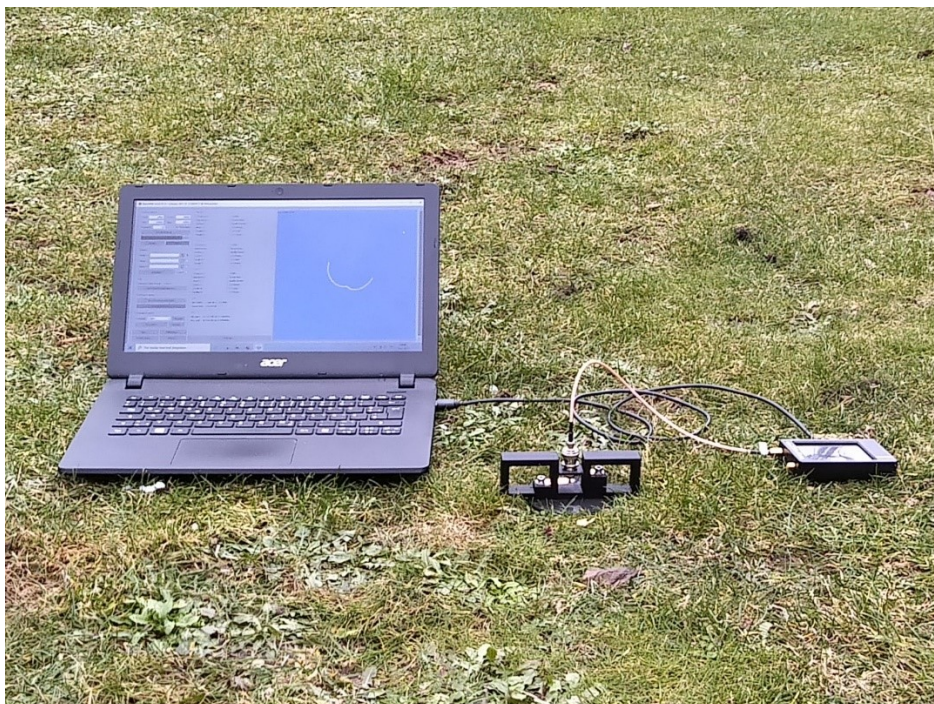


Messung von Bodenparametern

***Bau einer Sonde und praktische
Erfahrungen bei der Messung von
Leitfähigkeit und Permeabilität***



Christoph Schwärzler, OE1CGS
Jänner 2021

Abstract

Soil parameters near an antenna can show a pronounced effect on the antenna characteristics, especially for HF. Usually, soil is characterized by its conductivity σ in S/m and the relative permeability ϵ versus vacuum (also known as dielectric constant). Antenna software like EZNEC and MMANA also needs these parameters for simulation.

Unfortunately, most hams don't know those parameters for their antenna position and scarcely available maps don't offer enough detail. Frequently, the ground type "Average" is chosen for simulations and users trust that errors are kept at bay. But the characteristics of low hanging and vertical antennas highly depend on the soil under them and so do simulation results for these types of antennas. Many efforts to come up with precise simulations are foiled by choosing the wrong ground type.

This needs not be the case since there are amateur methods available to measure these soil parameters. Understandably, these DIY methods do not offer outstanding precision, but are sufficient to choose a suitable ground type for modelling purposes.

This document deals with measuring the soil characteristics and describes building a soil probe, which comes especially easy if 3D printed parts are accessible. Measuring requires a vector antenna analyzer (or VNA). Two methods for calculating the soil parameters are presented, tested and discussed. Although both methods agree most of the time, the method according to DL1GLH offers superior stability under certain conditions.

Finally, this document shows and discusses results derived from real measurements. It became clear, that a probe length between 25 and 35 cm is best.

This work deals with the frequency span from 1 to 30 MHz, but the methods themselves are not confined to this range.

Zusammenfassung

Die Eigenschaften des Erdbodens am Antennen-aufstellungsort können einen wesentlichen Einfluss auf die Abstrahlungseigenschaften der Antenne haben. Deren Beschreibung erfolgt zumeist durch die Leitfähigkeit σ in S/m und die relative Permeabilität (i.e. Dielektrizitätskonstante) ϵ der Erde als dimensionslose Zahl. Auch Antennen-simulationsprogramme wie EZNEC oder MMANA benötigen diese Parameter für eine Berechnung.

Leider kennen die wenigsten Funkamateure diese Werte an ihrem konkreten Antennenaufstellungsort.

Kartenmaterial mit diesen Werten ist selten und oft zu ungenau. So bleibt meistens nur übrig, den Wert für „average ground“ einzustellen und zu hoffen, dass der Fehler nicht zu groß ist. Jedoch kann dieser bei niedrig hängenden Antennen und insbesondere Vertikalstrahlern eine deutliche Auswirkung auf die Simulationsergebnisse haben und anderwärtige Bemühungen um eine möglichst gute Abschätzung der Antenneneigenschaften konterkarieren.

Das muss aber nicht so sein, denn mit kleinem Aufwand und mit Amateurmitteln ist es durchaus möglich, die Bodeneigenschaften am konkreten QTH zu messen. Auch wenn man sich von diesen Messungen keine hohe Präzision erwarten darf, geben sie mehr als einen Anhaltspunkt für die eigenen Simulationen.

Das vorliegende Dokument gibt eine Einführung in die Problematik und beschreibt den Aufbau einer Messsonde. Deren Herstellung gelingt insbesondere dann sehr einfach, wenn Zugriff auf einen 3D-Drucker besteht. Zur Messwerterfassung ist ein vektorieller Antennenanalysator (bzw. Netzwerkanalysator) erforderlich. Zwei Verfahren zur Umrechnung der gemessenen Impedanz auf σ und ϵ werden beschrieben und evaluiert. Obwohl beide meist zu ähnlichen Ergebnissen führen, hat sich die Methode nach DL1GLH unter gewissen Bedingungen als verlässlicher erwiesen.

Abschließend werden praktisch durchgeführte Bodenmessungen diskutiert. Dabei hat sich eine Länge der Bodensonde zwischen 25 und 35 cm als optimal erwiesen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Frequenzbereich von 1 bis 30 MHz. Die prinzipielle Verwendbarkeit der benutzten Methoden ist jedoch nicht auf diese Frequenzen eingeschränkt.

1.) Motivation

Im Nahfeld einer Antenne bis zu rund 4λ Abstand vom Strahler haben die Bodeneigenschaften einen erheblichen Einfluss auf deren Abstrahlcharakteristik. Diesem Umstand tragen auch Antennensimulationsprogramme Rechnung, indem Bodenparameter festgelegt werden können. Bild 1 zeigt exemplarisch diese Auswahl in EZNEC¹. Hier sind die elektrische Leitfähigkeit σ in S/m und die relative Permeabilität (bzw. Dielektrizitätskonstante) ϵ für einige typische Bodenbeschaffenheiten bis hin zu Salzwasser, angegeben.

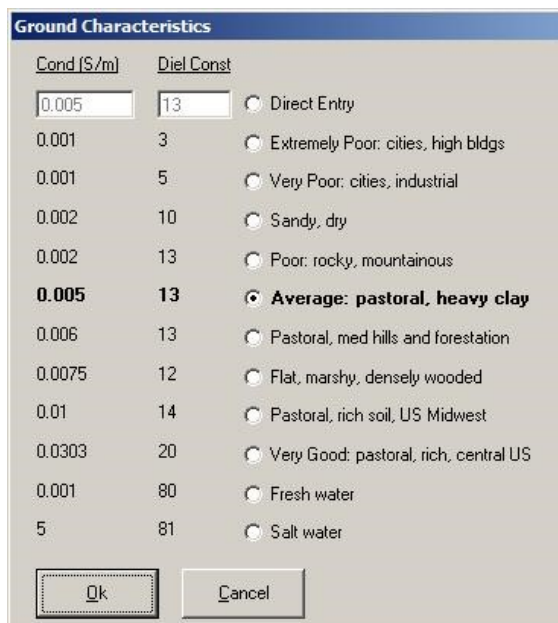


Bild 1: Vordefinierte Bodenparameter in EZNEC

Ein Blick in Bild 1 zeigt, dass sich die Leitfähigkeit der vorgegebenen Werte für diverse Bodenqualitäten bis zu einem Faktor von 30 und die Permeabilität immerhin bis zum 7-fachen unterscheiden.

In EZNEC besteht auch die Möglichkeit, eigene Werte direkt einzutragen. Damit können die selbst ermittelten Bodenparameter des eigenen Antennenaufstellortes in Simulationsrechnungen berücksichtigt werden. Ohne weitere Kenntnis, bleibt dem Funkamateurl bei der Modellierung oft nur, den (wohl nicht umsonst durch Fettdruck hervorgehobenen) Wert „Average: pastoral, heavy clay“ zu benutzen. Dass diese Auswahl aber einen erheblichen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben kann, zeigt Bild 2. Darin sind simulierte Erhebungsdiagramme einer Vertikalantenne (5,5m Fishpole mit Verlängerungsspule für das 40m Band) aus EZNEC über verschiedenen Erdqualitäten dargestellt.

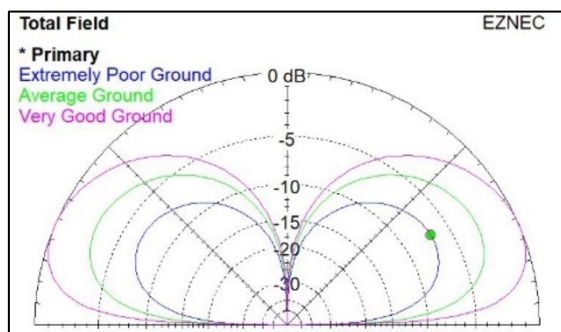


Bild 2: Abstrahlcharakteristik einer 40m Vertikalantenne über verschiedenen Bodenqualitäten, simuliert mit EZNEC

Nicht nur, dass die abgestrahlte Leistung bei idealer Erhöhung um 6,85dB abweicht, sinkt auch der ideale Abstrahlwinkel von 32° bei schlechtem Boden auf 23° bei sehr gutem Boden. Die insgesamt abgestrahlte Leistung variiert sogar um 7,1dB. Wohlgederkt, alles bei gleicher eingespeister Leistung!

Derartige Unterschiede sind natürlich bei Antennenformen, die stark mit dem Erdboden interagieren, wie Vertikalantennen oder niedrig hängenden Dipolen, am größten. Hoch hängende Antennen (bezogen auf die Wellenlänge) sind weniger empfindlich gegenüber unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten.

Selbstverständlich können die Bodeneigenschaften rund um die Antenne in verschiedenen Richtungen und Entfernungen vom Strahler unterschiedlich sein. Dabei spielen Distanzen bis rund 4λ , also der Bereich im Nahfeld der Antenne eine Rolle. Die meisten Simulationsprogramme erlauben hier nur eine eingeschränkte Granularität in der Bodenbeschreibung, so dass man sich im Extremfall mit einem gemittelten Wert zufriedengeben muss. Manche erlauben eine gewisse Flexibilität, wie z.B. EZNEC, wo ein zweiter Boden mit anderen Eigenschaften zumindest für die Fernfeldberechnung berücksichtigt werden kann. Leider sieht EZNEC keine frequenzabhängigen Bodenparameter vor, während in der Praxis eine derartige Abhängigkeit deutlich vorhanden ist, wie wir auch weiter unten sehen werden.

Problematisch bleibt zudem die Tatsache, dass die Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen in den Boden, abhängig von Frequenz und Bodenbeschaffenheit durchaus relativ groß sein kann. Bild 3 zeigt, dass die Eindringtiefe mit zunehmender Frequenz und zunehmender Bodenleitfähigkeit abnimmt.

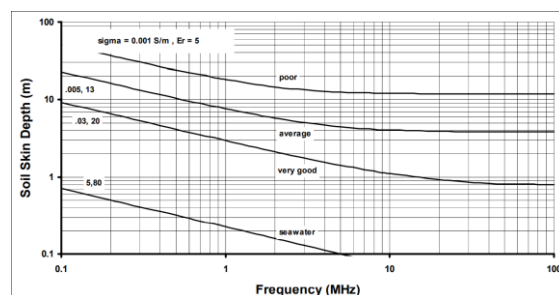


Bild 3: Eindringtiefe elektromagnetischer Wellen in den Erdboden²

Insbesondere für schlechte Bodenqualitäten können die Wellen mehrere Meter in den Boden eindringen und daher auch von den Eigenschaften tiefer liegender Schichten beeinflusst werden. Einfache Sonden aus Amateurmitteln, wie die hier beschriebene messen die Parameter einer

bestenfalls wenige Dezimeter tief reichenden Oberflächenschicht der Erde. Prinzipiell wäre es zwar möglich, durch Abgrabung und sukzessive Messungen ein vollständiges Bild bis in größere Tiefen zu erlangen, hier stellt sich aber die Frage, ob der Aufwand den Erkenntnisgewinn rechtfertigt. Vielfach wird man sich daher mit der Oberflächenmessung und einer Abschätzung für tiefere Schichten begnügen müssen. Für guten Boden und ab dem 40m Band decken diese Sonden jedoch bereits einen guten Teil des maßgeblichen Erdbodens ab.

2.) Messverfahren

Für die Messung von Bodeneigenschaften werden prinzipiell zwei Arten von Verfahren benutzt. Einerseits die direkte Messung durch Bodensonden und andererseits die indirekte Messung durch Signalstärkemessung in unterschiedlichen Entfernungen eines Senders und Vergleich mit Simulationsergebnissen. Die zweite Methode wird oftmals von kommerziellen Radiosendern benutzt, ist jedoch arbeitsintensiv. Für den Hobbybereich wird daher meist die direkte Messung bevorzugt, obwohl eine Variation der indirekten Messung in Form der Impedanzmessung an einem niedrig hängenden Dipol³ und Vergleich mit NEC4 Simulationen bereits erfolgreich von Amateuren benutzt wurde.

Direkte Messungen werden in der Literatur mit zwei Formen von Messsonden beschrieben. Die ursprüngliche Variante eines Bodenspießes der gegen eine größere, auf dem Erdboden aufgelegte Massefläche gemessen wird („Monoprobe“), hat sich als problematisch hinsichtlich der Mobilität der Sonde und insbesondere als empfindlich gegenüber der Art und Weise wie die Massefläche Kontakt zum Boden hat, erwiesen. Neuere Arbeiten zu diesem Thema beziehen sich daher meist auf eine Messsonde in der Form zweier paralleler Bodenspieße zwischen denen die Impedanz vektoriell gemessen wird. Diese Bodenspieße stellen HF-technisch eine einseitig offene Zweidrahtleitung dar, weshalb diese Methode auch unter dem Namen OWL (Open Wire Line) bekannt ist. Auch bei der vorliegenden Arbeit wurde eine OWL-Sonde benutzt.

In seinem ausführlichen Dokument⁴ „Measurement Of Soil Electrical Parameters At HF“ beschreibt Rudy Severns, N6LF beide Verfahren.

3.) Bau einer OWL-Sonde

Bild 4 zeigt eine OWL-Sonde. Sie besteht aus zwei Messingstäben mit 6 mm Durchmesser, die im Abstand (Mitte-Mitte) von 50 mm parallel zueinander

angeordnet sind. Dazu sind sie in einem 3D-Druckteil⁵ verschraubt, an welchem auch gleich eine BNC-Buchse montiert ist. Die Verschraubung erfolgt über M4 Innengewinde, die in die Messingstangen geschnitten werden und die Verbindung zur BNC-Buchse mit Messingblech. Der kreisförmige Teil in Bild 4 dient als Führung beim Einstechen der Sonde in den Boden und verbleibt während der Messung unmittelbar unter dem Griffstück.

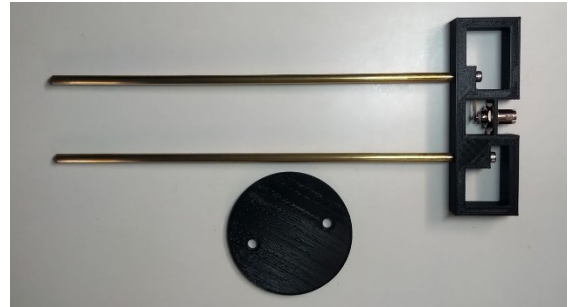


Bild 4: OWL-Sonde zur Messung von Bodeneigenschaften

Die Messingstangen werden vorne angespitzt, damit die Sonde leichter in den Boden getrieben werden kann. Das Herausziehen nach der Messung ist durch die Griffe im 3D-Druckteil leicht möglich.

Weder Durchmesser noch Abstand oder Länge der Leiter sind besonders kritisch, definieren aber u.a. den Bereich des Bodens, der in die Messung einfließt. Dies ist im Wesentlichen ein Zylinder um die beiden Stäbe, der unten etwas tiefer als die Spitzen beginnt und bis zur Oberfläche reicht. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass eine Sondenlänge über 30 bis 40 cm bereits Probleme beim Einstechen bereiten kann. Dies ist der Grund dafür, dass der Autor zu einer ersten, knapp 50 cm langen Version auch eine verkürzte zweite mit rund 25 cm Länge gebaut hat.

Bild 5 zeigt ein Detail des Griffstücks der Sonde mit den 0,2 mm starken Kupferblechen zur Verbindung von Sondenstäben und BNC-Buchse. Deren Mantel ist mit dem rechten Blech verschraubt, der Innenleiter an das linke Kupferblech gelötet.



Bild 5: Detail des montierten Griffstücks der OWL-Sonde

Direkt an die BNC-Buchse wird für eine Messung ein vektorielles Impedanzmessgerät (Antennenanalysator oder Netzwerkanalysator) angeschlossen. Bei den hier beschriebenen Messungen war dies ein NanoVNA⁶, der zuvor so kalibriert wurde, dass die Referenzebene mit der Lage der BNC-Buchse der Sonde übereinstimmt. Die Messungen selbst wurden mit der Software „NanoVNA Saver“ auf einem Notebook durchgeführt und als S-Parameterdateien abgespeichert.

4.) Auswertung der Messdaten

Aus der gemessenen, komplexen Impedanz müssen anschließend die Bodenparameter σ und ε berechnet werden. Dazu sind dem Autor zwei verschiedene Verfahren bekannt, die im Folgenden beschrieben und verglichen werden.

Rudy Severns, N6LF beschreibt eine Methode, die auf der Kapazität der Messsonde an Luft aufbaut. Diese muss daher anfänglich möglichst genau gemessen werden, wozu aber auch ein vernünftig genaues DMM (0,1pF Auflösung) oder anderes Kapazitätsmessgerät genügt. Wichtig: Es muss die Kapazität derjenigen Teile der Sonde gemessen werden, die sich später im Erdboden befinden! Dies geschieht am besten dadurch, dass die Kapazität des oberen Teils der Sonde von der Gesamtkapazität der Sonde abgezogen wird.

Es wird also zuerst die Kapazität der kompletten Sonde gemessen, in meinem Fall waren dies 7,1 pF für die lange Sonde und 5,2 pF für die kurze Version. Danach werden die Messingstäbe durch gekürzte Stäbe ersetzt, die nur bis zur Unterseite des runden Bodenteils gehen. Dieser Rest C_P repräsentiert somit genau den Teil der Sonde, der sich später außerhalb des Erdbodens befindet und wurde in meinem Fall mit einer Kapazität von 2,3 pF gemessen. Damit berechnet sich die wirksame Kapazität C_0 der langen Sonde zu 4,8 pF (= 7,1 - 2,3) und diejenige der kurzen Sonde zu 2,9 pF. Bei diesen Messungen ist darauf zu achten, dass die Kapazität nicht durch umgebende Materialien verfälscht werden.

Rudy Severns gibt in seiner Arbeit zwar Formeln zur Berechnung der Bodenparameter an, an anderer Stelle⁷ finden sich diese jedoch in leicht modifizierter Form. Diese unterscheiden sich insbesondere durch einen subtraktiven Term bei der Berechnung des ε von der Dokumentation bei N6LF. Eigene Messungen haben eindeutig gezeigt, dass der modifizierte Form der Vorzug zu geben ist, weshalb auch diese hier angeführt wird:

$$\sigma = \frac{8,859}{C_0} \cdot \frac{R}{(R^2 + X^2)} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{10^6 \cdot X}{2\pi f \cdot C_0 \cdot (R^2 + X^2)} - \frac{C_P}{C_0} \quad (2)$$

mit:

- σ : Leitfähigkeit der Erde [S/m]
- ε : Relative Permeabilität der Erde, dimensionslos
- C_0 : Kapazität des Sondenteils in der Erde [pF]
- C_P : Kapazität des Sondenteils oberhalb der Erde [pF]
- f : Frequenz der Messung [MHz]
- R : Wirkwiderstand, gemessen [Ω]
- X : Blindwiderstand, gemessen [Ω]

Sobald also die Kapazitäten der eigenen Sonde ermittelt sind, können die gemessenen Impedanzwerte in der Erde mit einer Tabellenkalkulation leicht in die Bodenparameter umgerechnet werden. Ich bezeichne diese Methode in weiterer Folge etwas salopp als die Kapazitätsmethode.

Eine andere Berechnungsart beschreibt Hardy Lau, DL1GLH auf seiner Website⁸. Er betrachtet die Probe als Zweidrahtleitung, deren offenes, unteres Ende in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit auf das obere Ende transformiert und dort gemessen wird. Auf seiner Website gibt Hardy Lau die Transformationsgleichung sowie eine Näherung für die Berücksichtigung des Endeffekts der offenen Zweidrahtleitung an. Die bestimmenden Parameter sind Länge, Abstand und Durchmesser sowie das Material der Erdstäbe. Daraus und aus der gemessenen Impedanz ermittelt er mit einem nicht näher beschriebenen iterativen Verfahren die Bodenparameter und stellt auch ein entsprechendes Programm zum Herunterladen zur Verfügung. Dieses steht auch in einer Online-Version auf seiner Website bereit, welche ich für die vorliegende Arbeit benutzt habe. Bild 5 zeigt die Eingabemaske dieses Werkzeugs. Die Bedienung ist selbsterklärend, einzig auf die Notwendigkeit einen Punkt statt des Kommas als Dezimaltrennzeichen zu verwenden, sowie die Frequenz in MHz (megacycles, Mc) anzugeben, sei verwiesen.

Input values

(Please, use a dot "." as a decimal separator in the input fields)

Length [millimeter]: 394 Diameter [millimeter]: 6

Distance [millimeter]: 50 Frequency [Mc]: 5.0

Measured impedance: [real, ohms]: 83.2 [imaginary, ohms]: -50.9

Material of the probes: brass

Calculate ground conductivity and relative permittivity

Bild 5: Eingabefenster für den Online-Rechner von DL1GLH

Nach Betätigung des Knopfes für die Berechnung gibt das Programm die berechnete Eingangs-impedanz (aufgrund von Endeffekten nicht unendlich

groß), die notwendige Impedanz der Transformationsleitung um die gemessene Impedanz zu erklären und die daraus berechneten Bodenparameter aus.

Dem Nachteil dieses, im Folgenden von mir Transformationsmethode genannten Verfahrens, auf den Rechner (Online/Onsite) angewiesen zu sein, steht im Vergleich mit der Kapazitätsmethode der Vorteil gegenüber, keine Messung der Probenkapazität durchführen zu müssen. Allerdings müssen die Probendimensionen millimetergenau bekannt sein.

5.) Evaluierung der Verfahren

Eingangs möchte ich klarstellen, dass keine überzogenen Erwartungen an die Genauigkeit dieser Messungen der Bodenparameter gestellt werden sollten. Eine hohe Präzision ist aber auch nicht erforderlich und eine Abweichung von z.B. 25% stellt bei der Modellierung kein Problem dar, wie auch Rudy Severns einleitend zu einer Publikation festhält. Zudem sorgen andere Effekte, wie vorhergehende Regenfälle jedenfalls für größere Schwankungen der Parameter. Dennoch sind diese Messungen mit Amateurmitteln ausreichend, um bei Antennensimulationen nicht mehr im „Blindflug“ Annahmen über die Bodenbeschaffenheit vornehmen zu müssen.

Um Vertrauen in die Messungen, insbesondere für den Einsatz im Kurzwellenbereich zu erlangen und auch um die beiden Berechnungsmethoden vergleichen zu können, wurden Testmessungen durchgeführt. Diese erfolgten in Materialien mit bekannten Eigenschaften: Luft, Süß- und Salzwasser, wobei für letzteres eine 0,61-molare NaCl Lösung als Ersatz für Meerwasser diente. Bild 6 zeigt dazu den Messaufbau.

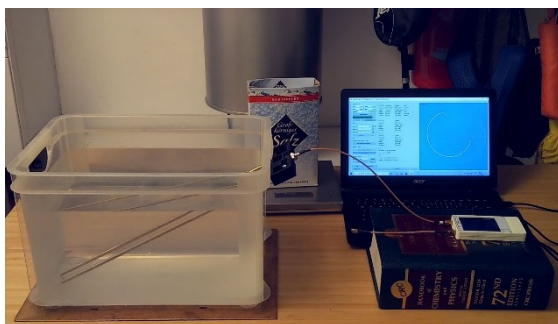


Bild 6: Aufbau für Probemessungen

Erwartungsgemäß lieferten beide Methoden für beide Sonden eine extrem geringe Leitfähigkeit an Luft ($< 0,1 \text{ mS/m}$) über den gesamten Frequenzbereich von 1 bis 30 MHz. Differenzierter und etwas überraschend fielen die Ergebnisse für die

Dielektrizitätskonstante aus, für die ein Wert von 1 erwartet wurde. Während die Kapazitätsmethode bei der langen Probe einen Wert von rund 1,4 lieferte, lag dieser bei der kurzen Probe bei ca. 0,7. Die Transformationsmethode indizierte in allen Fällen einen hohen Wert von etwas über 2.

Die Messungen in Leitungswasser zeigten sofort einen Anstieg der errechneten Leitfähigkeit und insbesondere der Permeabilität. Beide Methoden zeigten bei beiden Sonden Werte von 0,015 bis 0,04 S/m (steigend mit zunehmender Frequenz). Für die Dielektrizitätskonstante wurden nach der Transformationsmethode Werte zwischen 70 und 90 ermittelt, die Kapazitätsmethode lieferte Werte zwischen 40 und 70. Bei diesen Messungen zeigte sich erstmalig eine Schwäche der Kapazitätsmethode: In der Nähe von Eigenresonanzen, also wenn der Betrag des gemessenen Blindwiderstandes klein wird, kommt es teilweise zu extremen Werten sowohl für σ als auch ϵ . Hier erweist sich die Transformationsmethode als deutlich robuster.

Die Tests in Salzwasser brachten schlussendlich einige Überraschungen. Die berechneten Leitfähigkeiten stiegen gegenüber den vorhergehenden Messungen zwar stark an und kamen mit Maximalwerten von 4 S/m bei der Transformationsmethode auch in die Nähe der publizierten Werte (5 S/m). Allerdings sanken diese Werte mit zunehmender Frequenz rasch ab und lagen bei 30 MHz teilweise unter 0,05 S/m. Die Ergebnisse der Messungen nach der Kapazitätsmethode blieben teilweise noch darunter. Noch schlimmer die berechneten Dielektrizitätskonstanten: Sie lieferten bei niedrigen Frequenzen völlig unplausible Werte von mehreren Hundert Einheiten, nur ab 25 MHz kamen beide Methoden auf Werte zwischen 70 und 90. Hier blieben Zweifel an der Zulässigkeit des Messaufbaus, insbesondere dessen begrenztem Volumen. Mangels eines Zugangs zu Meerwasser und in Anbetracht der kalten Jahreszeit ließ ich es jedoch dabei bewenden.

Dennoch konnten die Probemessungen mein Vertrauen in die Messungen, insbesondere für den geplanten Einsatzbereich in Erdboden erhöhen. Das Verhalten der berechneten Leitfähigkeit ist für beide Methoden plausibel und (außerhalb der Resonanzbereiche, s.o.) in etwa übereinstimmend. Auch die Permeabilität liegt bei Luft und Süßwasser zumindest in den erwarteten Größenordnungen. Da reale Bodeneigenschaften zumeist zwischen diesen beiden Medien liegen, wohl sogar näher bei Süßwasser, ließen sich plausible Werte beim Einsatz der Sonden erwarten.

6.) Messungen an Erdboden

Die ersten Bodenmessungen fanden im eigenen Garten an verschiedenen Positionen in gepflegten und gedüngten Rasenflächen statt. Vor diesen Messungen hat es ausgiebig geregnet und durch das Winterwetter war der Boden insgesamt vollständig durchnässt. Insbesondere eine Position am Fuße einer leichten Böschung und in der Nähe der Sickerung für Regenwasser ließ erwarten, hier hervorragende Leitfähigkeiten vorzufinden.

Obwohl der Boden insgesamt gut gepflegt war, zeigte sich rasch, dass die längere Sonde mit einer Eindringtiefe von knapp einem halben Meter an mehreren Stellen wegen Steinen nicht komplett in den Boden gebracht werden konnte, die kürzere Sonde hingegen immer. Auch ohne Steine, war das Hineinstoßen und Herausziehen der langen Sonde im untersten Teil aufgrund der Reibungskräfte sehr mühsam und die dabei auftretenden Belastungen kamen an die Grenzen des Materials. Aus diesen Erfahrungen heraus würde ich beim Neubau einer Sonde für gute Böden eine Länge von 35 bis 40 cm empfehlen, bei mittlerer Bodenqualität sollte sich die Sondenlänge von 25 cm bewähren.

Bereits die ersten Messungen am Fuß der Böschung erfüllten die Erwartungen und deuteten auf eine hohe Bodenleitfähigkeit hin. Beide Messmethoden waren in vernünftiger Übereinstimmung und der Frequenzverlauf so wie in der Literatur beschrieben. Während die Leitfähigkeit σ von 1 bis 30 MHz mit zunehmender Frequenz anstieg (Bild 7), sank die Permeabilität ε (Bild 8).

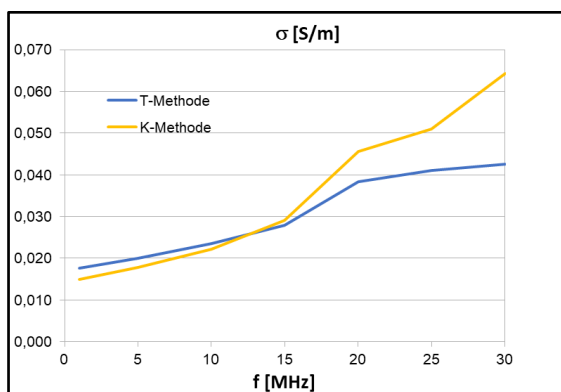


Bild 7: Bodenleitfähigkeit an einer sehr feuchten Stelle, gemessen mit der kurzen Sonde

In den Bildlegenden steht „T-Methode“ für die Transformationsmethode und „K-Methode“ für die Kapazitätsmethode.

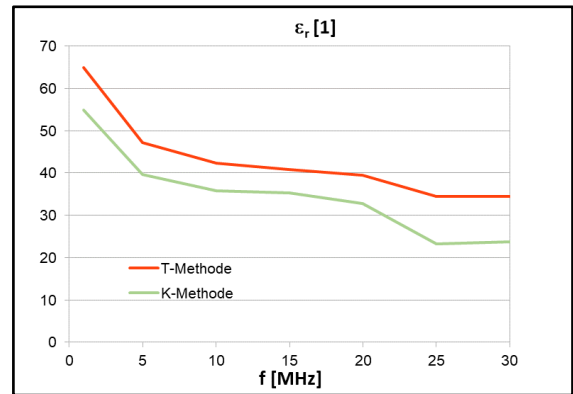


Bild 8: Relative Permeabilität, feuchter Boden, kurze Sonde

Über weite Strecken stimmen die beiden Methoden gut überein, nur bei hohen Frequenzen wird mit der Kapazitätsmethode eine deutlich höhere Leitfähigkeit berechnet als mit der Transformationsmethode. Mit Blick auf die Daten in EZNEC in Bild 1 kann dieser Boden sicherlich als „Very Good“ bezeichnet werden, dass die Permeabilität sogar über dem EZNEC-Wert liegt, ist durch den extrem hohen Feuchtegrad gut erklärbar. Klar wird aber auch, dass ein durchschnittlicher Wert dem frequenzabhängigen Verlauf nicht wirklich gerecht werden kann. So liegt die gemessene Leitfähigkeit bei 30 MHz bei mehr als dem Doppelten des Wertes bei 1 MHz.

Die gemessene relative Permeabilität liegt nach der Transformationsmethode konstant etwas höher als bei der Kapazitätsmethode. Ein Verhalten, das sich auch schon bei der Evaluierung der Verfahren an Luft und Leitungswasser zeigte. Der Unterschied bleibt allerdings überschaubar und so kann mit gutem Gewissen ein mittlerer Wert in die Simulationsprogramme eingetragen werden.

Im nächsten Schritt wiederholte ich die Messungen an derselben Stelle, aber mit der langen Sonde. Die daraus berechneten Werte für die Leitfähigkeit sind in Bild 9 zusätzlich zu denjenigen der kurzen Sonde eingetragen.

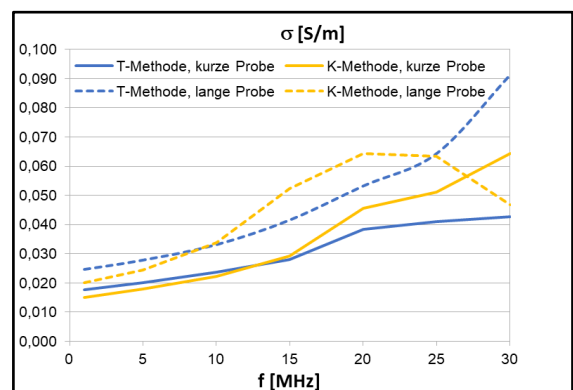


Bild 9: Vergleich zwischen Messungen mit unterschiedlichen Probenlängen

Es fällt auf, dass beide Berechnungsmethoden für die längere Sonde typischerweise eine höhere Bodenleitfähigkeit ergeben. Dies kann auf eine Zunahme in tieferen Schichten (höherer Feuchtigkeitsgehalt?) hindeuten. Im Großen und Ganzen werden die Werte aber auch durch diese Messungen bestätigt. Eine Ausnahme bilden die Berechnungen nach der Kapazitätsperiode für die lange Probe (gelb gestrichelte Linie in Bild 9) bei Frequenzen über 20 MHz. Ein Blick auf die gemessenen Impedanzwerte (siehe entsprechendes Smith Chart in Bild 10) klärt aber rasch auf: Genau bei dieser Frequenz kommt es zur Resonanz und darüber zu positiven Blindwiderständen. Es hat sich immer wieder gezeigt, dass die Kapazitätsmethode in diesen Bereichen Probleme hat.

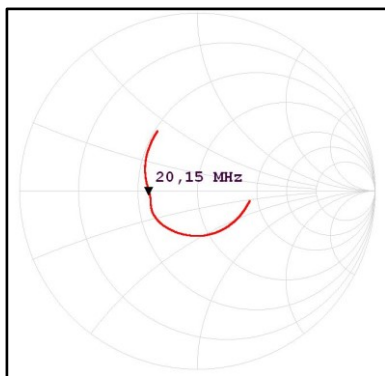


Bild 10: Ist der Blindwiderstand klein oder positiv, wie hier ab ca. 20 MHz, führt die Kapazitätsmethode meist zu unplausiblen Ergebnissen

Ich habe es mir daher zur Angewohnheit gemacht, die Berechnungen immer nach beiden Methoden durchzuführen und bei der Auswertung auch einen Blick auf die gemessenen Impedanzen zu werfen. Müsste ich mich für eine Methode entscheiden, würden ich vermutlich der Transformationsmethode den Vorzug geben, da sie sich immer wieder als stabiler erweisen hat.

An einer anderen, etwas weniger feuchten Stelle wurden mit der kurzen Probe die Werte gemessen, die in den Bildern 11 und 12 zu sehen sind.

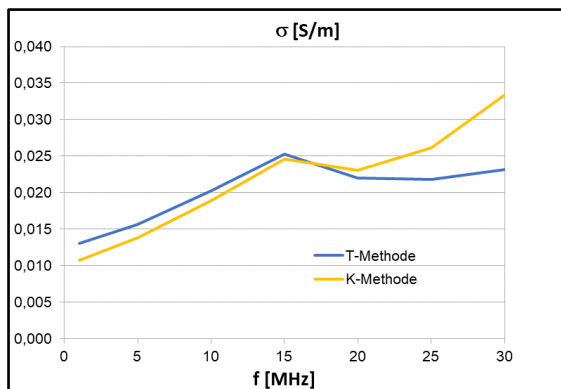


Bild 11: Bodenleitfähigkeit an einer etwas weniger feuchten Stelle

Offensichtlich ist, dass die Leitfähigkeit deutlich unter derjenigen liegt, die unterhalb der Böschung gemessen wurde (vgl. Bild 7). Auffällig ist der Knick bei 15 MHz, der nicht auf die oben beschriebene Problematik bei Resonanz zurückzuführen ist. Er tritt auch nicht nur bei der Kapazitätsmethode, sondern auch bei der Transformationsmethode auf. Zusammen mit dem deutlich stabileren Verlauf der Permeabilität (Bild 12) ist dies daher möglicherweise kein Artefakt, sondern eine tatsächliche Eigenschaft der Leitfähigkeit dieses Bodens bei höheren Frequenzen.

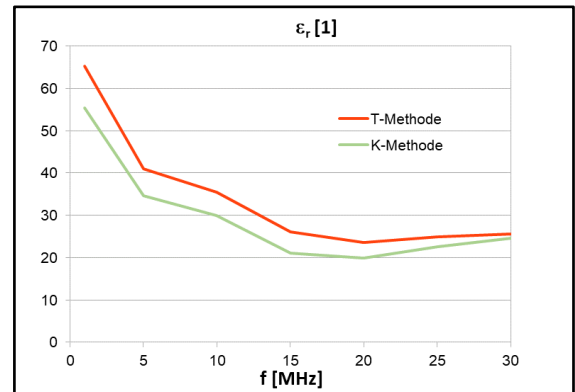


Bild 12: Relative Permeabilität des weniger feuchten Bodens

Beim Vergleich der rel. Permeabilitäten aus den Bildern 8 und 12 fällt auf, dass diese für den sehr feuchten und moderat feuchten Boden in etwa gleich sind. Hier wäre ein Vergleich mit Messungen an trockenen Böden interessant.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die Messung der Bodeneigenschaften mit einer OWL-Probe auch mit Amateurmitteln möglich ist und plausible Resultate liefert. Die Methode ist absolut feldtauglich, sofern ein portables, vektoriell arbeitendes Messgerät zur Verfügung steht. Als Probenlänge wird für gute Böden ca. 35 bis 40 cm praktikabel sein, bei schlechteren Bodenqualitäten eher nur 25 cm. Beide Berechnungsmethoden (Kapazitäts- und Transformationsmethode) führen über weite Bereiche zu ähnlichen Ergebnissen, in der Nähe von Resonanzen und bei positiven Blindwiderständen kann die Kapazitätsmethode jedoch problematisch sein.

¹ <https://www.eznec.com/>

² Quelle: „Skin Depth And Wavelength In Soil“, Rudy Severns, N6LF

³ “Determination of Soil Electrical Characteristics Using a Low Dipole“, Rudy Severns, N6LF, erschienen in QEX Nov/Dec 2016

⁴ https://www.antennasbyn6lf.com/files/ground_parameter_measurements_2.pdf

⁵ Die Teilebeschreibung steht hier: <https://www.thingiverse.com/thing:4750825>

⁶ <https://www.amazon.de/dp/B083BB82G5>

⁷ Siehe z.B.: Jürgen A. Weigl, OE5CWL, „Einfache Meßsonde zur Bestimmung der Bodeneigenschaften“, Zeitschrift Funkamateure 6/09

⁸ <https://www.dl1glh.de/groundconductivity.html>