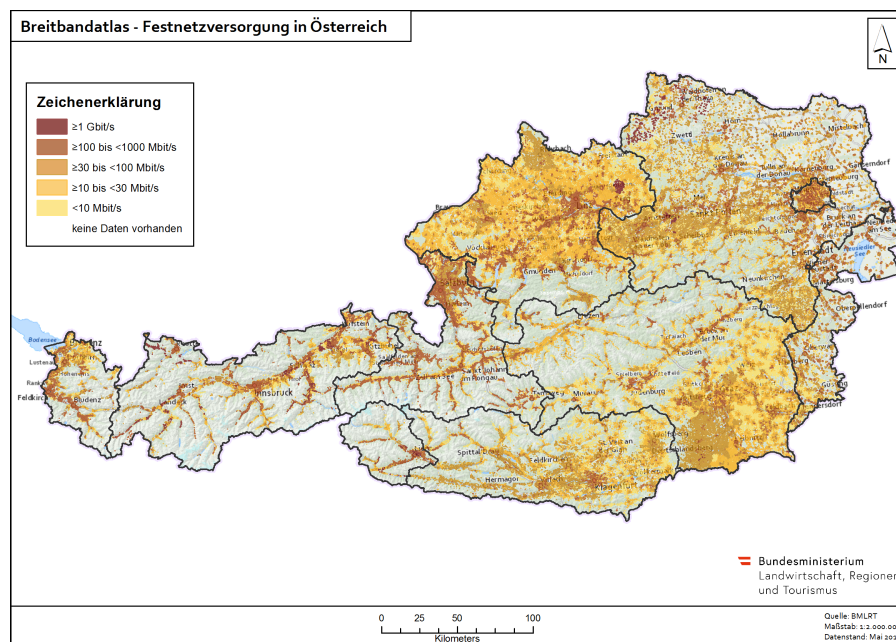


Abbildung 1.1: Breitbandatlas Festnetz

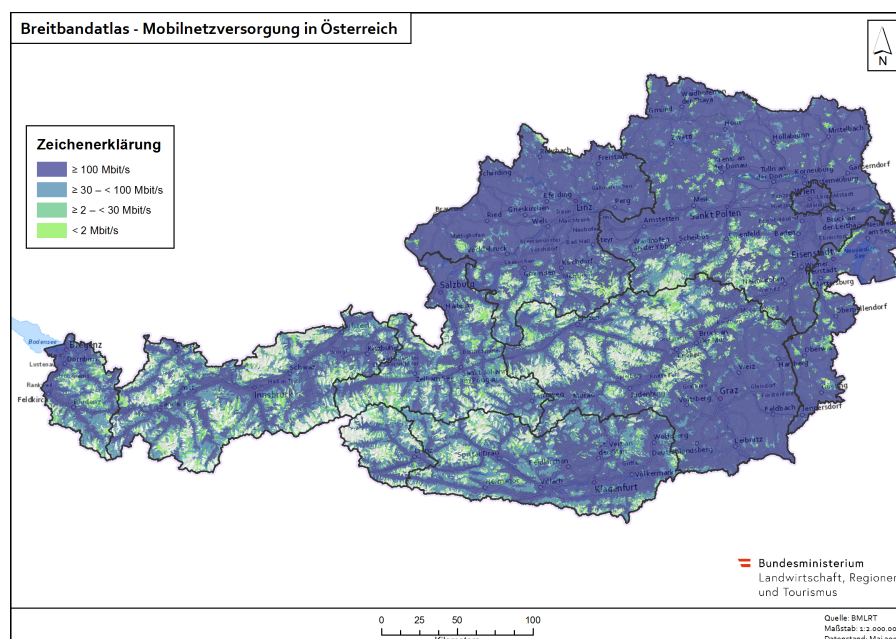


Abbildung 1.2: Breitbandatlas Mobilnetz

Im internationalen Vergleich liegt Österreich laut dem Speedtest Global Index bei Festnetz-Internet mit einer durchschnittlichen Internet-Geschwindigkeit von 58,05 Megabit pro Sekunde auf dem weltweit 55. Platz. Sogar Staaten wie Panama, Barbados, Malaysia und Moldawien sind besser gereiht.

Mobiles Internet erreicht im Speedtest Global Index durchschnittlich 52,67 Mbit/s und ist im internationalen Vergleich damit auf Platz 18. Im Durchschnitt erhält also ein Kunde in Österreich mit Mobilfunk Downloadbandbreiten, die sich nur knapp unterhalb der durchschnittlichen Festnetzbandbreiten befinden. [Kotrba, 2020, vgl.]

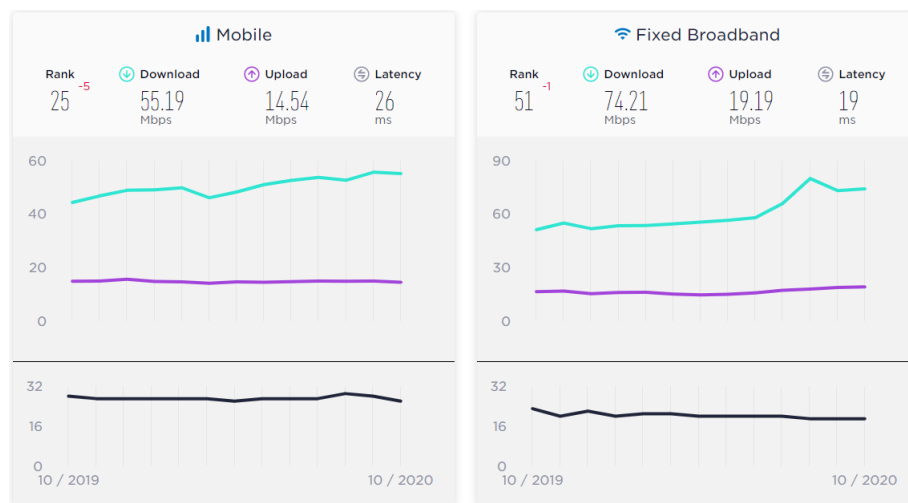


Abbildung 1.3: Speedtest Global Index Austria  
[Ookla, 2020]

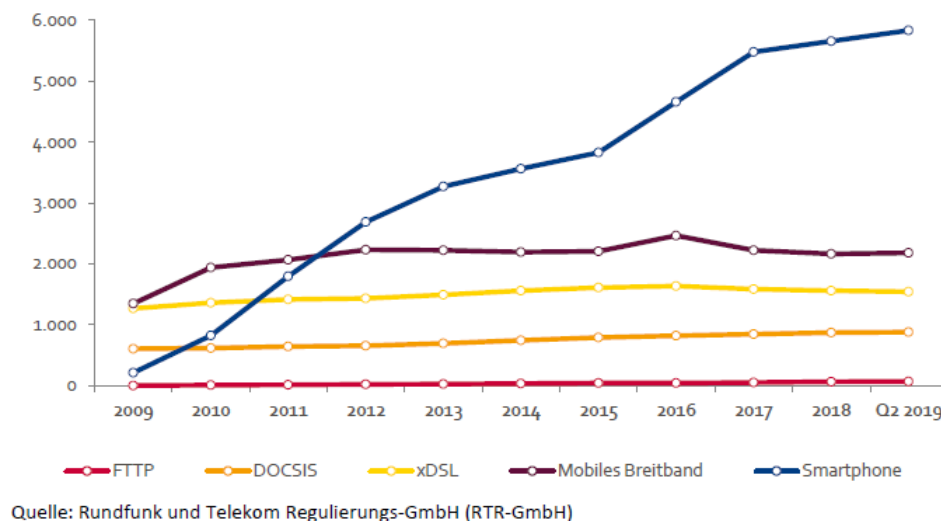


Abbildung 1.4: Breitbandanschlüsse nach Technologie 2009-2019 Q2  
[Breitbandbüro, 2020, S.64]

Laut dem Evaluierungsbericht des BMLRT aus dem Jahr 2019 ist in dem Zeitraum 2009 bis 2019 ein kontinuierlicher Anstieg der Smartphone Nutzer zu verzeichnen. In Abbildung 1.4 ist zu sehen, wie die Zunahme der gekauften Smartphone Verträge im Vergleich mit den Festnetztechnologien sich abhebt. In den Mobilfunknetzen werden außerdem bereits drei Viertel der Breitbandanschlüsse aus Smartphones und mobilem Breitband umgesetzt. Der Trend von den Internet Anwendern geht eindeutig immer mehr Richtung mobiler Datennutzung. Trotz dieser erstaunlichen Entwicklung in mobilen Breitbandtechnologien muss erwähnt werden, dass diese starken Zuwächse in den letzten Jahren abflachen. [Breitbandbüro, 2020, vgl. S.64f]

Bei den leitungsgebundenen Breitbandtechnologien gab es in den letzten Jahren nur geringe Zuwachsraten, jedoch gibt es einen deutlichen Trend von den Endanwendern hin zu mehr leistungsfähigeren Festnetztechnologien. [vgl. ebd. S.65f]

Auch beim Nutzerverhalten der mobilen Breitbandanschlüsse ist ein deutlich steigender Trend in den letzten Jahren zu beobachten. Im Durchschnitt werden pro Monat im Mobilfunk 70 Gigabyte an Datenvolumen verbraucht. Blickt man in die Vergangenheit, so betrug das übertragene Datenvolumen des gesamten Jahres 2009 rund 16 Millionen Gigabyte und bereits 10 Jahre später im Jahr 2018 wurden in den österreichischen Mobilfunknetzen ganze 1,5 Milliarden Daten übertragen. Das ist ein Anstieg um das 20 fache im Vergleich zu den übertragenen Daten von 2012. [Breitbandbüro, 2020, vgl. S.70f]

Auch zu besonderen Momenten, wie dem Jahreswechsel, kommt es zu besonders viel Datenübertragung in den Mobilfunknetzen aufgrund von versendeter Glücksbringernachrichten und angehängter Bilder sowie Videos in den diversen Social Media. Hierbei wurde am Jahreswechsel 2019 auf 2020 ein Datenvolumen von fast 28,5 Millionen Gigabyte übertragen. [vgl. ebd. S.70f]

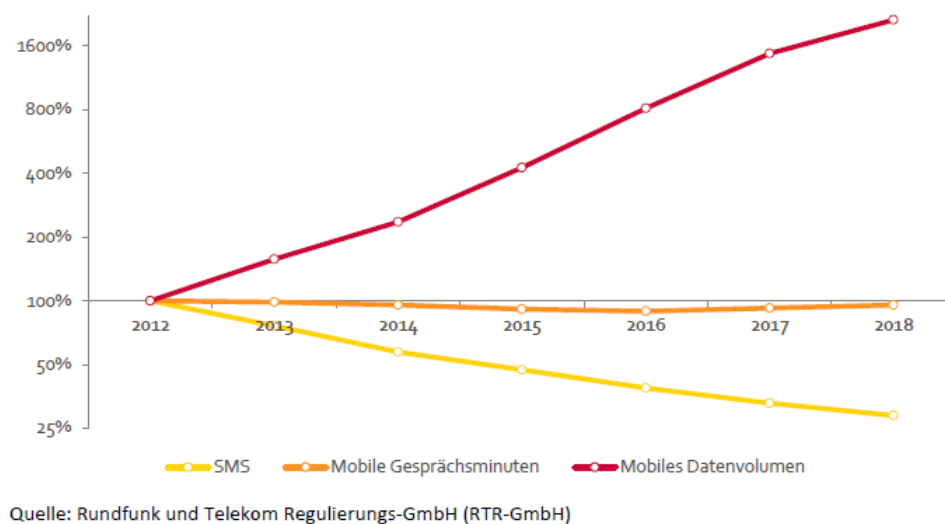


Abbildung 1.5: Nutzerverhalten  
[Breitbandbüro, 2020, S.70]

Das Verhalten der Mobilfunknutzer hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Techniken hat sich ebenfalls stark gewandelt. Die Kurznachrichtenübertragungsform SMS ist in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Von 2012 bis 2018 ist der Versand von SMS um mehr als 50% zurückgegangen. Man geht davon aus, dass diese Nachrichten seitdem in Online Messenger Diensten übertragen werden und somit zum mobilen Datenvolumen zählen. Trotz der Internet-Telefonie sind die mobilen Gesprächsminuten weitgehend stabil geblieben. [vgl. ebd. S.70f]

In internationalen Prognosen geht man mittlerweile von einem weltweiten Anstieg der Datennutzung von 1,5 ZettaByte im Jahr 2017 auf 4,8 ZettaByte bis in das Jahr 2022 aus. Dieses stark steigende Nutzungsverhalten der übertragenen Daten ist einerseits auf höheres Konsumverhalten von online Webinhalten und Social Media zurückzuführen, aber auch auf immer stärker werdende berufliche Anwendungen. Die immer stärkere Vernetzung von Geräten (IoT - Internet of Things), M2M Kommunikation aber auch Smart-Home Anwendungen, wie sie in Haushalten bereits oft vorkommt, sind hier die Treiber dieser immer stärker werdenden Datenübertragung. [vgl. ebd. S.71f]

Diese stark steigenden Datenübertragungen in den Mobilfunknetzen müssen aber auch von der entsprechenden Infrastruktur gewährleistet werden. Deshalb ist es besonders im Hinblick auf die Zukunft in den nächsten Jahren und Monaten entscheidend Mobilfunkmasten entsprechend dieser Herausforderungen technisch auszustatten und die strategische Planung der Platzierung sowie auch die Modellierung der Mobilfunkmasten zu gewährleisten. [vgl. ebd. S.71f]

## 1.2 Problemstellung

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist speziell im ländlichen Raum eine gute Abdeckung mit Mobilfunkantennen notwendig, um einen lückenlosen Mobilfunkempfang sicherzustellen.

Mobilfunkbetreiber melden an das BMLRT die jeweiligen Bandbreiten, dabei handelt es sich jedoch um sogenannte *Best Effort* Werte, welche die technisch möglichen Bandbreiten abbilden, jedoch keine realen Werte darstellen. Aufgrund dessen, dass es sich jedoch bei Mobilfunk um ein *Shared Medium* handelt - dies bedeutet, dass eine Antenne gleichzeitig von mehreren Mobilfunknutzern verwendet werden kann - ist es schwierig eine genaue Vorhersage hinsichtlich nutzbarer Bandbreite sowie Downloadgeschwindigkeit für den Endnutzer zu treffen. Weitere Einflussfaktoren auf die Bandbreite stellen landschaftliche Gegebenheiten wie Höhe, Neigung und Landnutzung dar. Aufgrund all dieser Einflussfaktoren kommt es häufig zu Abweichungen zwischen den von Providern gemeldeten Bandbreiten und der realen für den Endkunden nutzbaren Bandbreite. Dies führt sowohl zu Problemen für den privaten Nutzern, als auch viel wichtiger, noch ist eine stabile und schnelle Datenübertragung für Österreichs Wirtschaft, Verwaltung und Gesellschaft. Gerade in Krisensituationen, wie zum Beispiel der COVID-19-Pandemie steigt die Bedeutung einer flächendeckenden und leistungsfähigen Mobilfunkversorgung.

Aufgrund dessen, dass das BMLRT generalisierte HCM Daten (von der EU vereinheitlichte Daten über die Signalstärke, Download und Upload, Geschwindigkeit, die in allen EU Mitgliedsstaaten gleich aufgebaut sind, um eine grenzübergreifende Analyse zu ermöglichen) von den Providern erhält, ist es nicht möglich die realen Empfangsbandbreiten für den Endnutzer zu ermitteln. Ein Wissen über die genaue Abdeckung ist jedoch notwendig, um den Internetausbau in Österreich gerade im ländlichen Raum voranzutreiben, besonders im Hinblick auf zukünftige Einsatzbereiche wie *Teleworking*, *Cloud Computing* oder *Video-on-Demand* um nur einige zu nennen, die von schnellen und stabilen Mobilfunkverbindungen abhängig sind. Außerdem kann Mobilfunk als Substitut für Festnetz, besonders im ländlichen Raum, wo der Ausbau von Kabeltechnologien nicht immer wirtschaftlich ist, angesehen werden.

## 1.3 Zielsetzung

Allgemeines Ziel dieser Masterarbeit ist es mit Hilfe der ArcGIS Extension Cellular Experts die reale Mobilfunkabdeckung in einem spezifisch umgrenzten Bereich in Österreich zu ermitteln. Es soll zuerst verifiziert werden, ob es mit Hilfe von DriveTest Messungen möglich ist, das sogenannte Hata9999 Modell zu kalibrieren und damit eine genauere Mobilfunkabdeckung zu berechnen. Da jedoch nicht in jedem Gebiet reale Daten hinsichtlich Netzaabdeckung vorliegen, ist es das Ziel mit Hilfe des ersten berechneten Gebietes auf die reale Mobilfunkabdeckung innerhalb eines zweiten Untersuchungsgebietes mit vergleichbarer Landschaftscharakteristik zu schließen.

Hierfür ist ein Zwischenziel die nötige Landschaftscharakteristik aus den Corine Landcover Daten als auch aus einem digitalen Geländemodell zu beschreiben. Dabei sollen die zwei Datensätze in einem GIS Programm so aufbereitet werden, dass sie miteinander kombiniert werden können, um schließlich über statistische Methoden Landschaftskategorien abzuleiten, die sowohl die Landnutzung als auch die Geländehöhen beinhalten.

Im Speziellen ist das Ziel zu evaluieren, ob mit Hilfe des kalibrierbaren Hata9999 Modells eines Gebietes die genaue Mobilfunkabdeckung eines zweiten Gebietes, das in derselben Landschaftskategorie liegt, durch Analyse von HCM Daten ermittelt werden kann.

Dadurch soll eine Anpassung des Hata9999 Modells und seiner die Dämpfung der Umgebungsparameter darstellenden Koeffizienten, an den zuvor in Cellular Experts analysierten Datensatzes (HCM) erfolgen. Diese Berechnungen erfolgen an weiteren Antennenstandorten für verschiedene Landnutzungstypen, sodass eine Gegenüberstellung der Netzaabdeckung, der einfließenden Umgebungsparameter sowie Störfaktoren möglich wird.

Damit soll ermöglicht werden, DriveTest Ergebnisse von einem Gebiet auf ein anderes Gebiet ähnlicher Gebietscharakteristik anzuwenden, ohne dass dort neue Messungen durchgeführt werden müssen.

Außerdem soll untersucht, werden mit welcher Methodik ein begrenzter Untersuchungsraum optimal aus HCM Mobilfunkdaten mit Cellular Experts und dem Hata9999 Modell analysiert und beschrieben werden kann und welche Erkenntnisse sich über Mobilfunkparameter daraus ergeben.

Zusätzlich soll die verbesserte Modellierung der Mobilfunkabdeckung durch DriveTest Daten dargestellt werden.

## 1.4 Relevanz der Arbeit

Wenn die Berechnungen der Mobilfunkversorgung mit Cellular Experts auf den klassifizierten Landschaftskategorien verbessert werden, so ist es zukünftig möglich damit genauere Modelle zu berechnen und dadurch zu versorgende Nutzerzahlen besser und effizienter abzuschätzen. Weiteres können Mobilfunk Versorgungsgebiete detailreich analysiert werden z.B. für Förderabwicklungen oder Kontrollen der vorherrschenden Abdeckung, um die „User-Experience“ und deren Zufriedenheit zu garantieren. Vielerorts wird von den Nutzern, die mobile Internetanschlüsse nutzen, eine unzureichende Download Bandbreite oder Signalstärke bemängelt. Da das remote Working bzw. Home Office immer mehr an Bedeutung gewinnt, ist eine stabile und ausreichend hohe Bandbreite unbedingt erforderlich, um auch Bürotätigkeiten von zu Hause aus zu erledigen.

Durch die Kreuzkalibrierung der analysierten HCM Daten, die mit DriveTests kalibriert wurden, wird es möglich Abschätzungen zu treffen ob sich die Methode der Landschaftsklassifizierung und der Übertragung von kalibrierten Hata9999 Koeffizienten auf andere Gebietstypen anwenden lässt.

DriveTest Fahrten, um die genauen Parameter einer Mobilfunkstation zu messen, sind Zeitaufwendig und erfordern einer genauen Planung sowie Nachbearbeitung der Daten. Es soll letzten Endes eine Aussage getroffen werden können, ob es anhand von DriveTest Messungen eines Untersuchungsgebietes möglich ist diese auf ein x beliebiges zweites Untersuchungsgebiet mit ähnlicher geographischer Charakteristik und Gegebenheiten umzulegen, um schließlich ähnliche Modellergebnisse wie die DriveTest Messungen des ersten Untersuchungsgebietes zu erhalten.

## 1.5 Stand der Forschung

Das BMLRT ist derzeit die erste Institution in Österreich, welche die ArcGIS Erweiterung von Cellular Experts nutzt, um Mobilfunkdaten zu analysieren. Die hier angewandten Analyseprozesse wurden bei weitläufiger Betrachtung nirgends zuvor in dieser Art und Weise durchgeführt. Die Fragestellungen ergeben sich aus internen Problemstellungen im Ministerium, wodurch jedoch auch die internationale GIS Gemeinschaft im Endeffekt profitieren kann.

Zum Stand der Forschung lässt sich sagen, dass Cellular Experts<sup>1</sup> regelmäßig weiterentwickelt wird und das BMLRT an dieser Entwicklung auch beteiligt ist, was wiederum bedeutet, dass die von BMLRT gestellten Anforderungen, wie die Integrierbarkeit von HCM Daten, die Verbindung von Cellular Experts mit einer externen Postgre SQL Datenbank sowie Funktionen für spezielle Analysen, an die Software von Cellular Experts im Bereich der Mobilfunkanalyse und GIS neu sind.

Grundsätzlich gibt es zwar auch andere Planungsprogramme wie PegaPlan und Atoll, welche in der Privatwirtschaft und in vielen Europäischen Ländern zum Einsatz kommen, jedoch ist das Landwirtschaftsministerium die einzige Institution in Österreich welche Cellular Expert mit ArcGIS für Mobilfunkanalysen verwendet. Bereits in der Diplomarbeit von [Kogelnig, 2012] wurde die Analyse der Signalstärke von WLAN Routern an kleinräumigen Beispielen in der Stadt Wien vorgeführt. In der hier vorgestellten Masterarbeit wird die Analyse der Signalstärkeparameter jedoch um die Möglichkeit der Kalibrierung von im Feld gemessenen DriveTest Daten erweitert. Zusätzlich wird getestet ob DriveTest Daten auf andere Basisstationen, in Gebieten mit ähnlicher Landschaftlicher Charakteristik, angewandt werden können.

Durch die in dieser Masterarbeit durchgeführte Charakterisierung von Landschaftskategorien und die Analyse der Kreuzkalibrierung, soll es zukünftig möglich sein, Feldmessungen in Form von DriveTest Daten in einem dieser definierten Landschaftskategorien für verschiedene Basisstationen als Kalibrierungsgrundlage anzuwenden. Außerdem soll durch die Analyse der Kreuzkalibrierung festgestellt werden wie groß die Unterschiede der modellierten Signalwerte sind wenn DriveTest Daten einer anderen Basisstation angewendet werden.

---

<sup>1</sup>Ist eine Lithauische Firma und stellt eine Erweiterung von ArcGIS dar, welche für Mobilfunkanalysen konzipiert wurde.

## 1.6 Forschungsfrage

Die Forschungsfrage in dieser Masterarbeit orientiert sich stark praktisch an der Datenauswertung und Analyse der HCM Daten mittels Cellular Expert. Hierbei soll der praktische Nutzen, der durch die Beantwortung geschieht, durch Karten und Statistiken dargestellt werden.

Folgende Forschungshypothese wird in dieser Masterarbeit gebildet:

*Es wird davon ausgegangen, dass DriveTest Daten eines Untersuchungsgebietes mit spezifischer Charakteristik zur Kalibrierung der HCM Mobilfunkdaten eines zweiten Untersuchungsgebietes vergleichbarer Landschaftscharakteristik angewendet werden können.*

Arbeitsfrage 1

- Wie kann ein Gebiet anhand von Landnutzung und Geländehöhen charakterisiert werden, um schließlich Landschaftskategorien zu erhalten?

Arbeitsfrage 2

- Mit welcher Methodik können die Gebiete kategorisiert werden?

Arbeitsfrage 3

- Mit welcher Methodik kann ein begrenzter Untersuchungsraum optimal aus HCM Mobilfunkdaten mit Cellular Experts und dem Hata9999-Modell analysiert und beschrieben werden und welche Erkenntnisse über Mobilfunkparameter ergeben sich daraus?

Arbeitsfrage 4

- Kann mit Feldmessungen in Form von Drive-Tests eine Verbesserung der Netzabdeckungsparameter erzielt werden?



## 1.7 Methode

Mit Hilfe von GIS Methoden soll zuerst eine spezifische Region in Österreich – Niederösterreich – klassifiziert werden. Die Klassifizierung erfolgt anhand von Geländeeigenschaften wie Höhe und Landnutzung. Anschließend wird innerhalb von zwei vergleichbaren Gebieten, hinsichtlich ihrer Klassifikation, je ein Mobilfunkstandort mit gleicher Mobilfunkstärke ausgewählt und rund um diesen wird ein Bereich von rund 10km mit Cellular Expert modelliert.

Im nächsten Schritt wird zuerst ein Gebiet hinsichtlich Netzabdeckung ausschließlich mit den generalisierten HCM Daten berechnet. Darauf folgt die Berechnung des gleichen Gebietes unter Einbeziehung von Daten, die durch einen Drive Test kalibriert wurden. Schließlich werden beide Karten miteinander hinsichtlich Mobilnetzabdeckung verglichen.

In einem weiteren Schritt erfolgt der Vergleich mit einem zweiten Mobilfunkstandort in einem Gebiet mit vergleichbarer Landschaftsklassifikation. Dabei wird evaluiert, ob mit Hilfe des ersten Gebietes durch Kalibrierung des Hata9999 Modells in Cellular Expert auf die Netzabdeckung des zweiten Gebiets geschlossen werden kann.

Damit Aussagen über die vorher beschriebenen Einflussfaktoren gemacht werden können muss ein Modell, in diesem Fall ein Mobilfunkmodell erstellt und mit allen benötigten Parametern befüllt werden, um die Realität bestmöglich abzubilden. Diese Parameter beinhalten topographische Daten wie die Höhen des digitalen Geländemodells sowie die Landnutzungsdaten des Europäischen Corine Landcover Datensatzes.

Zum einen werden sogenannte Drive-Test Daten integriert, diese werden von einem speziellen Messempfänger der Firma Rohde und Schwarz aufgezeichnet und dienen der Kalibrierung des in Cellular Expert verwendeten Hata9999 Modells zur Modellierung der Daten. Die zwei Testgebiete sollen auch für die DriveTest Kalibrierung gut befahrbar sein, da die Mobilfunkstation aus allen Richtungen umrundet werden können muss. Es soll von jedem gemessenen Punkt eine Sichtverbindung im Radius von bis max. 10 Kilometern bestehen.

Weiteres sollen Hindernisse wie hohe Berge modelliert werden, da dies beträchtliche Auswirkungen auf die Empfangsleistung in abgeschatteten Bereichen hat. Der Einfluss der Topographie auf Mobilfunkanalysen, soll ebenfalls berücksichtigt werden. Methodisch sollen zwei Untersuchungsgebiete mit ähnlichen Geographischen Gesichtspunkten wie Topographie und Landnutzung ausgewählt werden. In diesen Gebieten werden Mobilfunkstationen lokalisiert, die bereits im Gelände durch einen DriveTest vermessen wurden.

Die Testgebiete sollen anhand von digitalen Höheninformationen mittels Indizes kategorisiert werden. Die Landnutzung soll mit diesen Höhenindizes räumlich verschnitten werden, um schließlich anhand dieser Parameter zwei ähnliche Gebiete, in denen sich Mobilfunkstationen befinden, zu ermitteln. In das Modell fließen die HCM Daten, die generalisierte Antennendiagramme besitzen, ein. Da es aus technisch und organisatorischen Gründen leider nicht möglich war reale Antennendaten zu erhalten, muss in dieser Arbeit mit modellartigen Antennen gerechnet werden.

HCM Daten werden in standardisierter Form nach einem Agreement der EU-Mitgliedstaaten von den österreichischen Mobilfunkbetreibern an das BMLRT übermittelt. In diesen Daten sind

jedoch die exakten Antennentypen nicht hinterlegt. Alle anderen Parameter sind vorhanden und können für die Analyse verwendet werden. [Grabler, 2018, vgl. S.9]

## 1.8 Zu erwartende Resultate

Resultate sollen in Form von Netzaabdeckungskarten des jeweiligen Untersuchungsgebietes sowie Datensatzes erbracht werden. Weiteres sollen Vergleiche über statistische Grafiken zwischen den verschiedenen Input Parametern und Datensätzen gemacht werden.

Es soll eine Verifizierung der These erbracht werden, ob mit HCM Daten und der Messung und Kalibrierung durch DriveTest Daten eine Verbesserung der Netzaabdeckungsparameter erzielt werden kann.

Weiteres soll überprüft werden ob die Analyse von zwei verschiedenen Mobilfunkstandorten, die sich auf Gebieten gleicher Landschaftskategorien befinden, Unterschiede in der Referenzsignalstärke RSRP, RSRQ sowie SINR ergeben. Zusätzlich sollen, durch DriveTests, kalibrierte Hata9999 Parameter der zwei Untersuchungsgebiete ausgetauscht werden, um eine Kreuzkalibrierung zu simulieren. Darauf folgend soll verifiziert werden, in wie weit die RSRP Signalstärke abweicht, wenn kalibrierte Hata9999 Parameter aus einem anderen Gebiet aber mit derselben Landschaftskategorie, Verwendung finden.

Dies würde einen enormen Vorteil in der großflächigen Analyse von HCM Mobilfunkdaten erbringen und könnte einen entscheidenden wissenschaftlichen Vorteil für viele weitere Untersuchungen und Forschungen erbringen. Zusätzlich würde damit das interne Mobilfunkmodell Hata9999 besser auf ausgewählte Gebietscharakteristika kalibriert werden, wodurch reale Mobilfunkabdeckungen modelliert werden können, um die mobile Breitbandversorgung bestmöglich darzustellen.

## 1.9 Struktur der Arbeit

Um einen Überblick über diese Masterarbeit zu erhalten, sollen hier die folgenden Kapitel kurz erläutert werden.

- In Kapitel 2 werden die Grundlagen von Mobilfunk näher erläutert. Hierbei sollen sowohl physikalische Basisinformationen über Frequenzen im Mobilfunk und die Signalausbreitung gegeben werden, als auch die Struktur und Funktionsweise von Mobilfunknetzen näher betrachtet werden. Es werden Multiplexverfahren vorgestellt, um Informationen effizient zu Übertragen als auch die Grundlagen erklärt wie analoge Informationen schließlich in digitale transformiert werden. Es werden die verschiedenen Referenzsignale erläutert, die für das Verständnis der Analysen in Kapitel 3 notwendig sind. Außerdem werden die Konzepte vorgestellt, wie mobile Empfangsgeräte durch ihre Bewegung von Zelle zu Zelle wechseln können. Die wichtigsten Mobilfunktechnologien einschließlich der Gerätekategorien, welche die Stärke des Empfangssignals beeinflussen, werden vorgestellt. Schließlich werden verschiedene Pfadverlust-Prognosemodelle vorgestellt, welche die Umgebungsbedingungen der Natur für Analysen vorhersagen.
- Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Analyse der Mobilfunkdaten in Cellular Experts. Es wird das in dieser Arbeit verwendete Mobilfunkmodell vorgestellt, aber auch auf Mobilfunkmodelle der Privatwirtschaft am Beispiel von Magenta Telekom eingegangen. Außerdem wird eine Landschaftsklassifizierung durchgeführt, um zu geeigneten Gebietstypen hinsichtlich Landnutzung als auch Höhenunterschieden zu gelangen. Diese wird in weiterer Folge dazu verwendet, zwei Untersuchungsgebiete in derselben Gebietsklasse zu analysieren. Außerdem werden sogenannte Dämpfungsklassen aus den Landnutzungsklassen abgeleitet. Aus den Höhendaten wird ein sogenannter Rauigkeitsindex erzeugt. Schließlich werden die Dämpfungsklassen mit dem Rauigkeitsindex miteinander kombiniert um eine effektive Gebietsabgrenzung zu realisieren. Weiteres wird auf die DriveTest Messungen eingegangen, welche für die Kalibrierung der Antennen notwendig sind. Es wird die Bedeutung der HCM Daten erläutert, sowie deren Verknüpfung mit den DriveTest Daten dargestellt. Anschließend werden die Einstellungen von Cellular Experts und die Bedeutung der Parameter erläutert. Schließlich werden die Mobilfunkanalysen für die Gebiete-H und V sowie deren Ergebnisse mit den Kombinationen unter kalibrierten und nicht kalibrierten Parametern sowie für die Frequenzen 800, 1800 sowie 2600 MHz durchgeführt.
- Das Kapitel 4 geht auf die Ergebnisse des in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnis ein. Es wurde gezeigt, wie und mit welcher Methodik ein Gebiet anhand von Landnutzung sowie Geländehöhen charakterisiert werden kann. Außerdem wurde dargestellt, mit welchen Konzepten so eine Klassifizierung durchgeführt werden kann. Es werden die Analyseergebnisse der Untersuchungsgebiete H und V zusammengefasst und die Unterschiede welche eine Kalibrierung mit sich bringt erläutert.
- In Kapitel 5 wird diskutiert welche Konzepte, Methoden sowie Modelle in dieser Masterarbeit verwendet wurden. Es wird auch über die bestehenden Grenzen der verwendeten Konzepte gesprochen.
- Im letzten Kapitel 6 Ausblick werden mögliche zukünftig weiterführende Konzepte diskutiert. Es wird dargelegt welche Analyse und Forschungen zukünftig durchgeführt werden sollten um eine möglichst breite Auseinandersetzung mit dem Thema der Analyse von Mobilfunkdaten und GIS zu gewährleisten.

## 2 Grundlagen von Mobilfunk

*„Mobilfunksysteme stellen eine der neuesten und spannendsten Technologien unserer Zeit dar und umfassen nahezu alle Facetten der modernen Nachrichtentechnik“ [Benkner, 2007, S.1].*

Unter Mobilfunk versteht man die kabellose Signalübertragung von Telekommunikationssystemen, die somit eine Mobilität der Teilnehmer ermöglichen. Diese Technologie erlaubt erstmals einen standortunabhängigen Informationsaustausch von Sprache als auch Daten. In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der Mobilfunk stark gewandelt und ist in vielen Lebensbereichen nicht mehr wegzudenken, da er unser Leben massiv verändert hat. Es gibt kaum noch jemanden, der kein Smartphone besitzt und kaum ein Gerät, welches nicht mittels Apps gesteuert werden kann. Auch der Zugang zum Internet und die dort unendlichen Möglichkeiten zeigen die immer stärker werdende Vernetzung unserer Welt auf. Mobilfunk schafft hierfür die notwendige Übertragung und leistet im Hintergrund für all die diversen Prozesse des Internets und der smarten Geräte jene Datenübertragung, die so notwendig ist, um die moderne Kommunikation kabellos überall und zu jeder Zeit, zu gewährleisten. [Rose, 2014, vgl. S.7f]

Die verfügbaren Frequenzen im Mobilfunk sind eine knappe und durch behördliche Stellen regulierte Ressource. Daher hat jeder Mobilfunknetzprovider ein begrenztes, einzigartiges Spektrum, in welchem er seine Dienste für den Endnutzer bereitstellen kann [vgl. ebd.].

Durch die ständige Mobilität der Teilnehmer unterliegen Mobilfunkverbindungen kontinuierlichen Veränderungen. Für den funktionierenden Betrieb von Mobilfunknetzen muss diese Problematik besonders berücksichtigt werden [vgl. ebd.].

In diesem Kapitel sollen die Grundlagen von Mobilfunk näher erläutert werden um im folgenden Analysekapitel 3 zu verstehen welche physikalischen Grundlagen hinter den Analysen stehen. Hierbei wird erklärt, welche Arten von Frequenzen es gibt, wie die Signalausbreitung in ihren Grundzügen funktioniert, wie Dämpfung funktioniert, was für Effekte die Mehrwegausbreitung besitzt, was unter einer Basisstation und einer Mobilstation verstanden wird, was Antennen und Sektoren sind, wozu es Multiplex Verfahren gibt, was Modulation bewirkt, welche Referenzsignale es gibt, warum Dezibel in der Nachrichtentechnik verwendet wird, was Handover sind, welche Mobilfunkgenerationen es gibt, was die Gerätekategorie ist und wofür Prognosemodelle verwendet werden.

### 2.1 Frequenzen

Mobilfunk basiert auf hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldern. Hierbei wandelt sich fortlaufend ein elektrisches Feld in ein magnetisches Feld um und umgekehrt. Wie oft dieser Wechsel geschieht, wird durch die Frequenz, die in der physikalischen Maßeinheit Hertz [Hz] angegeben wird, bestimmt. Je kleiner hierbei die Wellenlänge ist, desto schneller schwingt das Feld hin und her. Im Mobilfunk kommen Frequenzen im Mikrowellenbereich zum Einsatz. Je

nach verwendeter Frequenz verändert sich auch die Länge der Wellen, so besitzt eine Welle mit 900 Megahertz eine Länge von 33cm, bei 1800 Megahertz beträgt die Wellenlänge nur noch 16cm und bei 2100 Megahertz 14cm. [Otto and Mühlendahl, 2019, vgl.]

In der Telekommunikation sind Frequenzen ein wertvolles und seltenes Gut. Die meisten Frequenzen, die gut eingesetzt werden können sind oftmals bereits belegt. Für die weltweite Regelung und Vergabe der Frequenzen ist die *International Telecommunications Union (ITU)* in Genf zuständig. [Schiller, 2003, vgl. S.44ff]

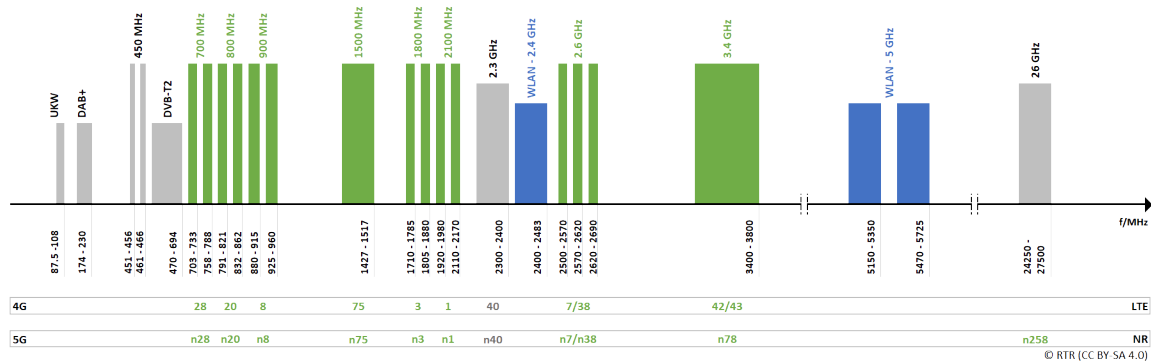


Abbildung 2.1: Frequenzbereiche  
[RTR, 2020]

Die Frequenzen in Österreich sind grundsätzlich in staatlicher Hand und werden von der *Rundfunk- und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR)* in Frequenzauktionsverfahren vergeben. Mit der exakten Vergabe der nutzbaren Frequenzen soll verhindert werden, dass Frequenzen nicht doppelt genutzt werden, was zu gegenseitigen Störungen führen könnte. Welche Frequenzen durch welche Telekommunikationsprovider genutzt werden können wird durch das Frequenzauktionsverfahren der RTR geregelt. Die jeweiligen Frequenzen stehen dann nur den jeweiligen Providern zur Verfügung. [Schiller, 2003, vgl. S.44ff]

Die im Mobilfunk eingesetzten Frequenzen erstrecken sich im Bereich von 700 MHz bis aktuell 3,4 GHz. In Abbildung 2.1 sind die genutzten Frequenzen im Mobilfunk in Grün sowie in Blau für WLAN Router und in Grau für weitere Geräte in niedrigeren Frequenzbereichen wie Radio oder Fernsehboxen, dargestellt. Der grundlegende Unterschied bei den Frequenzen liegt in ihrer maximalen Reichweite zur Datenübertragung. Niedrige Frequenzen wie das 700, 800 und 900 MHz Band können Reichweiten bis 15 Kilometer und mehr überwinden. Dagegen können hohe Frequenzen wie ab 3,4 GHz nur noch einen Bereich versorgen, der nicht weiter als einen Kilometer von der Mobilfunkstation entfernt liegt. In den folgenden Kapiteln 2.13 sowie 2.14 werden die Mobilfunkstandards 4G und 5G detailliert beschrieben und der Zusammenhang mit der verwendeten Frequenz genauer erläutert. [vgl. ebd]

## 2.2 Signalausbreitung

Sowohl drahtlose Kommunikationsnetze als auch herkömmliche leitungsgebundene<sup>1</sup> Netze besitzen einen Sender (die Basisstation<sup>2</sup>) und einen Empfänger (bei mobilen Verbindungen ist dies meistens ein Mobiltelefon, bei leitungsgebundenen Verbindungen oftmals ein Router oder anderes Gerät zum Empfang der Daten). Es bestehen jedoch grundlegende Unterschiede bei der Signalausbreitung von einem Sender zu einem Empfänger, je nach dem welche Technologie betrachtet wird. [Schiller, 2003, vgl. S.55f]

*„In leitungsgebundenen Netzen breiten sich Signale vorrangig entlang des Leiters aus, d.h. der Leiter gibt die Art der räumlichen Signalausbreitung vor (gewisse Abstrahleffekte sollen hierbei außer Acht gelassen werden)“* [Schiller, 2003, S.55]

Bei physisch vorhandenen Leitungen kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass die Charakteristik des Leiters an jeder Stelle gleich ist, solange das Material der Leitung nicht unterbrochen oder beschädigt ist. Man kann also aufgrund der Materialeigenschaften und der Signalform relativ genau vorhersagen, wie sich das Signal im Leiter fortpflanzt. [Schiller, 2003, vgl. S.55f].

*„Es kann beispielsweise relativ einfach bestimmt werden, wie stark das empfangene Signal nach einer bestimmten Leiterlänge bei einer gegebenen Stärke des eingespeisten Signals ist“* [Schiller, 2003, S.55].

Im Unterschied dazu bestimmen in drahtlosen Netzen sehr viele unterschiedliche Faktoren wie Geländeform, atmosphärische Bedingungen, Gebäude usw., wie sich die Signale tatsächlich ausbreiten.

Eine Vorhersage, wie gut oder schlecht sich letztlich die Signale bei einer drahtlosen Verbindung tatsächlich ausbreiten ist praktisch unmöglich und kann, wenn nur unter theoretischen Bedingungen im Vakuum, wie im Weltall, d.h. wo sich keinerlei Materie zwischen Sender und Empfänger befindet sowie diese auch nicht umgibt, angetroffen werden. [Schiller, 2003, vgl. S.55f]

Betrachtet man nun eine ideale Situation dieser Signalausbreitung von einer Basisstation, kann die Signalübertragung in drei grobe Zonen eingeteilt werden.

- Übertragungsbereich  
Innerhalb eines gewissen Abstandes um den Sender können die Daten zu einem Empfänger erfolgreich gesendet werden, sodass die Fehlerrate relativ gering bleibt und die gesendeten Daten wiederhergestellt werden können, wodurch eine aufrechte Kommunikation zwischen Sender und Empfänger besteht.
- Erkennungsbereich  
Ein Stück weiter entfernt um den Sender, erkennt ein Empfänger im Empfangsbereich zwar noch die Signale des Senders (die gesendeten Signale heben sich vom Hintergrundrauschen

<sup>1</sup>Generell sind dabei Koaxialkabel, wie bei der DOCSIS Technik, verdrehte Kupferadern wie bei der DSL Technik, Hohlleiter oder auch Glasfaserkabel wie bei FTTH/B/P zu verstehen

<sup>2</sup>Bezeichnung in der Fachliteratur für eine Mobilfunkstation, die auch als *eNodeB* abgekürzt wird. Sie stellt die Gesamtheit eines Mobilfunkstandortes mit Station, Antennen, Zubringerleitungen und allen weiteren technischen Bauteilen, dar, die für die Aussendung von Funkübertragungen notwendig sind

ab), die Fehlerrate der Übertragung ist jedoch zu groß und eine direkte Kommunikation ist nicht möglich.

- Interferenzbereich

In einem noch größeren Abstand kann der Empfänger die Signale eines Senders zwar nicht mehr übersetzen, also Informationen daraus ableiten, jedoch kann das Signal dazu beitragen das allgemeine Hintergrundrauschen zu verstärken. Wenn dieses Rauschen im Hintergrund zu stark wird, können die gesendeten Signale vom Sender beim Empfänger nicht mehr interpretiert werden (mehr zu Interferenzen und wie diese als Parameter dargestellt werden können in Kapitel 2.8.3). [Schiller, 2003, vgl. S.56]

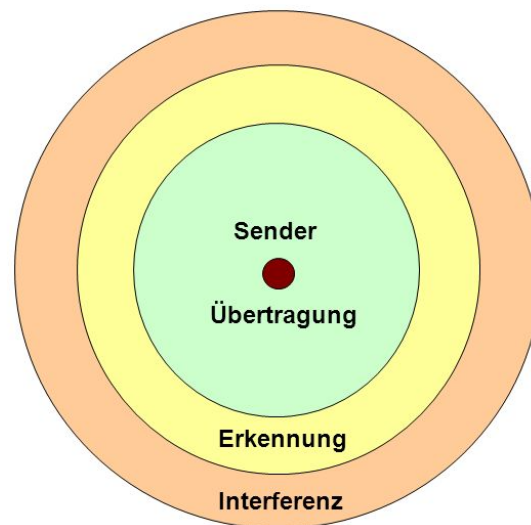


Abbildung 2.2: Schema Basisstationsübertragung  
[Schiller, 2003, S.56]

Alle drei Bereiche zusammen werden als Funkzelle bezeichnet. Diese sehen in der Realität jedoch nicht kreisförmig aus, sondern werden durch Geländeformationen wie Täler Berge sowie Hindernisse wie Häuser und Bäume abgeschwächt und führen zu unregelmäßig geformten Polygonen (genauer zu den Antennenausbreitungsradien in Kapitel 2.5). [vgl. ebd.]

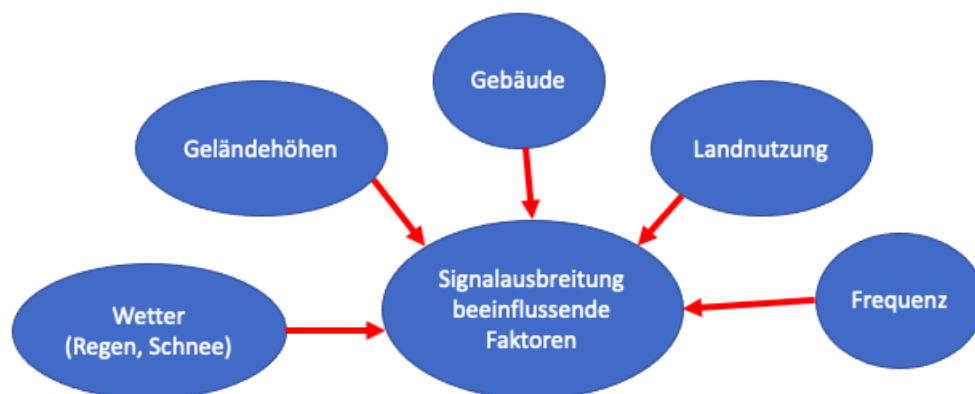


Abbildung 2.3: Signalausbreitung beeinflussende Faktoren

Welche geographischen Faktoren beeinflussen nun aber die Signalausbreitung wesentlich? Hierfür muss man sich im klaren werden, dass Mobilfunksignale, also elektromagnetische Wellen in der Realität von einer Vielzahl an Störungen abgeschwächt werden können. Diese Abschwächung der Signalstärke wird auch Pfadverlust genannt und beschreibt den Verlust der Signalstärke am Weg von Sender zum Empfänger. Warum es zu einem Pfadverlust kommt, kann diverse Gründe haben, beispielsweise Berge, Gebäude, die Landnutzung aber auch Wetterphänomene. So kommt es bei Starkregen aber auch bei Schneefall zu einer besonderen Beeinträchtigung des Signals, da Wasser elektromagnetische Wellen absorbieren. Aus diesem Grund sind Wasserflächen für Mobilfunksignale besonders hinderlich. Ebenfalls sind Inversionswetterlagen sehr abschwächend für die Ausbreitung von Mobilfunksignalen, da sich in diesen Bereichen viel Wasserdampf sammelt. Wälder sind oftmals ein Problem wenn die Belaubung im Frühjahr einsetzt. Auch die Höhe und Dichte des Bewuchs spielt eine wesentliche Rolle wie stark das Signal beeinflusst wird.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die ausgesendete Frequenz bereits einen wesentlichen Faktor darstellt wie weit ein Signal grundsätzlich kommt. Niedrige Frequenzen haben grundsätzlich größere Reichweiten als höhere Frequenzen.

### 2.2.1 Mehrwegausbreitung

Einen speziellen Einfluss bei der Mobilfunkübertragung spielt die sogenannte Mehrwegausbreitung (engl. *multipath propagation*) der ausgesendeten Wellen.

Hierbei handelt es sich um den Effekt, dass ein Signal auf mehreren Wegen mit Laufzeitunterschieden beim Empfänger eintreffen kann. Dabei können sich die unterschiedlichen Signalteile je nach Frequenz gegenseitig stören oder verstärken, was zu konstruktiven oder destruktiven Überlagerungen bis hin zur völligen Auslöschung führen kann. Für bestimmte Frequenzen ist die Topologie günstig, für andere jedoch ungünstig. Aus diesem Grund bezeichnet man den Effekt der Mehrwegausbreitung als *Frequenzselektives Fading*. [Schiller, 2003, vgl. S. 60ff]

Auch [Benkner, 2007, S.10] betont, dass „das Empfangssignal sich im Allgemeinen aus vielen Teilwellen zusammensetzt und neben einem möglichen direkten Ausbreitungspfad (*Line of Sight*, kurz: *LOS*) können weitere Teilwellen durch *Beugung*, *Streuung* oder *Reflexion* hinzukommen.“

Hierbei muss betont werden, dass die verschiedenen Teilwellen unterschiedliche Entfernungen zurücklegen, abhängig von deren Beugungs-, Streuungs- und Reflexionseigenschaften. Dadurch werden sie an ihren umgebenden Ausbreitungshindernissen unterschiedlich stark gedämpft und besitzen daher auch unterschiedliche Amplituden, Phasenlagen und Einfallsrichtungen. [Benkner, 2007, vgl. S.10]

[Benkner, 2007, S. 10] erläutert, „Mehrwegkomponenten addieren sich vektoriell an der Empfangsantenne und können sich gegenseitig verstärken (*konstruktive Interferenz*), abschwächen oder sogar ganz auslöschen (*destruktive Interferenz*).„



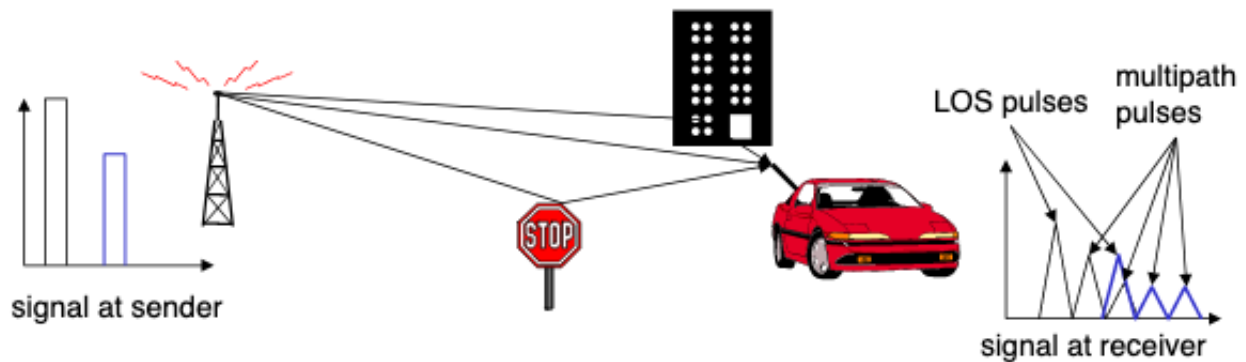


Abbildung 2.4: Mehrwegausbreitung  
[Schiller, 2003, S.61]

Da Positionsänderungen des mobilen Empfangsgerätes<sup>3</sup> in Teilen der Wellenlänge  $\lambda$  bereits zu starken Phasenänderungen führen können, ergeben sich während seiner Bewegung, Änderungen des Empfangspegels um mehrere Größenordnungen. Diesen Effekt bezeichnet man als *Fading* (engl. abschwächen), daher spricht man hier von einem Signalschwund. [Benkner, 2007, vgl. S.10]

In Abbildung 2.4 ist nun stark vereinfacht dargestellt, welchen Weg die Signale von einem Sender zu einem Empfänger zurücklegen. Hierbei gibt es Signale, die auf direktem Weg (Line of Sight, LOS) ohne Umwege zum Empfänger gelangen, Signale, die an Objekten wie Gebäuden reflektiert oder an einem Hindernis gestreut werden und erst verspätet den Empfänger erreichen. In der Realität existieren jedoch weit aus mehr Möglichkeiten, welche verschiedensten Wege von der elektromagnetischen Strahlung zurückgelegt werden können bis die Signale schließlich beim Empfänger ankommen. Viele dieser empfangenen Signale werden überhaupt zu schwach sein, um noch detektierbar zu sein und sind wenn nur als Hintergrundrauschen erkennbar. Signalanteile können auch zur Antenne des mobilen Empfängers über Umwege gelangen, z.B. aufgrund von Reflexionen an Häusern, einem Gebirge, einem Flugzeug, der Ionosphäre oder dem Erdboden. [Schiller, 2003, vgl. S.60f]

### 2.2.2 Laufzeitdispersion

Aufgrund dieser unterschiedlichen Wege welche die Signale zurücklegen, erreichen diese den Empfänger auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten, da die Geschwindigkeit von elektromagnetischen Signalen durch die Lichtgeschwindigkeit begrenzt ist. Dieser Effekt, welcher durch die unterschiedlichen Wege der Signale erzeugt wird, bezeichnet man auch als *Laufzeitdispersion* (engl. delay spread). [Schiller, 2003, vgl. S.60f]

*„Die Laufzeit eines Signals ist also kein fester Wert, sondern eine Verteilung in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Ausbreitungswegen“* [Schiller, 2003, S.60].

*„Die Wellenlänge  $\lambda$  ist mit der Frequenz  $f$  über die Lichtgeschwindigkeit  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s verknüpft ( $\lambda = c/f$ )“* [Benkner, 2007, S.9].

<sup>3</sup>wird in dieser Arbeit als Synonym für konventionelle Handys mit Sim Karten bezeichnet.

*Laufzeitdispersion* ist also ein besonders in drahtlosen Kommunikationsnetzen anzutreffendes Phänomen, da keine Leitung eine einheitliche Ausbreitungsrichtung vorgibt. Auch innerhalb von Glasfasern gibt es einen ähnlichen Effekt der Dispersion. Zu beachten gilt, dass Laufzeitdispersion nicht mit einer Bewegung von Sender oder Empfänger gleichgesetzt werden sollte. Zum Beispiel können in GSM Systemen Laufzeitunterschiede bis  $16\ \mu\text{s}$  mit einer Weglängendifferenz bis 5 km toleriert werden. Die *Laufzeitdispersion* wirkt sich nun als eine Impulsverbreiterung auf das Signal aus. Dabei wird ein kurzer Sendeimpuls in einen breiten sozusagen verschmiert. [Schiller, 2003, vgl. S.60f]

### 2.2.3 Intersymbolinterferenz

Ein weiterer Effekt geht aus Abbildung 2.4 hervor, nämlich dass auf Senderseite beide Signale deutlich voneinander getrennt erscheinen, hingegen überlappen sich die Signale auf der Empfängerseite durch die Ausbreitung der Signale nach der *Mehrwegausbreitung*.

„Je nach Codierung und Modulation könnte ein Impuls bzw. eine Folge von Impulsen ein Symbol darstellen, ein oder mehrere Symbole wiederum ein Bit. Das Signal, das für ein Symbol gedacht war, beeinflusst durch die Überlappung das zeitlich folgende Signal für das nächste Symbol.“ [Schiller, 2003]

Hierbei kommt es zum Effekt der *Intersymbolinterferenz (ISI)*. Je mehr Symbole von der Senderseite ausgesendet werden, desto stärker verschwimmen diese auf der Empfängerseite. Aus diesem Grund kommt der Effekt der *ISI* zum Tragen. Die *Intersymbolinterferenz* begrenzt somit auch die Bandbreite eines Funkkanals mit Mehrwegausbreitung. Aufgrund von *ISI* kann es zu Situationen kommen, in denen sich die nachfolgenden Symbole von ausgesendeten Signalen sich gegenseitig auslöschen wobei dies schließlich zu Übertragungsfehlern beim Empfänger führt.

Ist im Vorhinein bekannt, welche unterschiedlichen Wege das ausgesendete Signal nimmt, so können die durch die Mehrwegausbreitung verursachten Störungen kompensiert werden. Hierzu werden Trainingssequenzen vom Sender ausgesendet, sodass die Empfänger die empfangenen Signale mit diesen Trainingssequenzen vergleichen, um sogenannte *Entzerrer (Equalizer)* zu programmieren, welche die Störungen durch die Mehrwegausbreitung ausgleichen. [Benkner, 2007, vgl. S.11f]

### 2.2.4 Fading

Ein weiterer Effekt, der besonders durch die Bewegung zwischen Sender und Empfänger entsteht, ist das sogenannte *Fading (engl. abschwächen)*. Durch diese ständige Bewegung verändert sich die Charakteristik einer Übertragungskanals permanent und die Wege, die ein Signal zurücklegt, ändern sich dementsprechend. [vgl. ebd.]

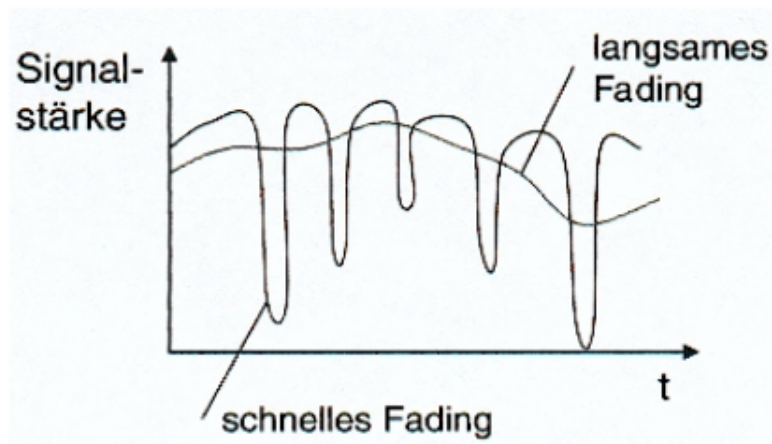


Abbildung 2.5: Fading  
[Schiller, 2003, S.62]

Beispiel dazu ist die hörbare Veränderung des Empfangs beim Autoradio während einer Autofahrt. Die Signalstärke ändert sich dabei oft sehr rasch, z.B. wenn ein längerer Tunnel durchfahren oder ein Waldstück passiert wird. Diese schnellen Änderungen des Signals werden als *short term fading* bezeichnet. Der Empfänger versucht dem Effekt entgegenzuwirken, indem er ständig versucht den Entzerrer neu zu justieren. Ändert sich das Signal allerdings sehr häufig, kann sich der Entzerrer ab einer bestimmten Frequenz nicht mehr schnell genug anpassen. In diesem Fall steigt die Fehlerrate schnell an. [Schiller, 2003, vgl. S.60ff]

Wenn nun ein Signal längerfristig schwindet, spricht man vom *long term fading*. Wenn sich der Abstand vom Sender zum Empfänger ständig ändert, sich daher vergrößert, dann wird das Signal auch immer schwächer. Um dies zu verhindern, kann die Sendeleistung dynamisch angepasst werden. Hierdurch wird erreicht, dass das Empfangssignal immer in einem bestimmten Bereich liegt und es nicht zu Empfangsstörungen kommt. [vgl. ebd.]

### 2.2.5 Freiraumdämpfung

„Im freien Raum, d.h. ohne irgendwelche Hindernisse, breiten sich elektromagnetische Wellen unabhängig von ihrer Frequenz geradlinig aus - Kurzwellen genauso wie Licht (abgesehen von auf der Erde vernachlässigbaren Gravitationseffekten) [Schiller, 2003, S.57].“

Wenn eine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger wird auch als *Line of Sight*, kurz: *LOS* bezeichnet. Selbst wenn man nun annimmt, dass sich zwischen Sender und Empfänger keinerlei Materie befindet, also sich im Vakuum aufhält, verliert ein gesendetes Signal zwischen beiden, in Abhängigkeit vom Abstand, dennoch an Leistung. Elektromagnetische Wellen breiten sich kugelförmig oder isotrop von der Sendestation aus und die Sendeleistung wird bei größeren Entfernungen auf eine größere Fläche verteilt. Diesen Effekt nennt man die sogenannte Freiraumdämpfung. [vgl. ebd.]

Die Empfangsleistung nimmt mit dem Abstand zum Sender quadratisch ab. In einer Formel ausgedrückt bedeutet dies:

$$P_r \approx P_0/r^2$$

Hierbei bedeuten die Formeltherme:

- $P$  = empfangene Leistung an einem Punkt
- $r$  = Abstand zum Sender
- $P_0$  = Sendeleistung

Berechnungen der Ausbreitungsdämpfung in geschlossener deterministischer Form ist außer in einigen Spezialfällen, wie z.B. die gerade angesprochene Freiraumausbreitung im Vakuum, nur in Ausnahmesituation überhaupt möglich. Für den praktischen Einsatz bei der Planung und Konstruktion von Mobilfunknetzen und Infrastrukturen existieren jedoch eine Vielzahl an Näherungslösungen und Modellen welche näher in Kapitel 2.3 erläutert werden. [Benkner, 2007, vgl. S.8f]

*„Auf dem Weg vom Sender zum Empfänger erfährt eine elektromagnetische Welle eine Dämpfung, die von verschiedenen Faktoren abhängig ist“* [Benkner, 2007, S.19].

Hierbei wird das Signal von vier wesentlichen Faktoren beeinflusst:

- die zu überbrückende Entfernung
- die Sendefrequenz
- die Wellenlänge
- die genaue Ausbreitungsumgebung

Auch wenn sich wie in unserem Idealfall des Vakuums angenommenen Beispiel keinerlei Materie zwischen Sender und Empfänger befindet, welche die Signalausbreitung stört, so hängt die empfangene Leistung zusätzlich noch von Faktoren ab, wie der Wellenlänge (siehe Kapitel 2.1) und der Richtungscharakteristik der Antennen (mehr dazu in Kapitel 2.5). [Schiller, 2003, vgl. S.57f]

Sobald sich jedoch Hindernisse zwischen Sender und Empfänger befinden, werden die Beeinflussungen der Signale wesentlich komplexer.

Beachtet werden muss, dass die Standardfunkübertragung durch die Atmosphäre der Erde hindurch durch Regen, Schnee, Nebel, Dunst, Smog usw. geschieht. Bei kleinen Distanzen durch die Atmosphäre spielt die Freiraumdämpfung kaum eine Rolle, jedoch verstärkt sich diese umso größer die Distanz wird. [vgl. ebd.]

*„Nicht nur Satellitenübertragung, sondern auch jede Kommunikation mit Mobilfunksystemen wird durch die Atmosphäre beeinflusst, beispielsweise durch starken Regen“* [Schiller, 2003, S. 57].

Bei starkem Regen kann es daher sein, dass Mobilfunksysteme zusammenbrechen können, weil Wasser sehr viel von der abgestrahlten Energie einer Antenne absorbieren kann und somit nicht genügend Energie zum Empfänger durchdringt. Aus diesem Grund spielt die Frequenz eine große Rolle bei der Ausbreitung von Funkwellen in der Natur. Generell kann gesagt werden, dass Signale mit niedriger Frequenz Objekte besser durchdringen als Signale mit hoher Frequenz.

So können beispielsweise sehr lange Wellen durch die ewigen Ozeane übertragen werden, während sehr kurze Wellen z.B. im EHF<sup>4</sup>-Bereich bereits an den Blättern eines Baumes blockiert werden. Umso höher die Frequenz eines Signals ist, desto mehr verhält es sich wie Licht. [vgl. ebd.]

Es gibt drei grundlegende Ausbreitungsverhalten bei Funkwellen. Diese sind abhängig von der Frequenz.

- Bodenwellen ( $< 2$  MHz):  
Da Funkwellen niedriger Frequenz der Erdoberfläche folgen, können mit diesen enorme Distanzen zurückgelegt werden. Einsatzgebiete für solche Wellen wären z.B. in U-Booten und Lang- und Mittelwellen-Radios. [vgl. ebd.]
- Raumwellen (2 - 30 MHz):  
Diese Funkwellen werden zwischen der Ionosphäre und Erdoberfläche gespiegelt und können so die gesamte Erde umwandern. Anwendung finden diese Frequenzen bei Kurzwellensendern und Amateurfunkern. [vgl. ebd.]
- Sichtverbindung ( $> 30$  MHz):  
Weitaus höhere Frequenzen nutzen Mobiltelefone, Satellitensysteme, schnurlose Telefone etc. Die hierbei gesendeten Wellen folgen alle einer mehr oder weniger geraden direkten Linie (LOS) von Antenne zu Antenne (Sender zu Empfänger). Daher ist eine direkte Kommunikation mit Satelliten ohne Reflexion an der Ionosphäre möglich, jedoch muss hierbei beachtet werden, dass die Wellen bei der terrestrischen Übertragung durch die Atmosphäre abgelenkt werden. Mobilfunksysteme verwenden Frequenzen über 100 MHz, funktionieren aber auch ohne Sichtverbindung. [vgl. ebd.]

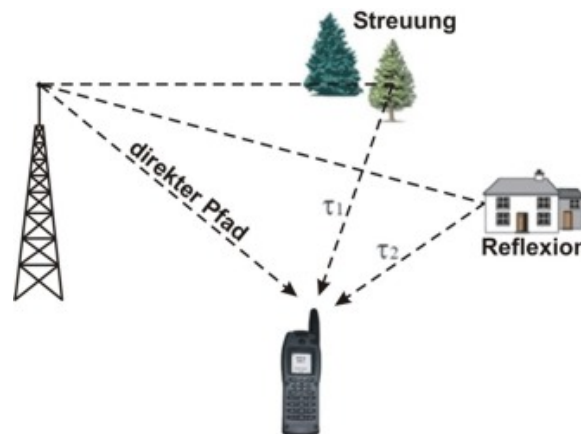


Abbildung 2.6: LOS, Streuung, Reflexion  
[Dig, 2020]

In diesem Zusammenhang ist es wichtig sich die grundlegenden Mechanismen der Reflexion, Streuung und Beugung von Wellen unter optimalen theoretischen Bedingungen, die so eigentlich nur im Weltall anzutreffen sind, zu betrachten. [Schiller, 2003, vgl. S.19ff]

<sup>4</sup>EHF steht als Abkürzung für *Extremely High Frequency*, diese sind elektromagnetische Millimeterwellen mit einer Wellenlänge von ca. 1-10 mm, was einer Frequenz von 300 - 3000 Gigahertz entspricht

**Abschattung** Die Abschattung (im Englischen auch als *Shadowing* oder *Long Term Fading* bezeichnet) beschreibt eine langsame Veränderung der Empfangsbedingungen aufgrund der sich ändernden Umgebung. Dies kommt vor, wenn der Empfänger z.B. an einem Gebäude vorbeifährt oder ein Waldstück verlässt. Die extremste Form der Dämpfung ist zweifelsohne die Abschattung eines Signals aufgrund eines Objektes. Wie bereits in 2.2.5 beschrieben verhält sich ein Signal umso eher wie Licht, wenn seine Frequenz höher ist. Deswegen kommt es bei hohen Frequenzen bereits zu Abschattungen von kleinen Objekten. Zum Beispiel können Signale durch Mauern, Fahrzeuge aber auch durch Bäume am Straßenrand gedämpft werden. [vgl. ebd. S.59f]

**Reflexion** Die Reflexion von Signalen tritt auf, sofern das Objekt an dem das Signal reflektiert wird zur Wellenlänge groß genug ist. *“Das reflektierte Signal besitzt nicht mehr die gleiche Stärke wie das Originalsignal, da ein Teil des Signals in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit absorbiert wird,”* [Benkner, 2007, vgl. S.23f]. Durch die Reflexion wandern die Signale ausgehend von der Antenne Straßenschluchten entlang, indem sie an den Gebäudewänden immer wieder reflektiert werden. Je nach dem wie oft dabei das Signal reflektiert wird, verliert dieses auch an Stärke. [vgl. ebd.]

**Refraction** Bei der Refraction geht es um die Dichte des Mediums, durch welches die elektromagnetischen Wellen sich bewegen. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  wird von elektromagnetischen Wellen nur im Vakuum erreicht. Bewegt sich jedoch eine Welle in ein dichteres Medium, so wird diese in Richtung des Mediums abgelenkt. In der Realität wird dies ersichtlich, wenn man Funkwellen betrachtet, die um die Erde geschickt werden. Diese folgen einer Sichtverbindung und werden Richtung der Erde abgelenkt, da die Dichte der Atmosphäre in Bodennähe größer, als an ihrem obersten Rand ist. [Schiller, 2003, vgl. S.58f]

**Streuung** Streuung erfolgt aufgrund von Objekten, welche dieselbe oder kleinere Wellenlänge wie das ausgesendete Signal besitzen. Es kommt zu einer Aufspaltung des Signals in mehrere schwächere Signale, die in verschiedene Richtungen weiterlaufen. [Benkner, 2007, vgl. S.27ff]

**Beugung** Radiowellen können aber auch an Objekten und dessen Kanten gebeugt werden, wodurch diese dann statt ihrer ursprüngliche Ausbreitungsrichtung, hinter einen Berg abgelenkt werden, womit sich plötzlich auch diese Empfänger erreichen lassen. [Benkner, 2007, vgl. S.30-35]

## 2.3 Pfadverlust-Prognosemodelle

Um die Ausbreitungsdämpfung von elektromagnetischen Wellen in realen Umgebungsbedingungen mit Bergen, Tälern, Häusern und der Oberflächenbeschaffenheit abzubilden, werden sogenannte Prognosemodelle angewendet, welche den Pfadverlust unter den jeweiligen Bedingungen so gut wie möglich vorhersagen können. Manche Prognosemodelle können zusätzlich mit einem digitalen Oberflächenmodell (DOM) berechnet werden, um die Landnutzungen als auch Höhenunterschiede sowie Gebäude der Landschaft abzubilden. Besonders beim Aufbau von Mobilfunknetzen, um eine optimale Anordnung von Basisstationen zu gewährleisten, ist es wichtig die Empfangsleistung  $P_E$  so exakt wie möglich vorauszuschätzen. Deshalb wurden umfangreiche Messreihen durchgeführt, um schließlich empirische (einfachste Form), deterministische (höhere Genauigkeit) als auch semi-empirische Ausbreitungsmodelle zu entwickeln. [Benkner, 2007, vgl.



S.35f]

Pfadverlust-Prognosemodelle werden im Mobilfunkmodell von Cellular Experts genutzt, um die Leistungsübertragungsbilanz einer Antenne zu modellieren. Sie nutzen die Freiraumdämpfung einer Funkverbindung, um die Reduzierung der Leistungsdichte je nach Abstand, sowie mit der Frequenz schrumpfende Wirkfläche einer Antenne, darzustellen. Je nach Einsatzzweck werden verschiedene Modelle mit Rechnergestützter Software, für die Planung von Funknetzen, eingesetzt. Die Mess- und Korrekturkurven werden im Speicher des Rechners hinterlegt und interpoliert. Durch die weitere Miteinbeziehung von Geländedaten kann eine genaue Vorhersage zur Ausbreitungsdämpfung eines Gebietes getroffen werden.

Modell	Anwendung	Vergleich	Eignung
Lee	30 MHz - 2 GHz 2 Km - 30 Km	sehr einfaches Modell für grobe Abschätzungen	schlecht
Okumura	150 MHz - 2 GHz 1 Km - 100 Km	wird als Grundlage für andere Modelle verwendet	mittel
COST 231	900 MHz, 1800 MHz	dicht besiedelte Gebiete, keine Parameter in Ruralen Umgebungen	schlecht
Hata	150 MHz - 1500 MHz 1 - 20 Km	sehr einfaches Modell, quasi ebenes Gelände	mittel
Hata 9999	800 MHz - 3000 MHz bis 100 Km	rurale bis dicht besiedelte Gebiete, variabel einstellbare Parameter	gut

Abbildung 2.7: Prognosemodelle  
Eigendarstellung

Historisch wurden verschiedenste solcher Modelle erzeugt um gewisse Gegebenheiten der Natur abzubilden und mit mathematischen Gleichungen Standardparameter für bestimmte Umgebungen bereitzustellen. Je nach Einsatzzweck werden andere Modelle verwendet. Folgend sollen mehrere solche Vorhersagemodelle, welche für unterschiedliche Zwecke erzeugt wurden, vorgestellt.

**Vorhersagemodell nach Lee** Eines dieser empirischen Ausbreitungsmodelle ist das sogenannte *Lee-Modell*, das ein sehr einfaches Modell darstellt, weshalb es nur eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Empfangsleistung bietet. Dieses Modell wurde durch Pfadverlustmessreihen unter Sendefrequenzen um 900 MHz in den USA entwickelt. [vgl. ebd. S.35f]

In Abbildung 2.8 ist zu sehen, welche Gebiete in den USA, mit welchem Pfadverlust gemessen wurden. Auf der Y-Achse ist die Empfangsleistung  $P_E$  in dBm [...] *“als Funktion der Entfernung  $d$  zum Sender in verschiedenen Ausbreitungsbedingungen,* [Benkner, 2007, S.37] [...] zu sehen. Hierbei ist klar erkennbar, dass die Freiraum-Ausbreitung die besten Empfangsbedingungen über große Distanzen besitzt. Auch ländliche Gebiete weisen gute Empfangsbedingungen im Nahbereich einer Basisstation auf, jedoch fällt diese mit zunehmender Entfernung stärker ab. Große Städte wie Newark, Philadelphia und Tokyo besitzen jedoch aufgrund ihrer Gebäude und vielen Hindernisse, keine optimalen Empfangsbedingungen, wodurch das Signal dort schwächer wird und besonders ab größeren Abständen, von mehr als 5 Kilometer zur Basisstation, zu

praktisch keinem Empfang führen. Um gebirges Gelände besser zu berücksichtigen, wird im Modell nach Lee, die tatsächliche Höhe der Basisstationsantenne mit der effektiven Höhe, zum mobilen Empfänger, ersetzt. Dies hat den Vorteil, dass Signale von der Basisstation, am nächsten Reflexionspunkt zum mobilen Empfänger verlängert werden. [vgl. ebd. S.37f]

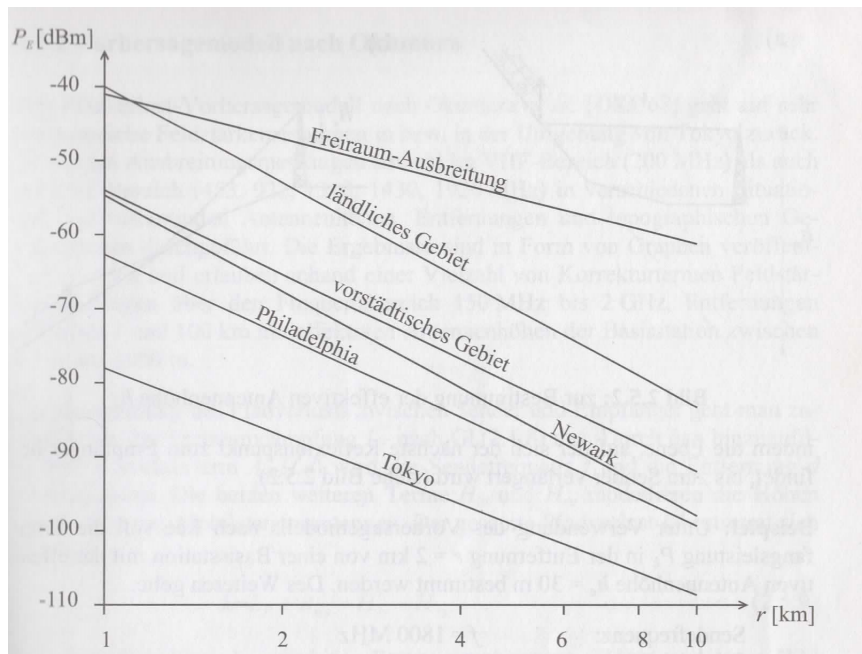


Abbildung 2.8: Pfadverlust Lee  
[Benkner, 2007, S.37]

**Vorhersagemodell nach Okumura** Das Vorhersagemodell nach Okumura wurde durch umfangreiche Feldstärkemessungen, in der Umgebung von Tokyo, erstellt. Durch die Ergebnisse der Messreihen, können Feldstärkevorhersagen für den Frequenzbereich von 150 MHz bis 2 GHz sowie für Entfernungen zwischen 1 und 100 Kilometer getroffen werden. Das Okumura Modell, kann den Grad der Unebenheit des Geländes bis zu einer Entfernung von 10 Kilometer berücksichtigen. Ebenso können hohe Berge im Modell durch ihre relative Höhe im mittleren Niveau berücksichtigt werden. [Benkner, 2007, vgl. S.39ff]

**Vorhersagemodell nach Hata** Das Hata Modell ist ein einfaches Funkwellenausbreitungsmodell, um den Pfadverlust von Mobilfunkwellen in der Natur vorherzusagen. Dieses bietet durch seine Einfachheit, Vorteile gegenüber dem Okumura Modell, da es den Median des Pfadverlustes berechnet. Die graphischen Ergebnisse von Okumura wurden durch Hata extrapoliert, wodurch einfacherer mathematische Gleichungen für die Vorhersage entstanden sind. Das Hata Modell kann jedoch nur auf quasi-ebenem Gelände und nur für Frequenzen von 150 – 1500 MHz verwendet werden. Außerdem bezieht es das Okumura Modell mit ein und erweitert dieses um die Effekte, welche bei Reflexion, Streuung und Beugung von Geländeformationen sowie städtischen Hindernissen erzeugt werden. [Benkner, 2007, vgl. S.43ff]

Durch unterschiedliche Umgebungen können sich hierbei unterschiedliche Bedingungen ergeben, welchen Einfluss auf die Ausbreitung der Funkwellen haben, wie z.B. Bäume, Häuser, Berge, aber auch die Landnutzung spielt eine Rolle, da z.B. Gewässer eine negative Reflektion, für Funkwellen aufweisen. Das Hata Modell basiert grundsätzlich auf dem Okumura Modell



und wird deshalb oft als Okumura-Hata Modell bezeichnet. Das Okumura Modell unterstützt Frequenzen bis 1920 MHz, während das Hata Modell nur Frequenzen bis 1500 MHz unterstützt. Wird das Hata Modell mit Frequenzen oberhalb von 1500 MHz verwendet, so kommt es in den Simulationen zu beträchtlichen Verfälschungen mit zu niedrigen Vorhersagewerten. [Benkner, 2007, vgl. S.43f]

**Vorhersagemodell nach COST 231** Damit das Hata Modell auch mit Frequenzen größer als 1500 MHz verwendet werden kann, wurde ein europäisches Forschungsprojekt namens *COST 231 evolution of land mobile radio* durchgeführt. Diese Modell basiert auf dem Hata Modell mit dem Unterschied, dass es für Frequenzen zwischen 1500 MHz bis 2000 MHz sowie mit Basisstationsantennenhöhen bis maximal 30 Meter limitiert ist. Das COST 231 Hata Modell sollte nicht im städtischen Bereich angewendet werden, da das Modell keine Lösungen, für die Ablenkung der Signale in Straßenschluchten sowie Kanten durch Gebäudedächer, bereitstellt. [Benkner, 2007, vgl. S.44f]

**Vorhersagemodell nach Ikegami** Die Vorhersagemodell nach Lee, Okumura, Hata sowie COST 231 sind alle empirische Modelle, die auf interpolierten Messdaten basieren, also Modelle welche unter kontrollierten Bedingungen im Labor oder in Feldforschungen objektiv und wiederholbar, durchgeführt wurden. Um jedoch auch die Ausbreitungsbedingungen von dicht besiedelten städtischen Gebiete besser zu simulieren, musste ein präziseres Vorhersagemodell, das auf einem analytischen Ansatz basiert, gefunden werden. Das sogenannte *Vorhersagemodell nach Ikegami* ist spezialisiert darauf Straßenschluchten sowie jegliche Ablenkung und Streuung von Signalen durch Gebäude und Hindernisse, abzubilden.

Durch die Untersuchungen von Ikegami, wurde klar, dass ein mobile Empfänger in einer Straßenschlucht, aufgrund von zahlreichen Kanten und Reflexions- sowie -Streuungsmöglichkeiten, viele Signalwellen aus unterschiedlichen Richtungen empfangen werden, jedoch nur wenige dieser dominieren das Signal. Man entschloss sich zu einem Zweistrahlmmodell, das sich aus einem direkten, gebeugten und einfachem-reflektierten Strahl zusammensetzt. Das Ikegami Modell wird jedoch heutzutage nicht für Pfadverlustbestimmungen mehr eingesetzt. [vgl. ebd. S.45ff]

Es hat sich für Signalstärke und Pfadverlustbestimmungen ein erweitertes Modell gefunden, das im nächsten Kapitel im Detail vorgestellt wird.

**Vorhersagemodell nach Hata9999** Es gab viele Überlegungen, wie man das Okumura-Hata und COST 231-Hata Modell verbessern könnte. Hierbei wurde von der Firma Ericsson das Hata9999 Modell entwickelt, welches zusätzlich die Umgebungseinflüsse der Natur in Form von Stördaten (Clutter) berücksichtigt. [Sami A, 2013, vgl.]

Der Pfadverlust in dB wird definiert als:

$$L_H = a_0 + a_1 * \log(d) + a_2 * \log(h_B) + a_3 * \log(h_B) * \log(d) + 3.2 * (\log(11.75 * h_M))^2 + g(f)$$

$$g(f) = 44.49 * \log(f) + 4.78 * (\log(f))^2$$

[Sliuzevicius, 2018]

- $a_0$  = Konstanter Abstand in dB. Dieser Wert wird dem Verlustraster hinzugefügt. Er verändert auch das absolute Level der Pfadverlustkurve.
- $a_1$  = Distanz Koeffizient. Dieser repräsentiert den Einfluss durch die Atmosphäre wie Sand oder andere Partikel, welcher sich auf die Strahlenausbreitung auswirkt.
- $a_2$  = Effektive Antennen Höhengewinn. Dieser berücksichtigt die Krümmung der Erde und Fehler in den Höhen des DGM.
- $a_3$  = definiert die Neigung der Pfadverlustkurve für verschiedene Antennenhöhen. [Sliuzevicius, 2018, vgl.]

Die empirischen Parameter  $a_0 - a_3$  können auf den gemessenen Pfadverlust der DriveTest Daten rückschließen. Hierbei verändern DriveTest Messungen die Lage und Neigung der Pfadverlustkurven im Hata9999 Vorhersagemodell. Folgend sind die Vorgaben von Cellular Experts bzgl. der zu verwendenden Koeffizienten um das Hata9999 Modell auf die Umgebungseinflüsse der Höhen sowie Landnutzung zu kalibrieren. [Sami A, 2013, vgl.]

Das Hata9999 Modell von Ericsson gibt die Standardkoeffizienten mit folgenden Werten an:  $a_0 = 36.2$ ,  $a_1 = 30.2$ ,  $a_2 = 12.0$ ,  $a_3 = 0.5$ .

Es wird in den Analysen mit Cellular Experts in folgendem Kapitel ausschließlich verwendet, da das Hata9999 die besonderen Einflüsse von Mobilfunkstrahlen im städtischen Bereich durch Beugung, Streuung, Reflektion und Abschattung abbilden kann. Außerdem liefert es die notwendigen Pfadverlustkorrekturen durch variabel messbare DriveTestdaten für urbane, suburbane sowie rurale Gebiete. [Sliuzevicius, 2018]

Die hier vorgestellten Koeffizienten, wurden im Zuge der DriveTest Messungen im Gelände aufgezeichnet und kalibrieren im Nachhinein die Koeffizienten  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  sowie  $a_3$  des Hata9999 Modells auf die Umgebungseinflüsse der Natur, wie die Höhe sowie die unterschiedlichsten Landnutzungen und Geländecharakteristika. Die Hata9999 Koeffizienten dienen außerdem dazu, den Unterschied zwischen einem kalibrierten und nicht kalibrierten Modell und der daraus resultierenden Mobilfunkanalyse, darzustellen. In dieser Masterarbeit sollen mithilfe von geographischen Parametern wie Höhen und Landnutzung das Hata9999 Vorhersagemodell verbessert werden.

## 2.4 Basisstation und Mobilstation

Die Grundlage von Mobilfunknetzen und folglich von kabelloser Kommunikation bilden die sogenannten Basisstationen. Sie bilden somit die infrastrukturelle Grundlage von Mobilfunknetzen und versorgen ein gewisses Gebiet mittels Antennen, die einen begrenzten Bereich die sogenannte Zelle, drahtlos mit Signalen versorgen. „Typische Zellradien sind 20 Meter innerhalb von Gebäuden, mehrere 100 Meter in Städten bis hin zu 50 Kilometern in ländlichen Regionen“ [Schiller, 2003, S.88].

Bei Verwendung von LTE Antennen an einer Basisstation bezeichnet man diese auch als *evolved NodeB* oder kurz *eNodeB*. [Rose, 2014, vgl. S.21]

Diese sogenannten Zellen haben also eine Räumliche Ausdehnung, jedoch darf man hierbei nicht an exakt abgegrenzte symmetrische Formen wie Kreis oder Sechseck denken, sondern vielmehr an je nach Geländeform, Bebauung oder aktuelle Wetterbedingungen, ändernde Zellengröße und Form. Auch kann die Anzahl der aktiv gleichzeitig in einer Zelle eingeloggten Nutzer die Daten übertragen, die Zelle mehr oder weniger belasten und zu Änderungen der Zellenform führen. Alle bekannten Mobilfunksysteme nutzen sogenanntes Raummultiplex<sup>5</sup>, welches eine Erhöhung der Gesamtkapazität bewirkt [Schiller, 2003, vgl, S.88].

Aufgrund dieser begrenzten Zellgrößen kommt es nun zu dem Umstand, dass für eine flächige Versorgung mit unterbrechungsfreien Zonen viele tausende Basisstationen notwendig sind. Könnten nicht wenige leistungsstarker Sender wie bei Rundfunkstationen wesentlich einfacher für die Umsetzung sein? Warum zellenbasierte Systeme sich letztlich im Mobilfunk durchgesetzt haben, soll nun detaillierter erläutert werden.

[Schiller, 2003, S.88] führt aus, dass *„der Einsatz von Raummultiplex eine Mehrfachverwendung von Frequenzen erlaubt. Sobald ein Sender weit genug von einem anderen entfernt ist, d.h. außerhalb der Störreichweite, kann er die gleichen Frequenzen benutzen“*

In zellulären Mobilfunksystemen ist es üblich, dass einem Nutzer eine bestimmte Sendefrequenz für einen definierten Zeitraum zugewiesen wird, die folglich für andere Nutzer jedoch dann blockiert ist. Da die Frequenzbereiche eine limitierte Ressource sind, ist somit auch die Anzahl der gleichzeitigen Nutzer innerhalb einer Zelle beschränkt. Somit verringern sehr große Zellen die Anzahl der gleichzeitig in einer Zelle eingeloggten Nutzer pro km<sup>2</sup>. Aus diesem Grund werden in dichteren städtischen Gebieten eher kleine Zellen und im ländlichen Raum verstärkt größere Zellen eingesetzt. [vgl. ebd.]

*„Mobilfunk unterscheidet sich wesentlich von Rundfunksystemen wie Fernseher und Radio (Broadcast), da Mobilfunk einen Rückkanal für die Übertragung vom Mobilgerät zur Basisstation besitzt und außerdem spezielle Inhalte an einzelne Mobilgeräte übertragen werden (Unicast)“* [Rose, 2014, S.7].

Als Folge davon werden Mobilfunknetze in kleine Bereiche, sogenannte Zellen, unterteilt, um die Aussendung von Unicasts, also speziellen Inhalten, räumlich zu begrenzen. Hierbei sind an der Basisstation meist am oberen Ende des Mastes an einem Antennenträger die eigentlichen Antennen, welche die jeweiligen Funkzellen versorgen, angebracht. [vgl. ebd.]

Allgemein wird im Mobilfunk ein Bereich in dem eine Verbindung zur Basisstation möglich ist, als versorgt bezeichnet. Bei der Bewegung eines Nutzers aus einer Zelle in die nächste, wird die Verbindung durch das Mobilfunknetz unterbrechungsfrei an die entsprechende Basisstation der neuen Funkzelle weitergeleitet, ein sogenannter Handover ist vollzogen worden. [vgl. ebd.]

---

<sup>5</sup>Ist eine Methoden, zur Signal- und Nachrichtenübertragung, bei der mehrere Signale zusammengefasst (gebündelt) und simultan über ein Medium (Leitung, Kabel oder Funkstrecke) übertragen werden.

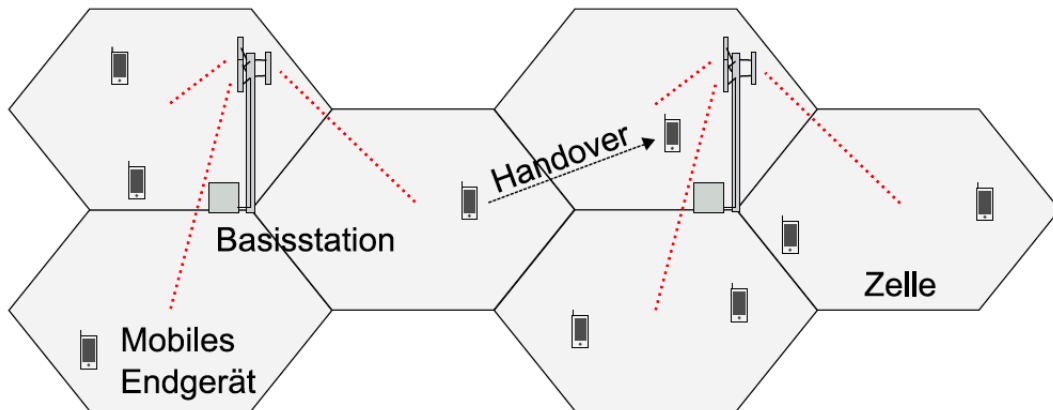


Abbildung 2.9: Mobilfunkzellen  
[Rose, 2014, S.7]

„Signale von benachbarten Funkzellen, die im gleichen Frequenzbereich senden, überlagern sich und stören so den Empfang des Signals der versorgenden Zelle“ [Rose, 2014, S.7]. Dies wird als Interferenz bezeichnet und ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die Definition der Versorgung.

„Ein Gebiet gilt als versorgt, wenn die von der versorgenden Zelle empfangene Leistung  $P_S$  am Empfänger oberhalb der minimal erkennbaren Signalleistung des Mobilteils  $P_{E,min}$  liegt“ [Rose, 2014, S.8].

$$P_S > P_{E,min}$$

$P_{E,min}$  kann somit auch als Empfängerempfindlichkeit interpretiert werden. Damit das empfangene Signal überhaupt decodiert werden kann, muss die empfangene Leistung der versorgenden Zelle um einen gewissen Wert größer als die Leistung der Interferenz  $P_I$  sein [Rose, 2014, vgl. S.8].

$$\frac{P_S}{P_I} > SIR_{min}$$

Für die vorher angesprochene Decodierung des Signals einer Basisstation gibt es einen weiteren Kennwert, der die beiden Leistungen  $P_S$  und  $P_I$  im minimalen Verhältnis zueinander betrachtet und als *Signal-to-Interference Ratio* kurz  $SIR_{min}$  bezeichnet wird.

Dieses Verhältnis wird üblicherweise im logarithmischen Maßstab in der Einheit Dezibel [dB] angegeben, da sich hier die empfangene Leistung beiderseits sowohl der versorgenden Zelle als auch der Interferenz über einen sehr großen Wertebereich erstrecken kann [Rose, 2014, vgl. ebd].

Der Mobilfunkstandard LTE (siehe 2.13) kann das Empfangssignal nur bis zu dem Grenzwert [-6,5 dB] von  $SIR_{min}$  decodieren [Rose, 2014, vgl. S.8]

Zelluläre Mobilfunksysteme bestehen aus einer Vielzahl von Systemparametern, die bei ihrer Planung berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 2.10 zeigt schematisch eine Funkzelle und das Zusammenspiel zwischen Basisstation und Mobilstation. [Rose, 2014, vgl. S.9]

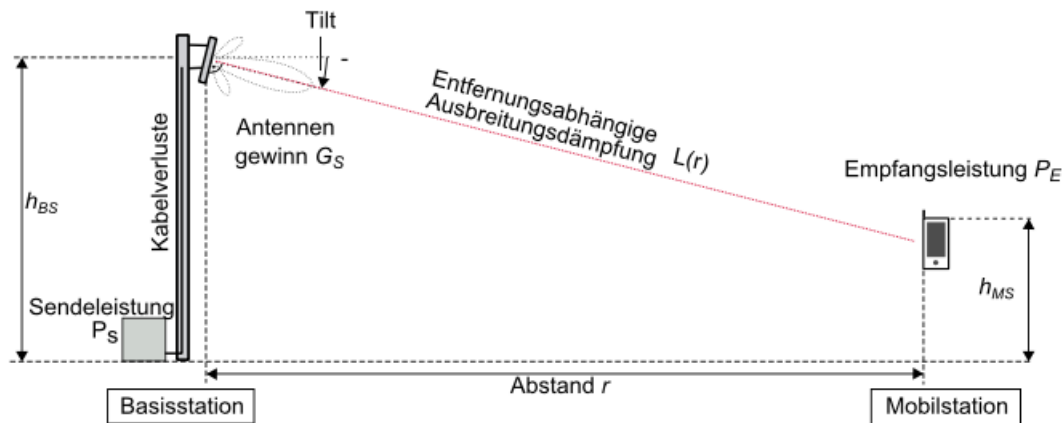


Abbildung 2.10: Line of Sight  
[Rose, 2014, S.9]

Betrachtet man nun genauer die Abläufe einer Mobilfunkzelle so wird klar, dass Informationen sowohl vom Sender (Basisstation) als auch vom mobilen Empfangsgerät (Empfänger) gesendet werden. Es gibt daher zwei Übertragungsrichtungen, den Downlink von Basisstation zu mobilem Empfangsgerät und den Uplink von mobilem Empfangsgerät zur Basisstation. Wird ein Mobilfunknetz geplant, muss die maximal unterstützte Entfernung von Basisstation und mobilem Empfangsgerät berechnet werden, um eine störungsfreie Kommunikation zu gewährleisten. [Olaf, 2021, vgl.]

In Abbildung 2.10 ist schematisch eine Basisstation mit einer gerichteten Antenne und einem mobilem Empfangsgerät in relativer Entfernung zu sehen. Der Abstand zwischen Basisstation und mobilem Empfangsgerät wird als  $r$  definiert. Dieser Abstand beeinflusst die Stärke des Signals, das bei einem mobilem Empfangsgerät ankommt durch die *entfernungsabhängige Ausbreitungsdämpfung*  $L(r)$ , die mit ansteigender Entfernung zunimmt und das Signal schwächer werden lässt. Weiteres ist in Abbildung 2.10 zu sehen, dass die Antenne in einem gewissen Winkel an der Basisstation installiert ist. Dieser auch als *Tilt* beschriebene Winkel, ist die vertikale Hauptstrahlrichtung einer gerichteten Antenne. Bei Veränderung des *Tilt* kann die Entfernung des abgedeckten Bereiches<sup>6</sup> als auch die Intensität von Bereichen, die mehr Sendeleistung erfahren, auch als Hotspots bezeichnet, beeinflusst werden. So kann es notwendig sein, dass bei erhöhten Verkehrsaufkommen der Nutzer in einer Zelle aufgrund von Großveranstaltungen oder während der Stoßzeiten auf Autobahnen, die Neigung einer Antenne auf das Gebiet maximaler Auslastung gerichtet werden muss, um dem Bedarf des erhöhten Datenaufkommens gerecht zu werden. Die Basisstation sendet ihre Daten mit einer bestimmten Sendeleistung  $P_S$  aus. Es muss hier auch bedacht werden, dass die Stärke der Sendeleistung einer Antenne, von den Kabelverlusten zwischen dem sich am Boden befindlichen Geräteschrank, sowie der Zubringerleitung abgeschwächt wird. Obwohl heutzutage diese Zubringerleitungen aus den übergeordneten Backbonenetzen aus ultra schnellen Lichtwellenleitern bestehen, kann es auch vorkommen, dass Stationen nur mit ummantelten Kupferkabeln<sup>7</sup> verbunden sind. Diese hätten dann eine limitierte Bandbreite zur Verfügung und dementsprechend schwächeres Signal anzubieten. Aber auch der Geräte-

<sup>6</sup>Dies wird auch als *Coverage* bezeichnet

<sup>7</sup>Koaxialkabel sind zweipolige Kabel mit konzentrischem Aufbau, die aus einem Innenleiter und einem abschirmenden Außenleiter bestehen. Aufgrund dieses Mantels ergeben sich Geschwindigkeitsvorteile im Vergleich zu Kupferkabeln wie DSL.

schränk muss mit einer Leitung zur Antenne verbunden sein. Die Geschwindigkeit und Qualität dieser Leitung bestimmt ebenfalls letztlich die Stärke des ausgesendeten Signals. [Olaf, 2021, vgl.]

Weiteres ist für die Beschreibung einer Mobilfunkantenne, der sogenannte *Azimut*, auch als horizontale Ausrichtung bezeichnet, ausschlaggebend. Sie wird im Mobilfunk als Richtdiagramm in Abhängigkeit des Öffnungswinkels und des Antennengewinns  $G_S$  in der Horizontalen dargestellt. Der *Azimut* gibt an, welcher Bereich in der Horizontalen abgedeckt werden kann. Das Gegenteil des *Azimut* wäre die *Elevation* oder auch Öffnungswinkel in der Höhe. Detaillierter wird in Kapitel 2.5 auf den *Azimut* sowie die *Elevation* eingegangen. [vgl. ebd]

Eine der wichtigsten Faktoren bei der Ausbreitung von Mobilfunkwellen stellt die Höhe der Basisstationsantenne (hier als  $h_{BS}$ ) dar. Diese stellt die direkte Sichtverbindung zu den Empfangspunkten im Versorgungsgebiet her. *“Ein hoher Antennenstandort ist potenziell von mehr Teilnehmern direkt zu sehen (Line of Sight, LOS) und bietet daher bessere Bedingungen für die Wellenausbreitung,”* [Rose, 2014, S.10]. Auch für mobile Empfangsgeräte gilt dieses Faktum der Antennenhöhe, jedoch liegt diese meistens doch auf Höhe des menschlichen Oberkörpers und erreicht daher im Mittel eine Höhe von  $h_{MS}$  1,00 bis 1,5 Meter. [vgl. ebd]

## 2.5 Antennen und Sektoren

Die im Mobilfunk zum Einsatz kommenden Antennen, besitzen häufig eine starke Richtwirkung. Dies wird durch eine spezielle Anordnung von Dipolantennen, die vor einem Reflektor installiert sind, erzielt. Dabei entsteht eine Richtwirkung, welche die Stärke der empfangenen und gesendeten Leistung in einer bestimmten gebündelten Richtung widerspiegelt.



Abbildung 2.11: Mobilfunkantenne  
[Bundesamt für Landestopografie, 2018]



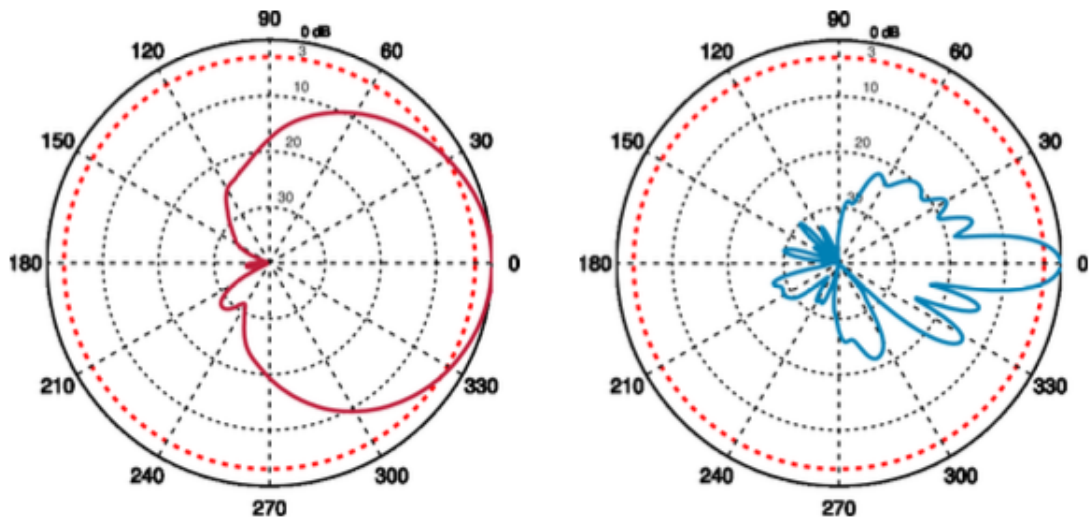


Abbildung 2.12: Richtcharakteristik  
[Rose, 2014, S.10]

„Der Öffnungswinkel der Antenne wird durch die 3dB-Grenzen beschrieben, also dem Winkel, bei dem die in Hauptstrahlrichtung abgestrahlte Leistung auf die Hälfte des Maximums abgefallen ist“ [Rose, 2014, S.10].

In Abbildung 2.12 ist ein typisches Antennendiagramm zu sehen. Es hat einen 65 Grad Horizontalwinkel und einen 10 Grad Vertikalwinkel.

Antennen werden gerichtet, um den Bereich einer Funkzelle zu begrenzen und gleichzeitig die Empfangsleistung innerhalb dieses Bereiches zu erhöhen. Gleichzeitig sollen aber auch die Störungen für andere Funkzellen reduziert werden. Oft werden 65 Grad Horizontalwinkel benutzt, damit 3 Sektoren um eine Basisstation herum erzeugt werden. [Rose, 2014, S.10]

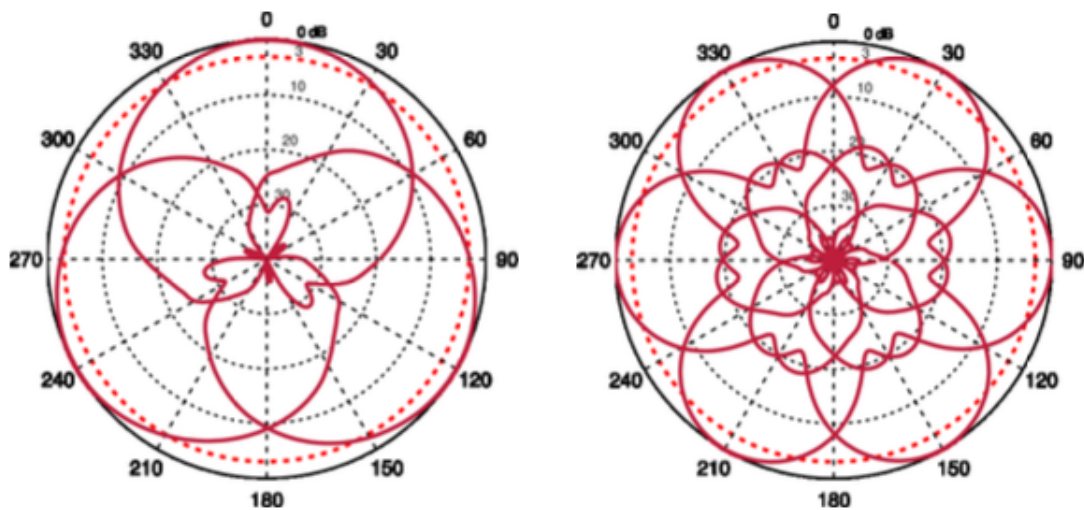


Abbildung 2.13: Sektorisierung  
[Rose, 2014, S.11]

Daher spricht man bei der Verwendung von mehreren Richtantennen an ein und derselben Basisstation von einer Sektorisierung. Hierbei sind die Sektoren also die Azimut-Winkel der Richtantennen so ausgerichtet, dass jede Antenne einen Sektor bestrahlt und sich mit den anderen Sektoren nur begrenzt überlappt. Die Sektorisierung hat den Vorteil, dass das Funkfeld gezielter gestaltet werden kann, als wenn eine omni-direktionale<sup>8</sup> Antenne verwendet würde. Hinzukommt, dass die Aufteilung in mehrere Zellen eine günstige Möglichkeit darstellt die Anzahl der Zelle und somit die Gesamtkapazität eines Netzes zu erhöhen ohne zusätzliche Standorte zu errichten.

*„Die horizontale Ausrichtung einer Antenne wird durch den Azimut-Winkel beschrieben, der ausgehend von Norden (0 Grad) im Uhrzeigersinn angegeben wird“* [Rose, 2014, S.11]

Änderungen des Azimuts haben genauso wie beim Tilt einen direkten Einfluss auf die Versorgung und Ausprägung der Zellüberlappung sowie Interferenzen zur Folge. [Rose, 2014, vgl. S.11f]

Die eine Mobilfunkantenne abstrahlende Sendeleistung wird als  $P_S$  bezeichnet und besitzt die Einheit Dezibel Milliwatt die in [dBm] abgekürzt wird. Übliche Werte die eine LTE Basisstation am Antenneneingang aufweisen, können zwischen 40 bis 46 dBm liegen. Wenn die Sendeleistung reduziert wird, kann eine Zellüberlappung als auch Interferenz reduziert werden. Bei einer 5 MHz Bandbreite der Basisstation kann von einer Sendeleistung von rund 43 dBm sowie bei einer Bandbreite von 10 MHz von 46 dBm ausgegangen werden.

## 2.6 Multiplex Verfahren

Multiplex steht generell für die Mehrfachnutzung eines Mediums z.B. in der drahtlosen Kommunikation.

*„Multiplex Verfahren beschreiben, wie verschiedene Nutzer ein gemeinsames Medium mit möglichst wenig gegenseitiger Beeinflussung nutzen können“* [Schiller, 2003, S. 63].

Multiplexverfahren können wiederum in vier verschiedene Kategorien entsprechend der Dimensionen Raum, Zeit, Frequenz und Code eingeteilt werden. Dementsprechend unterscheidet man zwischen:

- Raummultiplex
- Zeitmultiplex
- Frequenzmultiplex
- Codemultiplex

### 2.6.1 Frequenzmultiplex

Als *Frequency Division Multiplex* (FDM) versteht man eine Funktechnik wodurch ein breites Frequenzband in mehrere schmalere Frequenzbänder unterteilt wird. „Jedes dieser Frequenzbän-

---

<sup>8</sup>Sind Antennen, die elektromagnetische Wellen kugelförmig in alle Richtungen abstrahlen.



der entspricht einem eigenen Übertragungskanal“ [Lipinski, 2016a].

Dieses Aufteilen der Übertragungskanäle zu unterschiedlichen Frequenzen wird in der Fachliteratur auch als *single channel per carrier (SCPC)* bezeichnet.

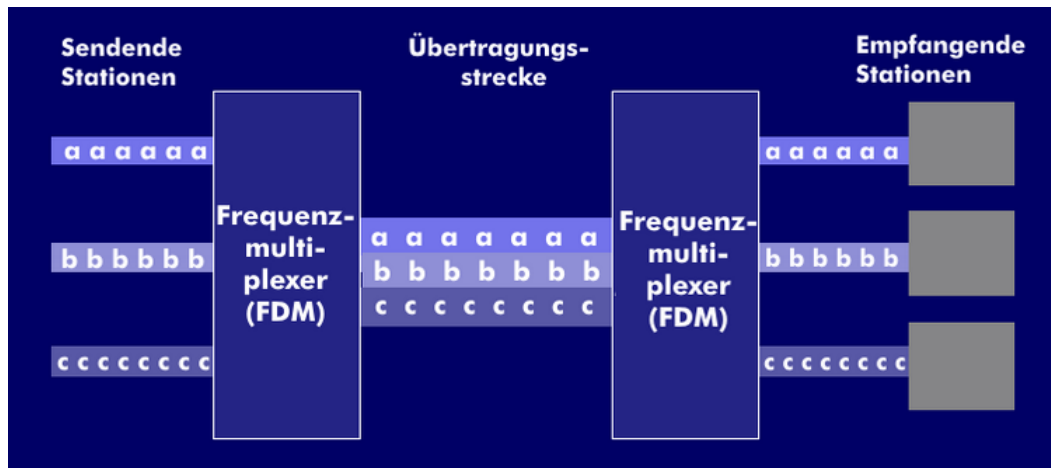


Abbildung 2.14: Frequency Division Multiplex (FDM)  
[Lipinski, 2016a]

Durch diese Technik der Kombination von mehreren unabhängigen Trägerfrequenzen können beim Frequenzmultiplex gleichzeitig mehrere modulierte Frequenzen über den Übertragungskanal gesendet werden. Dabei kann die Bandbreite der Kanäle sich durchaus voneinander unterscheiden.

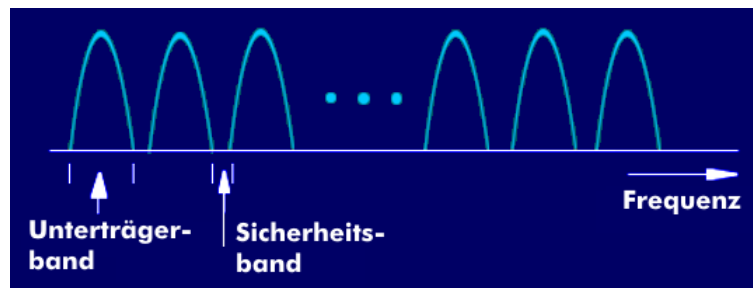


Abbildung 2.15: FDM - Unterträger  
[Lipinski, 2016a]

„Um ein Überlappen der einzelnen Unterträgerbänder und eine gegenseitige Beeinträchtigung zu vermeiden, wird zwischen die benachbarten Trägerfrequenzen ein Sicherheits-Frequenzband gelegt“ [Lipinski, 2016a].

Daher sollten die Übertragungskanäle einen gewissen Mindestabstand zueinander aufweisen, um ein mögliches gegenseitiges Überlappen der Kanäle, das durch den Modulationsprozess entstehen kann, zu verhindern. Ursprünglich wurde Frequenzmultiplex für die Übertragung von analogen Signalen wie z.B. von Fernsehern oder Sprache verwendet. In frühen Zeiten der Telekommunikation wurde es auch auf Kupferkabeln für Telefongespräche eingesetzt. Jedoch wurde ab den 60er Jahren aufgrund von steigenden Bandbreitenbedarf verstärkt Zeitmultiplex eingesetzt. [Benkner, 2007, vgl. S.315]

### 2.6.1.1 Frequency Division Duplex

Eine Variante der Frequenzmultiplex Verfahren stellt das sogenannte *Frequency Division Duplex* (FDD) dar. Dieses trennt die Funkkanäle von Uplink und Downlink zwischen Empfangs- und Basistation auf zwei verschiedene Trägerfrequenzen.

FDD kommt besonders bei Anwendungen wie GSM, UMTS, Long Reach Internet (LRE) sowie WiMAX zum Einsatz, die eine symmetrische Bandbreite im Uplink und Downlink benötigen. Durch ähnliche Übertragungsbreiten der Kanäle eignet sich FDD besonders gut für Sprachanwendungen. Hingegen ist die Verwendung von FDD bei Internet Anwendungen, die einen asymmetrischen, Verkehr aufweisen, nicht besonders effizient, da die Übertragungskapazitäten im Uplink ungenutzt bleiben. [Lipinski, 2016a, vgl.]

### 2.6.1.2 Orthogonal Frequency Division Multiplex

OFDM ist ein Vielfachträgerverfahren, das den Datenstrom innerhalb eines breiten Frequenzbandes auf viele schmale Träger (Subbänder) aufteilt. Hierbei wird der serielle Datenstrom in mehrere parallele Datenströme aufgeteilt. OFDM stellt eine sehr Bandbreiten effiziente Variante der Frequenzmultiplexverfahren dar. [Lipinski, 2016a, vgl.]

## 2.6.2 Zeitmultiplex

Zeitmultiplex, in der Fachliteratur auch als *Time Division Multiplexing* (TDM) bezeichnet, ist ein sehr flexibles Multiplexverfahren, das in digitalen Mobilfunksystemen eingesetzt wird.

„Bei diesem Verfahren kann ein Kanal  $k_i$  den gesamten Frequenzbereich für sich alleine beanspruchen“ [Schiller, 2003, S. 66f]. Daher kann hier die gesamte verfügbare Bandbreite auf einem Trägersignal zeitlich zwischen den Teilnehmern aufgeteilt werden. [Benkner, 2007, vgl. S.320f]

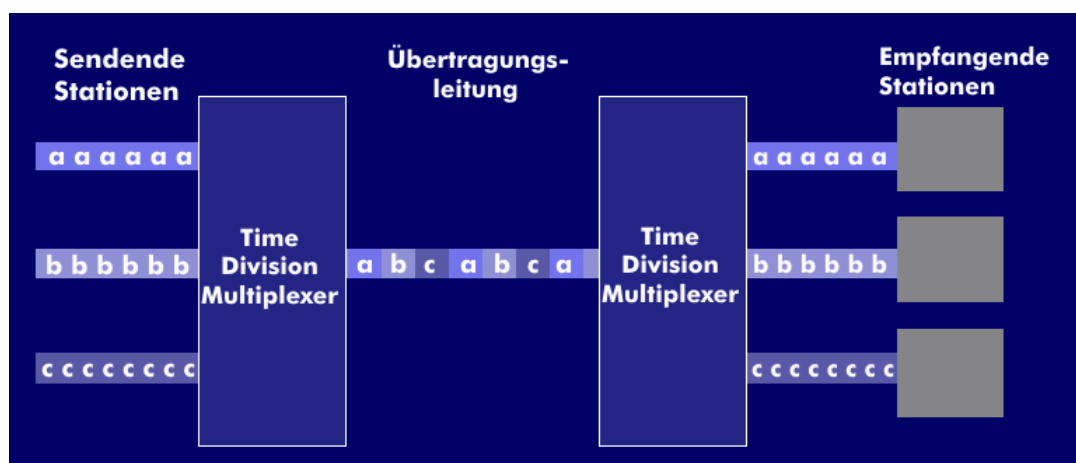


Abbildung 2.16: Time Division Multiplex (TDM)

[Lipinski, 2020b]

Es wird also von verschiedenen Sendern zu unterschiedlichen Zeitpunkten die selbe Frequenz verwendet. Dabei sind auch Schutzabstände einzuhalten, also kurze Pausen zwischen der Belegung einer Frequenz durch verschiedene Kanäle. „Überlappen sich dennoch zwei Kanäle in der

*Zeit, so stören sich die Signale der Kanäle gegenseitig [...] auch bekannt als (engl. co-channel interference)“ [Schiller, 2003, S. 66].*

Damit *co-channel interference* nicht auftritt, müssen alle Sender exakt zeitlich aufeinander abgestimmt sein. Hiermit wird die Vergabe von Frequenzen komplizierter, da nun ein gemeinsamer Takt mit den Sendern eingestellt werden muss bzw. alle Sender über hoch präzise Uhren verfügen müssen.

Um beim Zeitmultiplex Daten von einem Sender zu empfangen, muss der Empfänger exakt zum richtigen Zeitpunkt auf die richtige Frequenz eingestellt sein, um die Daten vom Sender zu empfangen. Obwohl hier scheinbar viele Nachteile gegeben sind, stellt Zeitmultiplex ein äußerst flexibles Verfahren dar. [Schiller, 2003, vgl. S. 66f]

Oftmals kombiniert man die Eigenschaften von Frequenzmultiplex und Zeitmultiplex derart, dass es durch Frequenzmultiplex mehrere Trägerfrequenzen gibt, auf die dann nach dem Zeitmultiplex Verfahren getrennt zugegriffen werden kann. [Benkner, 2007, vgl. S.320f]

Beispielsweise werden bei GSM Trägerfrequenzen im Abstand von 200 kHz verwendet, von welchen jeder dieser Frequenzträger wieder in je 8 Zeitschlitze (engl. Slots) unterteilt werden. [Benkner, 2007, vgl. S.321f] *„Die Anzahl der Zeitschlitze pro Träger hängt von vielen Faktoren ab, wie der maximalen erlaubten Verzögerungszeit, der Datenrate, der Laufzeitverzögerung zwischen Sender und Empfänger, dem Modulationsverfahren sowie der verfügbaren Bandbreite“ [Benkner, 2007, S.321]*

Ein Nachteil der Kombination von FDM und TDM besteht im erhöhten Koordinationsaufwand, welcher zwischen Sender und Empfänger entsteht. [Schiller, 2003, vgl. S.67]

### 2.6.3 Codemultiplex

Die bisher vorgestellten Multiplexverfahren (Frequenzmultiplex, Zeitmultiplex) sind bereits seit geraumer Zeit in zivilen Kommunikationssystemen anzutreffen. Eine weitere Möglichkeit Daten zur selben Zeit mit der selben Frequenz zu übertragen, besteht im sogenannten Codemultiplex (engl. *Code Division Multiplexing, CDMA*)

*„Codemultiplex wurde für militärische Kommunikationssysteme entwickelt, da es in der Kombination mit Bandspreizverfahren über eine inhärente Abhörsicherheit verfügt“ [Schiller, 2003, S.68].*

Aufgrund des immer effizienteren Kosten-Leistungsverhältnisses hochintegrierter Schaltungen kann Codemultiplex heutzutage auch für zivile Mobilfunksysteme genutzt werden. [Schiller, 2003, S.68] definiert hier, dass *„alle Kanäle  $k_i$  [...] bei dieser Technik zur selben Zeit dieselbe Frequenz zur Datenübertragung [...]“* nutzen. Über einen speziell für jeden Kanal generierten Code erfolgt die Trennung der einzelnen Kanäle.

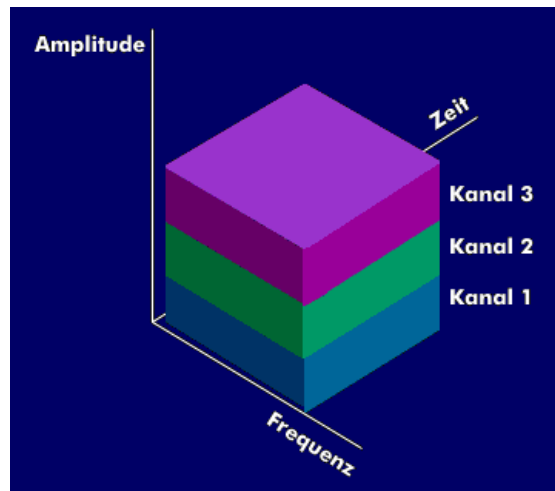


Abbildung 2.17: Code Division Multiplex Access(CDMA)  
[Lipinski, 2013]

Bei Codemultiplex wird das zu übertragende Signal mehr als über die notwendige Bandbreite zur Übertragung hinaus gespreizt. Dieses Verfahren bekannt als Spreizspektrumtechnik wird genutzt, um die [...] *„Interferenzfestigkeit der Teilnehmersignale stark zu erhöhen, so dass viele Signale gleichzeitig im selben Frequenzband übertragen werden können [...]“* [Benkner, 2007, S.325].

Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens besteht in der Limitierung der Clustergröße des zellulären Netzaufbaus. Hierdurch kann in jeder Zelle dasselbe Spektrum wiederverwendet werden. [Benkner, 2007, vgl. S.324]

## 2.7 Modulations- und Codierungsschemata

In der Nachrichtentechnik versteht man unter Signalübertragung, wie viele Informationen möglichst verlustfrei übertragen werden können. Wenn verschiedenste Signale über den selben Übertragungsweg gesendet werden, ist eine Signalaufbereitung vor der Signalübertragung notwendig. Hierfür werden Modulationsverfahren eingesetzt, um Informationen und Daten so in elektrische Signale umzuwandeln, dass sie für die Übertragung geeignet sind.

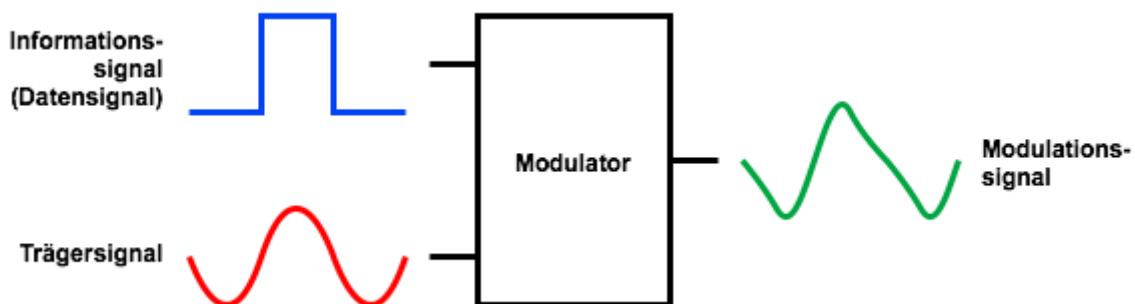


Abbildung 2.18: Modulation  
[Thomas, 2020a]

„Das Modulationsverfahren beschreibt, wie Daten abgebildet werden müssen, damit sie auf einem Kabel oder über die Luft übertragen werden können“

Bei der Modulation passiert eine Art mathematische Multiplikation von Träger- und Informationssignal. Dieser Vorgang wird von einem Modulator, auch als 'Mischer' bezeichnet, durchgeführt. Damit nun Träger- und Informationssignal zum Modulationssignal zusammengeführt werden können, müssen die Signale schaltungstechnisch addiert werden. Das Signal wird von einer linearen Frequenz in ein Signal mit einer nichtlinearen Frequenz transformiert. Elektrische Signale besitzen grundsätzlich drei Hauptmerkmale, die auch als Signalparameter bezeichnet werden. Diese Signalparameter sind die *Amplitude*, *Frequenz* sowie die *Phase*.

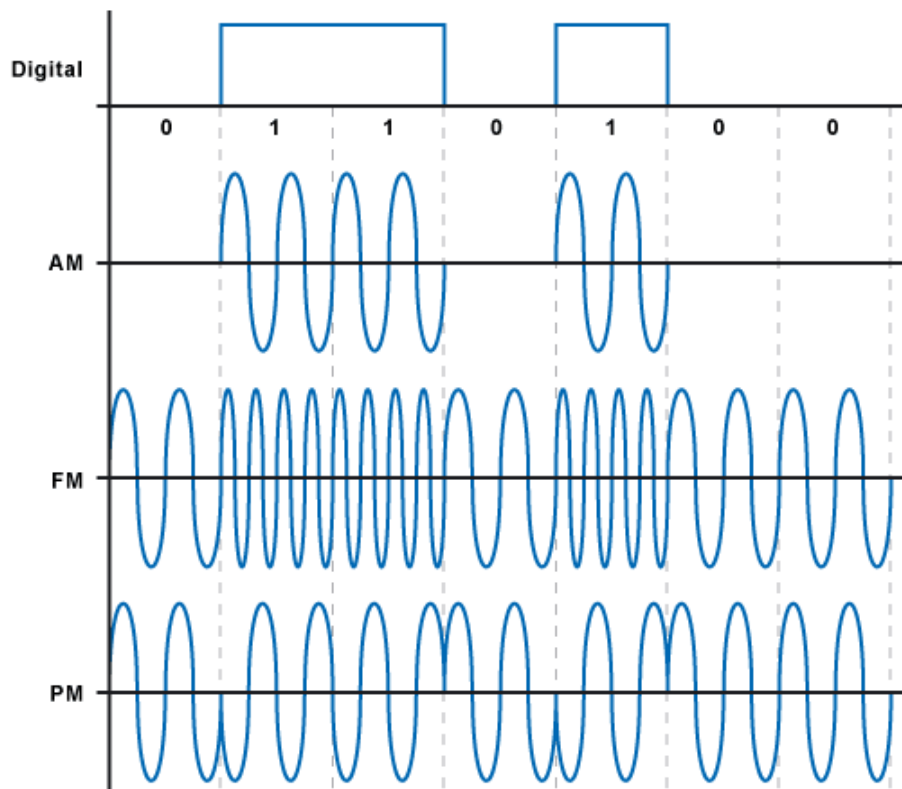


Abbildung 2.19: Modulation Hauptmerkmale  
[Thomas, 2020a]

Beim Prozess der Modulation werden einer oder mehrere dieser Signalparameter, des Trägersignals, durch das Informationssignal verändert, man spricht hier auch von moduliert. Das Informationssignal, oder auch Modulationssignal, wird dem Trägersignal aufgetragen, welches schließlich das Modulationssignal in eine veränderte Form bringt.

### 2.7.1 Quadratur-Amplituden-Modulation

In dem hier verwendeten Mobilfunk Modell MoNGA wird ausschließlich mit der *Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM)* für Mobilfunksignalen gerechnet.

Das *QAM* ist ein Modulationsverfahren, das gegenüber der normalen Modulation, die rein aus An/Aus Zuständen von '0' und '1' besteht, weit aus mehr Zustände von zwei, vier, acht und

mehr Bit bestehen kann und ein Datenwort in jeweils 4-, 16-, 64- oder höherstufiges Symbol transformiert. Dabei bedeutet z.B. die Abkürzung *64QAM*, dass maximal 64 mögliche Zustände erreicht werden können. [Thomas, 2020c, vgl.]

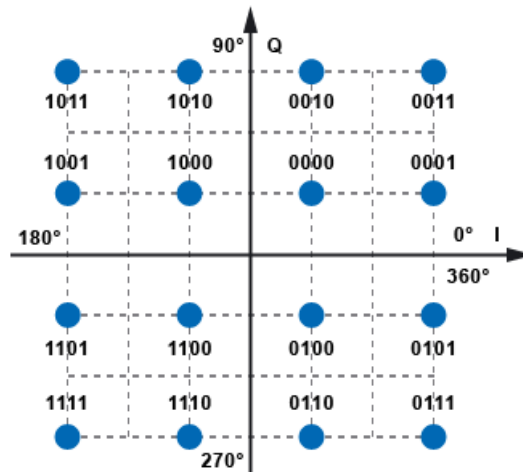


Abbildung 2.20: Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM)  
[Thomas, 2020c]

Bei der sogenannten *16QAM*, die maximal 16 mögliche Zustände zulässt, wird das sogenannte *Phase Shift Keying (PSK)* auch als Phasenumtastung bekannt, mit dem sogenannten *Amplitude Shift Keying (ASK)* auch als Amplitudenumtastung bezeichnet, kombiniert. Hierbei werden zwei frequenzgleiche Trägersignale mit zwei verschieden großen Amplituden, um 90 Grad zueinander phasenverschoben, übertragen. Dabei entsteht ein Sinus- sowie ein Cosinus- Signal. [ebd, vgl.]

Die sogenannte *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)* auch als Quadraturphasenumtastung bekannt, ist eine Modulationsmethode, die abhängig von den genutzten Bits pro Symbol, die Kombinationsmöglichkeiten steigen. So kann bei einer *vierfachen-QAM* mit zwei Bit, vier Kombinationen, bei *16-QAM* mit vier Bit, 16 Kombinationen sowie bei *64-QAM* mit 6 Bit, 64 Kombinationen, erreicht werden. [ebd, vgl.]

## 2.8 Referenzsignale

Referenzsignale werden von einer Mobilstation zur Suche von LTE-Signalen in einem Netzwerk verwendet, um die Signalqualität einschätzen zu können. Dies geschieht im Downlink durch die Übertragung von vordefinierten Mustern, die auch als Referenzsymbole bezeichnet werden.

### 2.8.1 RSRP

Der *RSRP* Wert steht für *Reference Signal Received Power* und ist die mittlere Empfangsleistung eines Referenzsymbols über die betrachtete Kanalbandbreite. Der *RSRP* ist der wichtigste Parameter, um die eigenen Empfangswerte bzw. Empfangsqualität zu beurteilen. [Rose, 2014, vgl. S.20]

„Aus der Messung der Referenzsymbole kann u.a die mittlere Empfangsleistung *Reference Signal Received Power (RSRP)* einer Zelle geschätzt werden“ [Rose, 2014, S.20].

Der Wertebereich des RSRP liegt zwischen -140 dBm und -50 dBm. Hierbei stehen Werte nahe -50 dBm für einen optimalen Empfang. RSRP Werte zwischen -50 bis -70 dBm stehen für sehr gute Bedingungen, was die Signalstärke betrifft. Für RSRP Werte unter -60 dBm muss sich der Empfänger in Sichtverbindung und einer Distanz näher als 300 Meter von der Basisstation befinden. Im normalen Alltag können Nutzer Empfangswerte der RSRP von -70 bis -90 dBm erwarten. [Schöne and Wildemann, a, vgl.]

RSRP Wertebereiche	Schulnote	Kommentar
-50 bis -65 dBm	1 (sehr gut)	es liegt exzellenter Empfang vor - perfekt!
-65 dBm bis -80 dBm	2 (gut)	gute, ausreichende Empfangsbedingungen
-80 dBm bis -95 dBm	3 (befriedigend)	nicht perfekt aber ausreichend für stabile Verbindungen
-95 dBm bis -105 dBm	4 (ausreichend)	noch akzeptable Bedingungen mit Einschränkungen beim Speed; ggf. auch Abbrüche
-110 dBm bis -125 dBm	5 (mangelhaft)	sehr schlechter Pegel - dringender Handlungsbedarf; wahrscheinlich kaum Verbindung möglich
-125 dBm bis -140 dBm	6 (ungenügend)	extrem schlecht - wahrscheinlich keine Verbindung möglich

Abbildung 2.21: RSRP Wertebereich  
[Schöne and Wildemann, a]

Die *RSRP* misst die Signalstärke eines Sektors und blendet dabei Interferenzen und Störungen anderer in der Nähe liegender Sektoren aus. Man nimmt an, dass ihre Empfangsleistung den gleichen Wert besitzt wie alle weiteren Signale der Nutzdaten. Hierdurch kann die Mobilfunkzelle als Referenz ausgewählt werden, welche das am stärksten empfangene Signal darstellt. Von besonderer Bedeutung ist die RSRP jedoch bei einem Handover, bei dem eine neue Zelle ausgewählt wird (mehr dazu in Kapitel 2.11). [ebd, vgl.]

## 2.8.2 RSRQ

Ein weiteres Referenzsignal ist die sogenannte *RSRQ*, die für *Reference Signal Received Quality* steht. Die *RSRQ* wird aus der *RSRP* und dem *RSSI* als Verhältnis Wert errechnet. Sie ist besonders hilfreich, um die Empfangsqualität einer Funkverbindung zu beurteilen. Eingesetzt wird die *RSRQ* z.B. für mobile Empfangsgeräte, um bei der Entscheidung einer Mobilfunkbasisstation hinsichtlich eines Zell- oder Netzwechsels zu unterstützen. Außerdem wird mithilfe des *RSRQ* Wertes die Ausrichtung der Mobilfunkantennen für eine optimale Abdeckung der Sektoren eingesetzt. [Schöne and Wildemann, b, vgl.] Der *RSRQ* Wert berechnet sich aus folgender Formel:

$$RSRQ = N \cdot \frac{RSRP}{RSSI}$$



Die Formel besteht aus der *RSRP*, welche die mittlere Empfangsleistung (siehe Kapitel 2.8.1), der *RSSI* welche die gesamte Leistung einer gemessenen Frequenz sowie dem *N*, welches die Anzahl der Ressourcenblöcke in dem jeweiligen Netz und Frequenzbereich darstellt. Betrachtet man ein Beispiel, so würde eine typische LTE Antenne mit 800 MHz eine Kanalbandbreite von 10 MHz und somit 50 Ressourcenblöcken besitzen.

RSRQ Wertebereiche	Schulnote	Kommentar
-3 dB	1 (sehr gut)	Optimale Verbindungsqualität, keine Beeinflussung durch Störer
-4 ... -5 dB	2 (gut)	störende Einflüsse vorhanden, sind aber ohne Auswirkungen
-6 ... -8 dB	3 (befriedigend)	störende Einflüsse, leichte Beeinflussung d. Verbindung
-9 ... -11 dB	4 (ausreichend)	störende Einflüsse, spürbare Beeinflussung der Verbindung
-12 ... -15 dB	5 (mangelhaft)	Stark störende Einflüsse vorhanden, Verbindung sehr instabil
-16 ... -20 dB	6 (ungenügend)	Extrem störende Einflüsse, keine nutzbare Verbindung möglich

Abbildung 2.22: RSRQ Wertebereich  
[Schöne and Wildemann, b]

Der *RSSI*, der für *Received Signal Strength Indicator* steht, wird hauptsächlich als Übersichtsmessung verwendet. Dieser Wert stellt die gesamte Leistung eines gemessenen Frequenzkanals dar. Hierbei werden keine anderen Signale herausgefiltert, daher besteht dieser Wert aus dem Nutzsignal wie auch aus anderen Fremdleistungen. Aus diesem Grund sind im *RSSI* auch Störsignale, Hintergrundgeräusche sowie Interferenzen einer anderen Mobilfunkstation oder Nachbarkanalstörungen von funkbetriebenen Alarmanlagen oder weiteren kabellos betriebenen Geräten in der Nähe enthalten.

### 2.8.3 SINR

Aber nicht nur die *RSRP* kann zur Beurteilung eines Funkkanals zwischen Basisstation und Mobilstation dienen. [Rose, 2014, S. 21] beschreibt, dass die sogenannte *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)* welche das „Verhältnis des Referenzsignals zu den durch Interferenzen und Rauschen verursachten Störungen“ darstellt, auch ein solches Maß beschreibt.

$$SINR = \frac{S}{I+N} [dB]$$

In obiger Formel wird *S* als die empfangene Leistung bezeichnet. Aus den aufsummierten Empfangsleistungen aller anderer Quellen, stellt *I* die Interferenzleistung dar. Als *N* wird jene Leistung bezeichnet, welche das bandbreitenabhängige thermische Rauschen des Kanals verursacht. [vgl. ebd.]

Schließlich ist das *SINR* ein wichtiges Maß für die Quantifizierung der Signalqualität, da diese einen bedeutenden Einfluss auf die erreichbare Datenrate eines Funkkanals hat. Referenzsignale



sind auch für Kanalschätzungen von großer Bedeutung. [ebd, vgl.]

SINR Wertebereiche	Schulnote	Kommentar
+40 dB bis +20 dB	1 (sehr gut)	exzellente Bedingungen - fast keine Störeinflüsse
+19 dB bis +10 dB	2 (gut)	gutes, stabiles Signal - kaum Störungen vorhanden
+5 dB bis +9 dB	3 (befriedigend)	brauchbare Verbindung mit leichten Abstrichen
+0 dB bis +4 dB	4 (ausreichend)	gerade noch ausreichend - nicht unerhebliche Störeinflüsse - Verbindungsprobleme möglich
-5 dB bis -1 dB	5 (mangelhaft)	Störsignale überwiegen - Verbindung wahrscheinlich kaum möglich oder extrem instabil
-12 dB bis -5 dB	6 (ungenügend)	Störer dominieren Nutzsignal extrem, Datenverbindung praktisch unmöglich

Abbildung 2.23: SINR Wertebereich  
[Schöne and Wildemann, c]

#### 2.8.4 SNR

Neben dem *SINR* gibt es ein ähnliches Referenzsignal, nämlich das *Signal to noise ratio (SNR)*, welches das Signal-Rauschverhältnis oder Störabstand darstellt. Das *SNR* unterscheidet sich jedoch vom *SINR*, das in Kapitel (2.8.3) vorgestellt wurde. *SINR* und *SNR* ähneln sich, indem sie beide die Qualität eines Signals beschreiben, unterscheiden sich aber, da das *SNR* nur das Verhältnis zum Rauschen angibt ohne die Einbeziehung der Interferenz. [Rose, 2014, vgl. S.21]

## 2.9 Dezibel die Einheit der Funktechnik

Wie in den soeben beschriebenen Kapiteln werden Referenzsignale der Funktechnik häufig verwendet, um Funksignale und deren Stärke, Qualität oder Interferenzen zu beschreiben. In diesem Zusammenhang ist es jedoch wichtig zu betonen, dass die Referenzsignale nicht in Watt sondern in sogenannten Dezibel angegeben werden. In der Elektrotechnik hat es sich etabliert die elektrische Leistung in logarithmischer Form anzugeben, damit sowohl sehr große als auch sehr kleine Leistungsangaben besser in der Praxis verwendet werden können. Um sehr niedrige Werte darzustellen, wird auf eine festgelegte Bezugsgröße, typischerweise 1 Milliwatt (Dezibel Milliwatt: dBm), referenziert. Der Leistungspegel, der als Dezibel angegeben wird, kann folgend als Formel dargestellt werden [Winter, 2014, vgl.]:

$$L_P = 10 \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

In den Kapiteln, welche sich der Analyse der Mobilfunkdaten widmet, werden die Ergebnisse der RSRP rein in der Einheit Dezibel Milliwatt (dBm) dargestellt, da ansonsten die große Bandbreite der sich stark im negativen Bereich befindlichen RSRP Werte, nicht dargestellt werden kann. Die anderen Referenzsignale, wie RSRQ sowie SINR, werden in der Einheit Dezibel (dB) dargestellt. [Schnabel, 2021, vgl.]

## 2.10 Maximal generierbarer Datendurchsatz

Der maximal generierbarer Datendurchsatz bei drahtlosen Netzen hängt stark von der Bandbreite, aber natürlich auch von den auftretenden Störungen und Rauschen auf dem genutzten Funkkanal ab. Der maximal generierbarer Datendurchsatz wird durch die Stärke des Rauschens beeinflusst, der durch das *SNR* dargestellt wird, und anhand der Kanalkapazität von Shannon wie folgt in einer Formel beschrieben werden kann:

$$D_{max} = B \cdot \log_2(1 + SNR_{lin})$$

In dieser Formel ist  $B$  die Bandbreite des Kanals in Hertz (Hz).  $SNR_{lin}$  ist das *Signal plus Noise Ratio*, also das Signal-Rauschverhältnis oder Störabstand als lineare Größe (siehe Kapitel 2.8.4). Wird der Kanal stärker gestört und verringert sich somit das *SINR*, so sinkt auch  $D_{max}$  ab. Um auch die Datenübertragung in durch Rauschen gestörten Funkkanälen die Datenübertragung auf einem Maximum zu erhalten, wird in Mobilfunksystemen versucht, eine möglichst passende Kombination aus Modulationsschema und Fehlerschutzcodierung auszuwählen.

## 2.11 Handover

Bei der Bewegung von mobilen Empfangsgeräten durch den Raum ist es aufgrund von beschränkten Ausbreitungsradien der Basisstationen notwendig, dass die Datenverbindung von einer Basisstation an die nächste weitergeleitet wird. Diesen Vorgang des Wechsels eines aktiven mobilen Empfangsgerätes von einer Funkzelle in die nächste bezeichnet man im Fachjargon als *Handover* oder *Handoff*. Wenn die Verbindungsunterbrechung für den Teilnehmer nicht bemerkbar ist, dann wurde ein *Seamless Handover* also ein nahtloser Handover durchgeführt. Ein *Handover* wird durchgeführt, damit das mobile Empfangsgerät, während es sich durch verschiedene Mobilfunkzellen bewegt, immer mit der Zelle verbunden ist, welche ihm die besten Referenzsignale, wie die *RSRP*, *RSRQ*, *SINR* aus Kapitel 2.8) anbietet. [Benkner, 2007, vgl. S.128ff]

In Mobilfunksystemen muss eine Kontinuität aller laufender Verbindungen zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden, weshalb ein *Handover* einen sehr zeitkritischen Vorgang darstellt. Ein Handover wird eingeleitet, weil sich z.B die Empfangsbedingungen für das mobile Empfangsgerät ändern, sodass keine ausreichende Versorgung durch die verbundene Basisstation gegeben ist. Damit es jedoch zu einer gleichmäßigen Auslastung bzw. zu keiner übermäßigen Überlastung der Zellen kommt, können Handover auch von der Basisstation selbst initiiert werden. Aufgrund von Messberichten, die bei Erreichen von definierten Grenzwerten von mobilen Empfangsgeräten an die Basisstation gesendet werden, wird schließlich entschieden, ob es zu einem Wechsel der empfangenen Basisstation kommt. Dies betrifft unter anderem Qualitätskriterien, wie die Bitfehlerraten oder Störabstände, jedoch können auch Kriterien wie die Entfernung eines mobilen Empfangsgerätes zur nächsten Basisstation aufgrund der Signallaufzeit mit einfließen. Der Wechsel von einer Funkzelle in die nächste geschieht nicht plötzlich abrupt, sondern ist ein allmählicher Übergang. [Pollini, 1996, vgl. S.82f]

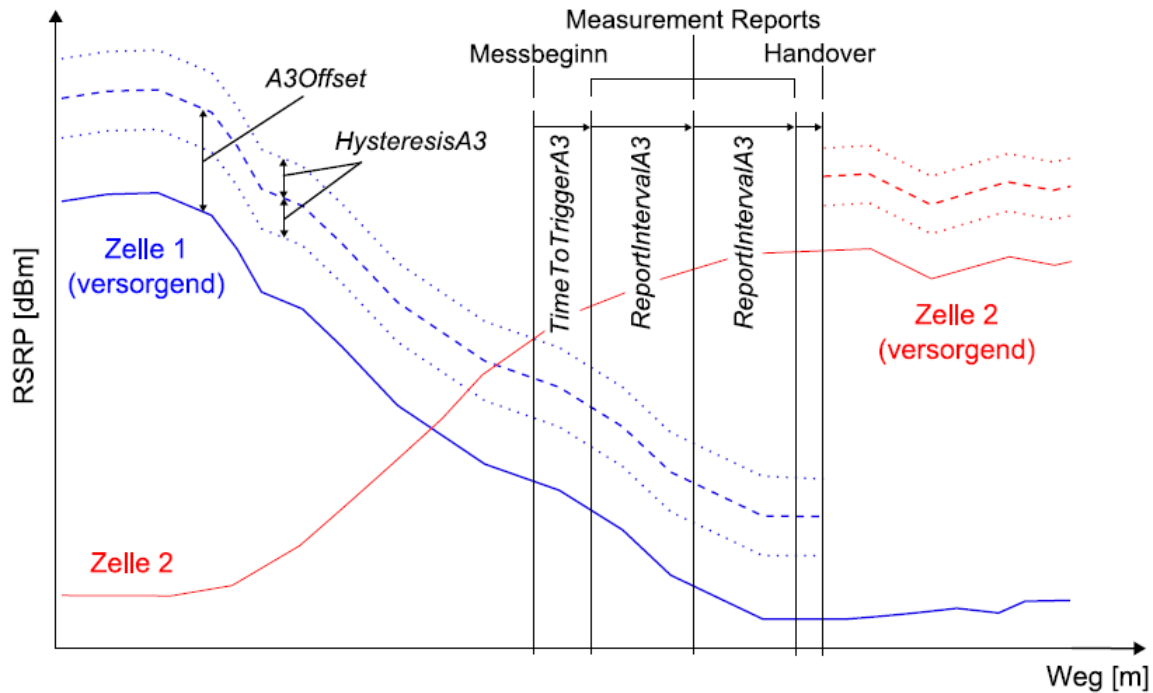


Abbildung 2.24: Schematischer Handover Übergabevorgang von zwei Zellen  
[Rose, 2014, vgl. S.24f]

In Abbildung 2.24 ist nun ein typisches Handover Szenario eines mobilen Empfangsgerätes, das sich am Übergang von einer Mobilfunkzelle zur nächsten befindet. Hierbei sieht man nun schematisch den RSRP Verlauf des mobilen Empfangsgerätes von der aktuell noch versorgenden Zelle hinzu zur benachbarten nächstgelegenen Zelle. [Benkner, 2007, vgl. S.128-132]

Der Handover Vorgang wird durch das Event *A3* beschrieben und setzt sich aus mehreren Phasen zusammen bis es schließlich zur Übergabe an die neue Zelle kommt. Zuerst wird die versorgende Zelle im Vergleich zu ihrer Nachbarzelle aufgewertet, indem der Bereich *Offset* zum gemessenen RSRP Wert hinzu addiert wird. Bevor nun überhaupt ein Handover in Betracht gezogen wird, muss mindestens eine bestimmte Differenz der RSRP Werte zwischen beiden Zellen vorhanden sein. Diesen Differenz Bereich der RSRP Werte zweier Zellen bezeichnet man als *Hysteresis*. Die spezifischen Handoverbedingungen müssen über einen gewissen Zeitraum, der als *TimeToTrigger* bezeichnet wird, erfüllt sein damit anschließend von einem mobilen Empfangsgerät ein Messbericht an die Basisstation gesendet wird, welcher den Handover Vorgang schließlich zur Durchführung freigibt. Der Zeitraum bis weitere Messberichte von einem mobilen Empfangsgerät an die Basisstation gesendet werden, wird als *ReportIntervall* bezeichnet und kann mehrere Messberichte hintereinander beschreiben. [Sauter, 2011, vgl. S.75-78]

Bis zu dem Zeitpunkt, wo das mobile Empfangsgerät eine Rückmeldung über das von ihr gesendeten Messberichtes, von der Basisstation, erhält, wird kontinuierlich ein neuer Messbericht gesendet. In folgender Formel soll dargestellt werden, wie sich der Messbericht abhängig von der *RSRP* dem *Offset* sowie der *Hysteresis* zusammensetzt:

$$RSRP_{target} > RSRP_{serving} + Offset + Hysteresis$$

Betrachtet man nochmals Abbildung 2.24, so befinden wir uns nun im Bereich des *Measurement Reports* zwischen Messbeginn und *Handover*. Schließlich sei angenommen, dass ein mobiles Empfangsgerät die Bestätigung von der nächsten Basisstation erhält, einen *Handover* zu ihr durchzuführen. Da im Vorhinein, im Zeitabschnitt der sogenannte *TimeToTrigger (TTT)*, die Eignung des Wechsels der Zelle überprüft wurde, konnten Ping Pong *Handover* reduziert und somit unnötiger Signalisierungsverkehr vermieden werden. Wird der *TimeToTrigger* Bereich sehr groß gewählt, so kann es passieren, dass das Signal der zu versorgenden Zelle zu schwach wird und die Verbindung abbricht. Besonders anfällig für Störungen während eines *Handovers* sind Funkzellen, die sich in Regionen mit hohen Nutzergeschwindigkeiten wie z.B. Autobahnen oder Bahnstrecken befinden. [Benkner, 2007, vgl. S.128-132]

## 2.12 Ein Rückblick zu 2G und 3G

Bei UMTS<sup>9</sup> und LTE wurden im Vergleich zur ersten kommerziell erfolgreichen Mobilfunktechnologie GSM die verfügbaren Frequenzressourcen immer effizienter genutzt. [Rose, 2014, vgl. S.20]

Der 1990 eingeführte Mobilfunkstandard der 2.Generation, besser bekannt als *2G* oder auch *GSM*, ermöglicht Datenübertragungsraten von maximal 220 kbit/s und kann jeder Funkzelle einen kleinen Bereich des Frequenzspektrums zu exklusiven Nutzung zuweisen. Dagegen kann bei UMTS (3G) jede Zelle das komplette zugewiesene Spektrum nutzen. Bei UMTS wird dies durch ein spezielles Kodierungsverfahren ermöglicht, welches die Störungen zwischen benachbarten Zellen zumindest in der Theorie komplett unterbinden kann. Auch LTE kann in jeder Zelle das komplette zugewiesene Frequenzspektrum nutzen. [Rose, 2014, vgl. S.20]

„Trotz der sich daraus ergebenden unvermeidlichen Interferenzen liegen die erreichbaren Datenraten über denen, die sich ergäben, wenn man wieder zu exklusiver Frequenz-Nutzung einzelner Zellen zurückkehren würde“ [Rose, 2014, S.20].

## 2.13 Der Mobilfunkstandard 4G

2009 wurde der heute weitverbreitete Mobilfunkstandard der vierten Generation, kurz (4G), besser bekannt als *Long Term Evolution* oder *LTE*, wird fachlich auch als 3.9G bezeichnet. Dieser wird in einem Frequenzbereich von 700 bis 2700 MHz verwendet. Die Übertragungskanäle können sich in einem Bereich von 1,25 bis 20 MHz befinden. Mit *LTE* sind Übertragungsgeschwindigkeiten bis maximal 1000 Mbit/s möglich, jedoch in der Praxis werden im Schnitt um die 100 Mbit/s erreicht.

Die Erweiterung von *LTE* wird als *LTE-Advanced* bezeichnet und weist eine Abwärtskompatibilität im Projekt *Next Generation Mobile Networks (NGMN)*<sup>10</sup> auf.

Als erstes muss ausgeführt werden, dass die Architektur des LTE-Netzwerkes der von GSM und UMTS grundsätzlich sehr ähnlich ist. „Auch bei *LTE* ist das Netzwerk in ein Radionetz

<sup>9</sup>Steht für *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)* und ist ein Mobilfunkstandard der dritten Generation, besser bekannt als *3G*. Diese Technologie aus dem Jahre 2004 erreicht Datenraten < 0,39 Mbit/s

<sup>10</sup>Das NGMN ist ein laufendes Projekt von Mobilfunkfirmen und -ausrüstern, welche die nächsten Mobilfunkstandards weiterentwickeln wie z.B. aktuell, der neue Mobilfunkstandard 5G

und ein Kernnetz getrennt“ [Sauter, 2011, S.279]. Im Unterschied zu GSM und UMTS wurde bei LTE die Anzahl der logischen Komponenten reduziert, was zu einer Effizienzsteigerung und gleichzeitig zur Reduzierung der Kosten und Latenzzeiten führte. [vgl. ebd]

### 2.13.1 OFDM die Stärke von LTE

[Sauter, 2011, S.279] beschreibt, dass „Mit LTE ein komplett neues Übertragungsverfahren eingeführt wurde, mit dem der Multipath Fading-Effekt elegant umgangen werden kann. Anstatt nur ein Signal über einen sehr breiten Übertragungskanal (z.B. 5 MHz wie bei UMTS) zu senden, verwendet LTE ein Verfahren mit der Bezeichnung Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)“. (siehe 2.6.1.2)

Mit dem OFDM Verfahren kann die Information für unterschiedliche Nutzer auf benachbarten Frequenzen übertragen werden, ohne dass sich diese gegenseitig beeinflussen. Dies ermöglicht eine höhere Datenrate pro verfügbarer Frequenzressource, die als spektrale Effizienz bezeichnet wird [bit/s / Hz] [Rose, 2014, vgl, S.20].

Hierbei unterteilt das OFDM Verfahren einen schellen Datenstrom in viele langsamere Datenströme, die letztlich gleichzeitig übertragen werden. Im Vergleich zu UMTS<sup>11</sup> werden dadurch bei gleicher Kanalbandbreite wesentlich höhere Datenraten möglich, wobei der Multipath-Effekt jedoch aufgrund der längeren Übertragungsschritte jedes einzelnen Datenstromes deutlich verringert wird. Um auf höhere Datenraten zu gelangen, kann nun die Anzahl der langsamen Datenströme erhöht werden, wobei deren Datenrate konstant bleibt. Falls einem Netzwerkbetreiber weniger als 5 MHz pro Frequenzband zur Verfügung steht, kann für OFDM die Anzahl der parallelen Datenströme reduziert werden. [Sauter, 2011, vgl, ebd.]

Durch diese gleichzeitige Nutzung der Frequenz in jeder Zelle ergeben sich jedoch auch neue Herausforderungen bei der Planung und Errichtung von Netzen. Zu Zeiten von GSM war der eindeutige Schlüssel für die Kapazität der Zelle die Frequenzzuweisung der einzelnen Zellen. Hingegen ist bei LTE die Minimierung der Interferenz zwischen benachbarten Zellen essenziell für die Kapazität der Zellen und des gesamten Netzes [Rose, 2014, vgl, S.20]. Der LTE Mobilfunkstandard unterstützt alle Bandbreiten zwischen 1,25 bis 20 MHz. Grundsätzlich müssen alle LTE Empfangsgeräte alle Bandbreiten unterstützen. Welches Frequenzband schließlich beim Verbindungsaufbau gewählt wird, hängt vom Umfang des Spektrums eines Netzbetreibers ab und wie breit dieser den Kanal schließlich wählt. Im Optimalfall kann in der Praxis mit einem 20 MHz Kanal unter günstigen Übertragungsbedingungen Datenraten größer 100 Mbit/s übertragen werden. Die Anforderungen an LTE Empfangsgeräte wurden von der 3rd Generation Partnership Project (3GPP) von Anfang an sehr hoch ausgelegt. [Sauter, 2011, vgl, S.280f]

Hierbei beschreibt [Sauter, 2011, S.280]: „Zusätzlich zur Unterstützung aller definierten Bandbreiten muss ein LTE-Empfangsgerät auch Multiple Input Multiple Output (MIMO) Übertragungen unterstützen, mit dem mehrere unabhängige Datenströme gleichzeitig über den gleichen Kanal übertragen werden“.

---

<sup>11</sup>Ist ein Mobilfunkstandard der 3. Generation (3G) und basiert auf dem GSM Standard. Im Vergleich zu diesem erreicht UMTS Datenübertragungsraten bis 42 Mbit/s

Mit dieser Technik können unter optimalen Übertragungsbedingungen Datenraten deutlich über jenen erzielt werden, die mit üblichen Techniken normalerweise erreicht werden. Eine weitere wichtige Änderung von LTE im Vergleich zu vorherigen Mobilfunktechnologien ist, dass LTE sich stärker auf das Paket vermittelnde Internet Protokoll (IP) stützt. LTE besitzt ein rein paketvermittelndes Kernnetz, über welches alle Dienste mit Ausnahme von SMS (Short Message Service) abgewickelt werden. Beim Vorgänger UMTS gab es noch ein leitungsvermittelndes Kernnetz für Sprache-, SMS und andere Dienste. Nur SMS wird bei LTE noch über Signalisierungsnachrichten abgewickelt. Diese Neuerungen hin zu einem auf Paketvermittlung basierendem Netz, welches das IP-Protokoll nutzt, vereinfacht nicht nur das Design sondern auch die Implementierung der LTE-Luftschnittstelle, des Radionetzwerkes und auch des Kernnetzes. [Sauter, 2011, vgl. ebd.]

Hierbei betont [Sauter, 2011, S.280] *„dass LTE [...] den Trend hin zu IP-Protokoll fortsetzt, der vor einigen Jahren schon in Festnetzen mit DSL, Glasfaser und rückkanalfähigen TV-Netzen genommen wurde und Sprachtelefonie ins IP-Netz migriert wurde“*.

Damit unter voller Auslastung der LTE Netze noch immer eine konstante Verzögerung und Bandbreite für die Sprachtelefonie garantiert werden kann, wurden sogenannte Quality of Service-Mechanismen für alle Schnittstellen spezifiziert. Diese Schnittstellen basieren nun bei LTE zwischen den einzelnen Netzwerkkomponenten auf dem IP-Protokoll als auch der Verbindung zur Basisstation. [vgl. ebd.]

Die physikalische Infrastruktur ist hierbei komplett transparent und austauschbar. Außerdem verringerte man die Netzwerkkomponenten, wodurch das LTE Netzwerk vereinfacht wurde und damit *Round Trip Delay*<sup>12</sup> Zeiten auf eine Geschwindigkeit von 25-30 Millisekunden angehoben wurden. Auch der Verbindungsaufbau wurde vereinfacht, sodass Geräte sich mit dem Netzwerk innerhalb weniger Millisekunden verbinden können. Zusätzlich können Stromsparzustände schnell aktiviert sowie deaktiviert werden [vgl. ebd.]

Damit die Nutzer von Mobiltelefonen immer Netzverbindungen mit ihren Empfangsgeräten aufbauen können, müssen diese auch ältere Standards wie GSM, GPRS, EDGE, UMTS und HSPA unterstützen. *„Auf der Netzwerkseite sind dazu Schnittstellen und Protokoll nötig, um eine Verbindung nahtlos zwischen GSM, UMTS und LTE umzuschalten, wenn der Nutzer den Abdeckungsbereich einer Radiotechnologie verlässt“* [Sauter, 2011, S.280].

Die erste Version, welche das Fundament des LTE Standards bildet, wurde in 3GPP Release 8 spezifiziert und bildet somit die Basis für künftige Erweiterungen, wie z.B. der Release 10, der das System noch schneller und effizienter machen sollte. Die Erweiterungen von LTE nennt man auch LTE-Advanced und sollen das System kompatibel zu den vorgegebenen Anforderungen der *International Telecommunication Union (ITU)* machen. [Sauter, 2011, vgl. S.282]

---

<sup>12</sup>Bezeichnet die Paketumlaufzeit, also jene Zeit, die ein Datenpaket in einem Rechnernetz benötigt, um von der Quelle zum Ziel und zurück zu reisen.



## 2.14 Der Mobilfunkstandard 5G

Die neueste Mobilfunktechnologie der fünften Generation, besser bekannt als *5G*, in der Fachliteratur als *New Radio* bezeichnet, ist das neue Maß der Dinge, wenn es um Massendatenverarbeitung und Hochgeschwindigkeitsdatentransfer zwischen Smart Geräten sowie den immer mehr diskutierten *Internet of Things (IoT)* geht. [Shafi, 2017, vgl. S.1f]

Ende des Jahres 2020 wurden die für den Betrieb des 5G Mobilfunknetzes notwendigen Frequenzen an die Mobilfunkbetreiber von der staatlichen Regulierungsbehörde (RTR) versteigert. Diese Versteigerung brachte dem Staat einen Gewinn von rund 202 Millionen Euro. Hierbei wurden Frequenzen für 5G im Bereich von 700, 1500, sowie 2100 MHz von den drei Mobilfunkanbietern A1, Magenta und DREI erworben. [Sulzbacher, 2020, vgl.]

Im Unterschied zu LTE (4G) und UMTS (3G) wird bei 5G die benötigte Zahl der Mobilfunkstationen nicht mehr von der Besiedlungsdichte abhängen, sondern vielmehr von den Anforderungen der Anwender vor Ort. 5G wird je nach Bedarf in verschiedene Situationen angewendet, wie z.B. in Gewerbegebieten, die sehr hohe Bandbreiten benötigen oder an Verkehrswegen, wo es darum geht, ein schnelles Netz mit extrem kurzen Antwortzeiten und hoher Zuverlässigkeit bereitzustellen oder in einer Werkshalle, die eine extrem große Anzahl an Maschinen und Menschen verbindet, wodurch deren gleichzeitige Zusammenarbeit unterstützt werden soll. Aufgrund dieser vielen verschiedenen Anwendungsszenarien mit 5G wird es kein gleichförmiges 5G Netz für alle geben, sondern viele individuelle, virtuelle Spezialnetze, die auf die jeweiligen Anwendungsszenarien zugeschnitten werden müssen. Diese Netze befinden sich somit unter einer gemeinsamen physischen Infrastruktur, welche durch 5G bereitgestellt wird. [Shafi, 2017, vgl. S.1ff]

Das 5G Netzwerk wird in drei verschiedene Anwendungsbereiche, die ultra schnelles mobiles Breitband (Enhanced Mobile Broadband), Kommunikation zwischen Maschine und Anwendung (Massive Machine Type Communications, M2M) sowie ein hoch verlässliches Netz mit ultrakurzen Antwortzeiten (Ultra Reliable and Low Latency Communications) umfasst, unterteilt. Mit dem 5G Standard sollen mehr Datendurchsatz, Kapazität sowie sinkende Betriebskosten in Mobilfunknetzen realisiert werden. [vgl. ebd]

Von Jahr zu Jahr steigt die mobil übertragene Datenmenge um mehr als 50 Prozent. Durch das Streaming von hochauflösenden, die mit 4K bzw. 8K übertragenden Videos, werden sehr hohe Datenraten als auch eine hohe Kapazität des Netzwerkes benötigt. Mit 5G ist es erstmals möglich Daten mit einer Geschwindigkeit von 10 Gbit/s zu übertragen<sup>13</sup>. Weitere Anwendung, bei denen diese sehr hohen Datendurchsatzraten benötigt werden, sind z.B. virtuelle Realitäten (*engl. Augmented Reality*), die z.B. bei Infrastrukturprojekten zur digitalen Sichtbarkeit der Daten bei Vorort Inspektionen genutzt werden können. Aber auch Bereiche, wie digitale Handwerker oder hochauflösende Videokonferenzen mit einem Arzt, der eine Operation aus tausenden Kilometer Entfernung durchführt, sind Anwendungsbereiche, welche bald schon Realität sein werden. [vgl. ebd.]

In Zukunft wird die Vernetzung von Dingen eine große Rolle spielen. Daher wird die Maschine-to-Maschine-Kommunikation (M2M) oder auch bekannt als das Internet der Dinge (IoT) eine

<sup>13</sup>entspricht einer Datentransferringeschwindigkeit von bis zu 10 Milliarden Bit pro Sekunde

Vielzahl an Geräten miteinander vernetzen, die kleine Datenmengen, bei gleichzeitiger großer räumlicher Verbreitung, durch ein großflächiges Netz verarbeitet benötigen. Wichtig bei diesen Anwendungen ist nicht die Übertragungsgeschwindigkeit sondern vielmehr der geringe Energieverbrauch. [Parlamentsdirektion, 2020, vgl.]

Im Bereich des vernetzten Fahrens für z.B. autonom fahrende Fahrzeuge ist die Anforderung an das 5G Netz hingegen vielmehr, dass ultraschnell zuverlässig Informationen übermittelt werden. Das 5G Netz bietet hier sehr kurze Latenzzeiten, also Antwortzeiten zwischen Geräten von bis 1 Millisekunde. Blickt man zurück, so lagen die Latenzzeiten von 3G noch bei etwa 100 Millisekunden und später bei 4G noch bei etwa 30 Millisekunden. Durch diese enorme Geschwindigkeit der Antwortzeiten bei 5G werden Daten daher beinahe in Echtzeit übertragen. Aber auch in anderen Bereichen wie bei bildgebenden Verfahren in der Medizin oder der Industrie ist diese hohe Zuverlässigkeit der Übertragungsnetze von großer Bedeutung. [Schellmann, 2018, vgl. S.3ff]

### 2.14.1 Carrier Aggregation

5G besitzt die besondere Fähigkeit extrem hohe Bandbreiten bereitzustellen, was unter dem Begriff *Carrier Aggregation* also Kanalbündelung benannt wird. Hierbei können verschiedene Frequenzbereiche zusammengefasst werden, wodurch die Datenrate pro Nutzer drastisch steigt. [Alkansha and et. al., 2014, vgl. S.1f]

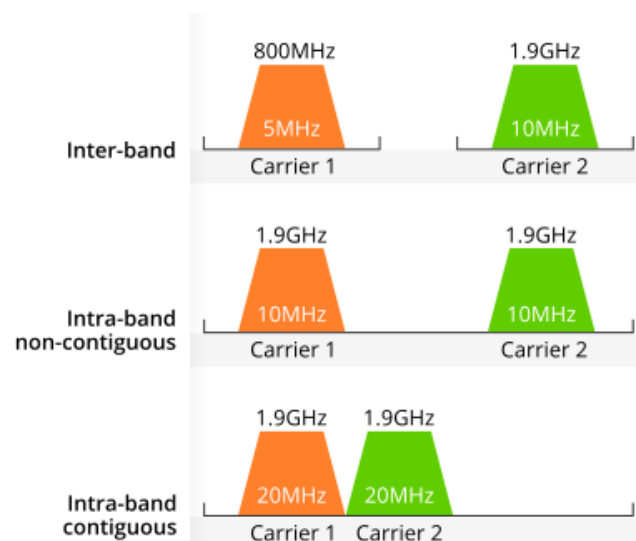


Abbildung 2.25: Carrier Aggregation - Kanalbündelung  
[SS7Ware, 2015]

Im Detail werden bei diesem Verfahren einem Nutzer mehrere einzelne Carrier, auch bekannt als Frequenzblöcke zugewiesen. Durch die Nutzung mehrerer Frequenzblöcke ist der Nutzer im Stande mit seinem mobilen Empfangsgerät seine maximal erreichbare Datenrate zu erhöhen. In Abbildung 2.25 sind nun drei Szenarien der möglichen Carrier Aggregation dargestellt. An oberster Stelle ist die **Inter-band** Aggregation zu sehen, mit welcher zwei verschiedene Frequenzbänder miteinander kombiniert werden können, um die Bandbreite zu erhöhen. In der Mitte ist die **Intra-band non-contiguous** Aggregation zweier nicht benachbarter Kanäle dargestellt, die im selben Frequenzband liegen. An unterster Stelle sieht man die **Intra-band**



**contiguous** Aggregation, die zwei nebeneinander liegende Kanäle im selben Frequenzband miteinander kombiniert. [Alkansha and et. al., 2014, vgl. S.3f]

Das Carrier Aggregation Verfahren bietet jedoch leider nicht nur Vorteile, denn eine hohe Datenrate geht gleichzeitig mit einer geringen Reichweite des Signals einher, da in der Kanalbündelung auch Frequenzen mit geringer Reichweite verwendet werden. Die Carrier Aggregation ist vom Konzept her in 5G nicht neu erfunden aber erweitert worden, da diese bereits bei 4G LTE angewendet wurde. [vgl. ebd.]

## 2.14.2 MIMO

Um eine weitere Steigerung der Kapazität einer drahtlosen Verbindung mit 5G zu ermöglichen, kommen größere Mehrantennensysteme, sogenannte *Multiple Input and Multiple Output* (MIMO), zum Einsatz. Dieses Verfahren bezeichnet in der Nachrichtentechnik die gleichzeitige Nutzung von mehreren Sende- und Empfangsantennen um höhere Datenrate zu erhalten. Die Grundlage hierfür bieten spezielle Kodierungsverfahren, die nicht nur die, zeitliche sondern auch die räumliche Dimension der Informationsübertragung nutzen. [Shafi, 2017, vgl. S.3f] MIMO Systeme können wesentlich mehr Bits/pro genutztem Hz Bandbreite übertragen und haben daher eine höhere Spektrale Effizienz als konventionelle *Single Input and Single Output* (SISO) Systeme. [Gesbert and Akhtar, 2002, vgl. S.1f]

Durch diese Technik lassen sich sowohl die Datenrate als auch die Qualität stark verbessern, ohne dass dabei die Frequenz erhöht wird. Da Frequenzen eine limitierte und wertvolle Ressource in der mobilen Datenübertragung sind, stellt das MIMO Verfahren eine effiziente Möglichkeit dar, ohne eine Frequenzerhöhung mehr Leistung zu erzielen. Mehr Bandbreite kann somit bei 5G mit größeren Mehrantennensystemen erzielt werden. Die effektive Datenrate kann bei MIMO 2x2 um den Faktor 1,9 und bei MIMO 4x4 um den Faktor 3,8 gesteigert werden. [Shafi, 2017, vgl. S.3f]

Nimmt man als Beispiel an, bei einer Kanalbandbreite von 20 MHz, würde eine MIMO 2x2 Antenne maximal 173 MBit/s in der Downloadgeschwindigkeit erreichen. Wäre die Antenne jedoch mit MIMO 4x4 ausgestattet, so würde diese bereits bis zu 298 MBit/s in der Downloadgeschwindigkeit erzielen. Vergleicht man dies nun mit einem LTE System, welches nur 5 MHz Kanalbandbreite besitzt, so würde dieses System nur 25 MBit/s an Downloadgeschwindigkeit besitzen. Natürlich muss hier deutlich erwähnt werden, dass dies die Systemkonfigurationen von Basisstationen sind und sich je nach mobilem Empfangsgerät und dessen Ausstattung die maximal erreichbare Downloadgeschwindigkeit weiter limitiert wird. Mobile Empfangsgeräte besitzen je nach Baujahr eine gewisse Gerätekategorie welche als *CAT* bezeichnet wird (mehr dazu in Kapitel 2.15).

## 2.14.3 Beamforming

Eine weitere Neuerung, welche mit 5G den Mobilfunkbereich revolutioniert hat, ist das sogenannte *Beamforming*. Durch die Mehrfachantennentechnik MIMO können nun gezielt mobile Empfangsgeräte mit einer Antennen versorgt werden. Hierbei wird die Antennensenderichtung derart verändert, dass das maximal mögliche Signal im Bereich des anvisierten mobilen Empfangsgerätes ankommt. [vgl. ebd. S.9f]

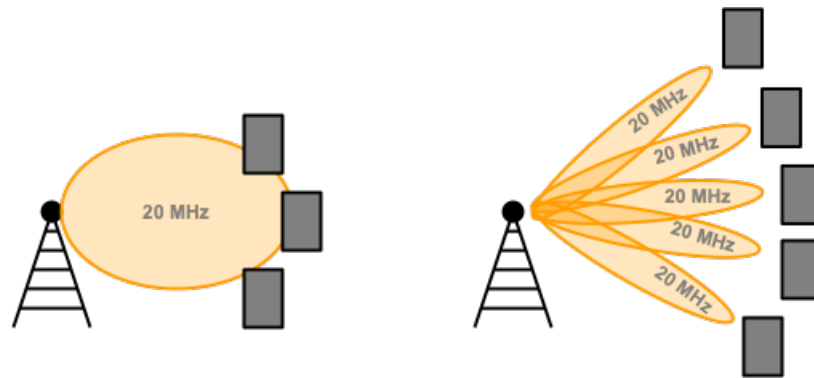


Abbildung 2.26: Beamforming  
[Thomas, 2020b]

Bisher sendeten Antennen ihre Signale in kreis- bis ellipsenförmigen Mustern aus. Beim *Beamforming* verändert sich diese Senderichtung derart, dass nur noch ein kleiner Bereich um das anvisierte Empfangsgerät versorgt wird. Dies hat den Vorteil, dass die benötigte Energie beim Sender reduziert wird und umgebende Störeinflüsse reduziert werden. Zusätzlich kann die Sendeleistung variable je nach Bedarf der Anwendung angepasst werden. Durch Beamforming wird das Signal von den Umgebungseinflüssen wie Rauschen und Interferenzen besser abgeschottet und liefert hierdurch ein klareres Signal. Dies ermöglicht die Übertragung von Daten an mehrere mobile Empfangsgeräte im gleichen Frequenzband. [Shafi, 2017, vgl. S.6f]

#### 2.14.4 Networklicing

Durch die immer individuelleren Bedürfnisse von Nutzern und Anwendungen, welche an Kapazität, Datenrate und Zuverlässigkeit gestellt werden, müssen Mobilfunknetze für die Zukunft flexibel gestaltet werden. Mit der nun in 5G neu zur Verfügung stehenden *Networklicing* Technik ist es erstmals möglich das Mobilfunknetz für unterschiedliche Bedürfnisse aufzuteilen. Hierbei ist es nun möglich, dass ein Netzbetreiber für bestimmte Kunden eine zugesicherte Datenkapazität oder Reaktionszeit (Latenz) garantiert. Unter dem Schlagwort *Network-as-a-Service* versteht man, wenn ein Netzbetreiber aus einer physischen Infrastruktur mehrere virtuelle Netze mit unterschiedlichen Eigenschaften an seine Kunden bereitstellt. [Campolo and et. al., 2017, vgl. S.1f]

#### 2.14.5 Mobile Edge Computing

Eine weitere Neuerung in der 5G Netzarchitektur besteht in der Verlagerung der erforderlichen Rechenleistung an die jeweilige Basisstation. Unter dem Fachbegriff *Mobile Edge Computing (MEC)* wird ein standardisiertes Konzept verstanden, wodurch Ressourcen flexibel in der Nähe der Nutzer genutzt werden. Für dieses Konzept müssen die Basisstationen mit IT Infrastruktur im betroffenen Gebiet erweitert werden. Um z.B. sehr geringe Reaktionszeiten beim vernetzten Fahren zu erreichen, könnten Sensoren in anderen Fahrzeugen angebracht werden, die bereits weit vor dem Fahrzeug fahren, welches gemessen werden soll, Daten versenden und somit messen, ob die Straße vor dem zu messenden Fahrzeug frei ist. Diese Informationen würden über das Mobilfunknetz an das Auto gesendet, um entsprechende Manöver einzuleiten. Eventuelle Überholmanöver könnten durch einen Server aufgrund der Messungen der Sensoren an den Autos berechnet werden. Da die IT Infrastruktur für die notwendige Rechenleistung in der

Nähe der Mobilfunksender aufgebaut ist, können die Informationen sehr schnell an die vernetzt fahrenden Autos weitergegeben werden. [Yaqiong and et. al., 2020, vgl. S.9f]

## 2.15 Gerätekategorien - CAT

Die Qualität sowie erreichbare Downloadgeschwindigkeit hängt bei der Nutzung von Mobilfunk von zwei Faktoren ab.

Auf der Netzwerkseite, welche die gesamte Telekommunikationsinfrastruktur für den Betrieb darstellt, werden von der 3GPP sogenannte Release Versionen definiert. Diese Versionen werden in Mobilfunkgenerationen von 2G bis aktuell 5G eingeteilt. Sie legen die kompletten technischen Rahmenbedingungen in Form von Standards fest. Diese Standards definieren wiederum, welche Eigenschaften die jeweilige Generation hinsichtlich maximale Breite des nutzbaren Frequenzspektrums für Down- und Upload, die maximale Datenübertragung, MIMO- Mehrantennenspezifikationen, Modulationsverfahren bis hin zur Kodierung sowie Netzaufbau, aufweisen. Die Mobilfunkgeneration mit 'G' abgekürzt, bezeichnet also die aktuell Fähigkeiten und Kapazitäten auf der Netzseite. [Rolf, 2015, vgl.]

In Abbildung 2.27 sind die verschiedenen Mobilfunkstandards von 2G bis dem aktuellsten Standard 5G anhand ihres Veröffentlichungszeitpunktes dargestellt. Zu sehen ist, dass jede Mobilfunkgeneration sich in mehrere Releases unterscheiden lässt, welche über die Zeit effizienter werden und somit die maximale Downloadkapazität gesteigert wird. In so einem Fall wird der Mobilfunkstandard in einen namensgleichen aber neuen Standard veröffentlicht wie z.B. bei 3G von UMTS zu HSPA und HSPA+ sowie auch bei 4G von LTE zu LTE Advanced.

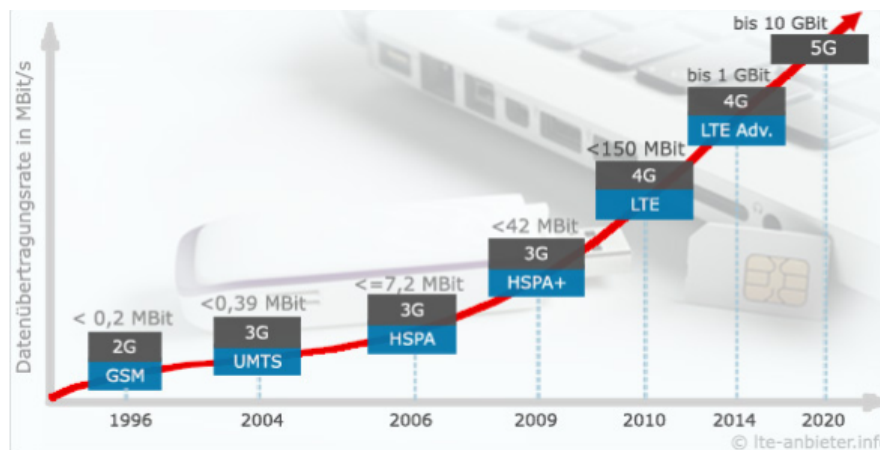


Abbildung 2.27: 3GPP Release Versionen

[Wildemann and Maik, 2021]

Auf der anderen Seite gibt es die auf dem Markt für den Endkunden produzierten mobilen Empfangsgeräte, welche innerhalb eines Mobilfunkstandards z.B. 4G mehrere Release Version beinhalten und diese bestimmten Gerätekategorien unterstützen. Für den Endnutzer sind im Endeffekt diese als CAT bezeichneten Gerätekategorien von Interesse, da sie ihm die maximale Downloadrate seines Gerätes, welche einen bestimmten Mobilfunkstandard unterstützen, definiert. Der erste verfügbare LTE-Standard in Deutschland wurde mit dem Release 8 veröffentlicht und unterstützte 5 verschiedene Gerätekategorien (CAT 1-5). Als Beispiel erreicht ein CAT 6

Gerät eine maximale Downloadgeschwindigkeit von 300 Mbit/s, während es bei einem CAT 18 Gerät bereits 1200 Mbit/s sind. Aktuell unterstützen das Release 12 die Gerätekategorien 11-21, wobei CAT-21 hierbei eine maximale Downloadgeschwindigkeit von bereits 1,4 GBit/s erreichen könnte. Detaillierte Informationen zu den Releases und Gerätekategorien (CAT) findet sich unter ([www.sqimway.com](http://www.sqimway.com)). [Rolf, 2015, vgl.]

### 3 Analyse mit Cellular Experts

In den folgenden Kapiteln soll mittels eines Mobilfunkmodells eine praktische Analyse von Mobilfunkdaten des BMLRT durchgeführt werden. Hierfür wird ein Mobilfunkmodell erweitert, das vom BMLRT entwickelt wurde. In folgenden Unterkapiteln wird auf den genauen Aufbau sowie Funktionsweise dieses Modells eingegangen, sowie anschließend anhand von zwei Untersuchungsgebieten verschiedenste Simulationen mit den wichtigsten Mobilfunkparametern durchgeführt.



Abbildung 3.1: Workflow Analyseschritte

Die Workflow Darstellung 3.1 zeigt die Arbeitsschritte, die in dieser Masterarbeit durchgeführt wurden, als auch die Datensätze welche verwendet wurden, um schließlich die Untersuchungsgebiete zu analysieren und die Forschungsfragen zu beantworten.

Das BMLRT nutzt eine Mobilfunkplanungssoftware namens Cellular Expert für die Analyse von Mobilfunkdaten. Sie stellt eine integrierte Erweiterung für das Geoinformationssystem ArcGIS dar. Cellular Experts wird vom BMLRT verwendet, da dieses die beste Integration einer Mobilfunkplanungssoftware in ArcGIS liefert. Mit ihr sind sowohl Mobilfunkanalysen als auch alle mit herkömmlichen GIS nutzbaren Analysefunktionen sowie Kartenerstellungen möglich. Herkömmliche Mobilfunkbetreiber verwenden hingegen für sie speziell hergestellte Software(siehe 3.1). In Österreich wird Cellular Experts erstmal vom BMLRT für Mobilfunkanalysen verwendet. Cellular Experts hat jedoch Kunden in mehr als 37 Ländern welche die Software für Mobilfunkplanungen nutzen.

### 3.1 Mobilfunkmodelle der Privatwirtschaft

In dieser Masterarbeit soll auch Bezug genommen werden, auf die Anwendung von Mobilfunkmodellen in der Privatwirtschaft. Hierfür wurde ein Fachgespräch am 19.Mai.2021 mit Diplom Ingenieur Thomas Maier, welcher die Position des Senior RAN Architect bei der österreichischen Magenta Telekom inne hat, geführt. In diesem Spezialkapitel soll veranschaulicht werden, mit welcher Software und Mobilfunkmodellen eine privatwirtschaftlich geführtes Großunternehmen wie die Magenta Telekom Mobilfunkprognosen erstellt. [Maier, 2021]

Seit 1990er Jahren hat die Magenta Telekom für Mobilfunkplanungen im Bereich Standortplanung sowie Verkehrsmodellierung das Planungstool *PegaPlan* von T-Systems in Verwendung. Pega Plan ist hierbei Teil der Softwareserie *PegaProducts* welche berühmt für seine Mobilfunknetzwerkplanungs Werkzeuge ist. Diese Softwareserie versorgt mehrere hundert Millionen Kunden mit Telekommunikationsnetzwerklösungen Weltweit. Mit PegaPlan werden Signalstärke Vorhersagen getroffen, Abdeckungsbereiche sowie die Qualität und Kapazität von Netzen analysiert. Es können Planungen zu Parametern und Frequenzen vorgenommen werden um die Netze zu optimieren. Statistiken und Reports können aus den analysierten Daten erzeugt werden. [vgl. ebd.]

Aktuell kommt es zu einem Umstieg von *PegaPlan* auf ein neues Planungstool Namens *Atoll*. Die Magenta Telekom hat sich für diesen Umstieg entschieden, da PegaPlan zu wenig Benutzerfreundlichkeit bot sowie die Integration von 5G Features unzureichend war. Auch Kostenersparnisse durch ein Tool einer externe Firma waren Gründe dafür. [vgl. ebd.]

Das Planungstool *Atoll* wurde von der Firma *Forsk* entwickelt und stellt eine der bekanntesten Software Produkte im Bereich Mobilfunkplanung dar. Sie ist bei allen größeren Firmen, welche mit Mobilfunkplanungen und Vorhersagen zu tun haben, zu finden. Atoll wird als Plattform beworben welche mit mehreren Technologien Netze designen und optimieren kann. In ihr sind vereinheitlichte Verkehrsmodelle, Monte Carlo Simulatoren sowie Funktionen für die automatische Zellenplanung integriert. Hierbei werden alle Mobilfunktechnologien von 2G, 3G, 4G sowie dem neuesten 5G Standard bis hin zu Micro, Macro und klein Zellen sowie Wi-Fi Hot Spots unterstützt. Für die neuste Mobilfunktechnologie 5G New Radio (NR) werden Microwellen Ausbreitungsmodelle, das massive MIMO sowie das 3D Beamforming unterstützt. Atoll besitzt

ein In-Building Modul, mit welchen Gebäude indoor sowie outdoor modelliert werden können. Hiermit können einzelne Stockwerke sowie Gebäudeteile auf die dortige Mobilfunkversorgung analysiert werden. Atoll ist Modular aufgebaut und besteht aus 6 spezialisierten Modulen. [Maier, 2021, vgl.]

**Atoll Core** ist das zentrale Modul, welches das Benutzer Interface, die GIS Features, die Ausbreitungsmodelle sowie das Datenmanagement bereitstellt. Alle weiteren Module arbeiten auf dem Atoll Core.

**Atoll Live** ermöglicht das Anreichern der Modelle mit Live Netzwerkdaten, wie Benutzer Equipment, Sektor- als auch Crowdsourced -Daten um die Genauigkeit der Vorhersagen zu steigern. Mit der Zellenplanungsfunktion (ACP) können Stationen automatisiert selektiert, optimiert sowie konfiguriert werden.

**Atoll in Building** ermöglicht indoor Drahtlosenetzwerke zu planen und umzusetzen.

**Atoll Microwave** ist für die Modellierung von Backhaul als auch Übertragungsnetzwerken zuständig. Mit diesem Modul sind fortgeschrittenere Pfadverlust LOS Modellierungen möglich.

**Aster and Aster mmWave** sind fortgeschrittene Ausbreitungsmodelle welche Modellierungen von über und unter 6 GHz ermöglichen.

**CrossWave** ist das Hochleistungsausbreitungsmodell welches von Orange Labs entwickelt wurde und die Einbindung von ruralen bis dichten urbane Landschaftstypen erlaubt.

Für die Modellierung von Mobilfunkdaten und Basisstationen werden von der Magenta Telekom auch weitere Daten in Form von Landnutzung, digitalen Höhenmodellen sowie Gebäudedaten, die durch Flugzeugbefliegungen aufgenommen wurden, verwendet. Bis jetzt werden für die Landnutzungsmodellierung proprietäre Daten verwendet. Jedoch steht ein Wechsel auf die Corine Landcover Daten der Europäischen Union, die auch in dieser Arbeit genutzt werden, im Raum. Magenta Telekom kritisiert jedoch, dass die Generalisierung der Corine Landcover Daten sehr grob ist und es in gewissen Siedlungsbereichen notwendig ist genauere Daten zu verwenden. Auch die Höhendaten bezieht Magenta Telekom von der [www.data.gv.at](http://www.data.gv.at) Plattform und bezieht hier die Daten der 10 Meter Höhendatenbank, die ebenfalls in dieser Masterarbeit Verwendung finden. Magenta Telekom verwendet vorerst keine Gebäudedaten um Abschattungseffekte zu modellieren, jedoch sollen in naher Zukunft die digitalen Oberflächenmodelle der Länder, dazu genutzt werden um auch diese zu modellieren. [Maier, 2021, vgl.]

Im Bezug auf die verwendete Auflösung von Vorhersagemodellen, wird hier betont, dass die räumliche Auflösung immer vom Einsatzzweck abhängt. So wird im alpinen Bereich eine niedrigere räumliche Auflösung für Vorhersagemodelle benötigt, als z.B. im städtischen Bereich wo Gebäude und Straßenzüge mit 5 Metern oder sogar 1 Meter Auflösung modelliert werden um Ray Tracing Modelle korrekt zu berechnen. [Maier, 2021] betont, dass für statistische Modelle, jedoch eine Auflösung von 10 Meter ausreichend sind, da es ansonsten zu einer künstlich erzeugten Vorhersagegenauigkeit kommt. [Maier, 2021, vgl.]



## 3.2 Das Mobilfunk Modell - MoNGA

Das Breitbandbüro des BMLRT<sup>1</sup> hat ein internes Mobilfunk Modell entwickelt, um die Breitbandversorgung im Mobilfunk mittels GIS Daten zu simulieren, und Download- sowie Versorgungsberechnungen durchführen zu können.

*“Um eine realitätsnahe Darstellung und Überprüfung der Mobilfunkversorgung zu ermöglichen, hat das BMVIT (seit 01.Jänner 2020 BMLRT) ein Mobile Network Prediction Model (MoNGA) entwickelt, [Grabler, 2018, S.7]*

Die Abkürzung *MoNGA* steht für *Mobile Next Generation Access* und basiert auf einem Mobilfunkmodell des Netzplanungstools *Cellular Experts* für kabellose Mobilfunkstandortplanung, welches Methoden bereitstellt, um eine grobe Abschätzung der bestehenden Mobilfunkabdeckung eines Gebietes zu geben. Mit Hilfe dieses Modells kann die Mobilfunkversorgung eines Bereiches überprüft werden sowie realitätsnahe Darstellungen der Mobilfunkversorgung in Form von Karten und Statistiken erstellt werden. Das Modell wird mit 5 thematischen Datensätzen angereichert:

- HCM-Daten (werden im Kapitel 3.5 näher beschrieben)
- Drive-Test Daten (genaue Messung der Signalwerte eines Mobilfunkstandortes)
- Landnutzungs Daten (Corine Landcover)
- Geländehöhen Daten (digitales Geländemodell)
- Hindernisse (in Form von OSM Gebäudegrundrissen)

Das Mobilfunkmodell MoNGA wird hierbei vom BMLRT für verschiedenste Szenarien verwendet, um innerhalb des Ministeriums einen Wissensgewinn im Bezug auf die Österreichische Mobilfunkversorgung in den verschiedensten Regionen abhängig von deren Bebauung, Höhe, Neigung sowie Landnutzung zu erhalten. Mithilfe dieses Modells ist es erstmals möglich die gemeldeten Daten der Mobilfunkbetreiber, mit Analysen zu verifizieren. Hierbei kann die bestehende Mobilfunkversorgung eines Mobilfunkbetreibers in einem definierten Gebiet verglichen werden. Außerdem kann der Mobilfunkausbau, im Zusammenhang mit der Breitbandförderung (BBA2020)<sup>2</sup> besser eingeschätzt werden. Es können auch Green-Field-Szenarien für den Ausbau gerechnet werden, z.B in Gebieten, wo die Kosten eines Festnetzausbaues mit FTTP auch mittels Förderungen nicht rentabel sind.

Das Mobilfunkmodell MoNGA kann mit einem Drive-Test Gerät kalibriert werden, welches es ermöglicht Messdaten in der Realität eines Mobilfunkmasten zu messen. Mithilfe dieser Daten ist es möglich die Ergebnisse von MoNGA zu kalibrieren, um verbesserte Darstellungen der realen Mobilfunkversorgung zu erhalten (mehr dazu in Kapitel 3.4). MoNGA basiert auf einem GIS System von der Firma *ESRI* namens ArcGIS und besteht wesentlich aus der dafür im

---

<sup>1</sup>Stand 16.01.2020 evtl. Änderungen vorbehalten durch politische Verschiebungen der Ressorts und Gruppen zwischen Verkehrsministerium und Landwirtschaftsministerium als Folge der Nationalratswahl vom 29.09.2019

<sup>2</sup>Breitband Austria 2020 ist das Breitbandförderprogramm von 2013-2020, welches Next Generation Access (NGA) Breitbandinfrastrukturprojekte in Österreich fördert. Nachfolgerprogramm stellt das Breitband Austria 2030 (BBA2030) dar.



speziellen entwickelten Erweiterung der litauischen Firma *Cellular Experts*. Mit der Erweiterung von Cellular Experts für ArcGIS ist es möglich in ArcGIS Mobilfunkdaten zu verarbeiten, analysieren und Kartenprodukte sowie Statistiken zu erstellen. Mehr zu den genauen Mobilfunkdaten folgt in Kapitel 3.5.

Wie in Kapitel 2.4 bereits erläutert, werden mittels des Mobilfunkmodells MoNGA verschiedenste Mobilfunkparameter erstellt und in Form von Karten und Statistiken dargestellt. Diese Parameter sind die RSRP, RSRQ sowie SINR. [Grabler, 2018, S.9f]

In dieser Masterarbeit wird das Modell MoNGA von mir validiert und analysiert welchen Einfluss DriveTest Kalibrierungen auf Mobilfunkberechnungen haben. Außerdem wird getestet in wie weit sich Kalibrierungen auf ein anderes Gebiet übertragen lassen. Für die Analyse werden alle notwendigen Datensätze aufbereitet und analysiert. Anschließend werden diese miteinander kombiniert und sowohl statistisch als auch in Form von Karten dargestellt.

## 3.3 Landschaftsklassifizierung

Im Mobilfunkmodell MoNGA fließen neben den Versorgungsdaten (HCM Daten) der Mobilfunkbetreiber und der DriveTest Daten aber auch Landschaftscharakteristika mit ein. Unter Landschaftscharakteristika wird in dieser Masterarbeit verstanden, wie die Landnutzung beschrieben werden kann sowie welche Geländeunterschiede vorhanden sind.

Solche Landschaftscharakteristika, welche die geographischen Gegebenheiten einer Region widerspiegeln, werden in dieser Masterarbeit im Modell MoNGA in Form der Corine Landcover 2012 Daten als auch aus einem digitalen Geländemodell abgeleitet. Durch die Aufbereitung der Landnutzungsdaten als auch Höhendaten sollen somit Landschaftscharakteristika der zu untersuchenden Regionen beschrieben werden.

### 3.3.1 Corine Landcover

Im Rahmen des EU-weiten CORINE-Programmes werden digitale Satellitenbilder großflächig erfasst und ausgewertet, um einen flächendeckenden Landnutzungsgeodatenatz für Europa zu erhalten. Mit den Corine Landcover (CLC) Daten kann also die Oberflächenstruktur des jeweiligen Terrains und der für Mobilfunk wichtigen Dämpfungseigenschaften modelliert werden.

Die Corine Landcover Daten bestehen aus 44 Landnutzungskategorien, die in drei Level Bereiche (Level 1 - 3) aufgeteilt sind (siehe hierfür Tabelle 3.1). In Österreich befinden sich jedoch nur 28 dieser 44 Klassen aufgrund seiner Landschaftsbeschaffenheit. Ausgehend von Level 1 wird von groben Kategorien (Bebaute Flächen, Landwirtschaft) über Level 2 mit mittlereren Kategorien (Städtisch geprägte Flächen, Ackerflächen, Dauerkulturen, Strauchvegetation etc.) bis hin zu Level 3 mit Detailkategorien (durchgängig städtische Prägung, Abbaufächen, Laubwälder etc.) unterschieden.

Auf der offiziellen Homepage des Umweltbundesamtes [www.umweltbundesamt.at](http://www.umweltbundesamt.at) sind alle Informationen zum CORINE Programm der Europäischen Union zu finden. Weiteres können unter [www.umweltbundesamt.at/opendata](http://www.umweltbundesamt.at/opendata) alle wichtigen Links gefunden werden, um Landnutzungsdaten und alle damit in Verbindung stehenden Datensätze bequem online über das

OpenData Portal zu beziehen. Diese internationale Landnutzungsklassifikation wird in weiterer Folge für die Mobilfunkberechnungen in zusammengefasste Dämpfungsklassen aggregiert und hat auf die Ergebnisse der Analysen einen wesentlichen Einfluss.

Die Corine Landcover Klassen die bei den Mobilfunkanalysen berücksichtigt werden, sind logischerweise limitiert auf jene Klassen, die im kleinräumigen gerade betrachtet werden. Demnach beeinflussen das Signal einer Antenne nur jene Landnutzungen, die sich im jeweiligen Empfangsradius der Antenne befinden.

1. Bebaute Fläche	1.1. Städtisch geprägte Flächen	1.1.1. durchgängig städtische Prägung 1.1.2. nicht durchgängig städtische Prägung
	1.2. Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	1.2.1. Industrie/Gewerbeflächen 1.2.2. Straßen/Eisenbahnnetze, funktionell zugeordnete Flächen 1.2.3. Hafengebiete 1.2.4. Flughäfen
	1.3. Abbauflächen, Deponien, Baustellen	1.3.1. Abbauflächen 1.3.2. Deponien, Abraumhalden 1.3.3. Baustellen
	1.4. Künstlich angelegte nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen	1.4.1. Städtische Grünflächen 1.4.2. Sport/Freizeitanlagen
2. Landwirtschaft	2.1. Ackerflächen	2.1.1. Nicht bewässertes Ackerland 2.1.2. Regelmäßig bewässertes Ackerland 2.1.3. Reisfelder
	2.2. Dauerkulturen	2.2.1. Weinbauflächen 2.2.2. Obst/Beerenobstbestände 2.2.3. Olivenhaine
	2.3. Grünland	2.3.1. Wiesen und Weiden
	2.4. Heterogene landwirtschaftliche Flächen	2.4.1. Einjähr. Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen 2.4.2. Komplexe Parzellenstruktur 2.4.3. Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Vegetation von signifikanter Größe 2.4.4. Land/Forstwirtschaftliche Flächen
3. Wälder und naturnahe Flächen	3.1. Wälder	3.1.1. Laubwälder 3.1.2. Nadelwälder 3.1.3. Mischwälder
	3.2. Kraut/Strauchvegetation	3.2.1. Natürliches Grünland 3.2.2. Heiden und Moorheiden 3.2.3. Hartlaubbewuchs 3.2.4. Wald/Strauch Übergangsstadien
	3.3. Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation	3.3.1. Strände, Dünen, Sandflächen 3.3.2. Felsflächen ohne Vegetation 3.3.3. Flächen mit spärlicher Vegetation 3.3.4. Brandflächen 3.3.5. Gletscher/Dauerschneegebiet
4. Feuchtflächen	4.1. Feuchtflächen im Landesinneren	4.1.1. Stümpfe 4.1.2. Torfmoore
	4.2. Feuchtflächen an der Küste	4.2.1. Salzwiesen 4.2.2. Salinen 4.2.3. In der Gezeitenzone liegende Flächen
5. Wasserflächen	5.1. Wasserflächen im Landesinneren	5.1.1. Gewässerläufe 5.1.2. Wasserflächen
	5.2. Meeresgewässer	5.2.1. Lagunen 5.2.2. Mündungsgebiete 5.2.3. Meer und Ozean

Tabelle 3.1: Corine Landcover Nomenklatur

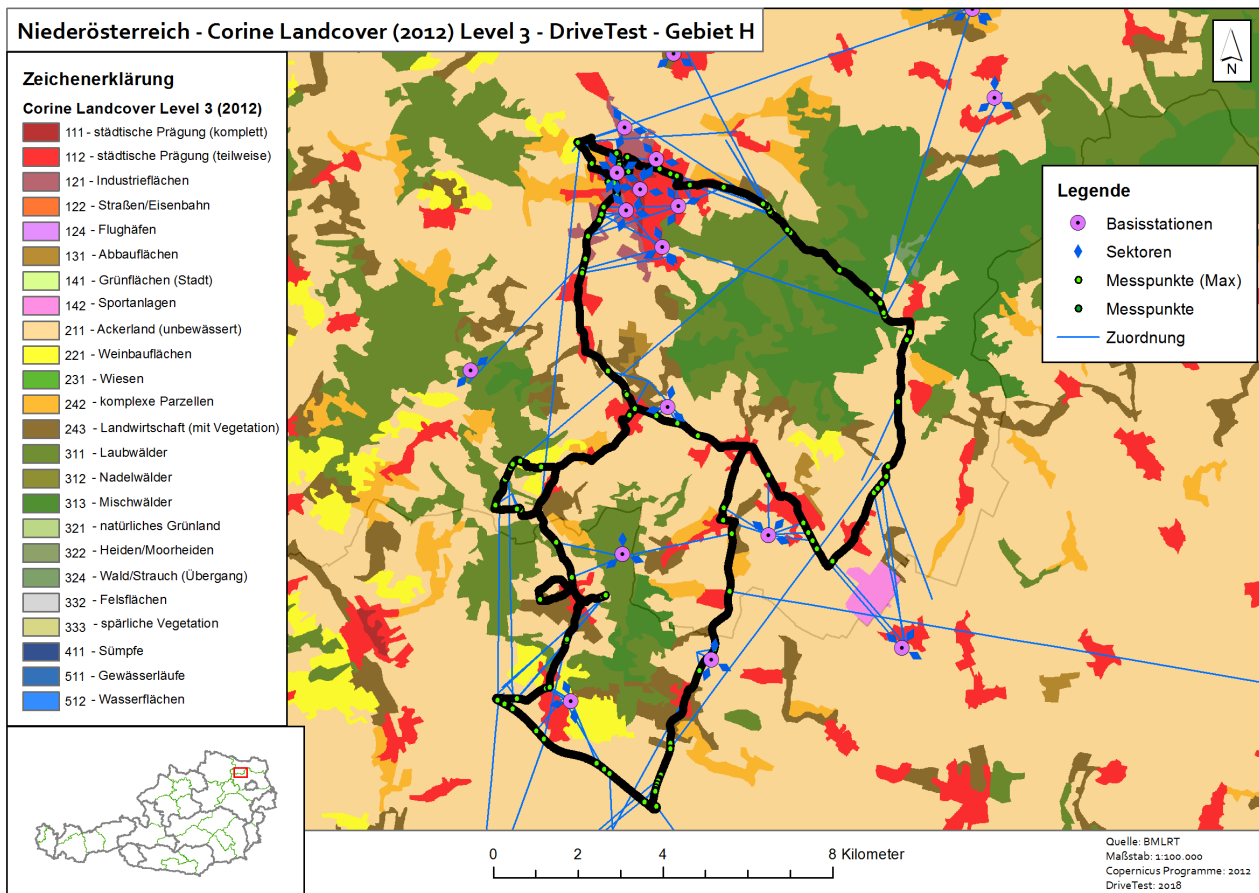


Abbildung 3.2: Beispiel DriveTest mit Corine Landcover Klassifizierung  
Messungen von [Grabler, 2018]

In Karte 3.2 ist nun ein Beispiel eines Gebietes dargestellt in welchem DriveTest Messungen, in Form von Punkten um die dort befindlichen Basisstationen, mit ihren Antennen gemessen wurden.

Mittels der DriveTest Messungen, wie in Abbildung 3.2 zu sehen ist, werden die verschiedensten Landnutzungskategorien durchfahren. Da sich der untersuchende Bereich auf Niederösterreich beschränkt, werden die Landnutzungsdaten die für gesamt Österreich vorliegen, mit einem Geoverarbeitungswerkzeug von ArcGIS auf das Bundesland Niederösterreich zugeschnitten. Als nächstes werden die Corine Landcover Daten welche original als Shapes also Flächen vorliegen, in einen einheitlichen Raster mittels des Geoverarbeitungswerkzeuges *Feature to Raster* umkonvertiert. Dies ist notwendig da die digitalen Höhendaten aus dem DTM auch im Rasterformat vorliegen und das weitere Arbeiten nur im selben Format praktikabel ist.

Da die beiden Datensätze schließlich miteinander kombiniert werden sollen, müssen diese die exakt gleiche geographische Ausdehnung in jedem Pixel besitzen, um eine Kategorisierung sowohl nach Höhe als auch nach Landnutzung zu erzielen. Um dies zu gewährleisten wird der Ausgangsraster der Corine Landcover Daten noch an den DHM Raster *gesnappt* also angeglichen. Die zugeschnittenen Corine Landcover Landnutzungsdaten sind in Karte 3.3 nach Level 3 und ihrer jeweiligen Klassenbezeichnung dargestellt.

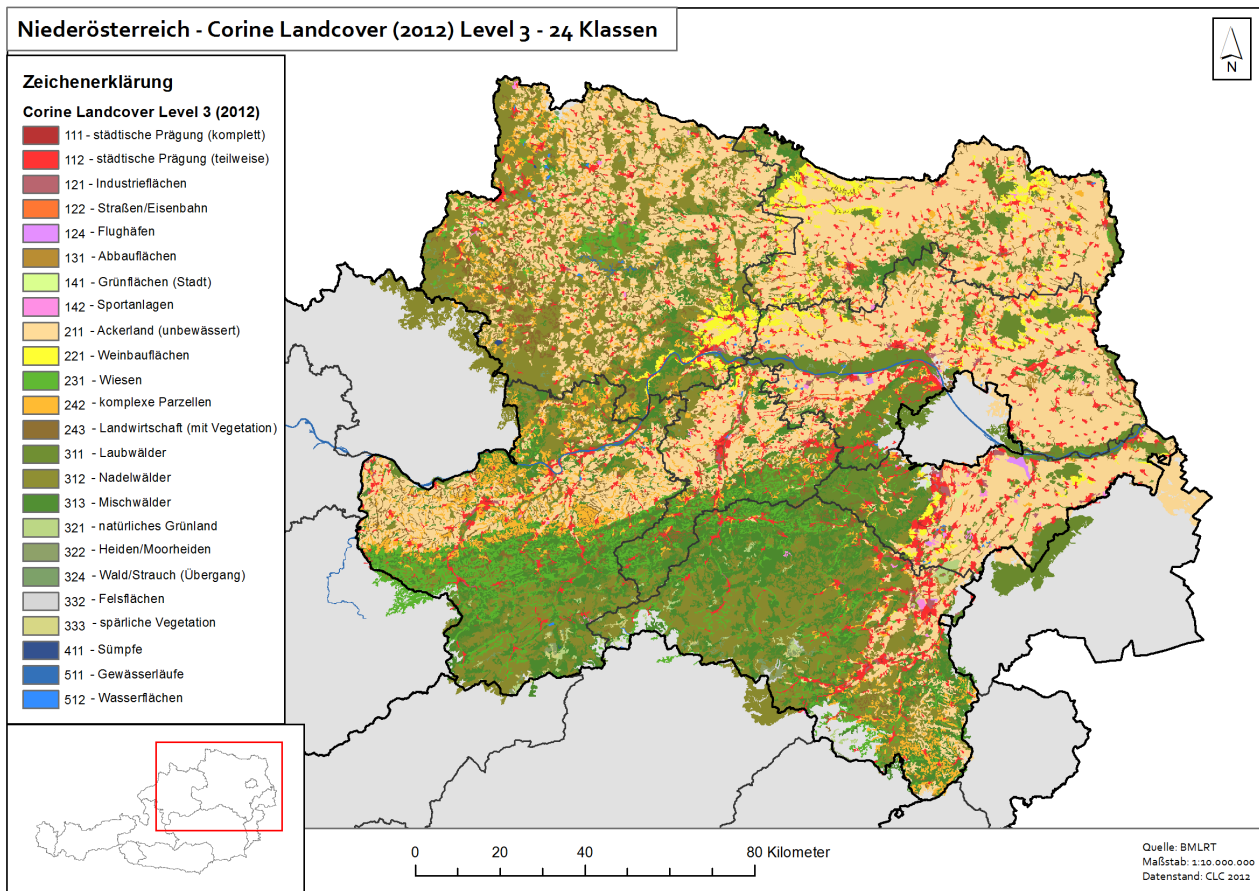


Abbildung 3.3: Corine Landcover Raster von Niederösterreich

Obwohl in den Corine Landcover 28 Klassen in Österreich vorhanden sind, kommen in Niederösterreich aufgrund der Bodenbeschaffenheit nur 24 dieser Klassen vor.

Im nächsten Kapitel werden die Corine Landcover Klassen in durch die ITU definierte Dämpfungsklassen aggregiert und weiteres untersucht ob es zu statistischen Häufungen in gewissen Klassen kommt.

### 3.3.1.1 Reklassifizierung Corine Landcover

Da die Corine Landcover Daten mit 24 verschiedenen Klassen, in Niederösterreich noch immer eine zu hohe Anzahl darstellen, um eine klare und einfache Klassifizierung zu erzeugen, müssen diese weiter aggregiert werden. Hierfür werden mittels Python Code die Klassen zusammengefasst und zu neuen sogenannten Dämpfungsklassen zugeordnet (im engl. clutter). Als *Clutter* werden alle Objekte bezeichnet die Gebäude oder Vegetation aber keinen Teil der Erdoberfläche darstellen. *“Clutter Objekte, welche eine Mobilfunkstation umgeben, können einen signifikanten Einfluss auf die Signalreichweite haben,”* [ITU-R, 2017, S.4].

Über das Geoverarbeitungswerkzeug *Reclassify* in ArcGIS Pro, können die ursprünglichen Landnutzungsklassen zusammengefasst werden, indem ähnlichen Kategorien zu neuen Dämpfungskategorien zugeordnet werden. Diese Dämpfungskategorien wurden von der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) definiert und von Cellular Experts in dessen Workflow ebenfalls verwendet. [Sliuzevicius, 2018, K.3, S.1].

Der neue Landnutzungsraster welcher aus den Dämpfungskategorien besteht, soll auch die zuvor verwendeten Corine Landcover Klassen sowie deren Bezeichnungen für die bessere Übersicht hinzugefügt werden.

```

1  ### CLC L3 Codes(Text) from Clutter ID
2
3  ▼ def myCalc(Clutter_ID):
4      if (Clutter_ID == 1 ):
5          return "321/332/333/511/512/335"
6      elif (Clutter_ID == 2):
7          return "231/243/122/221/322/244/324"
8      elif (Clutter_ID == 3):
9          return "211/242/222/411/412"
10     elif (Clutter_ID == 4):
11         return "131/124/132/133"
12     elif (Clutter_ID == 5):
13         return "141"
14     elif (Clutter_ID == 6):
15         return "142/123/311"
16     elif (Clutter_ID == 7):
17         return "312/313"
18     elif (Clutter_ID == 8):
19         return "111/121"
20     else:
21         return "112"

```

Abbildung 3.4: Zuordnung CLC Codes zu Clutter ID

```

1  ▼ def myCalc(Value):
2      if (Value == 1 ):
3          return "Water"
4      elif (Value == 2):
5          return "Open"
6      elif (Value == 3):
7          return "Semi_Open_low"
8      elif (Value == 4):
9          return "Semi_Open_high"
10     elif (Value == 5):
11         return "Villiage"
12     elif (Value == 6):
13         return "Forest_low"
14     elif (Value == 7):
15         return "Forest_high"
16     elif (Value == 8):
17         return "Urban"
18     else:
19         return "Suburban"

```

Abbildung 3.5: Zuordnung Clutter Bezeichnung zu Clutter ID

```

1  ▼ def myCalc(Clutter_ID):
2      if (Clutter_ID == 1 ):
3          return "Sparsely_vegetated_areas / Water_courses/Water_bodies"
4      elif (Clutter_ID == 2):
5          return "Road_and_rail_networks_and_associated_land/Non_irrigated_arable_land/Vineyards / Pastures / Natural_grasslands"
6      elif (Clutter_ID == 3):
7          return "Fruit_trees_and_berry_plantations / Complex_cultivation_patterns / Land_principally_occupied_by_agriculture_with_si / Moors_and_heath"
8      elif (Clutter_ID == 4):
9          return "Mineral_extraction_sites / Construction_sites"
10     elif (Clutter_ID == 5):
11         return "Discontinuous_urban_fabric / Airports / Green_urban_areas / Agro_forestry_areas"
12     elif (Clutter_ID == 6):
13         return "Port_areas / Sport_and_leisure_facilities / Broad_leaved_forest"
14     elif (Clutter_ID == 7):
15         return "Continuous_urban_fabric / Coniferous_forest / Mixed_forest"
16     elif (Clutter_ID == 8):
17         return "Industrial_or_commercial_units"
18     else:
19         return "Loose_obstruction"

```

Abbildung 3.6: Zuordnung CLC Beschreibung zu Clutter ID



In Abbildung 3.2 sind auf der linken Seite die neu erstellten Dämpfungsklassen zu sehen. Daneben befinden sich die für jede Dämpfungsklasse zugehöriger Name. In der Mitte stehen die originalen Level 3 Corine Landcover Klassen. Rechts ist die genaue Bezeichnung der jeweiligen Landnutzungsklasse beschrieben. Die originalen 24 Corine Landcover Klassen wurden zu acht Klassen zusammengefasst, welche ähnliche Dämpfungseigenschaften auf Mobilfunksignale haben sollten. Die abschließende Tabelle mit den neu klassifizierten Corine Landcover Klassen und den zusätzlichen alten Klassenbeschreibungen aus den originalen Corine Landcover Klassen ist in Tabelle 3.2 zu sehen. Die Dämpfung, die von [Sliuzevicius, 2018, S.3-2] so eingeteilt wurde, ist für die Frequenzbereiche mit 900 MHz sowie 1900 MHz der neuen Landbedeckungsklassen in Tabelle 3.3 ersichtlich. Die Zusammenfassung der Corine Landcover Klassen zu den 8 Clutter Klassen wurde nach [Grabler, 2018] verwendet.

Clutter Klasse	Clutter Name	CLC Code	CLC Beschreibung
1	Water	321/332/333/511/512/335	Sparsely vegetated areas/Water courses/Water bodies
2	Open	231/243/122/221/322/244/324	Road and rail networks and associated land/Non-irrigated arable land/Vineyards/Pastures/Natural grasslands
3	Semi Open (Low)	211/242/222/411/412	Fruit trees and berry plantations/Complex cultivation patterns/Land principally occupied by agriculture, with si*/Moors and heat
4	Semi Open (High)	131/124/132/133	Mineral extraction sites/Construction sites
5	Villiage	141	Discontinuous urban fabric/Airports/Green urban areas/Agro-forestry areas
6	Forest (Low)	142/123/311	Port areas/Sport and leisure facilities/Broad-leaved forest
7	Forest (High)	312/313	Continuous urban fabric/Coniferous forest/Mixed forest
8	Urban	111/121	Industrial or commercial units
9	Suburban	112	Loose obstruction

Tabelle 3.2: Clutter Tabelle Zuordnung  
[ITU-R, 2017] nach [Grabler, 2018]

Clutter Klasse	Clutter Name	Höhe [m]	Dämpfung 900 MHz	Dämpfung 1900 MHz
1	Water	0	0.1	2.9
2	Open	1	3	4.2
3	Semi Open (Low)	2	11.1	16.6
4	Semi Open (High)	3	11.1	16.6
5	Villiage	10	12.6	15.2
6	Forest (Low)	15	11.6	16.9
7	Forest (High)	20	11.6	16.9
8	Urban	30	22.6	28.1
9	Suburban	12	17.6	23.1

Tabelle 3.3: Clutter Tabelle Dämpfung  
[ITU-R, 2017] nach [Grabler, 2018]

Schließlich sind in Abbildung 3.3 die Dämpfungsklassen mit den Klassennamen, der angenommenen Höhe dieser Klasse sowie der nominalen Dämpfungsabweichung für Mobilfunksignale gespeichert.

In Karte 3.7 sind nun diese Dämpfungsklassen nach Dämpfungswert dargestellt. Hierbei sieht man ein Bild in welchem gelbe sowie dunkelgrüne Zonen hervorstechen. Sie repräsentieren Wald als auch halb offene Flächen. Außerdem sind gruppierte rote Flächen gut sichtbar, die dichter bebaute Siedlungsgegenden darstellen. Diese Klassen werden in späteren Analysekapiteln noch im Detail analysiert.

Nun soll die Frage beantwortet werden: Welche der Dämpfungsklassen kommt am häufigsten innerhalb einer Gemeinde in Niederösterreich vor?

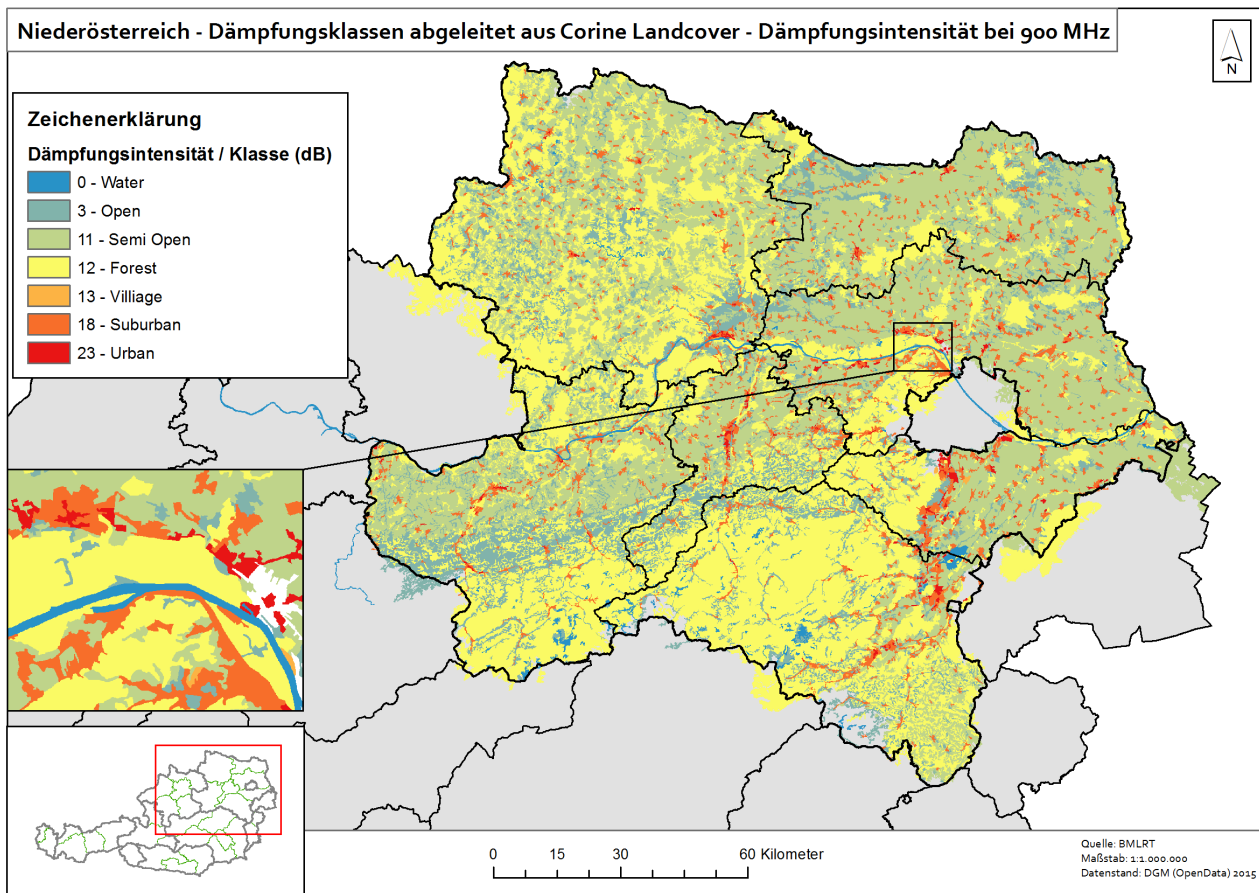
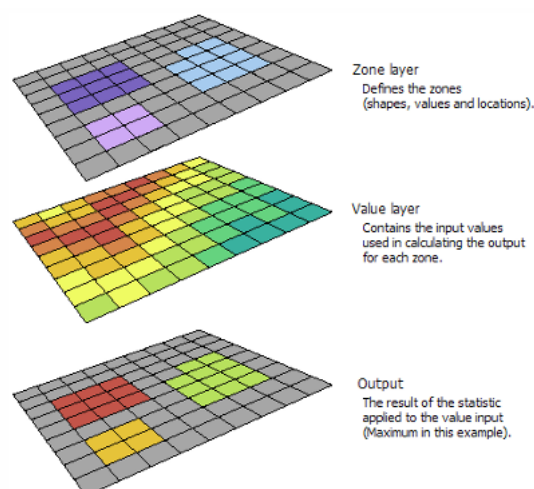


Abbildung 3.7: Dämpfungsklassen pro Raster

Die Zonale Statistik berechnet einen Statistiktyp wie (Mittelwert, Durchschnitt) auf Basis einer Bezugsfläche bzw. Zonen, welche dem Geoverarbeitungswerkzeug als Datensatz zur Verfügung gestellt werden muss. Sie ermöglicht einen statistisch räumlichen Überblick, mittels eines statistischen Maßes, wie z.B dem überwiegenden Anteil, anhand von größeren räumlichen Einheiten, wie z.B der Gemeindegrenzen, zu erhalten.


 Abbildung 3.8: Zonale Statistik  
 [ArcGIS, 2021b]

In Karte 3.9 ist nun eine Statistik über die Dämpfungsraster pro Gemeinde in Niederösterreich dargestellt. Hierbei wird die häufigste Dämpfungsklasse von allen vorhandenen Zellen innerhalb einer Gemeinde berechnet. Die Karte 3.8 gibt einen schnellen Überblick über die häufigsten Dämpfungsklassen innerhalb der Niederösterreichischen Gemeinden. Dies soll die Interpretierbarkeit aus Karte 3.7 erleichtern und einen räumlichen Überblick bieten. Hierbei kann anhand der aggregierten Dämpfungsklassen bereits eine gewisse Landschaftscharakteristik durch das Merkmal der Landnutzung gewonnen werden. Neben der Zonalen Statistik gibt es noch die Fokale Statistik, mit welcher in ArcGIS Statistische Kennwerte auf räumlichen Datensätzen berechnet werden können. Im Unterschied hierbei berechnet jedoch die Fokale Statistik nicht auf Basis von Zonen, sondern anhand von Entfernungsangaben um die Eingaberaster.

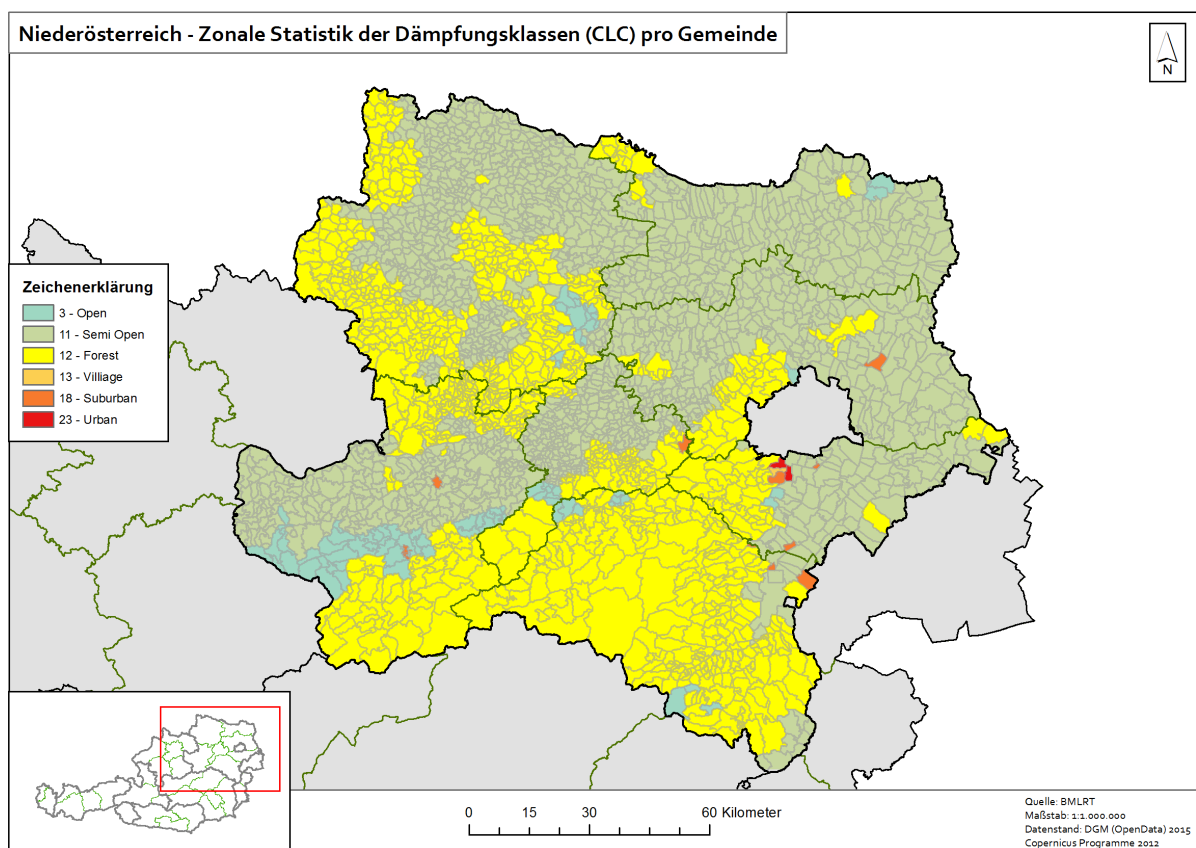


Abbildung 3.9: Dämpfungsklassen pro Gemeinde

In weiterer Folge wird in dieser Masterarbeit die Bezugsgröße von den Statistik Austria Rastern verwendet, um eine homogene Verteilung der berechneten Zonen zu ermöglichen.

### 3.3.2 Digitales Geländemodell

Um eine Klassifikation aus einer Höhencharakteristik des Geländes zu erstellen, muss überlegt werden wie, das Gelände im Untersuchungsgebiet am besten anhand seiner Höhe bzw. Neigungen klassifiziert werden kann. Bei einer klassischen Einteilung wäre hierbei anzunehmen, dass gewisse Gebiete hügelig andere wiederum flach sind. Es gibt die klassischen Tallagen mit ihren tiefen einschnitten in das Gelände sowie Gebiete, die ab dem Alpenvorland Richtung Westen gehend eine verstärkt durchgehende Berglandschaft aufweisen.



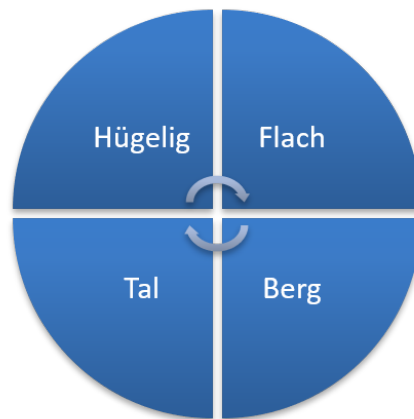


Abbildung 3.10: grobe Landschaftscharakteristik

Aber wie lassen sich solche grobe Charakteristika im Bezug auf Höhe und Neigung nun bestmöglich in ein Modell integrieren? Parameter *Flach* bzw. *Berg* haben die unterschiedlichsten Ausprägungen in Österreich und können ihrerseits wieder in viele verschiedene Subkategorien mit diversen Charakteristika unterteilt werden. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel das digitale Geländemodell zuerst in Neigungen umgewandelt und daraus ein Neigungsvariabilitätsindex erzeugt, um herauszufinden ob sich Neigungen dazu verwenden lassen Gebiete anhand der Neigung abzugrenzen. Daraufaufgehend wird aus den Höhen des digitalen Geländemodells der sogenannte Rauigkeitsindex (TRI) abgeleitet. Schließlich wird geprüft welche Datensätze miteinander kombiniert werden können, um möglichst wenige Klassen welche sich klar abgrenzen, zu erhalten.

Es ist zu unterscheiden zwischen digitalem Geländemodell, welches rein das Terrain der Erde mit seinen Höhenunterschieden darstellt sowie dem digitalen Oberflächenmodell, welches das Terrain inklusive aller sich auf der Erdoberfläche befindlichen Objekte, wie z.B. Bäume und Häuser darstellt.

Mit dem digitalen Geländemodell (DGM) ist es möglich Höhen sowie berechnete Neigungen in das Mobilfunkmodell MoNGA mit einfließen zu lassen, um Geländehöhenunterschiede in den Berechnungen zu berücksichtigen.

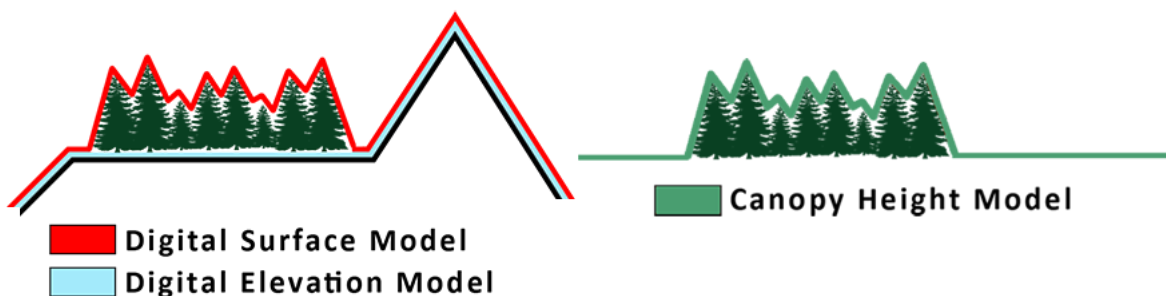


Abbildung 3.11: Oberflächenmodell, Geländemodell Vergleich  
[Humboldt, 2021]

In dieser Arbeit wird mit dem digitalen Geländemodell gearbeitet, um Höhendifferenzen im Gelände zu modellieren und in die Mobilfunkergebnisse einfließen zu lassen.

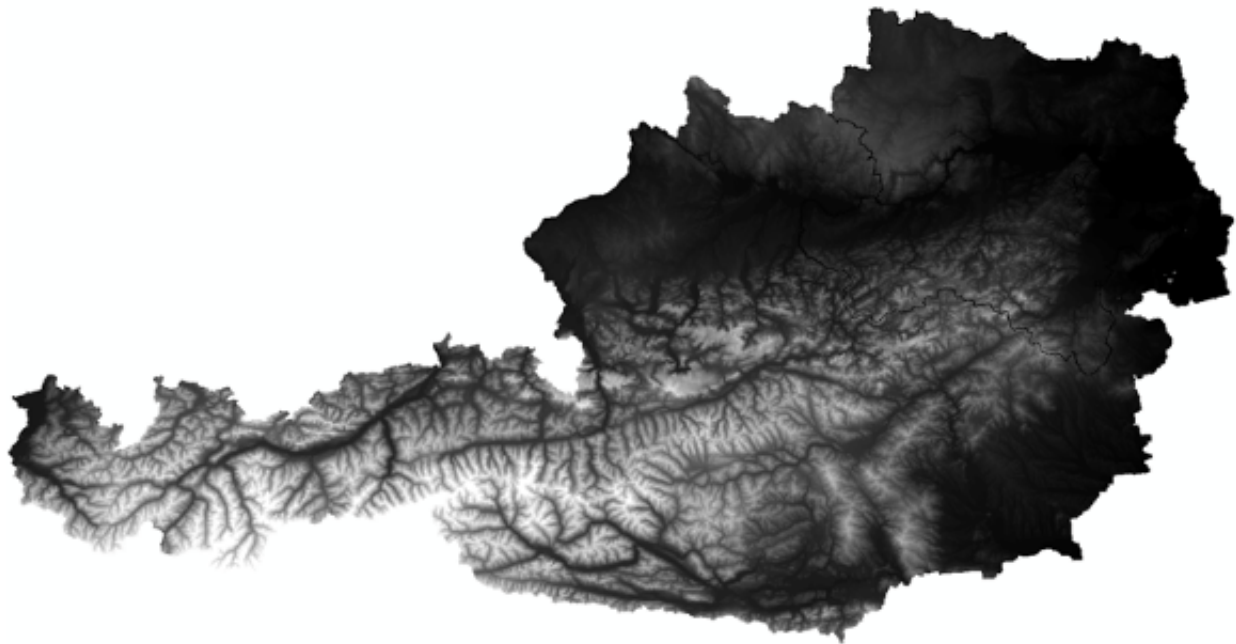


Abbildung 3.12: Höhenmodell Österreich  
[Geoland, 2021]

Das hier verwendete Höhenmodell ist unter der OpenData Plattform von Österreich [www.data.gv.at](http://www.data.gv.at) [Geoland, 2021] über das gesamte Bundesgebiet in einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 Meter pro Pixel frei verfügbar. Die 10 Meter Auflösung des Geländemodells wird für das verwendete Mobilfunkmodell als ausreichend bewertet da in Bereichen von mehreren Kilometern Analysen berechnet werden. Daher wurde von der Verwendung eines 1 Meter Geländemodells abgesehen.

Raster Information	
Columns and Rows	60114, 32951
Number of Bands	1
Cell Size (X, Y)	10, 10
Uncompressed Size	7,38 GB
Format	GRID
Source Type	Generic
Pixel Type	floating point
Pixel Depth	32 Bit

Tabelle 3.4: Höhenmodell Pixelgrösse

Spatial Reference	
<b>XY Coordinate System</b>	ETRS_1989_LAEA
Linear Unit	Meter (1,000000)
Angular Unit	Degree (0,0174532925199433)
False_Easting	4321000
False_Northing	3210000
Central_Meridian	10
Latitude_Of_Origin	52
Datum	D_ETRS_1989

Tabelle 3.5: Höhenmodell Räumliches Koordinatensystem

Das Koordinatensystem ist das europäische standardisierte ETRS 1989 LAEA, welches bei allen Datensätzen einheitlich verwendet wird. In Österreich wird zwar noch immer das ältere Koordinatensystem des Militärgeographischen Instituts (MGI) mit der Lambert Projektion verwendet. Da jedoch weitere internationale Datensätze in dieser Masterarbeit Verwendung finden, muss eine einheitliche Projektion und Koordinatensystem, welche Europa bestmöglich abbildet, verwendet werden.

Das digitale Geländemodell liegt noch im klassisch österreichischen MGI Austria Lambert vor und muss, damit es mit den Landnutzungsdaten verknüpft werden kann, in das selbe Koordinatensystem, nämlich das ETRS 1989 LAEA, überführt werden. Ansonsten kann es zu Lageverschiebungen von den Raster der beiden Datensätze kommen.

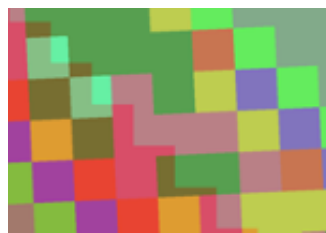


Abbildung 3.13: Räumlicher Versatz

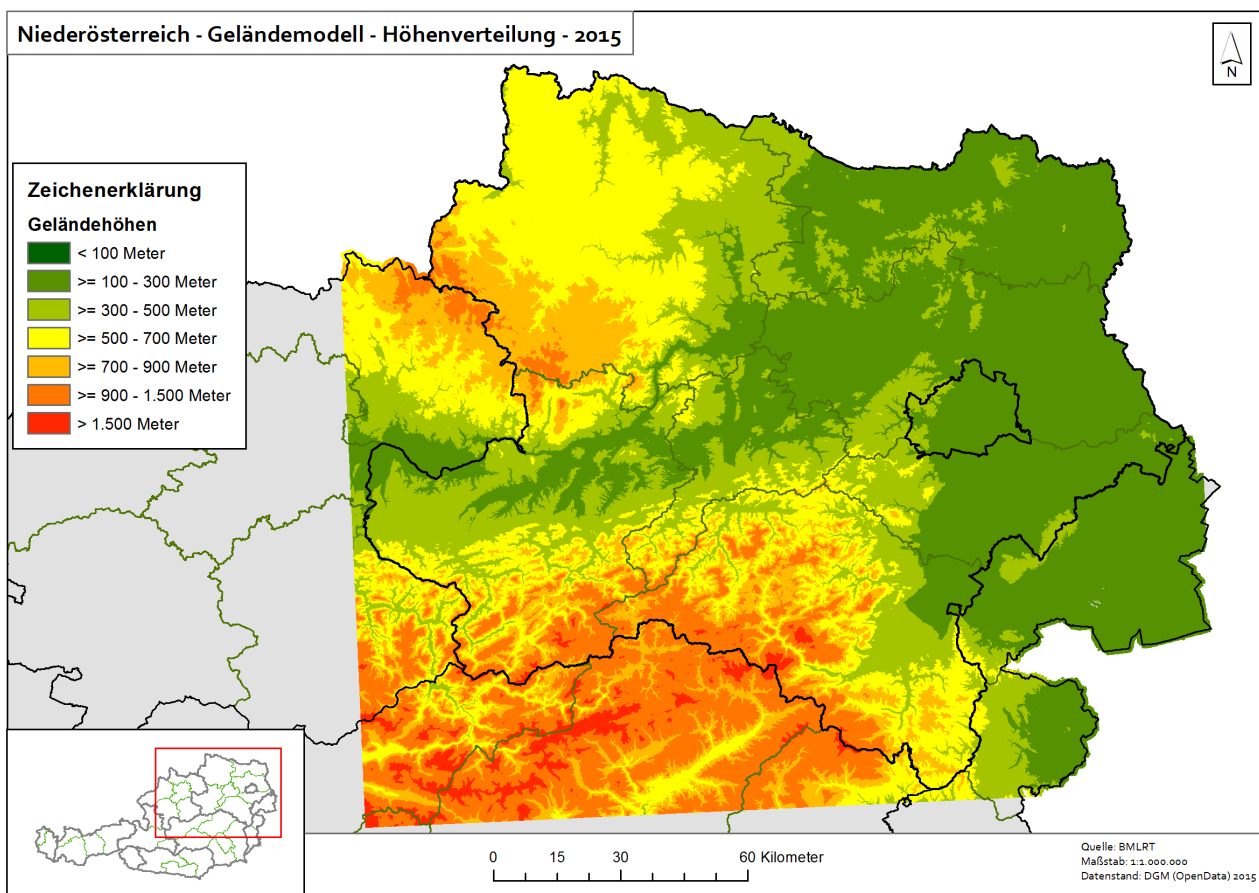


Abbildung 3.14: Geländemodell Niederösterreich  
[Geoland, 2021]

Da sich das Untersuchungsgebiet im Bundesland Niederösterreich befindet, wird das digitale Geländemodell mittels dem ArcGIS Geoprozessierungswerkzeug *Clip* anhand des Vektorlayers

der österreichischen Bundesländer auf das Bundesland Niederösterreich zugeschnitten (siehe Abbildung 3.14).

Nun sollen aus den Höhen des Rasters Neigungen berechnet werden. Durch die Verwendung von Neigungen können Geländeunterschiede besser modelliert werden. In einem Geographischen Informationssystem wie z.B. mit dem kommerziellen Produkt von ESRI *ArcGIS Pro* kann ein digitales Geländemodell in Neigungen pro Rasterzelleneinheit umgerechnet werden. Diese Neigungen werden in dieser Masterarbeit genutzt, um die Mobilfunkrechnungen auf die unterschiedlichen Neigungslevels sowie Neigungsunterschiede im Terrain anzupassen.

Mittels des Geoprozessierungswerkzeug *Slope* von ArcGIS Pro wird das DGM in ein digitales Neigungsmodell umgerechnet (siehe Abbildung 3.15).

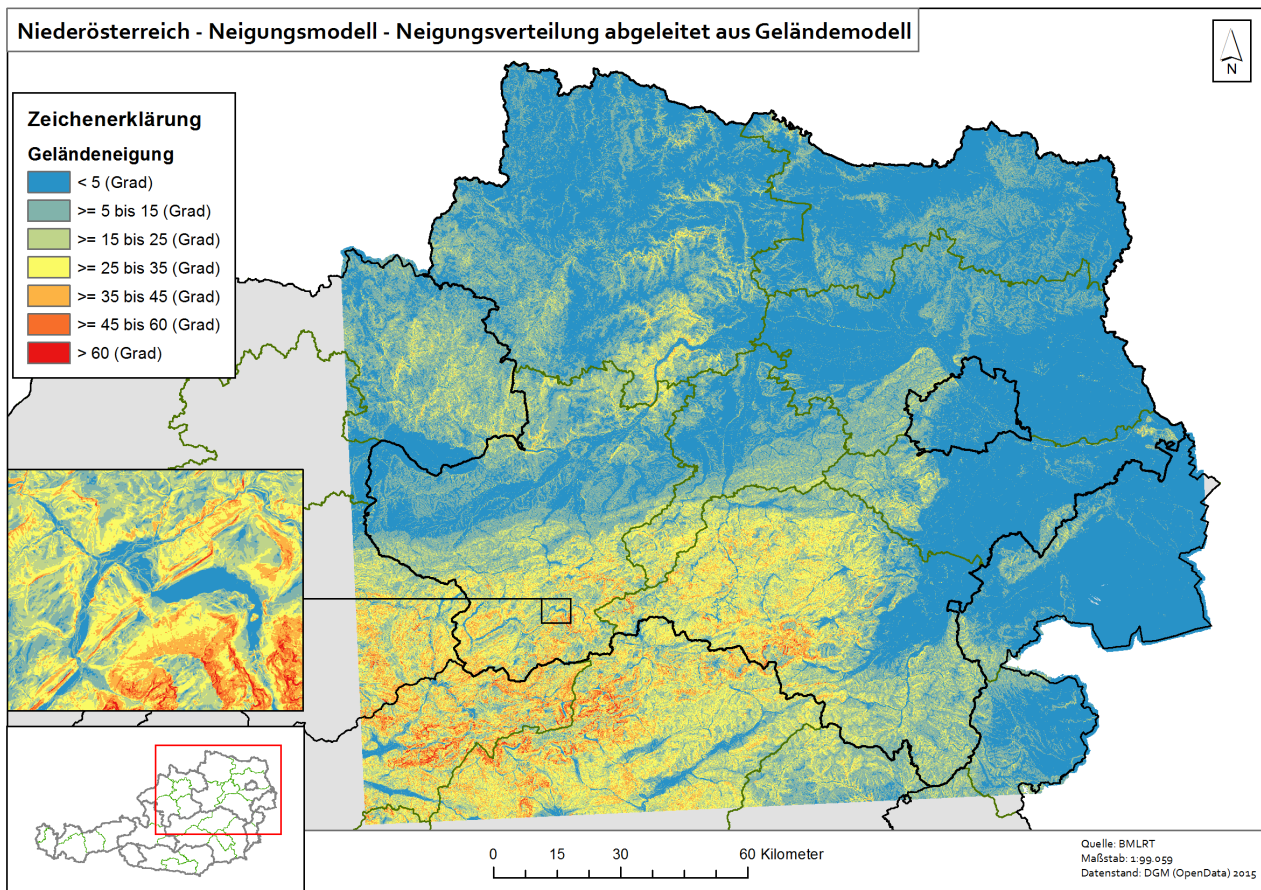


Abbildung 3.15: Neigungsmodell Niederösterreich

Um eine verbesserte Performance bei der Darstellung von großen Rasterdaten wie dem Neigungs raster in 10 x 10 Meter Auflösung zu erhalten, werden sogenannte Pyramiden erstellt. Mittels des Geoprozessierungswerkzeuges *Build Pyramids* in ArcGIS Pro können Pyramiden für Rasterdaten erstellt werden. Hierbei wird der Datensatz in mehrere reduzierte Versionen des ursprünglichen Rasters unterteilt.

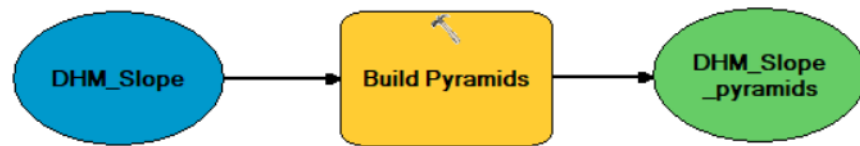


Abbildung 3.16: Pyramiden für Performance Steigerung

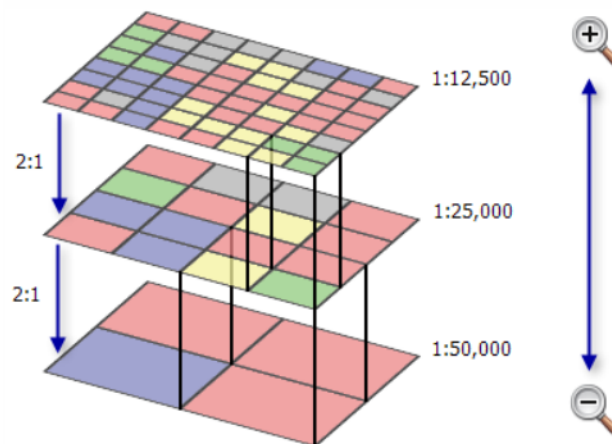


Abbildung 3.17: Resampling Methode beim Pyramiden Bau

„Für jeden Layer der Pyramide wird ein Resampling im Verhältnis 2:1 durchgeführt“ [ArcGIS, 2021c]. In weiterer Folge werden alle in dieser Masterarbeit verarbeiteten Datensätze, die im Rasterformat vorliegen, für die Geschwindigkeitssteigerung einer Pyramidenberechnung unterzogen.

### 3.3.3 Neigungsvariabilitätsindex (SV)

Um das Problem der Klassifizierung zu lösen, wird in dieser Masterarbeit auf zwei in der Wissenschaftlichen Literatur und Studien oftmals verwendeten, speziellen Indizes zur Höhen- sowie Neigungsklassifizierung zurückgegriffen.

Eine Möglichkeit das Gelände zu beschreiben, besteht in dem von [Ruszkiczay-Rüdiger et al., 2009] entwickelten *Neigungsvariabilitätsindex* (in engl. *Slope Variability Index (SV)*). Anhand dieses Indexes können Neigungsvariabilitäten, also starke oder schwache Neigungsunterschiede veranschaulicht werden. [Tomislav and Timotej, 2013, vgl. S.200f]

Die Berechnung erfolgt in ArcGIS anhand der *Fokalen Statistik*, welche die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Zellen berechnet. Anhand einer Modelldarstellung wird in Abbildung 3.18 dargestellt, welche Schritte durchgeführt wurden, um von einem Neigungsdatensatz schließlich einen Datensatz zu erhalten, der die Neigungsvariabilität darstellt. [ArcGIS, 2021a, vgl.]

Der Neigungsvariabilitätsindex betrachtet einen vordefinierten Bereich um eine Betrachtungsrasterzelle. Dieser Betrachtungsraum kann z.B. die angrenzenden 8 Zellen der betrachteten Zelle darstellen. Der Neigungsvariabilitätsindex berechnet dann mittels Fokaler Statistik die



Anzahl der einheitlichen Werte der Nachbarzellen. Der Neigungsvariabilitätsindex gibt nun an, wie gleich oder ungleich die umgebenden 8 Zellen einer betrachteten Zelle sind. Existieren keine Unterschiede in den Neigungen, also haben alle Nachbarzellen der betrachteten Zelle weitgehend idente Neigungen aufzuweisen, so ist der Neigungsvariabilitätsindex wenig variabel. Kommt es hingegen zu sehr starken Abweichungen der Neigungen zwischen den betrachteten Zellen, so wird der Index sehr stark variabel. [Tomislav and Timotej, 2013, vgl. S.200f]

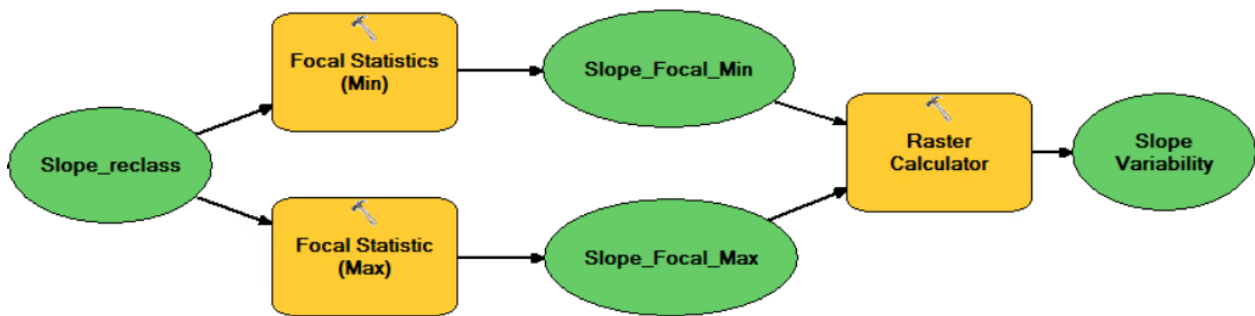


Abbildung 3.18: Berechnung Slope Variability Index in ArcGIS Pro

Der Neigungsvariabilitätsindex berechnet sich über den Unterschied der maximalen Neigung minus der minimalen Neigung. In Karte 3.19 soll die Neigungsvariabilität darstellen, wie unterschiedlich stark die Geländeformen strukturiert sind.

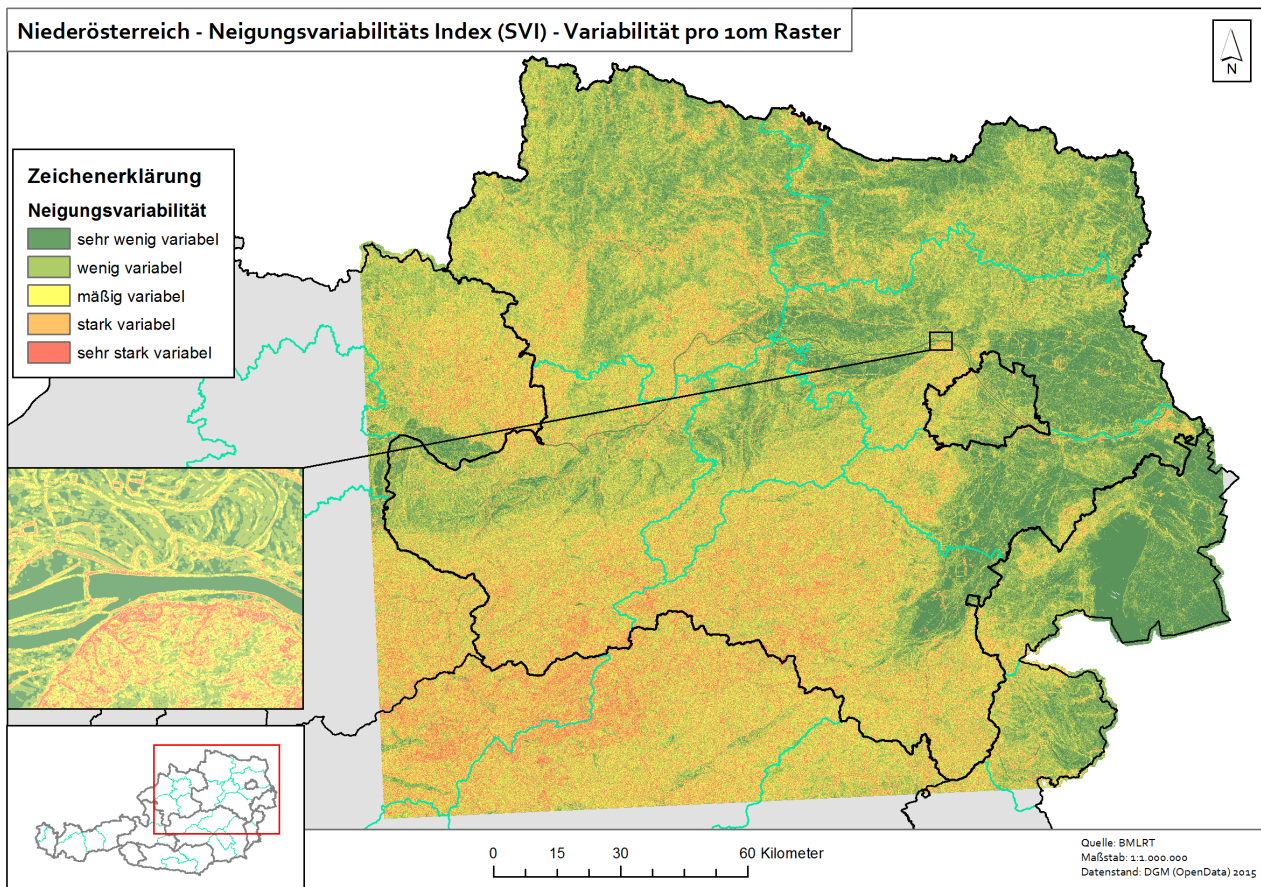


Abbildung 3.19: Neigungsvariabilität pro 10m Raster

Die Klasse 1 (grün -sehr wenig variabel) in Karte 3.19 sind Bereiche, welche exakt dieselben Neigungen aufweisen. Ebenfalls gut ersichtlich ist, wie gut die Donau oder flachen Ackerflächen des Alpenvorlandes Richtung Tulln an der Donau mit denselben Neigungswerten durch den Index abgebildet werden. Geht man weiter Richtung Südwesten an die Grenzen von Niederösterreich in den Bereich des Mostviertels so entsteht ein neues Landschaftsbild, welches absolut heterogene Neigungen aufweist. Dort sind keine Clusterungen oder Gruppen von denselben Neigungswerten anzutreffen. Daher kann hier von einem Gelände ausgegangen werden, welches unregelmäßiger beschaffen ist und oftmals in steileren und höheren Lagen anzutreffen sein wird. Mit diesem Datensatz kann die *Variabilität* der Neigungen von Gebieten also wie homogen gleich oder heterogen unterschiedlich die Neigungen der 10 Meter Raster und deren Nachbarzellen sind, dargestellt werden.

Nun hat man einen Eindruck, wo sich homogene oder heterogene Neigungen des Geländes befinden. Diese Unterschiede in der Variabilität sind in Karte 3.19 auf 10 Meter Raster dargestellt. Jedoch ergibt dies ein schwierig zu Interpretierendes Bild, den im Maßstab 1:1000 000 können unterschiedliche Gruppierungen in den 10 Meter Rastern nicht mehr ausgemacht werden.

In weiterer Folge wird in Kapitel 3.3.5 getestet, in wie weit sich die Neigungsvariabilität eignet um eine Landschaftsklassifizierung durchzuführen.

### 3.3.4 Rauigkeitsindex (TRI)

Für die Höhenklassifizierung wird der sogenannte Rauigkeitsindex (engl. *Terrain Ruggedness Index*) verwendet, um die Höhenunterschiede des Geländes anhand von digitalen Höhendaten zu beschreiben.

Eine Reihe von Methoden wurden für die Definition, Berechnung sowie Anwendung von Oberflächenrauigkeit entwickelt. In der Geomorphometry wird die Geländerauigkeit mit den Höhen und Neigungen eines Terrains verwendet, um Landformen und deren Variabilität über verschiedene Skalen zu charakterisieren. [Grohmann et al., 2009, vgl.].

[Riley et al., 1999] entwickelte den Rauigkeitsindex als eine Quantitative Einheit für GIS basierte Geländerauigkeitsanalysen. Er liefert schnelle, objektive Messungen der Heterogenität einer Geländeoberfläche. [Riley et al., 1999, vgl.]

Der Rauigkeitsindex wird verwendet, um die Rauigkeit des Geländes im Untersuchungsgebiet anhand der digitalen Höhendaten in ein vergleichbares Rasterformat zu bringen, welche in weiterer Folge mit den Dämpfungsklassen verknüpft werden. Der Rauigkeitsindex, oftmals abgekürzt bezeichnet als *TRI* ist ein von [Riley et al., 1999] entwickelter Index zur Messung von Höhendifferenzen zwischen angrenzenden Zellen eines digitalen Geländemodells. Dabei berechnet der Index die Höhenunterschiede eines Rasters ausgehend von einer zentralen Zelle und ihren 8 angrenzenden umliegenden Zellen. Die Formel von [Riley et al., 1999] setzt jede Zelle zum Quadrat, womit diese positiv umgewandelt werden. Anschließend wird aus den quadrierten Zellen der Durchschnitt berechnet. [Riley et al., 1999, vgl. S.24]

-1,-1	0,-1	1,-1
-1,0	0,0	1,0
-1,1	0,1	1,1

Abbildung 3.20: Terrain Ruggedness Index Berechnung  
[Riley et al., 1999]

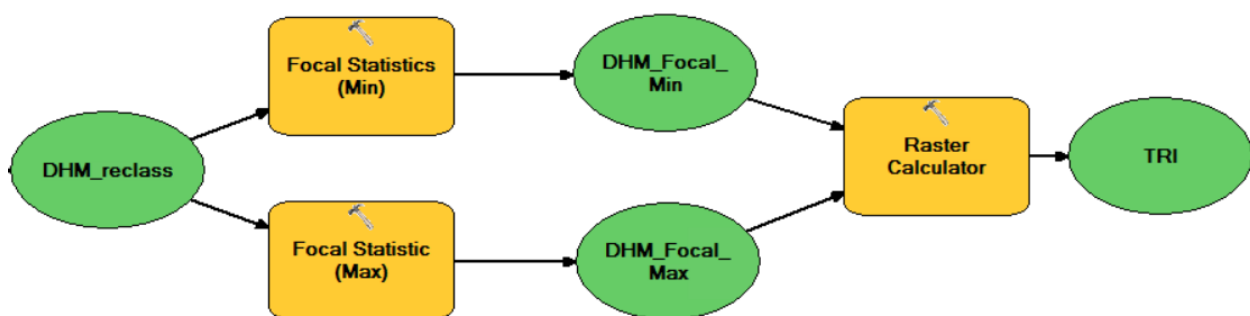


Abbildung 3.21: Berechnung Terrain Ruggedness Index in ArcGIS Pro

Formel des Terrain Ruggedness Index (TRI):

$$TRI = \sqrt{|H_{max}^2 - H_{min}^2|}$$

$H_{max}$  = maximum elevations

$H_{min}$  = minimum elevations

[Riley et al., 1999]

Um die Höhenunterschiede einer Rasterzelle und ihren angrenzenden Nachbarzellen zu berechnen, wird das ArcGIS Pro Geoverarbeitungswerkzeug *Fokale Statistik* verwendet. Mittels des Parameters *Variety* berechnet das Tool die Varianz, also die Anzahl der Einzelwerte der Zellen innerhalb ihrer Nachbarschaft. Die Nachbarschaft kann dabei ebenfalls als Parameter in Form von der Anzahl der angrenzenden Rasterzellen angegeben werden. [ArcGIS, 2021a, vgl.] In dieser Analyse wurden die Höhen von 8 angrenzende Zellen miteinander verglichen. Inklusive der Ausgangszelle, welche sich jeweils im Mittelpunkt befindet, entsteht so ein 9 Zellen Block, der von der *Fokalen Statistik* berechnet wird.

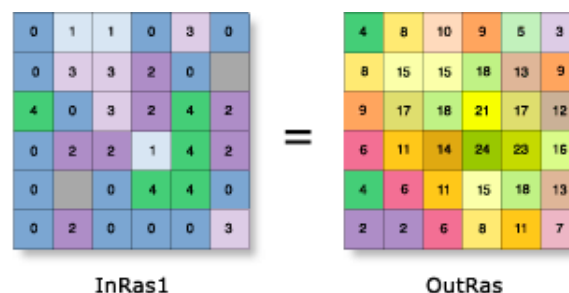


Abbildung 3.22: Focal Statistik Beispiel  
[ArcGIS, 2021a]



Der Rauigkeitsindex wird schließlich abgeleitet, indem dieser Durchschnitt zur Quadratwurzel gesetzt wird. Dies bedeutet letztendlich, dass die Formel von [Riley et al., 1999] den Durchschnitt der Höhenveränderung jeder Zelle und ihren umgebenden Nachbarzellen auf einem Höhenraster berechnet. [Riley et al., 1999, vgl.]

Die Berechnung des Rauigkeitsindex wird, so wie alle weiteren Analysen, in dieser Masterarbeit in der Geoinformationssoftware ArcGIS von ESRI<sup>3</sup> vollständig durchgeführt.

In den vorherigen Abschnitten wurde die theoretische Berechnung des TRI vorgeführt, nun soll jedoch in dieser Masterarbeit der TRI Index zur Geländecharakterisierung von realen Höhendaten herangezogen werden. Hierfür werden in ArcGIS mit dem Geoprozessierungswerkzeug *Focal Statistics* 9 Zellen, mit einer Auflösung von 10 Metern miteinander verglichen.

Mittels der *Fokalen Statistik* in ArcMap<sup>4</sup> wird eine Rasterkarte der maximalen sowie minimalen Höhe des digitalen Geländemodells berechnet.

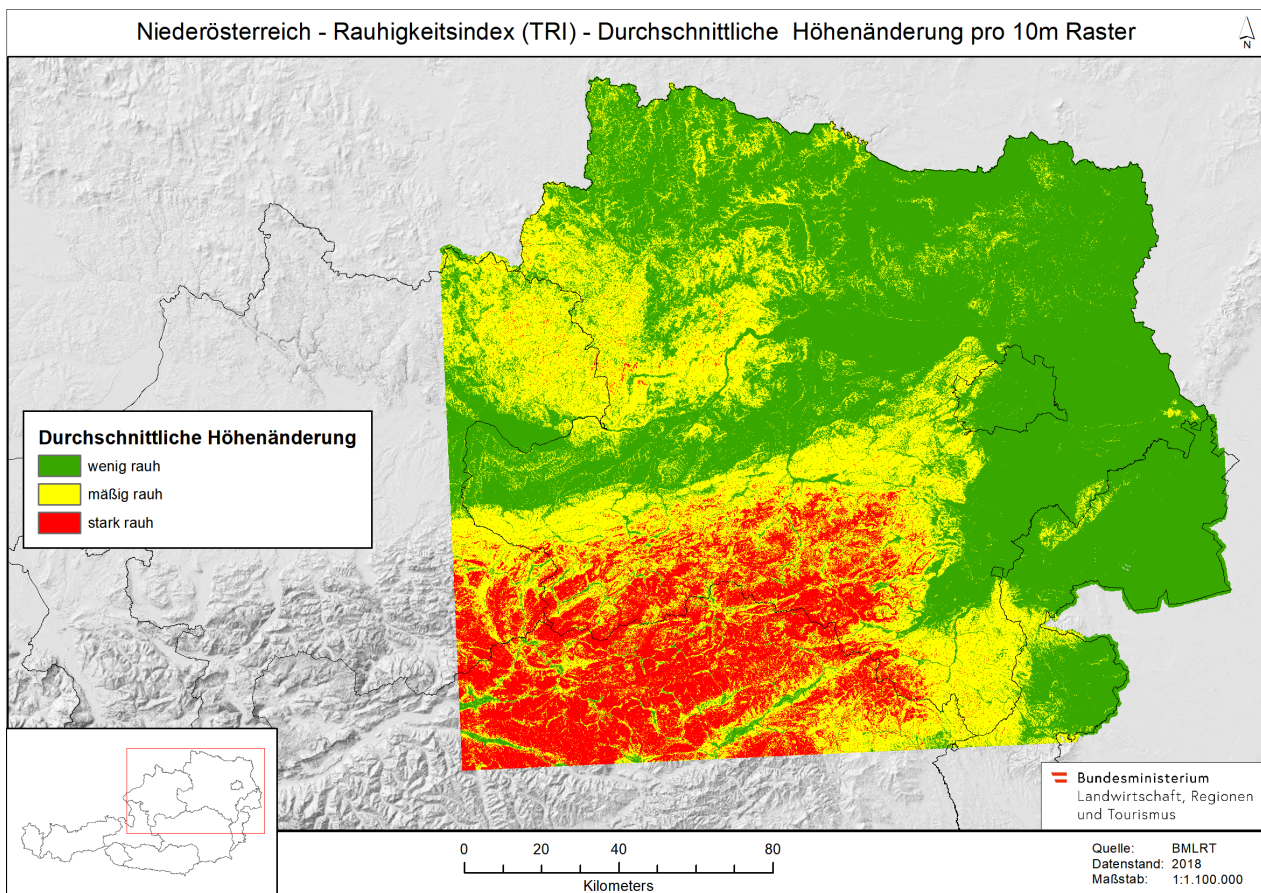


Abbildung 3.23: Geländerauhigkeitsindex pro 10 Meter Raster

Aufgrund der Einfachheit wurden in dieser Masterarbeit drei Klassen für den Rauigkeitsindex verwendet, welche die Höhen in die von Tabelle 3.6 dargestellten Klassen zusammenfasst. Die Höhen wurden hierbei nach der Nearest Neighbor Methode Klassifiziert.

<sup>3</sup>ESRI Inc. ist ein US amerikanischer Softwarehersteller von kommerziellen Geoinformationssystemen welche in den Redlands von Kalifornien ansässig und seit 1969 vollständig im Privatbesitz von Jack Dangermond, welcher auch noch heute Präsident der Gesellschaft ist.

<sup>4</sup>ist eine Subsoftware für Kartenerstellung, Analyse und Verwaltung der Serie von ESRI

TRI Klasse *	TRI Name	height
1	wenig rauh	< 56 Meter
2	mäßig rauh	>= 56 - 138 Meter
3	stark rauh	> 138 - 1111 Meter

Tabelle 3.6: TRI Klassen

### 3.3.5 Kombination der Datensätze und Bezugsgröße

Als nächstes soll getestet werden, welche Datensätze eine geeignete Kombination für die Landschaftsklassifizierung darstellen. Hierbei sollen möglichst wenige Klassen am Ende der Klassifizierung übrig bleiben.

Datensatz - Kombination	Vergleich	Eignung
Neigungsvariabilität - Landnutzung	216 Kombinationen	schlecht
Neigungsvariabilität - Dämpfung	24 Kombinationen	mittel
Rauhigkeitsindex - Dämpfung	14 Kombinationen	gut

Tabelle 3.7: Kombination Datensätze

Die Tabelle 3.7 soll eine Übersicht gegeben, welche Kombinationen an Datensätzen miteinander verglichen wurden. In folgenden Kapitel 3.3.6 und 3.3.7 werden diese Datensätze und deren Kombination genauer analysiert und auf deren Eignung für die Landschaftsklassifizierung untersucht.

Bezugsgröße	Vergleich	Eignung
Puffer	Überlagerung	schlecht
Gemeinde	fiktive Anordnung	mittel
Raster	neutral einheitlich	gut

Tabelle 3.8: Test Bezugsgrößen

Außerdem werden die in Tabelle 3.8 veranschaulichten Bezugsgrößen für eine Darstellung der Landschaftskategorisierung untersucht. Der hier dargestellte Vergleich und Bewertung soll einen schnellen Überblick über das Ergebnis der nächstens zwei Kapitel geben.

### 3.3.6 Test Kombination Neigungsvariabilität und Landnutzung

Um die Frage zu beantworten, wie man Landschaften anhand ihrer Höhen- und Geländeerscheinungen charakterisieren kann, muss es zu einer räumlichen Abgrenzung von Gebieten kommen. Anschließend soll über diese Abgrenzungen eine Statistik gerechnet werden, welche der neu erzeugten Klassen am häufigsten in einer definierten Bezugseinheit vorkommt. Nun stellt sich aber die Frage, wie auch die Landnutzungskategorien hier einfließen sollen. Um die Landnutzungsdaten ebenfalls in der Statistik zu berücksichtigen, müssen die Daten des Neigungsvariabilitätsindex mit den Landnutzungsdaten verknüpft werden und wieder eine Zonale Statistik einer bestimmten Bezugsgröße berechnet werden. Nur so kann schließlich eine exakte Gebietsklassifikation für die Basisstationsausstrahlungsradien modelliert werden.

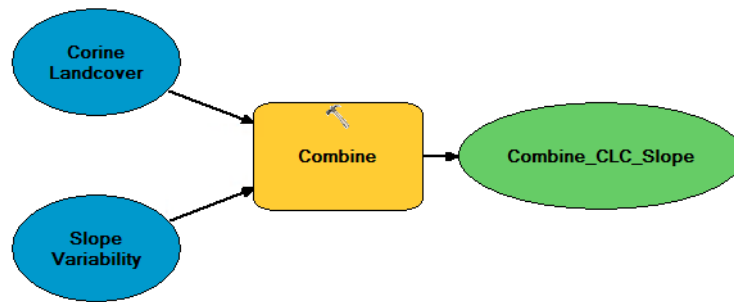


Abbildung 3.24: ArcGIS Werkzeug Combine

Durch Verknüpfung der Landnutzung und dem Neigungsvariabilitätsindex wird ein Raster erzeugt, der sowohl Informationen zur Landnutzung als auch zur Neigungsvariabilität enthält und somit beide dieser Faktoren als Kategorien darstellen kann.

	Value	Corine Landcover L3	Neigungsvariabilität
	1	312	6
	2	312	7
	3	312	8
	4	312	9
	5	312	5
	6	312	4
	7	312	3
	8	312	2
	9	312	1
	10	211	3
	11	211	2
	12	211	1
	13	211	4
	14	211	6
	15	324	3
	16	324	2

Tabelle 3.9: Kombinierte Corine Landcover (L3) und Neigungsvariabilität

Die Corine Landcover enthält für gesamt Niederösterreich 24 verschiedene Level 3 Landnutzungstypen. Die Neigungsvariabilität beschränkt sich jedoch auf nur 9 verschiedene Klassen. Würde man nun für die Kombination der zwei Datensätze (Landnutzung und Neigungsvariabilität) die originalen Landnutzungsklassen verwenden, erhielte man nun 216 verschiedene Kombinationen. Da 216 verschiedene Klassen nicht sehr praktikabel sind, um Analysen zu berechnen, wurde der Landnutzungsdatensatz bereits in Kapitel 3.3.1.1 zu den sogenannten Dämpfungsklassen zusammengefasst.

### 3.3.6.1 Aggregierung an Puffer

Nun soll mittels des ArcGIS Werkzeuges *Zonale Statistik* berechnet werden, welche kombinierten Klassen aus der Landnutzung und Neigungsvariabilität am häufigsten innerhalb eines jeden berechneten 4 Kilometer Pufferbereiches einer Basisstation, vorkommt. Aus den ca 10 000 Basisstationen österreichweit, wurden für Niederösterreich alle 1600 Stationen ausgewählt und um diese eine Puffer Zone von 4 Kilometer berechnet.

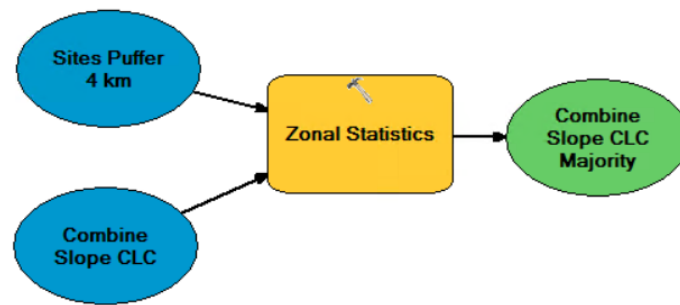


Abbildung 3.25: Zonale Statistik / Combine Slope CLC

Von den gesamt in Niederösterreich vorkommenden 216 Kombinationen aus Landnutzung und Neigungsvariabilität kommen 70 Klassenkombinationen in den 4 km Puffern der Basisstationen am häufigsten vor. Hierbei entsteht nun aber die Problematik, dass mit einer großen Anzahl an Klassen bei der Kombination der Neigungsvariabilität mit der Landnutzung, gearbeitet werden muss. Zu kritisieren ist vor allem, dass weitere Analysen mit so vielen Klassen unmöglich zu realisieren sind aufgrund der immer steigenden Skalierung in Richtung mehr Klassen. In Karte 3.26 ist das Ergebnis der Berechnung der Zonalen Statistik anhand der 4 Kilometer Stationspuffer zu sehen. Hierbei sind die unterschiedlichen Klassen der Landcover mit der Neigungsvariabilität in Graustufen dargestellt. Da in den Originaldaten, mehr als 200 Kombinationen der Corine Landcover als auch der Neigungsvariabilität in den Rastern vorkommen, ergeben sich leider in der Statistik der Pufferbereiche mit 70 verschiedenen Klassen noch immer zu viele unterschiedliche Kombinationen, um hiermit eine eindeutige Gebietsklassifizierung abzuleiten.

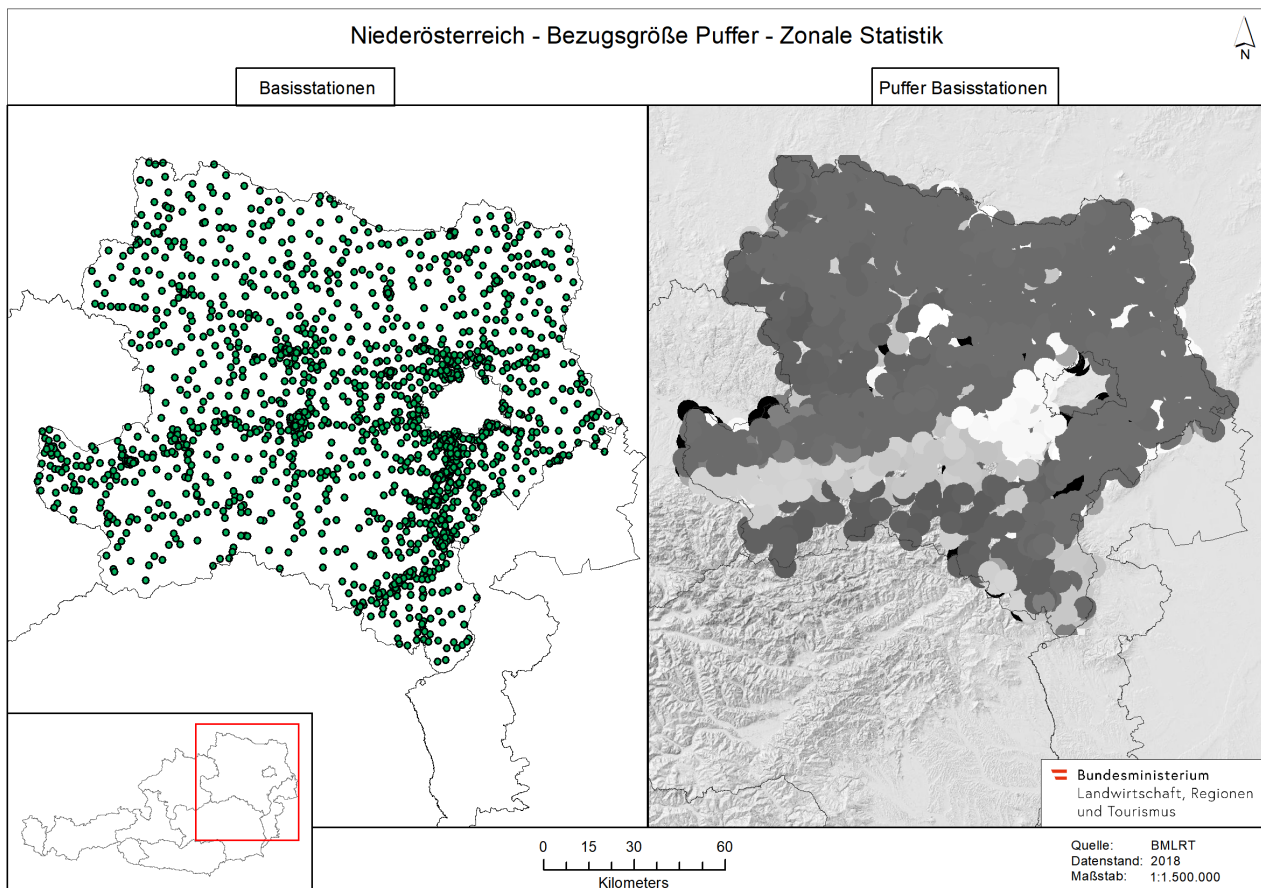


Abbildung 3.26: Bezugsgröße Puffer



Der Ansatz die Aggregation der Daten auf Pufferbereiche zu berechnen und zwar anhand der kombinierten Corine Landcover Daten muss hiermit verworfen werden.

### 3.3.6.2 Aggregierung an Gemeindegrenzen

Dieselbe Analyse wurde durchgeführt nur diesmal mit den in Kapitel 3.3.1.1 reklassifizierten Corine Landcover Klassen zu sogenannten Dämpfungsklassen. Hierbei wurden die originalen 24 Corine Landcover Klassen zu 8 Dämpfungsklassen zusammengefasst. Hierfür wurden die österreichischen Gemeindegrenzen herangezogen, um sogenannte Zonen zu definieren für welche die häufigsten vorkommenden Raster berechnet wurden (siehe Karte 3.27). Pro Zone wurde also eine Statistik berechnet, welche abgleicht wie viele Rasterzellen jeder Kategorie vorkommen. Über das Geoverarbeitungswerkzeug *Zonale Statistik* kann die häufigste vorkommende Klasse innerhalb einer Zone, welche hier als Gemeindegrenze definiert wurde, dargestellt werden. Die Zonale Statistik mit der Einstellung (Majority) kann auch beschrieben werden als *“the value that occurs most often of all cells in the value raster that belong to the same zone as the output cell,”* [ArcGIS, 2021b].

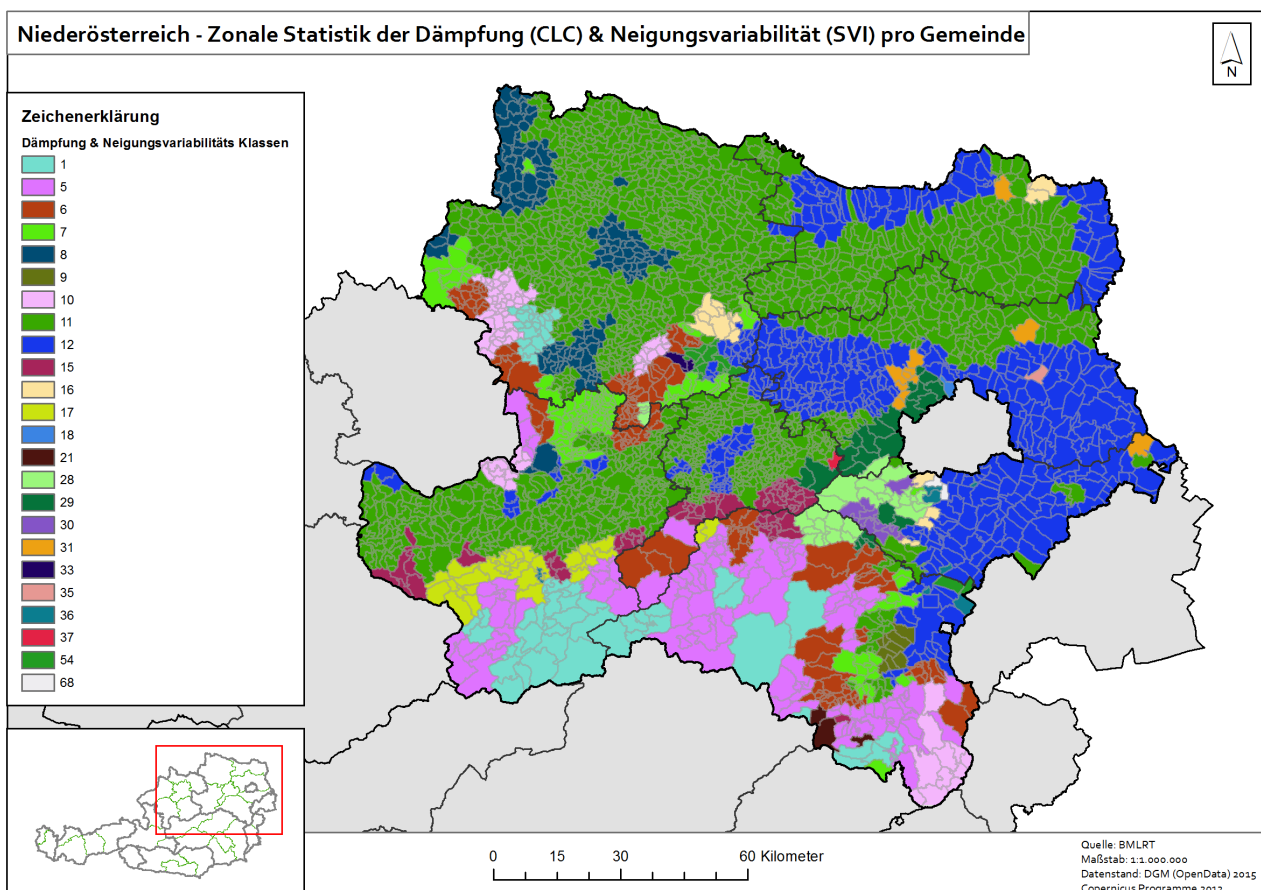


Abbildung 3.27: Häufigste Kombinierte Neigungsvariabilität und Dämpfung pro Gemeinden

Mit diesen Klassen erhält man in Kombination mit der Neigungsvariabilität 24 Kombinationen. Die Frage ist in diesem Zusammenhang, auf welche Bezugsgröße die kombinierten Raster dargestellt werden sollen. Hierbei wurden in dieser Masterarbeit verschiedenen Ansätze ausprobiert und getestet. Problem der hier dargestellten Methode ist, dass die Bezugsgröße, die hier

gewählt wurde, sich auf politisch entschiedene Gemeindegrenzen bezieht. Da die Größe und Verteilung von Gemeindegrenzen willkürlich angeordnet sind, kann diese Bezugsbasis nicht für die Gebietsklassifizierung herangezogen werden.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die Neigungsvariabilität sich nicht als geeignetes Kriterium für die Kombination mit Landnutzungsklassen bewiesen hat. Hierbei ist besonders zu kritisieren, dass das Rauschen der Daten in Karte 3.19 zu hoch ist. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Arbeit für die Höhenklassifizierung der in Kapitel 3.3.4 vorgestellte Rauigkeitsindex angewandt. Dieser besitzt im Gegensatz zur Neigungsvariabilität eine weit aus harmonischere Verteilung seiner Daten in den Klassen, welche in Karte 3.23 dargestellt ist. Das Kriterium der Neigung stellt daher vermutlich keine geeignete Grundlage dar, um eine Gebietsabgrenzung rein durch die Unterschiede von Geländeneigungen zu argumentieren.

### 3.3.7 Kombination Dämpfungsklassen und Rauigkeitsindex

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung von Landschaftscharakteristika besteht, indem die zuvor klassifizierten Landnutzungsklassen der Corine Landcover in neue sogenannte Dämpfungsklassen zusammengefasst werden (siehe Tabelle 3.2 sowie 3.3). Auch der Höhendatensatz wird in die mit dem Rauigkeitsindex berechneten Klassen neu klassifiziert, die in Kapitel 3.3.4 im Detail vorgestellt wurden. Somit werden für die Mobilfunkanalysen in Kapitel 3.7 sowie die Einteilung der Landschaftskategorien, folgende Parameter verwendet, welche in Abbildung 3.28 dargestellt sind.

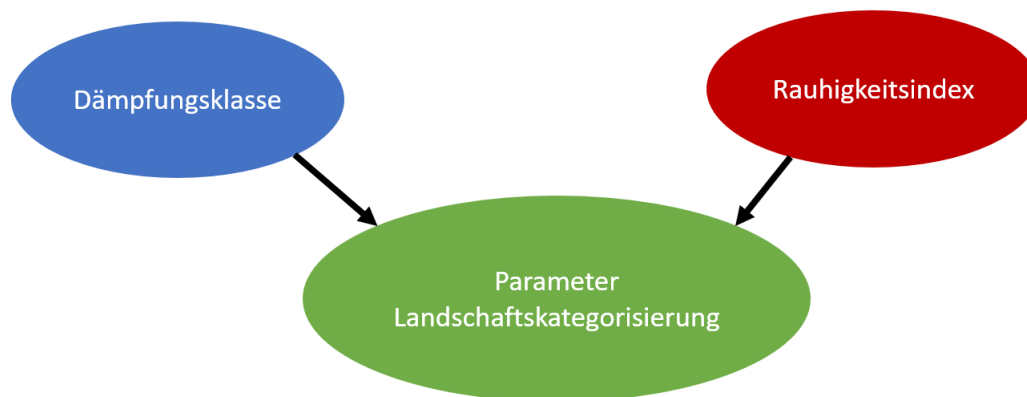


Abbildung 3.28: Parameter Landschaftsklassifizierung

Nun sollen die zwei neu klassifizierten Datensätze zu Dämpfungs- und Rauigkeitscharakteristika in einen kombinierten Datensatz übergeführt werden. Hierzu wird mittels des Geoverarbeitungswerkzeuges *Combine* eine Kombination der Rasterdatensätze Dämpfung und Rauigkeitsindex erzeugt.

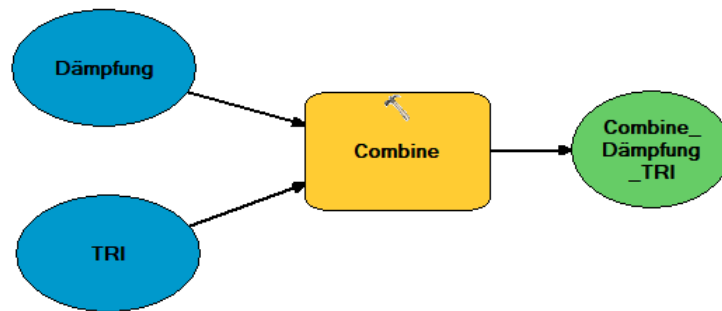


Abbildung 3.29: Verknüpfung von Dämpfungsklassen mit TRI Index

Aus den nun kombinierten Dämpfungs- und Rauigkeitsklassen erhält man 26 Kombinationen dieser zwei Landschaftscharakteristika.

Value	Count	Clutter Klassen	TRI Klassen
1	13009353	7	1
2	33307212	7	2
3	70090467	3	1
4	12355350	2	1
5	7890932	3	2
6	11854022	2	2
7	10163874	6	1
8	8065400	6	2
9	9214092	9	1
10	1451976	9	2
11	11582714	7	3
12	299682	1	2
13	1457513	1	1
14	16498	9	3
15	484760	2	3
16	8512	3	3
17	1349638	6	3
18	63033	4	2
19	432527	4	1
20	2864	4	3
21	1000981	8	1
22	31624	8	2
23	541367	1	3
24	106910	5	1
25	19051	5	2
26	321	8	3

Tabelle 3.10: Kombination der Dämpfung mit TRI

Die einzelnen Kombinationen der kombinierten Dämpfungs- und Rauigkeitsklassen sind in Tabelle 3.10 aufgeführt. Hierbei ist auch die Anzahl, wie oft jede Kombination pro Rasterzelle vorkommt, berechnet. Um nun jedoch zu einer Landschaftscharakterisierung zu gelangen, muss eine Aggregierung der kombinierten Raster vorgenommen werden. Es muss überlegt werden, auf welche Bezugsgröße die einzelnen Raster zusammengefasst werden sollen. Bereits in Kapitel 3.3.6.1 wurde anhand von Pufferbereichen eine Aggregationsmethodik getestet. Aber auch in Kapitel 3.3.6.2 wurde mittels politischer Gemeindegrenzen versucht eine Aggregierung herzustellen. Im nächsten Kapitel soll nun eine weitere Methode getestet werden, um den kombinierten Datensatz auf eine einheitliche homogene Bezugsgröße zu aggregieren.

### 3.3.7.1 Aggregierung an Rastern

Eine objektiv- einheitliche Bezugsgröße stellen vordefinierte Zonen in Form von gleichgroßen Rastern dar. Die Statistik Austria veröffentlicht frei zugänglich auf [Open Data Österreich](#) seine regionalstatistischen Rastereinheiten (in den Größenordnungen 100m, 250m, 500m, 1km, 2km, 5km, 10km, 20k, 50km sowie 100km) in Form von Shapes im Vektorformat bezogen auf das europäischen Referenzkoordinatensystem ETRS89 LAEA. Von diesen Vektorrastern wurde für die Aggregierung eine Rastergrößenordnung mit 5 Kilometern Ausdehnung in x und y Richtung



gewählt, da dieser Abstand ausreichend ist, um für die Mobilfunkabdeckung Gebiete abzugrenzen. Größere Rastereinheiten z.B. 10 Km würden zu viel Information der Gebietsausprägung entfernen. Kleinere Rasterzellen hingegen sind für die Analysen wo es um Entfernungen von 5 - 10 Km geht nicht notwendig und würden einen unnötigen Rechenaufwand und somit Detaillierungsgrad erzeugen. Mit diesen homogenen Rastern wird in weiterer Folge versucht eine sinnhafte Aggregation auf diese Bezugsgröße zu erreichen. Die flächendeckend über ganz Österreich zur Verfügung stehenden Statistik Austria Raster wurden für die Verwendung zuerst auf das Bundesland Niederösterreich, in welchen sich alle Untersuchungsgebiete befinden, ausgewählt und auf die entsprechenden Raster zugeschnitten. In Karte 3.30 ist das österreichische Bundesgebiet mit den flächendeckenden 5 Kilometer Statistik Austria Rastern zu sehen.

Um jedoch die Statistik Austria Raster als Bezugsgröße für die Aggregation des kombinierten Datensatzes der Dämpfungsklassen sowie des Rauigkeitsindex zu verwenden, muss zuerst eine Zonale Statistik auf die Raster berechnet werden.

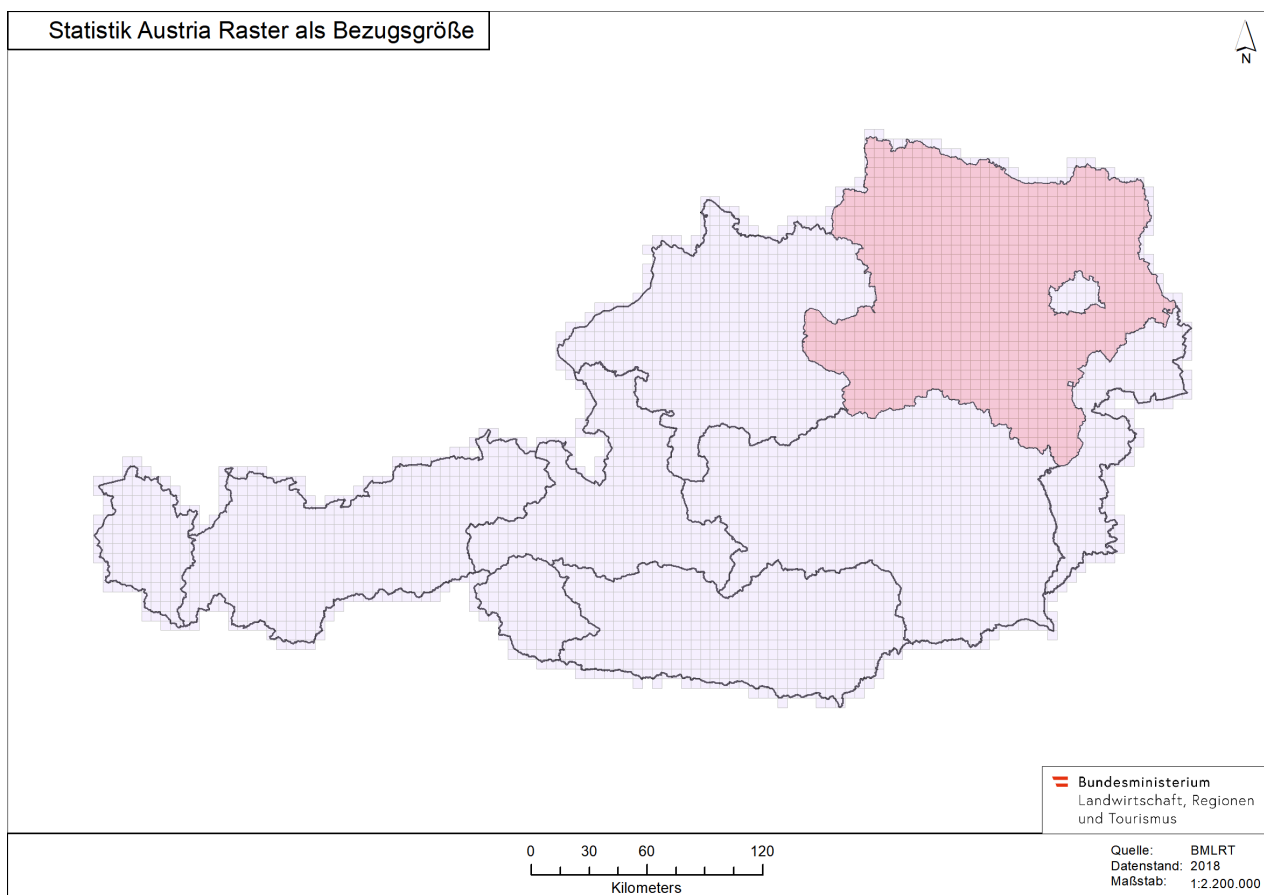


Abbildung 3.30: Statistik Austria 5 Km Raster  
[[Statistik Austria, 2021](#)]

Mit dem ArcGIS Geoprozessierungswerkzeug *Zonale Statistik* wird berechnet, welche kombinierten Klassen aus der Dämpfung sowie dem Rauigkeitsindex am häufigsten innerhalb einer jeden 5 Kilometer großen Maschenweite der Raster vorkommt. Das Modell in Abbildung 3.31 zeigt den Analyseschritt um die statistisch häufigsten 10 Meter Raster in die 5 Kilometer Rastern zu aggregieren. Hier muss als Option *Majority* für die Berechnung der Statistik angegeben werden, um den überwiegenden Anteil pro Klasse in der jeweiligen Zelle zu erhalten.

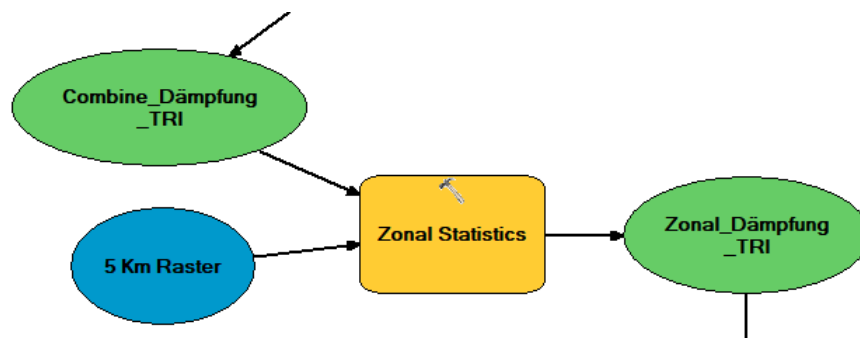


Abbildung 3.31: Zonale Statistik der Kombinierten Dämpfung sowie TRI mit 5Km Raster

Das Ergebnis der Aggregation und der Mehrheitsstatistik ist in Karte 3.32 zu sehen. Hierbei ist in Teil-A noch der Kombinierte Datensatz in einer Auflösung von 10m zu sehen. Durch das in leicht grau darüber gelegte Statistik Austria Raster ist ersichtlich, auf welche Zonen die Ausgangsdaten aggregiert werden.

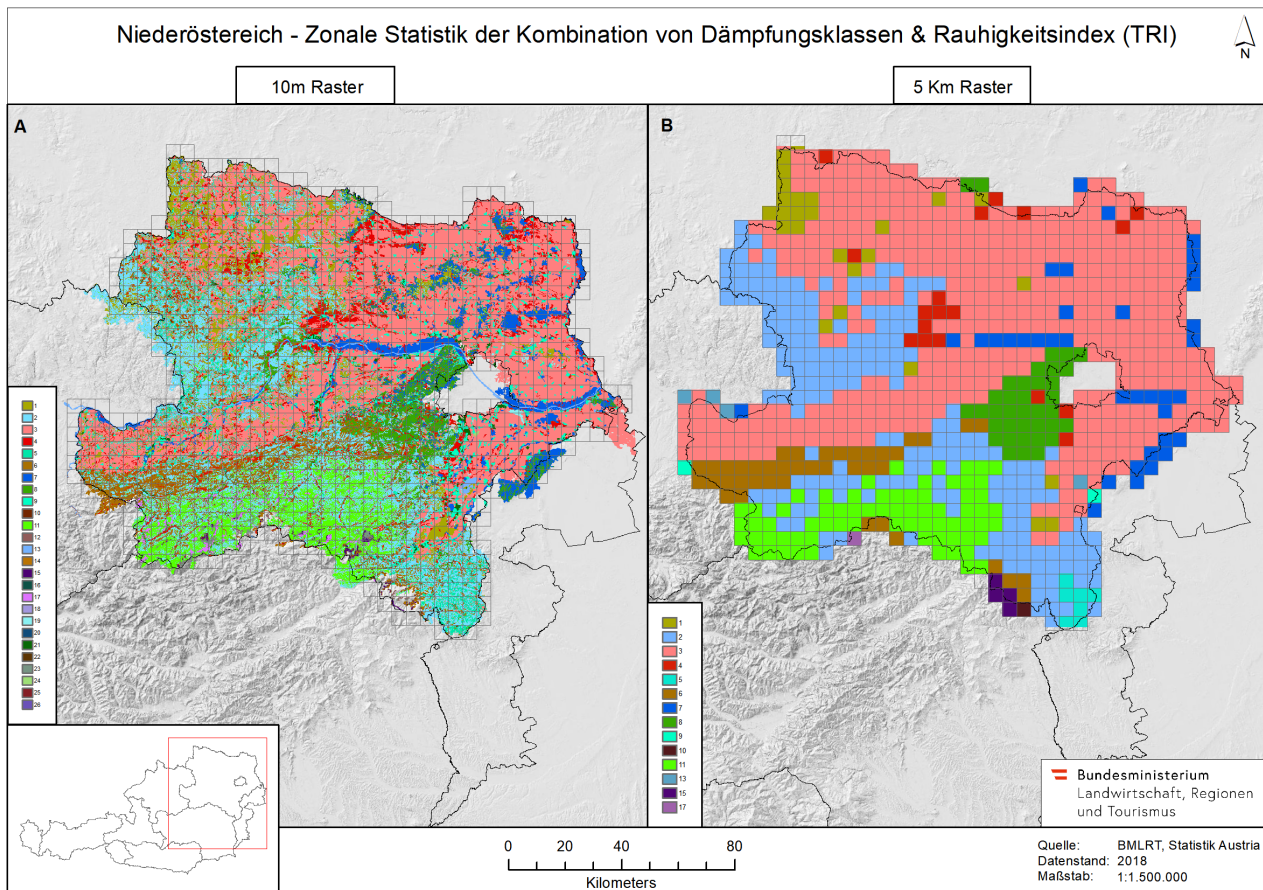


Abbildung 3.32: Landschaftskategorien Zonal

In Teil-B ist nun die Aggregation der kombinierten 10m Raster nun auf 5 Km des Bezugsrasters der Statistik Austria zu sehen. Hierbei sieht man bereits, dass es zu einer deutlichen Zusammenfassung der Zonen gekommen ist. Es ergeben sich bereits größer zusammenhängende Gebiete in rot, blau, grün sowie hell grün. Betrachtet man nun in Teil-A die Anzahl der Klassen so sieht man, dass es für die originalen Daten der Kombination von Dämpfungsklassen mit dem Rauigkeitsindex (TRI) 26 verschiedene Klassen gibt. Hingegen hat sich die Anzahl der

Klassen in Teil-B nach der Aggregation durch die Zonale Statistik auf 14 reduziert. Trotz der Reduzierung um fast die Hälfte der Klassen, gibt es noch immer einzelne Ausreißer, welche in keinen größeren Klassenverbänden vorkommen. So erscheinen vereinzelt gruppiert dunkelrote Zellen als auch dunkelblaue Zellen nord-westlich als auch östlich von Wien. Im Waldviertel kommt es ebenfalls zu einer Mischform von mattrot, dunkelrot und mattgrün. Als auch im südlichen Industrieviertel sind zwei kleinere Cluster in lila und türkis entstanden.

Für eine saubere Gebietsklassifizierung gilt es diese Einzelfälle noch zu bereinigen, damit sich klar abgrenzbare Zonen ergeben, die sich anhand ihrer Höhen und Landnutzung ähneln. Einzelne Zonen Raster, welche von größeren Klassen umgeben sind, werden mit dem Geoprozessierungswerkzeug *Mehrheitsfilter* den größeren Gruppen zugeordnet. In Karte 3.35 ist das Ergebnis dieser Aggregation zu sehen. Es kommt zwar zu einem ruhigeren Zonenbild, jedoch bestehen an den Rändern der großen Klassen noch immer Gruppierungen von anderen einzelnen Klassen.

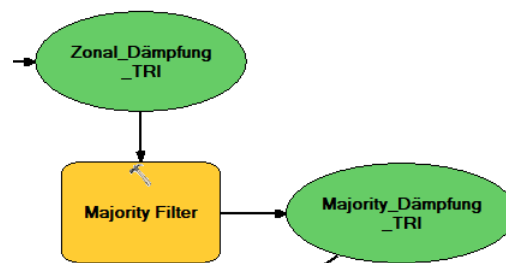


Abbildung 3.33: Mehrheitsfilter

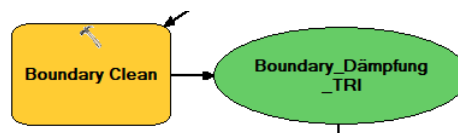


Abbildung 3.34: Grenzbereinigung

Mittels des Werkzeuges *Grenzbereinigung* können die Grenzen zwischen Zonen geglättet werden, wodurch Ausreißer von anderen Klassen entfernt werden können. Das Werkzeug kann die Grenzen von Zonen erweitern bzw. verkleinern, wodurch größere Zonen in kleinere eindringen können. Der Nachteil dieser Methode ist, dass es hier zu einer Aggregation der Zonen kommt wodurch einzelne kategorisierte Landschaftszonen in andere Kategorien aggregiert werden. Auch an den Rändern der klassifizierten Landschaftskategorien kann es hierdurch zu Unschärfen im Bezug auf die Klassen kommen. Letzten Endes soll die Landschaftsklassifizierung jedoch einen schnellen Überblick über die Eigenschaften der Bereiche im Bezug auf Höhe und Landnutzung bieten.

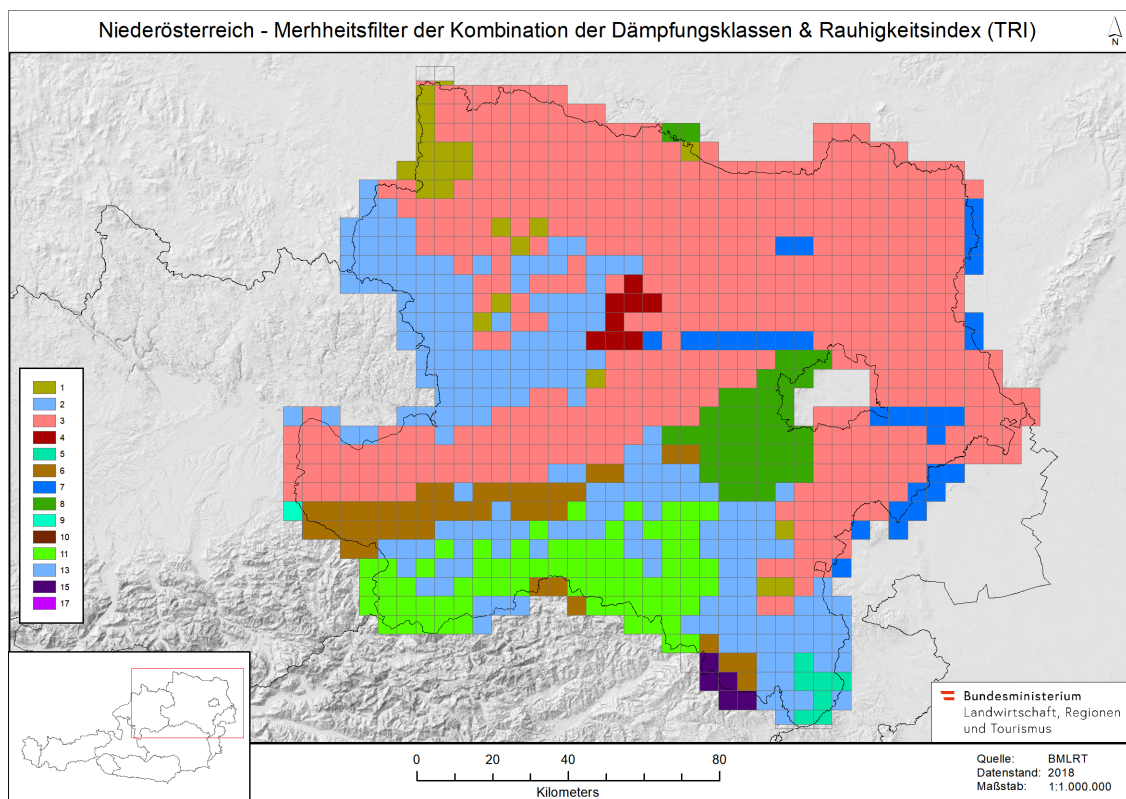


Abbildung 3.35: Landschaftskategorien Mehrheitsfilter

Schließlich wird der finale Raster mit dem Geoprocessingwerkzeug *Reklassifizieren* neu berechnet, damit die neuen Klassen richtig zugeordnet werden. Außerdem werden den neu erzeugten Klassen die originalen Werte aus Dämpfungsklasse sowie Rauigkeitsindex hinzugefügt und entsprechend pro Landschaftskategorie neu berechnet.

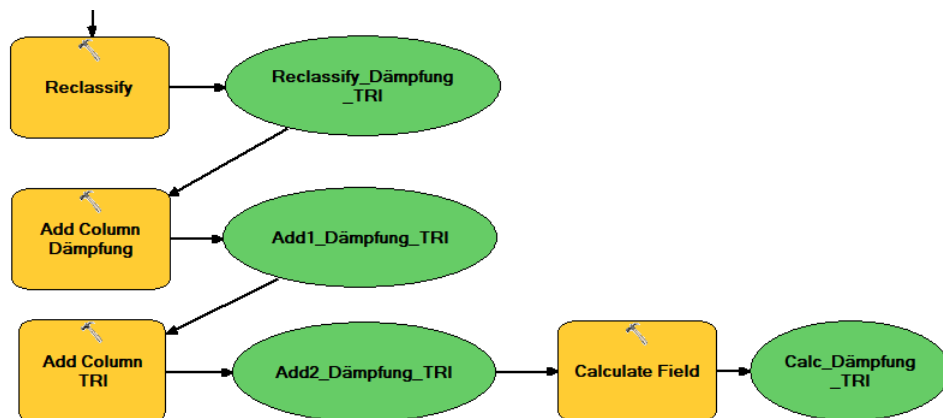


Abbildung 3.36: Reklassifizierung Dämpfung und TRI

Mittels des Python Codes in Abbildung 3.37 sowie 3.38 lässt sich der kombinierte Dämpfung/TRI Raster, der reklassifiziert nur aus Rasterwerten der finalen Klassen besteht, um die originalen Daten der Dämpfung- sowie TRI-Index Klassen anreichern.

```
1 # Spalte (Dämpfung)
2 ▼ def myCalc(Value):
3     if (Value == 1):
4         return 7
5     elif (Value == 2):
6         return 7
7     elif (Value == 3):
8         return 3
9     elif (Value == 4):
10        return 2
11    elif (Value == 5):
12        return 6
13 ▼ else:
14    return 7
```

Abbildung 3.37: Berechnung Dämpfungsklassen pro Landschaftskategorie

```
16 # Spalte TRI
17 ▼ def myCalc(Value):
18     if (Value == 1):
19         return 1
20     elif (Value == 2):
21         return 2
22     elif (Value == 3):
23         return 1
24     elif (Value == 4):
25         return 2
26     elif (Value == 5):
27         return 2
28     else:
29         return 3
```

Abbildung 3.38: Berechnung TRI Klassen pro Landschaftskategorie

Nach der Bereinigung und Reklassifizierung kann aus Dämpfungs- und TRI Klassen die Karte 3.39 der Landschaftskategorien erzeugt werden. Die finalen Klassen werden außerdem in der Legende mit den Kombinationen aus Dämpfung und TRI Index dargestellt. Die Zonen grenzen sich nun deutlich voneinander ab und es gibt nur mehr 6 verschiedene Klassen. Mit dieser begrenzten Anzahl an Klassen kann nun versucht werden spezifisch auf diese Landschaftskategorien Mobilfunkmodelle zu kalibrieren und analysieren. Die Untersuchungsgebiete in denen die Mobilfunkanalysen in Kapitel 3.7 durchgeführt wurden, sind ebenfalls in Karte 3.39 zu sehen.

Mit der vorliegenden Karte können nun sehr leicht anhand der vorhandenen Daten gleiche Testgebiete, die ähnliche Landschaftscharakteristika im Bezug auf Höhe sowie Landnutzung aufweisen, gefunden werden. Dies ermöglicht in weiterer Folge, einen wissenschaftlichen Vergleich der Mobilfunkrechnungen und deren Ergebnisparameter. In den Gebieten H und V sind DriveTest Messungen durchgeführt worden. Da sich diese beiden Gebiete in der selben Landschaftskategorie, an den roten Flächen in Karte 3.39 zu sehen, befinden, können sie für den Vergleich und die anschließende Kreuzvalidierung, durch vertauschen Ihrer DriveTest Daten, herangezogen werden.



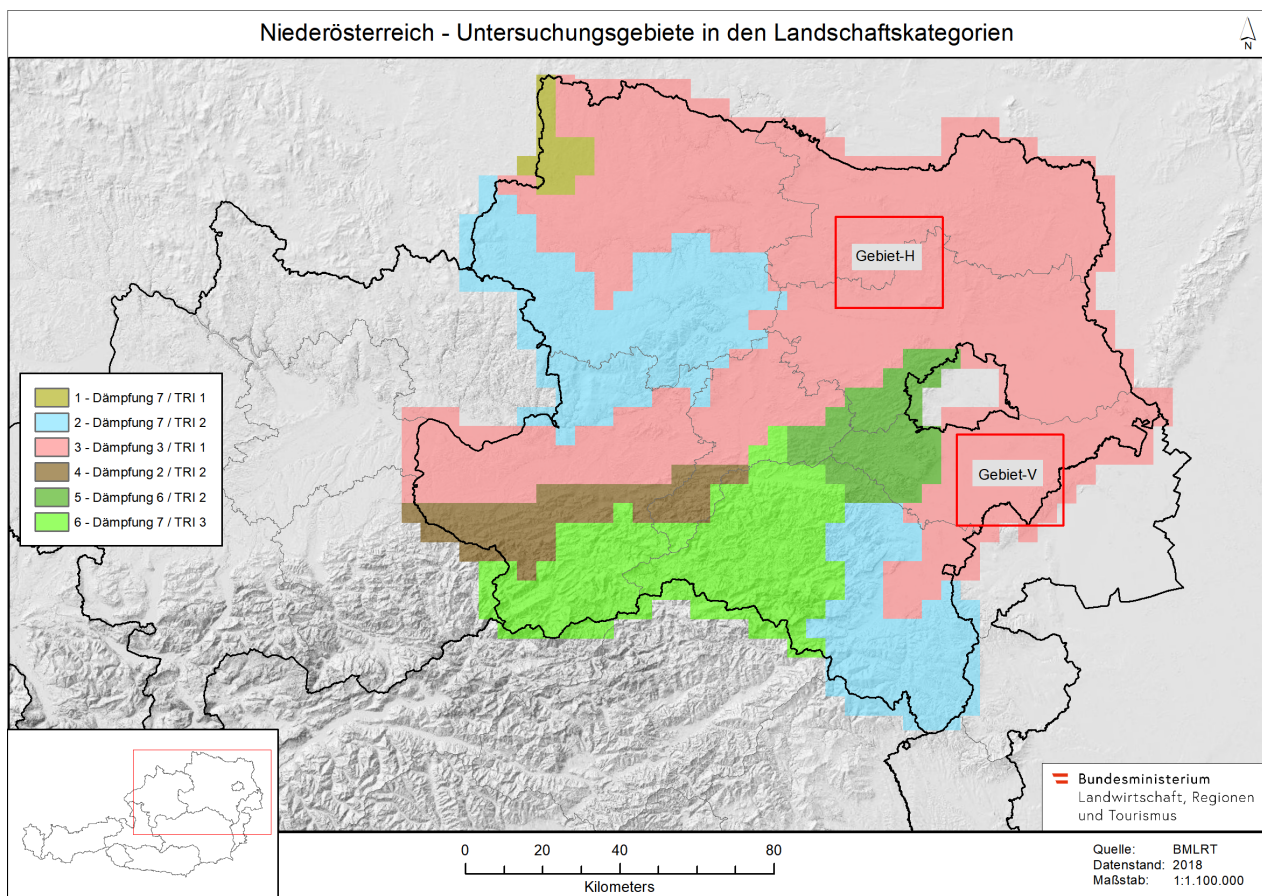


Abbildung 3.39: Landschaftskategorien Untersuchungsgebiete

Landschaftskategorie	Dämpfungsklasse	Name	Dämpfung 900 Mhz (in dBm)	Dämpfung 1900 Mhz (in dBm)	TRI Klasse	Name	Höhe (in Meter)
1	7	Forest (high)	12	17	1	wenig rauh	< 56
2	7	Forest (high)	12	17	2	mäßig rauh	>= 56 - 138
3	3	Semi-Open (low)	11	16	1	wenig rauh	< 56
4	2	Open	3	4	2	mäßig rauh	>= 56 - 138
5	6	Forest (low)	12	17	2	mäßig rauh	>= 56 - 138
6	7	Forest (high)	12	17	3	stark rauh	< 138 - 1111

Abbildung 3.40: Landschaftskategorien mit Dämpfungsklassen und Rauigkeitsindex

Die Kategorien aus denen die Karte 3.39 mit den Landschaftskategorien besteht, werden in Tabelle 3.40 mit ihren genau enthaltenen Parametern dargestellt.

In diesem Kapitel konnten die ersten beiden Arbeitsfragen beantwortet werden:

#### Arbeitsfrage 1

- Wie kann ein Gebiet anhand von Landnutzung und Geländehöhen charakterisiert werden um schließlich Landschaftskategorien zu erhalten?

#### Arbeitsfrage 2

- Mit welcher Methodik können die Gebiete kategorisiert werden?

**Zusammenfassung** Zusammenfassend soll erwähnt werden, warum in dieser Masterarbeit mit dem Rauigkeitsindex für die Landschaftsklassifizierung gearbeitet wurde. Mithilfe einer Maßzahl zur Beurteilung des Unterschiedes zwischen den beiden Rastern des Neigungsvariabilitätsindex sowie des Rauigkeitsindex wurde untersucht, welcher Index für die Klassifizierung besser geeignet ist.

Der *Root Mean Square Error (RMSE)* ist eine Maßzahl um die Qualität einer Prognosen zu beurteilen. Er gibt an wie stark die Daten einer Prognose im Durchschnitt von tatsächlichen Beobachtungswerten abweicht. Der RMSE berechnet sich aus der Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers zwischen dem Neigungsvariabilitätsindex Raster und dem Rauigkeitsindex Raster. Umso größer der RMSE ist, umso stärker weichen die Werte der Raster voneinander ab. Ein RMSE von 0 würde eine exakte Übereinstimmung zwischen den Daten bedeuten. Jedoch muss betont werden, dass keine generelle Aussage über den RMSE Wert getroffen werden können, denn je nach dem wie groß die Spannweite im Ausgangsdatensatz ist, kann ein Ergebnis gut oder schlecht sein.

Der RMSE berechnet sich über:

$$RMSE = \sqrt{\text{Mean}(f - o)^2}$$

- $f$  = forecasts (vorhergesagte Werte)
- $o$  = observed (beobachtete Werte)

In der vorgestellten Analyse ist der beobachtete Wert der Neigungsvariabilitäts Raster und der vorhergesagte Wert der Rauigkeitsindex Raster. Hierbei ergibt sich zwischen diesen ein RMSE von 4.7. Betrachtet man jedoch die Spannweite der Ausgangsdaten, so gab es beim Neigungsvariabilitätsindex fünf verschiedene Werteklassen und beim Rauigkeitsindex (TRI) drei verschiedene Klassen. Der RMSE Wert zeigt also zwischen dem Neigungsvariabilitätsindex und dem Rauigkeitsindex einen starken Unterschied auf. Daher wurde der Neigungsvariabilitätsindex als ungeeignet eingestuft um eine Klassifizierung anhand von Höhencharakteristika durchzuführen. Hingegen weißt der Rauigkeitsindex eine wesentlich bessere Abgrenzung seiner Klassen, im Bezug auf die Höhencharakteristika von Niederösterreich, auf.

Durch die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Versuche geeignete Kategorien für eine klare und effiziente Landschaftskategorisierung durchzuführen, wurden hierfür in dieser Masterarbeit schließlich die erzeugten Dämpfungsklassen mit dem berechneten Rauigkeitsindex (TRI) verwendet.

Als Vergleich soll hier noch erwähnt werden, dass es natürlich bereits andere Ansätze einer Landschaftsklassifizierung in der wissenschaftlichen Literatur gibt. LA Beispiel wäre hier die *europäische Landschaftsklassifizierung (LANMAP)* von [Mücher et al., 2010] zu nennen, welche eine umfassende Klassifizierung aus 4 digitalen Datensätzen, bestehend aus Klima, Höhe, Material und Landnutzung, vornimmt. Hierbei wurden im Unterschied zu dieser Masterarbeit mit drei aggregierten Höhenlevels in Form von TRI Klassen und 9 aggregierten Landnutzungs-klassen in Form von Dämpfungsklassen, in der LANMAP die Höhen auf 5 Klassen und die Landnutzung auf 10 Klassen aggregiert sowie das Ausgangsbodenmaterial und klimatische Bedingungen klassifiziert. Auch in der hierarchischen Typologie der kombinierten Klassen sind



in der LANMAP 3 Aggregationslevels vorhanden, wobei in der detailliertesten Stufe 76 Klassen und in der aggregiertesten Klasse letztlich 8 Klassen zusammengefasst werden. In dieser Masterarbeit wurden zwei Aggregationslevels verwendet, bestehend aus den originalen Daten der Landnutzung mit 24 Klassen die zu 9 Dämpfungsklassen aggregiert wurden und den Höhendaten die mittels des TRI Index auf drei Klassen aggregiert wurden. Zusammengefasst entstanden so 6 kombinierte Klassen aus der Dämpfung und dem TRI Index welche die Landschaft in Zonen in Niederösterreich aufteilte. Auch nutzt die LANMAP eine Kombination der digitalen Datensätze wie Höhe und Landnutzung wie sie ebenfalls in dieser Masterarbeit vorgenommen wird. Im Unterschied zur LANMAP, welche eine detaillierte Klassifizierung der landschaftlichen Eigenschaften aus Klima, Höhe, Bodenmaterial und Landnutzung vornimmt, wurde in dieser Masterarbeit eine simplere Aggregation aus den Höhen und Landnutzungseigenschaften vorgenommen. [Mücher et al., 2010, vgl. S91ff]

### 3.4 Drive Test

Durch die Messung mit einem speziell für Mobilfunkantennen entwickelten Messempfänger der Firma Rohde und Schwarz werden durch eine kreisförmige Datenaufnahme von Basisstationen die Referenzsignalwerte ermittelt sowie die Stationsposition geschätzt. [Grabler, 2018, vgl.S.14f] Im Untersuchungsgebiet aufgenommene DriveTest Punktdaten werden für die Anpassung der Koeffizienten des Hata9999-Modells herangezogen werden.

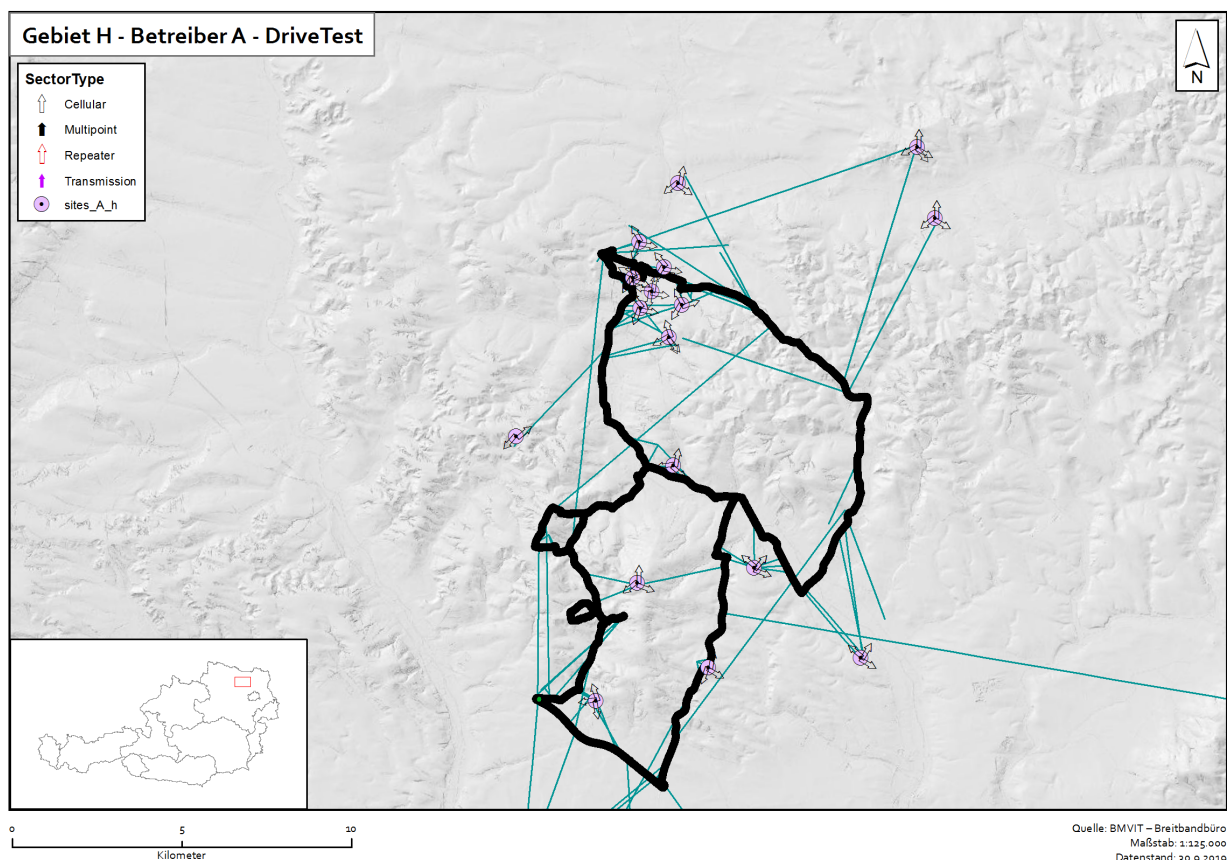


Abbildung 3.41: DriveTest Gebiet H  
[Grabler, 2019, Messungen]

Die folgenden Koeffizienten werden in Cellular Experts im Hata9999 Modell durch die Drive-Test Messung angepasst:  $A_0, A_1, K_{off}, K_{LogD}, K_{LogF}$

Diese Koeffizienten haben folgende Bedeutung:

- $K_{Off}$  - Konstante Abweichung (in dBm). Standardwert: 32
- $K_{LogD}$  - Entfernungseinflusskoeffizient. Standardwert: 20
- $K_{LogF}$  - Frequenzeinflusskoeffizient. Standardwert: 20

[[Sliuzevicius, 2018](#)]

Die Koeffizienten  $A_0$  und  $A_1$  wurden in Kapitel 2.3 bereits erläutert.

Bei der Durchführung des DriveTest sollten ein paar Punkte beachtet werden um die Genauigkeit der Aufnahmen nicht zu beeinträchtigen.

Es sollte hierbei eine möglichst hohe Zahl an verschiedenen Landnutzungstypen oder Dämpfungsklassen durchfahren werden. Außerdem sollten größere Wasserflächen vermieden werden da diese die Mobilfunkstrahlung wesentlich beeinträchtigt. Die Messung der Stationen sollte möglichst ohne Sichtverhinderung erfolgen und rundlich umkreist werden. [[Grabler, 2018](#), vgl. S.10f]

Mit dem DriveTest Scanner können alle relevanten Parameter einer Funkzelle aufgezeichnet werden, solange eine genügend hohe Anzahl an Messpunkten um die Basisstation aufgezeichnet wurden. Auch kann die ungefähre Stationsposition durch das Gerät geschätzt werden. [[Grabler, 2018](#), vgl. S.10f]

Damit ein Vorhersagemodell an die realen Umgebungseinflüsse der Landschaftsbeschaffenheit (vergleiche Kapitel 3.3.1) als auch die Höheneinflüsse des Geländes (vergleiche 3.3.2) angepasst werden kann, müssen Messungen im Gelände mittels DriveTests durchgeführt werden. Sobald diese Daten vorhanden sind, können die Hata9999 Koeffizienten (siehe Kapitel 2.3) in Cellular Experts angepasst werden. Wie gut jedoch die Kalibrierung letzten Endes auf das Vorhersagemodell passt, sind in den Kalibrierungsergebnissen anhand der Standardabweichung (Std) sichtbar. Dabei wird das Vorhersagemodell verfeinert durch sogenanntes *engl. Model Tuning*. Hierbei wird nachdem die Analyseergebnisse wie z.B. der RSRP als auch der durchgeführte DriveTest vorliegen, diese in die *Model Tuning* Funktionalität von Cellular Experts hinzugefügt. [[Sliuzevicius, 2018](#), vgl. K.7, S.8]

	Parameter der DriveTest Kalibrierung						
Kalibrierung	A0	A1	Koff	KlogD	KlogF	Std	Eignung
Gebiet-H 800 MHz	17,5	37,4	28,3	29,2	20	4,5	sehr gut
Gebiet-H 1800 MHz	19,9	48,8	43,6	14,3	20	8,8	schlecht
Gebiet-H 2100 MHz	18,2	42,4	35,2	12,1	20	7,2	mittel
Gebiet-V 800 MHz	15,4	21,6	18,4	18,9	20	5	gut

Tabelle 3.11: Parameter DriveTest Kalibrierung

In Tabelle 3.11 werden verschiedenste Statistiken über die Qualität dieser Kalibrierung erzeugt. Der wichtigste Parameter um die Qualität der Kalibrierung zu beurteilen ist die Standard Abweichung. Hierbei gilt, umso kleiner und näher diese gegen Null ist, desto besser bildet das kalibrierte Vorhersagemodell die realen Umgebungseinflüsse ab. [Sliuzevicius, 2018, vgl. K.7, S.8]

In Tabelle 3.11 sind die verschiedensten Parameter nach der Model Kalibrierung zu sehen. Cellular Experts empfiehlt ein Vorhersagemodell zu akzeptieren welches eine Standardabweichung von  $< 9$  aufweist. In Tabelle 3.11 ist nun die Kalibrierung für das Hata9999 Vorhersagemodell zu sehen welches für die Analysen in dieser Arbeit verwendet wurde. Diese liegen mit Standardabweichungen zwischen knapp unter 9 bis 4,5 und konnten somit als valide Kalibrierungen akzeptiert werden. Cellular Experts empfiehlt hierbei die Kalibrierung mit einer relativen effektiven Antennen Höhe als auch mit erzeugten Dämpfungsrastern durchzuführen. Auch die Anzahl der gemessenen Werte im Feld spielen bei der Qualität der DriveTest Kalibrierung eine wesentliche Rolle. Cellular Experts empfiehlt hierbei mindestens 10 000 Messpunkte damit eine Kalibrierung sinnvolle Ergebnisse liefert. In Gebiet-H wurden knappe 180 000 Messpunkte aufgenommen. In Gebiet-V etwas weniger mit 100 000 Messpunkten.

Durch die mit den DriveTests aufgenommenen Messungen werden die Parameter im Hata9999 Model angepasst. Hierdurch wird das Berechnungsergebnis von Cellular Experts, den realen Bedingungen wie sie vom DriveTest gemessen wurden, verbessert. Für die folgenden Mobilfunkanalysen in Kapitel 3.7 wurden nur Kalibrierungsergebnisse akzeptiert, welche eine Standardabweichung kleiner 9 aufweisen.

## 3.5 HCM Daten

In dieser Masterarbeit werden Mobilfunkdaten, in Form von HCM Daten, verarbeitet. Hierbei steht HCM für die Abkürzung *Harmoniced Calculation Method* und stellt einen in der europäischen Union standardisierten Datensatz dar. Die EU Mitgliedsstaaten haben sich darauf geeinigt Mobilfunkdaten in standardisierter Form bereitzustellen um grenzübergreifende Mobilfunkagen den einheitlich behandeln zu können. Da Mobilfunksignale von Basisstationen in Grenznähe, oftmals ihre Signale in das Nachbarland senden, erlaubt der HCM Standard eine vereinfachte Kommunikation zwischen benachbarten Ländern und allen Fragen rund um Mobilfunksignale. [HCM, 2010, vgl. S.4ff]

Durch das HCM Agreement der EU Mitgliedsstaaten werden die „Real-World-Antennen“ von den Mobilfunkprovidern den HCM „Modellantennen“ zugeordnet. Durch die Datenübermittlung dieser HCM Daten, welche zwar modellhafte Antennen enthalten, ist es möglich, mithilfe des Mobilfunkmodells MoNGA, Modellrechnungen und Vorhersagen zu der erwartenden Mobilfunkabdeckung in Österreich zu treffen. Die HCM Daten werden grundsätzlich in Textbasierter Form im Datenformat (.hcm) ausgeliefert und enthalten alle wichtigen Informationen um eine Mobilfunkstation in ihrer räumlichen Lage, sowie die Stärke und Qualität des Signals, zu berechnen. [vgl. ebd.]

Hierunter fallen der Name des Mobilfunkbetreibers, die geographische Position in Längen- und Breitengrad der Sektoren einer Basisstation, die Sektorhöhe über Grund, die Höhe, Azimut sowie Tilt der Antennen (Sektoren), das horizontale- und vertikale Antennendiagramm (generalisiert

nach HCM EU Agreement) und die Kanalbandbreite des Sektors. [vgl. ebd.]

„Die textbasierten HCM-Daten werden mittels eines Importtools von Cellular Expert in den Workspace von ArcGIS importiert und stehen dann für die Berechnung der Mobilfunkversorgung zur Verfügung“ [Grabler, 2018, S.10].

Am 12.10.2005 wurde die Vereinbarung zwischen den Verwaltungen von Österreich, Belgien, der Tschechischen Republik, Deutschland, Frankreich, Ungarn, den Niederlanden, Kroatien, Italien, Liechtenstein, Litauen, Luxemburg, Polen, Rumänien, der Slowakischen Republik, Slowenien und der Schweiz über die Koordinierung von Frequenzen zwischen 29,7 MHz und 39,5 GHz für den festen Funkdienst und den mobilen Landfunkdienst (HCM Vereinbarung) getroffen. Die sogenannte *Harmonised Calculation Method (HCM)* ist ein international abgestimmtes Verfahren, um die Feldstärke im Sendegebiet von Funkdiensten zu ermitteln. Die Einführung durch europäische Fernmeldeverwaltungen erfolgte durch die HCM-Vereinbarung mit dem Ziel, das spezifizierte Frequenzspektrum auch in Grenznähe optimal auszunutzen und schädliche Störungen zu verhindern. Das HCM Agreement wurde geschaffen damit sich Mobilfunkfrequenzen nicht gegenseitig stören. Besonders in Grenzgebieten kann dies zu Problemen führen und soll somit Mobilfunkfrequenzen besser unter den beitragenden EU Mitgliedstaaten organisiert werden. Jedes Land muss andere Stationen welche zu Störungen führen könnten berücksichtigen bevor es eine neue Station baut. Durch die exakte Berechnung der Interferenzen soll eine optimale Nutzung des Spektrums erreicht werden. [HCM, 2010, vgl. S.4ff]

### 3.6 Verknüpfung HCM Daten mit Drive-Test

Damit die Koeffizienten (A0, A1) durch die DriveTest Messung angepasst werden können, müssen in den Mobilfunkmodellen (zB. im Hata9999 Modell) eine Zuordnung der eNodeB Zellen ID der DriveTest Daten mit der Zellen ID der Stations- und Sektordaten in den HCM Daten durchgeführt werden.

Dies wird in einem Python Skript welches im BMLRT entwickelt wurde, umgesetzt. Hierbei werden die HCM Daten mit den DriveTest Daten verbunden, um in weiterer Folge die Sektoren und deren Vorhersage Modelle zu kalibrieren. Hierbei werden die maximal gemessenen Signalwerte der Basisstation dem jeweiligen Sektor zugeordnet. Die aufgezeichneten Drive-Test Punkte werden über eine räumliche Zuordnung der geschätzten Stationspositionen zu den Geopositionen aus den HCM Daten verbunden. In Abbildung 3.42 ist der Prozess schematisch zu sehen, wie die HCM Daten mit den DriveTest Messungen verbunden werden.

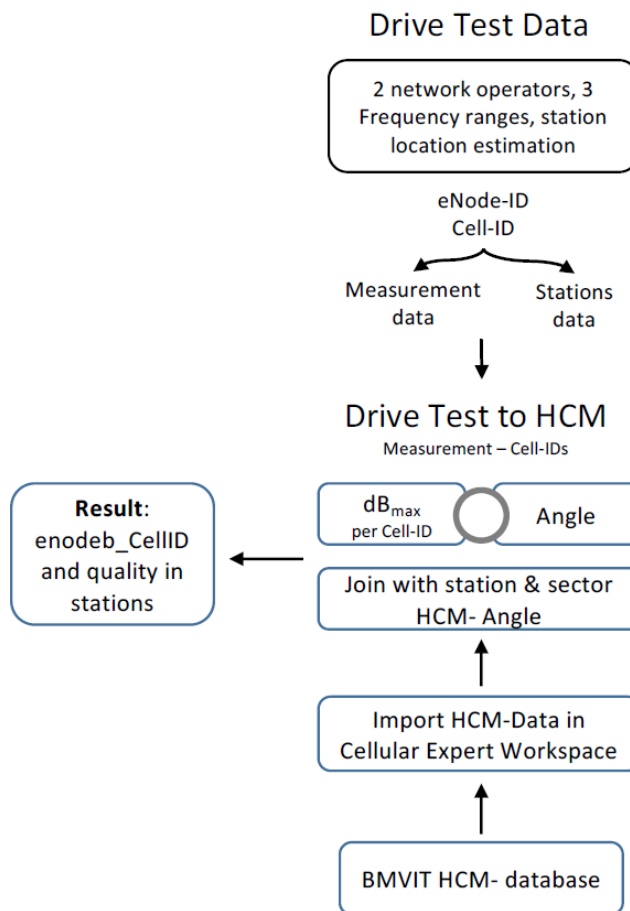


Abbildung 3.42: Workflow Integration der DriveTest Ergebnisse in HCM Daten  
[Grabler, 2018, S.13]

Hierfür werden in dem oben angesprochenen Skript mehrere der folgenden Schritte durchgeführt. Zuerst wird anhand berechneter Fehlerellipsen die Genauigkeit der Standortschätzung überprüft. Hierbei wird überprüft welche DriveTest Messpunkte für die Verknüpfung mit den HCM Sektoren verwendet werden. Wenn der Radius der Fehlerellipsen mit hoher Präzision an die jeweiligen HCM Sektoren zusammenpasst, kann die Verknüpfung dieser Messdaten verwendet werden. Auch die Anzahl der Messdaten spielt bei der Qualität der Fehlerellipsen eine Rolle. Bei zu wenig Messdaten kann eine korrekte Zuordnung zu den HCM Sektoren nicht vollzogen werden. Am sichersten ist die Aufnahme von Messreihen in mehreren Ringen um die jeweiligen Sektoren in unterschiedlichen Abständen. Anschließend werden die bereits gemessenen DriveTest Messpunkte markiert, welche einen maximalen Abstand von 5000 Meter von der jeweiligen Basisstation besitzen. Zusätzlich werden hierbei auch NULL Werte also Zeilen ohne Werte gelöscht, welche nicht benötigt werden und nur unnötigen Speicherplatz verbrauchen würden. Die Winkeln zwischen zwei HCM-Sektoren werden halbiert abzüglich 10 Prozent um Überlappungen im Grenzbereich der Sektoren zu vermeiden. Als Beispiel werden zB. 90 Grad -10 Prozent des Sektors berechnet was 81 Grad oder +- 40 Grad als gültigen Bereich zwischen zwei Sektoren ergibt. Zusätzlich wird überprüft ob der Winkel des maximalen Messwertes (dbMax) in dem soeben berechneten Bereich zum liegen kommt. [Grabler, 2018, vgl. S.13f]

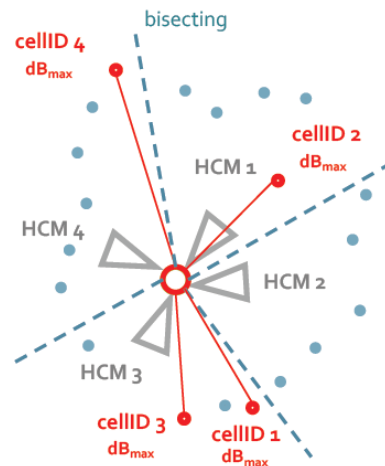


Abbildung 3.43: Beispiel einer Sektorzuordnung durch DriveTest Daten  
[Grabler, 2018, S.14]

Nachdem die HCM Daten zu den DriveTest Messungen mittels der Sektoren zugeordnet wurden, kann mit Cellular Experts in ArcGIS durch den Import eines Arbeitsbereiches die in Rohform vorhandenen HCM Daten in für Geographische Informationssysteme lesbare Form gebracht werden. Hierbei werden aus den gemessenen DriveTest Punkten die Maximalwerte den richtigen Sektoren der HCM Daten zugewiesen und in der Attribut Tabelle die richtige *eNodeB cell ID* gespeichert. Die korrekten Sektoren werden dann als neuer Punktdatensatz in eine neue *File Geodatabase* exportiert. [Grabler, 2018, vgl. S.14]

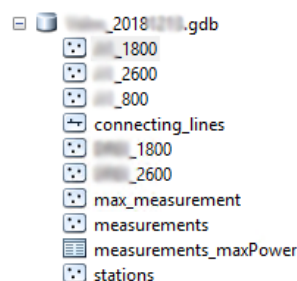


Abbildung 3.44: Sektoren in GDB

Die Dateistruktur welche in Abbildung 3.44 zu sehen ist, wurde bereits in der Karte 3.41 visualisiert und stellt den Prozess der Zuordnung der maximal aufgezeichneten Messwerte der DriveTests zu den einzelnen Antennensektoren aus den HCM Daten dar.

## 3.7 Mobilfunkanalysen

In diesem Kapitel sollen die HCM Daten mittels Cellular Expert analysiert werden. Hierzu werden zwei Testgebiete herangezogen in welchen einmal mit dem DriveTest Scanner die Antennendiagramme kalibriert wurden und einmal ohne Kalibrierung. Es sollen auch die Ergebnisse hinsichtlich der Frequenzen 800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz analysiert werden. Die Frequenz leistet hierbei ein wesentliches Merkmal für unterschiedliche Reichweiten der Antennenleistung. Jede der Frequenzen wird pro Gebiet- H sowie Gebiet-V jeweils mit und ohne Kalibrierung kartographisch als auch statistisch im Detail analysiert. Am Ende wird noch das Gebiet-H



und Gebiet-V jeweils mit vertauschten DriveTest Kalibrierung Kreuzkalibriert und anhand der RSRP analysiert.

Gebiet	Frequenz	DriveTest	RMSE	Daten Spannweite
Gebiet-H	800 MHz	nicht kalibriert	12,8	64
		kalibriert		88
	1800 MHz	nicht kalibriert	21,9	82
		kalibriert		89
	2100 MHz	nicht kalibriert	23,2	91
		kalibriert		89
Gebiet-V	800 MHz	nicht kalibriert	27,8	77
		kalibriert		
Gebiet-H	800 MHz	Kreuzkalibriert mit Gebiet-V	21,5	67
		kalibriert		
Gebiet-V	800 MHz	Kreuzkalibriert mit Gebiet-H	22,08	80
		kalibriert		

Abbildung 3.45: Parameter der Mobilfunkanalysen

Als Übersicht über die, ab Kapitel 3.7.5, durchgeführten Analysen, soll in Tabelle 3.45 dargestellt werden, welche Analysen in den Gebieten mit welcher Frequenz, ob mit DriveTest Kalibrierung oder ohne, durchgeführt wurden. Zusätzlich wird das Ergebnis des RMSE pro Analyse angegeben als auch die Gesamtdatenspannweite jeder Berechnung um den RMSE in Relation zu setzen.

### 3.7.1 Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete für die Kreuzvalidierung befinden sich Nord-Westlich von Wien im sogenannten Gebiet-H sowie süd-östlich im Gebiet-V. In diesen Gebieten sind DriveTest Daten vorhanden, welche die gemessenen Sektoren kalibrieren um die Mobilfunkberechnungen an die realen Umgebungseinflüsse anzupassen.

Das Gebiet-H sowie Gebiet-V befinden sich in der selben Landschaftskategorie wie sie in Abbildung 3.46 definiert wurden. Daher dienen diese zwei Gebiete als Testgebiete für eine Kreuzvalidierung der durch die DriveTest Daten kalibrierten Hata9999 Parameter welche die Mobilfunkanalyse Ergebnisse beeinflussen.

Die für diese Masterarbeit entwickelten und definierten Landschaftskategorien wurden bereits ausführlich in Kapitel 3.3 beschrieben und analysiert. Diese Landschaftskategorien fließen in folgenden Kapiteln bei allen Cellular Expert Mobilfunkberechnungen mit ein.



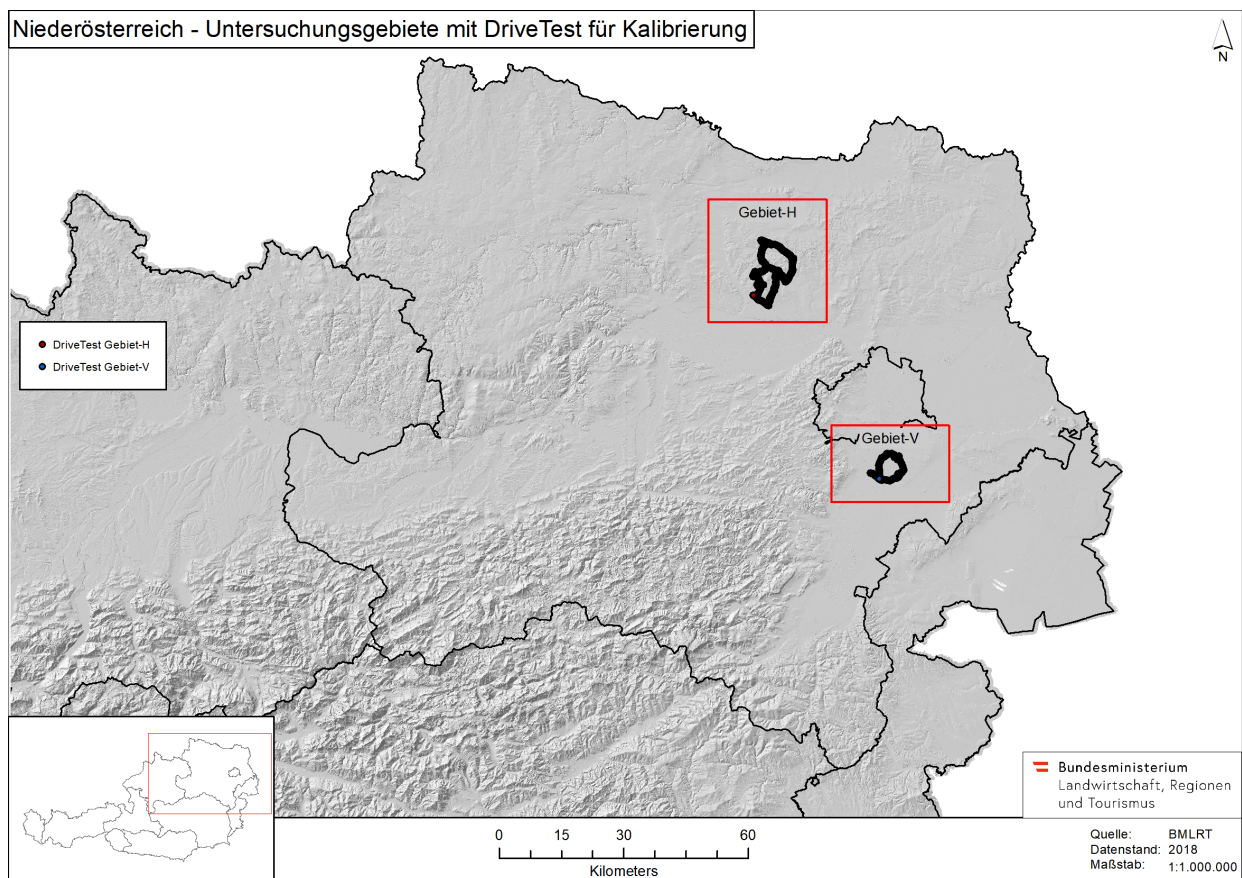


Abbildung 3.46: Untersuchungsgebiete mit DriveTest in Niederösterreich  
[Grabler, 2018, DriveTest Messungen]

Alle zu Verfügung stehenden Drive Tests befinden sich im Österreichischen Bundesland Niederösterreich. Innerhalb der ausgewählten Gebiete in welchen die Mobilfunkanalyse durchgeführt wurden, befinden sich diverse Landschaftscharakteristika wie unterschiedliche Höhen des Geländemodells sowie Landnutzungskategorien aus den Corine Landcover Daten. Das Untersuchungsgebiet wird also anhand der Drive Tests ausgesucht da sich die Mobilfunkberechnungen von *MoNGA* mit den Drive Tests abgeglichen werden müssen um einen Vergleich über die Netzausbreitung mit und ohne Kalibrierter Ergebnisse zu erhalten.

Da in Gebiet-H sehr detailliert die Signalparameter und ihre Bedeutung beschrieben werden, wird in Gebiet-V nur der Vergleich der RSRP und der Unterschied der Berechnungen mit Kalibrierung und ohne Kalibrierung dargestellt. An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass für die Berechnungen der Vorhersagemodelle aus einem Gesamtdatensatz der HCM Daten aus 10 000 Basisstationen einzelne ausgewählt wurden.

### 3.7.2 Cellular Experts Modelleinstellungen

Bevor in Cellular Experts Mobilfunkvorhersagen durchgeführt werden können, müssen zuerst einige Einstellungen getroffen werden. Hierbei wird das sogenannte Vorhersagemodell mit Einstellungen versehen um die verschiedensten Parameter welche im Mobilfunk berücksichtigt werden müssen zu definieren. Zuerst wird der *Model name* vergeben, welcher in weiterer Folge im Attribut Table von ArcGIS innerhalb der Sektoren gespeichert werden muss damit die

berechneten Sektoren mit dem jeweiligen Vorhersagemodell verbunden werden können. Natürlich muss dem Modell die auf der zu berechnenden Basisstation und Sektor verwendete Frequenz mitgeteilt werden welche unter *Frequency (MHz)* als numerische Ganzzahl zu hinterlegen ist. Weiteres kann der zu berechnenden Radius als *Prediction extent* ebenfalls als numerische Ganzzahl angegeben werden. Dieser limitiert dann abhängig von der angegebenen maximalen Reichweite die Berechnungsergebnisse dementsprechend. Bei der Berechnung der Vorhersage wird eine Raster Datei erzeugt welche eine gewisse räumliche Auflösung besitzt. Diese Auflösung kann anhand der *Cell size* angegeben werden. Dadurch kann der berechnete Raster dementsprechend besser oder schlechte aufgelöst sein. In dieser Arbeit wurden hauptsächlich Raster Auflösungen von 50 x 50 Metern gewählt um einen Kompromiss zwischen guter Auflösung und schnellen Berechnungsdurchlaufzeiten zu garantieren. Für hohe Auflösungen < 10 x 10 Metern können Berechnungszeiten stark ansteigen.

The screenshot shows the 'General settings' window of the Cellular Experts software. It contains several input fields and checkboxes for configuring the model. The 'Model name' is 'A\_800\_V\_cal\_loss\_bui' and the 'Frequency (MHz)' is '800'. Under 'Prediction extent', the 'Maximum radius (km)' is '15' and the 'Cell size (m)' is '10'. In the 'Topography' section, the 'DTM grid' is set to 'ehoeihenmodell\dtm\_lamb\_10m\_00\_01\_ETRS\_1989\_LAEA\dtm\_10m\_cubic.tif' and the 'Obstacle height grid' is checked and set to 'ino\4\_CE\_Test\_Analysis\1\_Data\BUILDINGS\buildings\_raster'. The 'Receiving antenna gain' section has three radio buttons: 'User defined (dBi)' (0), 'From antenna', and 'From user profile' (selected, set to 'Mobile\_LTE'). The 'Effective earth' section has a 'Multiplier' dropdown set to '4/3' and a 'Radius (km)' set to '8500'. The 'Receiving antenna height' section has two radio buttons: 'Constant receiving antenna height above DTM (m)' (selected, set to '1,5') and 'Receiving antenna height grid'.

Abbildung 3.47: Modelleinstellungen allgemein  
[Sliuzevicius, 2018]

Um auch die Topographie des Geländes in das Modell einfließen zu lassen, kann unter *DTM grid* ein Raster mit einem digitalen Geländemodell hinzugefügt werden. Zusätzlich kann auch ein eigener Raster, welcher Hindernisse darstellt und in dieser Masterarbeit die Umrisse der OSM Gebäude beinhalten, dem Modell mitgegeben werden. Unter *Receiving Antenna Gain* kann ein spezifisches Benutzer Profil, welches Eigenschaften zur verwendeten Antennen und deren Leistung in dBm als auch der maximalen Download Kapazität, angegeben werden. Um das Modell auf die wahre Krümmung der Erde auszurichten wird unter *Multiplier 4/3* die Korrektur in das Modell eingerechnet. Zusätzlich kann in das Modell noch die ungefähre Höhe eines mobilen Empfangsgerätes unter *constant receiving antenna height above DTM(m)* angegeben werden. Dieser Wert wurde für die Berechnungen in dieser Masterarbeit mit 1,5 Meter über dem Grund geschätzt.

**Hata Model parameters**

Hata Model Parameters

☐ Standard Hata Model Parameters

☒ Macro Model Parameters

KOff: 135 KLogD: 38 KHm: -2,55

KLogHm: 0 KLogHeff: -13,82 KLogHeffLogD: -6,55

☐ Use Dual Slope

KFarOff: 32 KFarLogD: 40 Breakpoint distance (km):

☒ 9999 Model parameters

A0: 36,8 A1: 30,2 A2: -12 A3: 0,1

Abbildung 3.48: Modelleinstellungen Hata parameters  
[Sliuzevicius, 2018]

Besonders wichtig für die Berechnungen im Mobilfunkmodell von Cellular Experts sind die *Hata Model parameters*. Hier kann zwischen *Standard Hata Model Parameters*, *Macro Model Parameters* sowie dem *9999 Model parameters* ausgewählt werden. Für die Berechnungen in dieser Masterarbeit wurde das genauere Hata9999 Modell verwendet. Die hier angegebenen Hata9999 Werte beziehen sich auf eine nicht kalibrierte Analyse und sind Standardwerte.

**Effective antenna height**

Effective antenna height

☐ Absolute

☐ Average

☒ Relative

☐ Profile Each (deg): 5

☐ Slope MAX (m): 2000

**Diffraction loss**

☒ Calculate Diffraction Loss

Method: Dominant

Parameters

MIN Knife-Edge separation (m): 0

☒ KDiff value: 1

☐ KDiff raster:

Abbildung 3.49: Modelleinstellungen Antennenhöhe und Beugungsverlust  
[Sliuzevicius, 2018]

Die *Effektive Antennenhöhe* kann sich auch auf einem gewissen Level über Grund befinden. In dieser Masterarbeit wurde hierbei die Einstellung *Relative* gewählt. Eine weitere Einstellung bezieht sich auf den Beugungsverlust *Diffraction Loss* der Signale an Hindernissen wenn keine direkte Sichtverbindung zum Empfangsgerät vorhanden ist. In diesem Fall erlaubt die Beugung das Blicken hinter ein Hindernis. Im Bereich des sichtbaren Lichtes ist das Blicken hinter ein Hindernis nicht möglich. Jedoch in den niederen Frequenzen des Mobilfunkes können elektromagnetische Wellen an der Spitze der Kante von Hindernissen derart gebeugt werden, dass diese den Weg dahinter zum Empfänger finden. Jedoch werden die elektromagnetischen Wellen bei diesem Vorgang abgeschwächt wodurch es zu einer sogenannten Beugungsdämpfung kommt [Sliuzevicius, 2018, vgl. S.3-9].

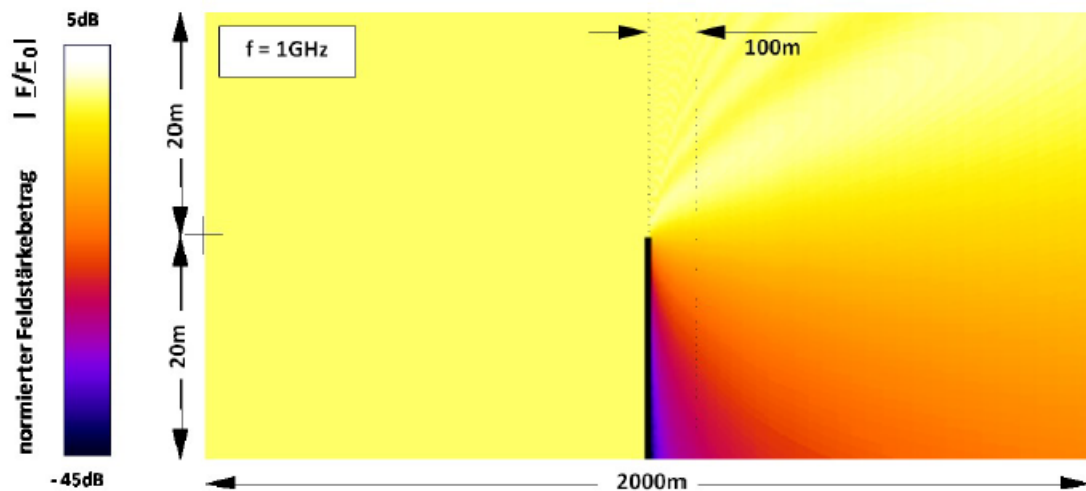


Abbildung 3.50: Beugungsdämpfung  
[Rose, 2014]

Eine weitere wichtige Einstellung betrifft das *Free Space Loss Model for LOS areas (FSPL)* in Abbildung 3.51, welche den Pfadverlust der Signalstärke einer elektromagnetischen Welle durch den frei sichtbaren Raum ohne Hindernisse, die Reflexionen oder Beugungen verursachen, beschreibt. Das FSPL stellt also die theoretische ideale Ausbreitung von Funkwellen im Vakuum dar, wie sie eigentlich nur im Weltall bei der Kommunikation zwischen Satelliten vorkommt. [Wolff, 2021, vgl.]

Die Koeffizienten des FSPL der Abbildung 3.51 wurden in Kapitel 3.4 im Detail erläutert. [Sliuzevicius, 2018, vgl. S.]

Weiteres kann über *Use Dual Slope* definiert werden wie analoge Signale in digitale Signale umgewandelt werden. Hierbei definiert das *Dual Slope* Verfahren wie die wellenförmigen analogen Signale in digitale 0 und 1 interpretiert werden. Dies geschieht in einem A/D Wandler welcher kontrolliert ob am Eingang des Sensors die positive Spannung gegenüber der negativen überwiegt und als “1,” interpretiert oder aber die positive Spannung gegenüber der negativen unterliegt und somit das Signal als “0,” interpretiert. Hierbei stellen die in Abbildung 3.51 dargestellten Parameter die Anpassung des Mobilfunkmodells dar. [Lipinski, 2020a]

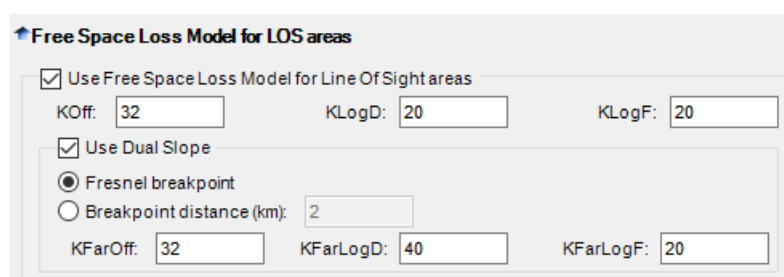


Abbildung 3.51: Modelleinstellungen Freespace loss  
[Sliuzevicius, 2018]

Zusätzlich kann unter den Freiraummodelleinstellungen in Abbildung 3.51 auch der sogenannte *Fresnel breakpoint* definiert werden. Mit Hilfe der Fresnelzonen, welche in Abbildung 3.52 dargestellt sind, kann die zusätzlich entstehende Dämpfung, welche aufgrund von Hindernissen

zwischen zwei Antennen auftritt gemessen und anhand eines Rotationsellipsoids modelliert werden. Hierbei kann es trotz direkter Sichtverbindung, fachlich als *Line of Sight* bezeichnet, zwischen den Antennen zu einer Dämpfung des Funksignals durch Hindernisse, welche zwischen diesen liegen kommen. [Lipinski, 2016b, vgl.]

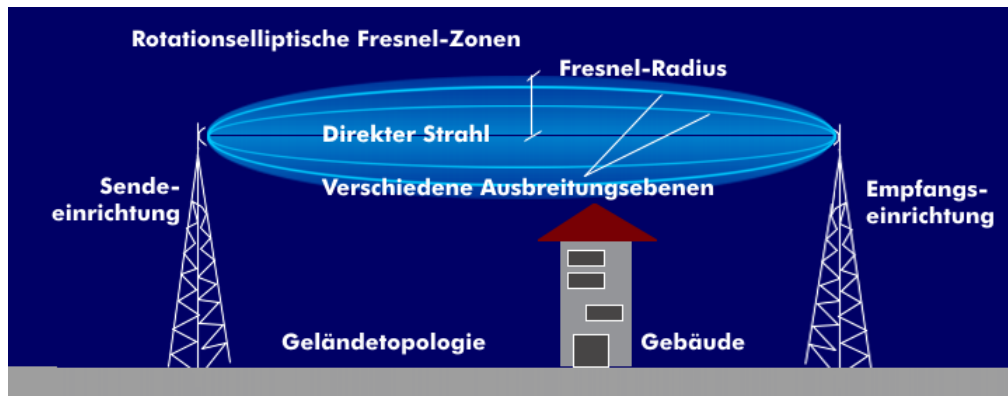


Abbildung 3.52: Fresnelsche Zone  
[Lipinski, 2016b]

Schließlich kann im Mobilfunkmodell das sogenannte *Loss offset grid* hinzugefügt werden. Dieser Raster definiert, wie das Signallevel an jedem Punkt beeinflusst wird. Durch den Loss offset Raster kommt es an manchen Orten zu einem stärkeren Übertragungsverlust, während es an anderen Orten zu einem geringeren Verlust kommen kann. Aus den Corine Landcover Daten werden, wie in Kapitel 3.3.1.1 vorgestellt, die Dämpfungsklassen zusammengefasst aus welchen schließlich der Loss Offset Raster erzeugt wird.

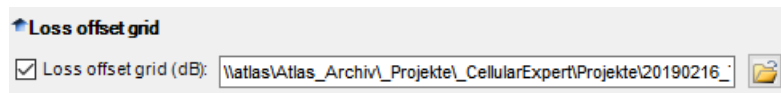


Abbildung 3.53: Modelleinstellungen loss offset  
[Sliuzevicius, 2018]

### 3.7.3 ESRI Grid-Raster

Rasterdaten welche in von ESRI genutzten Programmen wie ArcGIS verwendet werden, weisen eine spezielle Dateistruktur auf. Jedes Grid besteht aus mehreren Dateien in denen geographische Positions- und Attributwerte, als auch Daten zur Coverage des Grids gespeichert sind. Die verschiedenen Dateien, welche zu einem ESRI Grid-Raster zugehörig sind, befinden sich in einem gemeinsamen Verzeichnis. Diese Daten können sowohl im INFO-, ASCII oder Binärformat gespeichert sein. Durch die Berechnungen mit Cellular Experts werden aus den Basisstations- und Sektordaten, welche in Geographischen Punktdaten vorliegen, Grid-Rasterdaten erzeugt. [ESRI, 2021, vgl.] Folgende Daten werden in dieser Masterarbeit analysiert und in den nachfolgenden Kapiteln sowohl grafisch als auch statistisch analysiert:

- dbfbnd.adf  
Die sogenannte Grenzdatei enthält die minimale und maximale XY-Koordinaten für ein Grid. Diese liegt im sogenannten INFO-Format vor.

- **hdr.adf**  
In der Headerdatei sind die Zellauflösung, der Dateityp (Integer oder Gleitkomma), der Grad der Komprimierung, sowie Kacheln des Grids gespeichert. Die hdr Datei liegt im Binärformat vor.
- **sta.adf**  
In der sta Datei sind die Statistiken der Zellenwerte (Minimum, Maximum, Durchschnitt und Standardabweichung) gespeichert. Sie wird im INFO Format bereitgestellt.
- **vat.adf**  
Die *vat* stellt die Wert-Attributtabelle in welcher Attributdaten zu den Zonen des Grids gespeichert sind. Sie liegt im INFO Format vor und kann nur für Grids vorhanden sein, welche mit dem Dateityp Integer gespeichert sind.
- **w001001.adf**  
In der *w001001* wird der Wert jeder Zelle in der ersten Basiskachel eines Grids gespeichert. Diese liegen im Binärformat vor.
- **w001001x.adf**  
In der *w001001x* wird in den Kacheln jedes Blockes der Index gespeichert. Diese liegen im Binärformat vor. Falls sich mehrere Kacheln in einem Grid befinden, bedeutet das x am Ende des Dateinamens ein Inkrement.

[vgl. ebd.]

In folgenden Kapiteln werden nun die hier vorgestellten ESRI Grid-Raster anhand von Karten und Statistiken nach Frequenz, Untersuchungsgebiet als auch Referenzsignal analysiert, um Rückschlüsse auf die Qualität und den Einfluss einer Kalibrierung durch DriveTest Messungen zu erhalten.

### 3.7.4 Vorbereitung der Daten

Bevor jedoch die RSRP Raster genauer statistisch analysiert werden können, müssen diese noch mit den Dämpfungsklassen (Landnutzung) verknüpft werden. Dafür müssen die neu klassifizierten Dämpfungsklassen, welche original in Form von Polygonen vorliegen in Raster umgewandelt werden. Da in diesem Kapitel die Signalstärke RSRP, welche als Raster vorliegt, analysiert wird, müssen der Dämpfungsdatensatz ebenfalls auf das Raster Format umgewandelt werden, um eine Verknüpfung dieser Daten zu ermöglichen. Mit dem Geoverarbeitungs Werkzeug *Combine* werden dem RSRP Raster zu jeder Signalstärke die jeweilige dort vorhandene Dämpfungsklasse aus der Landnutzung hinzugefügt. Nur so können anschließend Statistiken erzeugt werden, welche den Zusammenhang zwischen RSRP Signalstärke und den jeweiligen Dämpfungsklassen veranschaulichen.



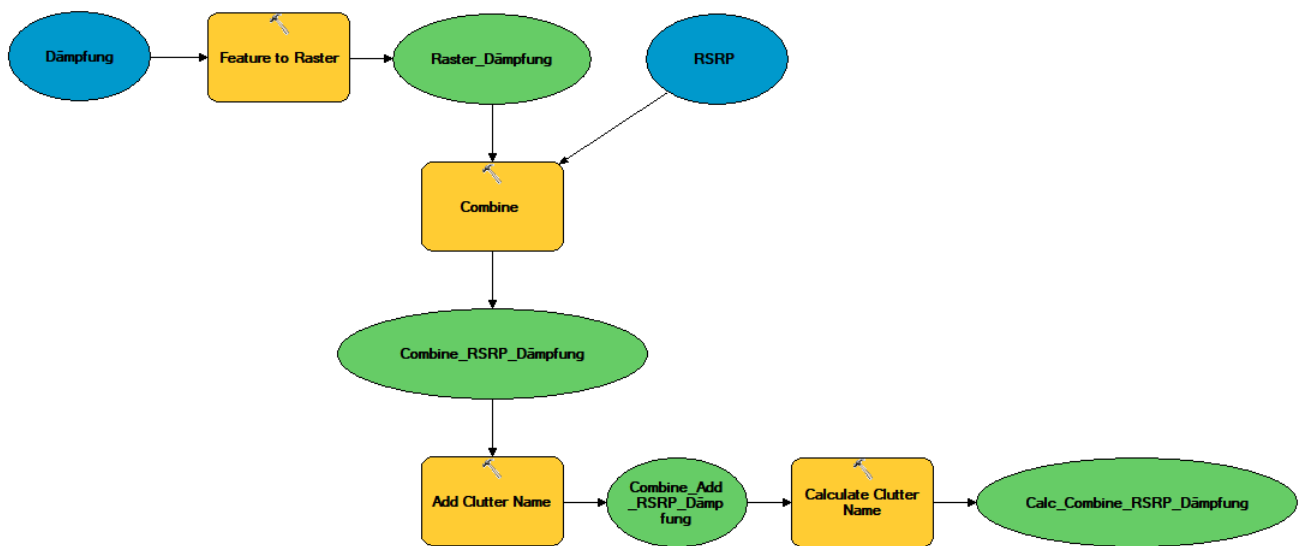


Abbildung 3.54: Modell Verknüpfung der RSRP mit Dämpfung

Das Modell in Abbildung 3.54 beschreibt schematisch wie der RSRP Datensatz mit den Dämpfungsklassen verknüpft wird, um anschließend für die statistische Analyse angereicherte Informationen bereitzustellen. In Abbildung 3.58 ist ein Ausschnitt der Ergebnistabelle, wie sie nach der Verknüpfung der RSRP mit der Dämpfung sowie dem Hinzufügen der Dämpfungsklassennamen, aussieht.

Um in weiterer Folge das berechnete Referenzsignal RSRP zu analysieren, wird der durch Cellular Experts erzeugte Grid-Raster (siehe Kapitel 3.7.3) mit der Statistik Programmiersprache *R* eingelesen und in den folgenden Kapiteln detailliert anhand statistischer Kennwerte analysiert. Hierfür wird die speziell für Rasterdaten entwickelte R-Bibliothek *raster* verwendet, um die durch Cellular Experts erzeugten ESRI Grid Raster im Format (.hdf) einzulesen. Das *raster* Paket bietet Funktionen und Klassen um geographisch- räumliche Daten im Raster Format zu verändern. Rasterdaten teilen den Raum in gleich große Zellen anhand der Einheiten des Referenzkoordinatensystems.

Die in Abbildung 3.61 durchgeführten Analysen werden in *R* als sogenannte *Raster Layer* abgespeichert (siehe Abbildung 3.55).

```

> class(hdr)
[1] "RasterLayer"
attr(,"package")
[1] "raster"
  
```

Abbildung 3.55: Klasse Raster

Damit jedoch die hier eingelesenen Grid Raster Daten von ESRI im (.hdf) Format für eine statistische Analyse mittels des Paketes *ggplot* verwendet werden kann, müssen die Raster in ein sogenanntes Data.Frame in *R* umgewandelt werden. Die hierfür notwendigen Schritte sind in Abbildung 3.56 zu sehen. Hierbei müssen leider mehrere Schritte programmiert werden um den Raster, welcher den RSRP Wert in der *ID* Variable gespeichert hat, in eine *RSRP* Variable umzuwandeln (siehe 3.57).



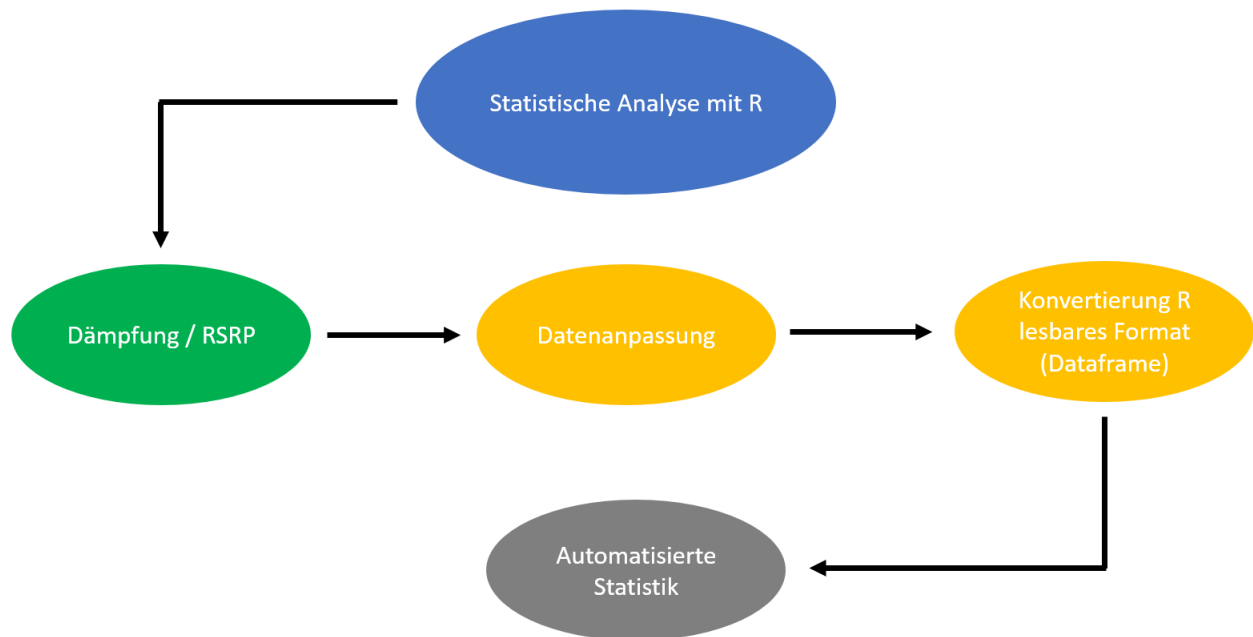


Abbildung 3.56: Workflow Aufbereitung für R Statistik

```

library(raster)
library(sf)
library(ggplot2)

# read H 800 uncal_a - RSRP(hdr) - Raster
hdr <- raster("G:/Master_Thesis_CE_Daten/CE_Analyse/Ergebnisse_Messungen/Analysis_Noe/Predictions/Vergleich/
H_800_unca1_a/Show/1tepred_200902164905/FS1_clc2/hdr.adf")

# Inspect hdr Raster
head(levels(hdr)[[1]])

### convert Raster to Dataframe ###
# Get the attribute table
RAT <- levels(hdr)[[1]]

# Replace COUNT with ID
RAT$RSRP <- RAT$ID
RAT$COUNT <- NULL

# Replace the attribute table
hdr2 <- hdr
levels(hdr2)[[1]] <- RAT

# Create a single layer based on the new RAT
hdr2 <- deratify(hdr2)

# Create a data frame
hdr_df <- as.data.frame(hdr2, xy = FALSE, fix.empty.names = TRUE, na.rm = TRUE)

# delete Zwischendatensätze
rm(hdr2, RAT)

# Inspect hdr Raster
head(hdr_df)

# rename FS1 to RSRP
names(hdr_df)[names(hdr_df) == "FS1_1"] <- "RSRP"
names(hdr_df)[names(hdr_df) == "CLC_NOE_RASTER_R"] <- "Clutter_Klasse"
names(hdr_df)[names(hdr_df) == "CLUTTER_NAME_CLUTTER_NAME"] <- "Clutter_Name"

# delete Column
hdr_df[4] <- NULL

```

Abbildung 3.57: Lesen der (.hdr) Raster sowie Umwandlung in Data.Frame  
Copyright: Pino Feichtinger

Außerdem werden die zuvor in ArcGIS mittels Python verbundenen Dämpfungsklassen, welche sich nun am Datensatz mit der RSRP befinden, umbenannt sowie unnötige Spalten gelöscht. In

Abbildung 3.58 wird überprüft, ob der Code auch wirklich die Transformation der Raster hin zu einem Data.Frame vollzogen hat.

```
> class(hdr_df)
[1] "data.frame"
> head(hdr_df)
  Clutter_Klasse RSRP Clutter_Name
128             6 -101 Forest_low
129             6 -101 Forest_low
130             6 -101 Forest_low
131             6 -101 Forest_low
132             6 -101 Forest_low
133             6 -101 Forest_low
```

Abbildung 3.58: Klasse Data.Frame

Man sieht nun, dass der (.hdr) Raster in ein von ggplot2 lesbares Datenformat (Data.Frame) umgewandelt wurde und dass sich neben jedem RSRP Wert eine Dämpfungsklasse sowie Dämpfungsklassenname befindet (diese werden hier im Code der Einfachheit halber als *Clutter* bezeichnet). Damit die Analyse der RSRP auch mit den Dämpfungsklassen (Clutter) gemeinsam kombiniert analysiert werden kann, müssen diese beiden Datensätze noch miteinander verknüpft werden.

```
# ggplot Histogram
png(file="G:/Master_Thesis_CE_Daten/Master Thesis/Masterarbeit_TeX_zitierung/img/Histogram_RSRP_Gebiet-H_800_nicht_kalibriert.png",
width=827, height=614)

ggplot(hdr_df, aes(x=RSRP, fill= Clutter_Name, color = Clutter_Name)) +
  geom_histogram(bins = 60, alpha = 1, position="identity") +
  labs(title = 'Häufigkeitsverteilung der RSRP in Gebiet-H, 800 MHz - nicht kalibriert pro Dämpfungsklasse',
        x = 'RSRP (in dBm)', y = 'Anzahl Rasterzellen') +
  geom_vline(aes(xintercept=mean(RSRP)), color="blue", linetype="dashed", size=1)
dev.off()

# ggplot Boxplot
png(file="G:/Master_Thesis_CE_Daten/Master Thesis/Masterarbeit_TeX_zitierung/img/Boxplot_RSRP_Gebiet-H_800_nicht_kalibriert.png",
width=750, height=620)

ggplot(hdr_df, aes(x=Clutter_Name, y=RSRP, color=Clutter_Name)) +
  geom_boxplot() +
  labs(title="Boxplot - Verteilung RSRP in Gebiet-H, 800 MHz - nicht kalibriert pro Dämpfungsklasse", x="Dämpfungsklassen",
        y="RSRP (in dBm)") +
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 45, hjust = 1, size=12)) +
  theme(axis.title.x = element_text(size=13)) +
  theme(axis.title.y = element_text(size = 13, angle = 90)) +
  theme(legend.text = element_text(size = 12)) +
  theme(plot.title=element_text(size = 13, face="bold"))
bp + theme_classic()
dev.off()

# Gesamtstatistik
summary(hdr_df)
```

Abbildung 3.59: Erzeugung von Histogramm, Boxplot sowie Gesamtstatistik mit ggplot2  
Copyright: Pino Feichtinger

Damit die RSRP pro Dämpfungskategorie (Clutter Name) mit dem Befehl *fill* angereichert werden kann, müssen die Dämpfungsklassen in den Daten als Faktoren vorliegen.

```
hdr_df      282770 obs. of 4 variables
 $ COUNT      : num  8651 8651 8651 8651 6349 ...
 $ RSRP       : num  -119 -119 -119 -119 -120 -120 -120 -120 -119 ...
 $ Clutter_Klasse: num   3 3 3 3 3 3 3 3 3 ...
 $ Clutter_Name : Factor w/ 8 levels "Forest_high",...: 5 5 5 5 5 5 5 5 5 ...
```

Abbildung 3.60: Überprüfung auf Datenformat [Faktor] für Klassendarstellung

Die in diesem Abschnitt durchgeführten Schritte wurden in allen weiteren Kapiteln der Analyse angewandt und stellen die Vorbereitung der Daten dar, um diese effizient und leicht wiederholbar statistisch auszuwerten.

### 3.7.5 Analyse Gebiet-H

Um überhaupt vergleichen zu können, wie sich die einzelnen Mobilfunkparameter wie RSRP, RSRQ, SINR, auf ein und denselben Gebiet unterscheiden, werden in diesem Kapitel alle folgenden Analysen auf dem markierten Gebiet-H, das in Karte 3.46 sichtbar ist, durchgeführt. Es soll in diesem Kapitel die Forschungsfrage 3 beantwortet werden, in welcher untersucht wird, ob es einen Unterschied auf die Modellierungsergebnisse, bei Kalibrierung der ausgewählten Antennen im Vergleich zu nicht kalibrierten Antennen, durch die aufgenommenen DriveTest Daten gibt.

#### 3.7.5.1 800 MHz Vergleich

Das Untersuchungsgebiet liegt im Gebiet-H nord-westlich von Wien, wo ebenfalls Drivetest Daten vorliegen.

**3.7.5.1.1 RSRP** In Abbildung 3.61 des **Teil-A** nutzt der hier dargestellte Betreiber eine Frequenz von 800 MHz, wobei diese Sektoren nicht kalibriert wurden. Hier ist eine ideale Signalstärke Charakteristik anhand der RSRP mit einer schönen runden Ausrichtung zu sehen. Der Signalstärke Wert der RSRP wird hier auf einer logarithmischen Skala dargestellt. Es fällt auf, dass die Signalstärke mit kontinuierlichem rundlichen Muster von den drei Antennen an Stärke verliert.

In **Teil B** ist dasselbe Gebiet-H auch mit 800 MHz nur mit DriveTest kalibrierten Daten dargestellt. Es zeigt sich eine deutlich andere Signalverteilung. Der Ausstrahlungsradius ist nicht mehr rund bis ellipsenförmig, sondern stellt sich stark zerklüftet dar. Die Antennenwirkung reicht besonders in den stärkeren Bereichen der RSRP von -100 bis -70 dBm auch deutlich weiter als die nicht kalibrierten ellipsenförmigen Standardradien. Aber auch in den hohen RSRP Werten, welche ein sehr schlechtes Signal ab -105 dBm kennzeichnen, wird ein deutlich größerer Bereich abgedeckt.

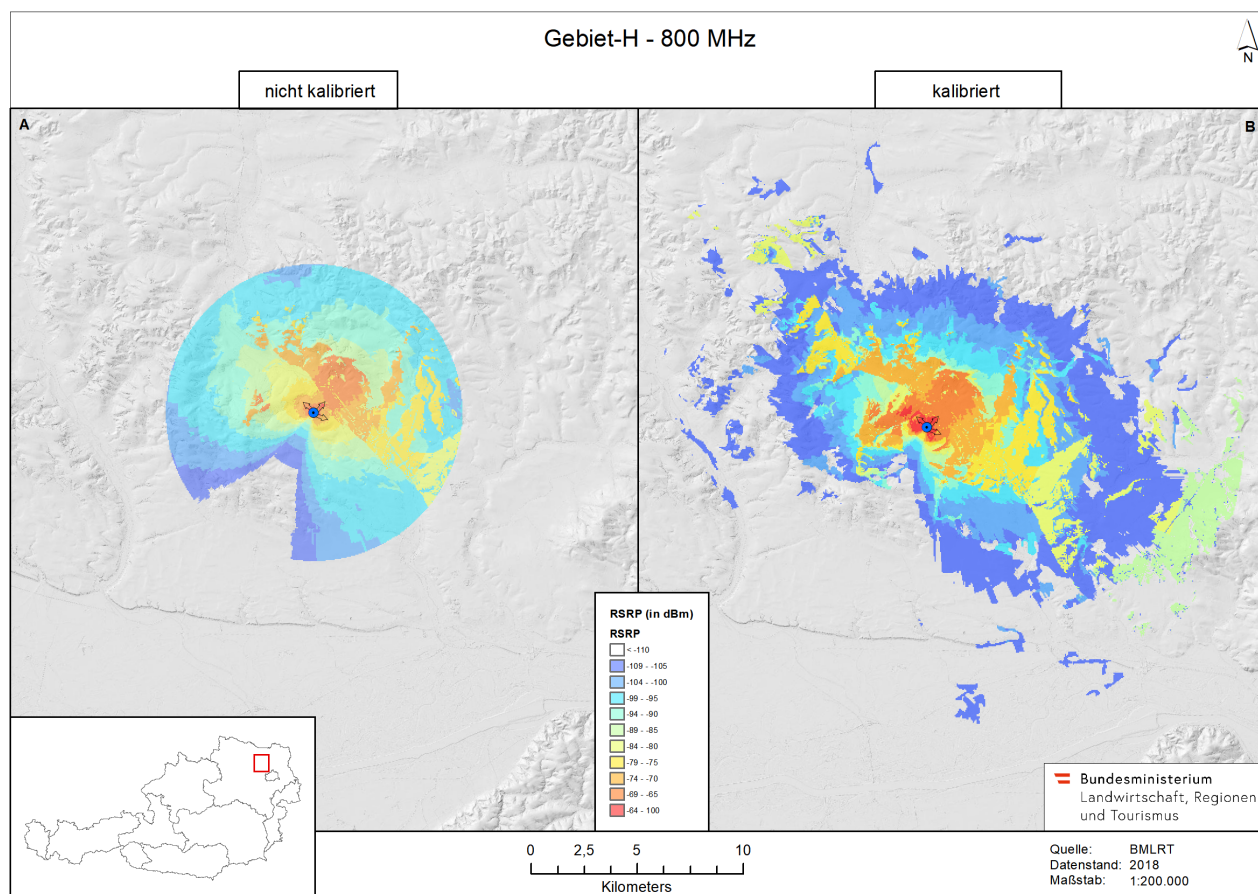


Abbildung 3.61: Gebiet H 800 nicht kalibriert - kalibriert

Die kalibrierten Koeffizienten des Hata9999 Modells durch die DriveTest Daten, werden in Tabelle 3.62 dargestellt.

A0	A1	A2	A3
17,5	37,4	-12	0,1

Abbildung 3.62: Parameter Kalibrierung Gebiet-H 800

**Differenzraster** Um nun den Unterschied zwischen der Analyse mit und ohne Kalibrierung besser zu veranschaulichen, wurde ein Differenzraster in Karte 3.63 berechnet. Dieser zeigt anhand der grünen Raster, dass es keinen Unterschied zwischen mit Kalibrierung und ohne Kalibrierung an der Signalstärke RSRP gibt. Die roten Rasterflächen hingegen zeigen einen Unterschied zwischen mit Kalibrierung und ohne Kalibrierung an.

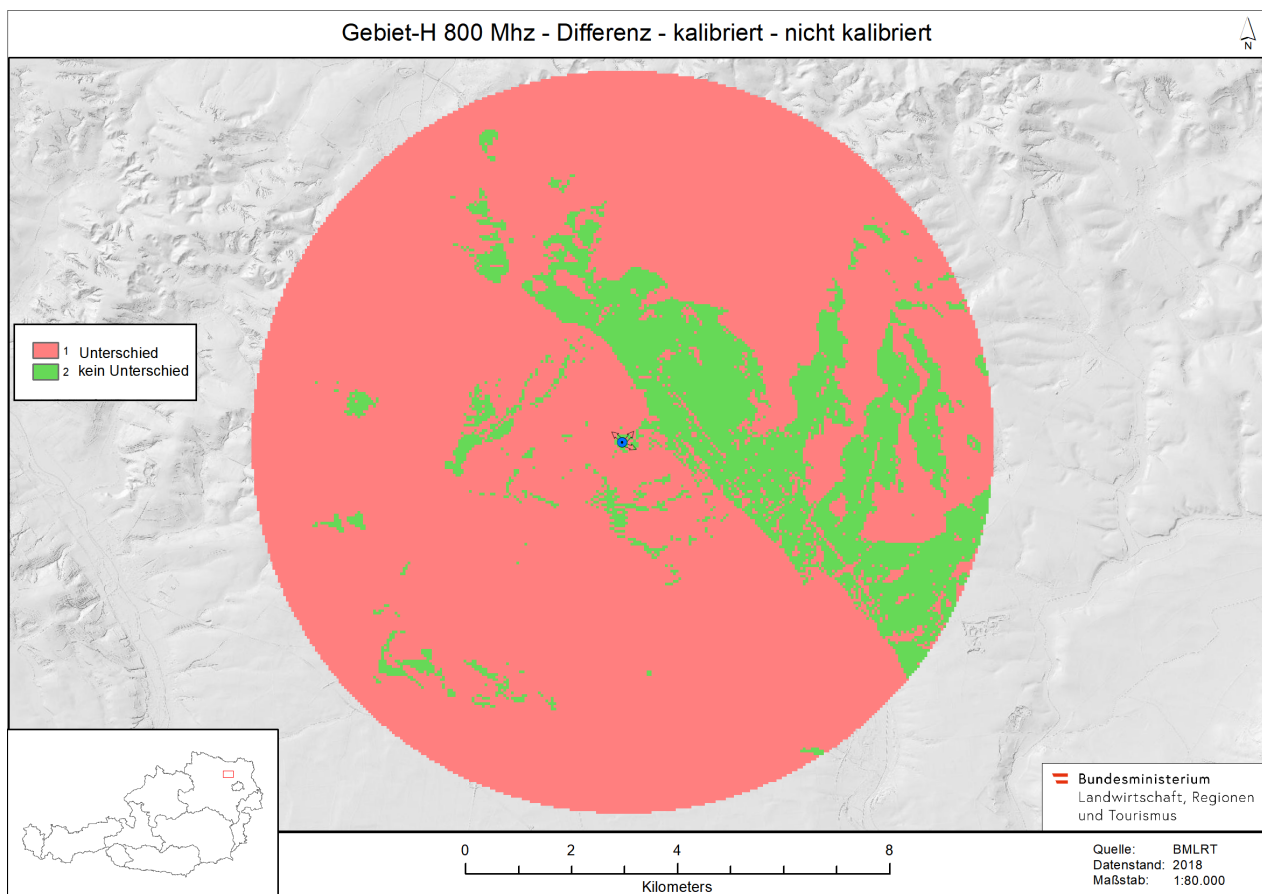


Abbildung 3.63: Gebiet-H 800 MHz Differenz - nicht kalibriert - kalibriert

**Root Mean Square Error (RMSE)** In der vorgestellten Analyse ist der beobachtete Wert der kalibrierte Raster und der vorhergesagte Wert der nicht kalibrierte Raster. Hierbei ergibt sich zwischen diesen ein RMSE von 12.8.

Da die Spannweite der RSRP knapp über 100 verschiedene Werteabstufungen besitzt zeigt der RMSE Wert von 12.8 doch eine gewisse Übereinstimmung zwischen den beiden Rastern der Kalibrierung sowie nicht Kalibrierung.

In Karte 3.64 ist nun der Teil A aus Karte 3.61 zu sehen. Hierbei wird das digitale Geländemodell mit Signalstärke (RSRP) sowie mit der Landnutzung verglichen. Anhand der nummerierten Ellipsen wird veranschaulicht aufgrund welcher Gegebenheiten des Geländes oder der abgeleiteten Dämpfungsklassen es zu einer Abschwächung des Signals kommt. Auch nördlich der Basisstation ist zu erkennen, dass die RSRP Werte aufgrund des dort liegenden dichten Waldes plötzlich deutlich abfallen (siehe [3]). Vergleicht man den Radius der RSRP der nicht kalibrierten Karte 3.64 mit der kalibrierten Signalstärke, so fällt auf, dass die räumliche Verteilung der RSRP bis -89 dBm ident bei beiden Berechnungen ausfällt. Hingegen größer -89 dBm kommt es zu großen Abweichungen in beiden Karten. Die nicht kalibrierte Variante in Karte 3.64 unterscheidet sich durch eine schemenhafte rundliche Modellierung der RSRP Werte größer -94 dBm, die in der kalibrierten Berechnung in Karte 3.65 nicht rundlich, sondern den lokalen Gegebenheiten des Geländes und der Landnutzung angepasst dargestellt wird.



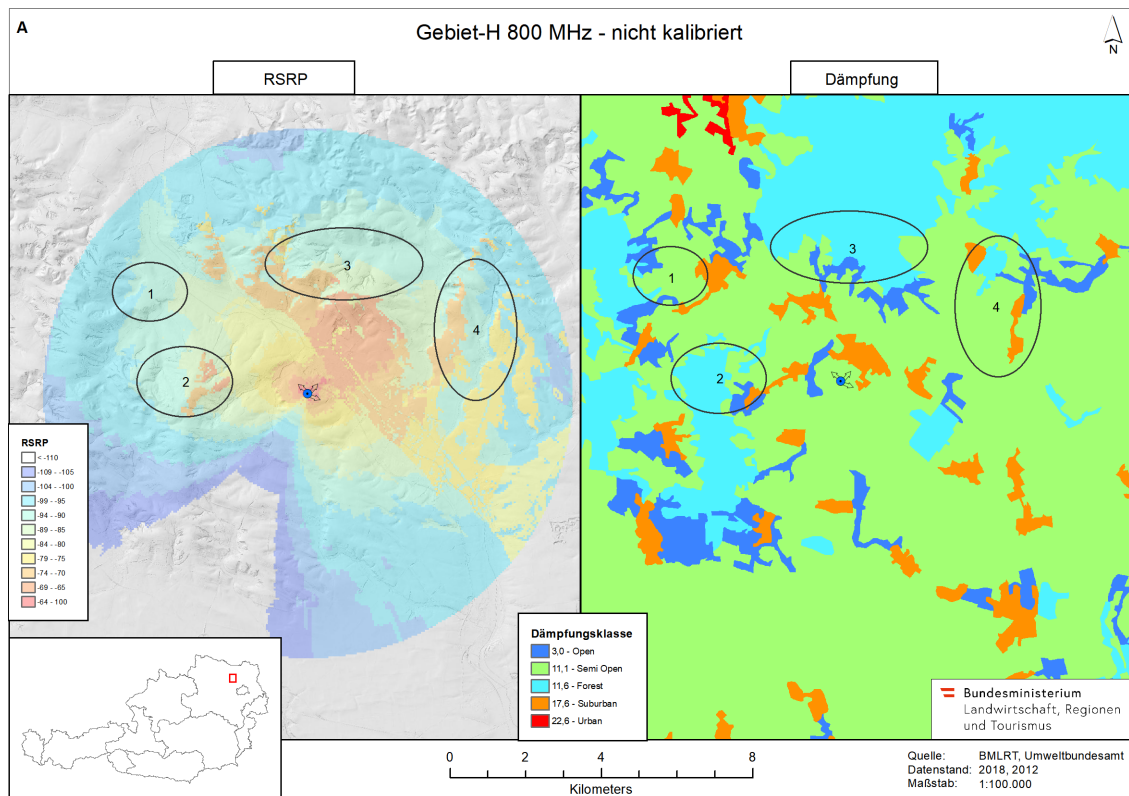


Abbildung 3.64: Gebiet H 800 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung

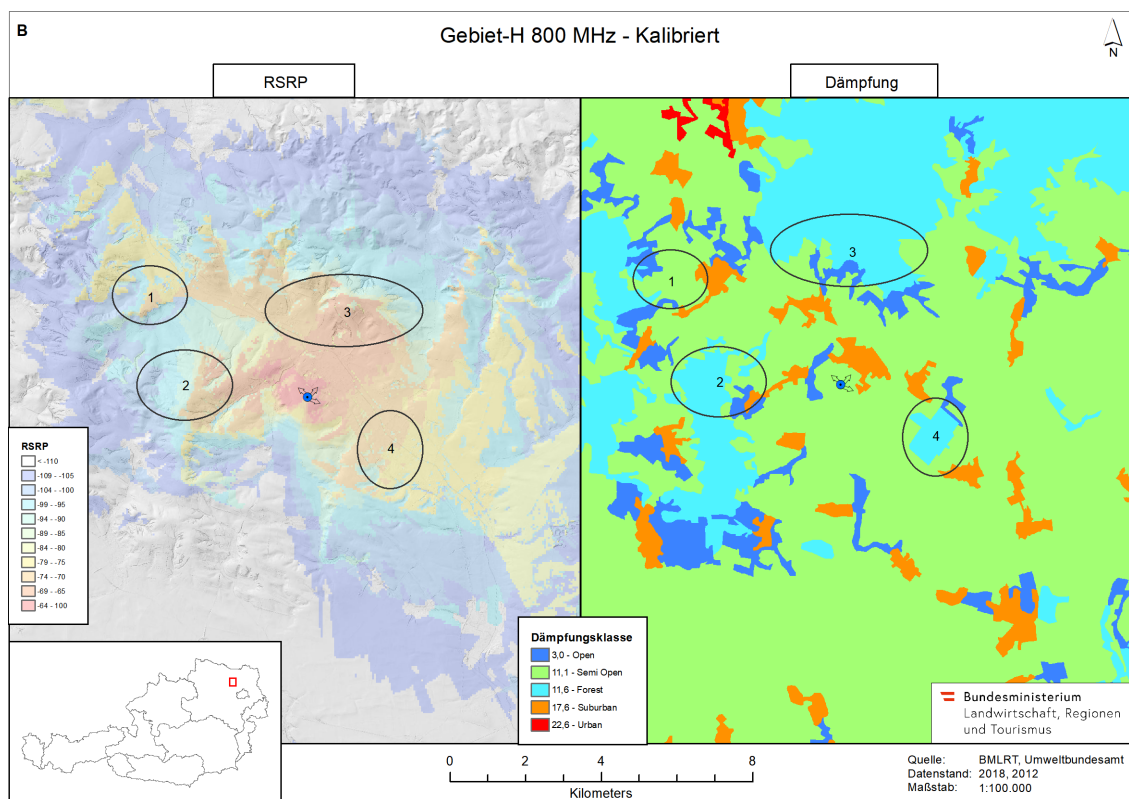


Abbildung 3.65: Gebiet H 800 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung

In Karte 3.65 wird der kalibrierte Teil aus Karte 3.61 genauer anhand der Signalstärke RSRP und seiner Ausbreitungsflächen untersucht. Das digitale Geländemodell wird, durch



eine bei der Analyse durchgeführten Sichtbarkeitsanalyse, bei der Ausbreitung der Signalstärke berücksichtigt. Die kalibrierte Variante der Berechnung mit 800 MHz über dem Gebiet-H besitzt einen wesentlich realistischeren Ausbreitungsradius im Randbereich, wo gerade noch ein Signal zu erwarten ist. In den nicht kalibrierten Varianten in Karte 3.64 ist der Außenrand wesentlich größer und modellhaft rund. Weiters ist in Karte 3.65 zu sehen, dass das Funksignal deutlich an Kanten und Berghängen beeinflusst wird. So sieht man in [1, 2 und 3], dass das Referenzsignal auf der Seite des Berghanges, welches der Basisstation zugewandt ist (Luv) einen noch hohen RSRP Wert von bis -70 dBm aufweist, hingegen auf der Seite des Berges, welche der Basisstation abgewandt ist (Lee), sinkt der RSRP Wert deutlich in den blauen Bereich unter -95 dBm ab. Dies verdeutlicht den Einfluss des Terrains auf das Referenzsignals RSRP.

In weiterer Folge werden mit dem Paket *ggplot2* ein Histogramm als auch ein Boxplot erstellt um darzustellen, wie sich die Daten statistisch gesehen anhand der RSRP und der Landnutzung verteilen. Als erstes wird in Abbildung 3.66 die RSRP auf dessen Gesamtstatistik überprüft. Hierbei wird die statistische Verteilung über den gesamten Datensatz betrachtet. Es zeigt sich in Abbildung 3.66, dass die schwächsten Werte der RSRP bei -120 dBm liegen und bis zu den stärksten Werten auf -56 dBm reichen. Der Median liegt bei -95 dBm und das arithmetische Mittel bei -93.69 dBm.

RSRP	
Min.	: -120.00
1st Qu.	: -99.00
Median	: -95.00
Mean	: -93.69
3rd Qu.	: -88.00
Max.	: -56.00

Abbildung 3.66: Statistik Gebiet-H (800 MHz) nicht kalibriert

Weiteres kann betrachtet werden, wie viele Zellen in welchen Dämpfungsklassen in Abbildung 3.67 vorkommen. In weiterer Folge wird diese Rohstatistik in besser verständliche statistische Grafiken umgewandelt und visuell dargestellt.

Clutter_Name	
Forest_high	: 5352
Forest_low	: 8384
Open	: 5025
Semi_Open_high	: 280
Semi_Open_low	: 38824
Suburban	: 3686
Urban	: 25

Abbildung 3.67: Statistik Clutter Name Gebiet-H (800 MHz) nicht kalibriert

Der R Code in Abbildung 3.59 erzeugte aus den Daten folgendes Histogramm, welches in Abbildung 3.68 ersichtlich ist. Hierbei wird die Häufigkeitsverteilung der RSRP in Gebiet-H bei 800 MHz mit nicht kalibrierten Hata9999 Parametern dargestellt. Im Histogramm wird die Anzahl an Rasterzellen pro RSRP Klasse präsentiert und zeigt somit wie häufig eine RSRP Klasse in den Rastern vorkommt. Zusätzlich gibt es auch Auskunft, welche Dämpfungsklassen aus der abgeleiteten Landnutzung wie häufig pro RSRP Klasse vorkommen.

Aus dem Histogramm in Abbildung 3.68 wird ersichtlich, dass im Bereich der RSRP um ca -95 dBm die meisten Rasterzellen vorhanden sind. Weitere hohe Werte kommen bei -70, -80, -109 sowie -115 dBm vor. Relativ wenig Zellen fallen auf den Bereich -60 dBm bis -65 dBm. Betrachtet man nun die Verteilung der Dämpfungskategorien, so sind die meisten Zellen mit

der Clutter Klasse *Semi Open low* klassifiziert, was auch im Histogramm an den blauen Balken gut erkennbar ist. Die zweit häufigsten Klassen sind im *Forest low* sowie *Forest high* Bereich zu finden. Danach folgt die Klasse *Open* mit knapp über 5000 Zellen. Ein kleiner Teil fällt noch auf die Klasse *Suburban* in lila dargestellt. Die blau gestrichelte Linie stellt hierbei das arithmetische Mittel der RSRP von 93,69 dBm dar.

Insgesamt kann gesagt werden, dass die Häufigkeitsverteilung der RSRP fast einer Normalverteilung ähnelt. Die Verteilung der RSRP über alle Dämpfungsklassen liegt **ohne Kalibrierung** im Vergleich zu der kalibrierten Analyse, bei deutlich stärkeren RSRP Werten von im Mittel mit -93 dBm.

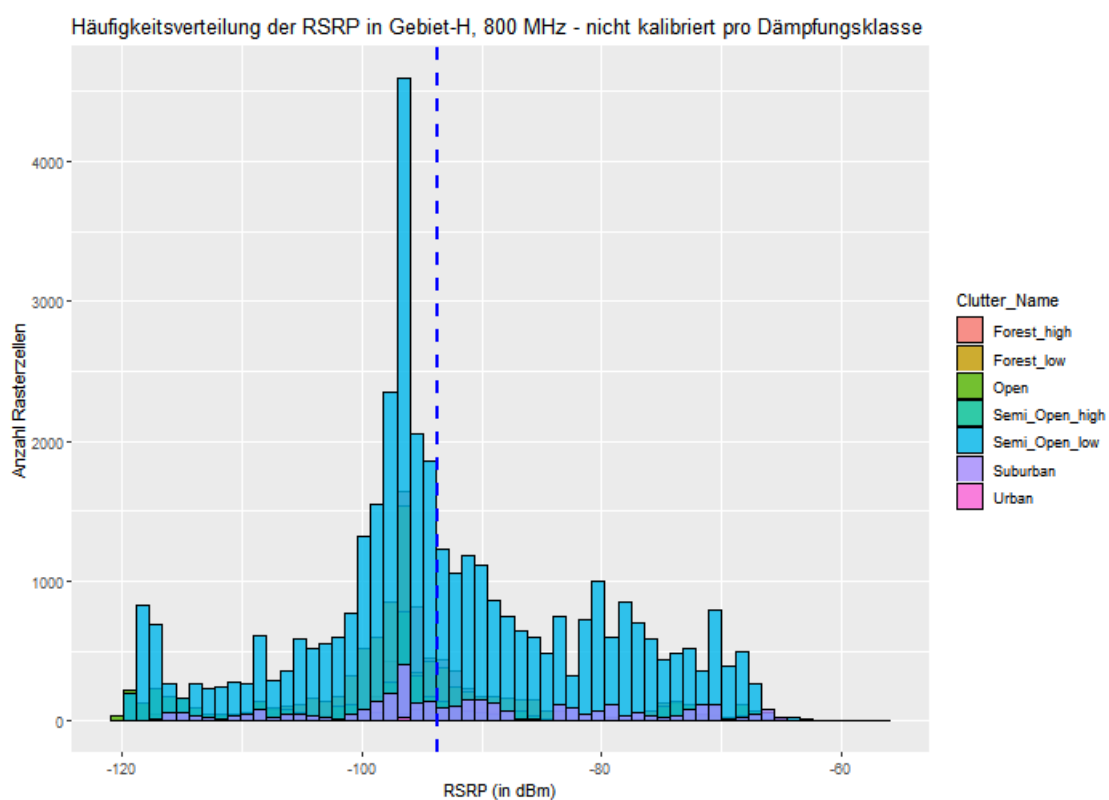


Abbildung 3.68: Histogramm RSRP Gebiet-H 800 nicht kalibriert

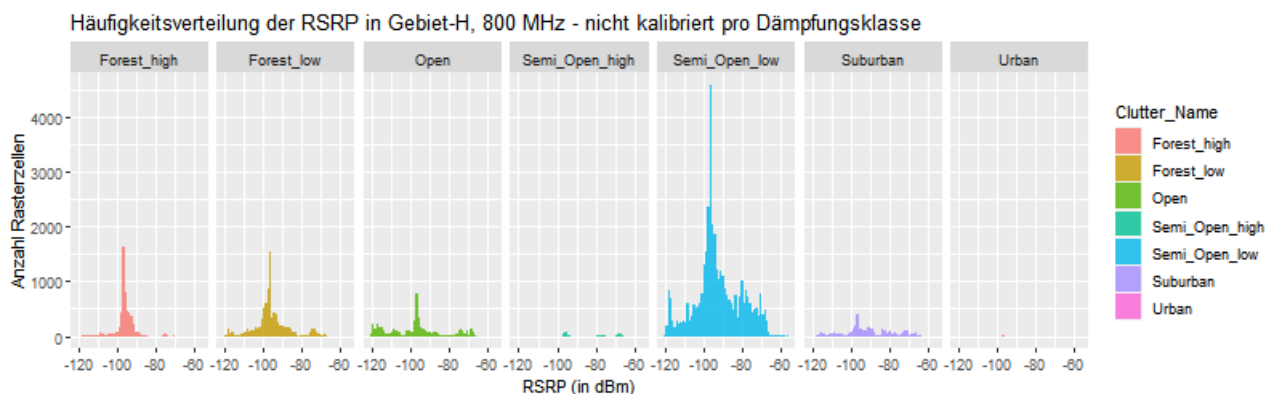


Abbildung 3.69: Histogramm Facet RSRP Gebiet-H 800 nicht kalibriert

Eine weitere Möglichkeit die Verteilung der RSRP über die Landnutzung zu betrachten, ist über ein sogenanntes Boxplot. Das Boxplot Diagramm stellt verschiedene robuste Streuungs- und Lagemaße in einer Grafik dar. Das Boxplot vermittelt hierbei schnell, in welchen Bereichen die Daten liegen und wie sie sich über diese Bereiche verteilen. Das Boxplot besteht aus einer Box, die am oberen Ende durch das obere Quartil (75 Prozent der Daten liegen hier) und ein unteres Ende das untere Quartil (25 Prozent der Daten liegen hier) dargestellt wird. Der Strich in der Box stellt den Median dar, welcher den exakten Mittelpunkt der Daten darstellt. Der Median stellt also den Bereich dar in welchem exakt 50 Prozent der Daten unterhalb als auch oberhalb des Striches vorkommen. Die Striche, welche vertikal von der Box nach oben und nach unten zeigen, stellen an ihren Enden jeweils oben den Maximalwert und unten den Minimalwert der Daten dar und werden auch als Antennen oder Whisker bezeichnet. Ausreißer, welche Datenwerte bezeichnen die sich außerhalb der normalen Wertverteilung befinden, werden als Punkte ober- oder unterhalb der Antennen / Whisker dargestellt.

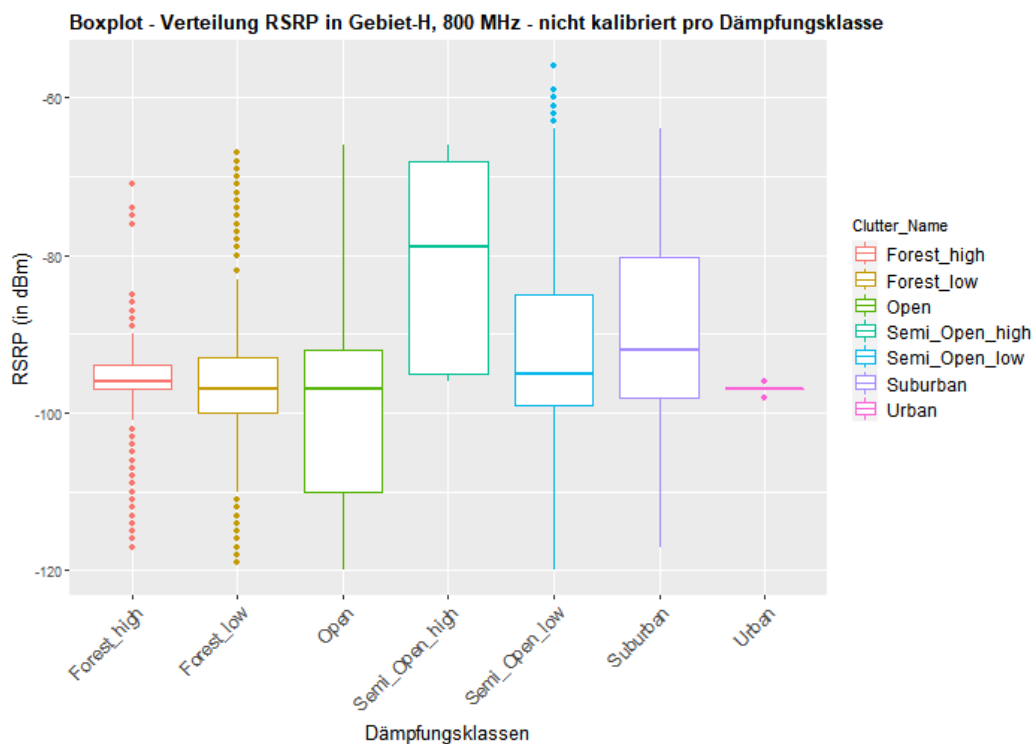


Abbildung 3.70: Boxplot RSRP Gebiet-H 800 nicht kalibriert

Das Boxplot in Abbildung 3.70 zeigt nicht nur die Verteilung der Daten über die RSRP Klassen, sondern stellt mehrere Boxplots für jede Dämpfungsklasse gegenüber. Dies vereinfacht den Vergleich der Stärke der RSRP pro Dämpfungsklasse. Umso höher hier das Boxplot in der jeweiligen Dämpfungsklasse ausfällt desto stärker das Signal. Hierbei ist auffallend, dass die Dämpfungsklasse *Semi Open high* den höchsten Median von kleiner -80 dBm sowie die größte Schwankungsbreite der RSRP von 25 Prozent Perzentil bis zu 75 Prozent Perzentil aufweist. Die Medians der restlichen Dämpfungsklassen befinden sich alle zwischen 90 und 100 dBm. Ausreißer der RSRP, also besonders hohe Werte im Vergleich zur Hälfte der Daten, befinden sich über den Dämpfungsklassen *Forest high*, *Forest low*, *Semi Open low* sowie *Urban*.

Betrachtet man nun die Daten der **kalibrierten** Analyse für die Häufigkeitsverteilung der RSRP in Abbildung 3.71 so fällt auf, dass die Dämpfungsklasse (Clutter Name) *Semi Open low* mit überwiegender Mehrheit durch das Signal in Gebiet-H abgedeckt ist. Hier wird wieder die Frage beantwortet, wie oft welche Dämpfungsklasse (Clutter Name) pro RSRP Wert vorkommt und wie sich diese Daten an der RSRP verteilen.

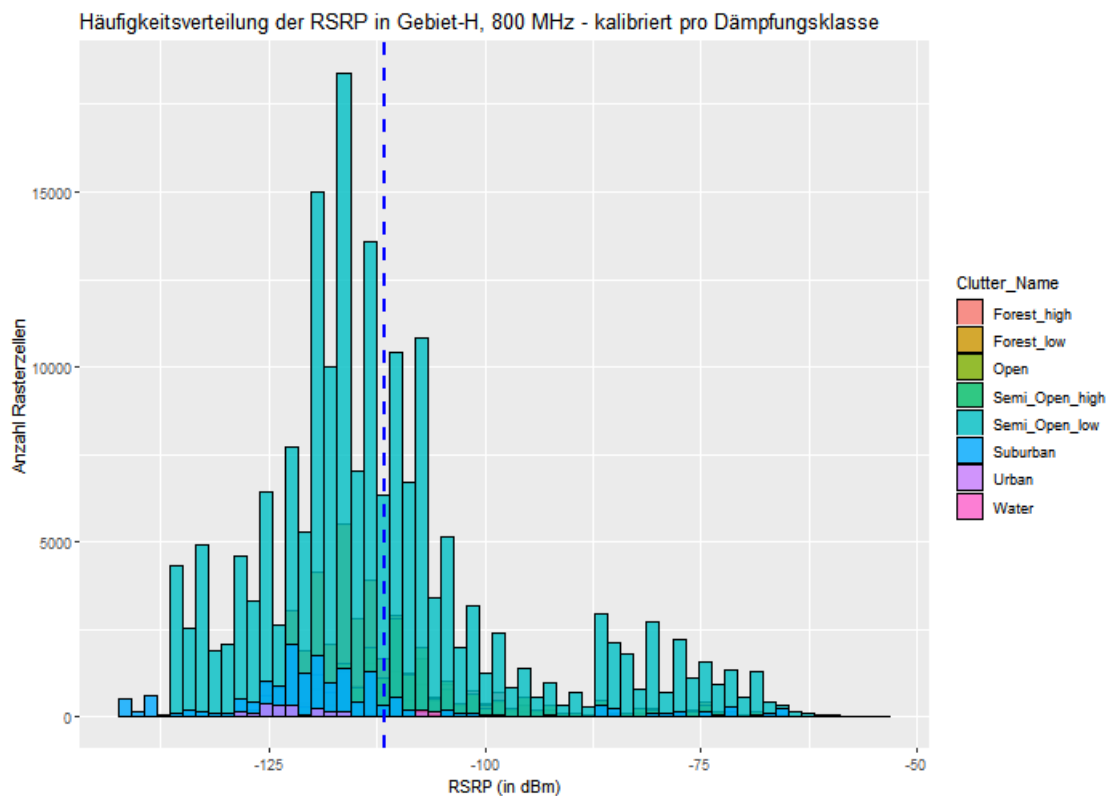


Abbildung 3.71: Histogram RSRP Gebiet-H 800 kalibriert

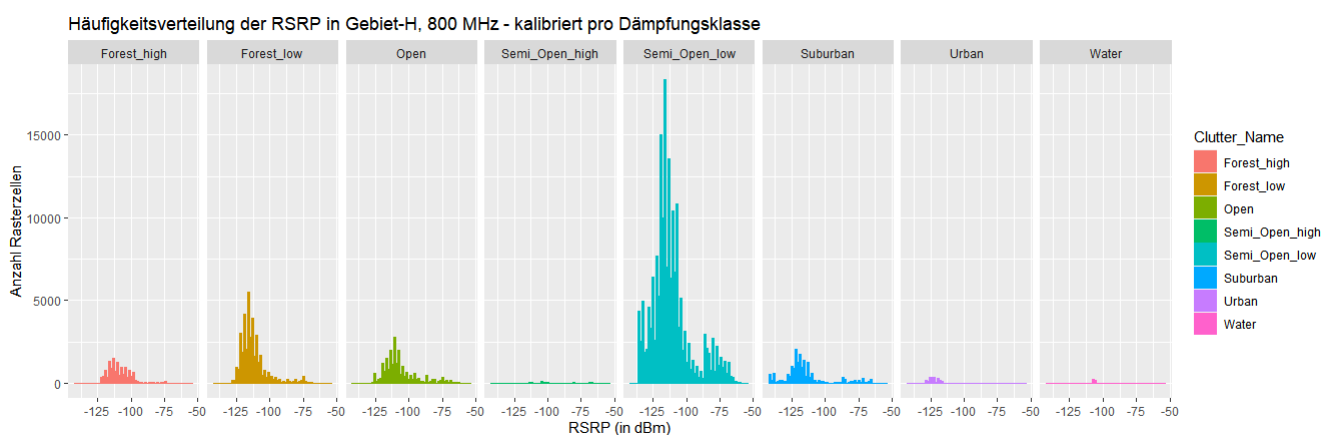


Abbildung 3.72: Histogram RSRP 800 kalibriert facet grid

Die Dämpfungsklasse *Open* kommt am zweithäufigsten im RSRP Bereich von -125 bis -75 dBm vor. Der Median der RSRP befindet sich bei -115 dBm. Die Dämpfungsklasse *Suburban* in blau kommt hauptsächlich oberhalb des Median < -115 dBm vor und erstreckt sich bis an die

Grenze von -142 dBm, wo keine Signalstärke mehr zu erwarten ist. Die Klasse *Urban* kommt nur zu einem geringen Teil im schwachen RSRP Wertebereich oberhalb des Median um -125 dBm vor. Die Klasse *Water* kommt ebenfalls nur zu einem marginalen Anteil um -115 dBm vor. Hierbei muss erwähnt werden, dass diese Klasse nur in der kalibrierten Analyse vorhanden ist, da der Gesamtradius der Signalstärke größer ausfällt als bei der nicht kalibrierten Analyse (siehe Karte 3.61). Insgesamt sieht man, dass die Häufigkeitsverteilung bei Kalibrierung der RSRP an der Anzahl der Rasterzellen wesentlich inhomogener verläuft als ohne die Kalibrierung. Die Verteilung der RSRP über alle Dämpfungsklassen ist bei Kalibrierung eine schiefe Verteilung und gesamt gesehen mehr in den RSRP Bereich von -115 dBm verschoben. Die Verteilung der Zellen, welche als *Semi Open low* klassifiziert wurden, befinden sich in der kalibrierten Analyse insgesamt in schwächeren RSRP kleiner -100 dBm. Auffällig ist ebenfalls, dass in der Klasse *Forest low* am zweit meisten Rasterzellen vorkommen und somit der Waldbereich bei 800 MHz noch nicht so stark dämpft.

Im nächsten Schritt soll mit einem **Boxplot** in 3.73 die Verteilung der kalibrierten RSRP über die jeweiligen Dämpfungsklassen (Clutter Name) betrachtet werden. Hierbei sieht man nun anhand der einzelnen Boxplots, wie sich die Stärke der RSRP über die einzelnen Dämpfungsklassen verteilt. Vergleicht man nun das Boxplot mit dem Histogramm in 3.71 so fällt zuerst auf, dass die Dämpfungsklasse *Semi Open Low* in der Verteilung der RSRP im Boxplot eine große Streuung der Daten aufweist. Der Median liegt hierbei unter -115 dBm, während im Histogramm diese Klasse die meisten Rasterzellen abgedeckt hat. Die stärksten RSRP Werte in der Verteilung sind in der Dämpfungsklasse *Semi Open high* zu sehen. In dieser sind 50 Prozent der Daten zwischen einer RSRP von -70 dBm bis knapp über -100 dBm.

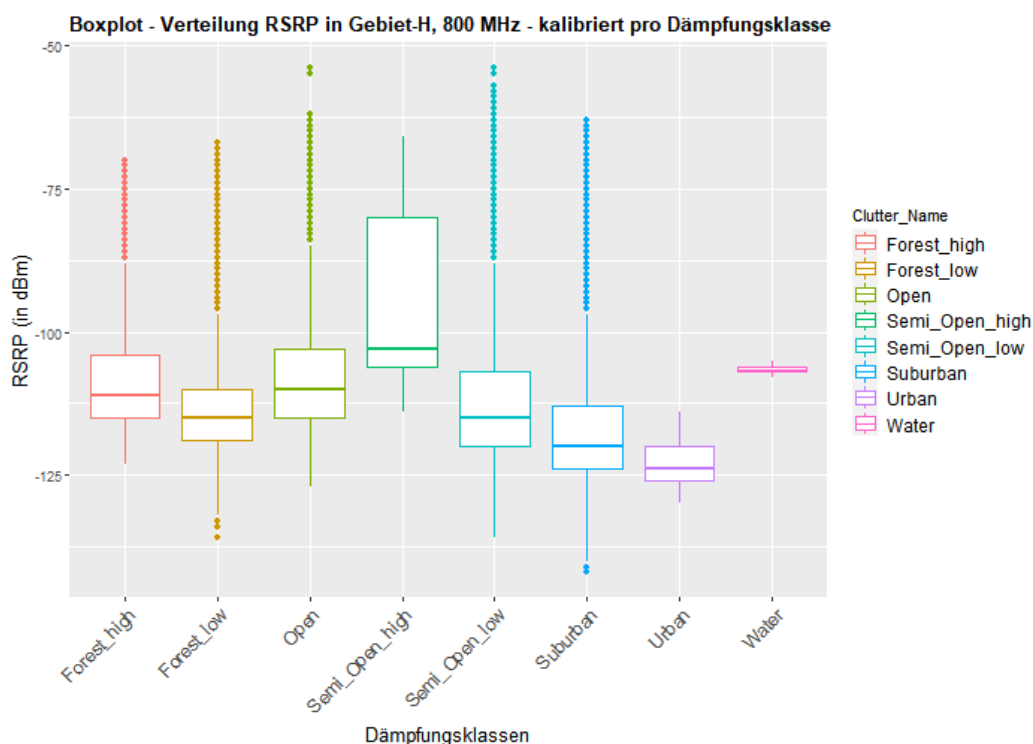


Abbildung 3.73: Boxplot RSRP Gebiet-H 800 kalibriert

Alle anderen Dämpfungsklassen pendeln sich mehr oder weniger im RSRP Bereich um -115 dBm ein. Auffallend im Boxplot ist auch, dass die Klasse *Water* sich auf einen sehr begrenzten

RSRP Bereich erstreckt. Dies hat vermutlich damit zu tun, dass Wasserflächen nur sehr vereinzelt im Analysegebiet vorkommen und sich die RSRP Werte dort nicht breit streuen. Ansonsten weisen fast alle Dämpfungsklassen, bis auf *Water*, Ausreißer in den stärkeren RSRP Wertebereichen auf.

**3.7.5.1.2 RSRQ** In Karte 3.74 ist das Referenzsignal der RSRQ bei 800 MHz ohne Kalibrierung von DriveTest Daten zu sehen. Die RSRQ zeigt eine ausreichende Signalqualität, aber mit spürbarer Beeinflussung der Qualität in der Klasse von  $<-10$  bis  $-15$  dB (in hellgrün) im Nahbereich ca 3 Kilometer um die Basisstation. Auch ist erkennbar, dass sich der hellgrüne Bereich mit dem RSRP Bereich bis  $-89$  dBm deckt. Außerhalb der Bereiche  $<-10$  dB sinkt der Wert der RSRQ drastisch unter  $-20$  dB und zeigt somit extrem störende Einflüsse und keine nutzbare Verbindung mehr an.

Vergleicht man nun die RSRQ von der Analyse mit 800 Mhz jedoch mit einer DriveTest Kalibrierung, so sieht man in Karte 3.75, dass der Bereich  $-10$  bis  $-15$  dB (hellgrün) mit ausreichender Signalqualität einen wesentlich größeren Bereich abdeckt als bei der nicht kalibrierten Analyse in Karte 3.74.

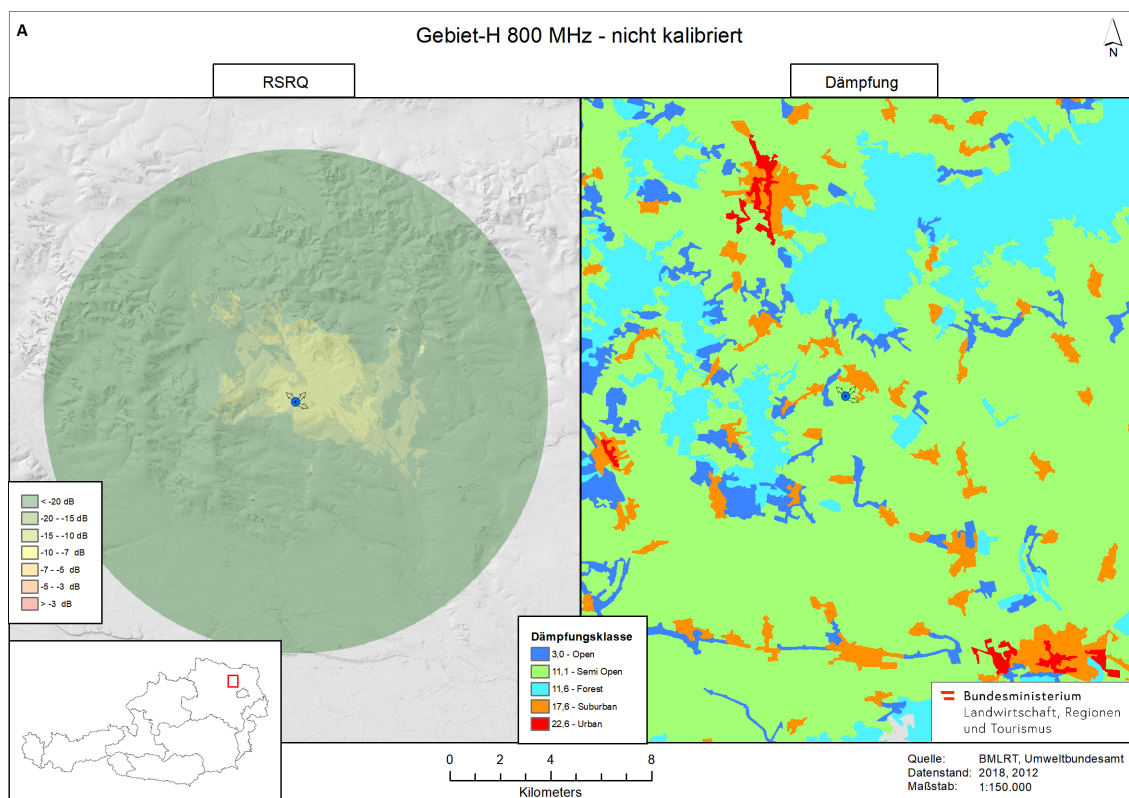


Abbildung 3.74: Gebiet H 800 A Nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ



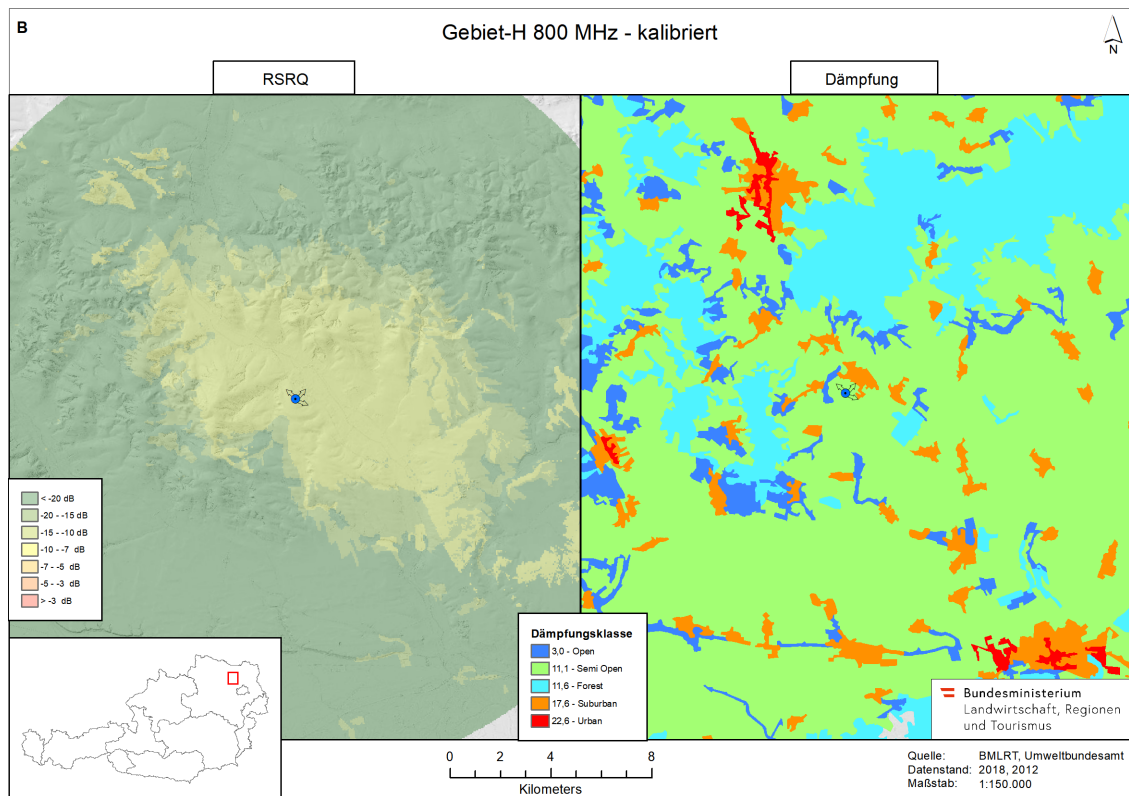


Abbildung 3.75: Gebiet H 800 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ

**3.7.5.1.3 SINR** Im Bezug auf das Verhältnis des Referenzsignals zu Interferenzen und Störungen- wie Rauschen- zeigt das SINR in Karte 3.76 mit 800 MHz und **ohne Kalibrierung** durch DriveTest Daten, dass das SINR exzellente Bedingungen mit fast keinen Störungen in den Klassen 30 - 40 dB (orange bis rot) darstellt. Dies deckt sich auch mit der Analyse der RSRP in Karte 3.64, welche die besten Signalstärke Werte in selbigen Bereich darstellt. Dieser stärkste Bereich erstreckt sich von 1 bis 4 Kilometer um die Basisstation, wobei die nördlich ausgerichtete Antennen hier am weitesten bis 4 Kilometer von der Basisstation optimale Bedingungen zwischen Signalstärke und Störungen- wie Hintergrundrauschen- bietet. Alle weiteren Bereiche, welche einen SINR Wert < 0 besitzen (grün) haben erhebliche Störeinflüsse, welche das Nutzsignal sehr stark einschränken und kaum Verbindungen möglich machen.

Bei der Analyse des Gebietes-H mit 800 MHz in Karte 3.77, welches mit einem DriveTest **kalibriert** wurde, zeigt das SINR einen wesentlich größeren Bereich in der höchsten Klasse >40 dB, welche exzellente Bedingungen zwischen Nutzsignal und Störeinflüssen darstellen. Die besten Werte der SINR, wo das Nutzsignal eindeutig im Vorteil zu den Störungen wie Rauschen steht, kommen deckend zu den starken RSRP Werten in Karte 3.65 vor.

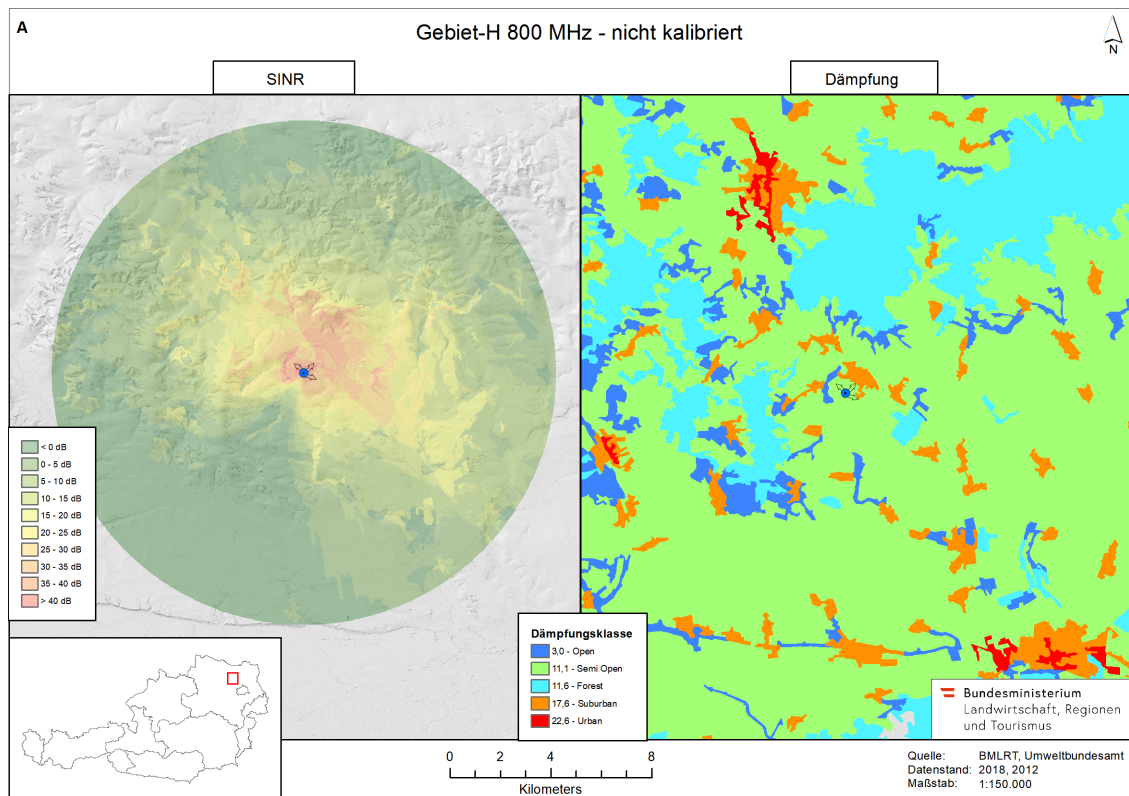


Abbildung 3.76: Gebiet H 800 A Nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR

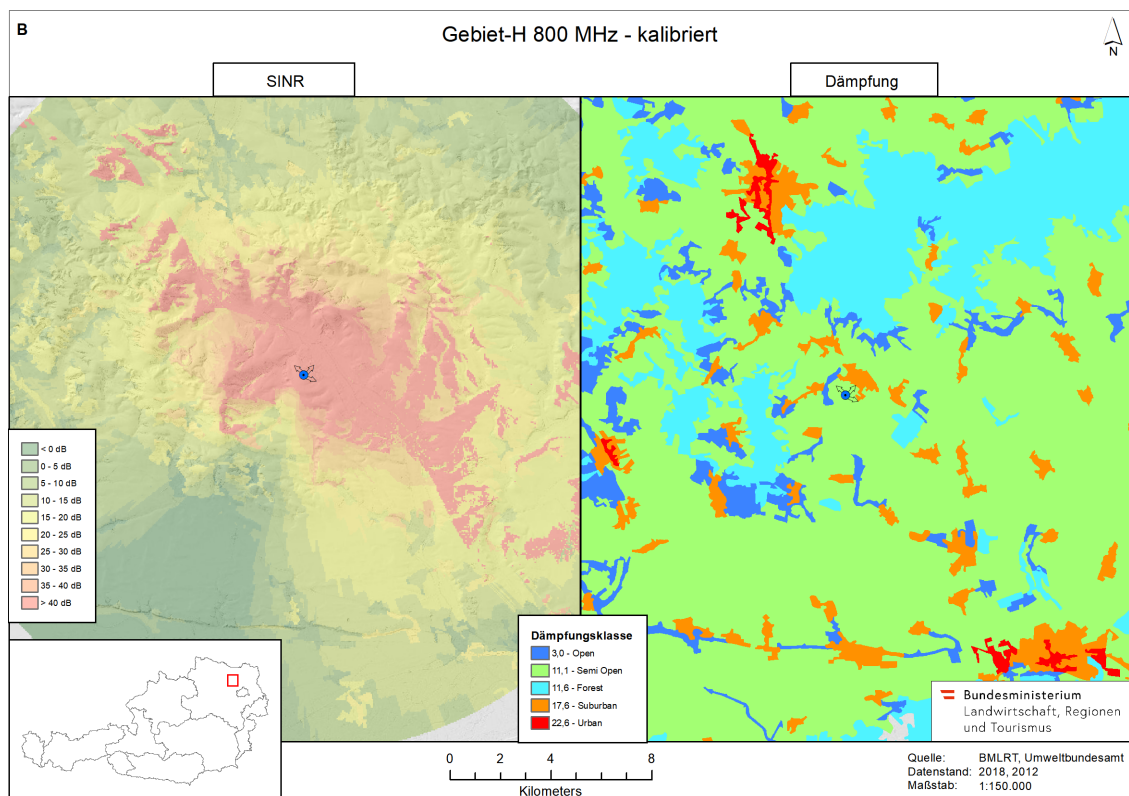


Abbildung 3.77: Gebiet H 800 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR

### 3.7.5.2 1800 MHz Vergleich

Eine weitere Vorhersagerechnung wurde im selben Gebiet-H durchgeführt, diesmal jedoch mit einer Frequenz von 1800 MHz. Der Standort dieser Basisstation befindet sich ca 9 Kilometer nördlich der Basisstation aus den Karten von Kapitel 3.7.5.1. Es sollen hierbei die Unterschiede in der erhöhten Frequenz dargestellt werden.

**3.7.5.2.1 RSRP** Auch bei dieser Analyse wird in Abbildung 3.78 die Vorhersage einmal ohne kalibrierte Daten durchgeführt und ein weiteres mal mit DriveTest kalibrierte Daten. Die zwei Analyseergebnisse werden in einer Karte dargestellt, um die Vergleichbarkeit der Abdeckungsbereiche sowie die Stärke der Mobilfunkparameter gegenüberzustellen.

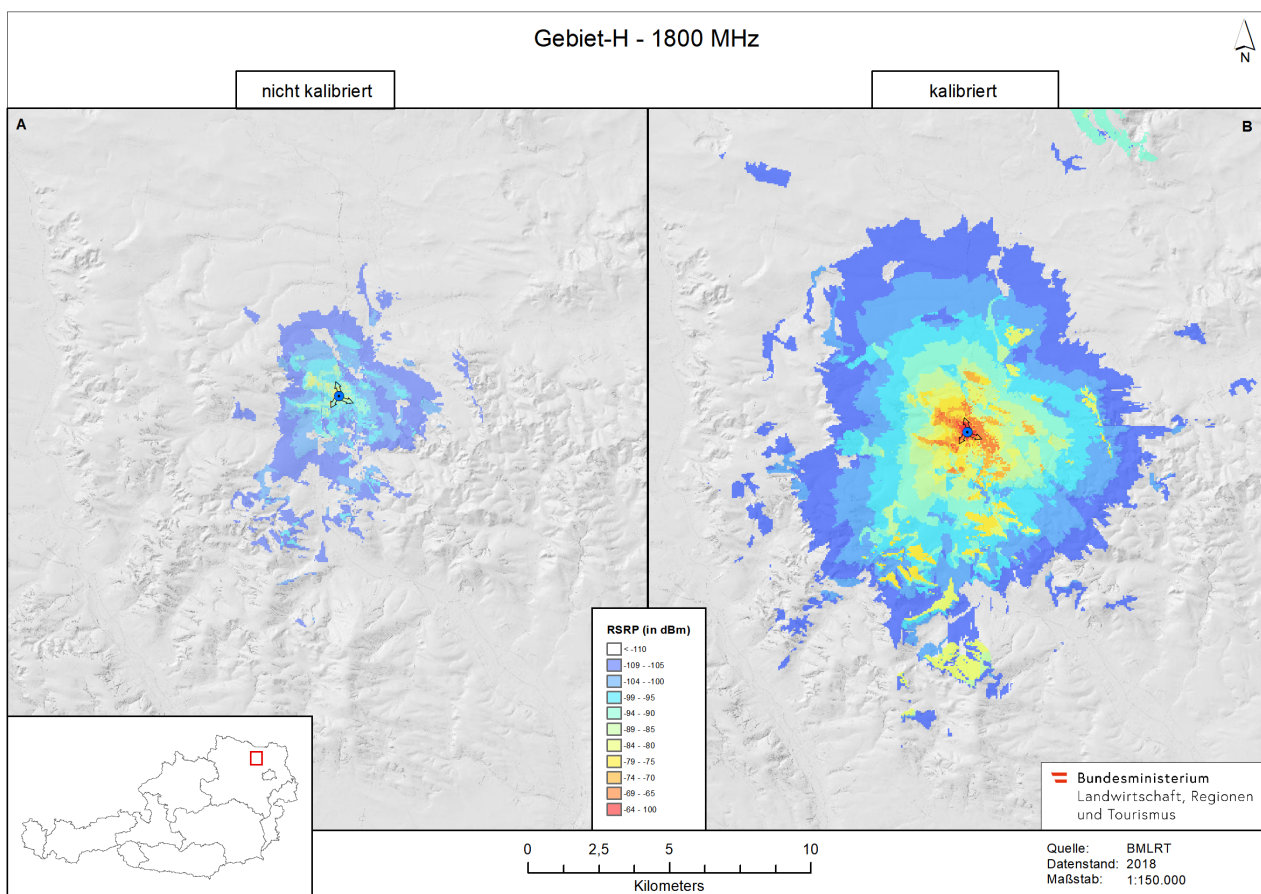


Abbildung 3.78: Gebiet H2 1800 nicht kalibriert - kalibriert

Die kalibrierten Koeffizienten des Hata9999 Modells durch die DriveTest Daten, werden in Tabelle 3.79 dargestellt.

A0	A1	A2	A3
19,9	48,8	-12	0,1

Abbildung 3.79: Parameter Kalibrierung Gebiet-H 1800

Betrachtet man nun in Karte 3.78 die Gegenüberstellung der kalibrierten und nicht kalibrierten Mobilfunkrechnung mit 1800 MHz so fällt auf, dass die Größe des Abdeckungsbereiches beider Analysen ähnlich erscheinen aber dennoch unterschiedliche Klassen auf denselben Gebieten

liegen. Die Signalstärke im Zentrum nahe um die Basisstation liegt mit Kalibrierung wesentlich höher, bei -64 bis 100 dBm.

In Karte 3.80 ist der Differenzraster zwischen der nicht kalibrierten und der kalibrierten Analyse zu sehen. Dieser zeigt durch die roten Flächen in allen Rasterzellen zwischen den beiden Analysen starke Unterschiede in Bezug auf die Signalstärke auf.

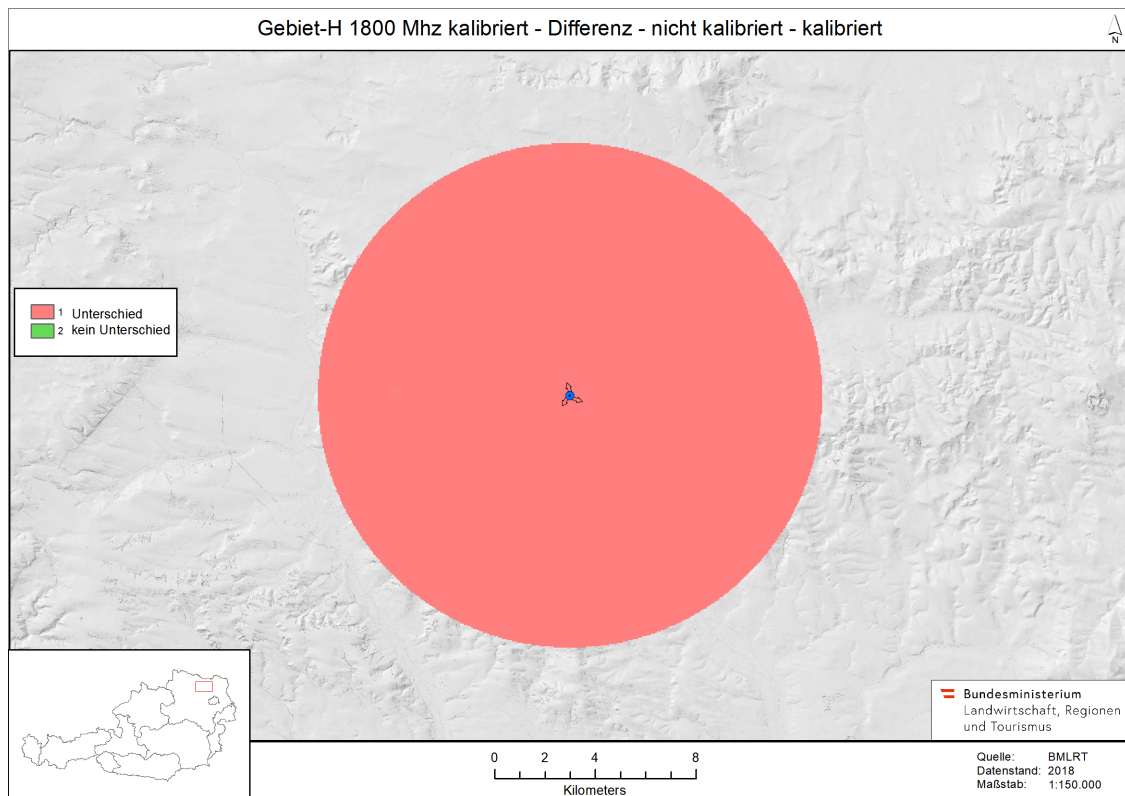


Abbildung 3.80: Gebiet-H 1800 MHz Differenz - nicht kalibriert - kalibriert

**Root Mean Square Error** Der RMSE zwischen der kalibrierten und nicht kalibrierten Analyse liegt bei 21,9. Da die Spannweite der RSRP Daten bei 100 liegt, ist der RMSE recht hoch und deutet auf einen größeren Unterschied zwischen kalibrierter und nicht kalibrierter Analyse hin.

Zuerst betrachten wir die nicht kalibrierte Analyse, um im nächsten Abschnitt die Unterschiede mit einer Kalibrierung zu erkennen.

In Karte 3.81 wird die Frequenz 1800 MHz mit dem digitalen Höhenmodell und der Landnutzung verglichen, um Muster aufgrund der erzeugten Vorhersageanalyse durch Cellular Experts zu erkennen. Hierbei muss erwähnt werden, dass sich die Basisstation nicht an derselben Position wie bei der Analyse von 800 MHz befindet, sondern ein Stück nördlich, in einer etwas dichter besiedelten Stadt. Dies wird weiters noch deutliche Auswirkungen auf das Signal und dessen Verbreitung haben.



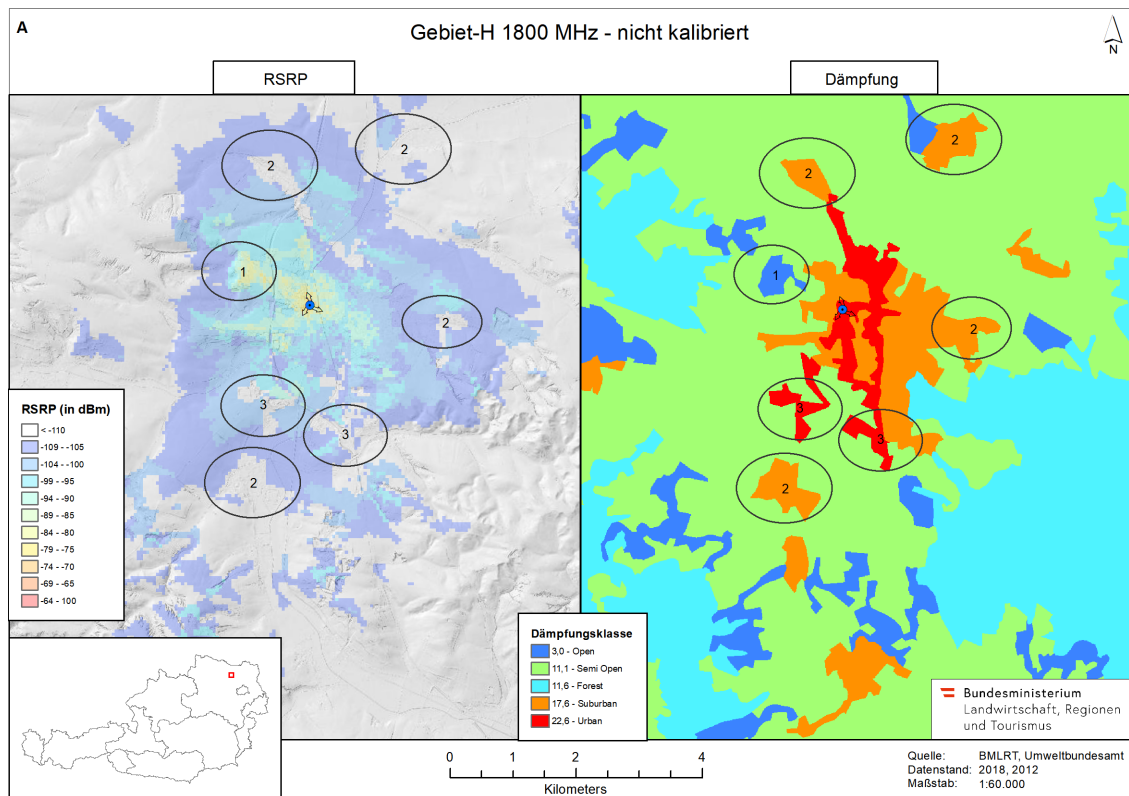


Abbildung 3.81: Karte Gebiet H2 1800 Teil-A nicht kalibriert Vergleich DGM Landnutzung

In der nicht kalibrierten Analyse mit 1800 MHz in Abbildung 3.81 ist zu sehen, dass in gekennzeichneten Bereich [1] eine Geländeerhöhung vorhanden ist, wodurch das RSRP Signal am Hang der Geländeneigung reflektiert wird und hohe Werte von -75 dBm aufweist. Hingegen sinkt der Wert der RSRP abrupt nach der Kuppe in eine Mulde gehend ab, auf kleiner -100 dBm. Weiters ist zu sehen, dass Empfangslücken der RSRP in [2,3] vorhanden sind, welche vermutlich aufgrund der Kategorien (lockere Verbauung, Industrie u. Gewerbe) entstehen. Vergleicht man die Abbildung mit dem Landnutzungslayer so wird ersichtlich, dass diese Empfangslücken durch mittelstarke Bebauung (in rot) sowie durch Industrielle Anlagen (in lila) verursacht werden.

Betrachtet man nun die statistische Häufigkeitsverteilung der nicht kalibrierten Analyse des Referenzsignals (RSRP) in Abbildung 3.83, so liegt der Median der Verteilung bei knapp -125 dBm, was eigentlich einem sehr schlechten Signal entspricht. Die Verteilung ist in Richtung der schwächeren Signalwerte orientiert, daher befinden sich generell wenig Zellen mit RSRP Werten von stärker als -100 dBm in der Verteilung. Vergleicht man nun genauer wie sich die Signalstärke über die einzelnen Dämpfungsklassen verteilt, so wird in Abbildung 3.83 deutlicher, dass auf der Klasse *Semi Open low* der überwiegende Anteil der RSRP verteilt ist. Da jedoch 7 Klassen in einem Histogramm sehr schwer übereinander darzustellen sind, wird die RSRP mit den einzelnen Dämpfungsklassen nebeneinander einzeln in Abbildung 3.84 dargestellt.

RSRP	
Min.	:-146.0
1st Qu.	:-129.0
Median	:-125.0
Mean	:-122.7
3rd Qu.	:-118.0
Max.	:-64.0

Abbildung 3.82: Statistik RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert

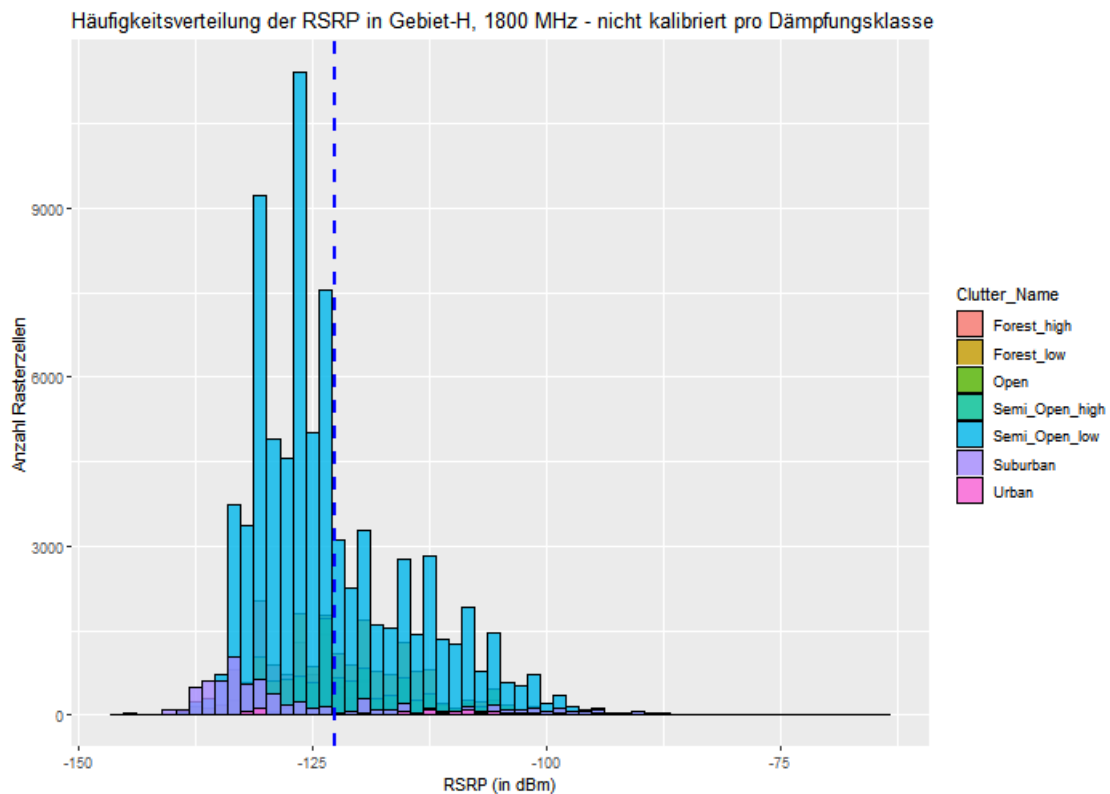


Abbildung 3.83: Histogram RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert

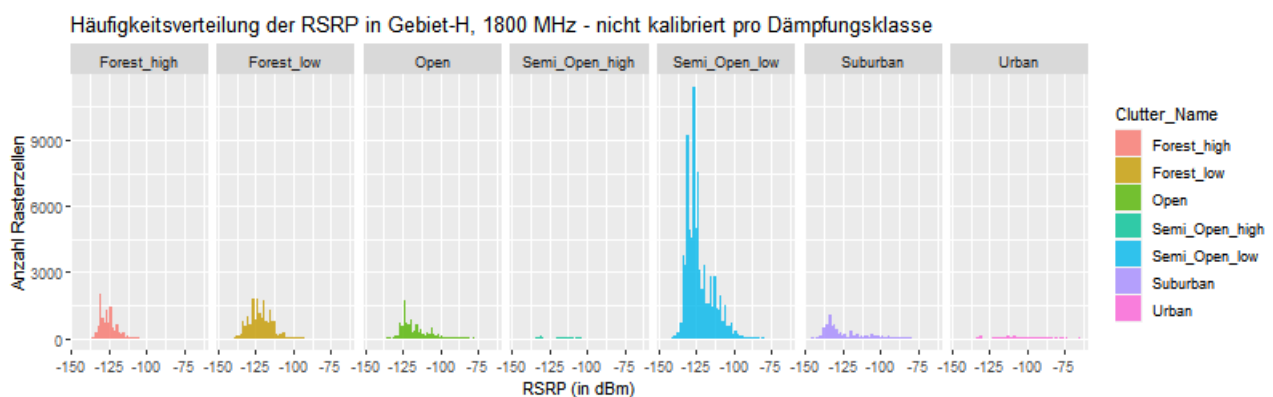


Abbildung 3.84: Histogram Facet RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert

Auf den Dämpfungsklassen *Suburban*, *Open*, *Forest low* sowie *Forest high* kommen im Schnitt bis ca 1500 Rasterzellen pro RSRP Wert vor. Die Dämpfungsklasse *Semi Open high* sowie *Suburban* kommen nur zu einem geringen Anteil vor. Die Klasse *Urban* kommt zu einem minimalen Anteil vor, jedoch befinden sich deren Werte mehr im stärkeren RSRP Bereich. Vergleicht man hier die Klasse *Forest low* mit dem Histogramm aus der Analyse mit 800 MHz in Abbildung 3.69, so fällt auf, dass bei 1800 MHz wesentlich weniger Zellen Waldbereiche erreichen als bei 800 MHz. Dies macht durchaus Sinn, da niedrige Frequenzen viel besser Hindernisse noch über größere Distanzen überwinden können.

Betrachtet man in Abbildung 3.85 anhand des Boxplots die Verteilung der Signalstärke RSRP über die einzelnen Dämpfungsklassen, so befinden sich alle Klassen im RSRP Bereich zwischen



-135 bis -105 dBm. Die Boxen zeigen hier wieder in welchen RSRP Wertebereich 50 Prozent der Daten liegen. Der horizontale Strich in der Box beschreibt genau die Mitte der Daten und wird als Median bezeichnet. Vergleicht man die Lage der Mediane, so erkennt man, dass in der Klasse *Urban* der Median am höchsten zur RSRP liegt. Daher sind im Urbanen Bereich die Hälfte der Daten im stärkeren RSRP Bereich als in den anderen Dämpfungsklassen vorhanden.

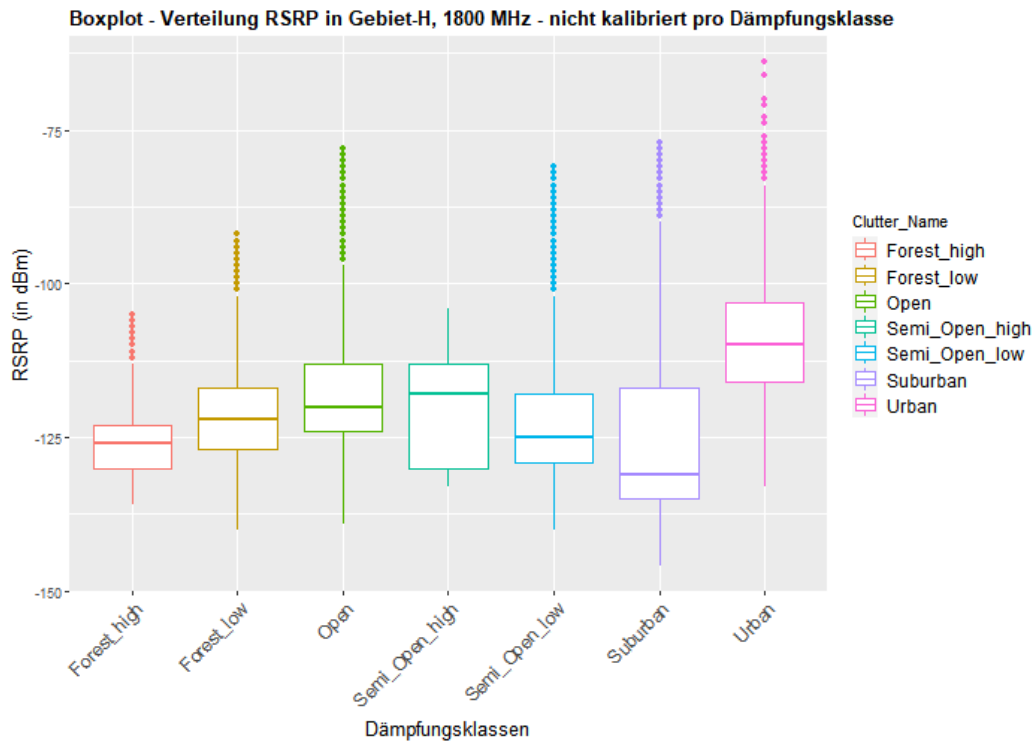


Abbildung 3.85: Boxplot RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert

Die Streuung nach oben und nach unten der Daten, ist an den Antennen oder Whiskern von den Boxen vertikal nach oben und unten zu sehen. Die Streuung erstreckt sich hierbei von -70 bis -150 dBm. Interessanterweise fiel in Histogramm 3.83 die überwiegende räumliche Abdeckung an Zellen mit der Dämpfungsklasse *Semi Open Low* auf. Die Hälfte der Daten dieser Dämpfungsklasse besitzen jedoch im Vergleich zu den anderen Klassen einen sehr geringen RSRP Wert von -125 dBm. Ausreißer Werte, die vereinzelnde Extremwerte darstellen, sind in allen Klassen bis auf *Semi Open high* vorhanden.

Deutlich zu sehen ist anhand der kalibrierten Analyse in Abbildung 3.86, dass durch Kalibrierung die Empfangslücken aus der nicht kalibrierten Analyse in Abbildung 3.81 richtig modelliert werden konnten und somit auch eine deutliche Verbesserung für eine realitätsnahe Mobilfunkvorhersage erreicht werden konnte. Man sieht außerdem eine stärkere RSRP in der Nähe um die Basisstation. Der Abdeckungsbereich der RSRP hat sich auch im Vergleich zur nicht kalibrierten Analyse vergrößert.

Betrachtet man die Häufigkeitsverteilung anhand des Histogrammes in Abbildung 3.88, so fällt- wie in der nicht kalibrierten Analyse in 3.83- auf, dass die Verteilung stark schief in Richtung der schwachen RSRP Werte ausgerichtet ist. Im Unterschied zur nicht kalibrierten Analyse liegt der Median der kalibrierten Analyse höher und zwar bei -118 dBm.

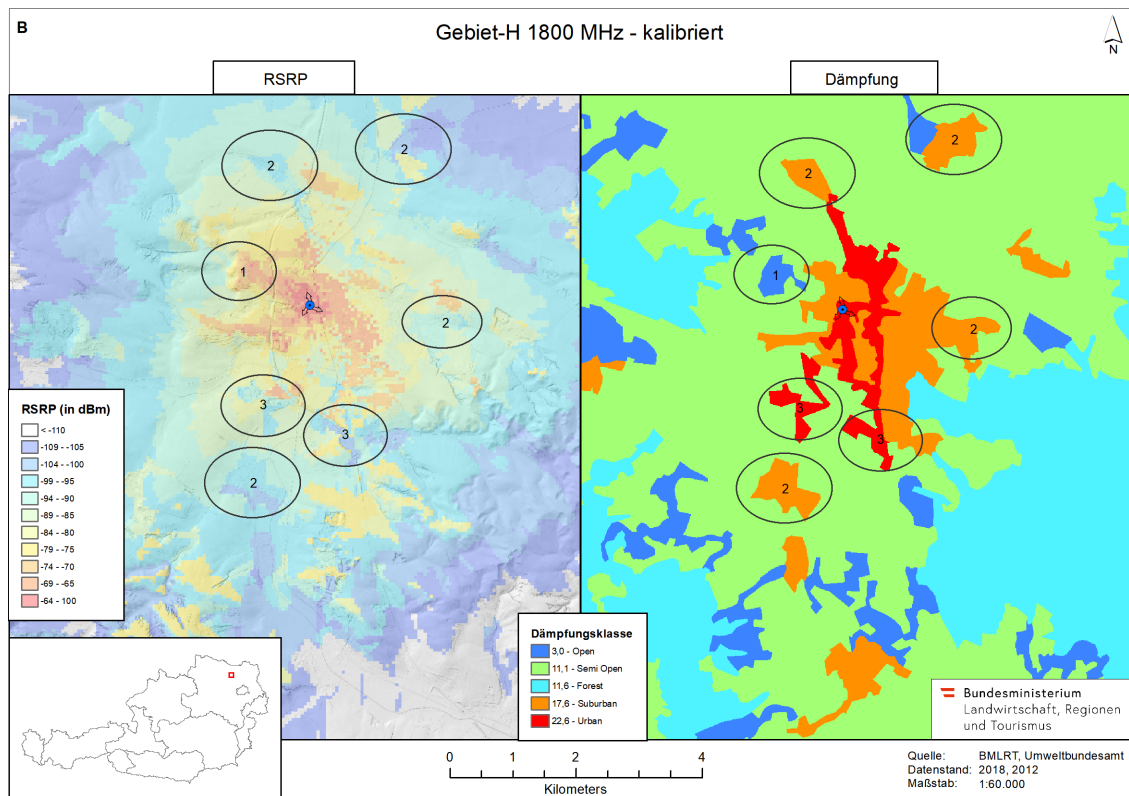


Abbildung 3.86: Karte Gebiet H2 1800 Teil-B kalibriert Vergleich DGM Landnutzung

RSRP	
Min.	:-139.0
1st Qu.	:-124.0
Median	:-118.0
Mean	:-116.4
3rd Qu.	:-112.0
Max.	:-47.0

Abbildung 3.87: Statistik RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert

In der Gesamtstatistik in Abbildung 3.87, ist die Verteilung der Daten von -139 bis -47 dBm der Signalstärke, zu sehen. Wieder ist die Dämpfungsklasse *Semi Open low* über die Fläche und anhand der Anzahl der Rasterzellen am häufigsten vertreten. Zu einem größeren Anteil ist diesmal die Klasse *Open* vertreten. Die Klasse *Suburban* ist zum größten Teil im schwächeren RSRP Bereich anzutreffen. Die Klasse *Open* verteilt sich um den Medianwert der Gesamtverteilung. Ähnliche Verteilungen weisen die Klassen *Forest high* sowie *Forest low* auf. Einen minimalen Anteil an der Verteilung besitzt die Klasse *Semi Open high* sowie *Urban*.

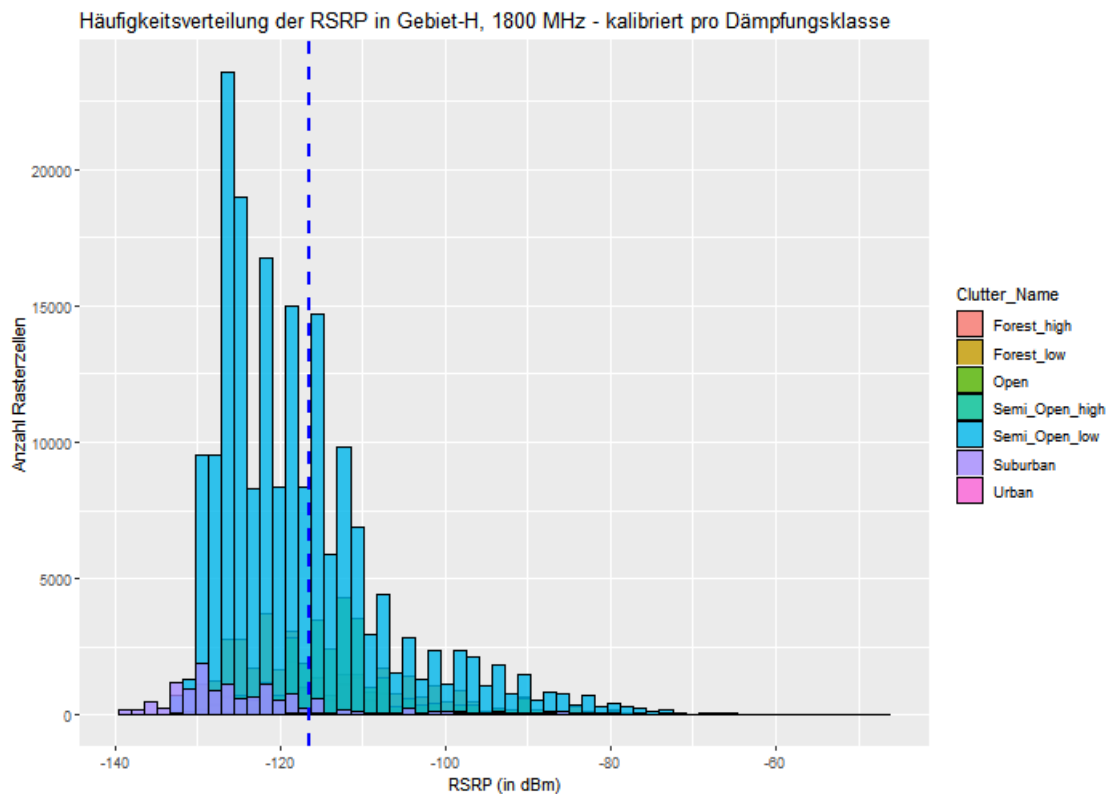


Abbildung 3.88: Histogram RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert

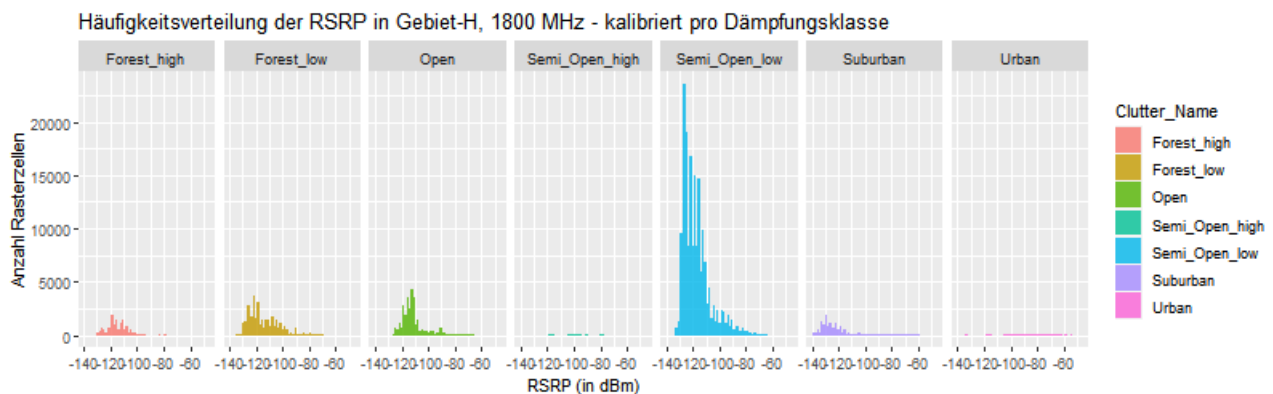


Abbildung 3.89: Histogram Facet RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert

Betrachtet man nun anhand des Boxplot für jede Dämpfungsklasse die Verteilung der RSRP, so ergibt sich auch hier ein diverses Bild. Genau die Klasse *Urban*, die in der Häufigkeitsverteilung am wenigsten Rasterzellen abdeckt, besitzt in der Boxplot Verteilung die stärksten RSRP Werte über die Daten. Dies ist nicht verwunderlich, wenn man sich in Karte 3.86 vor Augen führt, dass die Bereiche um die Basisstation im dicht besiedelten Gebiet, also Urban klassifiziert sind, liegen. Auch die Spannweite über die RSRP ist besonders groß, da sich hier die Hälfte der Daten im RSRP Bereich von -80 bis -110 dBm befinden. Relativ schnell sinkt die Stärke der RSRP ab und somit liegt auch der Median in der Klasse *Suburban* sehr niedrig bei ca -125 dBm.

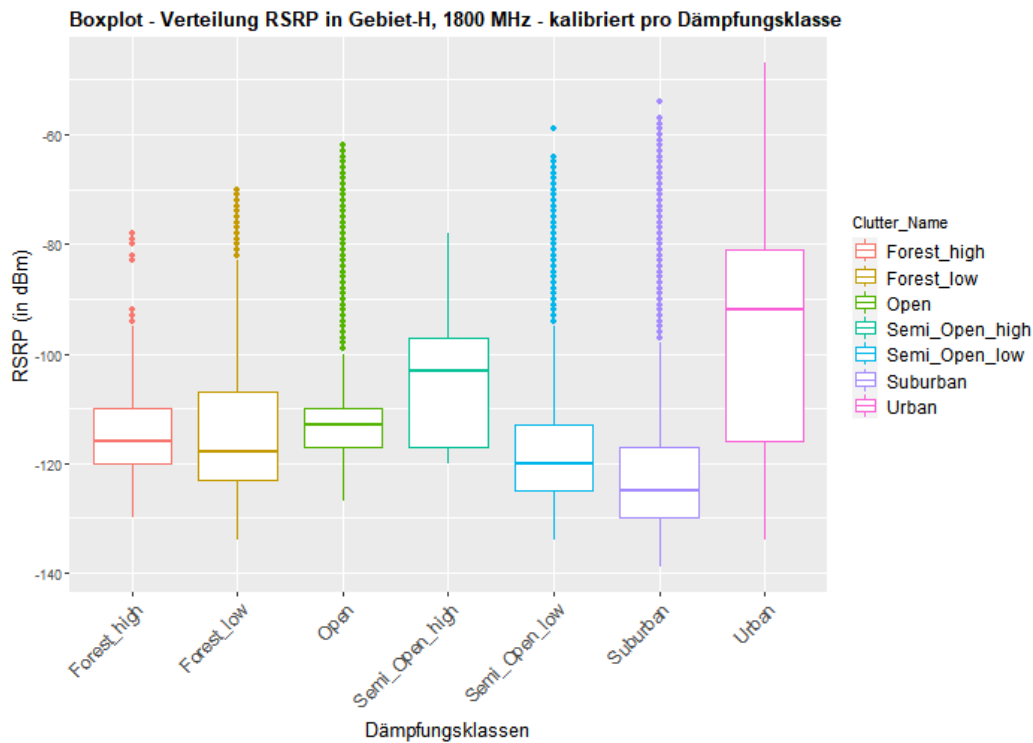


Abbildung 3.90: Boxplot RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert

Die restlichen Klassen und deren Mediane pendeln sich alle im RSRP Bereich um -100 bis -120 dBm ein.

**3.7.5.2.2 RSRQ** Um nun auch die Qualität des Empfangssignals beurteilen zu können, wurde in Karte 3.91 die *Reference Signal Received Quality (RSRQ)* mit einer **nicht kalibrierten** Analyse im Vergleich zu dem digitalen Geländemodell als auch zur Landnutzung, dargestellt. Zu sehen ist, dass die Signalqualitätswerte in der Nähe rund um die Basisstation in hellem grün, welche sich im locker verbautem Gebiet befinden, einer spürbaren Störung der Verbindung unterworfen sind. Alles außerhalb des hellgrünen Bereiches, welches einen RSRQ von  $>-15$  dB aufweist, stellt sehr stark störende Einflüsse dar, welche sich letzten Endes stark auf die Qualität des empfangenen Signals auswirken. Im Vergleich hierzu zeigt die **kalibrierte** Analyse in Karte 3.92, dass die RSRQ im Bereich mit mittleren Signalstörungen  $>-10$  dB in hellgrün wesentlich größer mit einem Radius von ca 5 Kilometern ausfällt.

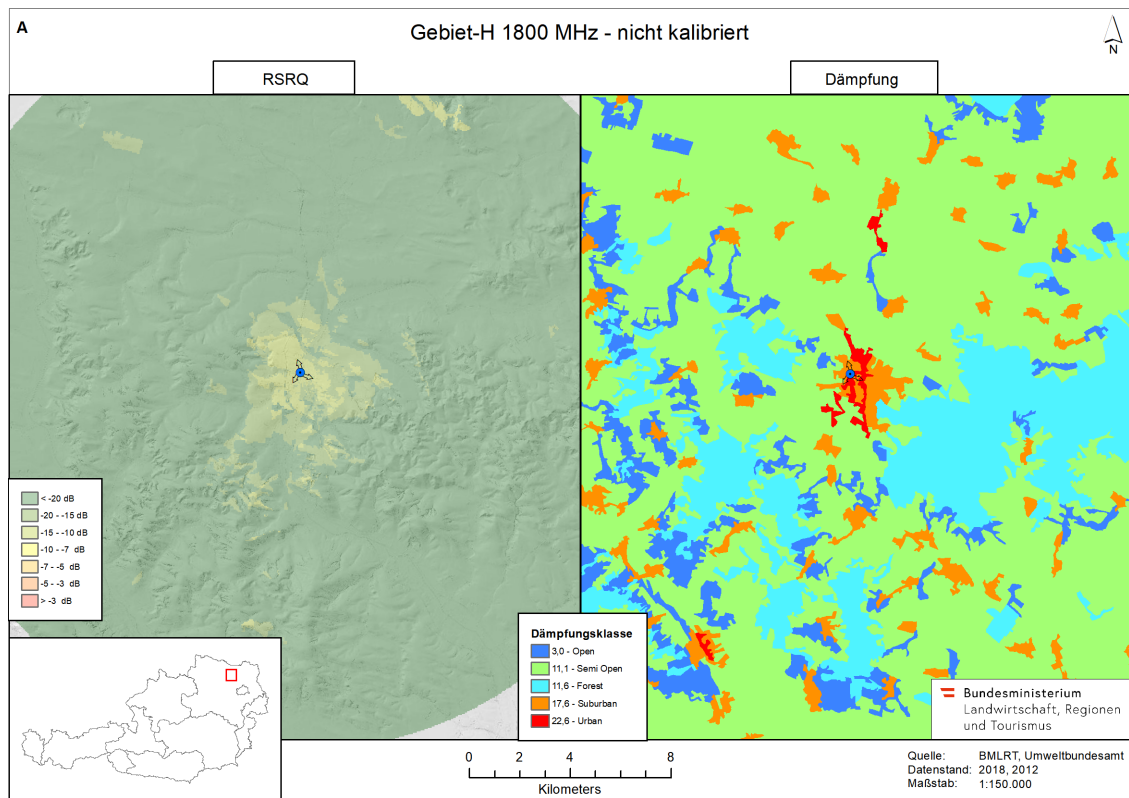


Abbildung 3.91: Karte Gebiet H2 1800 Teil-A Nicht kalibriert Vergleich DGM Landnutzung RSRQ

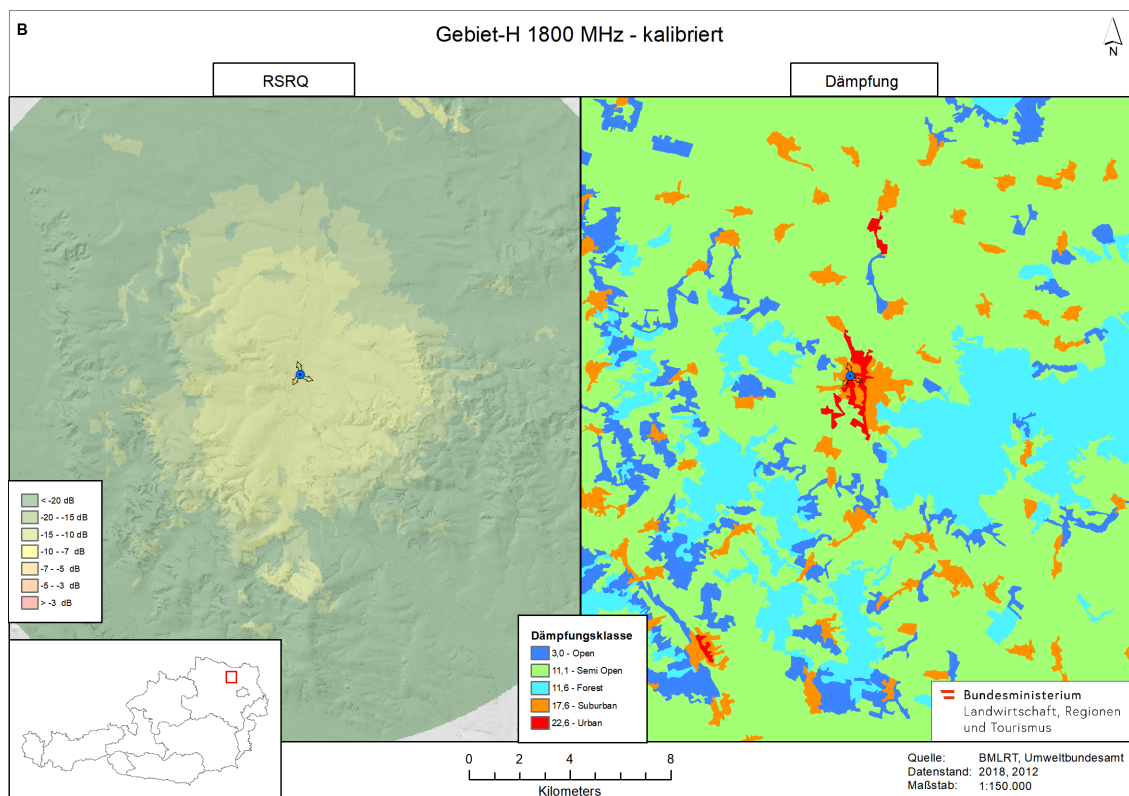


Abbildung 3.92: Karte Gebiet H2 1800 Teil-B kalibriert Vergleich DGM Landnutzung RSRQ

**3.7.5.2.3 SINR** Betrachtet man nun in Karte 3.93 der **nicht kalibrierten** Analyse, das Verhältnis von Nutzsignal zu Rauschen und Interferenzen anhand des Referenzsignales der *Signal to interference plus noise ratio (SINR)* so fällt auf, dass ein Großteil des modellierten Bereiches noch bis 10 dB mit akzeptabler Verbindungsqualität abgedeckt wird. Die beste Verbindungsqualität anhand der SINR zeigt sich in einem Bereich zwei Kilometer um die Basisstation mit ähnlichem Muster wie die RSRP im Bereich bis -99 dBm der Karte 3.81.

Betrachtet man hingegen die **kalibrierte** Variante mit der SINR, so sind die maximal Werte des Verhältnisses von Nutzsignal zu Rauschen und Interferenzen in wesentlich größerem Ausmaß vorhanden. Hierbei sieht man, dass der maximal Wert >40 dB, welcher eine optimale Verbindung darstellt, um die Basisstation in einem ca 5 Kilometer großen Radius vorkommt.

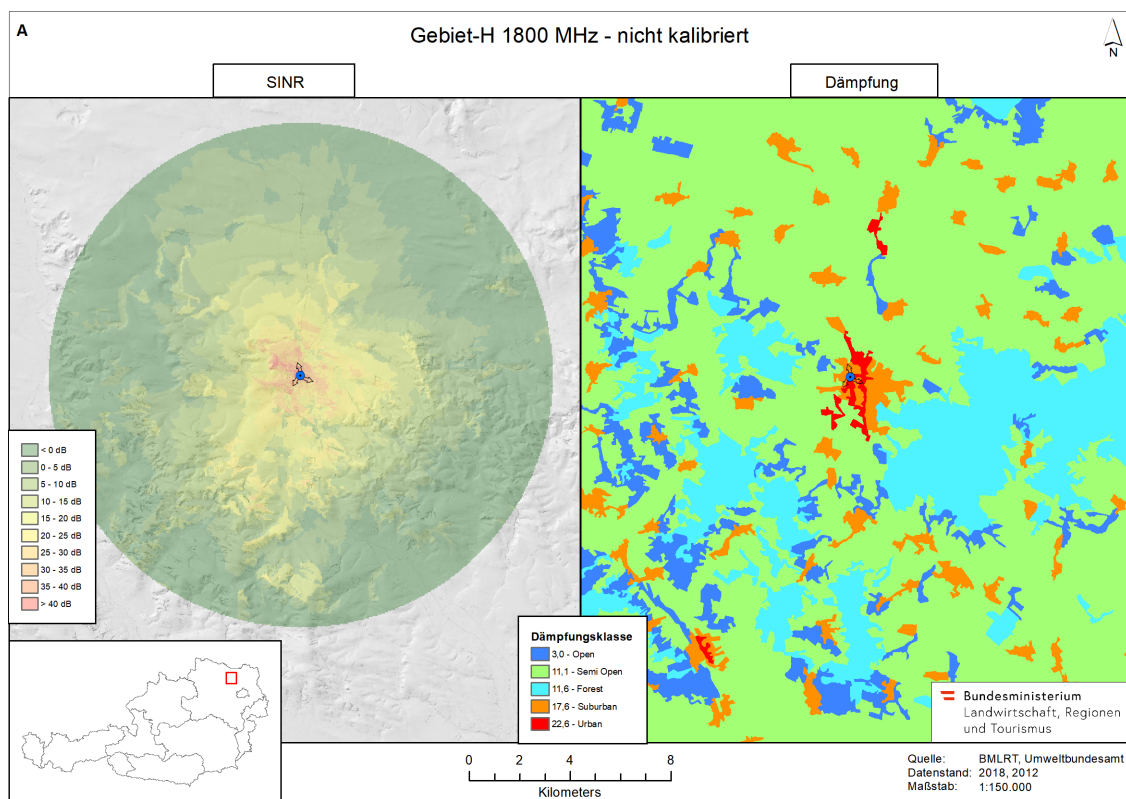


Abbildung 3.93: Karte Gebiet H2 1800 Teil-A Nicht kalibriert Vergleich DGM Landnutzung SINR



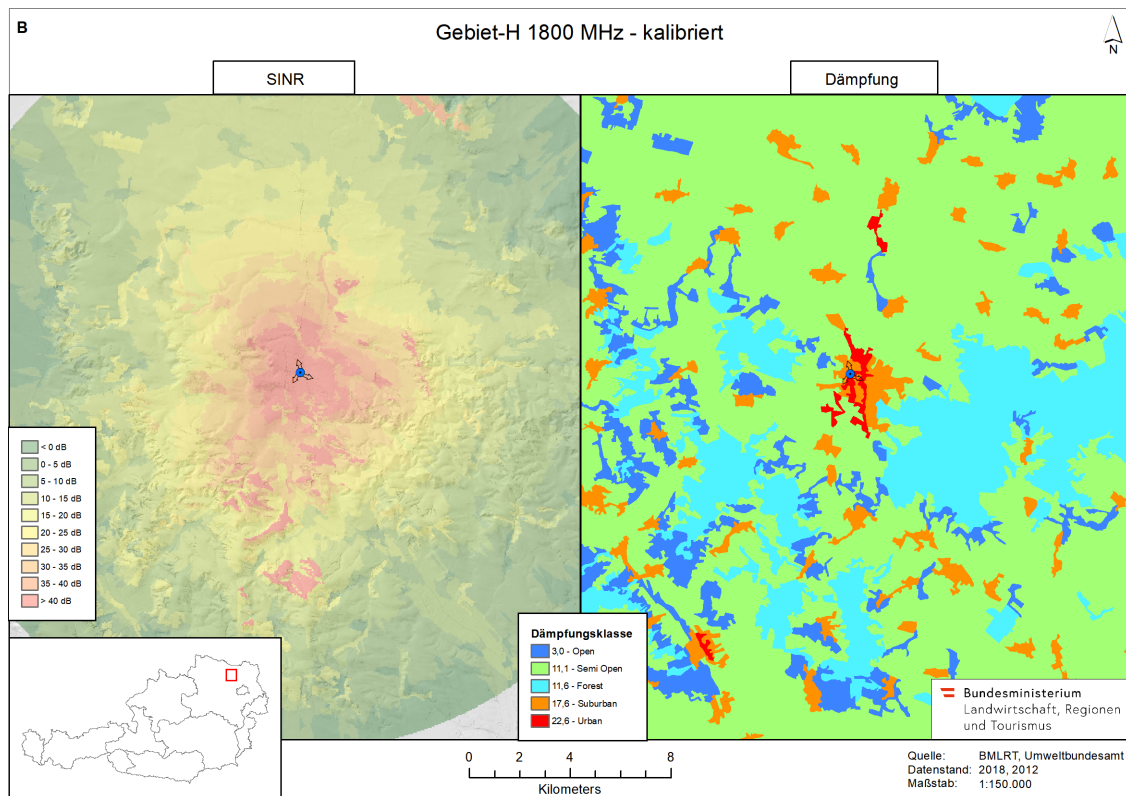


Abbildung 3.94: Karte Gebiet H2 1800 Teil-B kalibriert Vergleich DGM Landnutzung SINR

### 3.7.5.3 2100 MHz Vergleich

Die dritte Analyse wurde mit der höchsten Frequenz von 2100 MHz- wieder einmal ohne kalibrierte HCM Daten und einmal durch DriveTest kalibrierte HCM Daten- durchgeführt. Die Unterschiede zwischen der Vorhersage von nicht kalibrierten Daten zu kalibrierten Daten ist in diesem Fall sehr groß. Der Bereich, in welchem Signale einer Basisstation noch empfangen werden können, verringert sich bei einer Frequenz von 2100 MHz. Da bei höheren Frequenzen die Durchsatzrate der gesendeten Datenpakete steigt, jedoch die Reichweite sich verringert. Bei höheren Frequenzen steht grundsätzlich ein größeres Frequenzspektrum zur Verfügung, auf welches die jeweiligen Nutzer zugreifen können. Die Durchsatzrate ist abhängig vom genutzten Spektrum im Frequenzbereich und der Modulation.

**3.7.5.3.1 RSRP** Sowohl bei der kalibrierten als auch bei der nicht kalibrierten Analyse ist ein ähnliches Grundmuster zu erkennen, wobei die drei Antennen in Nord-westlicher bis süd-östlicher Richtung ausgerichtet sind. Hierbei sind stärkere Referenzsignale im nahen nördlichen Bereich sowie nahe der Antennen zu beobachten. Besonders die RSRP Klasse von -70 bis -74 dBm dürfte im nördlichen Bereich dominant vorkommen. Auch im östlichen Bereich ist die RSRP Klasse von -75 bis -79 dBm in beiden Analysen dominant vertreten. Unterschiede ergeben sich jedoch in der kalibrierten Analyse (B), wo in der höchsten Klasse des Referenzsignals von 100 bis -64 dBm ein deutlich größerer Bereich um die Antennen abgedeckt ist, als in der nicht kalibrierten Analyse (A). Auch fällt auf, dass in der kalibrierten Analyse (B) die Klassen mit dem schwächsten Referenzsignal -95 bis -105 dBm deutlich weiter um die Basisstation modelliert wurden, als in der nicht kalibrierten Analyse (A). Dies ist vermutlich auf den durchgeführten DriveTest zurückzuführen, da durch die Feldmessungen der Referenzsignale eine Verbesserung der Modellie-

rungsergebnisse und somit eine Näherung an die realen vorort befindlichen Gegebenheiten erfolgt.

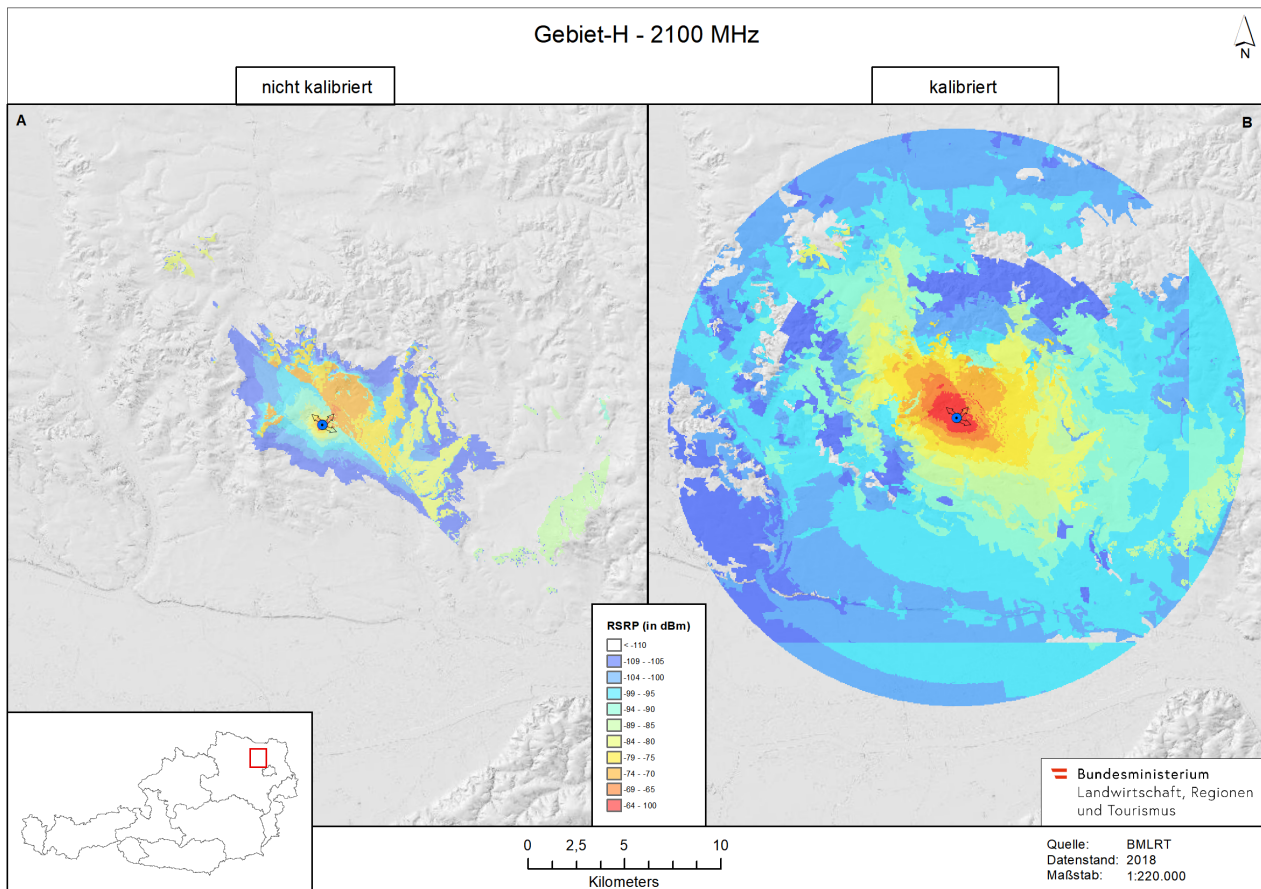


Abbildung 3.95: Gebiet H 2100 nicht kalibriert - kalibriert

Die kalibrierten Koeffizienten des Hata9999 Modells durch die DriveTest Daten, werden in Tabelle 3.96 dargestellt.

A0	A1	A2	A3
18,2	42,4	-12	0,1

Abbildung 3.96: Parameter Kalibrierung Gebiet-H 2100

In Karte 3.97 wurde der Differenzraster zwischen der kalibrierten und nicht kalibrierten Analyse berechnet. Die grünen Bereiche stellen die Rasterzellen dar, welche dieselbe Signalstärke sowohl in der kalibrierten als auch in der nicht kalibrierten Analyse aufweisen. Die roten Bereiche hingegen, zeigen Rasterzellen auf, welche in den beiden Analysen unterschiedliche Signalstärken besitzen.

Um nun weitere Rückschlüsse und Erklärungsansätze für die ersichtlichen Referenzsignalmuster in Abbildung 3.95 zu finden, müssen die Datensätze, welche in das Mobilfunkberechnungsmodell eingeflossen sind, verglichen werden. Hierbei wurde im Hata9999 Model die Landnutzung als auch das Geländere relief in den Mobilfunkergebnissen berücksichtigt. Demnach müssen diese Informationen auch einen Einfluss auf die soeben berechneten Signale haben, welche in weiterer

Folge in Karte 3.98 sowie in Karte 3.99 detailliert analysiert werden.

Um einen schnellen Überblick über die Unterschiede zwischen der kalibrierten und nicht kalibrierten Analyse zu erhalten, wird der Differenzraster zwischen diesen beiden in Karte 3.97 berechnet. Hierbei sind in rot die Bereiche dargestellt, die sich zwischen Kalibrierung und nicht Kalibrierung unterscheiden und in grün die Bereiche, welche keinen Unterschied in der RSRP aufweisen.

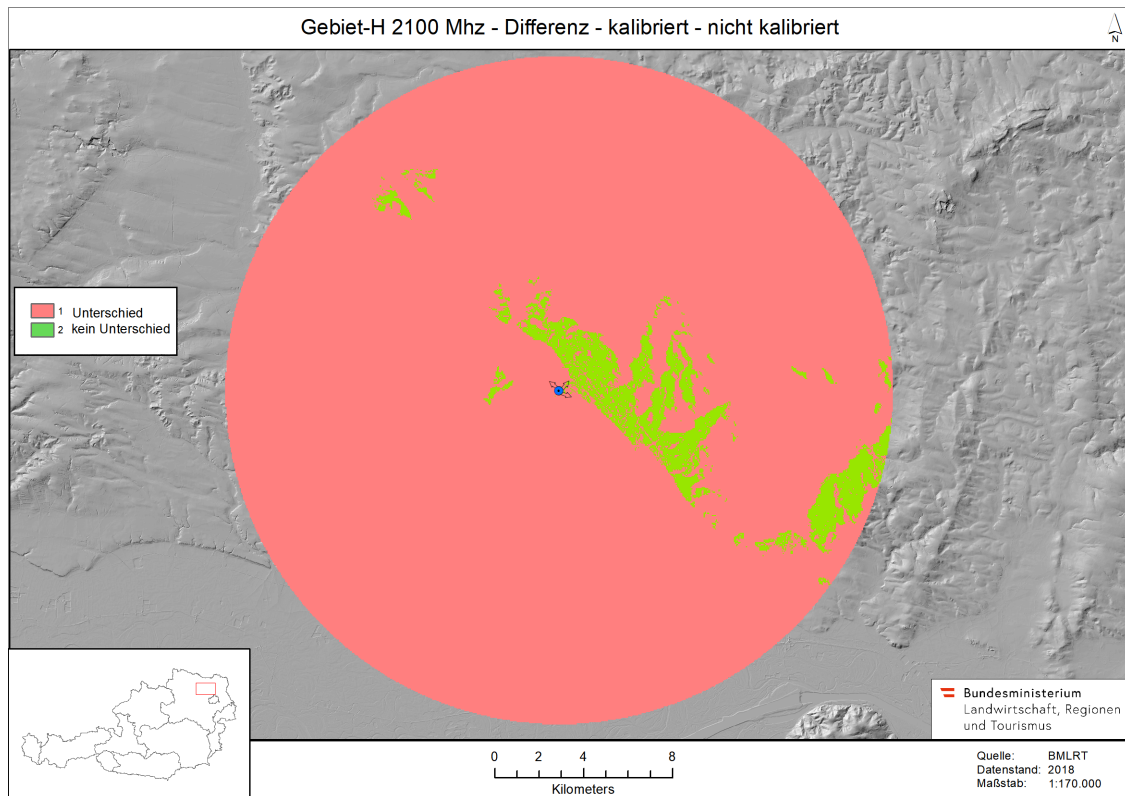


Abbildung 3.97: Gebiet-H 2100 Differenzraster

**Root Mean Square Error** Der RMSE zwischen kalibrierter und nicht kalibrierter Analyse liegt bei 23,2. Die Spannweite der RSRP liegt bei 100 und somit zeigt der RMSE einen starken Unterschied zwischen kalibrierter und nicht kalibrierter Analyse an.

In Karte 3.99 welcher die kalibrierte Analyse des Teilbereichs (B) aus Karte 3.95 darstellt, soll nun das Gelände sowie die Landnutzung und deren möglicher Einfluss auf das Mobilfunksignal untersucht werden. Das Relief des digitalen Geländemodells hat hier bereits einen natürlichen Einfluss durch unterschiedliche Höhen und Neigungen welche das Mobilfunksignal beeinflussen können. Hier muss erwähnt werden, dass in dieser Analyse zwar die Landnutzung und damit die bebaute Fläche in die Berechnung mit einfließen, jedoch die detaillierten Gebäudeumrisse zwar in der Karte dargestellt werden, jedoch nicht in das Hata9999 Model mit eingeflossen sind. Besonders der Signalstärkebereich in der Karte 3.99 zeigt, dass die noch hohen RSRP Werte von +100 bis -84 dBm, durch Laub- und Mischwald begrenzt werden, was an den gelben gekennzeichneten Kreisen dargestellt wird. Wald jeglicher Sorte hat somit einen bedeutenden Einfluss auf die Signalstärke und die Reichweite eines LTE Funkmasten. Besondere Bedeutung

kommt auch der Jahreszeit hinzu, da je nach dem ob die Bäume nun Blätter tragen oder nicht, noch mehr Fläche vorhanden ist an der Signale absorbiert, reflektiert oder gestreut werden können.

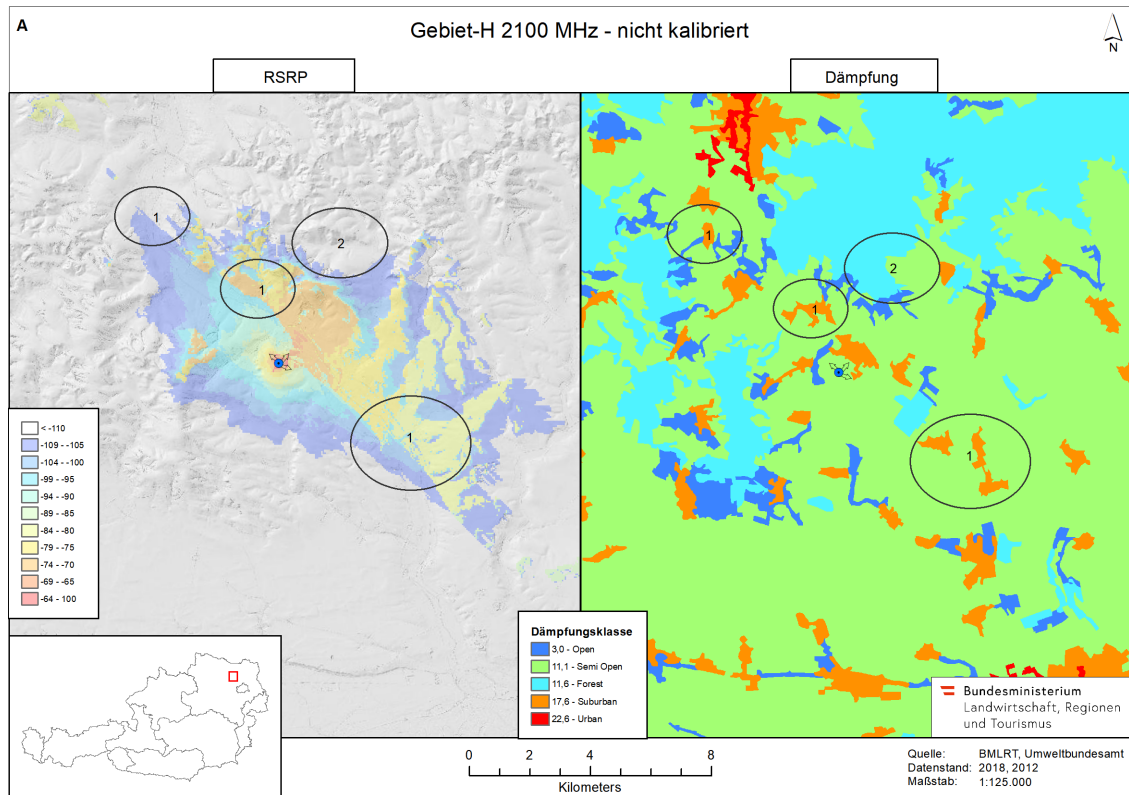


Abbildung 3.98: Gebiet H 2100 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung



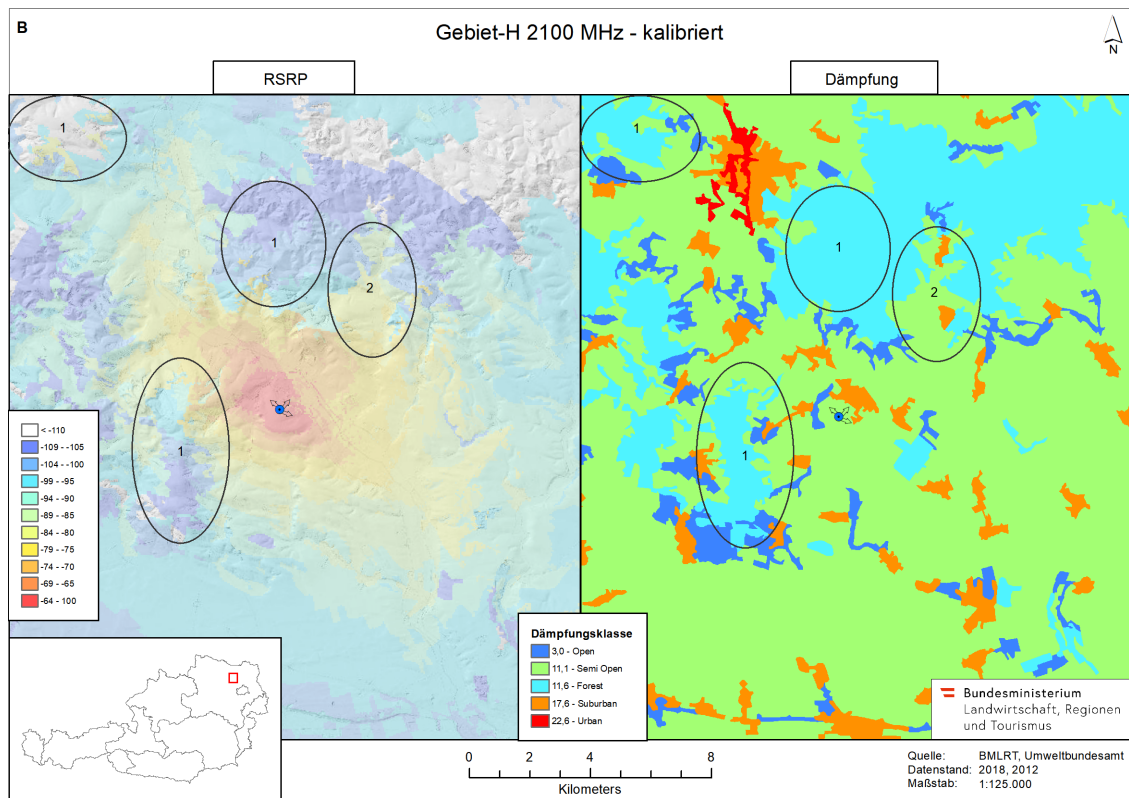


Abbildung 3.99: Gebiet H 2100 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung

Erkennbar ist ebenfalls, dass der RSRP Wert des Referenzsignals bei einer Kalibrierung, deutlich realistischer an urbanen Flächen und Gebäuden modelliert werden, als bei der nicht kalibrierten Variante in Karte 3.98. Außerdem werden bei nicht Kalibrierung, die Abdeckungsbe-  
reiche der nord-westlichen als auch süd-östlichen Antennen nicht realitätsgetreu abgebildet. In  
der kalibrierten Variante hingegen, ist ein kontinuierlicher Verlauf der RSRP von den Antennen  
weg zu beobachten. Dieser verändert sich anhand von Bebauung, Bewuchs oder Relief, die  
natürliche Dämpfungsfaktoren darstellen.

Untersucht man nun die statistische Häufigkeitsverteilung für die nicht kalibrierte Analyse, so  
erkennt man eine stark nach links in Richtung der schwächsten RSRP Werte geneigte Verteilung.

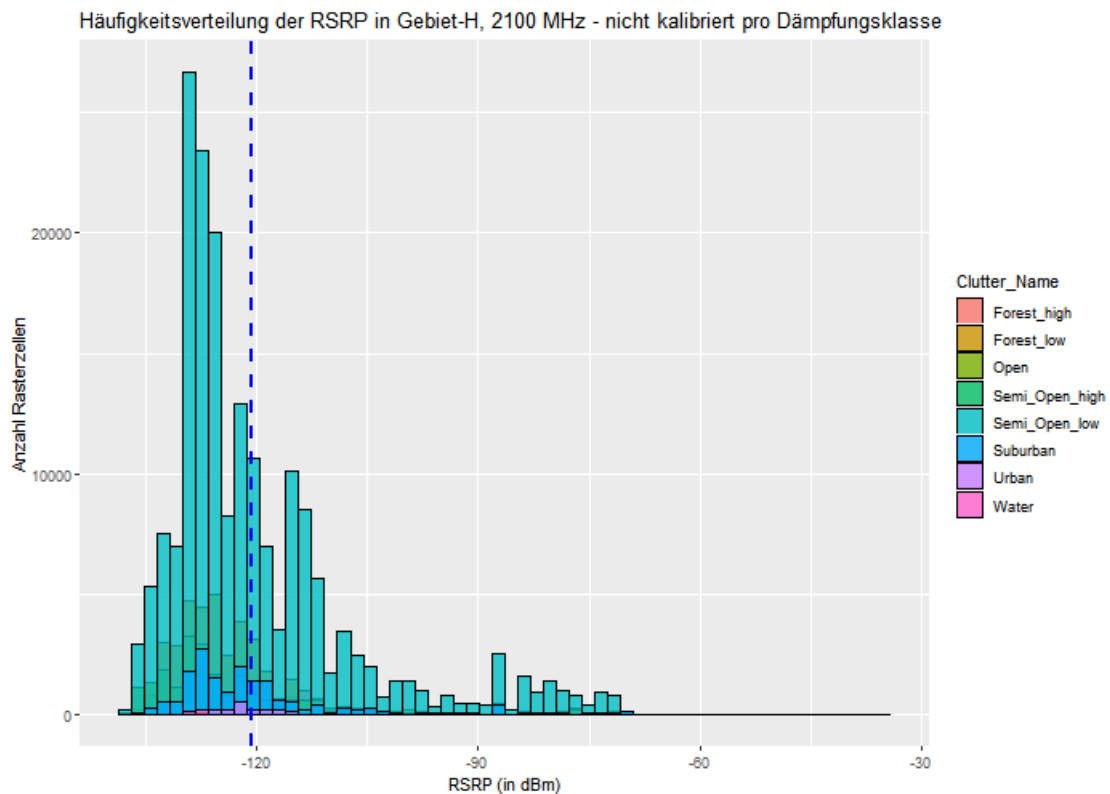


Abbildung 3.100: Histogram RSRP Gebiet-H 2100 nicht kalibriert

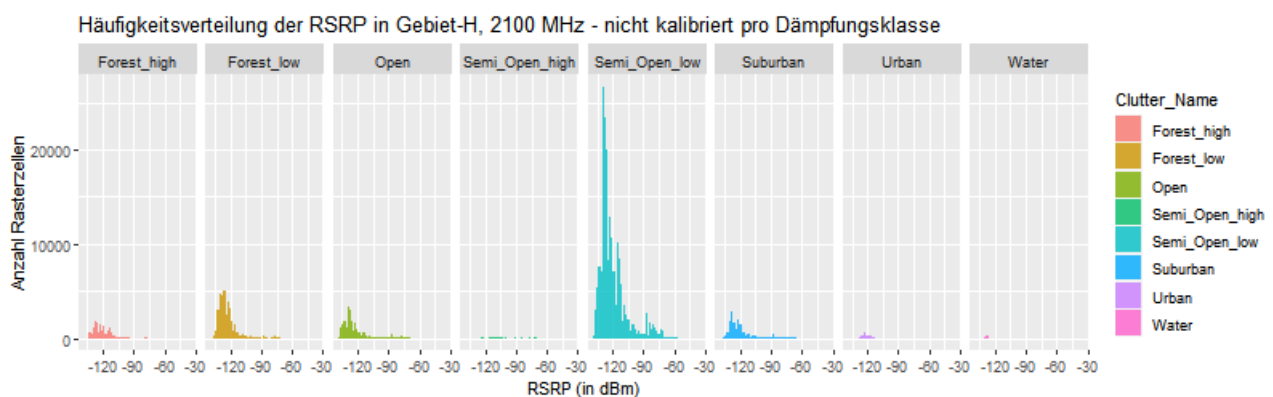


Abbildung 3.101: Histogram Facet RSRP Gebiet-H 2100 nicht kalibriert

Der Median der Gesamtverteilung liegt bei -125 dBm, das Minimum bei -138 dBm sowie das Maximum bei -35 dBm. Die Dämpfungsklasse *Semi Open low* kommt zum überwiegenden Anteil vor. Da die Klassen sich stark überlagern, lassen sich die weiteren Dämpfungsklassen besser über das aufgetrennte Histogramm in Abbildung 3.101 herauslesen. Die Klasse *Forest low* stellt die zweithäufigste Verteilung dar. Darüber kommen aber auch die Klassen *Forest high*, *Open* sowie *Suburban* vor. Relativ gering vertreten sind die Klassen *Urban* sowie *Water*.



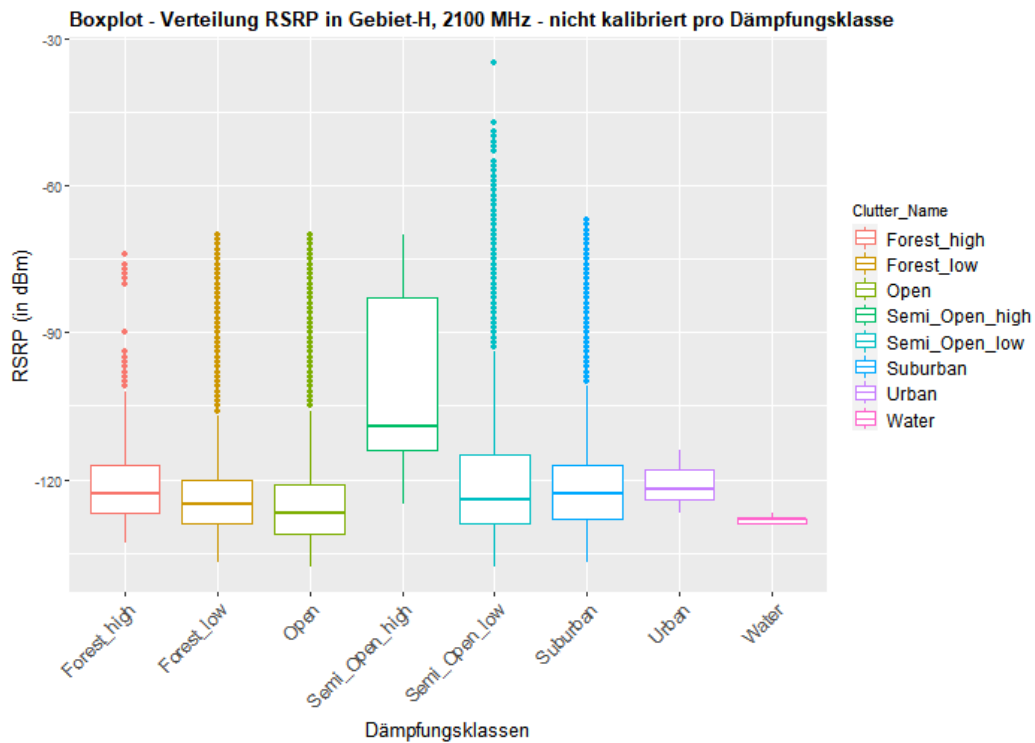


Abbildung 3.102: Boxplot RSRP Gebiet-H 2100 nicht kalibriert

Betrachtet man wieder mittels des Boxplot die Verteilung der RSRP über jede Dämpfungsklasse, so ergibt sich hierbei ein relativ klares Bild. Alle Mediane der Klassen mit Ausnahme von *Semi Open high* befinden sich im RSRP Bereich um -120 dBm. Die Klasse *Semi Open high* ist von -100 bis -80 dBm im deutlich besseren RSRP Bereich.

Als nächstes soll die kalibrierte Analyse statistisch ausgewertet werden. Der Median bei Kalibrierung liegt bei -98 dBm, das Minimum bei -122 dBm und das Maximum bei -10 dBm. Die Verteilung zeigt auf den ersten Blick, dass weitaus mehr Rasterzellen mit einer um 20 dBm besseren RSRP vorhanden sind als ohne Kalibrierung. Außerdem zeigt sich bei Kalibrierung bereits in Karte 3.99 eine deutlich homogener Ausbreitung der RSRP, was sich auch im Histogramm als eine fast Normalverteilung widerspiegelt. Um nun die Effekte der verschiedenen Landnutzung durch die Dämpfungsklassen zu veranschaulichen, wurde in Abbildung 3.104 die einzelnen Dämpfungsklassen anhand der RSRP gegenübergestellt. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie in der nicht kalibrierten Analyse.

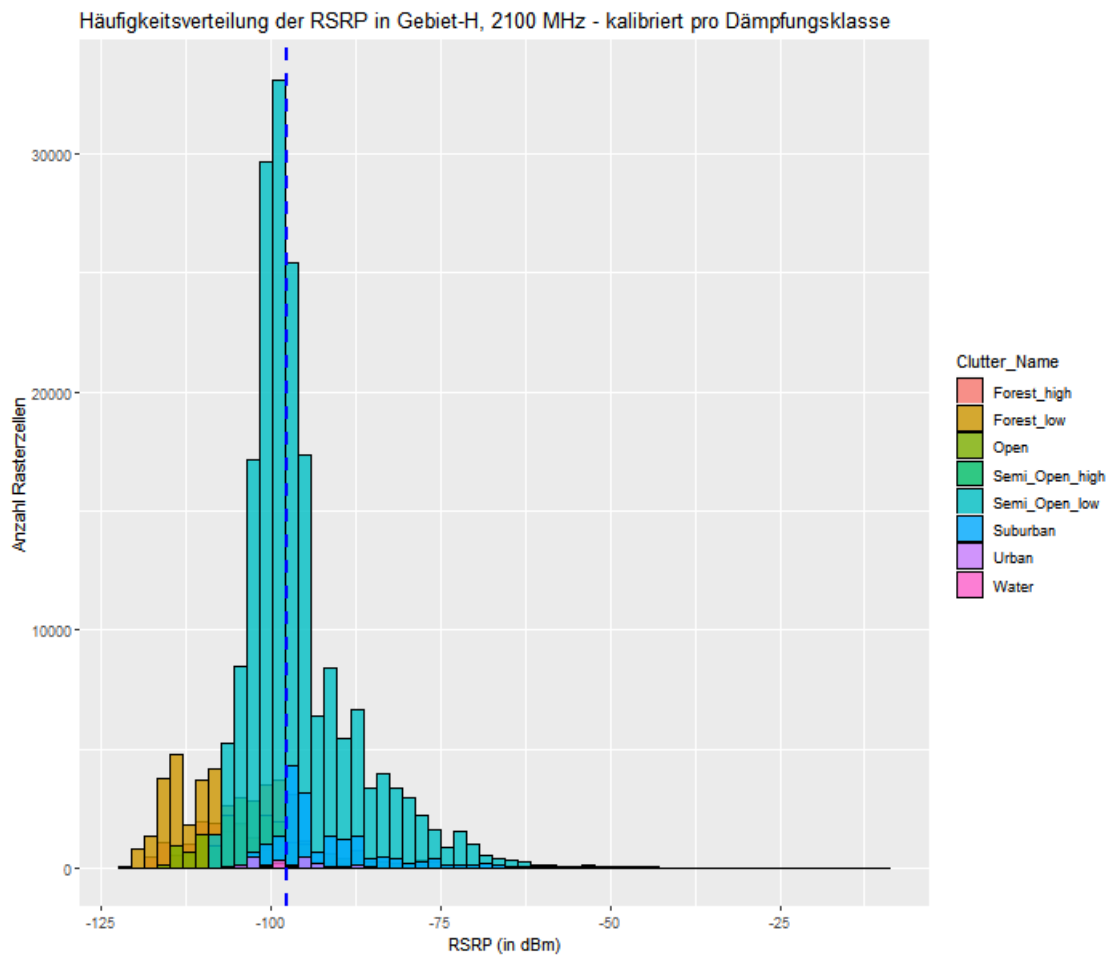


Abbildung 3.103: Histogram RSRP Gebiet-H 2100 kalibriert

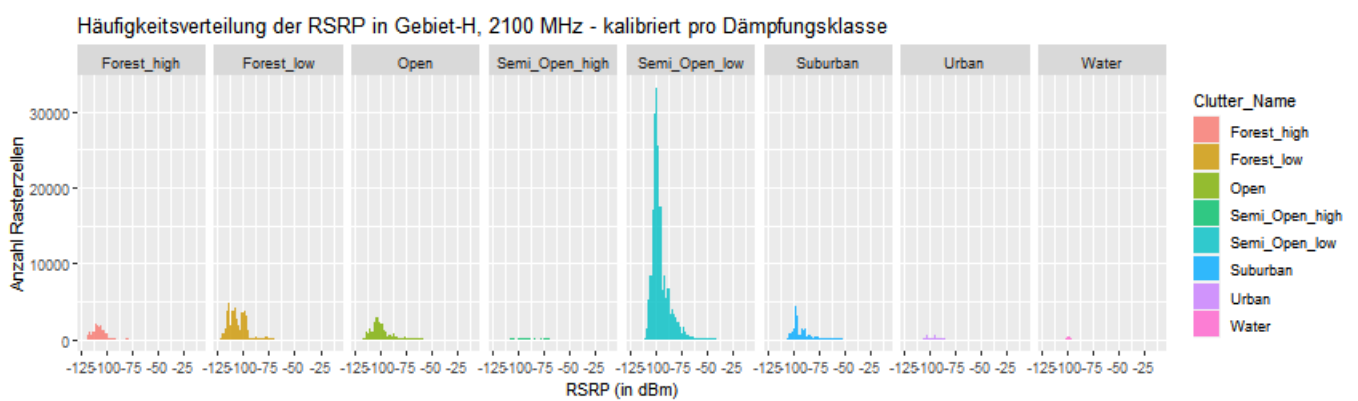


Abbildung 3.104: Histogram Facet RSRP Gebiet-H 2100 kalibriert

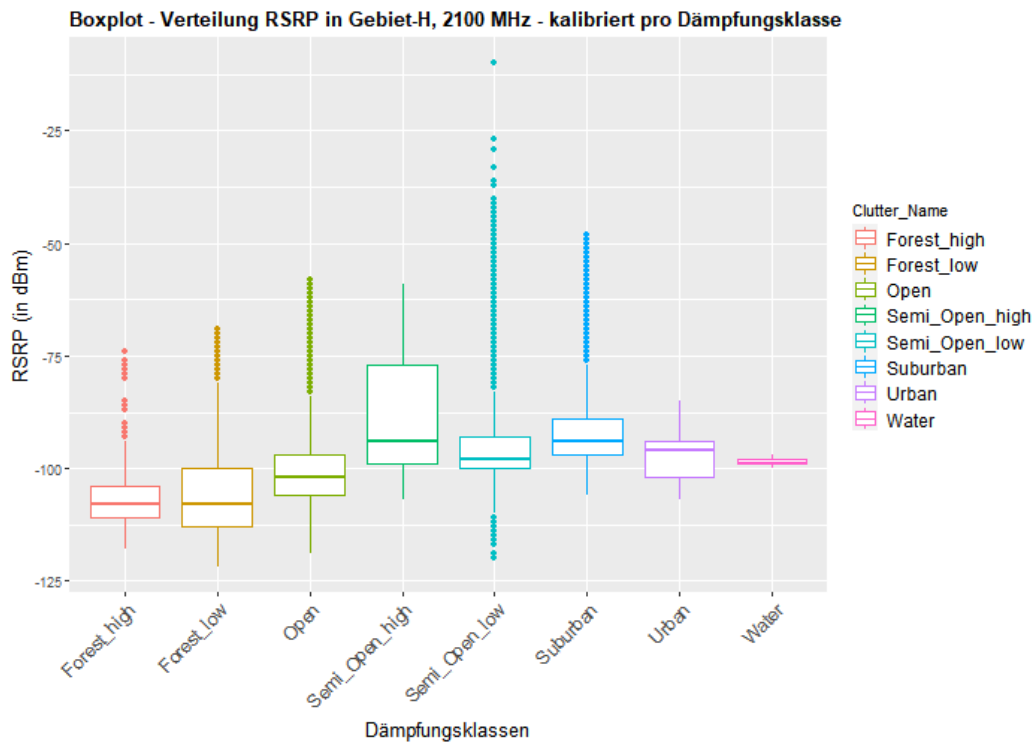


Abbildung 3.105: Boxplot RSRP Gebiet-H 2100 kalibriert

Betrachtet man nun über das Boxplot 3.105 die Verteilung der RSRP über die Dämpfungsklassen, so fällt auf, dass die Mediane der kalibrierten Analyse mit RSRP Werten von -110 bis -90 dBm deutlich besser ausfallen als bei nicht Kalibrierung. Auffällig ist ebenfalls, dass die Klasse *Semi open low* die breiteste Streuung über die RSRP aufweist.

**3.7.5.3.2 RSRQ** Die Qualität des Referenzsignales wurde nun in Karte 3.106 **ohne Kalibrierung** mit 2100 MHz analysiert. Hierbei ist zu erkennen, dass in einem Bereich von 5 bis 8 Kilometer die Qualität des Signals bei -15 bis -10 dB liegt, welche störende bis stark störende Einflüsse bedeuten und daher mit einer spürbaren Beeinflussung des Signals zu rechnen ist. Dieser Bereich deckt sich mit dem RSRP Bereich wo gerade noch ein Signal zu erwarten wäre, wie in Karte 3.98 dargestellt ist.

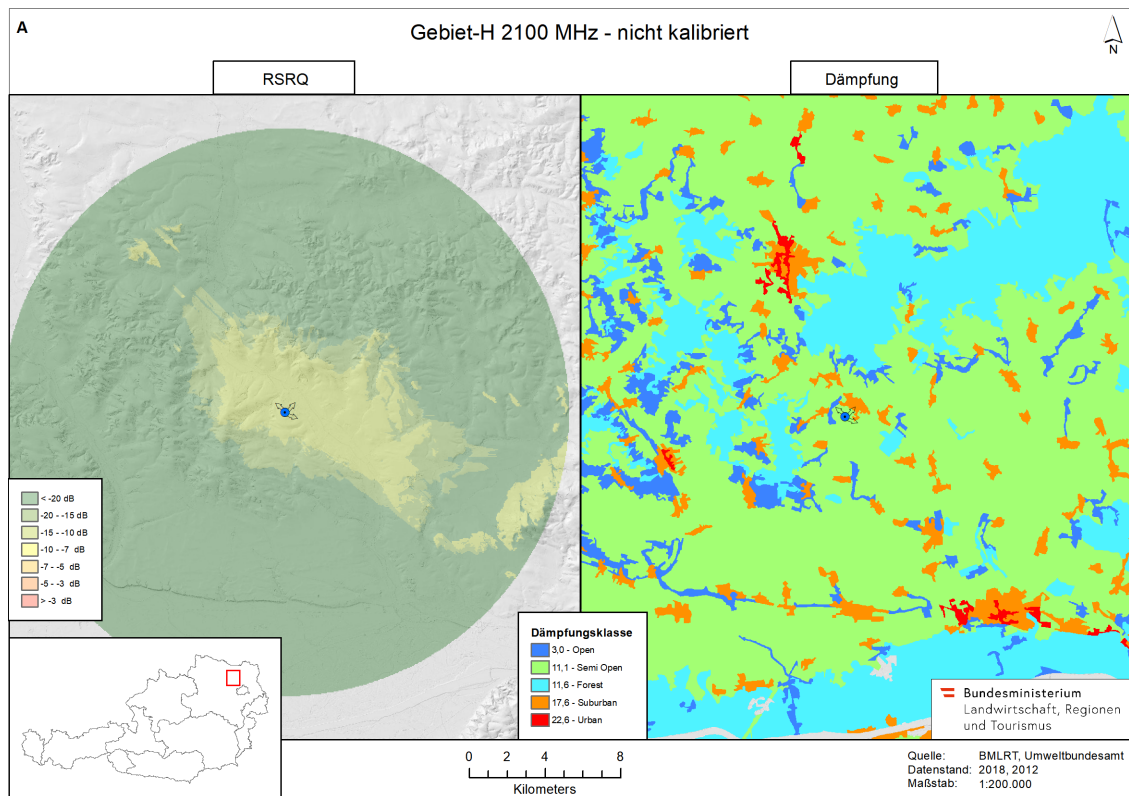


Abbildung 3.106: Gebiet H 2100 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ

Alle anderen Bereiche welche eine Signalqualität von weniger als 15 dB aufweisen und außerhalb der Klasse -15 bis -10 dB liegen, besitzen praktisch so starke Störungen, dass keine Verbindungen mehr möglich sind.

Betrachtet man nun zum Vergleich die Karte 3.107 mit der RSRQ in welcher die Mobilfunkstation mit DriveTest Daten **kalibriert** wurde, so fällt auf, dass die Klasse -15 bis -10 dB (hell grün) in größeren Bereichen um die Basisstation vorkommt als im Gegensatz zur nicht kalibrierten Analyse der Karte 3.106. Dies deckt sich auch mit dem wesentlich größeren Abdeckungsbereich der RSRP in der kalibrierten Analyse aus Karte 3.99. Der hell grüne Bereich mit der Klasse -15 bis -10 dB stellt hierbei einen Bereich dar, in welchen man bei der Signalqualität mit einer spürbaren Beeinflussung rechnen muss. Nur im nord-östlichen Bereich der Basisstation fällt die Signalqualität unter -15 dB aufgrund des dort vorhandenen Laub- und Nadelwald, was zu stark störenden Einflüssen für die Verbindungsqualität führt.

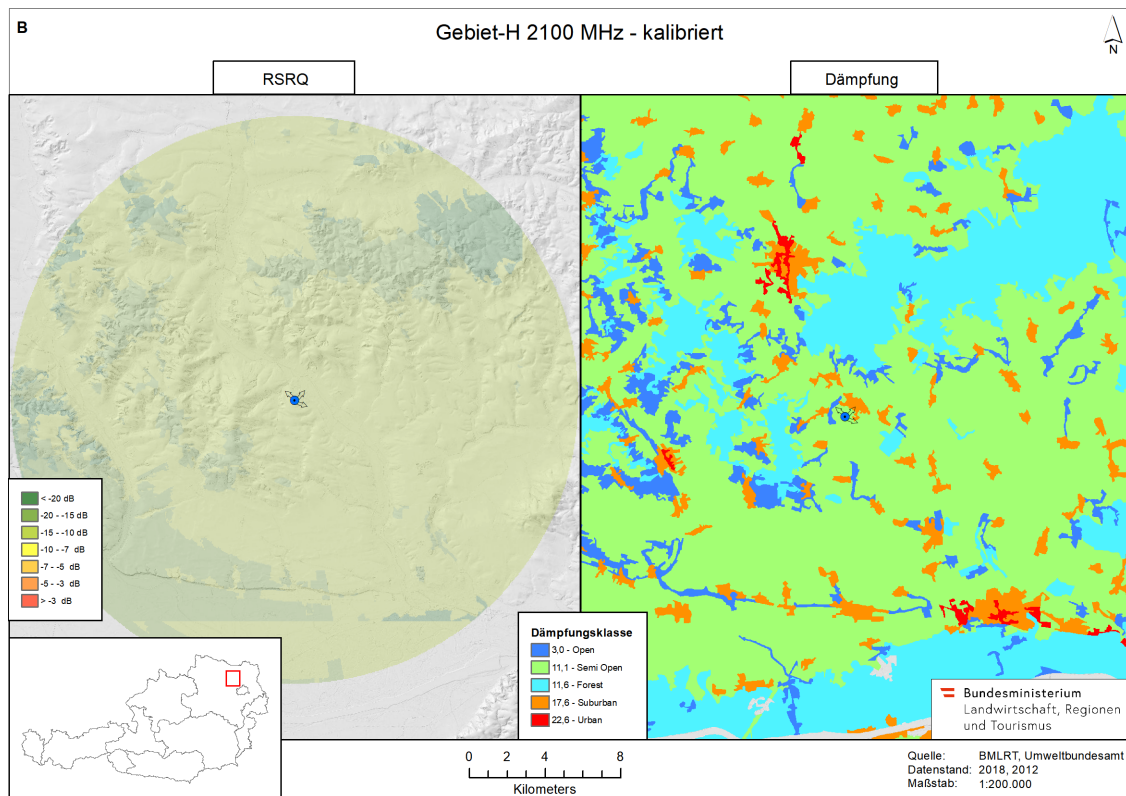


Abbildung 3.107: Gebiet H 2100 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ

**3.7.5.3.3 SINR** Betrachtet man nun Teil-A für das Gebiet-H bei 2100 MHz, die **nicht kalibrierte** Analyse des Verhältnisses der Signalstärke zu Störungen wie Rauschen anhand der SINR, so sieht man in Karte 3.108, dass die optimalsten Werte von Signalstärke zu Rauschen auf demselben Gebiet liegen wie in der RSRP Karte 3.98. Das stärkste Signal der SINR mit  $> 40$  dB zeigt einen deutlichen Verlauf zwischen Nord-West bis Nord-Ost und erstreckt sich 3 bis 5 Kilometer vor der Basisstation da das Signal hier deutlich durch die nördlich liegenden Laub- und Nadelwälder eingeschränkt wird. Dies wird auch deutlich sichtbar, da in den zerklüfteten Bereichen des Waldes, das Signal weiter vordringen kann. Außerhalb der rot-gelben Bereiche sinkt die Signalstärke und es überwiegt das Rauschen ab einem  $\text{SINR} < 0$  dB.

Betrachtet man als Vergleich Teil-B für das Gebiet-H bei 2100 MHz die **kalibrierte** Analyse der SINR so fällt auf, dass die Störungen durch Rauschen wesentlich schwächer ausfallen, was insgesamt zu einem stärkeren Signal führt. Gesamt betrachtet ergibt die kalibrierte Analyse ein wesentlich realistischeres Bild mit einer fast gleichförmig starken Signal  $> 40$  dB. Diese rote Klasse mit  $> 40$  dB SINR deutet auf exzellente Bedingungen mit fast keinen Störeinflüssen für das Signal hin. Besonders sichtbar wird hier das bessere Ergebnis mit einer Kalibrierung, weil die rote Klasse mit optimalen Signalbedingungen deutlich durch die grüne Klasse mit Laub und Mischwald abgegrenzt wird. Gleichzeitig zeigt die kalibrierte SINR aber eine oval förmige Ausbreitung im Vergleich zur nicht kalibrierten SINR, welche sehr stark verzerrt ausfällt. Diese verbesserte Abdeckung des Signals 2 bis 4 Kilometer entfernt von den Sektoren, erscheint deutlich realistischer als die verzerrte Abdeckung ohne Kalibrierung.

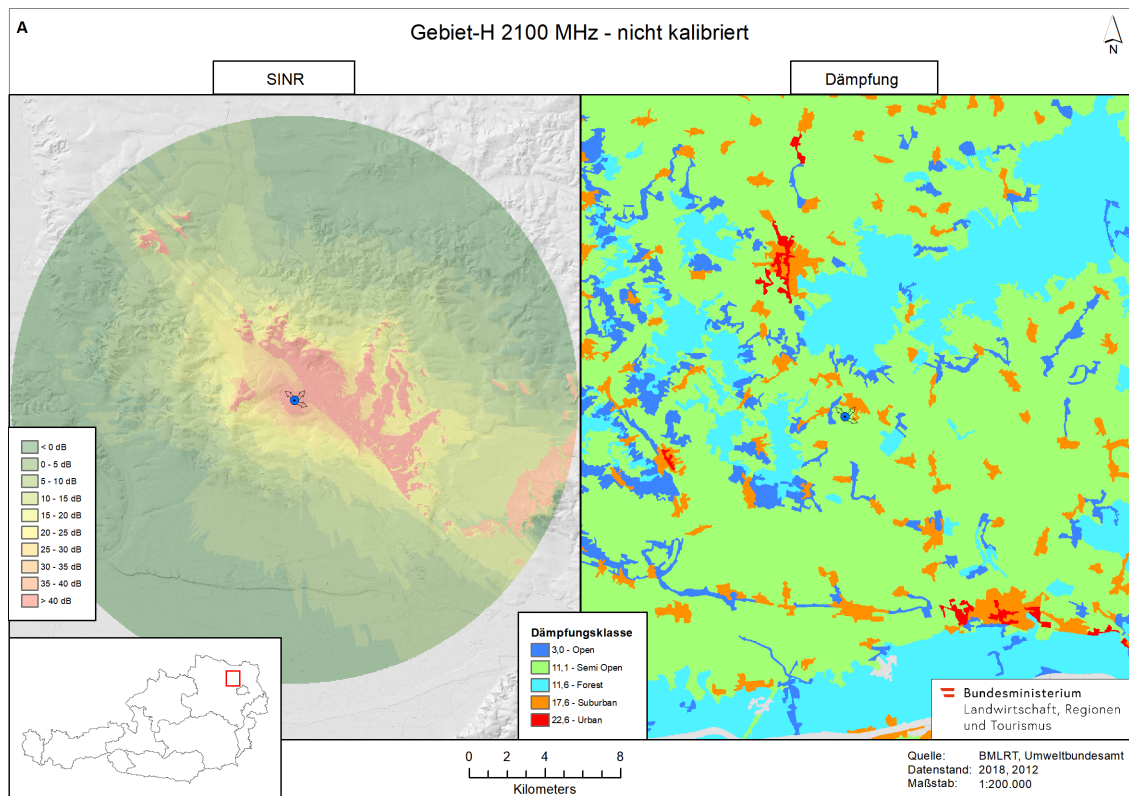


Abbildung 3.108: Gebiet H 2100 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR

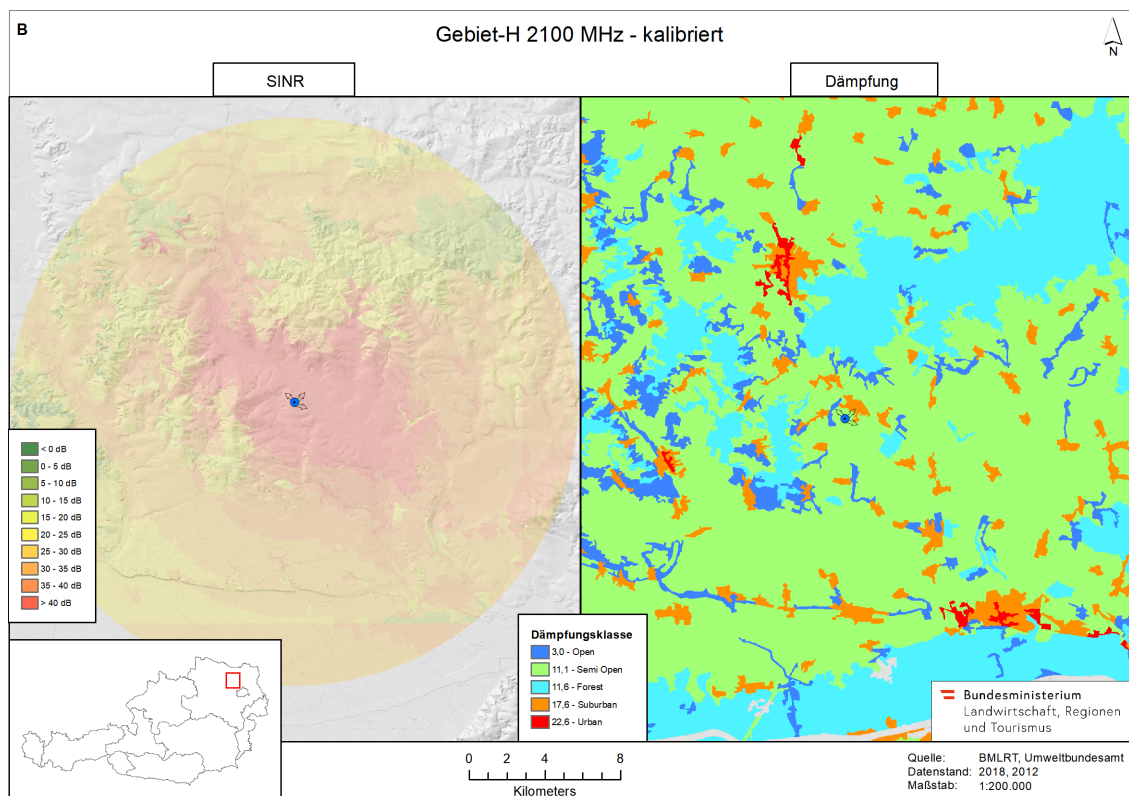


Abbildung 3.109: Gebiet H 2100 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR



**Zusammenfassung** Die Analyse des Gebietes-H hat gezeigt, dass durch unterschiedliche Frequenzbänder es zu unterschiedlichen Dämpfungen auf Landnutzungen wie Wald und Vegetation kommt. Besonders der Vergleich des 800 MHz Frequenzbandes mit dem 1800 MHz Frequenzband machte deutlich, wie die Dämpfung des RSRP Signals an Waldflächen bei höherer Frequenz zunimmt.

Die Analyse mit 800 MHz zeigte in der Statistik, dass ohne eine Kalibrierung die RSRP zu optimistisch berechnet wird. Mit Kalibrierung wird ein Median der RSRP von -110 dBm erreicht welcher ohne Kalibrierung auf -95 dBm verbessert dargestellt wird. Auch die RSRQ zeigt ohne Kalibrierung das sich die Bereiche mit ausreichender Signalqualität mit den RSRP Werten mit möglichem Empfang decken. Insgesamt hat die Kalibrierung zu einer verstärkten Dämpfung über alle Rasterzellen geführt. Zu beachten ist, dass die Analyse einen größeren Bereich modelliert welcher die niedrigsten RSRP Werte besitzt und damit auch die Gesamtstatistik der RSRP verringert. Auch die SINR zeigt mit dem Verhältnis des Referenzsignals zu Interferenzen und Störungen, dass jene Bereiche wo das Referenzsignal gegenüber Störungen noch überwiegt sich mit den Bereichen der RSRP decken, welche eine gute Signalqualität aufweisen. Der Differenzraster zwischen Kalibrierung und ohne Kalibrierung zeigte mehrere Bereiche wo es zu keinem Unterschied der RSRP egal ob mit oder ohne Kalibrierung kam.

Bei der Analyse von 1800 MHz wird bei der RSRP durch eine Kalibrierung ein wesentlich größerer Bereich modelliert. Durch die Kalibrierung verbessert sich das RSRP Signal anhand des Medians der Daten von -125 dBm (nicht Kalibriert) auf -118 dBm (Kalibriert). Auch lässt sich beobachten, dass das Histogramm der kalibrierten Gesamtstatistik eine schiefe Verteilung mit den meisten Rasterzellen in sehr schwachen RSRP Bereichen aufweist. Da die analysierte Basisstation bei 1800 MHz mitten im städtischen Bereich liegt, kommt es im Boxplot auf der Dämpfungsklasse Urban zu den höchsten RSRP Werten. Die Analysen der RSRQ und SINR decken sich wieder mit den Bereichen der RSRP wo noch eine ausreichende Signalstärke zu erwarten ist.

Auch bei der Analyse von 2100 MHz gibt es einen markanten Unterschied ob DriveTest Daten für eine Kalibrierung verwendet werden. Die kalibrierte Analyse weist einen wesentlich größeren Abdeckungsbereich auf, zwischen ihnen gibt es aber auch Bereiche welche dieselbe RSRP aufweisen. Die RSRP verbessert sich bei Kalibrierung auch bei 2100 MHz deutlich sichtbar am Median von -120 dBm (nicht kalibriert) auf -100 dBm (kalibriert). Die meisten Dämpfungsklassen wo Signale vorkommen sind im Semi Open Bereich, als auch im Forest und Open Klassen anzutreffen. Die stärkeren RSRP Werte werden jedoch deutlich durch die nördlich- und südlich gelegenen Waldstücke abgedämpft.

### 3.7.6 Analyse Gebiet-V

Um die Analysen des Gebietes-H vergleichbar zu machen, wird in diesem Kapitel das Gebiet-V anhand von 800 MHz analysiert. Das Gebiet-V liegt im süd-östlichen Bereich von Wien und um die analysierte Basisstation lag bereits eine DriveTest Messung vor, welche für die Kalibrierung als auch die Kreuzkalibrierung im nächsten Kapitel, verwendet wird. Die hier analysierte Basisstation besitzt zwei Antennen welche in süd-östlich bis süd-westlicher Richtung (140 und 230 Grad Azimut) ausgerichtet sind.

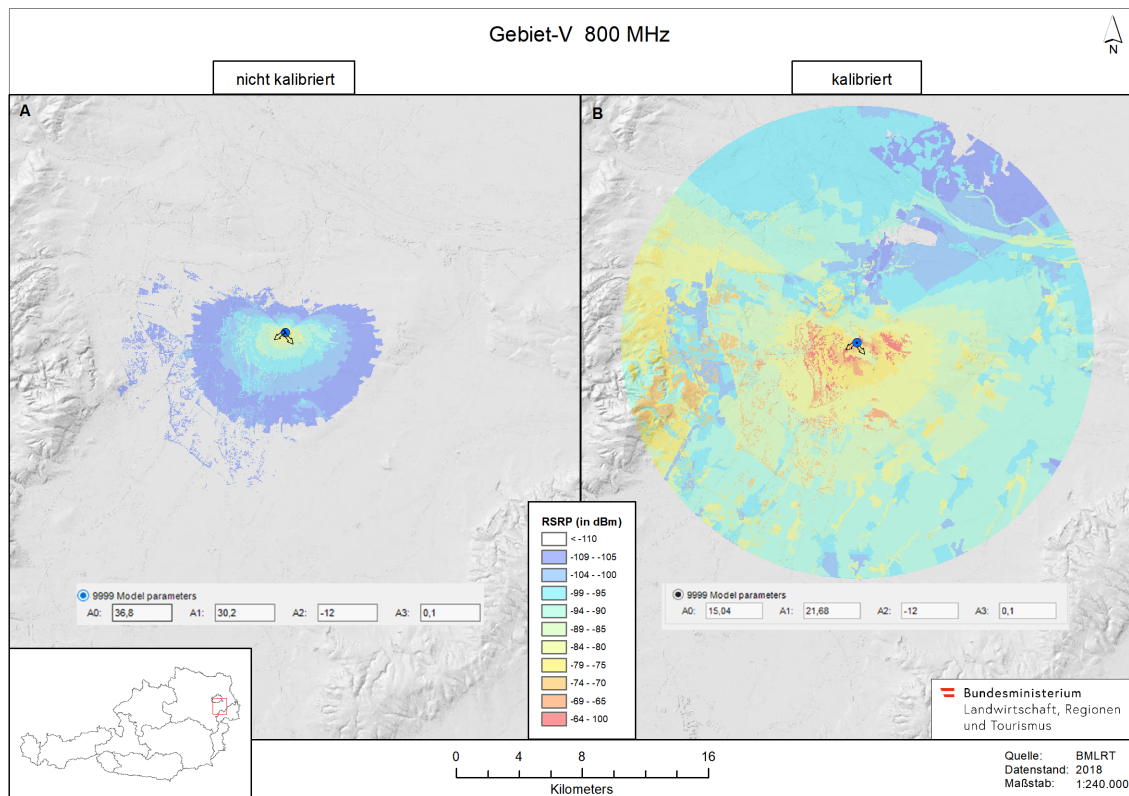


Abbildung 3.110: Gebiet-V 800 nicht kalibriert - kalibriert RSRP

Was als erstes zwischen den beiden Analysen (A) nicht kalibriert und (B) kalibriert, auffällt, sind die unterschiedlich großen Abdeckungsradien des Empfangssignales. Es muss beachtet werden, dass durch die Kalibrierung, die HCM Daten möglichst nahe an reale Antennen getrimmt werden. Solche reale Antennen wie sie von Mobilfunkbetreibern verwendet werden, standen in dieser Masterarbeit nicht zur Verfügung. Ein Beispiel für solche realen Antennendaten ist in Kapitel 6 *Anhang* in Abbildung 6.2 für ein reales Antennendiagramm und in Abbildung 6.1 für ein fiktives optimal anzunehmendes Antennendiagramm zu sehen.

Bei der *nicht kalibrierten Analyse* in Karte 3.110 Teil (A) wird ein Bereich von bis maximal 5 Kilometer um die Basisstation abgedeckt. Dies ist ein sehr geringer Bereich für eine niedrige Frequenz von 800 MHz, welche eigentlich ausgelegt ist großflächige Bereich im ländlichen Gebiet bis 15 Kilometer und mehr abzudecken. Außerdem erscheint die Modellierung sehr schematisch, da die Klassen der RSRP sehr homogen um die Basisstation abgebildet sind. Dies wirkt eher theoretisch korrekt als praktisch realistisch.

Hingegen ist bei der *kalibrierten Analyse* in Karte 3.110 Teil (B) ein deutlich anderes Bild zu sehen. Zuerst fällt auf dass, der modellierte Bereich wesentlich größer ist und das Signal bis 15 Kilometer um die Basisstation reicht. Außerdem fällt auf, dass die RSRP Klassen im stärkeren unteren Bereich  $> 65$  dBm besonders gestreut im Nahbereich um die Basisstation vorkommen. Besonders interessant ist, dass die gelbe Klasse von  $-75$  bis  $-84$  dBm nicht nur im Nahbereich bis 5 Kilometer um die Basisstation vorkommt, sondern ebenfalls im westlichen Bereich in noch 15 Kilometern Entfernung.

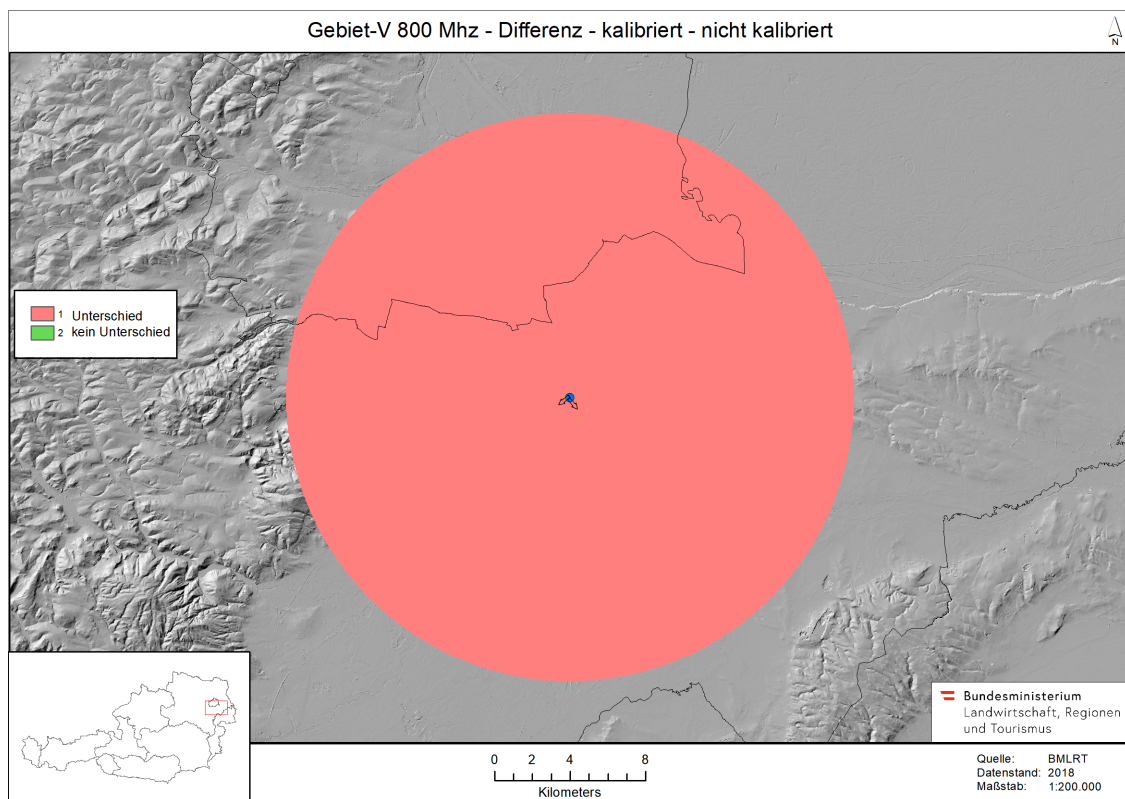


Abbildung 3.111: Gebiet-V 800 Differenz nicht kalibriert - kalibriert

Der Differenzraster in Karte 3.111 zeigt zwischen der kalibrierten und nicht kalibrierten Analyse, dass sich die RSRP Werte an kaum einem Ort ähneln.

**Root Mean Square Error** Der RMSE zwischen der kalibrierten und nicht kalibrierten Analyse liegt bei 27,8. Dieser zeigt auch wie der Differenzraster eine starke Ungleichverteilung der RSRP Daten auf.

In der Analyse des Gebietes-V wurde das RSRP Referenzsignal mit und ohne Kalibrierte Hata9999 Parameter verglichen. Andere Referenzsignale wie die RSRQ und SINR werden in diesem Kapitel nicht mehr dargestellt, diese sind jedoch in die Berechnung mit eingeflossen. Die weiteren Referenzsignale wie RSRQ und SINR wurden bereits ausführlich für das Gebiet-H in Kapitel 3.7.5 analysiert.

Betrachtet man nun die statistische Verteilung der nicht kalibrierten Analyse, so liegt der Median der RSRP bei -120 dBm. Die räumliche als auch statistische Verteilung der Daten ist relativ homogen, wobei es einzelnen höhere Werte an den Rändern der Verteilung gibt.

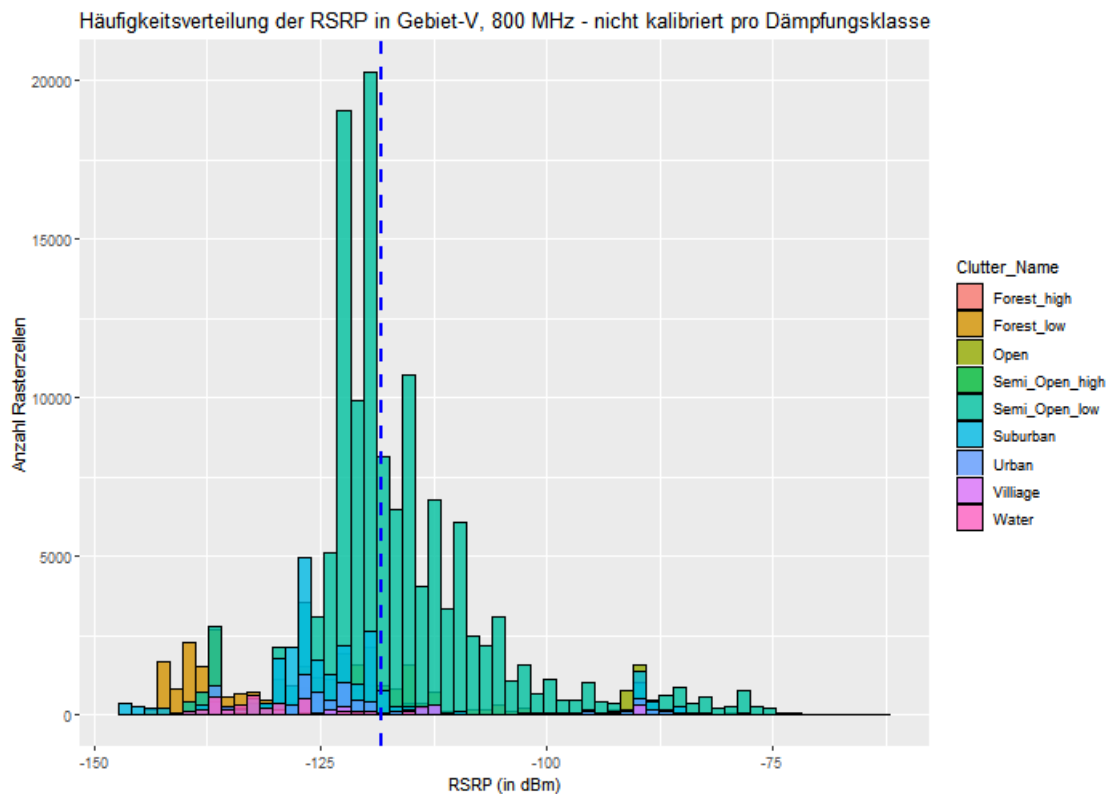


Abbildung 3.112: Histogram RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert

Das Boxplot zeigt nun noch genauer wie die Verteilung der RSRP pro Dämpfungsklasse ausfällt. Hierbei ergibt sich ein recht heterogenes Bild, mit unterschiedlichen Spannweiten der Verteilung der einzelnen Klassen. Die Klasse *Forest high* erstreckt sich über einen großen Bereich, da 50 Prozent der Daten von -90 bis über -125 dBm reichen. Auch die Klasse *Village* erstreckt sich über einen großen RSRP Bereich. Der Median mit der stärksten RSRP, ist jedoch in den Klassen *Open*, *Semi Open low* und *Village* vorhanden. Auch sehr markant liegen die RSRP Werte der Klasse *Water* am niedrigsten. Dies ergibt durchaus Sinn, da Wasser sehr bekannt dafür ist schwierig zu modellierende Eigenschaften für Mobilfunksignale zu haben. Auf Wasserflächen ergeben sich verschiedenste Ausbreitungswege von Mobilfunksignalen, welche unter anderem reflektiert werden und hierdurch die Signale stark verfälschen. Der Grad des Einflusses über Wasserflächen ist aber auch Frequenzabhängig.

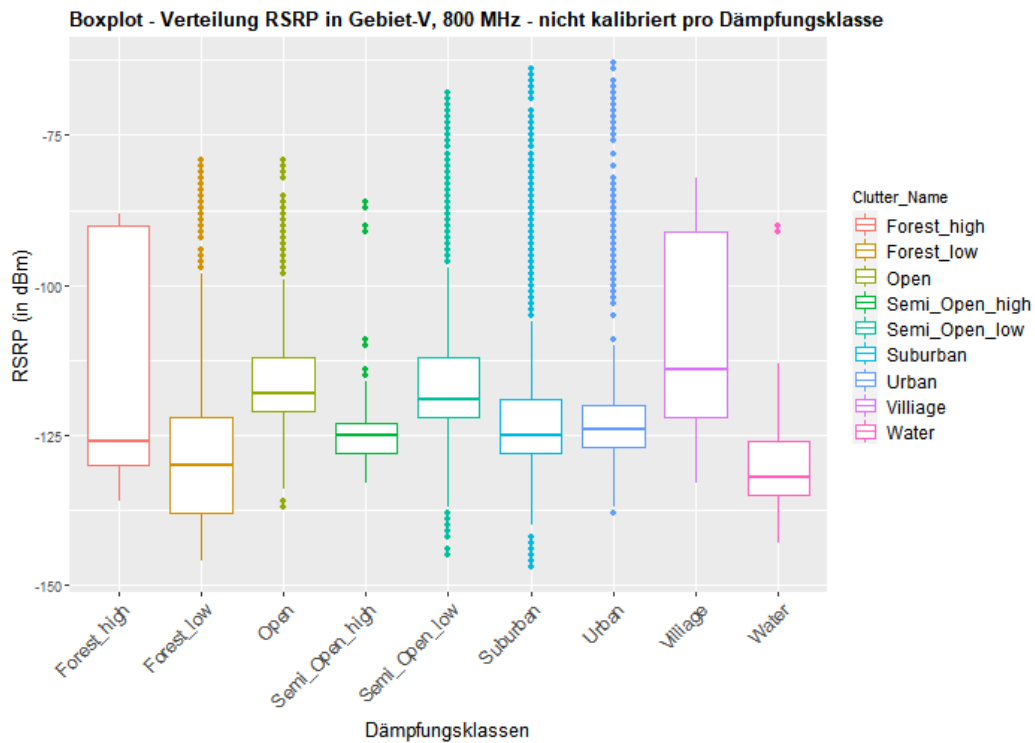


Abbildung 3.113: Boxplot RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert

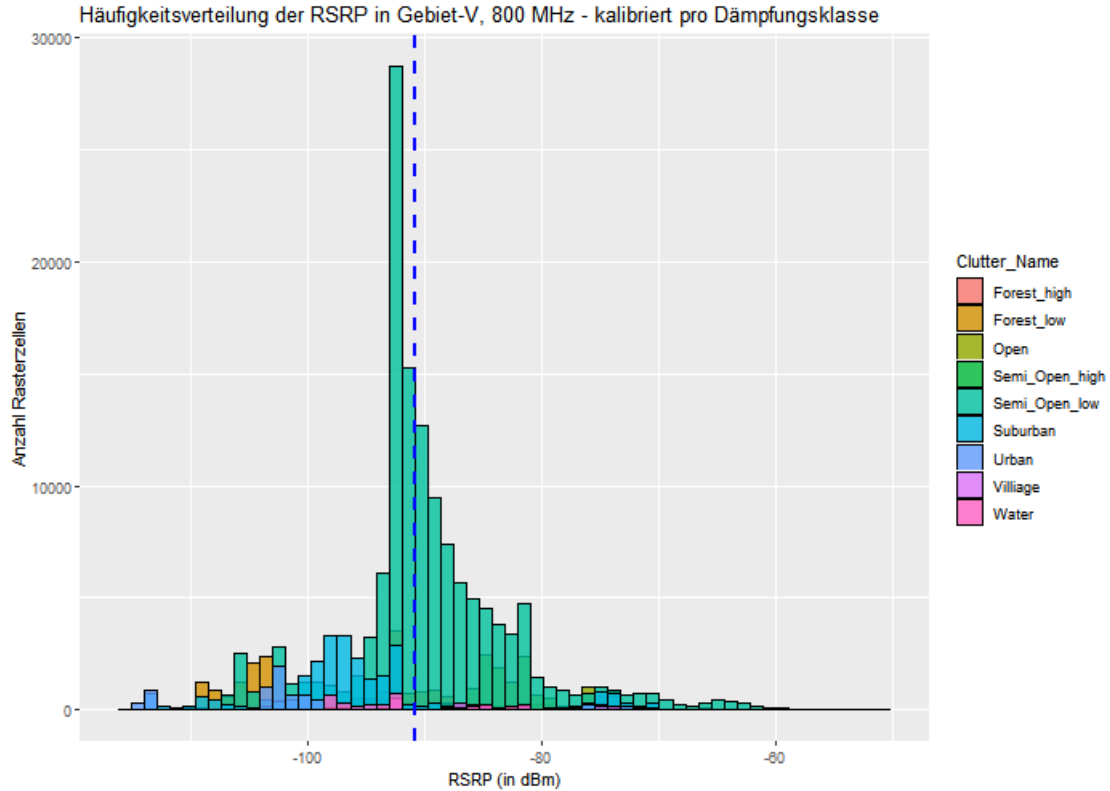


Abbildung 3.114: Histogramm RSRP Gebiet-V 800 kalibriert

Vergleicht man nun die vorherigen Statistiken und Karten mit der kalibrierten Analyse, so zeigt das Histogramm der Abbildung 3.114 eine deutliche Verteilung der Daten in Richtung

stärkerer RSRP Werte. Der Median aller RSRP Werte liegt bei Kalibrierung deutlich höher als ohne Kalibrierung und zwar bei -90 dBm. Die Verteilung ist durchaus als homogen zu betrachten, obwohl an den Flanken der Verteilung Ausreißer noch oben zu sehen sind. Diese sind auch in Karte 3.110 Teil-B als die gelben bis dunkel-blauen Zonen am Rande der Sektorgrenze zu erkennen.

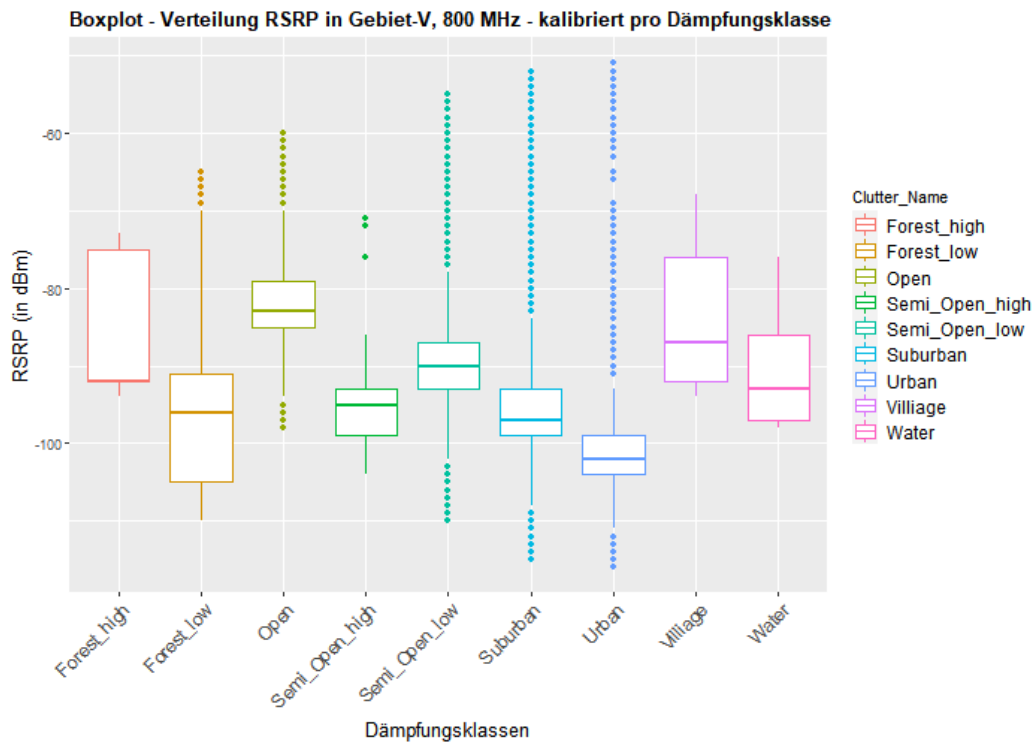


Abbildung 3.115: Boxplot RSRP Gebiet-V 800 kalibriert

Betrachtet man nun für die kalibrierte Analyse wieder die Verteilung der RSRP über die einzelnen Dämpfungsklassen, so sieht man, dass zwar alle Mediane deutlich im stärkeren RSRP Bereich, als bei der nicht kalibrierten Analyse, liegen, jedoch ergeben sich hier unter den Klassen stärkere Unterschiede in Bezug auf die Verteilung der Daten. Bei der Klasse *Forest high* liegt der Median zwar etwas unter -90 dBm jedoch gibt es trotzdem noch 25 Prozent der Daten, welche eine stärkerer RSRP von kleiner -80 dBm aufweisen. Die höchsten Mediane der RSRP befinden sich in den Klassen *Open* und *Villiage*. Eine besonders große Streuung der RSRP liegt bei den Klassen *Semi Open low*, *Suburban* sowie *Urban* vor. Insgesamt kann gesagt werden, dass durch die Kalibrierung die Modellierung heterogener geworden ist, gleichzeitig aber die RSRP Signalstärke deutlich angehoben wurde. Außerdem vergrößerte sich der modellierte Bereich bei 800 MHz auf einen Radius von 15 Kilometer, was einen wesentlich realistischeren Eindruck hinterlässt und daher die Umgebungseinflüsse besser abbildet.

**Zusammenfassung** Gebiet-V zeigte einen grundsätzlich großen Unterschied zwischen einer Kalibrierung und ohne einer Kalibrierung. Durch die Kalibrierung konnte eine Verbesserung der RSRP auf den statistischen Median von -90 dBm erreicht werden. Bei der Verteilung der Daten ist auch in den Boxplots sichtbar, dass es bei Kalibrierung zu größeren Unterschieden der RSRP unter den Dämpfungsklassen kommt. Die Analyse in Gebiet-V zeigte ein relativ klares Bild was den Unterschied einer Kalibrierung auf die Analyseergebnisse hat.



### 3.7.6.1 Gebäude Vergleich

In diesem Kapitel soll genau auf den Einfluss der Urbanen als auch Suburbanen Landnutzung eingegangen werden. Hierfür wird zusätzlich ein offener Gebäudedatensatz, welcher aus der [OpenStreetMap](#) stammt, verwendet.

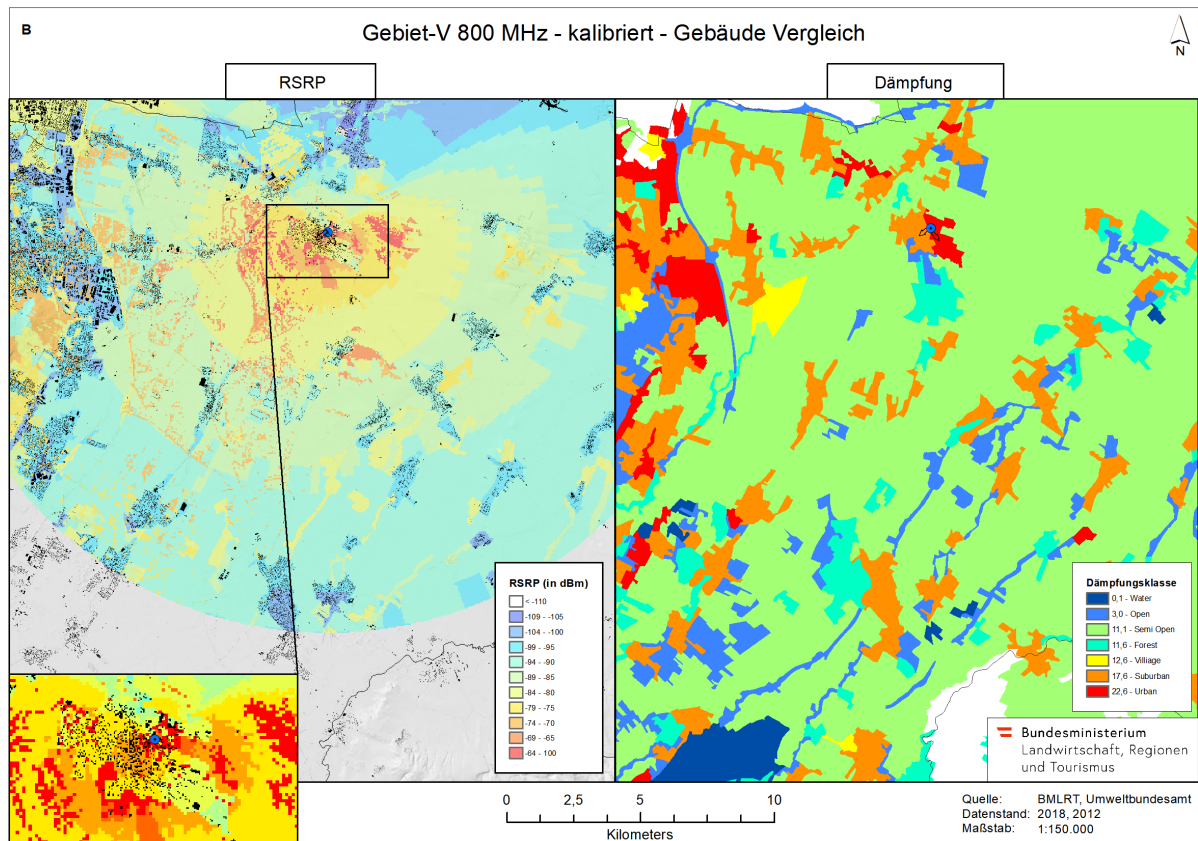


Abbildung 3.116: Gebiet V 800 kalibriert Vergleich Gebäude Dämpfung

Dieser Gebäudedatensatz wird als Hindernisraster im Hata9999 Vorhersagemodell hinzugefügt. In Karte 3.116 wird gezeigt welchen Einfluss Gebäude, mit einer durchschnittlichen Höhe von 7 Metern, auf das Referenzsignal RSRP des Standortes-V haben. Es zeigt sich anhand der RSRP Farbabstufung von rot sehr starken Referenzsignal bis zu blau sehr schlechten Referenzsignal, wo aufgrund von Gebäuden das Referenzsignal plötzlich an Stärke verliert. Besonders im Nahbereich um die Basisstation wird das Signal durch die dort vorhandene dichte Gebäudestruktur abgeschwächt. Auch an den Außenrändern sind starke Signaleinbrüche durch plötzliche blaue Zonen zu erkennen welche durch dort vorhandene Gebäude entstehen. Anhand der Karte in Teil-B ist ebenfalls die klassifizierte Landnutzung in Form der Dämpfungsklassen zu sehen. Hierbei wird auch sehr schnell deutlich, dass Flächen in rot bis orange eine stärker dämpfende Wirkung auf das Signal haben.

### 3.7.6.2 Basisstations Überlagerung

Um nun nicht nur empirisch die Referenzsignale anhand einer einzigen Basisstation zu untersuchen, soll in diesem Kapitel, so wie es in der Realität auch vorkommt, die Überlagerung von mehreren in der Nähe zueinander befindlichen Basisstationen, dargestellt werden. In Karte 3.117, sieht man so eine typische Situation, in welcher drei Basisstation mit jeweils drei Antennen sich

mit ihren Signalen überlagern. Hierbei kommt es zu einem besser versorgten Bereich wo sich die Antennen Sektoren überlagern. Hierdurch kann für den Nutzer, durch Carrier Aggregation und den Empfang mehrerer Signale, Frequenzbänder und Blöcke, eine bestmögliche Signalstärke erreicht werden. Gleichzeitig kommt es aber durch Überlagerungen zu Störungen des Signals, was auch als Interferenz bezeichnet wird.

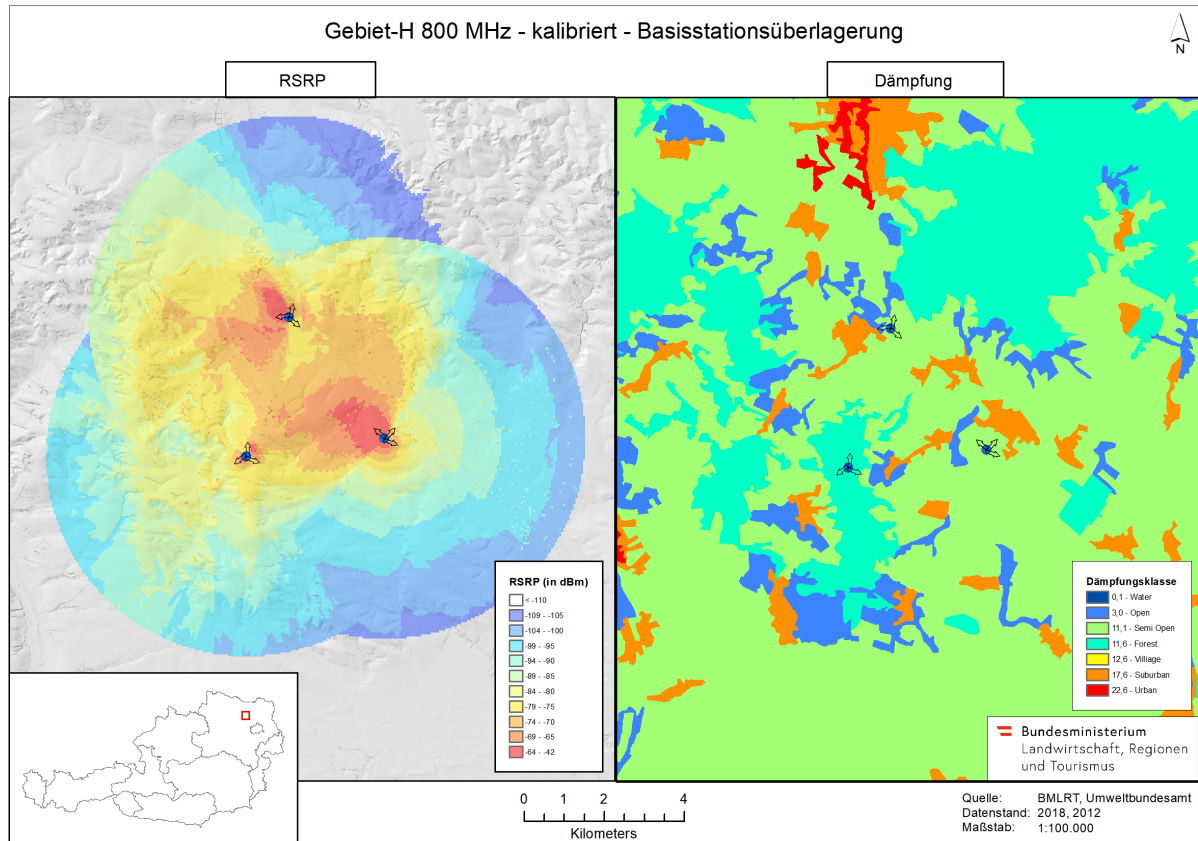


Abbildung 3.117: Gebiet-H 800 3 Basisstationen kalibriert Vergleich DGM Landnutzung

Dieser Effekt der Überlagerung und Interferenz wurde bereits in Kapitel 2.4 im Detail erläutert. Es soll hier mittels der RSRP dargestellt werden, wie die Signalstärke sich verhält wenn mehrere Zellen von unterschiedlichen Basisstationen sich überlagern.

### 3.7.7 Kreuzvalidierung Gebiet-H und Gebiet-V

Die Kreuzvalidierung ist eine Vorgehensweise in der Datenanalyse, um ein trainiertes Modell zu validieren. Hierfür wird neben einem Trainingsdatensatz auf welchem die Analysen durchgeführt werden, ein unabhängiger Testdatensatz analysiert. In dieser Masterarbeit wird das Modell über die Kalibrierung trainiert und wird anhand der Hata9999 Parameter angepasst.

Kreuzvalidierung wird angewandt um die Ergebnisse einer Analyse auf einem unabhängigen Testdatensatz zu validieren. Die Kreuzvalidierung wird in Situationen verwendet, in welchen eine Vorhersage getroffen werden muss und die Genauigkeit eines Vorhersagemodells geschätzt werden soll.

In diesem Kapitel soll verglichen werden wie sich die Ergebnisse der beiden Untersuchungsgebiete voneinander unterscheiden. Auf der Karte 3.46 in Kapitel 3.7.1 ist zu sehen welche

Gebiete kreuzvalidiert werden sollen, indem die Kalibrierungsparameter der Hata9999 Modelle aus Cellular Experts, welche durch die DriveTest Messungen erhoben wurden, ausgetauscht und der Analyse des anderen Gebietes hinzugefügt werden. Dieser Austausch der Hata9999 Parameter von Gebiet-H auf Gebiet-V und auch umgekehrt, ist nun schematisch in Abbildung 3.118 ersichtlich.

Dies soll auch meine Hauptforschungsfrage beantworten, ob *DriveTest Daten eines Untersuchungsgebietes mit spezifischer Charakteristik zur Kalibrierung der HCM Mobilfunkdaten eines zweiten Untersuchungsgebietes vergleichbarer Landschaftscharakteristik angewendet werden können?*

### Kreuzvalidierung Gebiet H auf V

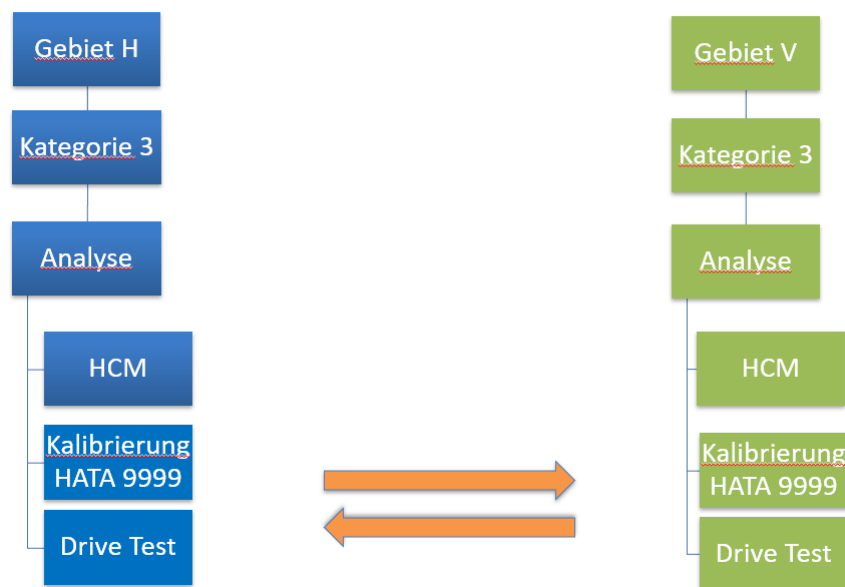


Abbildung 3.118: Kreuzvalidierung Schema

Durch die vertauschten Hata9999 Kalibrierungsparameter von Gebiet-H auf V und umgekehrt, werden die für die jeweiligen Umgebungseinflüsse kalibrierten Parameter dem anderen Gebiet als Kalibrierung hinzugefügt. In Karte 3.119 ist nun das Analyseergebnis der Kreuzkalibrierung des Gebietes-H welches mit den kalibrierten Parametern von Gebiet-V modelliert wurde in Teil [A] zu sehen. In Teil [B] ist für den Vergleich, die originale Analyse des Gebietes-H, mit den dort kalibrierten Parametern zu sehen. Somit erhält man einen direkten Vergleich der Analyseergebnisse der Kreuzkalibrierung, mit der originalen Kalibrierung des Gebietes-H. Jeweils unterhalb der Karte sind die kalibrierten Koeffizienten für die jeweilige Analyse zu sehen. Hierbei unterscheiden sich die Koeffizienten  $a0$  sowie  $a1$  von der originalen Kalibrierung zur Kreuzkalibrierung wesentlich. Untersucht man nun die Analyseergebnisse der Kreuzkalibrierung mit der originalen Kalibrierung, so kommt es doch zu deutlichen Unterschieden bei der Referenzsignalstärke RSRP. Die beiden Analysen unterscheiden sich vorerst vor allem durch den maximalen abgedeckten Bereich, welcher bei der originalen Kalibrierung im Schnitt 10 Kilometer, jedoch bei der Kreuzkalibrierung ganze 15 Kilometer umfasst.

## 3.7.7.1 Gebiet-H Kreuzkalibriert Gebiet-V

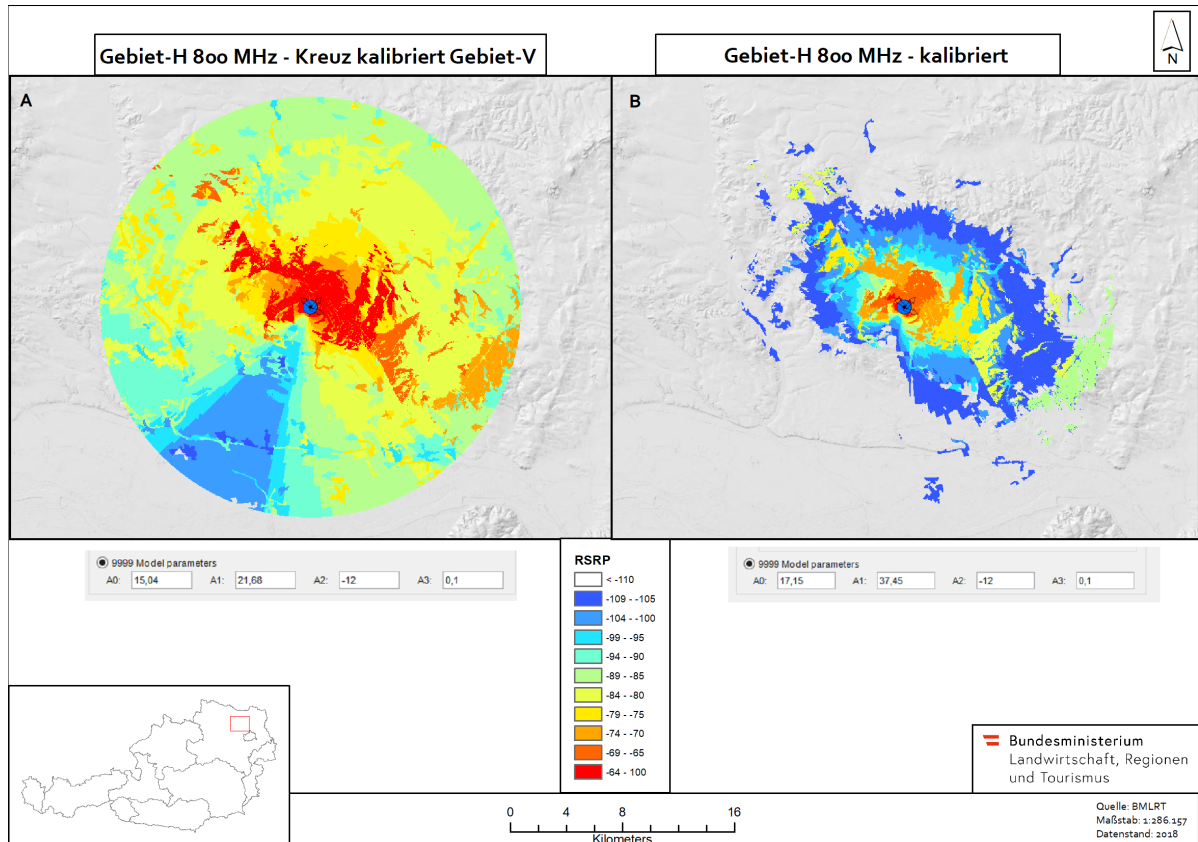


Abbildung 3.119: Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V

Die modellierten Klassen, besonders im Nahbereich der Basisstation, ähneln sich in ihrer Ausbreitung in beiden Analysen [A] und [B]. Der Unterschied von der originalen Kalibrierung zur Kreuzkalibrierung liegt in den unterschiedlichen RSRP Werten. In Teil [A] erkennt man sehr starke RSRP Werte von -64 dBm in rot. Auf diesen Bereichen sind in Teil [B] der originalen Kalibrierung wesentlich schwächere Signale zu erwarten, welche von orangen zu gelben Bereichen bis -84 dBm reichen. Vergleicht man die Randbereiche der Modellierung des Teil [B] welche in den Klassen Türkis bis dunkel Blau erscheinen, so sind diese Klassenbereiche in Teil [A] mit um zwei Klassenbereichen besseren RSRP Werten in gelb bis grün versehen. Es zeigt sich also eine deutlich erhöhte Signalstärke in der Kreuzkalibrierung im Vergleich zu originalen Kalibrierung.

Um nun auch direkt den Unterschied zwischen der originalen Kalibrierung des Gebietes-H und der Kreuzkalibrierung von Gebiet-H mit Gebiet-V gegenüberzustellen, wird in Karte 3.120 räumlich dargestellt, wo sich die RSRP Raster in Ihrer Signalstärke unterscheiden und wie hoch dieser Unterschied ausfällt. Zu sehen ist, dass die blauen Flächen eine niedrigere Differenz der Signalstärke zwischen Kreuzkalibrierung und originaler Kalibrierung darstellen. Der gelbliche Bereich zeigt bereits mittelstarke Unterschiede zwischen diesen auf. Der rote Bereich zeigt sehr starke Unterschiede der Signalstärke auf.



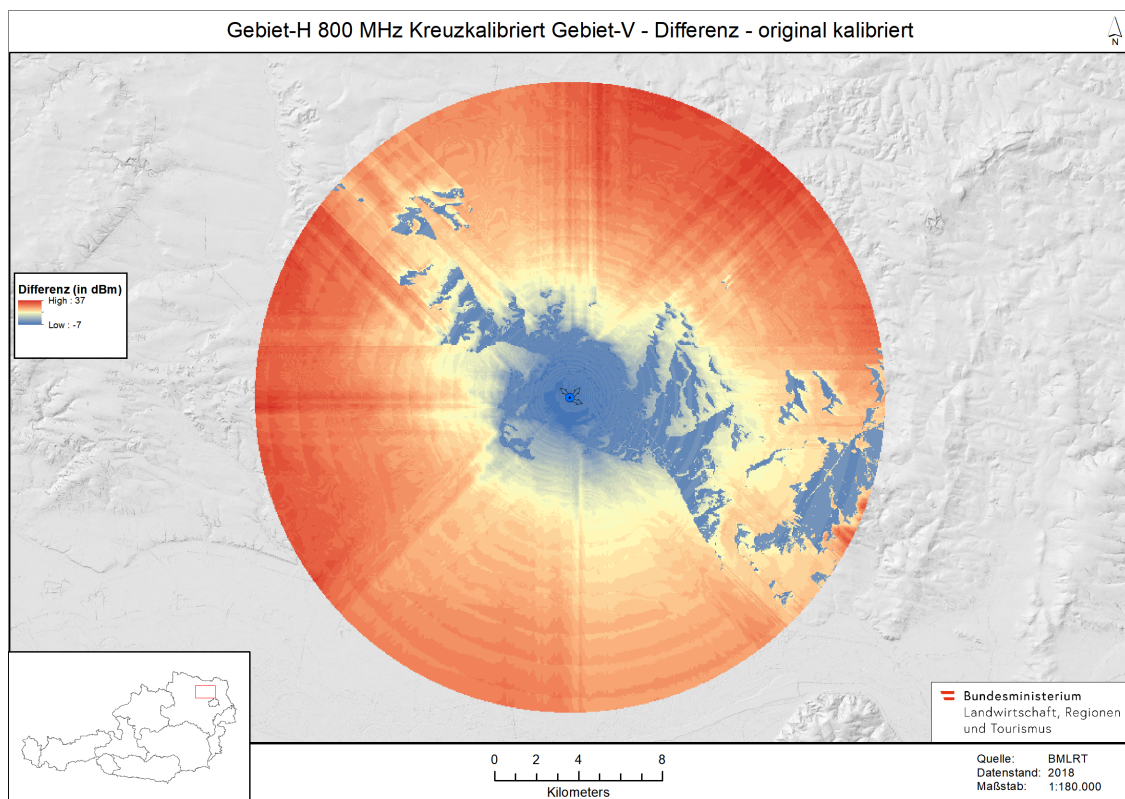


Abbildung 3.120: Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Differenz original kalibriert

**Root Mean Square Error** Auch der RMSE zwischen der Kreuzkalibrierten Analyse des Gebiet-H mit Gebiet-V und der originalen Kalibrierung des Gebiet-H ergibt einen Wert von 21,5. Die Streuung der RSRP umfasst knappe 100 Einheiten womit der RMSE relativ hoch liegt und eine starke Abweichung zwischen Kreuzkalibrierung und originaler Kalibrierung anzeigt.

Auch in Karte 3.121 wird ersichtlich, dass die Landnutzungen wie Wälder und Geländeunterschiede, welche das RSRP Signal in der originalen Kalibrierung in [B] deutlich dämpfen, zu weniger starken Dämpfungen und somit zu einem stärkeren RSRP Signal in [A] führen. Es kommt zu einer ähnlichen Ausbreitung des Signals besonders im stärksten Bereich der RSRP um -64 dBm, welches sich auch realitätsgetreu an dem nördlich gelegenen Wald ab dämpft. Auch das städtische Zentrum leicht Nord-westlich gelegen zwingt das Signal zu einer Abschwächung von rot -64 dBm auf türkis -100 dBm, was praktisch einem kompletten Signalverlust entspricht. Besonders markant fällt die Stärke der Dämpfung anhand der Dämpfungsklassen auf. Die türkisen Bereiche stellen Wälder dar, an welchen das Signal sehr deutlich abgeschwächt wird. Auch die blauen Flächen, die offene Areale darstellen, zeigen den umgekehrten Effekt das sich das Signal weiter weg im starken RSRP Bereich bewegen kann.

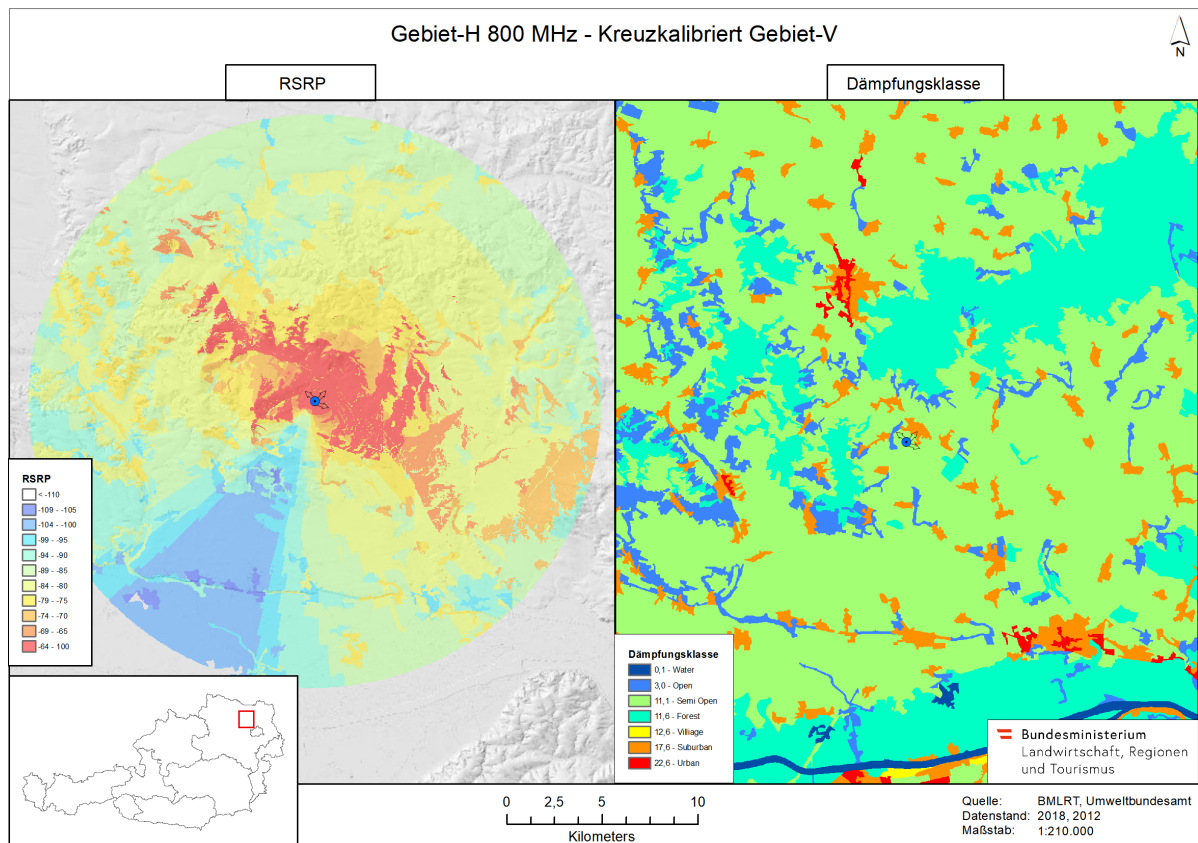


Abbildung 3.121: Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V Vergleich DGM Landnutzung

Betrachtet man die statistische Verteilung des Histogrammes der kreuzkalibrierten Analyse, so fallen in der Verteilung drei Bereiche auf in denen sich mehr Rasterzellen pro RSRP Klasse befinden. Diese Ausreißer befinden sich bei mehr als -100 dBm, im Bereich des Medians um -85 dBm sowie bei -70 dBm. In der originalen Kalibrierung liegt der Median bei -115 dBm und erhöht sich durch eine Kreuzkalibrierung auf -85 dBm deutlich. Gesamt betrachtet sind die meisten Rasterzellen über *Semi open low* zu finden. Der Median der meisten Klassen liegt um -90 dBm und die meisten weisen eine Spannweite von -110 bis -50 dBm auf. Betrachtet man das Boxplot zur Verteilung der RSRP über die einzelnen Dämpfungsklassen, so liegt der Median der Klassen *Open* als auch *Semi Open high* am höchsten. Am niedrigsten hingegen liegen die Klassen *Suburban* sowie *Urban*.



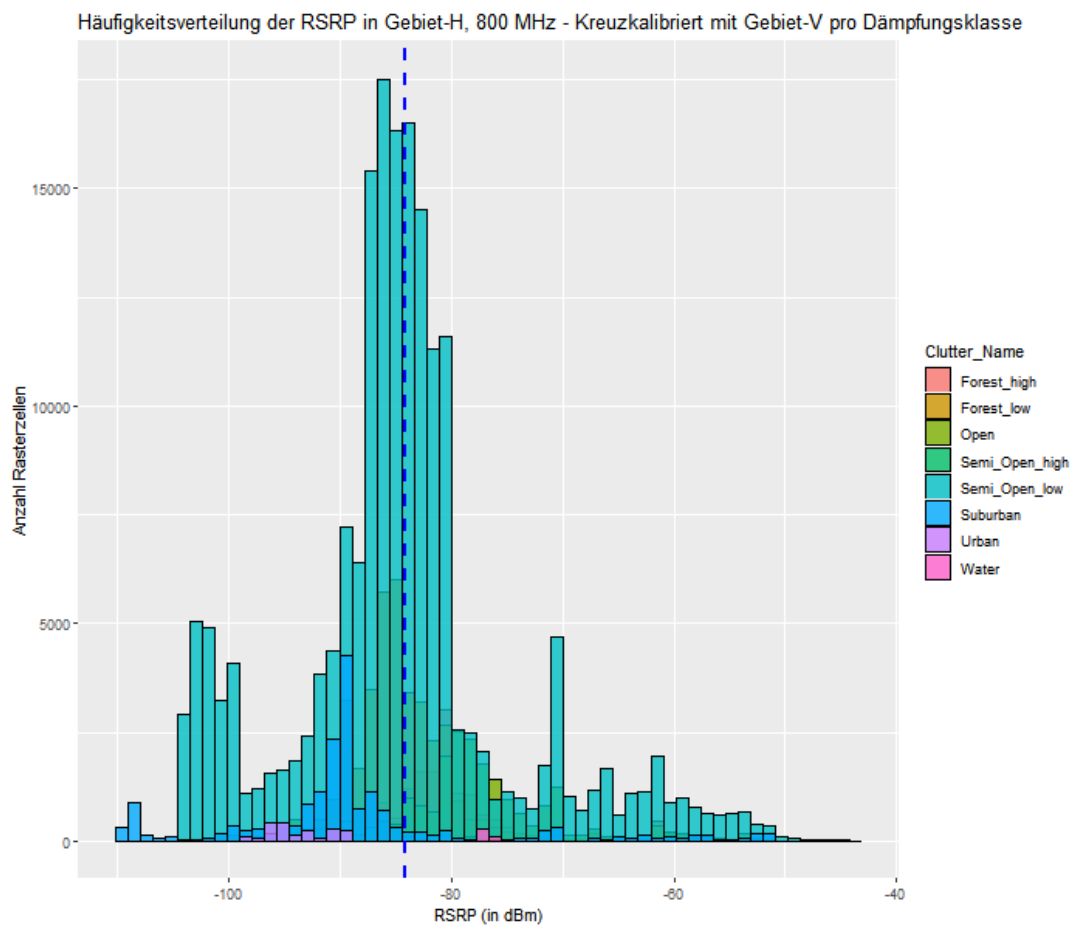


Abbildung 3.122: Histogram RSRP Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V

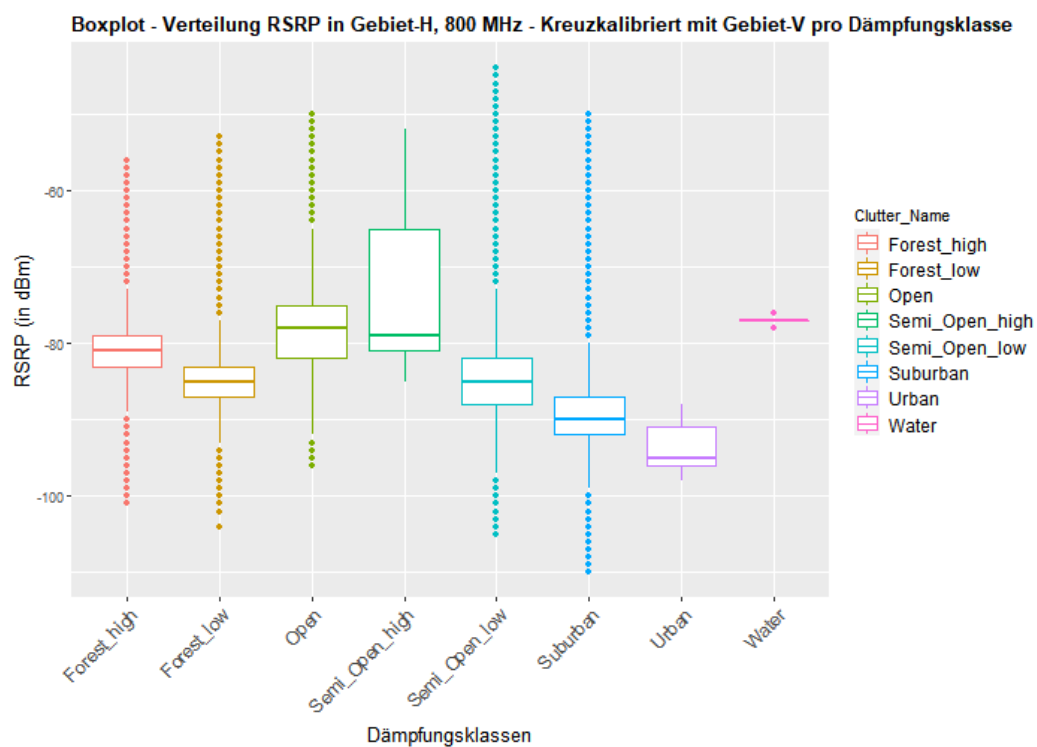


Abbildung 3.123: Boxplot RSRP Gebiet-H 800 kalibriert

**Zusammenfassung** In der Analyse zur Kreuzkalibrierung von Gebiet-H mit den DriveTest Daten von Gebiet-V konnte gezeigt werden, dass zwar durchaus ähnliche RSRP Bereiche durch die Übertragung von DriveTest Daten erzielt werden, diese jedoch generell zu optimistisch modelliert werden als sie in der originalen Analyse mit originaler Kalibrierung auftreten. Es konnte auch gezeigt werden anhand des Differenzrasters zwischen der originalen Kalibrierung und der Kreuzkalibrierung wo in der Analyse und wie stark die Unterschiede der RSRP liegen.

**Netztest Vergleich** Zusätzlich zum berechneten RSRP Raster aus Cellular Experts kann eine weitere Datensatz zur Überprüfung der Signalstärke herangezogen werden. Hierbei handelt es sich um sogenannte Crowdsourced Daten welche von jedermann erzeugt werden können. Die Regulierungsbehörde RTR stellt hierbei unter **RTR Netztest** eine Plattform zur Verfügung über die jeder an seinem aktuellen Standort die Netzqualität und diverse Signalstärke Parameter abfragen kann. Diese Messungen fließen in eine Datenbank der RTR welche wiederum frei zum download steht. Für die Verifizierung der Kreuzkalibrierten Analyse wurden solche Netztestmessungen von mobilen Endgeräten herangezogen und aufbereitet. Es wurden grundsätzlich nur Mobilfunktechnologien (2G, 3G, 4G) berücksichtigt. Die Netztestdatenbank wird täglich aktualisiert, jedoch wurde für die hier dargestellte Analyse eine Momentaufnahme dieser Daten aus dem Jahr 2018 herangezogen.

Hierfür wurde mittels der Statistik Programmiersprache R ein Skript geschrieben, das die Netztestdaten von der RTR Datenbank herunterlädt, aufbereitet und schließlich als geographische Punktdaten abgespeichert. Eine grobe Zusammenfassung der Arbeitsschritte ist im Workflow 3.124 zu sehen.

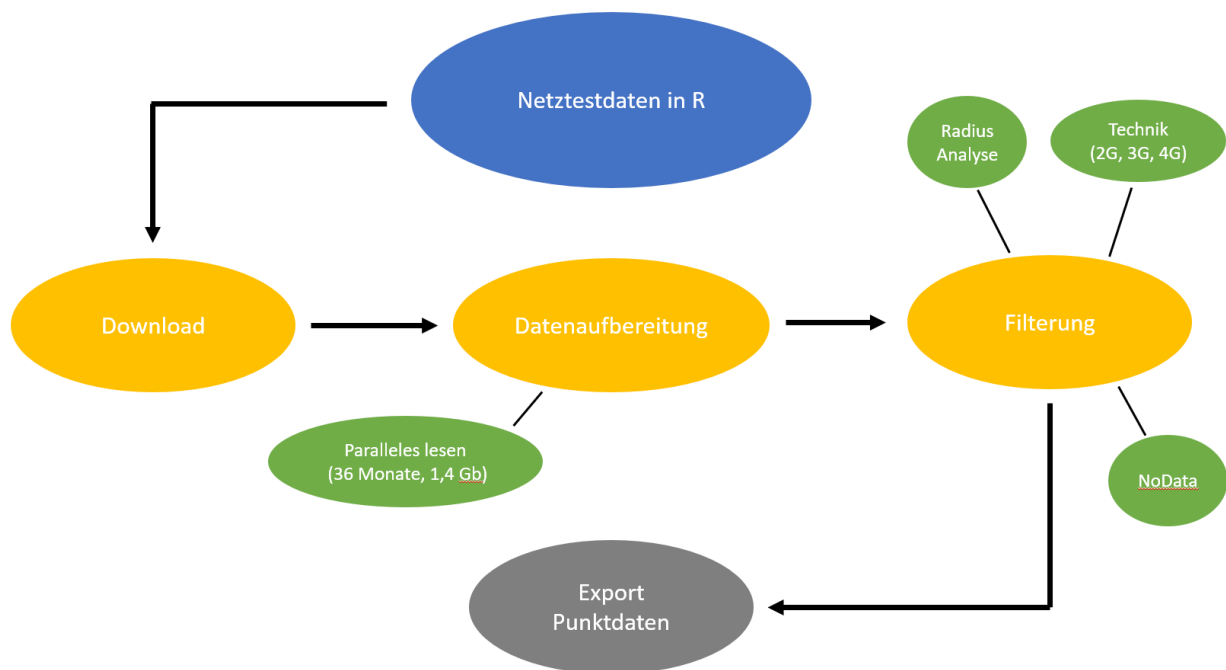


Abbildung 3.124: Workflow Netztestaufbereitung in R

Hierbei mussten zuerst die Netztestdaten von der RTR Datenbank heruntergeladen und gelesen werden. Da Netztests überall auf der Welt aber vor allem in ganz Österreich gemacht werden, mussten die Daten auf das Untersuchungsgebiet, also den Radius der 15 Kilometer

Netzabdeckung, begrenzt werden. Es wurden die Daten auf Mobilfunktechnologien wie (2G, 3G, 4G) gefiltert und fehlende Daten entfernt. Schließlich wurden die Daten als ESRI Punkt Features in einer Geodatabase abgespeichert.

Zu sehen in Karte 3.125 sind nun die fertig aufbereiteten Netztest Punktdaten, visualisiert über der Signalstärke RSRP des Gebietes-H welche mit Gebiet-V Kreuzkalibriert wurde.

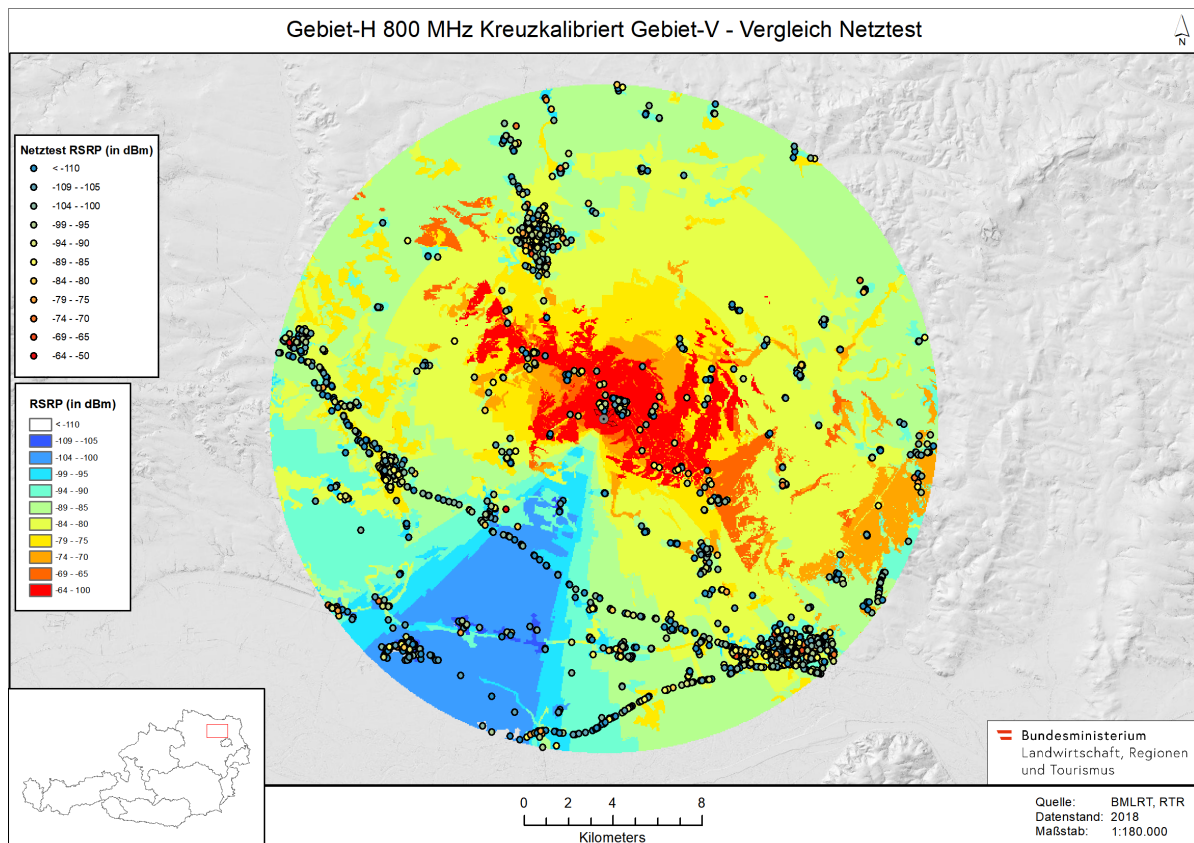


Abbildung 3.125: Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V Netztest

Hierbei sind die Netztestdaten als Punkte anhand der RSRP in den selben Farbabstufungen dargestellt wie die Raster der Signalausbreitung. Da Netztestmessungen der Signalstärke stark von den Endgeräten sowie den gekauften Produktbandbreiten der Nutzer abhängen, kommt es hier zu einem verzerrten Bild. Jedoch sind durchaus Netztestmessungen nahe der Basisstation sichtbar, die eine mittlere Signalstärke in gelb von ca -90 dBm aufweisen. Die Kreuzkalibrierte Analyse der RSRP modelliert hier den Signalstärkebereich etwas zu optimal. Abseits von Urbanen Zentren wird auch die Signalstärke RSRP in den Netztestdaten deutlich schwächer und erscheint in blau.

Insgesamt macht die Kreuzkalibrierte Analyse einen zu optimistischen Eindruck was die Stärke des Referenzsignales RSRP betrifft. Hingegen sind die modellierten Bereiche durchaus aus der originale Kalibrierung wiederzufinden. Demnach kann eine Kreuzkalibrierung durchaus in auf ähnlich klassifizierten Gebieten angewendet werden, wenn mit einer gewissen Verfälschung der Signalstärke zu rechnen ist.

### 3.7.7.2 Gebiet-V Kreuzkalibriert Gebiet-H

Nun wird das Gebiet-V kreuzkalibriert mit dem Gebiet-H, um den möglichen Einfluss zu untersuchen, welcher bei vertauschen von den kalibrierten Hata9999 Parametern zu erwarten ist.

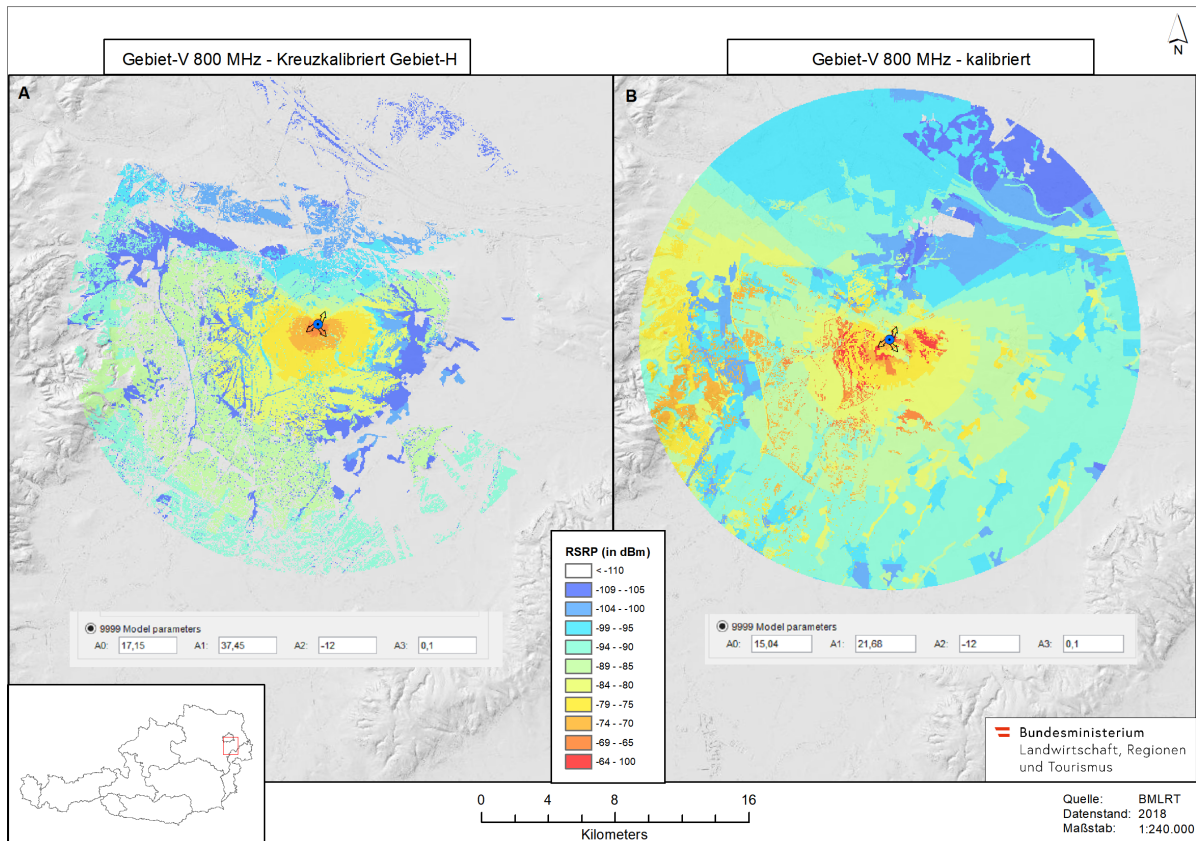


Abbildung 3.126: Gebiet-V 800 Kreuzkalibriert Gebiet-H

In Teil [A] der Karte 3.126 ist das Gebiet-V mit 800 MHz kalibriert mit den Hata9999 Parametern des Gebietes-H zu sehen. In Teil [B] ist das selbe Gebiet-V ebenfalls mit 800 MHz modelliert jedoch kalibriert mit seinen eigenen dort vorhandenen DriveTest Daten. Vergleicht man nun beide Teile [A] und [B], so fallen doch deutliche Unterschiede auf. Beide Modellierungen weisen einen Radius von 15 Kilometern auf. Jedoch ist Teil [A] mit der Kreuzkalibrierung wesentlich unvollständiger modelliert als Teil [B]. In Teil [A] erscheint im Nahbereich der Antenne die Modellierung sehr schematisch, wohingegen in Teil [B] bei der originalen Kalibrierung der Nahbereich wesentlich heterogener strukturiert ist. Dies ist vermutlich aufgrund der dort vorhandenen Gebäudestrukturen zurückzuführen, welche bereits in Karte 3.116 aufgezeigt wurde. Der Bereich um -80 dBm erscheint in beiden Analysen ähnlich strukturiert, jedoch sind generell die RSRP Werte der Kreuzkalibrierten Analyse in Teil [A] mit etwas schlechteren RSRP Klassen versehen als sie in der originalen Kalibrierung vorhanden sind.

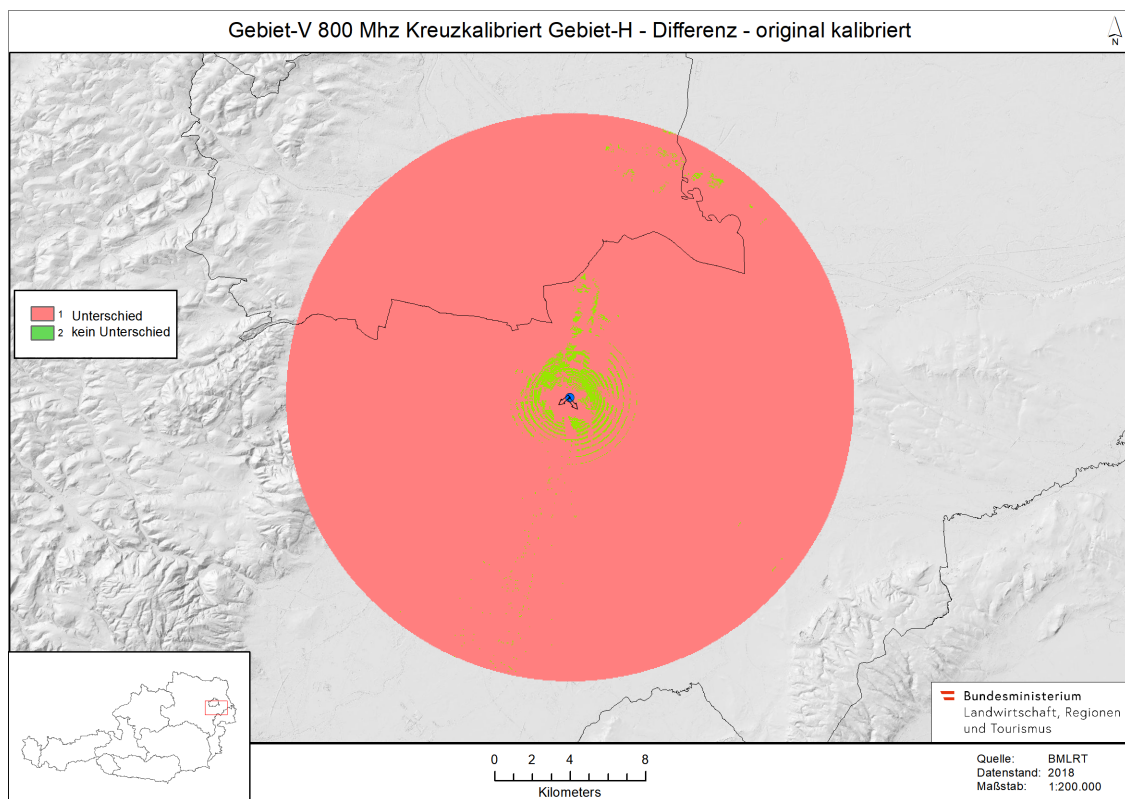


Abbildung 3.127: Gebiet-V 800 Kreuzkalibriert Differenz original kalibriert

Der Differenzraster in Karte 3.127 zeigt den Unterschied zwischen dem Gebiet-V, welches kreuzkalibriert mit Gebiet-H wurde, und der originalen Kalibrierung des Gebietes-V. In rot sind die Raster dargestellt, welche sich in der Signalstärke RSRP unterscheiden. In grün sind jene Raster dargestellt, welche keine Unterschiede zwischen der Kreuzkalibrierung und der originalen Kalibrierung aufweisen. Interessanterweise stellt der Differenzraster ringförmige grüne Bereiche nahe der Basisstation dar, welche dieselbe RSRP aufweisen.

**Root Mean Square Error** Der RMSE zeigt außerdem zwischen kreuzkalibrierten und original kalibrierten Raster einen Wert von 22,08 an. Dies stellt durchaus einen hohen Wert dar, da die RSRP Werteverteilung um die 100 beträgt.

Die Karte 3.128 zeigt den Vergleich der Kreuzkalibrierung mit der dort befindlichen Landnutzung und welchen eventuellen Einfluss die verschiedenen Nutzungstypen auf das RSRP Signal haben.



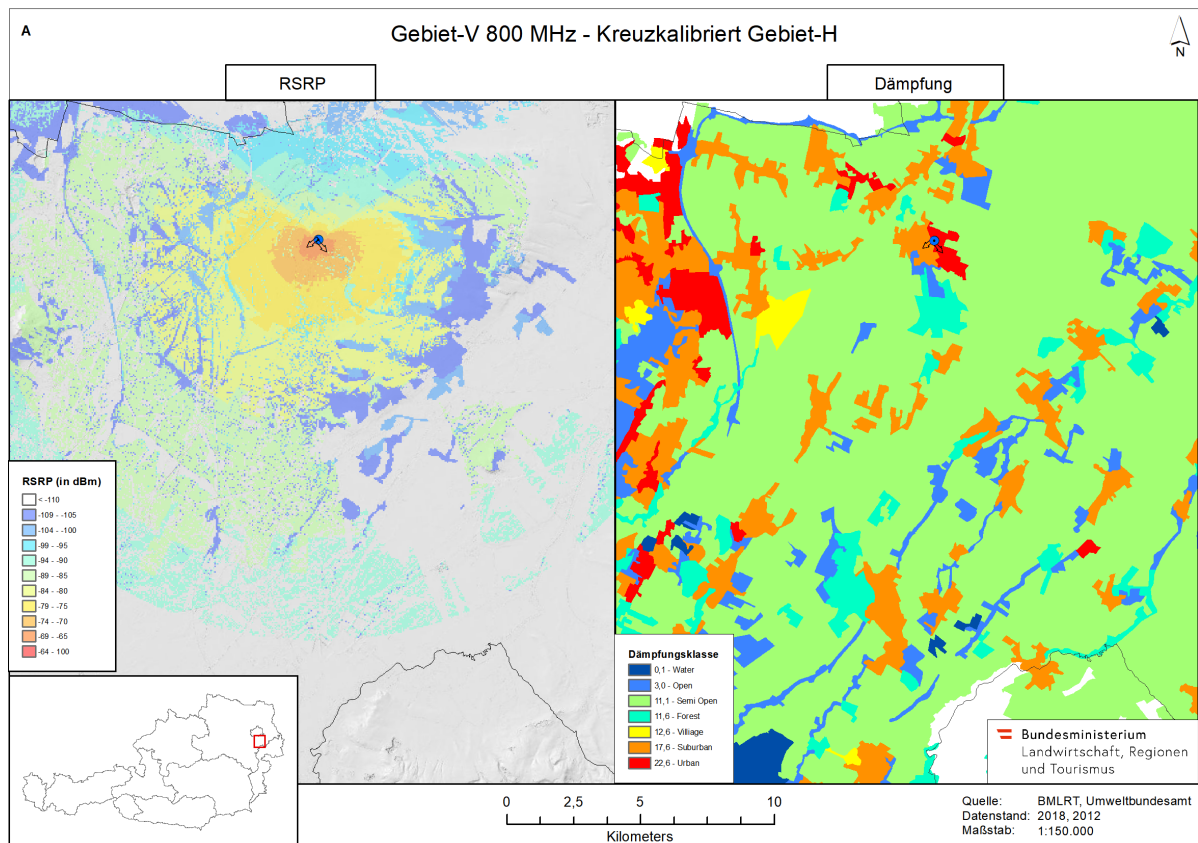


Abbildung 3.128: Gebiet-V 800 Kreuzkalibriert Gebiet-H Vergleich DGM Landnutzung

Durch die Fremdkalibrierung auf dem Gebiet-V kommt es zu Ungenauigkeiten was die Dämpfung durch die Landnutzung betrifft. Generell werden zwar bebaute Gebiete sowie Gebäude mit einer deutlichen Dämpfung modelliert, jedoch fällt diese Dämpfung um 20 dBm stärker aus als bei der originalen Kalibrierung in [B].

In der statistischen Analyse mittels Histogramm in Abbildung 3.129 sieht man zwei Bereiche in denen besonders viele Rasterzellen durch die gleiche RSRP Signalstärke abgedeckt sind. Diese befinden sich bei -85 dBm sowie bei -110 und -120 dBm. Da sich in der Nähe der Basisstation urbane als auch suburbane Flächen befinden, sind im Histogramm diese Kategorien im stärkeren RSRP Bereich von -80 bis -100 dBm zu finden. Der Median der RSRP liegt bei -112 dBm und somit deutlich niedriger als bei der originalen Kalibrierung des Gebietes-V, welcher -90 dBm aufwies. Wie bei allen Analysen kommt die Dämpfungsklasse *Semi Open low* am häufigsten von allen Klassen in den Rasterzellen vor. Die Klassen *Suburban*, *Village*, *Semi Open high*, *Village* sowie *Forest low* kommen ebenfalls bis zu 3000 Rasterzellen pro RSRP Wert vor. Am Randbereich der Analyse kommt die Klasse *Forest low* öfter in der Statistik im schwächeren RSRP Bereich um -130 dBm vor.



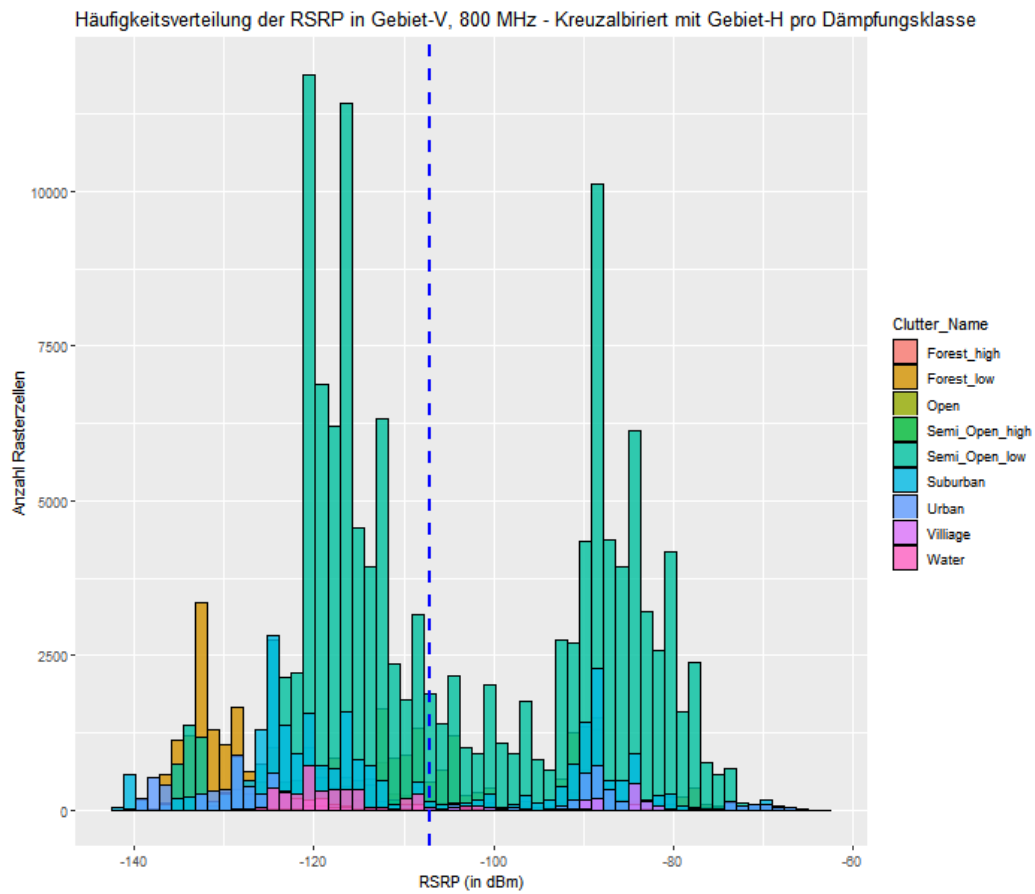


Abbildung 3.129: Histogram RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert

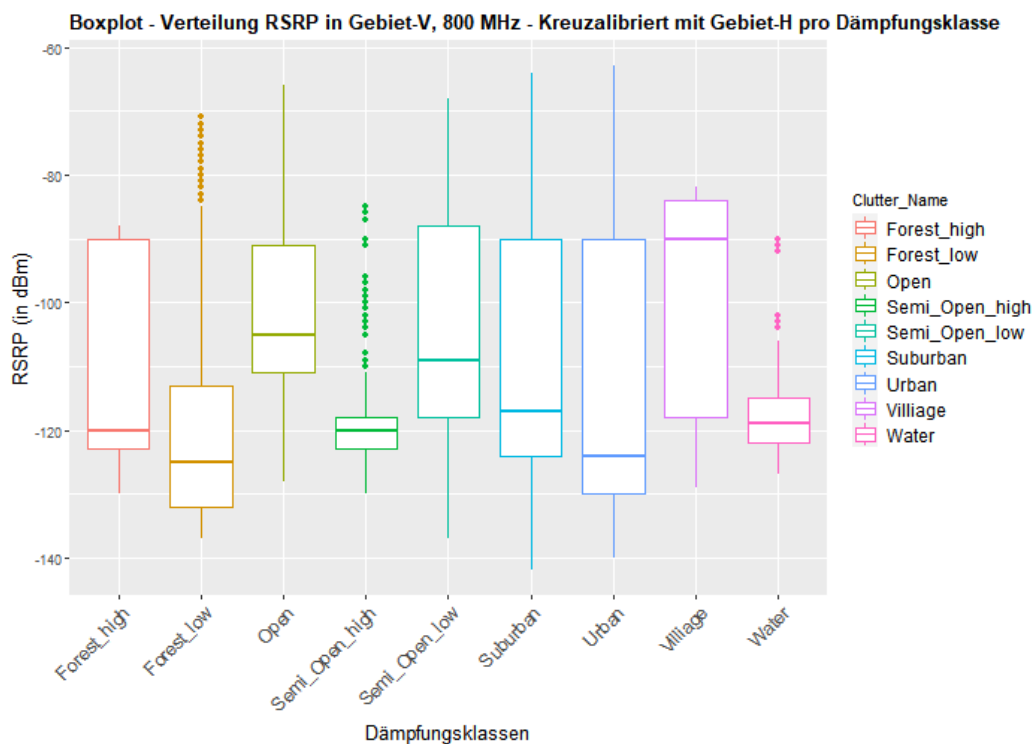


Abbildung 3.130: Boxplot RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert

Auch das Boxplot in Abbildung 3.130 zeigt eine starke Streuung der RSRP in allen Klassen von ca -80 dBm bis schwächer als -130 dBm. Der Median der Dämpfungsklasse *Village* liegt von allen Klassen am höchsten mit einem RSRP von -90 dBm.

**Zusammenfassung** Es muss gesagt werden, dass die Kreuzkalibrierung des Gebietes-V zwar im groben der räumlichen Ausbreitung der originalen Kalibrierung ähnelt, jedoch es bei Kreuzkalibrierung zu einer zu starken Abdämpfung der RSRP im Vergleich zur originalen Kalibrierung kommt. Auch die modellierte RSRP erzeugt bei Kreuzkalibrierung schemenhafte Formen, die sich grundsätzlich von der originalen Kalibrierung unterscheiden. Auch der RMSE zeigt durch seinen Kennwert mit 22,08 einen großen Unterschied zwischen Kreuz- und originaler Kalibrierung. Die statistische Verteilung der Rasterzellen zeigt bei Kreuzkalibrierung zwei Bereiche (-90 dBm und -120 dBm) in welchen besonders viele Rasterzellen vorkommen.

## 4 Ergebnisse

Dieses Kapitel widmet sich den Ergebnissen, welche durch die in Kapitel 3.3 der Landschaftsklassifizierung als auch der in Kapitel 3.7 durchgeführten Mobilfunkanalysen, erworbenen Erkenntnisse. In Kapitel 3.3 wird die erste Arbeitsfrage zur Klassifizierung der Landschaft für die Mobilfunkanalysen in dieser Masterarbeit behandelt.

### Arbeitsfrage 1

- *Wie kann ein Gebiet Charakterisiert werden, anhand von Landnutzung und Geländehöhen, um schließlich Gebietskategorien zu erhalten?*

Damit Gebiete anhand ihrer landschaftlichen Merkmale charakterisiert werden konnten, wurden digitale Höhen- als auch Landnutzungsdaten herangezogen. Hierfür wurden aus den Corine Landnutzungsdaten neue Dämpfungsklassen aggregiert, indem anhand von Höhen- und Dämpfungswerten, die laut ITU und Cellular Experts definiert wurden, die Landnutzungen mit ähnlichen Werten zusammengefasst wurden. Zusätzlich wurden Höhendaten als auch Neigungsdaten in einen Rauigkeitsindex, sowie einen Neigungsvariabilitäts Index umgerechnet. Der Rauigkeitsindex wurde schließlich mit den aggregierten Dämpfungsklassen kombiniert, um beide dieser Charakteristika in die Gebietsfindung miteinzubeziehen. Schließlich konnten so gleiche Gebiete gefunden werden, welche sich anhand der Höhen als auch Landnutzung ähneln. Diese Gebiete wurden letzten Endes benutzt, um die Mobilfunkanalysen auf gleich charakterisierten Gebieten durchzuführen.

### Arbeitsfrage 2

- *Mit welcher Methodik können die Gebiete kategorisiert werden?*

Die Methodik, die in dieser Masterarbeit zur Kategorisierung der Untersuchungsgebiete gewählt wurde, konzentriert sich auf die Ableitung von aggregierten Klassen der Landnutzungs- sowie Höhendaten. Aus den Landnutzungsdaten wurden Dämpfungsklassen abgeleitet, welche die Dämpfung des Signals auf den zusammengefassten Corine Landcover Klassen beschreibt. Für die Höhencharakterisierung wurden aus dem digitalen Geländemodell der sogenannte Rauigkeitsindex (TRI) abgeleitet. Mit Hilfe dieses Index konnte die durchschnittliche Höhenänderung auf 10 Meter Rasterzellen aggregiert werden. Da der abgeleitete Dämpfungsraster aus den Landnutzungsdaten mit dem erzeugten Rauigkeitsindex verknüpft wurde, musste darauf geachtet werden, dass die entstehenden Klassen sich auf ein mögliches Minimum reduzieren, damit eine überschaubare Anzahl an Klassen der Landschaftskategorien entstehen. Dies hat auch die Notwendigkeit, da diese Landschaftskategorien für die Kalibrierung für jedes einzelne Hata9999 Modell mit DriveTest Daten vorgesehen sind. Jedes Hata9999 Modell müsste für jede Frequenz 800 MHz, 1800 MHz sowie 2100 MHz kalibriert werden. Diese Masterarbeit analysierte jedoch eine Landschaftskategorie für zwei verschiedene Standorte und testete ob sich die DriveTest Kalibrierungen eignen um diese für eine Kreuzkalibrierung auszutauschen. Es konnte

anhand der zwei Untersuchungsgebiete H und V gezeigt werden, dass die Landschaftskategorisierung für die Kreuzkalibrierung ein positives Ergebnis mit einer gewissen Abweichung erzielte.

### Arbeitsfrage 3

- *Mit welcher Methodik kann ein begrenzter Untersuchungsraum optimal aus HCM Mobilfunkdaten mit Cellular Experts und dem Hata9999 Modell analysiert und beschrieben werden und welche Erkenntnisse über Mobilfunkparameter ergeben sich daraus?*

Nachdem in den Analysekapiteln 3.7.5 sowie 3.7.6 detailliert die Unterschiede der Mobilfunkmodellierung mit Cellular Experts untersucht wurden, sollen nun die erzeugten Ergebnisse zusammengefasst und analysiert werden. Für jedes Untersuchungsgebiet wurden Daten für die Frequenzen 800 MHz, 1800 MHz sowie 2100 MHz analysiert, um Unterschiede durch die verschiedenen Frequenzbereiche zu erkennen. Für jede dieser Frequenzen wurden die für die Beurteilung eines Funksignals wichtigen Referenzsignale (RSRP, RSRQ, SINR) jeweils mit Karten als auch Statistiken analysiert. Schließlich wurde für jedes Untersuchungsgebiet, Frequenz und Referenzsignal eine Analyse mit und ohne DriveTest Kalibrierungen durchgeführt.

Die in dieser Masterarbeit benutzte Methodik zur Modellierung von HCM Mobilfunkdaten benutzte grundsätzlich die Proprietäre Software von Cellular Experts, welche eine Extension für das Geoinformationssystem ArcGIS von ESRI darstellt. Mittels dieser Software war es möglich HCM Mobilfunkdaten in ein für ArcGIS lesbares Datenformat (.GDB) zu konvertieren. Weiteres konnte mit der Extension Cellular Experts ein Vorhersagemodell mittels dem Hata9999 Modell erstellt werden. Dieses Vorhersagemodell wurde anschließend mit einem digitalen Höhenmodell sowie Landnutzungsdaten angereichert, um auch die Effekte, welche durch Höhenunterschiede sowie Landnutzungstypen entstehen, zu berücksichtigen. Schließlich wurden mittels der vorhandenen DriveTest Daten die Hata9999 Parameter des Vorhersagemodells angepasst, um eine Kalibrierung der Modellierungsergebnisse zu erreichen.

Im **Untersuchungsgebiet H** kann bei der Analyse zu 800 MHz festgestellt werden, dass zwischen der Modellierung mit und ohne kalibrierte Daten, die starken RSRP Bereiche sich grundsätzlich ähneln. Erst ab RSRP Werten schwächer als -90 dBm kommt es zu stärkeren Unterschieden. Es konnte gezeigt werden, dass Wälder einen deutlichen Einfluss, besonders in den hohen RSRP Bereichen haben und dort das Signal limitieren. Weiteres konnte auch ein wesentlicher Einfluss, durch Geländeformationen sowie Höhenunterschiede auf die Netzabdeckung nachgewiesen werden. Hierbei konnten durch die Kalibrierung aber wesentlich genauere Abdämpfungs- sowie Abschattungseffekte durch das Gelände simuliert werden. Räumlich wurde durch die Kalibrierung ein größerer Bereich modelliert, der ohne Kalibrierung schematisch kreisrund ausfällt. Über die Berechnung der Differenz der Signalstärke zwischen dem kalibrierten und nicht kalibrierten Raster konnten die Unterschiede zwischen diesen räumlich dargestellt werden. Um diese Unterschiede in einer Maßzahl darzulegen, wurde der Root Mean Square Error (RMSE) zwischen den beiden Analysen berechnet. Dieser fiel mit 12.8 verhältnismäßig gut aus, was in einigen Bereichen eine exakte Übereinstimmung der Signalstärke RSRP bei Kalibrierung als auch nicht Kalibrierung bedeutet. Statistisch muss gesagt werden, dass ohne Kalibrierung der Median der RSRP bei -95 dBm liegt und somit sogar stärker ausfällt als mit einer Kalibrierung, wo er bei -110 dBm liegt und deutlich schwächer ist. Durch die Kalibrierung kam es auch zu einer deutlichen Verbesserung der Qualität des Referenzsignales, das anhand der RSRQ untersucht wurde. Auch durch das Verhältnis des Referenzsignales zum Rauschen

konnte gezeigt werden, dass durch eine Kalibrierung die optimalen SINR Werte mit den starken RSRP Werten übereinstimmen. Die Kalibrierung führte scheinbar auch zu einer Verbesserung des Verhältnisses des Signals zu den Störungen.

Für die Analyse mit 1800 MHz kann gesagt werden, dass durch die Kalibrierung es zu einer Verbesserung der gesamten RSRP Werte und somit der Signalstärke gekommen ist. Es wird ein vollständiger Bereich anhand der Karte in 3.86 modelliert. Die Empfangslücken, die in der nicht kalibrierten Karte in 3.81 zu sehen waren, konnten ebenfalls durch Kalibrierung beseitigt werden. Der berechnete Differenzraster zwischen der kalibrierten und nicht kalibrierten Analyse zeigte starke Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Signalstärke. Auch der RMSE zwischen den beiden Analysen lag bei einem hohen Wert von 21.9 und zeigt deutliche Unterschiede zwischen nicht Kalibrierung und Kalibrierung. Insgesamt wurde auch über die Betrachtung mittels Boxplot gezeigt, dass sich über die einzelnen Dämpfungsklassen, die Signalstärke RSRP bei Kalibrierung im Vergleich zu nicht Kalibrierung in Richtung eines besseren Signales verändert hat.

Bei der Analyse der Frequenz mit 2100 MHz wurden generell stärkere Unterschiede der RSRP Abdeckungsbereiche festgestellt. Im Nahbereich um die Basisstation konnten im stärksten RSRP Bereich bis -64 dBm, durch die Kalibrierung, der Radius dieser Klasse von 500 Meter auf 1,3 Kilometer gesteigert werden. Es konnte gezeigt werden, dass Wald eine bedeutende Rolle als begrenzender und abschwächender Faktor darstellt. Statistisch zeigt sich auch, dass sich durch eine Kalibrierung der Median der RSRP sich um 20 dBm in Richtung einer stärkeren Signalstärke verschoben hat. Zwar ragt die Klasse *Semi Open high* bei nicht Kalibrierung auch in den RSRP Bereich bis -90 dBm, jedoch liegen alle anderen Klasse deutlich unter -120 dBm, was allgemein gesehen zu einem schlechteren Ergebnis bei nicht Kalibrierung entspricht. Der berechnete Differenzraster zwischen nicht kalibrierte und kalibrierter Analyse zeigt deutlich, dass durch die unterschiedlichen Ausbreitungsradien zwar ein großer Unterschied entsteht, jedoch es trotzdem im Nahbereich Nord-östlich der Basisstation zu größeren Bereichen mit derselben Signalstärke kommt. Deshalb ist der RMSE mit 23.2 relativ hoch und zeigt starke Unterschiede zwischen den beiden Rastern, jedoch verzerren die unterschiedlichen Ausbreitungsflächen diesen Wert.

Im **Untersuchungsgebiet-V** welches als das Vergleichsgebiet zu Gebiet-H untersucht wurde, zeigt sich ebenfalls ein sehr diverses Bild. Bei nicht Kalibrierung kommt es zu einem sehr schematisch modellierten Bereich, der sehr homogen mit kontinuierlichen Radien verläuft. Der Radius der Signalstärke reicht ohne Kalibrierung nur 5 Kilometer, hingegen mit Kalibrierung liegt die maximale Reichweite des Signals bei 15 Kilometer, was einer realistischen Reichweite bei einer Frequenz von 800 MHz entspricht. Die starke räumliche Streuung der RSRP im Nahbereich um die Basisstation, kommt höchstwahrscheinlich durch die dortige, dichte Bebauung zustande. Es wurde eine eigene Analyse in Karte 3.116 durchgeführt, in welcher der Einfluss von Gebäuden auf die Signalstärke RSRP veranschaulicht wurde. Statistisch betrachtet liegt der Median der RSRP bei Kalibrierung mit -90 dBm bei einem deutlich besseren Wert, als bei nicht Kalibrierung von -120 dBm. Auch wenn die Hälfte der Daten einen RSRP von -90 dBm besitzen, was keinem sonderlich starken Empfang entspricht, so sind in der kalibrierten Analyse deutlich bessere Empfangsbereiche vorhanden als ohne Kalibrierung. Auch die kalibrierte Simulation, die Gebäude berücksichtigt, erzeugt ein deutlich realistischeres Bild. Der Differenzraster zwischen nicht kalibrierter und kalibrierter Analyse zeigt eine starke Abweichung zwischen den beiden Analysen. Auch der RMSE ist mit 27.8 auf einem sehr hohen

Niveau und zeigt diese starken Unterschiede zwischen den beiden Rastern und deren Signalstärke.

Anhand der verschiedenen Untersuchungsgebiete, Frequenzen sowie Referenzsignale konnte mit den Simulationen gezeigt werden, dass eine Kalibrierung der Modelle durch Messungen im Gelände einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse von Mobilfunkmodellierungen hat. Es konnte gezeigt werden mit welcher Methodik HCM Mobilfunkdaten für Geografische Informationssysteme aufbereitet, analysiert und modelliert werden können. Schließlich wurden die einzelnen Analysen sowohl kartographisch als auch statistisch mit verschiedenen Verteilungstatistiken und unterschiedlichen Kombinationen analysiert.

### Arbeitsfrage 4

- *Kann mit Feldmessungen in Form von Drive-Tests eine Verbesserung der Netzabdeckungsparameter erzielt werden?*

Grundsätzlich hat sich in allen Analysen sowohl im Gebiet-H als auch Gebiet-V und mit den verschiedenen Frequenzen 800 MHz, 1800 MHz sowie 2100 MHz gezeigt, dass die Kalibrierung des Vorhersagemodells mit DriveTest Daten im Gelände einen wesentlichen Einfluss auf die Analyseergebnisse in Cellular Experts haben. Ob eine Kalibrierung immer zu den besten Modellierungsergebnissen kann nicht immer mit Sicherheit gesagt werden, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass eine Kalibrierung die Umgebungseinflüsse der Natur deutlich besser in den Analysen widerspiegelt als ohne solche Kalibrierungsdaten.

Die Analyse von **Gebiet-H** mit 800 MHz hat gezeigt, dass die Kalibrierung des Vorhersagemodells durch DriveTest Daten, die Abdämpfungs- und Abschattungseffekte durch das Gelände besser simuliert werden konnten. Bei der Analyse mit 1800 MHz kam es ohne Kalibrierung zu Empfangslücken, welche durch eine Kalibrierung beseitigt werden konnten und eine realistische Dämpfung an Gebäuden und Wäldern erzeugte. Die Analyse mit 2100 MHz zeigte, dass ohne Kalibrierung die Signalstärkeverteilung unnatürliche Formen annimmt. Durch die Kalibrierung passt sich die Dämpfung der Signalstärke wieder deutlich realistischer an Wäldern, urbanen Gebäuden sowie Geländestrukturen an.

**Gebiet-V** zeigte, dass ohne Kalibrierung die Abdeckungsbereiche der RSRP Signalstärke mit nur 5 Kilometern unrealistisch klein ausfallen. Auch nahegelegene Gebäudestrukturen und urbane Flächen werden ohne Kalibrierung gar nicht berücksichtigt.

Nun soll die Hauptforschungsfrage in dieser Masterarbeit beantwortet werden. Diese lautet folgend:

- *Können die DriveTest Daten eines Untersuchungsgebietes mit spezifischer Charakteristik zur Kalibrierung der HCM Mobilfunkdaten eines zweiten Untersuchungsgebietes vergleichbarer Landschaftscharakteristik angewendet werden?*

Die **Kreuzkalibrierung** wurde sowohl für das Gebiet-H als auch das Gebiet-V mit der Frequenz 800 MHz durchgeführt. Es wurden die Unterschiede in den Analysen aufgezeigt, die aufgrund der vertauschten DriveTest Kalibrierungen entstanden sind.

Es konnte gezeigt werden, dass die Analyse des **Gebietes-H** kreuzkalibriert mit dem Gebiet-V, durchaus zu ähnlich modellierten Bereichen führt, wie die originale Kalibrierung. Die Ergebnisse



der Signalstärke werden in der Kreuzkalibrierung jedoch zu optimistisch modelliert. Es ist somit mit einer Abweichung besonders an Randbereichen, welche normalerweise stärker gedämpft sind, zu rechnen.

Bei der Analyse des **Gebietes-V**, welches kreuzkalibriert mit den DriveTest Daten von Gebiet-H, wurde, fällt zwar auch eine ähnliche Struktur der Dämpfungsunterschiede des Signals auf, jedoch wird die RSRP oft deutlich zu stark gedämpft. Dies wird anhand der urbanen Gebäudestrukturen sichtbar, die bei Kreuzkalibrierung schwächer erscheinen, als bei originaler Kalibrierung. Auch sind Flächen gar nicht-, sowie der Nahbereich um die Basisstation zu schematisch modelliert.

Die Kreuzkalibrierung hat gezeigt, dass es durchaus möglich ist die kalibrierten DriveTest Messungen von einem anderen gemessenen Standort für die Auswertung der HCM Daten zu verwenden. In beiden Analysen der Gebiete H und V konnte gezeigt werden, dass durch fremde DriveTest Kalibrierung die RSRP Berechnungen, ähnlichen Grundmustern folgen, als würden sie mit DriveTest Daten des eigentlich analysierten Gebietes kalibriert worden sein.

## 5 Diskussion

In diesem Kapitel sollen die vorgestellten Konzepte, Methoden und Modelle diskutiert werden, um mögliche Grenzen der Modelle sowie Probleme bei der Vorgehensweise zu beleuchten.

In Kapitel '2 Grundlagen von Mobilfunk' wurden alle Konzepte und Basisinhalte diskutiert, die notwendig sind, um die tiefer gehenden Analysen in Kapitel '3 Analyse mit Cellular Experts' und deren Analyseergebnisse zu verstehen.

Bevor jedoch mit der Analyse der Mobilfunkdaten begonnen werden konnte, mussten zuerst geeignete Landschaftskategorien gefunden werden. Hierfür wurde eine detaillierte Analyse und Datenaufbereitung von Höhen- sowie Landnutzungsdaten in Kapitel 3.3 durchgeführt. Die Corine Landcover Klassen wurden in sogenannte Dämpfungsklassen zusammengefasst. Der Aufbau und die Struktur der Dämpfungsklassen, wurden von Cellular Experts sowie der ITU definiert und in dieser Masterarbeit übernommen. Zu diskutieren wäre, ob man nun auch zu einer anderen Zusammenführung der Klassen gelangen hätte können. Der Ansatz in dieser Masterarbeit war, die Corine Landnutzungsklassen so zusammenzufassen, dass möglichst ähnliche Klassen in den Dämpfungsklassen aggregiert werden.

Als zweites Kriterium für eine Landschaftskategorisierung, wurden Höhendaten herangezogen, die in weiterer Folge in Neigungen umgerechnet wurden. Es wurden aus diesen berechneten Neigungen ein Variabilitätsindex berechnet, um die Unterschiede in den Neigungen des Untersuchungsgebietes Niederösterreich aufzuzeigen. Hierbei wurden jedoch zu unscharfe Ergebnisse erzielt, weshalb in weiterer Folge für die Landschaftskategorisierung die reinen Höhen verwendet wurden. Aus den Höhen wurde ein weiterer Index abgeleitet, der sogenannte Rauigkeitsindex (TRI). Dieser berechnet die durchschnittliche Höhenänderung einer jeden Rasterzelle mit ihren 8 Nachbarzellen. Der Rauigkeitsindex sollte das Gelände in drei Kategorien einteilen, je nachdem wie stark die Höhenänderungen in den Rastergruppen ausfielen. Der Rauigkeitsindex wurde in einer Karte visualisiert und stellte ein klares Bild der Höhenänderungen dar.

Um nun Aussagen über die Eigenschaften von Gebieten in Niederösterreich treffen zu können, wurden verschiedenste Kombinationen von Datensätzen ausprobiert. Zuerst wurde mit der Kombination der Corine Landcover Level 3 mit der Neigungsvariabilität experimentiert. Da jedoch bei dessen Kombination mehr als 200 Klassen entstanden, konnte dieser Ansatz nicht weiter verfolgt werden. Anschließend wurde getestet, ob mit den aus der Landnutzung entstandenen Dämpfungsklassen, eine Kombination mit der Neigungsvariabilität zu sinnvollen Ergebnissen führt. Die Anzahl an Kombinationen verringerte sich zwar, jedoch waren 24 Ausprägungen noch immer zu viel um klare Landschaftskategorien abzuleiten. Schließlich wurde in dieser Masterarbeit beschlossen die Kombination der Dämpfungsklassen mit dem zuvor berechneten Rauigkeitsindex (TRI) aus den Höhendaten für die Landschaftsklassifizierung zu verwenden, da die Kombination dieser, die deutlichsten Ergebnisse erbrachte. In weiterer Folge musste eine Statistische Aggregation der kombinierten Raster auf eine Bezugsbasis erfolgen. Es wurden

drei verschiedene Ansätze einer Bezugsbasis ausprobiert und getestet, um herauszufinden, welcher dieser die klarsten aber auch korrektesten Ergebnisse lieferte. Hierbei wurde als erstes mit sogenannten Puffern, also Kreisradien, die um die vorhandenen Basisstationen, berechnet wurden, gearbeitet. Dies führte jedoch zu einigen Komplikationen was die Lesbarkeit als auch die komplette Darstellung der Daten betraf. Als nächstes wurden als Bezugsbasis die Österreichischen Gemeindegrenzen herangezogen. Die Statistikberechnung auf diese, führte zwar zu sehr klaren Ergebnissen, jedoch musste hierbei erkannt werden, dass die Gemeindegrenzen aus rein politischen Gründen entstanden sind und nichts mit landschaftlichen Mustern zu tun haben. Die dritte Bezugsbasis bildeten die von der Statistik Austria veröffentlichten Raster in der Maschenweite mit 5 Kilometer Ausdehnung. Aufgrund ihrer klaren Lesbarkeit als auch geometrischen exakten Gleichverteilung wurde in dieser Masterarbeit entschieden, die Gebietskategorisierung auf der Bezugsbasis der Statistik Austria Raster mit 5 Kilometer Ausdehnung zu berechnen. Die Ausdehnung von 5 Kilometer war ein guter Kompromiss zwischen einer guten Übersichtlichkeit und ausreichender Abgrenzung. Durch die Aggregierung der kombinierten Dämpfungs- und Rauigkeitsindexklassen konnte eine relativ klare Gebietsabgrenzung erreicht werden. Kleinere Gruppen von Klassenanhäufungen wurden als nicht relevant eingestuft und mithilfe von Bereinigungsfunktionalitäten entfernt, um schließlich zu einer klaren abgegrenzten Karte zu gelangen, welche die Landschaftskategorien in nur 6 Klassen darstellt. Diese Karte stellte das Fundament der weiteren Mobilfunkanalysen dar, da sie die zwei zu untersuchenden Gebiete in der gleichen Landschaftskategorie identifizierte. Außerdem konnten in diesem Kapitel die ersten beiden Arbeitsfragen genau beantwortet werden.

Die Grenzen welche im Zuge der Analyse und Aufbereitung der Landschaftskategorien erreicht wurden, sind auf die geometrische Auflösung der Höhen- und Landnutzungsdatensätze bezogen. Würden hier noch besser aufgelöste Höhenmodelle bzw. Landnutzungsdaten vorliegen, könnten die Grenzen zwischen den Klassen noch exakter modelliert werden. Für den Einsatzzweck der Mobilfunkanalyse reichen die verwendeten 10 Meter jedoch auf jeden Fall aus. Die Mobilfunkanalysen wurden in Entfernungen zwischen 5 bis 15 Kilometer durchgeführt, wodurch keine genauere Modellierung der Höhen- und Landnutzungsdaten unter 10 Meter erforderlich war.

Auch die Landschaftskategorisierung ist ein Produkt der Aggregierung und wurde auf Kosten der Lesbarkeit und klaren Abgrenzung von Gebieten im Bezug auf Höhen und Landnutzung erzeugt. Hierbei ist zu beachten, dass kleinere Bereiche oder einzelnen Zellen für die Lesbarkeit und Übersicht mit größeren Kategorien zusammengefasst wurden. Es wurde eine Kategorisierung angestrebt, welche einen schnellen Überblick über die Eigenschaften der Landschaft bietet. Hierdurch kann es in Randzonen oder kleineren Bereichen zu Unschärfen kommen was die Kategorien betrifft. Es muss daher kritisch betrachtet werden, dass sich Gebiet-H und Gebiet-V in ein und der selben Landschaftskategorie befinden. Bei genauer Betrachtung liegt Gebiet-H in höheren Bereichen als Gebiet-V, jedoch kommt es durch die Aggregierung und die Kombination mit den Dämpfungsklassen zu einer Unschärfe wodurch auch unterschiedliche Eigenschaften zusammengefasst werden. Durch diese Landschaftskategorisierung und deren Aggregation besteht auch die Problematik, dass potentielle Mobilfunkberechnungen am Rande der definierten Klassen zu Versorgungsgebieten führen, welche eigentlich andere Landschaftskategorien versorgen. Dieses Problem muss in Grenzbereichen berücksichtigt und durch manuelle Eingriffe korrigiert werden.

Es konnte gezeigt werden, wie HCM Mobilfunkdaten mit, im Gelände gemessenen, Drivetest Daten verbunden werden können, um eine Kalibrierung und somit Verbesserung der Ergebnisse zu

erzielen. Aus organisatorischen Gründen konnte kein Messgerät für diese Masterarbeit beschafft werden, womit weitere Messungen nicht möglich waren. Auch bei den DriveTest Daten muss erwähnt werden, dass bei ungenügender Anzahl an Messpunkten eine korrekte Kalibrierung nicht durchgeführt werden kann. Daher besteht auch eine Limitation des gesamten Modells, dass DriveTest Messungen in genügend großer Anzahl und in korrekten Entfernungen durchgeführt werden müssen um mit validen Kalibrierungen arbeiten zu können.

Eine weitere Limitation in Bezug auf die Mobilfunkanalysen bestand in den HCM Antennentypen, welche nur in generalisierter Form zur Verfügung standen. Mit realen Antennendaten, könnten noch genauere Ergebnisse der Analyse erzielt werden bzw. die Umgebungseinflüsse noch genauer abbilden.

Eine technische Herausforderung, bestand auch im Arbeiten mit ESRI Grid-Raster Daten, um diese mit den notwendigen Informationen anzureichern und mit anderen Datensätzen zu kombinieren. Das Erzeugen von Statistiken mittels der Programmiersprache R aus diesen Rasterdaten, machte es erforderlich durch mehrere Konvertierungsschritte die Daten zuerst in R in lesbare Datenformate wie Data.Frame umzuwandeln. Hier muss beachtet werden, dass nicht alle Datensätze im Rasterformat vorlagen, so z.B. die Landnutzung welche in Polygonen vorlag und erst in Rastern umgewandelt werden musste, damit eine Verknüpfung dieser Daten erreicht werden konnte. Das Arbeiten mit Raster Daten war in gewissen Situationen im Bereich der Datenwissenschaft mit komplexen Problemen verbunden. Deshalb mussten in dieser Masterarbeit viele Datensätze mit der Programmiersprache R konvertiert, bearbeitet und analysiert werden.

In dieser Masterarbeit konnte erfolgreich gezeigt werden, wie Mobilfunkdaten aufbereitet, in Form von Karten visualisiert sowie statistisch mit automatischem Programmcode analysiert, werden können.

## 6 Ausblick

In zukünftigen Forschungen, könnten neue DriveTest Messungen in anderen, hier definierten, Landschaftskategorien durchgeführt werden, um die Effekte der unterschiedlichen Kategorien weiter zu untersuchen. Auch könnten die Landschaftskategorien auf andere Gebiete Österreichs ausgedehnt werden um dort DriveTest Messungen durchzuführen, um schließlich Mobilfunkanalysen in diesen Gebieten zu präzisieren.

Für zukünftige Untersuchungen, sollten außerdem reale Antennendiagramme mit in die Analysen einfließen um die Unterschiede mit generalisierten Antennendiagrammen aufzuzeigen. Reale Antennendaten besitzen Eigenschaften wie sie an dem jeweiligen Standort in der Natur benötigt werden. Daher werden auch die Vorhersageprognosen mit solchen Daten anders ausfallen, als unter der Verwendung von Daten welche von optimalen Eigenschaften und Bedingungen ausgehen.

Besonders aber im Hinblick auf großflächigere Untersuchungen sollte erprobt werden, wie sich mit der in dieser Masterarbeit vorgestellten Methode der Klassifizierung von Landschaftskategorien die Hata9999 Modelle auf diese Landschaftsklassen kalibrieren lassen und auf weitere Gebiete in Österreich anwenden lassen. Die in dieser Arbeit erzeugten Landschaftskategorien werden für die Kalibrierung der Hata9999 Modelle in Cellular Experts benötigt. Da für jede Frequenz 800 MHz, 1800 MHz und 2100 MHz als auch jede Landschaftskategorie schließlich ein Hata9999 Modell kalibriert werden muss, um ein vollständiges Modell abzubilden, mussten die Landschaftskategorien auf so wenig wie mögliche Kombinationen reduziert werden.

In dieser Masterarbeit beschränkte sich die Analyse auf Niederösterreich und es wurde ein Gebiet mit ähnlichen landschaftlichen Charakteristika anhand von zwei Basisstationen kalibriert und kreuzvalidiert. Dieser Prozess sollte jedoch zukünftig für weitere Kategorien der klassifizierten Gebiete durchgeführt werden.

## Anhang

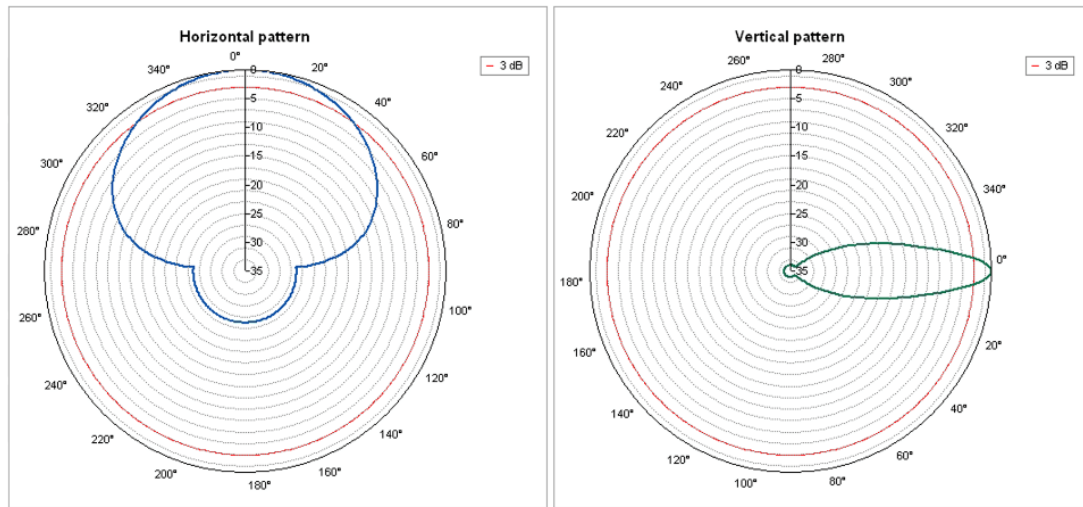


Abbildung 6.1: fiktives Antennendiagramm nicht kalibriert  
[Grabler, 2019, S.4]

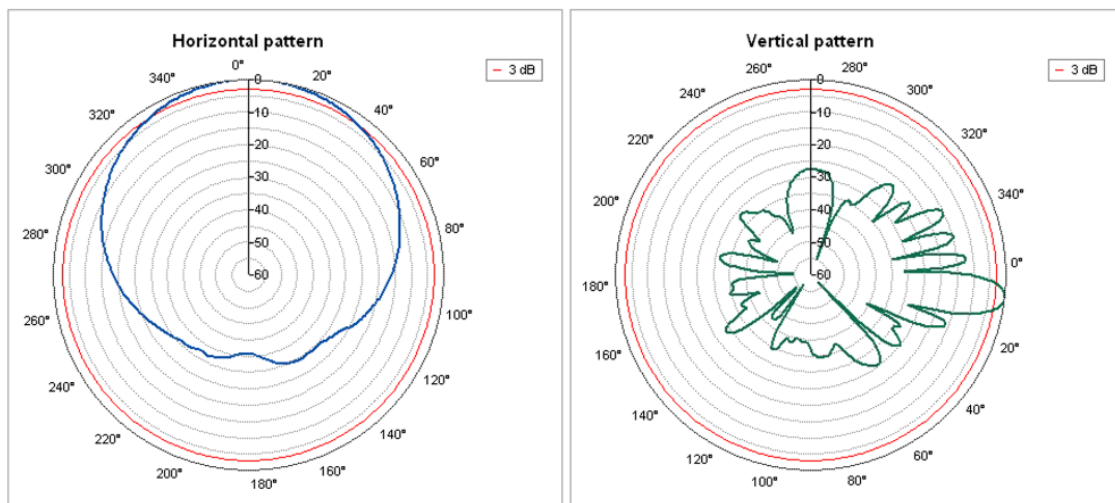


Abbildung 6.2: reales Antennendiagramm kalibriert  
[Grabler, 2019, S.4]



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Breitbandatlas Festnetz . . . . .	11
1.2	Breitbandatlas Mobilnetz . . . . .	11
1.3	Speedtest Global Index Austria . . . . .	12
1.4	Breitbandanschlüsse nach Technologie 2009-2019 Q2 . . . . .	12
1.5	Nutzerverhalten . . . . .	13
2.1	Frequenzbereiche . . . . .	23
2.2	Schema Basisstationsübertragung . . . . .	25
2.3	Signalausbreitung beeinflussende Faktoren . . . . .	25
2.4	Mehrwegausbreitung . . . . .	27
2.5	Fading . . . . .	29
2.6	LOS, Streuung, Reflexion . . . . .	31
2.7	Prognosemodelle . . . . .	33
2.8	Pfadverlust Lee . . . . .	34
2.9	Mobilfunkzellen . . . . .	38
2.10	Line of Sight . . . . .	39
2.11	Mobilfunkantenne . . . . .	40
2.12	Richtcharakteristik . . . . .	41
2.13	Sektorisierung . . . . .	41
2.14	Frequency Division Multiplex (FDM) . . . . .	43
2.15	FDM - Unterträger . . . . .	43
2.16	Time Division Multiplex (TDM) . . . . .	44
2.17	Code Division Multiplex Access(CDMA) . . . . .	46
2.18	Modulation . . . . .	46
2.19	Modulation Hauptmerkmale . . . . .	47
2.20	Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM) . . . . .	48
2.21	RSRP Wertebereich . . . . .	49
2.22	RSRQ Wertebereich . . . . .	50
2.23	SINR Wertebereich . . . . .	51
2.24	Schematischer Handover Übergabevorgang von zwei Zellen . . . . .	53
2.25	Carrier Aggregation - Kanalbündelung . . . . .	58
2.26	Beamforming . . . . .	60
2.27	3GPP Release Versionen . . . . .	61
3.1	Workflow Analyseschritte . . . . .	63
3.2	Beispiel DriveTest mit Corine Landcover Klassifizierung . . . . .	69
3.3	Corine Landcover Raster von Niederösterreich . . . . .	70
3.4	Zuordnung CLC Codes zu Clutter ID . . . . .	71
3.5	Zuordnung Clutter Bezeichnung zu Clutter ID . . . . .	71
3.6	Zuordnung CLC Beschreibung zu Clutter ID . . . . .	71
3.7	Dämpfungsklassen pro Raster . . . . .	73

3.8	Zonale Statistik . . . . .	73
3.9	Dämpfungsklassen pro Gemeinde . . . . .	74
3.10	grobe Landschaftscharakteristik . . . . .	75
3.11	Oberflächenmodell, Geländemodell Vergleich . . . . .	75
3.12	Höhenmodell Österreich . . . . .	76
3.13	Räumlicher Versatz . . . . .	77
3.14	Geländemodell Niederösterreich . . . . .	77
3.15	Neigungsmodell Niederösterreich . . . . .	78
3.16	Pyramiden für Performance Steigerung . . . . .	79
3.17	Resampling Methode beim Pyramiden Bau . . . . .	79
3.18	Berechnung Slope Variability Index in ArcGIS Pro . . . . .	80
3.19	Neigungsvariabilität pro 10m Raster . . . . .	80
3.20	Terrain Ruggedness Index Berechnung . . . . .	82
3.21	Berechnung Terrain Ruggedness Index in ArcGIS Pro . . . . .	82
3.22	Focal Statistik Beispiel . . . . .	82
3.23	Geländerauhigkeitsindex pro 10 Meter Raster . . . . .	83
3.24	ArcGIS Werkzeug Combine . . . . .	85
3.25	Zonale Statistik / Combine Slope CLC . . . . .	86
3.26	Bezugsgröße Puffer . . . . .	86
3.27	Häufigste Kombinierte Neigungsvariabilität und Dämpfung pro Gemeinden . . . . .	87
3.28	Parameter Landschaftsklassifizierung . . . . .	88
3.29	Verknüpfung von Dämpfungsklassen mit TRI Index . . . . .	89
3.30	Statistik Austria 5 Km Raster . . . . .	90
3.31	Zonale Statistik der Kombinierten Dämpfung sowie TRI mit 5Km Raster . . . . .	91
3.32	Landschaftskategorien Zonal . . . . .	91
3.33	Mehrheitsfilter . . . . .	92
3.34	Grenzbereinigung . . . . .	92
3.35	Landschaftskategorien Mehrheitsfilter . . . . .	93
3.36	Reklassifizierung Dämpfung und TRI . . . . .	93
3.37	Berechnung Dämpfungsklassen pro Landschaftskategorie . . . . .	94
3.38	Berechnung TRI Klassen pro Landschaftskategorie . . . . .	94
3.39	Landschaftskategorien Untersuchungsgebiete . . . . .	95
3.40	Landschaftskategorien mit Dämpfungsklassen und Rauigkeitsindex . . . . .	95
3.41	DriveTest Gebiet H . . . . .	97
3.42	Workflow Integration der DriveTest Ergebnisse in HCM Daten . . . . .	101
3.43	Beispiel einer Sektorzuordnung durch DriveTest Daten . . . . .	102
3.44	Sektoren in GDB . . . . .	102
3.45	Parameter der Mobilfunkanalysen . . . . .	103
3.46	Untersuchungsgebiete mit DriveTest in Niederösterreich . . . . .	104
3.47	Modelleinstellungen allgemein . . . . .	105
3.48	Modelleinstellungen Hata parameters . . . . .	106
3.49	Modelleinstellungen Antennenhöhe und Beugungsverlust . . . . .	106
3.50	Beugungsdämpfung . . . . .	107
3.51	Modelleinstellungen Freespace loss . . . . .	107
3.52	Fresnelsche Zone . . . . .	108
3.53	Modelleinstellungen loss offset . . . . .	108
3.54	Modell Verknüpfung der RSRP mit Dämpfung . . . . .	110

3.55	Klasse Raster	110
3.56	Workflow Aufbereitung für R Statistik	111
3.57	Lesen der (.hdr) Raster sowie Umwandlung in Data.Frame	111
3.58	Klasse Data.Frame	112
3.59	Erzeugung von Histogram, Boxplot sowie Gesamtstatistik mit ggplot2	112
3.60	Überprüfung auf Datenformat [Faktor] für Klassendarstellung	112
3.61	Gebiet H 800 nicht kalibriert - kalibriert	114
3.62	Parameter Kalibrierung Gebiet-H 800	114
3.63	Gebiet-H 800 MHz Differenz - nicht kalibriert - kalibriert	115
3.64	Gebiet H 800 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung	116
3.65	Gebiet H 800 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung	116
3.66	Statistik Gebiet-H (800 MHz) nicht kalibriert	117
3.67	Statistik Clutter Name Gebiet-H (800 MHz) nicht kalibriert	117
3.68	Histogram RSRP Gebiet-H 800 nicht kalibriert	118
3.69	Histogram Facet RSRP Gebiet-H 800 nicht kalibriert	118
3.70	Boxplot RSRP Gebiet-H 800 nicht kalibriert	119
3.71	Histogram RSRP Gebiet-H 800 kalibriert	120
3.72	Histogram RSRP 800 kalibriert facet grid	120
3.73	Boxplot RSRP Gebiet-H 800 kalibriert	121
3.74	Gebiet H 800 A Nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ	122
3.75	Gebiet H 800 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ	123
3.76	Gebiet H 800 A Nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR	124
3.77	Gebiet H 800 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR	124
3.78	Gebiet H2 1800 nicht kalibriert - kalibriert	125
3.79	Parameter Kalibrierung Gebiet-H 1800	125
3.80	Gebiet-H 1800 MHz Differenz - nicht kalibriert - kalibriert	126
3.81	Karte Gebiet H2 1800 Teil-A nicht kalibriert Vergleich DGM Landnutzung	127
3.82	Statistik RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert	127
3.83	Histogram RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert	128
3.84	Histogram Facet RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert	128
3.85	Boxplot RSRP Gebiet-H 1800 nicht kalibriert	129
3.86	Karte Gebiet H2 1800 Teil-B kalibriert Vergleich DGM Landnutzung	130
3.87	Statistik RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert	130
3.88	Histogram RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert	131
3.89	Histogram Facet RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert	131
3.90	Boxplot RSRP Gebiet-H 1800 kalibriert	132
3.91	Karte Gebiet H2 1800 Teil-A Nicht kalibriert Vergleich DGM Landnutzung RSRQ	133
3.92	Karte Gebiet H2 1800 Teil-B kalibriert Vergleich DGM Landnutzung RSRQ	133
3.93	Karte Gebiet H2 1800 Teil-A Nicht kalibriert Vergleich DGM Landnutzung SINR	134
3.94	Karte Gebiet H2 1800 Teil-B kalibriert Vergleich DGM Landnutzung SINR	135
3.95	Gebiet H 2100 nicht kalibriert - kalibriert	136
3.96	Parameter Kalibrierung Gebiet-H 2100	136
3.97	Gebiet-H 2100 Differenzraster	137
3.98	Gebiet H 2100 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung	138
3.99	Gebiet H 2100 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung	139
3.100	Histogram RSRP Gebiet-H 2100 nicht kalibriert	140
3.101	Histogram Facet RSRP Gebiet-H 2100 nicht kalibriert	140

3.102	Boxplot RSRP Gebiet-H 2100 nicht kalibriert . . . . .	141
3.103	Histogram RSRP Gebiet-H 2100 kalibriert . . . . .	142
3.104	Histogram Facet RSRP Gebiet-H 2100 kalibriert . . . . .	142
3.105	Boxplot RSRP Gebiet-H 2100 kalibriert . . . . .	143
3.106	Gebiet H 2100 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ . . . .	144
3.107	Gebiet H 2100 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - RSRQ . . . . .	145
3.108	Gebiet H 2100 A nicht kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR . . . .	146
3.109	Gebiet H 2100 B kalibriert - Vergleich DGM Landnutzung - SINR . . . . .	146
3.110	Gebiet-V 800 nicht kalibriert - kalibriert RSRP . . . . .	148
3.111	Gebiet-V 800 Differenz nicht kalibriert - kalibriert . . . . .	149
3.112	Histogram RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert . . . . .	150
3.113	Boxplot RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert . . . . .	151
3.114	Histogram RSRP Gebiet-V 800 kalibriert . . . . .	151
3.115	Boxplot RSRP Gebiet-V 800 kalibriert . . . . .	152
3.116	Gebiet V 800 kalibriert Vergleich Gebäude Dämpfung . . . . .	153
3.117	Gebiet-H 800 3 Basisstationen kalibriert Vergleich DGM Landnutzung . . . . .	154
3.118	Kreuzvalidierung Schema . . . . .	155
3.119	Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V . . . . .	156
3.120	Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Differenz original kalibriert . . . . .	157
3.121	Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V Vergleich DGM Landnutzung . . . . .	158
3.122	Histogram RSRP Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V . . . . .	159
3.123	Boxplot RSRP Gebiet-H 800 kalibriert . . . . .	159
3.124	Workflow Netztestaufbereitung in R . . . . .	160
3.125	Gebiet-H 800 Kreuzkalibriert Gebiet-V Netztest . . . . .	161
3.126	Gebiet-V 800 Kreuzkalibriert Gebiet-H . . . . .	162
3.127	Gebiet-V 800 Kreuzkalibriert Differenz original kalibriert . . . . .	163
3.128	Gebiet-V 800 Kreuzkalibriert Gebiet-H Vergleich DGM Landnutzung . . . . .	164
3.129	Histogram RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert . . . . .	165
3.130	Boxplot RSRP Gebiet-V 800 nicht kalibriert . . . . .	165
6.1	fiktives Antennendiagramm nicht kalibriert . . . . .	176
6.2	reales Antennendiagramm kalibriert . . . . .	176

# Tabellenverzeichnis

3.1	Corine Landcover Nomenklatur . . . . .	68
3.2	Clutter Tabelle Zuordnung . . . . .	72
3.3	Clutter Tabelle Dämpfung . . . . .	72
3.4	Höhenmodell Pixelgrösse . . . . .	76
3.5	Höhenmodell Räumliches Koordinatensystem . . . . .	76
3.6	TRI Klassen . . . . .	84
3.7	Kombination Datensätze . . . . .	84
3.8	Test Bezugsgrößen . . . . .	84
3.9	Kombinierte Corine Landcover (L3) und Neigungsvariabilität . . . . .	85
3.10	Kombination der Dämpfung mit TRI . . . . .	89
3.11	Parameter DriveTest Kalibrierung . . . . .	98

# Literaturverzeichnis

- [HCM, 2010] (2010). HCM Agreement.
- [Dig, 2020] (2020). Digitaler BOS-Funk. [www.digitaler-bos-funk.de](http://www.digitaler-bos-funk.de).
- [Alkansha and et. al., 2014] Alkansha, R. and et. al. (2014). LTE-WiFi Carrier Aggregation for Future 5G Systems: A Feasibility Study and Research Challenges. *Science Direct*.
- [ArcGIS, 2021a] ArcGIS, E. (2021a). Funktionsweise von "Focal Statistics"—Hilfe | ArcGIS for Desktop. [www.arcgis.com/Focal-Statistic](http://www.arcgis.com/Focal-Statistic).
- [ArcGIS, 2021b] ArcGIS, E. (2021b). Funktionsweise von "Zonale Statistiken"—Hilfe | ArcGIS for Desktop. [www.arcgis.com/Zonale-Statistik](http://www.arcgis.com/Zonale-Statistik).
- [ArcGIS, 2021c] ArcGIS, E. (2021c). Raster-Pyramiden—Hilfe | ArcGIS for Desktop. [www.arcgis.com/Raster-Pyramiden](http://www.arcgis.com/Raster-Pyramiden).
- [Benkner, 2007] Benkner, T. (2007). *Grundlagen des Mobilfunks*. Schlembach Fachverl, Wilburgstetten. OCLC: 188161420.
- [Breitbandbüro, 2020] Breitbandbüro (2020). Evaluierungsbericht 2019. [www.bmlrt.gv.at/Evaluierungsbericht2019](http://www.bmlrt.gv.at/Evaluierungsbericht2019).
- [Bundesamt für Landestopografie, 2018] Bundesamt für Landestopografie (2018). Mobilfunk-antenne.
- [Campolo and et. al., 2017] Campolo, C. and et. al. (2017). 5G Network Slicing for Vehicle-to-Everything Services. *IEEE Wireless Communications*.
- [ESRI, 2021] ESRI (2021). FAQ: Wie sieht die Dateistruktur eines Arc/INFO-Grids aus?
- [Geoland, 2021] Geoland, O. (2021). Digitales Geländemodell (DGM) Österreich - data.gv.at. [www.data.gv.at/DGM](http://www.data.gv.at/DGM).
- [Gesbert and Akhtar, 2002] Gesbert, D. and Akhtar, J. (2002). Breaking the barriers of Shannon's capacity: An overview of MIMO wireless systems.
- [Grabler, 2018] Grabler, E. (2018). A new Mobile Network Prediction Model to validate mobile coverage.
- [Grabler, 2019] Grabler, E. (2019). MoNGA a Mobile Network NGA prediction model From peak data rate to subscriber experience.
- [Grohmann et al., 2009] Grohmann, C. H., Smith, M. J., and Riccomini, C. (2009). Surface Roughness of Topography: A Multi-Scale Analysis of Landform Elements in Midland Valley, Scotland.



- [Humboldt, 2021] Humboldt, S. U. (2021). GSP 216 - Lab 12. [www.gsp.humboldt.edu](http://www.gsp.humboldt.edu).
- [ITU-R, 2017] ITU-R (2017). Prediction of clutter loss. *ITU-R (Radiocommunication Sector of ITU)*.
- [Kogelnig, 2012] Kogelnig, C. (2012). *Möglichkeiten Und Methoden Zur Räumlichen Visualisierung von WLAN-Netzwerken Mittels GIS-Gestützter Analyseverfahren*. Dipl, Universität Wien, wien.
- [Kotrba, 2020] Kotrba, D. (2020). Futurezone - internet Österreich. [futurezone.at/netzpolitik](http://futurezone.at/netzpolitik). Eingesehen am 08.01.2021.
- [Lipinski, 2013] Lipinski, K. (2013). CDMA (Code Multiplex). [www.itwissen.info/Kodemultiplex](http://www.itwissen.info/Kodemultiplex).
- [Lipinski, 2016a] Lipinski, K. (2016a). FDM (Frequenzmultiplex). [www.itwissen.info/Frequenzmultiplex](http://www.itwissen.info/Frequenzmultiplex).
- [Lipinski, 2016b] Lipinski, K. (2016b). Fresnel-Zone. [www.itwissen.info/Fresnel-Zone](http://www.itwissen.info/Fresnel-Zone).
- [Lipinski, 2020a] Lipinski, K. (2020a). Dual-Slope-Verfahren. [www.itwissen.info/Dual-Slope-Verfahren](http://www.itwissen.info/Dual-Slope-Verfahren).
- [Lipinski, 2020b] Lipinski, K. (2020b). TDM (Zeitmultiplex). [www.itwissen.info/Zeitmultiplex](http://www.itwissen.info/Zeitmultiplex).
- [Maier, 2021] Maier, T. (2021). Magenta Telekom.
- [Mücher et al., 2010] Mücher, C. A., Klijn, J. A., Wascher, D. M., and Schaminée, J. H. J. (2010). A new European Landscape Classification (LANMAP): A transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes. *Ecological Indicators*, 10(1):87–103.
- [Olaf, 2021] Olaf, H. (2021). Mobilfunk Lexikon | WLAN Begriffe | LTE & UMTS Lexikon | Antennen Glossar. [www.fts-hennig.at/WLAN](http://www.fts-hennig.at/WLAN). Eingesehen am 22.03.2021.
- [Ookla, 2020] Ookla (2020). Futurezone - speedtest. [www.speedtest.net/global-index](http://www.speedtest.net/global-index). Eingesehen am 08.01.2021.
- [Otto and Mühlendahl, 2019] Otto, D. M. and Mühlendahl, P. K. E. (2019). Grundwissen zu Mobilfunk und elektromagnetischen Feldern. [www.allum.de/ElektroMagnetischeFelder](http://www.allum.de/ElektroMagnetischeFelder). Eingesehen am 02.03.2021.
- [Parlamentsdirektion, 2020] Parlamentsdirektion (2020). Häufig gestellte Fragen zu 5G. *Rechts-, Legislativ- & Wissenschaftlicher Dienst*.
- [Pollini, 1996] Pollini, G. P. (1996). Trends in handover design. *IEEE Communications Magazine*, 34(3):82–90.
- [Riley et al., 1999] Riley, S., Degloria, S., and Elliot, S. (1999). A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Internation Journal of Science*, 5:23–27.
- [Rolf, 2015] Rolf, S. (2015). Stand und Perspektiven von LTE in Deutschland. *WIK Diskussionsbeitrag*.

- [Rose, 2014] Rose, D. e. a. (2014). Funknetzplanung für LTE.
- [RTR, 2020] RTR, R. (2020). Frequenzbereiche. [www.rtr.at/Frequenzbereiche](http://www.rtr.at/Frequenzbereiche).
- [Ruszkiczay-Rüdiger et al., 2009] Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Fodor, L., Horváth, E., and Telbisz, T. (2009). Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: A DEM-based morphotectonic analysis in the Central Pannonian Basin, Hungary. *Geomorphology*, 104(3-4):203–217.
- [Sami A, 2013] Sami A, M. (2013). Path Loss Propagation Model Prediction for GSM Network Planning. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, Volume 84 – No 7.
- [Sauter, 2011] Sauter, M. (2011). *Grundkurs mobile Kommunikationssysteme: UMTS, HSDPA und LTE, GSM, GPRS und Wireless LAN*. Studium. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 4., überarb. und erw. aufl edition. OCLC: 694880534.
- [Schellmann, 2018] Schellmann, M. (2018). 5G als Triebkraft für vernetztes autonomes Fahren. *ZE Vrail*.
- [Schiller, 2003] Schiller, J. (2003). *Mobilkommunikation*. Pearson Studium Technische Informatik. Pearson-Studium, München, 2., überarb. aufl edition. OCLC: 248830332.
- [Schnabel, 2021] Schnabel, P. (2021). Dezibel. [www.elektronik-kompndium.de/Dezibel](http://www.elektronik-kompndium.de/Dezibel). Eingesehen am 08.02.2021.
- [Schöne and Wildemann, a] Schöne, S. and Wildemann, M. E. RSRP. [www.lte-anbieter.info/RSRP](http://www.lte-anbieter.info/RSRP). Eingesehen am 07.02.2021.
- [Schöne and Wildemann, b] Schöne, S. and Wildemann, M. E. RSRQ | Bestimmung und Bedeutung. [www.lte-anbieter.info/RSRQ](http://www.lte-anbieter.info/RSRQ). Eingesehen am 07.02.2021.
- [Schöne and Wildemann, c] Schöne, S. and Wildemann, M. E. SINR. [www.lte-anbieter.info/SINR](http://www.lte-anbieter.info/SINR). Eingesehen am 07.03.2021.
- [Shafi, 2017] Shafi, M. (2017). 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice. *IEEE*.
- [Sliuzevicius, 2018] Sliuzevicius, R. (2018). Cellular Expert - Training Materials Workshop course User Workflows.
- [SS7Ware, 2015] SS7Ware (2015). Driving the Internet of Things with carrier aggregation.
- [Statistik Austria, 2021] Statistik Austria, O. (2021). Regionalstatistische Rastereinheiten - data.gv.at. [www.data.gv.at](http://www.data.gv.at).
- [Sulzbacher, 2020] Sulzbacher, M. (2020). 5G-Versteigerung brachte 202 Millionen Euro und schnelles Internet für ländliche Gebiete. [www.derstandard.at/5GVersteigerung](http://www.derstandard.at/5GVersteigerung).
- [Thomas, 2020a] Thomas, S. (2020a). Modulation und dessen verfahren. [www.elektronik-kompndium.de/Modulation](http://www.elektronik-kompndium.de/Modulation). Eingesehen am 14.01.2021.
- [Thomas, 2020b] Thomas, S. (2020b). Multi-User-MIMO. [www.elektronik-kompndium.de/MIMO](http://www.elektronik-kompndium.de/MIMO). Eingesehen am 14.01.2021.

- [Thomas, 2020c] Thomas, S. (2020c). QAM - Quadrature Amplitude Modulation / Quadratur-Amplituden-Modulation. [www.elektronik-kompodium.de/QAM](http://www.elektronik-kompodium.de/QAM). Eingesehen am 14.01.2021.
- [Tomislav and Timotej, 2013] Tomislav, P. and Timotej, V. (2013). Analysis of Surface Roughness. *RMZ - Faculty of Natural Sciences, Department of Geology, University of Ljubljana*, 60:197–204.
- [Wildemann and Maik, 2021] Wildemann, S. and Maik, E. (2021). Alle LTE Kategorien (CAT1 - CAT21) im Vergleich | so schnell ist LTE. [www.lte-anbieter.info](http://www.lte-anbieter.info).
- [Winter, 2014] Winter, A. (2014). dB or not dB? *Rohde&Schwarz*, page 36.
- [Wolff, 2021] Wolff, C. (2021). Free-Space Path Loss - Radartutorial. [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu).
- [Yaqiong and et. al., 2020] Yaqiong, L. and et. al. (2020). Toward Edge Intelligence: Multiaccess Edge Computing for 5G and Internet of Things. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*.