



Dr. Benjamin Winkel  
Radioobservatorium Effelsberg  
Max-Planck-Straße 28  
53902 Bad Münstereifel-Effelsberg

Telefon: 02257 / 301-167  
Fax: 02257 / 301-105  
Email: bwinkel@mpifr.de

B. Winkel/MPIfR, Max-Planck-Str. 28, 53902 Bad Münstereifel

An die

Kreisverwaltung Ahrweiler  
Wilhelmstraße 24-30  
53474 Neuenahr-Ahrweiler

Ihr Zeichen, Ihre Nachricht  
4.5-Im-01/2022-Ke

Unser Zeichen, Unsere Nachricht  
EB 2203a

Telefon  
02257 / 301-167

Datum  
09.03.2022

**Betreff: Errichtung von drei WEA bei Wiesemscheid;  
Schutz des Radioastronomiefunkdienstes am Standort Effelsberg**

Sehr geehrter Frau Kempenich,

haben Sie vielen Dank für Ihr Schreiben vom 23. Februar 2022 bezüglich der Errichtung von Windenergieanlagen (WEA) bei Wiesemscheid und die beigefügten Unterlagen. Das Vorhaben berührt unseren Aufgabenbereich. Die übersandten Unterlagen sind für unsere fachliche Prüfung ausreichend und vollständig. Wir haben die Standorte auf Verträglichkeit mit dem Beobachtungsbetrieb unseres Radioteleskops in Effelsberg geprüft. Die Details entnehmen Sie bitte der angefügten Studie. Wir sind zu folgendem Ergebnis gekommen:

1. Für die avisierten Standorte halten wir eine Störung des Messbetriebs am Observatorium in Effelsberg aufgrund von Eigenemissionen der WEA für unwahrscheinlich, aber nicht ausgeschlossen. Für die jeweiligen Einzelanlagen mit den genannten Nabenhöhen von 130 und 160 m, welche die erlaubten Grenzwerte für Industrieanlagen (CISPR-11 bzw. EN 550011) voll ausschöpfen würden, ergäbe sich rechnerisch eine Verletzung der RAS Leistungsschutzwerte um ca. 11 bis 12 dB (für eine Einzelanlage) bzw. ca. 16 dB (für den gesamten Standort). Da der Messdienst der Bundesnetzagentur jedoch zeigen konnte, dass für typische Anlagen die CISPR-11 Grenzwerte um 20 dB (und möglicherweise auch mehr) unterschritten werden, nehmen wir an, dass auch die geplanten Anlagen die CISPR-11 Grenzwerte, wenn auch nicht um 20 dB, so doch wenigstens um die nötigen 16 dB unterschreiten werden. Die Studie des Messdienstes kann bei Interesse vom Referat 220-2 der Bundesnetzagentur (Ansprechpartner: Herr Dietmar Gaul, Canisiusstr. 21, 55122 Mainz) bezogen werden. Die Studie der BNetzA ist mittlerweile auch in einen technischen Report<sup>1</sup> der europäischen Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation<sup>2</sup> aufgenommen worden. Auf diesem Report basiert auch die von uns verwendete Methodik, um die

<sup>1</sup> ECC Report 321: *Radio frequency test methods, tools and test results for wind turbines in relation to the Radio Astronomy Service*, Oct. 2020; <https://docdb.cept.org/document/15490>

<sup>2</sup> Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (CEPT)

potentiellen Störeinflüsse auf das Radioteleskop abzuschätzen.

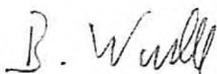
Der Sachverhalt, dass die Anlagen die CISPR-11 Grenzwert unterschreiten müssen, um als verträglich mit unserem Beobachtungsbetrieb zu gelten, sollte in die entsprechenden Auflagen zum Bau der Anlagen aufgenommen werden. Wir schlagen folgenden Passus vor:

*Damit eine Störung des Betriebs am 100-m Radioteleskop bei Effelsberg ausgeschlossen werden kann, müssen die Emissionen der Anlagen im Windpark Wiesemscheid, die in EN550011 (CISPR-11) angegebenen Feldstärkegrenzwerte von 30 dB[ $\mu$ V/m] (unterhalb von 230 MHz) bzw. 37 dB[ $\mu$ V/m] (oberhalb von 230 MHz), um ca. 16 dB unterschreiten, also im Mittel weniger als 14 dB[ $\mu$ V/m] (unterhalb von 230 MHz) bzw. 21 dB[ $\mu$ V/m] (oberhalb von 230 MHz) emittieren. Das Radioobservatorium Effelsberg ist im Wesentlichen finanziert durch Mittel der öffentlichen Hand und ist eine eingetragene Funkstelle im Sinne des BauGB, §35 Abs. 3.*

2. WEA können Radiowellen aus der Umgebung reflektieren oder streuen. Insbesondere die relativ intensiven Aussendungen von Radar oder Richtfunkstrecken sind möglicherweise relevant, insofern sie sich in unmittelbarer Nähe zu den Transmittern befinden oder deren Abstrahlcharakteristik (Antennendiagramm) hohe Verstärkungsfaktoren in Richtung der WEA aufweist. In unserer Studie berechnen wir die maximalen externen Feldstärken, die am Ort der WEA auftreten dürfen, damit eine Störung unseres Messbetriebes durch Reflexionen an den Anlagen ausgeschlossen werden kann. Leider liegen uns solche Feldstärkemessungen für die entsprechenden Gebiete nicht vor, so dass wir zum jetzigen Zeitpunkt keine Bewertung hinsichtlich dieses Aspekts vornehmen können. Wir weisen außerdem darauf hin, dass alle WEA auch für die Planung von neuen Sendeanlagen (wie etwa Richtfunkstrecken) in Verträglichkeitsprüfungen einzubeziehen sind. Hierzu verweisen wir Sie an die Bundesnetzagentur (Referat 226/Richtfunk, Fehrbelliner Platz 3, 10707 Berlin).

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen



---

Dr. Benjamin Winkel

# Studie zur Kompatibilität von WEA mit dem 100-m Radioteleskop (Update)

Benjamin Winkel, Axel Jessner

9. März 2022

## Ergebniszusammenfassung

In der vorgelegten Studie untersuchen wir die Kompatibilität von Windenergieanlagen (WEA) bei Wiesemscheid mit dem Beobachtungsbetrieb am Radioteleskop in Effelsberg. Das Observatorium ist eingetragene Funkstelle in der Kategorie Radioastronomie-dienst (RAS). Wir betrachten in der Studie zum einen die Eigenemissionen der Anlagen, sowie die mögliche Reflexion von anderen Radiowellen an den WEA. Die Rechnungen erfolgten unter der Annahme, dass der Betreiber die maximal erlaubten Emissionen nach CISPR-11 (EN 550011) über die gesamte Bandbreite des RAS Bandes voll ausschöpft. Die Kompatibilitätsrechnungen hängen dabei von der Nabenhöhe der Windkraftanlagen ab, wobei die Geländedämpfung (Streckendämpfung) außerdem frequenzabhängig ist. Es ist natürlich möglich, dass die verursachten Eigenemissionen nur einen Anteil der vollen RAS Bandbreite betreffen. Daher wurde als entgegengesetzter Extremfall ein zweites Szenario untersucht, in dem lediglich ein einzelner CISPR-Detektorkanal (120 kHz unterhalb von 1 GHz, sonst 1 MHz) den vollen CISPR-11 Grenzwert ausschöpft. Zu beachten ist außerdem, dass sich bei Errichtung mehrerer Anlagen an einem Standort die Gesamtemission entsprechend erhöht.

Basierend auf den obigen Annahmen, **ergibt sich für die Eigenemission der neu zu errichtenden WEA ein gewisses Störrisiko**. Bei maximaler Ausschöpfung der CISPR-11 über die gesamte RAS Bandbreite werden die Grenzwerte moderat überschritten. Dennoch sollte einem Bau der WEA nichts im Wege stehen, da der Messdienst der Bundesnetzagentur (BNetzA) Untersuchungen an WEA vorgenommen hat und dabei feststellte, dass für typische Anlagen die breitbandigen Emissionen häufig 20 dB (und möglicherweise auch mehr) unterhalb der CISPR-11-Grenzwerte lagen. Wir gehen davon aus, dass auch die zu bauenden Anlagen die CISPR-11-Norm übererfüllen, wahrscheinlich wenigstens um die benötigten ca. 16 dB. Die Studie der BNetzA ist mittlerweile auch in einen technischen Report<sup>1</sup> der europäischen Regulierungsbehörde für

---

<sup>1</sup>ECC Report 321: *Radio frequency test methods, tools and test results for wind turbines in relation to the Radio Astronomy Service*, Oct. 2020; <https://docdb.cept.org/document/15490>

Post und Telekommunikation<sup>2</sup> aufgenommen worden. Auf diesem Report basiert auch die hier verwendete Methodik, um die potentiellen Störeinflüsse auf das Radioteleskop abzuschätzen.

Für die Bewertung des Reflexionsfalles liegen uns leider nicht ausreichend Informationen zu dem allgemeinen Störpegel an den jeweiligen Standorten vor. Diese werden durch andere Sendeanlagen oder Störaussendungen von Geräten in der Umgebung bestimmt. Beispielsweise könnten die Signale starker RADAR-Sender oder Richtfunkstrecken an den Anlagen gestreut oder reflektiert werden, insofern erstere sich in unmittelbarer Nähe der WEA befinden, oder die Abstrahlcharakteristik (Antennendiagramm) hohe Verstärkungsfaktoren in Richtung der WEA aufweist. Hierzu sollte die Bundesnetzagentur kontaktiert werden, um eine Liste potentiell problematischer Sendeanlagen zu erhalten. Damit könnte der Betreiber mittels geeigneter Simulationen eine Abschätzung der typischen Hintergrund-Feldstärke vornehmen. Alternativ ließe sich dies auch mit einer Messkampagne an den einzelnen Standorten bewerkstelligen. In unserer Studie haben wir die Grenzwerte für die Hintergrundfeldstärken berechnet, so dass die Ergebnisse der Messungen oder Simulationen direkt damit verglichen werden können.

## 1. Einleitung

Die Nutzung von Windkraft ist eine der wenigen nachhaltigen Arten für die Energiegewinnung mit niedrigem CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Angesichts der enormen Herausforderungen des Klimawandels verdienen alle Anstrengungen die erneuerbaren Energien zu nutzen unseren Respekt. Gleichwohl sollten dabei die speziellen Anforderungen von Radioobservatorien nicht aus dem Blick geraten, für die Industrieanlagen in der unmittelbaren und – bei niedrigeren Radiofrequenzen – mittelbaren Umgebung ein gewisses Störpotential bedeuten. Gemessen an der Gesamtgröße der für Windkraft nutzbaren Flächen in Deutschland, ist die Einschränkung durch die Radioobservatorien jedoch vernachlässigbar.

Die Radioastronomie ist eine Grundlagenwissenschaft und befasst sich mit der Untersuchung des nahen und fernen Universums. Viele kosmische Phänomene lassen sich nur mit Radioteleskopen untersuchen. Auch wenn die natürlichen Strahlungsprozesse im Weltall zum Teil enorme Energien freisetzen, so ist durch die große Entfernung das auf der Erde eintreffende Signal extrem abgeschwächt. Entsprechend groß müssen die Empfangsanlagen sein (das Effelsberger Teleskop zählt mit 100-m Durchmesser zu den größten der Welt) und großer Entwicklungsaufwand ist notwendig, um möglichst empfindliche Empfangssysteme zu bauen. Zur Verdeutlichung: ein Mobiltelefon auf dem Mond wäre die vierthellste Radioquelle am Himmel.

Die *International Telecommunication Union* (ITU) hat die Bedeutung des Radioastronomie schon vor langer Zeit erkannt und entsprechende Schutzkriterien erstellt. Diese sind in der ITU-R Recommendation RA.769 beschrieben. Die Verwaltungen der Staaten (in Deutschland die Bundesnetzagentur) sind dafür verantwortlich, die Regeln der ITU in nationale Richtlinien umzusetzen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass das Radioobservatorium Effelsberg eine eingetragene Funkstelle im Sinne

---

<sup>2</sup>Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (CEPT)

Tab. 1: RAS Schutzkriterien nach ITU RA.769 (Auszug).

Frequenz MHz	$\Delta f$ MHz	$T_A$ K	$T_{Rx}$ K	$T_{rms}$ mK	$P_{lim}$ dB <sub>W</sub>	$S_{lim}$ dB <sub>W/m<sup>2</sup></sub>	$E_{lim}$ dB <sub><math>\mu</math>V/m</sub>
325	7	40	60	0.870	-201.0	-189.3	-43.5
408	4	25	60	0.962	-202.9	-189.2	-43.4
611	6	20	60	0.730	-202.2	-185.0	-39.2
1414	27	12	10	0.095	-204.5	-180.1	-34.3
1665	10	12	10	0.156	-206.7	-180.8	-35.0

des BauGB, §35 Abs. 3 ist und damit das Max-Planck-Institut für Radioastronomie als Träger eines öffentlichen Belanges in die Planungsverfahren mit eingebunden ist.

## 2. Vorbetrachtungen

### 2.1. RAS Schutzkriterien gemäß ITU RA.769

Die Schutzkriterien für den Radioastronomie-Dienst (RAS) sind in der ITU Recommendation RA.769 festgelegt. In Tab. 1 sind einige Kenngrößen zitiert. Im Folgenden werden wir die Kompatibilitätsrechnungen exemplarisch für zwei wichtige Beobachtungsbänder bei 610 MHz und 1420 MHz durchführen. Die Grenzwerte für die Leistung ( $P_{lim}$ ), die Strahlungsleistung ( $S_{lim}$ ) und die elektrische Feldstärke ( $E_{lim}$ ) sind dabei jeweils als Integral über die Bandbreite des RAS-Bandes angegeben.

### 2.2. CISPR-11

Als Industrieanlagen müssen WEA gemäß EN 550011 (auch CISPR-11) den folgenden Emissionskriterien (Group 1, Class A) entsprechen:

$$E_{C11} = \begin{cases} 30 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}} & \text{für } f < 230 \text{ MHz} \\ 37 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}} & \text{für } 230 \text{ MHz} < f < 1 \text{ GHz} \end{cases} \quad (1)$$

Oberhalb von 1 GHz sind keine Grenzwerte festgelegt, wir gehen daher von einer konstanten Fortführung der Grenzwerte aus. Zu beachten ist, dass die angegebenen Zahlen für einen sogenannten Quasi-Peak-Detektor (QP) mit einer Bandbreite von  $\Delta f_{C11} = 120 \text{ kHz}$  gelten, gemessen in einer Entfernung von  $d_0 = 30 \text{ m}$  zur Anlage. Für viele andere CISPR-Normen kommt oberhalb von 1 GHz Beobachtungsfrequenz eine andere Detektorbandbreite (1 MHz) zum Einsatz, was wir bei der Extrapolation der Grenzwerte berücksichtigen, indem wir  $E_{C11} = 46 \text{ dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}$  ( $f > 1 \text{ GHz}$ ) setzen. Außerdem sind dann häufig andere Detektortypen in Verwendung (etwa RMS). Die RAS Schutzkriterien passen besser zur Messung mit einem RMS Detektor. Die Umrechnung der Werte zwischen verschiedenen Detektoren ist nicht trivial und hängt empfindlich von der Art des

gemessenen Signals ab. Ohne spezifische Informationen zu den Eigenschaften der ausgesendeten Strahlung der WEA können wir hier nur vom Extremfall ausgehen, dass der RMS Detektor dieselben Werte wie der QP-Detektor anzeigen würde. Für viele Signalarten, insbesondere für stochastische oder Puls-artige Signale, dürfte der AVG Detektor aber geringere Werte anzeigen.

### 3. Berechnung des Minimal-Coupling-Loss (MCL)

Wir werden nun zwei Extremfälle untersuchen. Im *Szenario 1* gehen wir davon aus, dass die WEA die CISPR-Grenzwerte über das gesamte RAS-Band maximal ausschöpft (die Feldstärkegrenzwerte werden also um den Faktor  $\Delta f_{\text{RAS}}/\Delta f_{\text{C11}}$  erhöht). Allerdings ist zu vermuten, dass die WEA eher ein Linienspektrum produzieren, so dass wahrscheinlich nicht alle CISPR Sub-Kanäle im RAS Band belegt sind. Daher betrachten wir in *Szenario 2* den Minimal-Fall eines einzelnen belegten Kanals (mit maximaler erlaubter Störleistung).

Damit der Beobachtungsbetrieb am Radioteleskop Effelsberg nicht gestört wird, muss die notwendige Streckendämpfung<sup>3</sup> (in dB) mindestens dem Unterschied zwischen erlaubter Leistungsemission gemäß RA.769 und der tatsächlich ausgestrahlten Leistung entsprechen,  $P_{\text{em}}$ . Dieser Unterschied wird als *Minimal-Coupling-Loss* (MCL) bezeichnet und es gilt

$$\text{MCL}[\text{dB}] = P_{\text{em}}[\text{dBW}] - P_{\text{RA.769}}[\text{dBW}]. \quad (2)$$

Wir können die zu den Feldstärke-Grenzwerten nach CISPR-11 äquivalente Emissionsleistung leicht berechnen:

$$P_{\text{C11}}[\text{dBW}] = E_{\text{C11}}[\text{dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}] + 20 \log(d_0 [\text{m}]) + 10 \log(N_{\text{dev}}) - 134.8 \quad (3)$$

Um die CISPR-Werte mit den RAS-Kriterien aus Abschnitt 2.1 vergleichen zu können, müssen, wie weiter oben diskutiert, die unterschiedlichen Messbandbreiten für die zwei Szenarien berücksichtigt werden. In Szenario 1 ergibt sich eine Vergrößerung von  $P_{\text{C11}}$  um  $10 \log(\Delta f_{\text{RAS}}/\Delta f_{\text{C11}})$  dB. Bei 610 MHz ergibt dies +17.0 dB und bei 1420 MHz ermitteln wir +14.3 dB, wobei Bandbreiten entsprechend ITU-R RA.769 verwendet wurden (vgl. Tab. 1).

Für den Fall einer Einzelanlage ( $N_{\text{dev}} = 1$ ), sind in Abbildung 1 (oben) die so ermittelten CISPR-11 Leistungswerte, sowie der RAS Grenzwert dargestellt. Der untere Teil des Bildes zeigt die sich ergebenden MCL für beide Szenarien. Der Vollständigkeit halber, sind in Abb. 1 die Werte für alle RAS Frequenzen dargestellt.

---

<sup>3</sup>Als Streckendämpfung bezeichnet man die Abschwächung eines Radiosignales zwischen Sender und Empfänger.

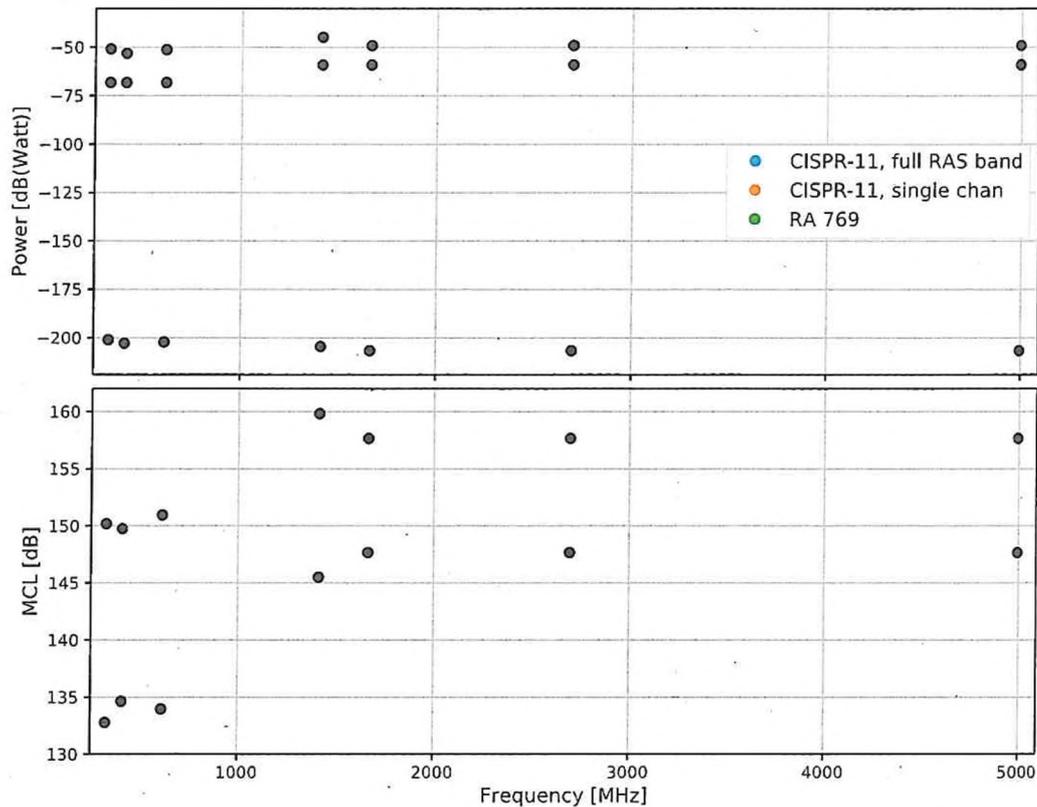


Abb. 1: *Oben*: Umrechnung der CISPR Feldstärken-Emissionsgrenzwerte in Leistungsgrenzwerte für die beiden Szenarien (*full RAS band* (Breitbandiges Störspektrum): der erlaubte CISPR Grenzwert wird im kompletten RAS band voll ausgeschöpft; *single CISPR channel* (Einzelne Störlinien): der erlaubte CISPR Grenzwert wird lediglich in einem Kanal, mit 120 kHz ( $f \leq 1$  GHz) bzw. 1 MHz ( $f > 1$  GHz) Bandbreite, erreicht). Außerdem ist der Leistungsgrenzwert für alle geschützten RAS-Bänder eingezeichnet. *Unten*: Aus der Differenz der CISPR-Kurven und dem RAS-Limit ergibt sich der sogenannte *minimal-coupling-loss* (MCL), also die minimal nötige Streckendämpfung um die Kompatibilität zu gewährleisten.

#### 4. Generische Kompatibilitätsstudie

Die ermittelten MCL müssen nun mit den tatsächlich gegebenen Streckendämpfungen zwischen den ausgewiesenen WEA Standorten und dem Radioteleskop in Effelsberg verglichen werden.

Bevor wir uns jedoch der spezifischen Situation am Radioteleskop Effelsberg widmen, betrachten wir den sogenannten generischen Fall eines beliebigen (isotropen) Empfängers

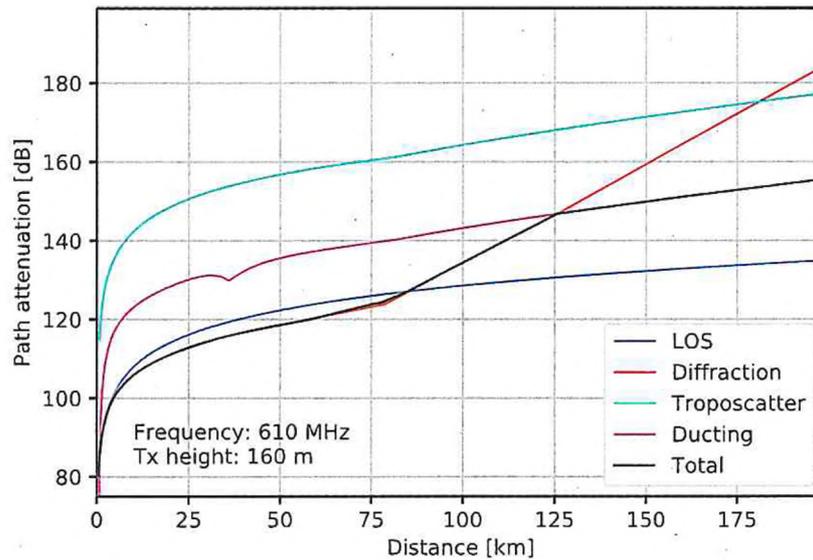


Abb. 2: Beiträge der verschiedenen physikalischen Dämpfungseffekte zur Gesamtstreckendämpfung am Beispiel eines 200 km langen Pfades. Für den hier betrachteten generischen Fall wurden die Geländehöhen auf Null (über Meeresspiegel) gesetzt. Frequenz: 610 MHz. Höhe Empfänger: 50 m. Höhe Sender: 160 m.

auf flacher Erdoberfläche (*flat-Earth*), sprich: alle Geländehöhen werden als identisch Null (über Meeresspiegel, auch „Normalnull“, NN) angenommen. Dies ist natürlich ein unrealistischer Fall und führt im Allgemeinen zu unterschätzten Streckendämpfungen. Dennoch lassen sich an diesem vereinfachten Modell die einzelnen Effekte gut studieren. In der Tat wird für typische Kompatibilitätsuntersuchungen im Rahmen der Arbeit der ITU fast immer nur der generische Fall untersucht.

Zur Abschätzung der Streckendämpfung bei Frequenzen ab ca. 100 MHz hat die ITU die Empfehlung ITU-R P.452 herausgegeben. Darin sind Berechnungsvorschriften (Algorithmen) enthalten, die wir in der Programmiersprache Python implementiert haben. In der vorliegenden Studie verwenden wir die Revision 16 der P.452.

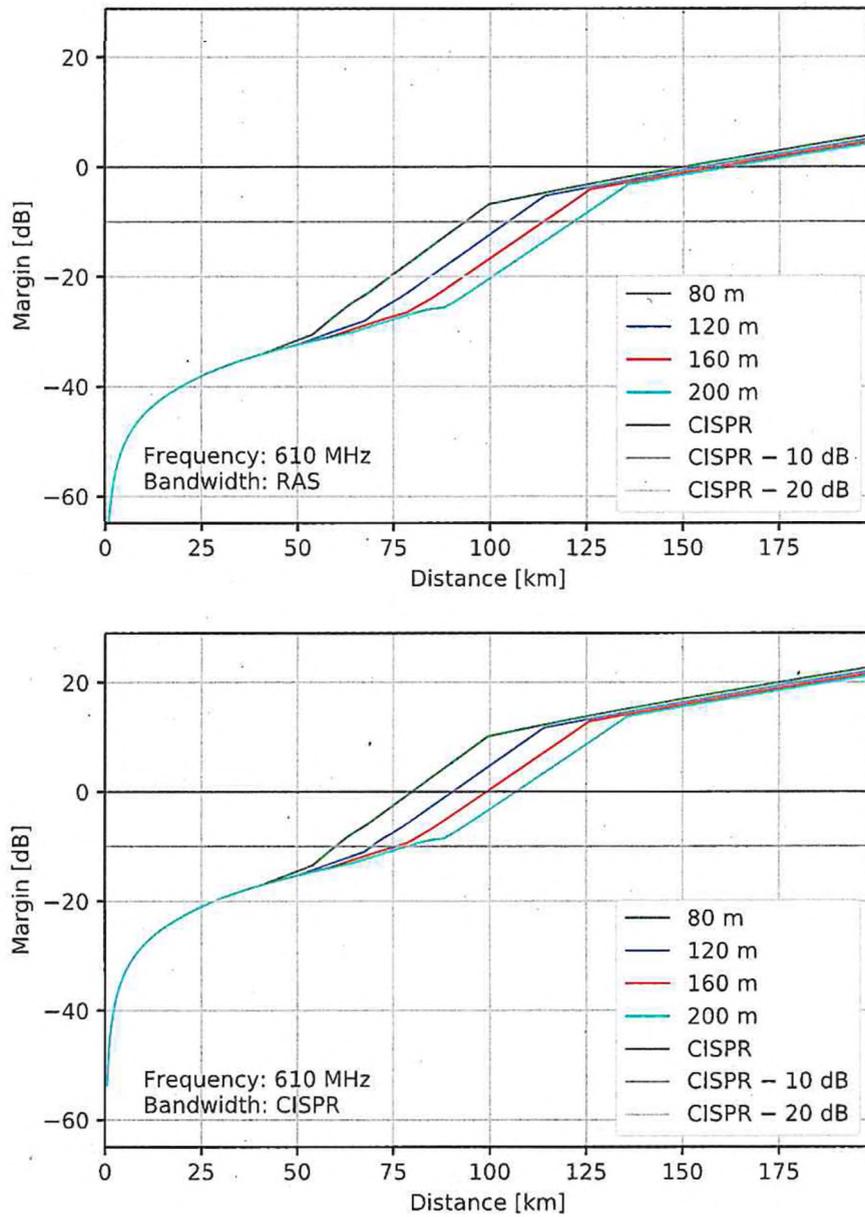
Die Streckendämpfung hängt im Wesentlichen von folgenden physikalischen Effekten ab: (1) Freiraumausbreitungsdämpfung (*Line-of-Sight attenuation*, LOS), (2) Diffraktion (Beugung) an Kanten oder Bergkuppen (3) Streuung an Troposphärenschichten (*Troposcatter*), (4) *Ducting* und Reflexion oder Brechung an Atmosphärenschichten. Außerdem kann die Streuung an Regentropfen eine Rolle spielen, die wir hier jedoch vernachlässigen. Die Dämpfung durch die Luft- und Wassermoleküle in der Atmosphäre ist ebenfalls von Bedeutung und rechnerisch unter den ersten beiden Punkten (LOS, Diffraktion) berücksichtigt.

In Abb. 2 sind die Einzelbeiträge, sowie die Gesamtstreckendämpfung für einen 200 km langen Pfad gezeigt, berechnet für eine Frequenz von 610 MHz. Für die Höhe des Senders

(Empfängers) wurde 50 m (160 m) angenommen. Der starke Knick im Diffraktionsverlauf entsteht durch den Übergang von Sichtverbindung zum sogenannten Transhorizontfall. Es versteht sich von selbst, dass die Dämpfung von der Höhe des Senders und Empfängers abhängt, im Wesentlichen, weil sich dadurch der Ort des Übergangs zwischen Sichtlinien- und Transhorizontverbindung ändert.

Subtrahiert man von der tatsächlichen Streckendämpfung den MCL, so erhält man den sogenannten *Margin* (Schutzabstand). Ist der Margin Null, so ist die Streckendämpfung gleich MCL und die WEA erfüllt gerade noch die RAS Grenzwerte. Bei negativen Margin muss von einer möglichen Störung ausgegangen werden. Ist der Margin positiv, so ist die Kompatibilität gewährleistet.

Mit den Dämpfungswerten aus Abb. 2 können wir die sich resultierenden Margins in Abhängigkeit der Entfernung vom Empfänger darstellen, siehe Abb. 3 und 4. Hierbei wurden Graphen für vier verschiedene Senderhöhen (40, 80, 120 und 160 m) eingetragen. Sobald der Margin Null oder kleiner wird, ist die Kompatibilität nicht mehr gegeben. In der Praxis ist es natürlich durchaus möglich, dass eine WEA die CISPR-Norm nicht voll ausschöpft. Werden beispielsweise die CISPR-Normen um 20 dB unterboten, so sind effektiv erst Margins unterhalb der  $-20$ -dB-Schwelle kritisch einzustufen. Gleichmaßen spielt die Anzahl der WEA an einem Standort eine Rolle. Die obige Rechnung wurde für eine Einzelanlage durchgeführt. Bei mehreren Anlagen am Ort verschlechtert sich der Margin um  $10 \log(N_{\text{dev}})$  dB, beispielsweise entsprechen 10 Anlagen einer Verschlechterung um 10 dB.



**Abb. 3:** Beispiele für die sich ergebenden Margins im generischen Fall (flat-Earth) bei 610 MHz. Die Höhe des Empfängers ist 50 m, und es sind die Kurven für vier verschiedene Senderhöhen gezeigt. Im oberen Teil ist der Margin für das 1. Szenario (Störemission über volle RAS Bandbreite) dargestellt, im unteren Teil für das 2. Szenario (Störemission in einem einzelnen CISPR-Kanal mit 120 kHz Bandbreite).

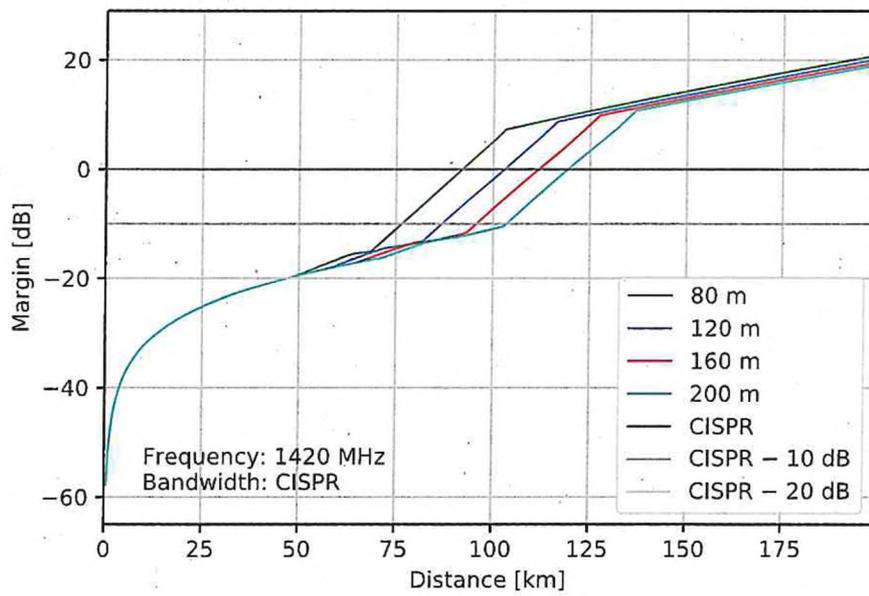
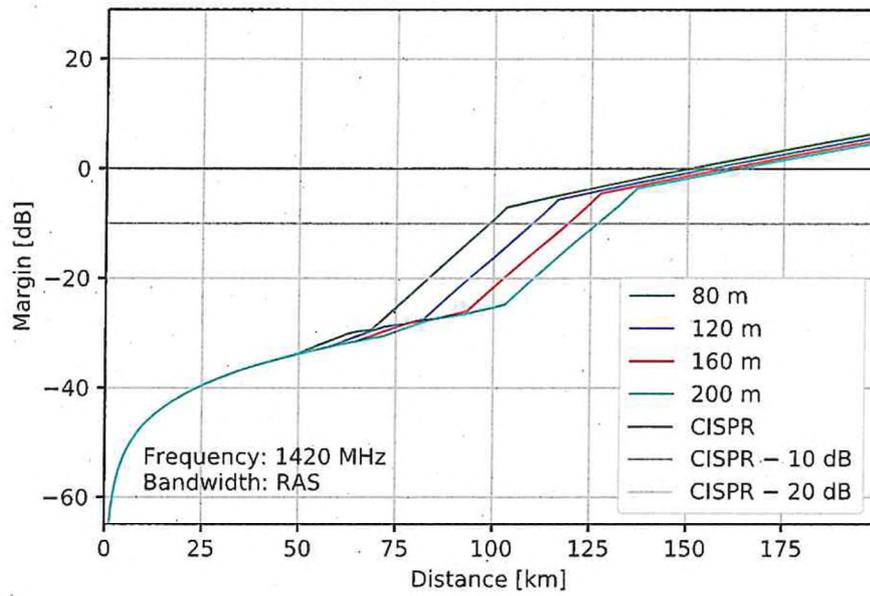


Abb. 4: Wie Abb. 3, für eine Frequenz von 1420 MHz. Die verwendete CISPR-Kanalbreite beträgt hier 1 MHz.

## 5. Kompatibilität der WEA mit dem Radioteleskop in Effelsberg

Der wesentliche Unterschied der tatsächlichen Situation am Radioobservatorium Effelsberg zum generischen Fall besteht in dem Vorhandensein einer Mittelgebirgslandschaft (Eifel), welche einen zusätzlichen natürlichen Schutz vor Radiointerferenzen bietet. Das Radioteleskop ist in ein Tal eingebettet, so dass das unliegende Terrain die erste Beugungskante nah an das Observatorium bringt. Als Ergebnis ist die typische Streckendämpfung sehr viel größer als im generischen Fall und die nötigen Schutzabstände werden entsprechend geringer.

Wie vorher berechnen wir die tatsächlichen Streckendämpfungen gemäß der Empfehlungen der ITU (ITU-R P.452). Um die Geländetopographie (in Form eines Höhenprofils zu jedem Punkt im Umkreis des Teleskops) berücksichtigen zu können, verwenden wir topographische Höhendaten, die freundlicherweise von den Bundesländern NRW<sup>4</sup> und Rheinland-Pfalz<sup>5</sup> zur Verfügung gestellt wurden, jeweils unter der "Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0"<sup>6</sup>. Diese Daten basieren auf sogenannten *Light Detection and Ranging* (Lidar), also Entfernungsmessungen mittels gepulstem Laserlicht von Flugzeugen aus. Diese Daten haben eine bessere Genauigkeit als beispielsweise solche der SRTM Space Shuttle Mission<sup>7</sup>. Für jede der beiden betrachteten Frequenzen muss jeweils eine Dämpfungskarte pro betrachteter WEA-Nabenhöhe (Senderhöhe) berechnet werden. Die beiden Detektorbandbreiten (Szenarien 1 und 2) spielen hier noch keine Rolle.

Zusammen mit den beiden Szenarien aus Abschnitt 3 ergeben sich somit verschiedene Fälle<sup>8</sup>. Exemplarisch ist in Abb. 5 die Dämpfungskarte für die Senderhöhe von 130 m und Frequenz 610 MHz dargestellt, die restlichen Fälle finden sich im Anhang. Wie man sieht, gibt es in der Karte riesige Unterschiede in den Dämpfungen von mehr als 100 dB (entspricht einem Faktor von 10 Mrd. in der eingehenden Störsignalintensität). In den Dämpfungskarten sind die vorgesehenen WEA-Standorte mit Pfeilen markiert. Da für die untersuchten Standorte unterschiedliche Nabenhöhen vorgesehen sind, haben wir in der Karte jeweils diejenigen WEA mit weißen Pfeilen versehen, die zur gerade betrachteten Nabenhöhe passen, während die anderen Standorte zwar ebenfalls eingezeichnet sind, aber mit grauen Pfeilen.

Subtrahiert man von der tatsächlichen Streckendämpfung den MCL, so erhält man den sogenannten *Margin* (Schutzabstand). Ist der Margin Null, so ist die Streckendämpfung gleich MCL und die WEA erfüllt gerade noch die RAS Grenzwerte. Bei negativen Margin muss von einer möglichen Störung ausgegangen werden. Ist der Margin positiv, so ist die Kompatibilität gewährleistet. Es sei aber nochmal darauf hingewiesen, dass die Rechnung für eine Einzelanlage durchgeführt wurde. Bei mehreren WEA an einem Standort

<sup>4</sup><https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/geobasis/dgm/dgm1/>

<sup>5</sup><https://lvermgeo.rlp.de/de/geodaten/opendata/>

<sup>6</sup><https://www.govdata.de/dl-de/by-2-0>

<sup>7</sup>Dies ist eine Radarvermessung der Erdoberfläche mit einer Auflösung von ca. 100 m×100 m.

<sup>8</sup>Die Dämpfungskarten selbst sind natürlich unabhängig vom gewählten Szenario, sondern nur von der WEA-Höhe.

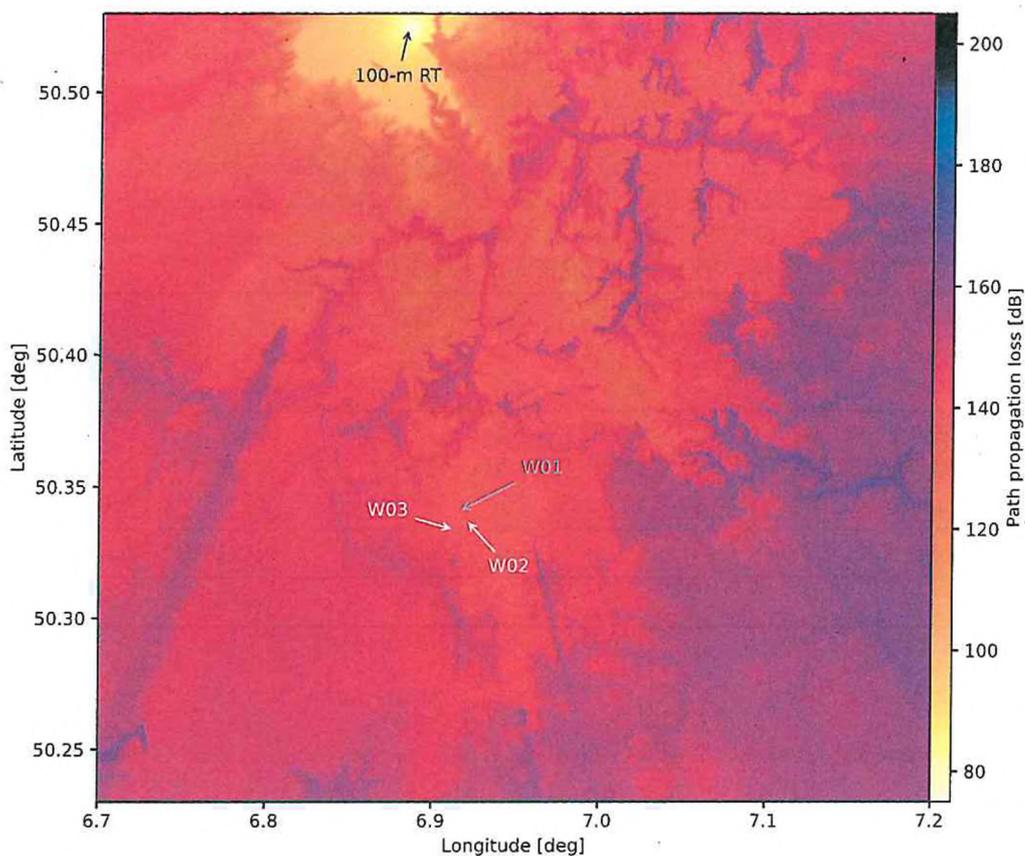


Abb. 5: Beispiel für eine Streckendämpfungskarte für eine Nabenhöhe von 130 m bei der Frequenz 610 MHz. Die Pfeile zeigen auf die avisierten WEA-Standorte bei eben dieser Nabenhöhe. Zur Übersicht haben wir aber auch den Standort für die Nabenhöhe mit 160 m markiert (grauer Pfeil). (W – Wiesemscheid)

verringert sich der Margin um  $10 \log(N_{\text{dev}})$  dB. Mit anderen Worten, je höher der Margin ist, desto mehr Anlagen könnten errichtet werden, ohne die Verträglichkeit zu gefährden.

In Abb. 6 ist der Margin als Konturkarte dargestellt (wieder für die Nabenhöhe 130 m und Frequenz 610 MHz; die anderen Karten finden sich im Anhang). Hierbei wurde mit einem segmentierten Farbschema gearbeitet, welches Zwischenfarbtöne vernachlässigt, aber ein leichteres Ablesen bestimmter Schwellwerte erlaubt. Die roten und orangefarbenen Gebiete markieren kritische Bereiche, während Farben im grünen Spektrum eher unbedenklich sind. Werden die CISPR-Grenzwerte um 10 dB (20 dB) unterschritten (also übererfüllt), sind auch die Gebiete, die mit hellem (dunklem) Orange markiert sind, verträglich einzustufen. Natürlich spielt auch hier wieder eine Rolle, ob mehr als eine Anlage am Standort errichtet würde. Beispielsweise müsste bei 10 Anlagen (entspricht einer um 10 dB erhöhten Emissionsleistung) die nächst-schlechtere Farbkategorie benutzt

**Tab. 2:** Margins für die Frequenz 611 MHz unter Berücksichtigung der beiden Szenarien (Szenario 1: *RAS BW*, also volle RAS-Bandbreite mit RMS-Detektor; Szenario 2: *CISPR BW*, d.h. Grenzwert für eine Störung in einem einzigen 120-kHz-breiten Kanal, ebenfalls mit RMS-Detektor).

Standort	ID	Länge	Breite	Höhe	Dämpfung	Margin RAS BW	Margin CISPR BW
		deg	deg	m	dB	dB	dB
Wiesemscheid	02	6.9194	50.3376	130	139.7	-11.2	5.8
Wiesemscheid	03	6.9128	50.3337	130	139.4	-11.5	5.5
Wiesemscheid	01	6.9145	50.3405	160	139.0	-12.0	5.0
Aggregiert						-16.3 dB	0.6 dB
MCL						150.9 dB	134.0 dB

**Tab. 3:** Margins für die Frequenz 1414 MHz unter Berücksichtigung der beiden Szenarien (Szenario 1: *RAS BW*, also volle RAS-Bandbreite mit RMS-Detektor; Szenario 2: *CISPR BW*, d.h. Grenzwert für eine Störung in einem einzigen 1-MHz-breiten Kanal, ebenfalls mit RMS-Detektor).

Standort	ID	Länge	Breite	Höhe	Dämpfung	Margin RAS BW	Margin CISPR BW
		deg	deg	m	dB	dB	dB
Wiesemscheid	02	6.9194	50.3376	130	150.7	-9.1	5.2
Wiesemscheid	03	6.9128	50.3337	130	150.4	-9.4	4.9
Wiesemscheid	01	6.9145	50.3405	160	150.0	-9.8	4.5
Aggregiert						-14.2 dB	0.1 dB
MCL						159.8 dB	145.5 dB

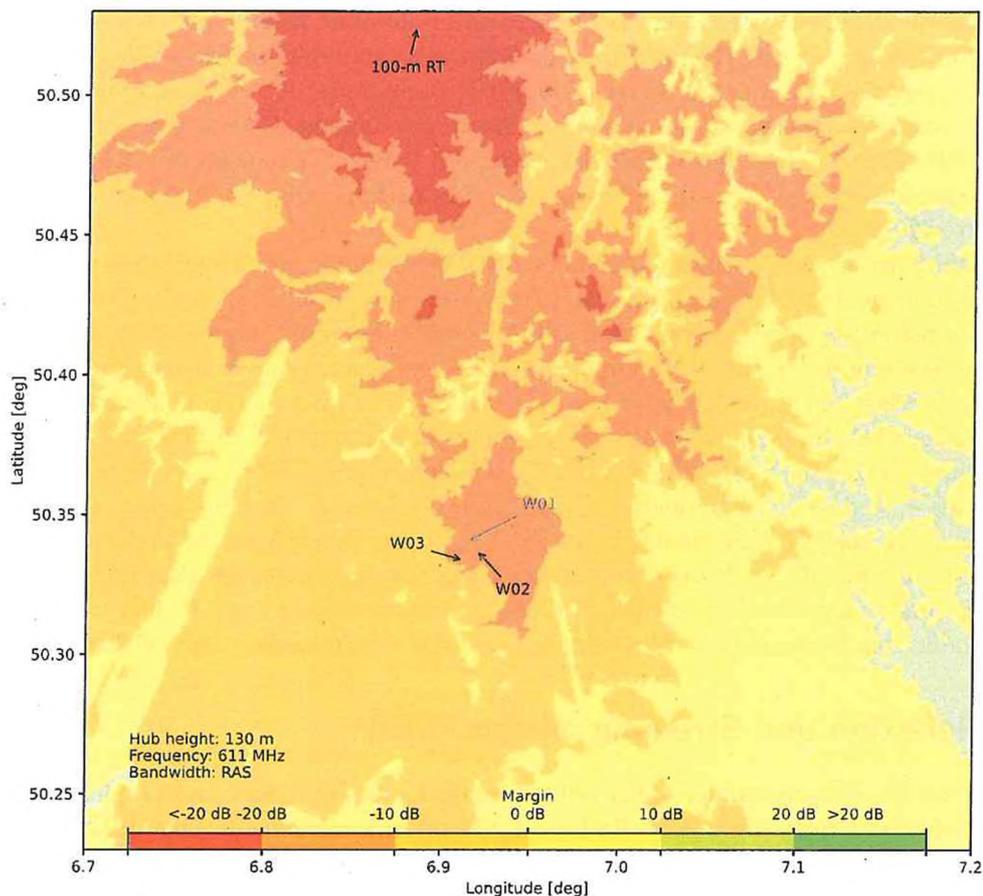


Abb. 6: Beispiel für eine Margin-Konturkarte für eine Nabenhöhe von 130 m bei der Frequenz 610 MHz unter Berücksichtigung des 1. Szenario. Die Pfeile zeigen auf die avisierten WEA-Standorte bei eben dieser Nabenhöhe. Zur Übersicht haben wir aber auch den Standort für die Nabenhöhe mit 160 m markiert (grauer Pfeil). (W – Wiesemscheid)

werden (etwa hellgrün statt gelb). Die Pfeile markieren wieder die avisierten Standorte der WEA, welche der Übersichtlichkeit halber auch mit entsprechenden Zahlenwerten für Streckendämpfung und Margin in den Tabellen 2 (610 MHz) und 3 (1420 MHz) aufgeführt sind. Um die Arbeit mit den Konturkarten zu erleichtern, stellen wir außerdem sogenannte kmz-Dateien für gängige GIS-Software (z.B. Google Earth) zur Verfügung.

Wenn keine Informationen zu den tatsächlichen Emissionen der WEA vorliegen, sollte zunächst vom *worst-case* ausgegangen werden (610 MHz, 1. Szenario: Störung über volle RAS Bandbreite mit maximal erlaubter Intensität nach CISPR-11). Dann sind rote und orangefarbene Gebiete als inkompatibel mit dem Beobachtungsbetrieb in Effelsberg anzusehen. Wenn durch Messungen an den ins Auge gefassten Anlagentypen bekannt

ist, dass die WEA die CISPR-11-Grenzwerte unterschreiten, kann man entsprechend andere Farbkategorien zur Bestimmung der Schutzabstände heranziehen. Gleichmaßen könnte man die Karten des 2. Szenarios (CISPR-Bandbreite: 120 kHz) verwenden, wenn es sich bekanntermaßen um schmalbandige Störungen handelt. Gegebenenfalls wären die 1420 MHz-Karten (dann mit CISPR-Bandbreite: 1 MHz) zu benutzen, für den (eher unwahrscheinlichen) Fall, dass die Störungen bei 610 MHz geringere Signalpegel aufweisen als bei 1420 MHz.

Anhand der ermittelten Werte in den beiden Tabellen lässt sich leicht ablesen, dass für alle Standorte eine Überschreitung der Grenzwerte um jeweils ca. 11-12 dB im 1. Szenario gegeben ist. Berücksichtigt man alle Anlagen in Summe („aggregiert“), ergibt sich rechnerisch eine Überschreitung um ca. 16 dB. Diese Berechnungen fußen aber auf den maximal erlaubten Emissionswerten nach CISPR-11. Nach neueren Erkenntnissen des Messdienst der Bundesnetzagentur (Hasenpusch & Fleckenstein, 2017)<sup>9</sup> unterschreiten moderne Anlagen die CISPR-11-Werte bei entsprechender Ausführung sogar noch um bis zu 20 dB<sup>10</sup>, so dass unter Berücksichtigung aller Aspekte eine Störung des Messbetriebes in Effelsberg eher unwahrscheinlich ist. Die Studie der BNetzA ist mittlerweile auch in einen technischen Report<sup>11</sup> der europäischen Regulierungsbehörde für Post und Telekommunikation<sup>12</sup> aufgenommen worden. Auf diesem Report basiert auch die hier verwendete Methodik, um die potentiellen Störeinflüsse auf das Radioteleskop abzuschätzen.

## 6. Reflexion und Streuung an den WEA

Nicht nur die Emissionen der WEA selbst, sondern auch Reflexionen von anderen Funkdiensten in der Umgebung (z.B. Radar oder Richtfunkstrecken) an den WEA könnten für den Beobachtungsbetrieb in Effelsberg problematisch sein, wenn sich diese in unmittelbarer Umgebung einer WEA befinden oder mit starker Richtwirkung (Antennendiagramm) die WEA anleuchten. Da uns keine weiteren Informationen zu den typischen Umgebungsfeldstärken,  $E_{env}$ , in der betrachteten Region vorliegen, berechnen wir hier lediglich die Grenzfeldstärken  $E_{env}^{lim}$ , die nicht überschritten werden sollten, um weitere Untersuchungen in diesem Kontext zu erleichtern.

Um die Reflexionseigenschaften einer WEA abzuschätzen, machen wir folgende vereinfachende Annahmen: (1) die Anlage sei in Richtung Radioteleskop ausgerichtet (2) die effektive Reflexionsfläche,  $A_{eff}$  sei das Produkt aus geometrischer Fläche,  $A_{eff}$  und dem Reflexionskoeffizienten,  $\eta$  und (3) die Reflexionseigenschaften seien konstant über die Höhe der Anlage.

Beispielhaft schätzen wir für eine Anlage der Höhe 149 m folgende Größen ab:

---

<sup>9</sup>Eine Kopie des Berichtes kann über die Bundesnetzagentur (Referat 220, Herr Dietmar Gaul) bezogen werden.

<sup>10</sup>Möglicherweise auch mehr; dies lässt sich aber durch die physikalisch begrenzte Empfindlichkeit des verwendeten Messverfahrens aber kaum noch mit ausreichender Genauigkeit bestimmen.

<sup>11</sup>ECC Report 321: *Radio frequency test methods, tools and test results for wind turbines in relation to the Radio Astronomy Service*, Oct. 2020; <https://docdb.cept.org/document/15490>

<sup>12</sup>Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (CEPT)

$w_{\text{bas}} = 6 \text{ m}$	Breite des Turms am Fundament
$w_{\text{gen}} = 3 \text{ m}$	Breite des Turms an der Nabe
$h_{\text{sup}} = 149 \text{ m}$	Höhe des Turms
$\eta_{\text{sup}} = 90\%$	Reflexionskoeffizient des Turms
$r_{\text{rot}} = 58 \text{ m}$	Rotor-Radius
$f_{\text{rot}} = 10\%$	Flächenfüllfaktor des Rotors
$\eta_{\text{rot}} = 12\%$	Reflexionskoeffizient des Rotors

Die geometrische Fläche des Turms ist

$$A_{\text{sup}} = \frac{1}{2}(w_{\text{gen}} + w_{\text{bas}})h_{\text{sup}} \quad (4)$$

und für den Rotor ergibt sich

$$A_{\text{rot}} = f_{\text{rot}}\pi r_{\text{rot}}^2 \quad (5)$$

Die effektive Reflexionsfläche ist

$$A_{\text{eff}} = \eta_{\text{sup}}A_{\text{sup}} + \eta_{\text{rot}}A_{\text{rot}} \approx 429 \text{ m}^2 \quad (6)$$

Gehen wir davon aus, dass diese Fläche mit einer bestimmten Leistungsflussdichte,  $S_{\text{env}}$ , der Umgebung bestrahlt wird, so ist die reflektierte Leistung (in Richtung Effelsberg)

$$P_{\text{ref}} = S_{\text{env}}A_{\text{eff}} \quad (7)$$

Die Leistungsflussdichte kann in Feldstärke umgerechnet werden, mittels

$$S \equiv |\vec{S}| = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}|\vec{E}|^2 = \frac{E^2}{R_0} \quad (8)$$

Wenn wir nun fordern, dass die reflektierte Leistung am Ort des Radioteleskops die RA.769-Leistungsgrenzwerte,  $P_{\text{lim}}$ , nicht überschreiten darf, so folgt

$$S_{\text{lim}}^{\text{env}} = \frac{P_{\text{lim}}L_{\text{path}}}{N_{\text{dev}}A_{\text{eff}}} \quad (9)$$

$$(E_{\text{lim}}^{\text{env}})^2 = R_0 \frac{P_{\text{lim}}L_{\text{path}}}{N_{\text{dev}}A_{\text{eff}}} \quad (10)$$

bzw. in logarithmischer Form

$$S_{\text{lim}}^{\text{env}}[\text{dB}_{\text{W}/\text{m}^2}] = P_{\text{lim}}[\text{dB}_{\text{W}}] + L_{\text{path}}[\text{dB}] - 10 \log N_{\text{dev}} - 10 \log A_{\text{eff}}[\text{m}^2] \quad (11)$$

$$E_{\text{lim}}^{\text{env}}[\text{dB}_{\mu\text{V}/\text{m}}] = S_{\text{lim}}^{\text{env}}[\text{dB}_{\text{W}/\text{m}^2}] + 145.8, \quad (12)$$

wobei  $L_{\text{path}}$  die Streckendämpfung bei der entsprechenden Beobachtungsfrequenz sei.

Im Unterschied zum Fall der Eigenemission der Anlagen ist es wenig sinnvoll die kleineren Bandbreiten des 2. Szenarios bei der Betrachtung der Reflexion in Erwägung zu ziehen. Alle uns bekannten relevanten festen Funkdienste arbeiten mit relativ großen Bandbreiten, so dass wir im Folgenden nur die Resultate des 1. Szenarios diskutieren,

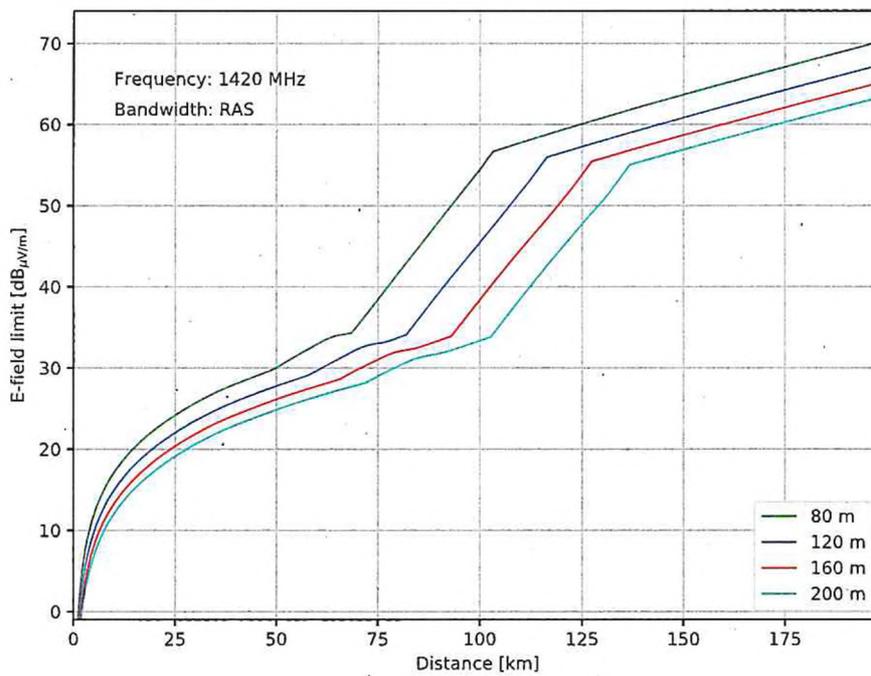
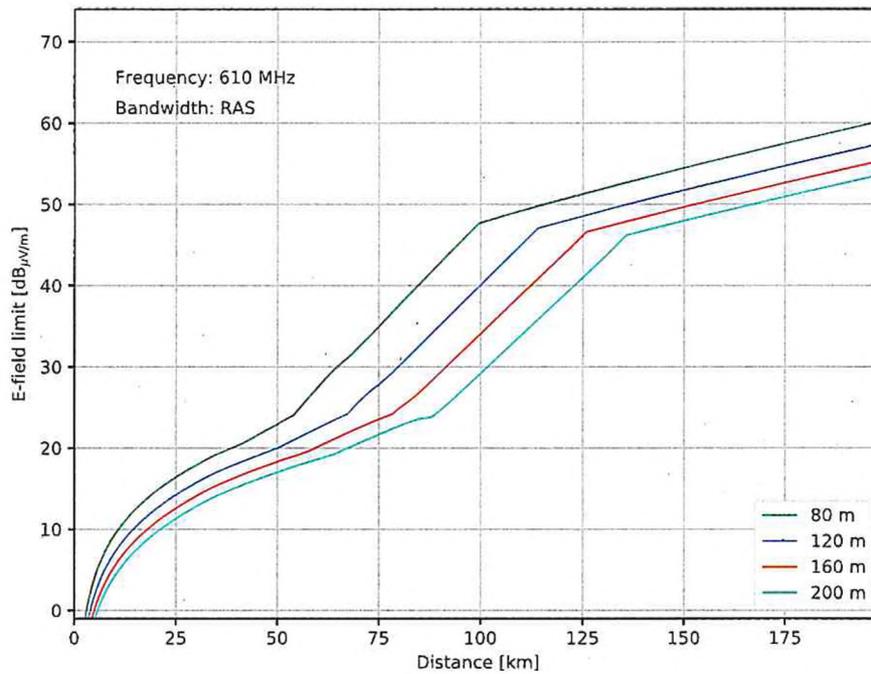


Abb. 7: Beispiele für die sich ergebenden Feldstärkegrenzwerte im generischen Fall (flat-Earth) bei 610 MHz (oben) und 1420 MHz (unten). Die Höhe des Empfängers ist 50 m, und es sind die Kurven für vier verschiedene Senderhöhen gezeigt.

Tab. 4: Maximal erlaubte Umgebungsfeldstärken,  $E_{\text{env}}^{\text{lim}}$ , für die Frequenz 611 MHz berechnet für die CISPR-11 Detektor-Bandbreite (120 kHz).

Standort	ID	Länge deg	Breite deg	Höhe m	Dämpfung dB	$E_{\text{env}}^{\text{lim}}$ dB $_{\mu\text{V}/\text{m}}$
Wiesemscheid	02	6.9194	50.3376	130	139.7	39.8
Wiesemscheid	03	6.9128	50.3337	130	139.4	39.6
Wiesemscheid	01	6.9145	50.3405	160	139.0	38.6

Tab. 5: Maximal erlaubte Umgebungsfeldstärken,  $E_{\text{env}}^{\text{lim}}$ , für die Frequenz 1414 MHz berechnet für die CISPR-11 Detektor-Bandbreite (1 MHz).

Standort	ID	Länge deg	Breite deg	Höhe m	Dämpfung dB	$E_{\text{env}}^{\text{lim}}$ dB $_{\mu\text{V}/\text{m}}$
Wiesemscheid	02	6.9194	50.3376	130	150.7	51.2
Wiesemscheid	03	6.9128	50.3337	130	150.4	50.9
Wiesemscheid	01	6.9145	50.3405	160	150.0	49.9

die sich durch Integration über das volle RAS Band ergeben. In Abb. 7 wurden die sich ergebenden Feldstärkegrenzwerte für den generischen Fall aus Abschnitt 4 bestimmt, indem die entsprechende Streckendämpfung aus Abb. 2 in obige Formeln eingesetzt wurde.

In den Tabellen 4 (610 MHz) und 5 (1420 MHz) haben wir für alle möglichen Standorte die sich ergebenden Werte eingetragen. Hierbei wurden die sich ergebenden Feldstärkegrenzwerte von der RAS Bandbreite auf die CISPR-11 Detektorkopfbandbreite von 120 kHz ( $f \leq 1$  GHz) bzw. 1 MHz ( $f > 1$  GHz) umgerechnet, um die Arbeit mit den angegebenen Werten zu vereinfachen.

Da uns keine Informationen zu typischen Feldstärke-Werten an den potentiellen WEA-Standorten vorliegen, können wir hier noch keine Bewertung zur Verträglichkeit vornehmen. Die in den Tab. 4 und 5 aufgeführten Grenzwerte lassen sich aber direkt mit Messungen vergleichen, die ein künftiger Betreiber am Standort vornehmen könnte. Dabei sollte mindestens für 24 h gemessen werden, um ein statistisch signifikantes Ergebnis zu erhalten. Es könnten alternativ auch Simulationen durchgeführt werden, in denen für alle bekannten Nutzer des Radiospektrums in der Umgebung die jeweiligen zu erwartenden Feldstärken am Ort der WEA bestimmt werden, die in der Summe die berechneten Grenzwerte nicht überschreiten sollten.

Aus unserer Sicht kann das Band bei 1420 MHz von Untersuchungen bzgl. Reflexionen ausgespart werden, um den Aufwand etwas geringer zu halten. Beim 1420-MHz-Band handelt es sich um ein sogenanntes passives Band, in dem jegliche Emissionen untersagt sind<sup>13</sup>, so dass eigentlich keine festen Funkdienste existieren dürften, die hier zu

<sup>13</sup>In der deutschen Zuweisungstabelle, dem sog. Frequenznutzungsteilplan, ist der Eintrag 1420–1427 MHz mit der Fußnote D340 versehen: „In den folgenden Frequenzbereichen sind Ausstrahlungen nicht zugelassen [...]“.

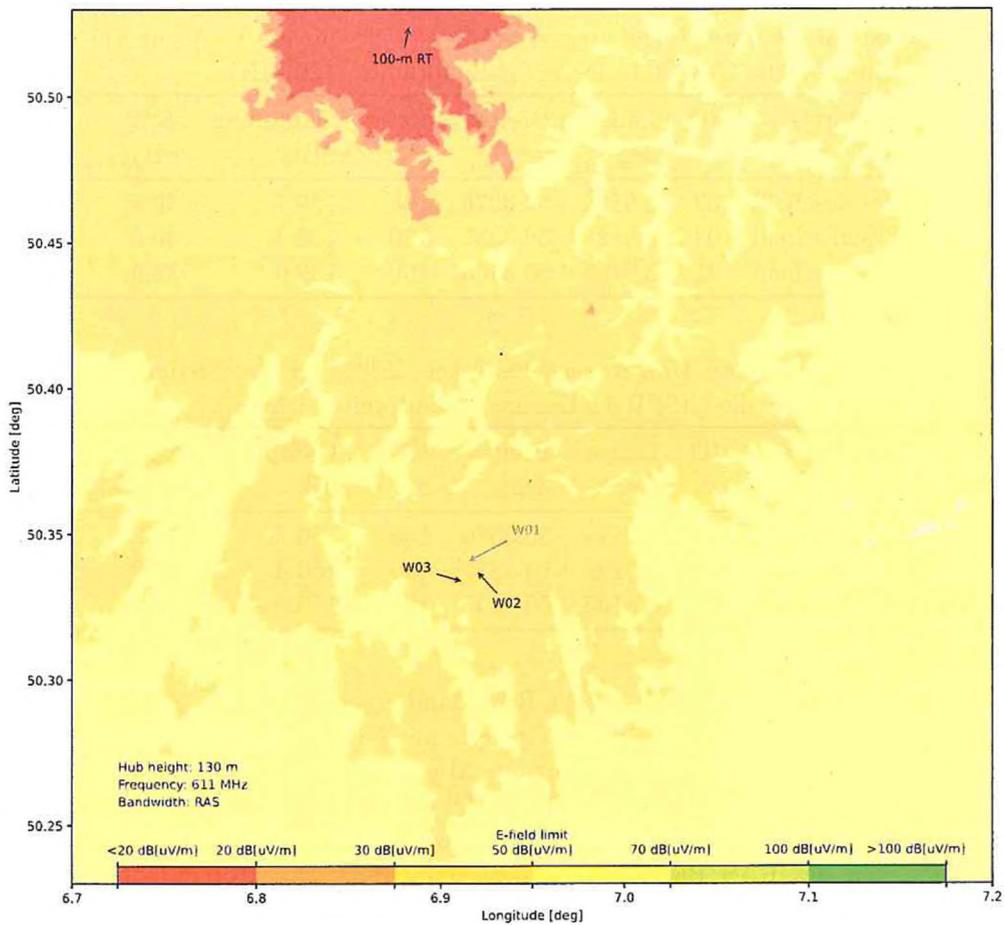


Abb. 8: Beispiel für eine Feldstärkegrenzwert-Konturkarte für eine Nabenhöhe von 130 m bei der Frequenz 610 MHz.

Problemen führen können.

In Abb. 8 haben wir analog zu den Margin-Konturkarten die Feldstärkegrenzwerte in der Region um das Radioteleskop dargestellt.

A. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 610 MHz

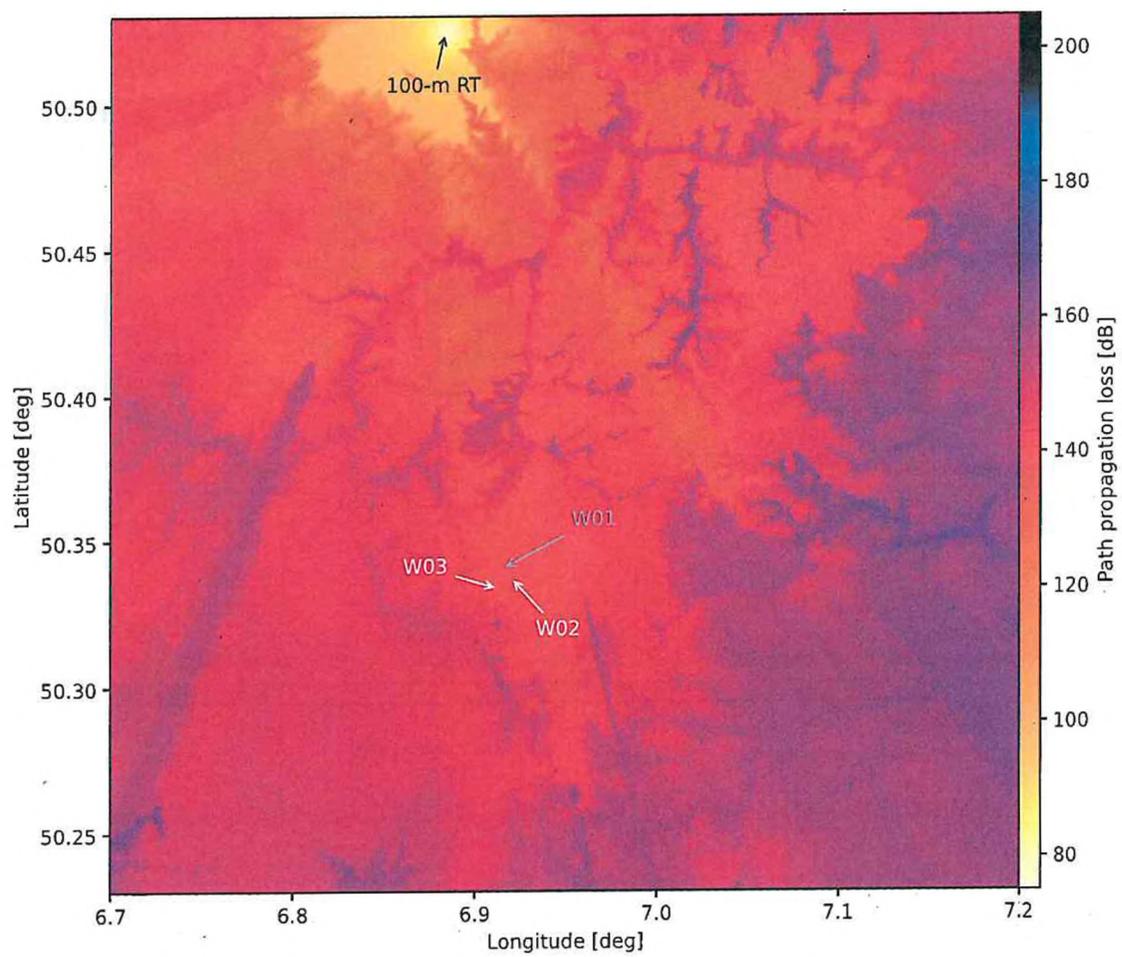


Abb. 9: Streckendämpfungskarte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 610 MHz.

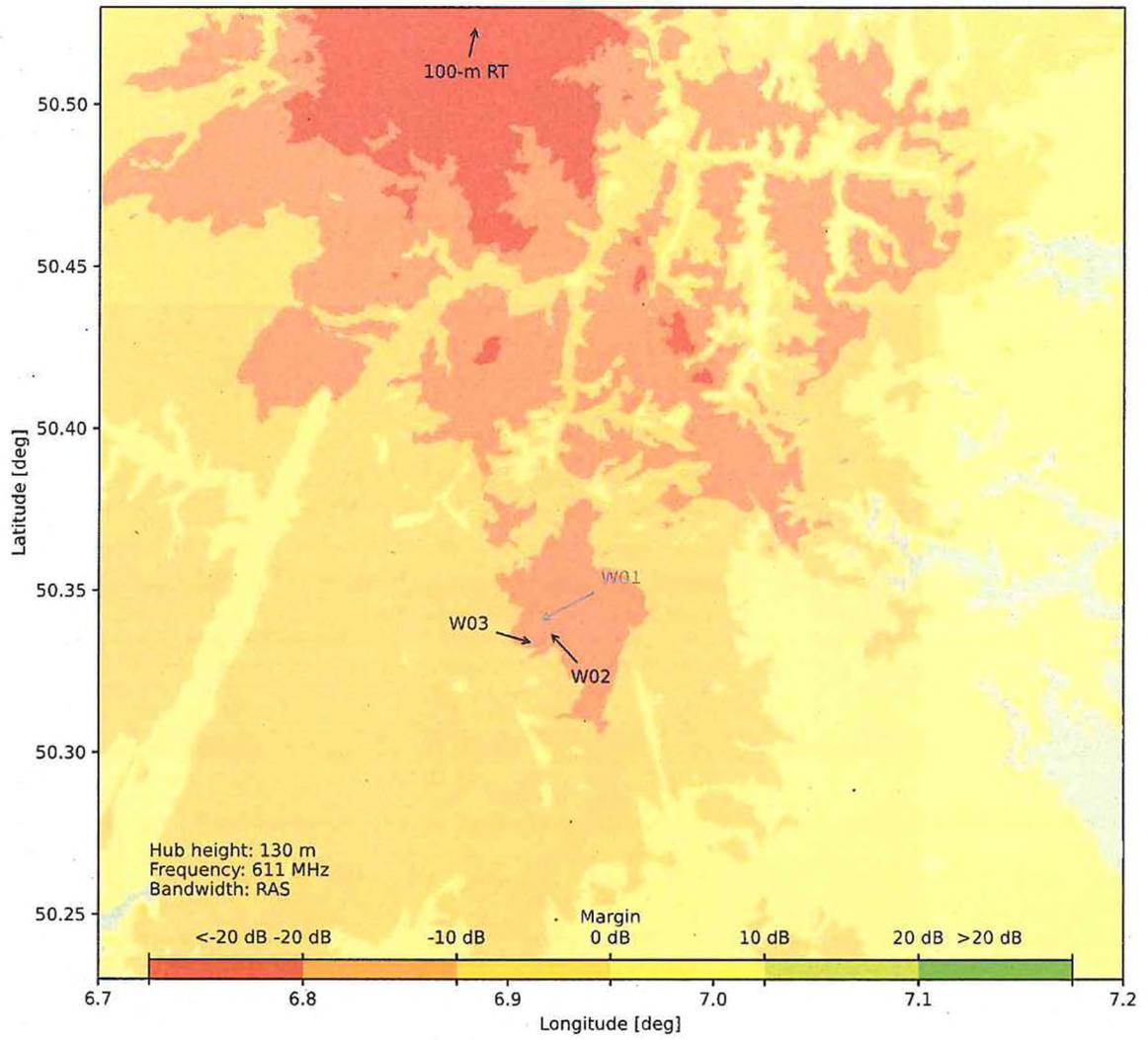


Abb. 10: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 610 MHz, Szenario 1.

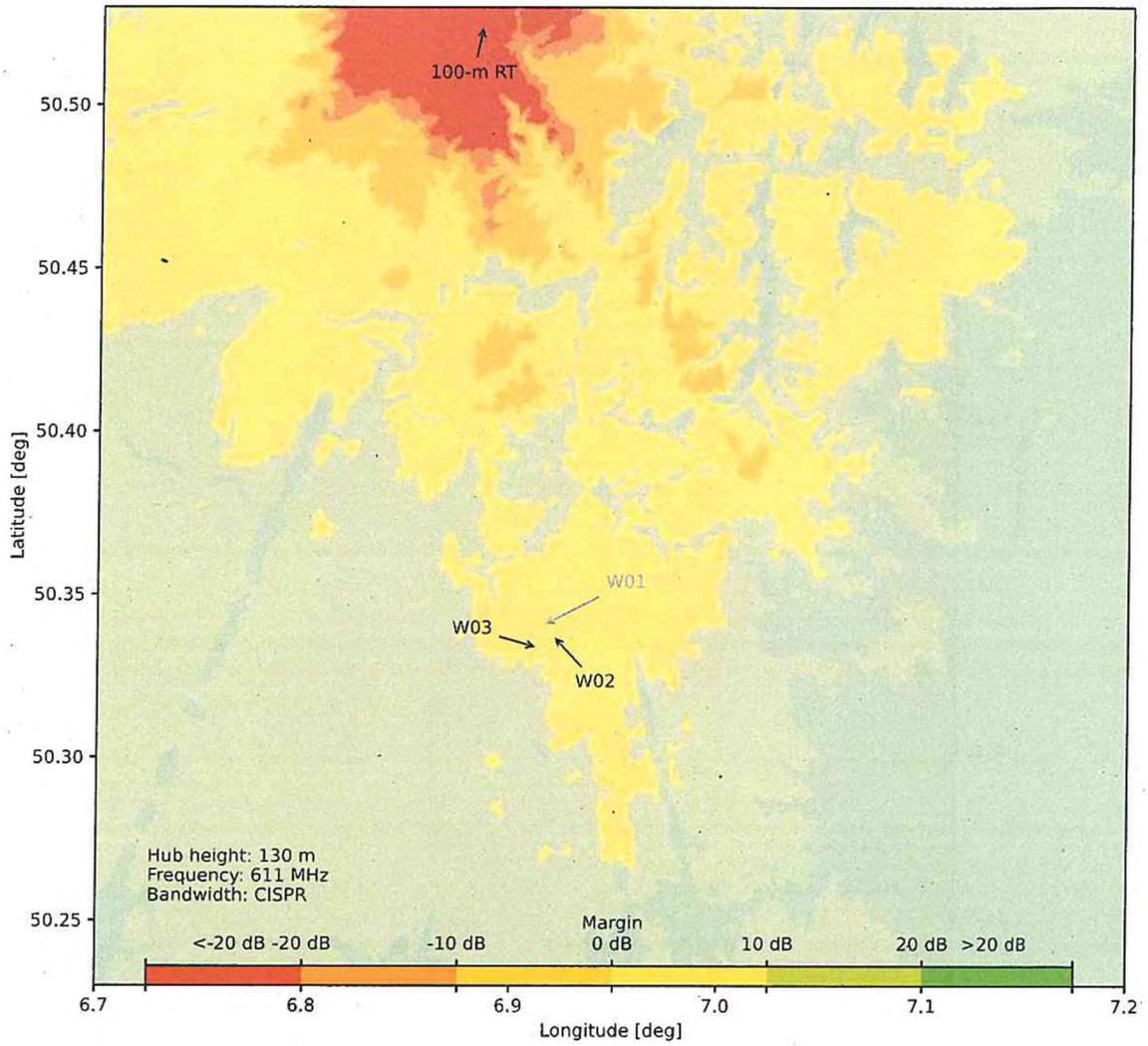


Abb. 11: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 610 MHz, Szenario 2.

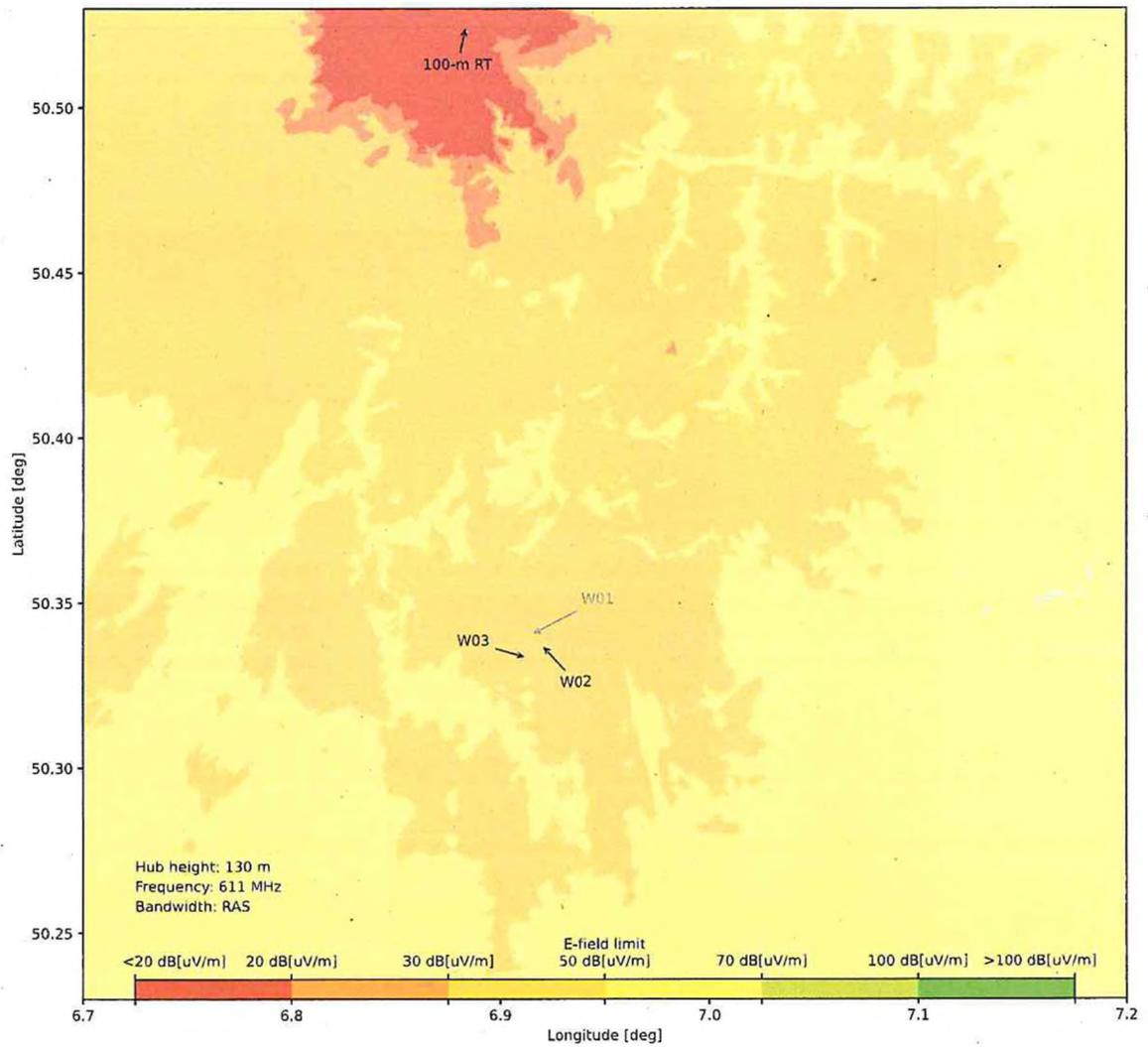


Abb. 12: Feldstärkegrenzwerte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 610 MHz, Szenario 1 (umgerechnet auf CISPR-Detektorkopf mit 120 kHz Bandbreite).

B. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 1420 MHz

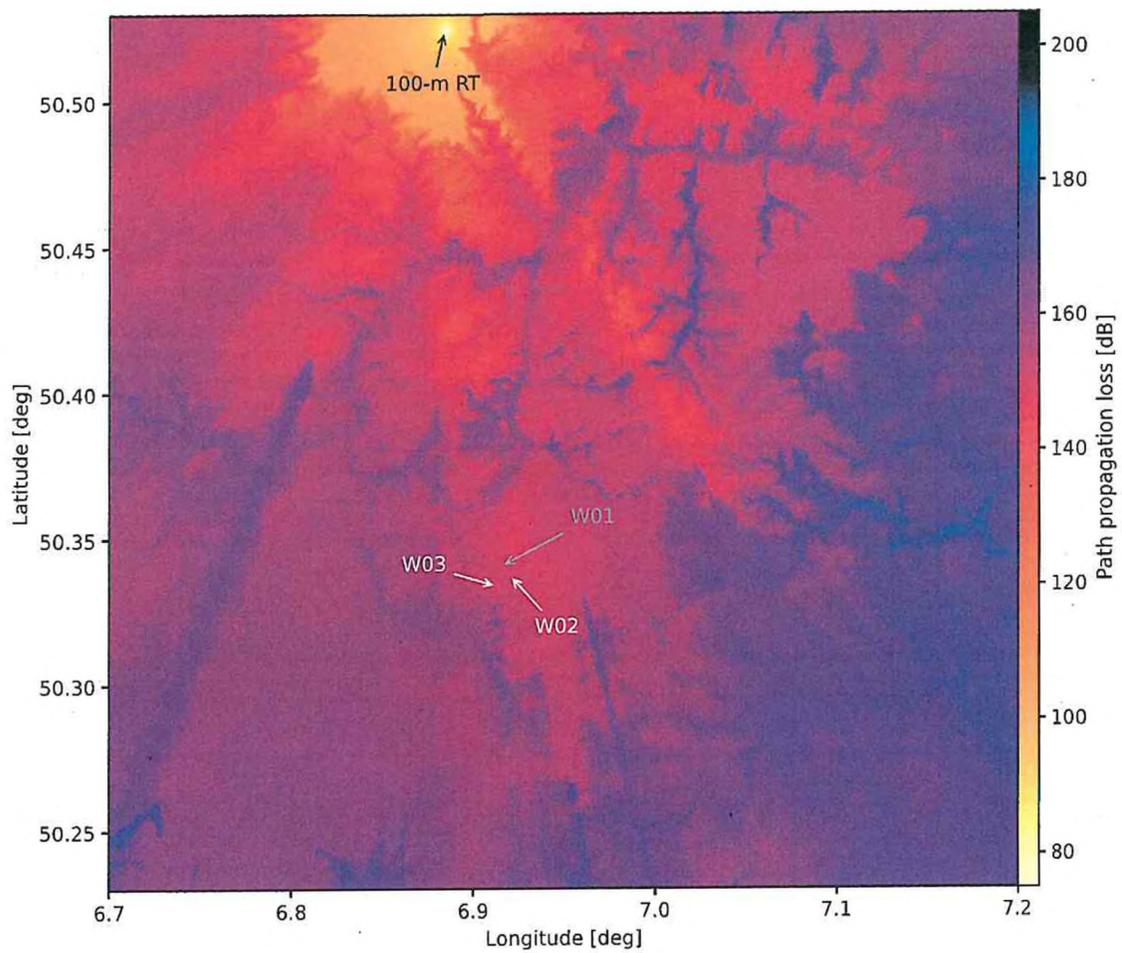


Abb. 13: Streckendämpfungskarte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 1420 MHz.

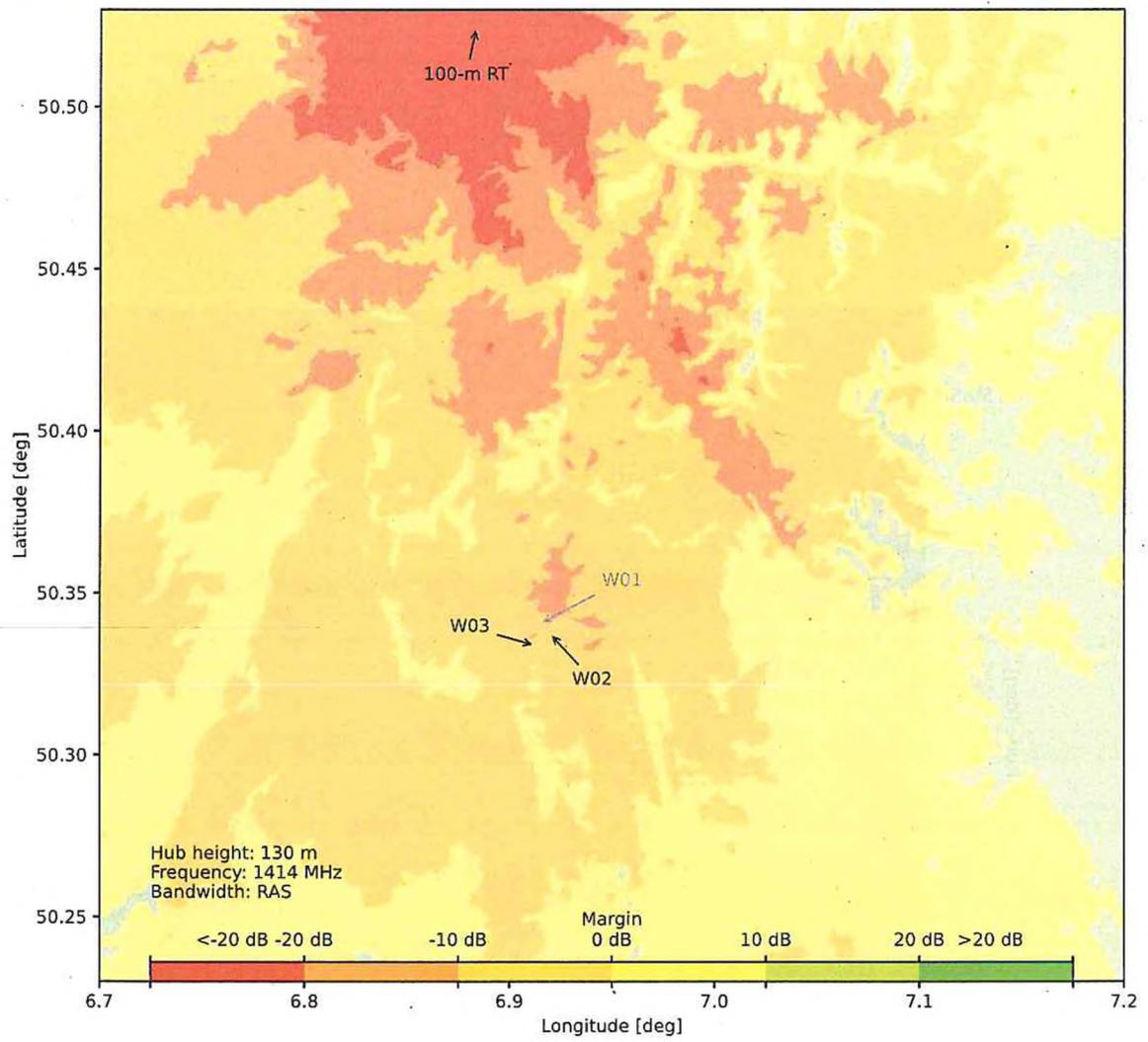


Abb. 14: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 1420 MHz, Szenario 1.

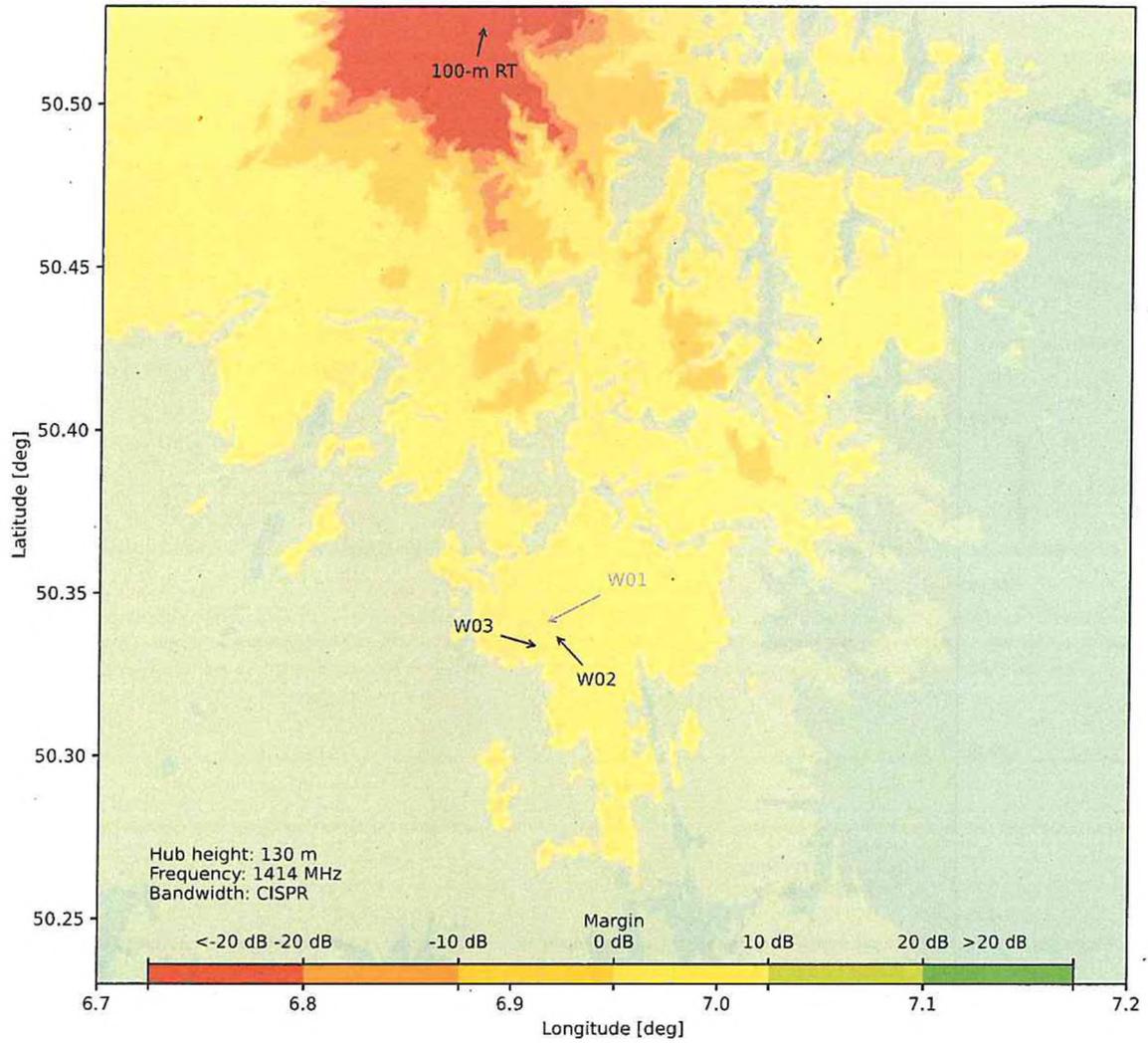


Abb. 15: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 1420 MHz, Szenario 2.

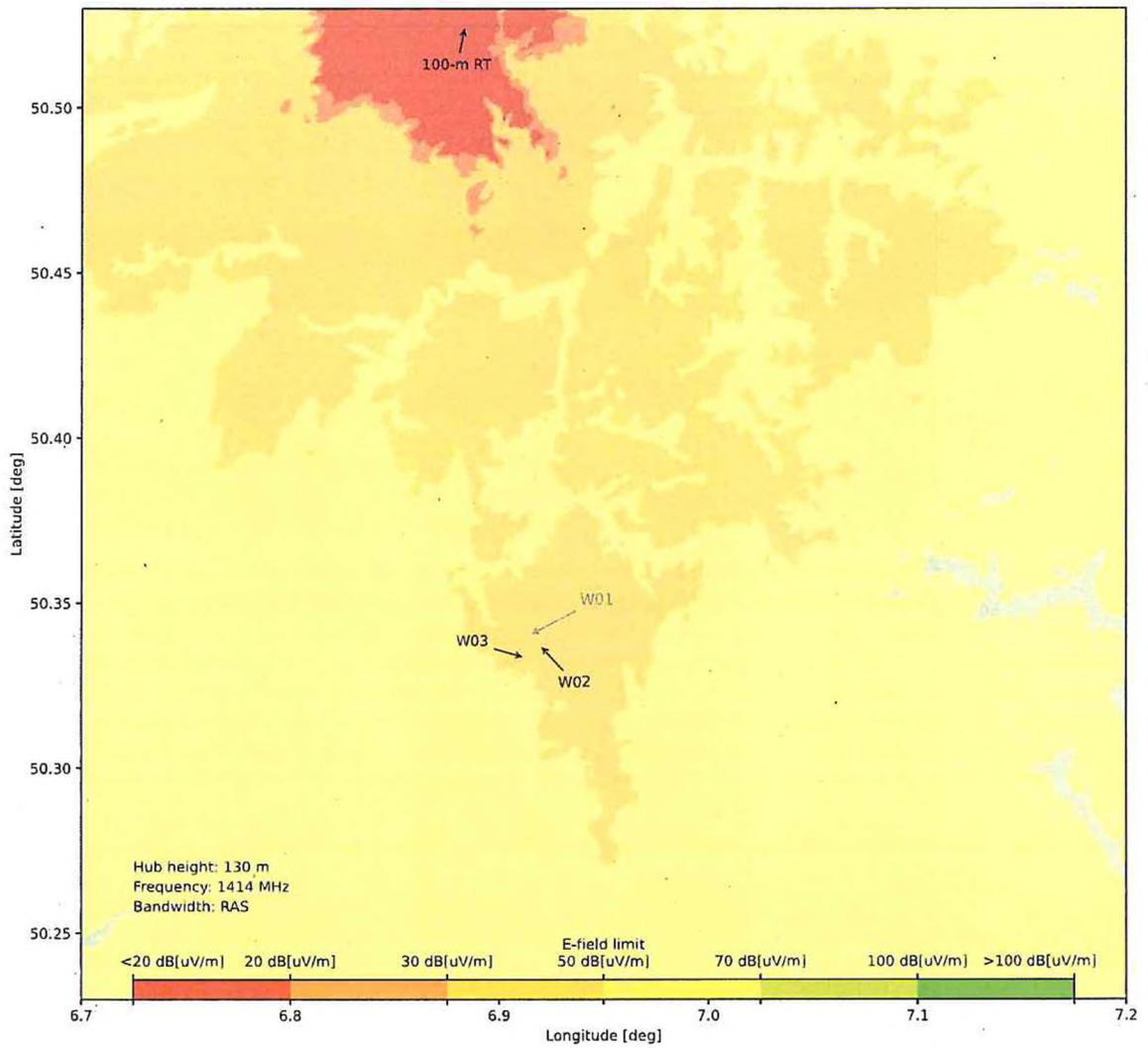


Abb. 16: Feldstärkegrenzwerte. Nabenhöhe: 130 m, Frequenz: 1420 MHz, Szenario 1 (umgerechnet auf CISPR-Detektorkopf mit 1 MHz Bandbreite).

C. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 610 MHz

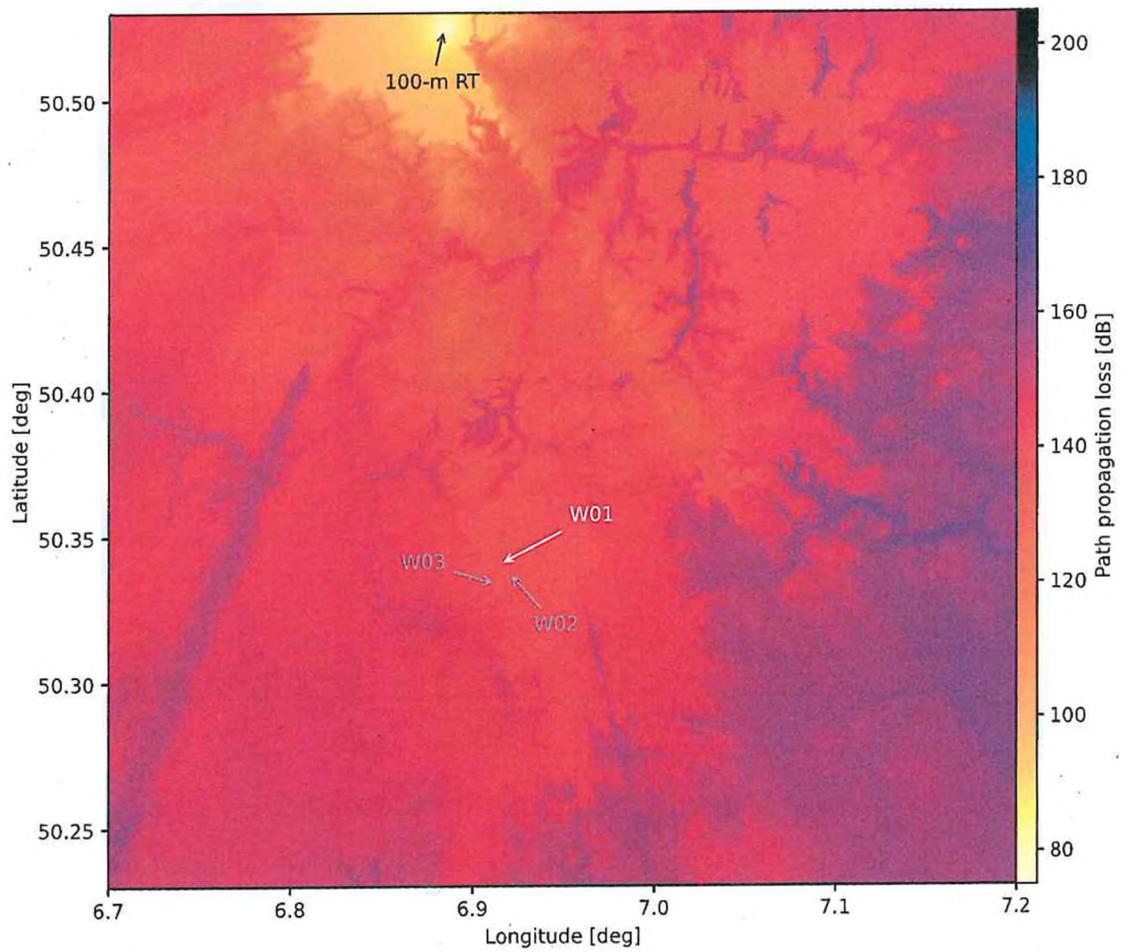


Abb. 17: Streckendämpfungskarte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 610 MHz.

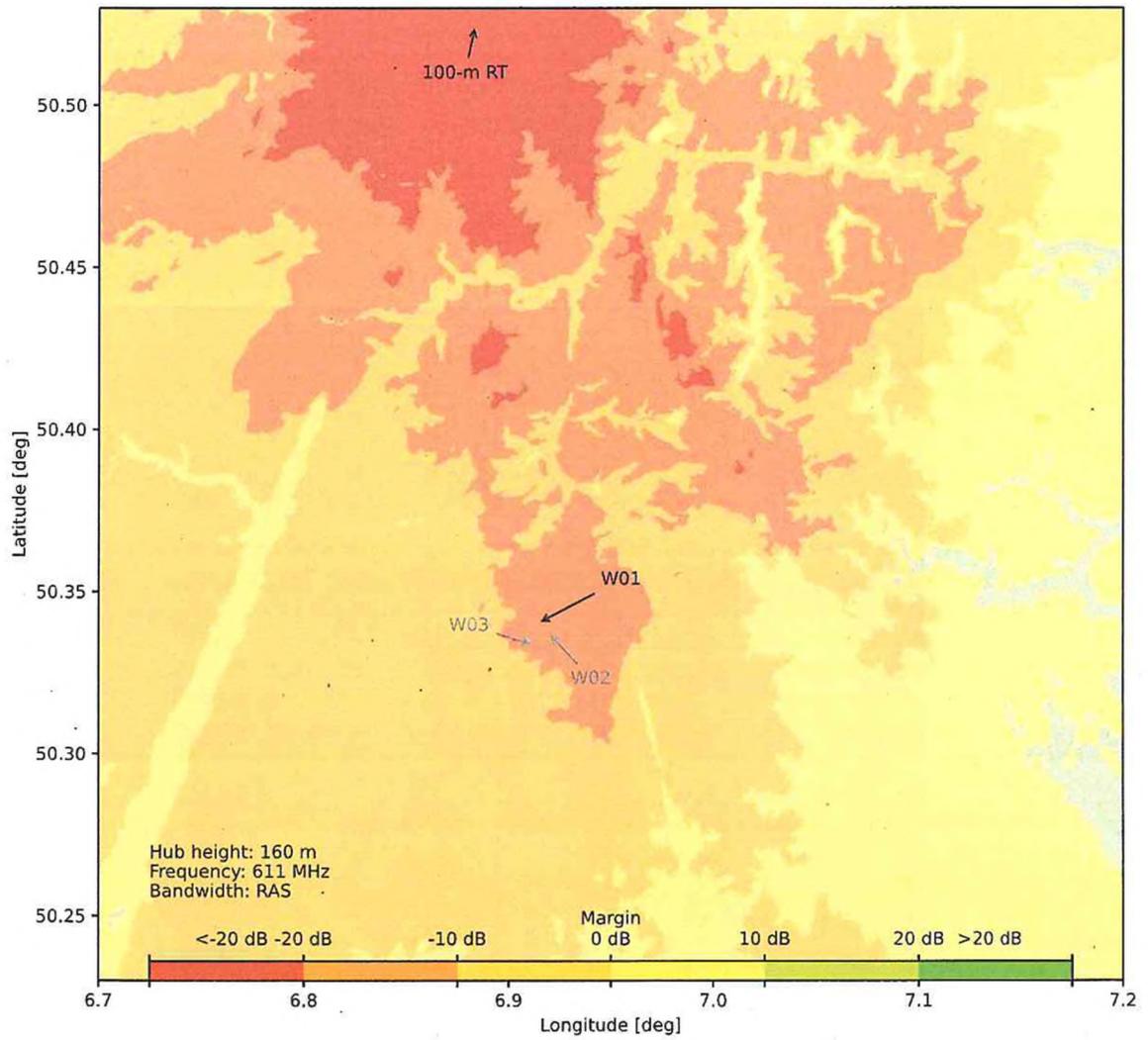


Abb. 18: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 610 MHz, Szenario 1.

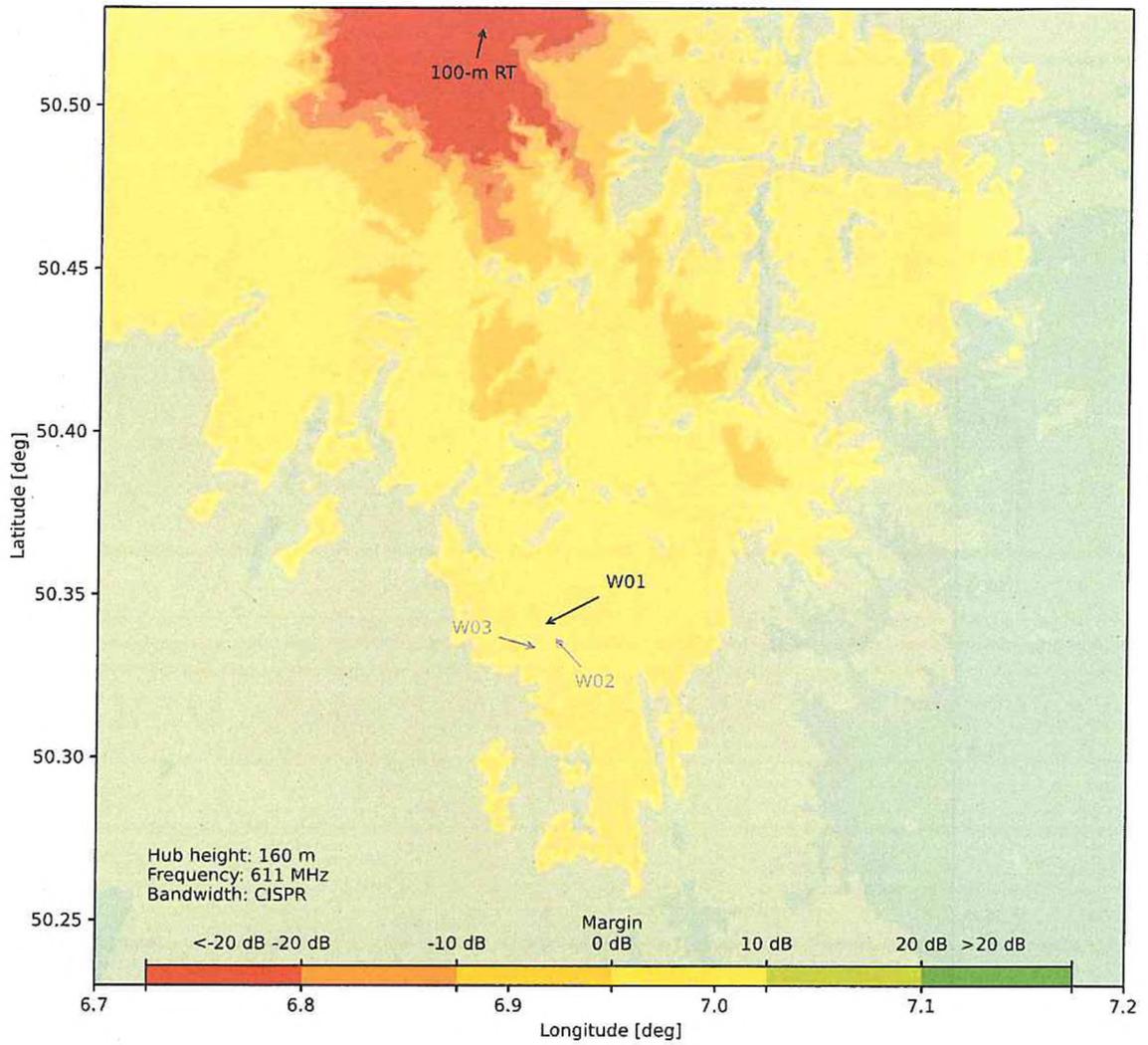


Abb. 19: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 610 MHz, Szenario 2.

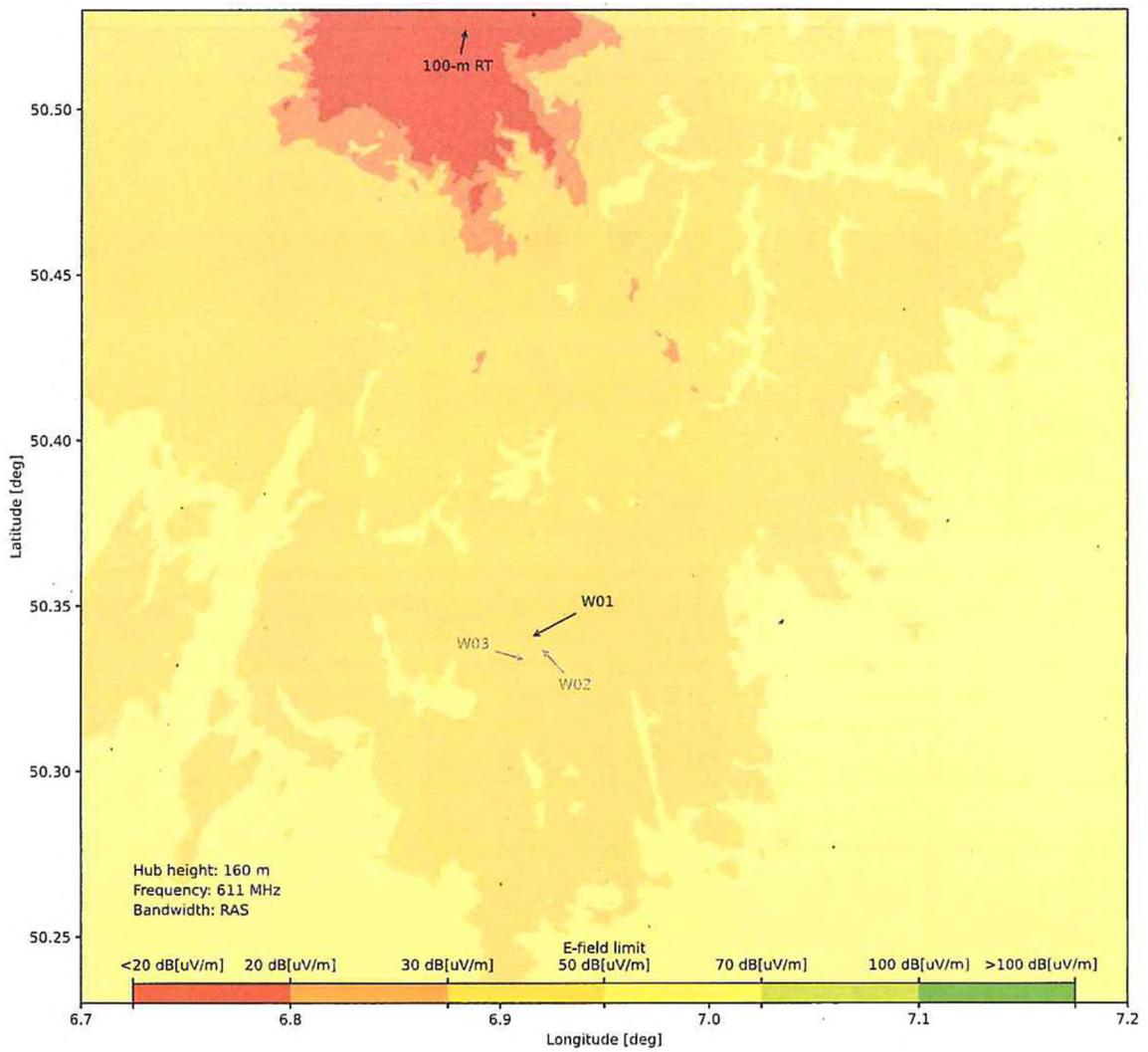


Abb. 20: Feldstärkegrenzwerte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 610 MHz, Szenario 1 (umgerechnet auf CISPR-Detektorkopf mit 120 kHz Bandbreite).

D. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 1420 MHz

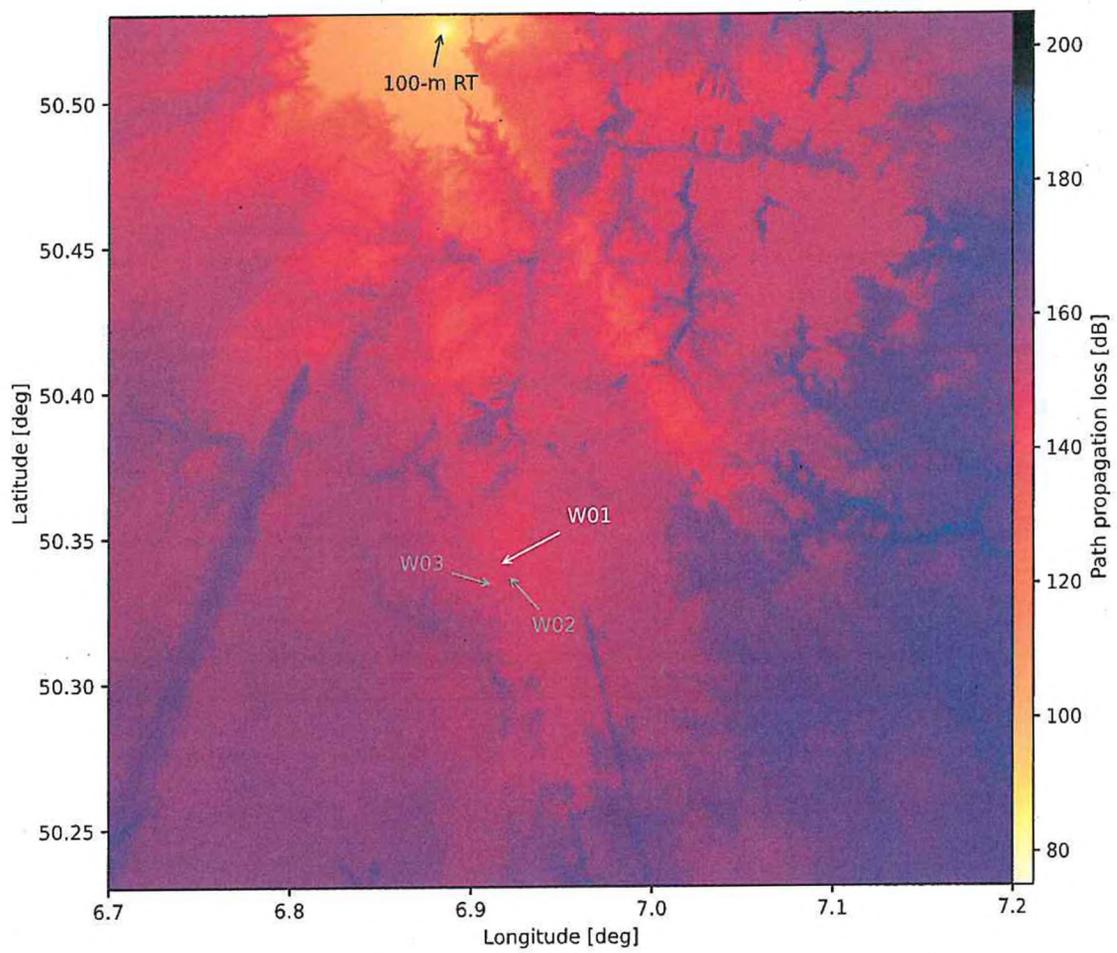


Abb. 21: Streckendämpfungskarte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 1420 MHz.

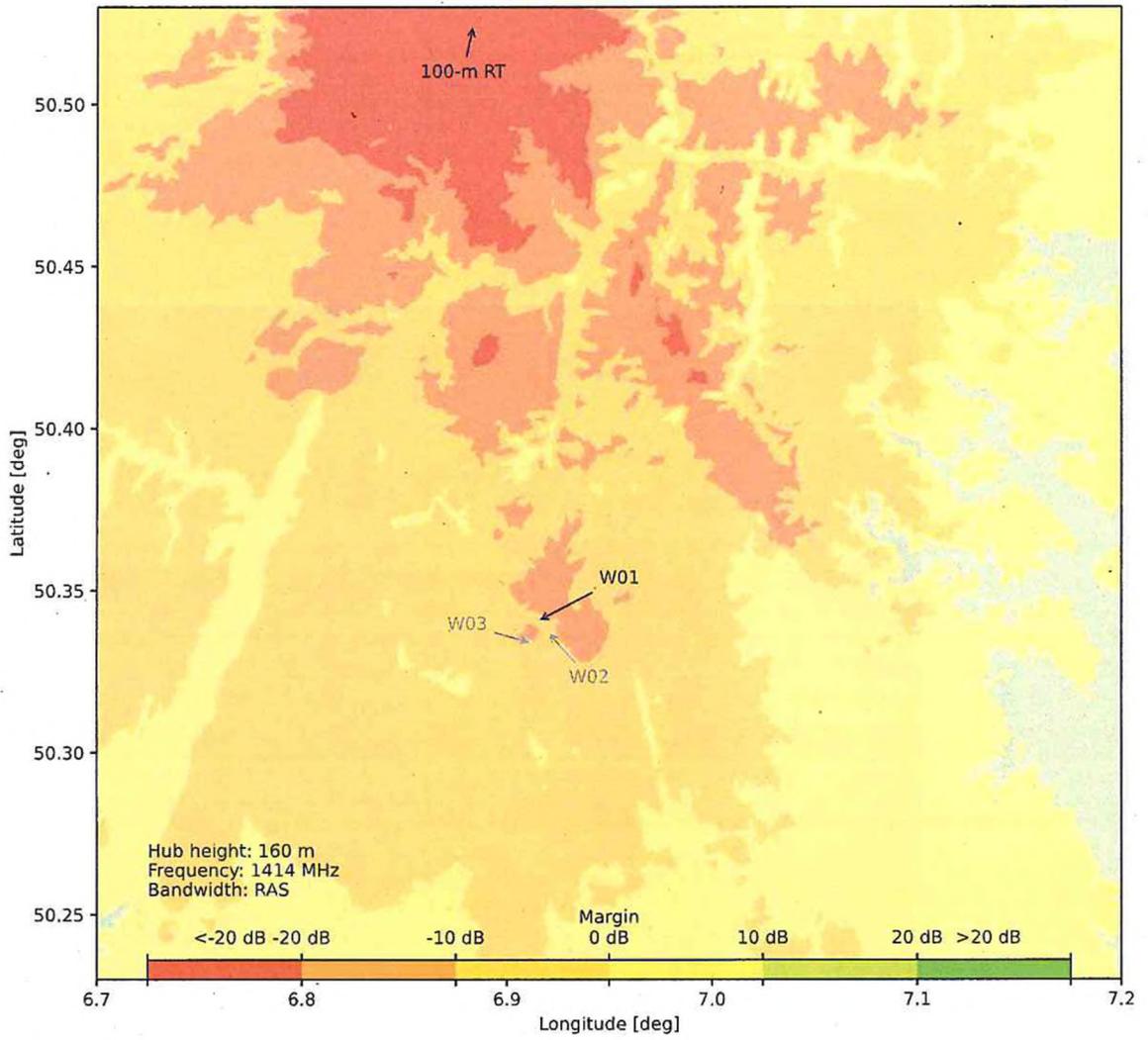


Abb. 22: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 1420 MHz, Szenario 1.

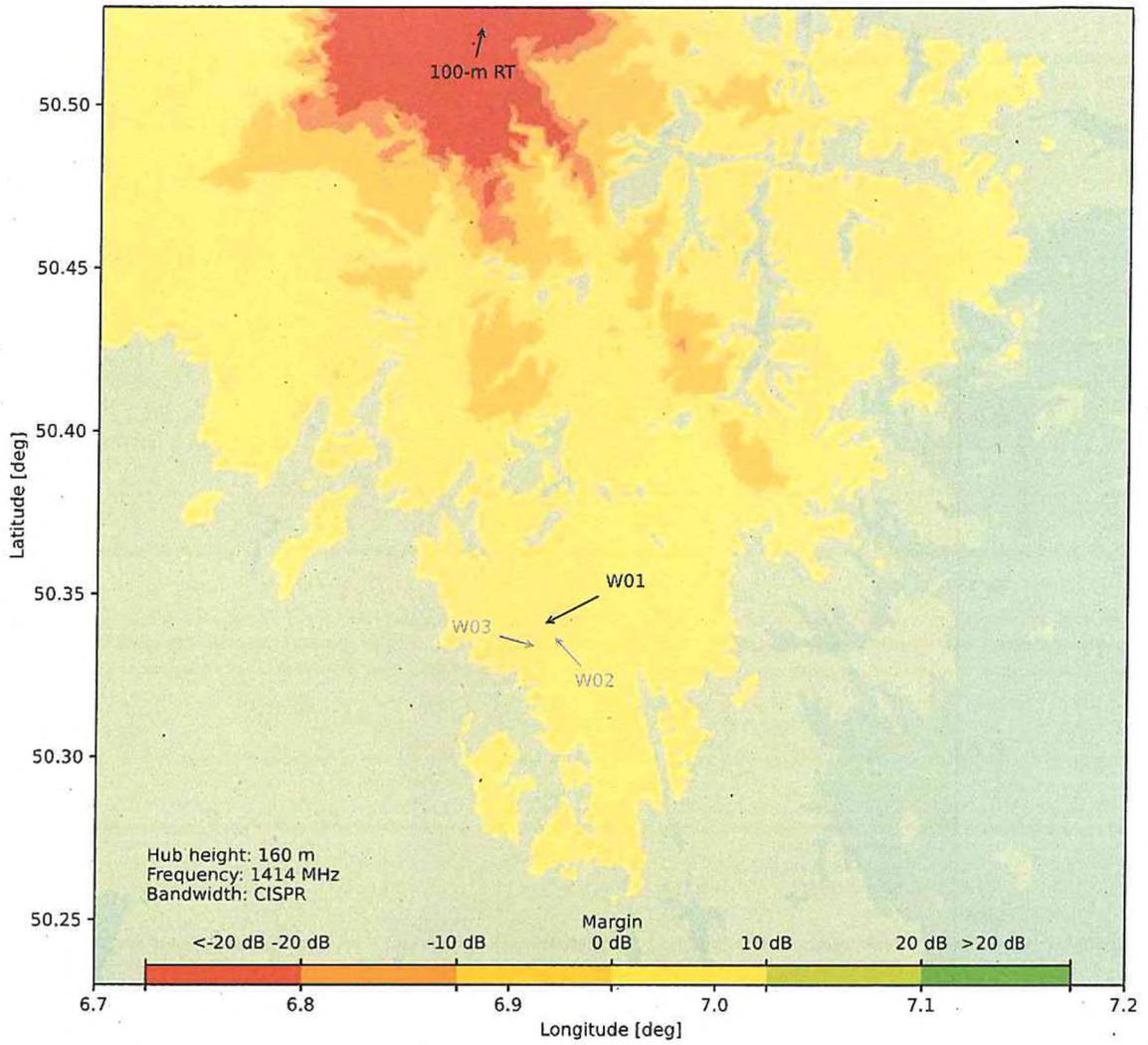


Abb. 23: Margin-Konturkarte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 1420 MHz, Szenario 2.

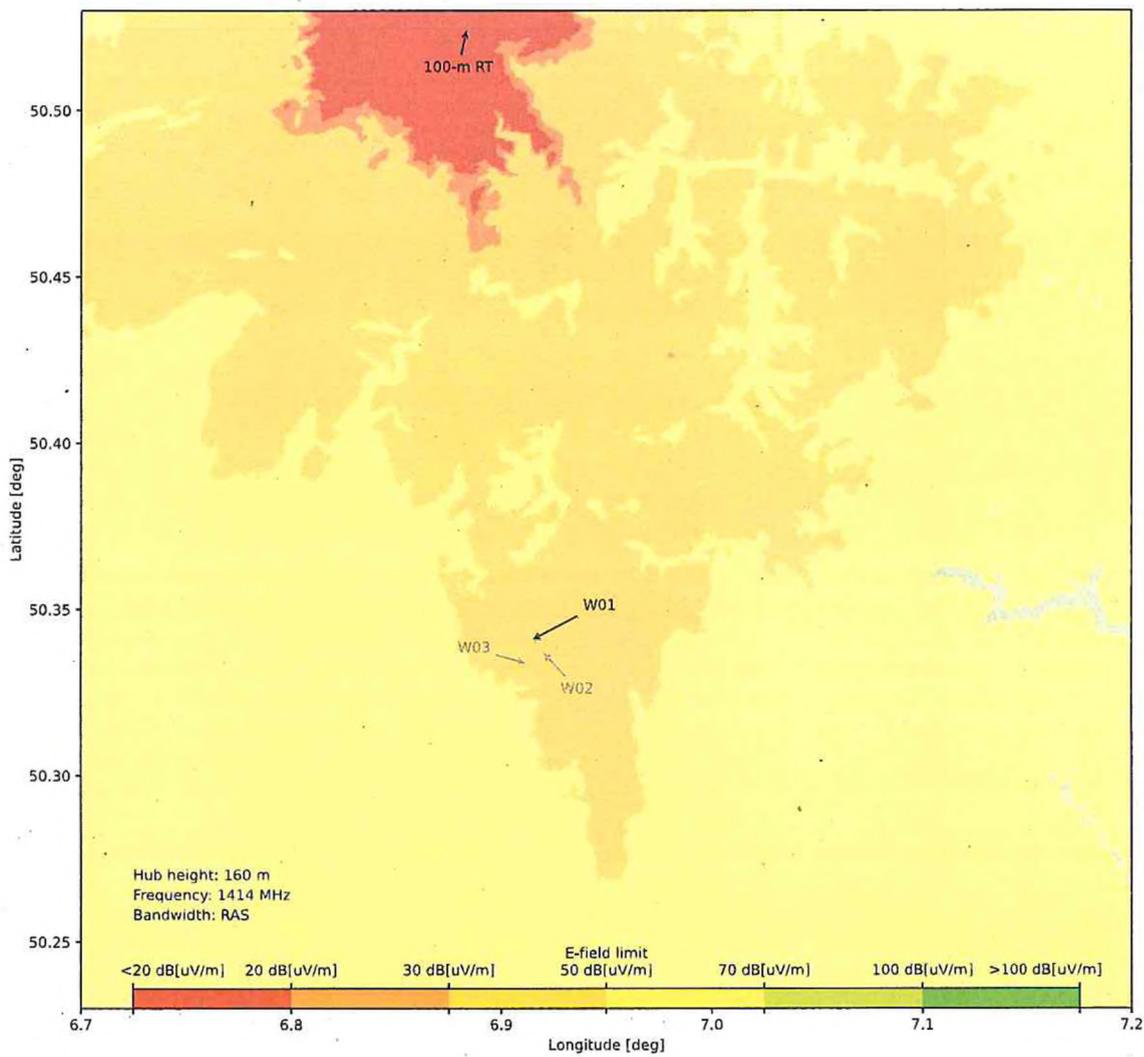


Abb. 24: Feldstärkegrenzwerte. Nabenhöhe: 160 m, Frequenz: 1420 MHz, Szenario 1 (umgerechnet auf CISPR-Detektorkopf mit 1 MHz Bandbreite).