



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna | Austria

## Diplomarbeit

# Untersuchungen von Weingärten im Seewinkel mit dem elektromagnetischen Induktionsverfahren bei kleiner Induktionszahl (CMD Mini-Explorer)

Verfasst von

Astrid Windholz, BSc  
Matrikelnummer: 1126344

angestrebter akademischer Grad

Diplomingenieur (Dipl.-Ing.)

Studienrichtung lt. Studienblatt:  
Masterstudium Geodäsie und Geoinformation (066 421)

Betreuer:  
Associate Prof. Dr.rer.nat. Adrian Flores-Orozco  
(Forschungsgruppe Geophysik E120-3)

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Matthias Steiner, BSc  
(Forschungsgruppe Geophysik E120-3)

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Datum/Ort

Unterschrift

## Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinen beiden Betreuern Associate Prof. Dr.rer.nat. Adrian Flores-Orozco und Univ.Ass. Dipl.-Ing. Matthias Steiner bedanken, die mir stets mit fachkundigen Rat zur Seite gestanden sind und viel Geduld und Verständnis entgegengebracht haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei allen andern Mitarbeitern der Forschungsgruppe „Geophysik“ bedanken, die ihr Wissen mit mir geteilt haben und auch sonst eine große Unterstützung waren.

Ein besonderer Dank gilt den Weinbauern Herrn Michael Pilles und Herrn Michael Lang, die mir erlaubt haben, in ihren Weingärten Daten zu sammeln und mir hilfreiche und relevante Informationen über ihre Weingärten und den Weinbau geliefert haben.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung und Aufmunterung danken. Ihr seid mir stets zur Seite gestanden und habt mich aufgemuntert, wenn meine Motivation nicht so groß war.

Besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Boden als Standort der Weinreben</b> .....	<b>10</b>
2.1	Der Boden und seine Bestandteile	
2.2	Böden als Standorte für Pflanzen	
2.3	Die Weinrebe und Einflussfaktoren auf ihr Wachstum	
<b>3</b>	<b>Elektrische Leitfähigkeit des Bodens</b> .....	<b>17</b>
3.1	Leitfähigkeitsmechanismen	
3.1.1	Elektronische Matrixleitfähigkeit	
3.1.2	Elektrolytische Leitfähigkeit	
3.1.3	Grenzflächenleitfähigkeit	
3.2	Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit	
3.2.1	Empirische Untersuchung über den Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Tongehalt	
<b>4</b>	<b>Grundlagen der Messmethoden</b> .....	<b>29</b>
4.1	Die Maxwell-Gleichungen	
4.1.1	Der Gaußsche Satz für das elektrische Feld	
4.1.2	Der Gaußsche Satz für das magnetische Feld	
4.1.3	Das Faraday'sche Induktionsgesetz	
4.1.4	Das Ampere'sche Maxwell'sche Gesetz	
4.2	Elektromagnetisches Induktionsverfahren (Zweispulen-System)	
4.2.1	Elektromagnetische Wellen	
4.2.2	Prinzip der Methode	
4.2.3	Leitfähigkeitsmessung bei kleiner Induktionszahl	
4.2.4	Tiefensondierung mit dem elektromagnetischen Induktionsverfahren	
4.2.4.1	Tiefensondierung durch Änderung der Dipolstellung	
4.2.4.2	Tiefensondierung durch Änderung des Spulenabstandes	
4.2.4.3	Tiefensondierung durch Änderung der Frequenz	
4.2.4.4	Tiefensondierung durch Änderung der Messhöhe über dem Boden	
4.2.5	Ausrüstung (CMD Mini-Explorer)	
4.2.6	Vorteile & Nachteile	
4.2.6.1	Vorteile	
4.2.6.2	Nachteile	
4.3	Geoelektrische Verfahren	
4.3.1	Die Gleichstrommethode	
4.3.1.1	Ermittlung des spezifischen Widerstandes	
4.3.2	IP (Induzierte Polarisation)	
4.3.2.1	Bestimmung der Polarisierungseffekte (Puls-IP & Frequenz-IP)	
4.3.3	Ausrüstung & Elektrodenanordnung	
4.3.4	Bildliche Darstellung (Auswertung)	
4.3.5	Vorteile & Nachteile	

- 4.3.5.1 Vorteile
- 4.3.5.2 Nachteile

## **5 Messkampagne ..... 62**

### **5.1 Der Seewinkel als Messgebiet**

### **5.2 Die Weingärten**

- 5.2.1 Weingarten 1
  - 5.2.1.1 Messprotokoll
- 5.2.2 Weingarten 2
  - 5.2.2.1 Messprotokoll
- 5.2.3 Weingarten 3
  - 5.2.3.1 Messprotokoll
- 5.2.4 Weingarten 4
  - 5.2.4.1 Messprotokoll
- 5.2.5 Weingarten 5
  - 5.2.5.1 Messprotokoll
- 5.2.6 Weingarten 6
  - 5.2.6.1 Messprotokoll
- 5.2.7 Weingarten 7
  - 5.2.7.1 Messprotokoll
- 5.2.8 Weingarten 8
  - 5.2.8.1 Messprotokoll

## **6 Datenpräsentation und Analyse ..... 77**

### **6.1 Weingarten 1**

- 6.1.1 Auswertung
  - 6.1.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)
  - 6.1.1.2 DAS-1 (ERT, IP)
  - 6.1.1.3 Vergleich EMI und ERT

#### **6.1.2 Analyse**

### **6.2 Weingarten 2**

- 6.2.1 Auswertung
  - 6.2.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)
  - 6.2.1.2 Vergleich EMI und ERT

#### **6.2.2 Analyse**

### **6.3 Weingarten 3**

- 6.3.1 Auswertung
  - 6.3.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)
  - 6.3.1.2 Vergleich EMI und ERT

#### **6.3.2 Analyse**

### **6.4 Weingarten 4**

- 6.4.1 Auswertung
  - 6.4.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)
  - 6.4.1.2 Vergleich EMI und ERT

#### **6.4.2 Analyse**

### **6.5 Weingarten 5**

<b>6.5.1</b> Auswertung	
<b>6.5.1.1</b> CMD Mini-Explorer (EMI)	
<b>6.5.1.2</b> Vergleich EMI und ERT	
<b>6.5.2</b> Analyse	
<b>6.6</b> Weingarten 6	
<b>6.6.1</b> Auswertung	
<b>6.6.1.1</b> CMD Mini-Explorer (EMI)	
<b>6.6.2</b> Analyse	
<b>6.7</b> Weingarten 7	
<b>6.7.1</b> Auswertung	
<b>6.7.1.1</b> CMD Mini-Explorer (EMI)	
<b>6.7.1.2</b> Vergleich EMI und ERT	
<b>6.7.2</b> Analyse	
<b>6.8</b> Weingarten 8	
<b>6.8.1</b> Auswertung	
<b>6.8.1.1</b> CMD Mini-Explorer (EMI)	
<b>6.8.1.2</b> Vergleich EMI und ERT	
<b>6.8.2</b> Analyse	
<b>7 Fazit</b> .....	<b>130</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>133</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>136</b>

# 1 Einleitung

*„Terroir is concerned with the relationship between the characteristics of an agricultural product (quality, taste, style) and its geographic origin, which might influence these characteristics“ (van Leeuwen, Seguin 2006: 1).*

Der Begriff Terroir beschreibt also den Einfluss auf ein landwirtschaftliches Produkt, in unserem Fall Weintrauben, durch dessen geographische Herkunft.

Daher ist laut dem Konzept des Terroirs nicht nur der Mensch und dessen Eingreifen für die Qualität der Weintrauben verantwortlich, sondern auch der Standort, wo die Weintrauben gepflanzt wurden. Faktoren, wie z.B. Boden, Klima und Topographie, beeinflussen also ebenfalls die Eigenschaften (wie Qualität oder Geschmack) der Weintrauben und somit auch dessen Endprodukt, den Wein. (vgl. van Leeuwen, Seguin 2006: 1-10)

Kommt es also auf Grund des Bodens zu Problemen bei der Wasser-/Nährstoff- oder Sauerstoffversorgung der Weinpflanze, kann sich dies somit beträchtlich (bis hin zu Ernteeinbußen) auf die Qualität und den Geschmack der Weintrauben ausüben. (vgl. Mohr 2005: 238-295)

Im modernen Weinbau (Präzisionsweinbau) versucht man daher, unter anderem mit GPS und Bodenproben, solche problematischen Stellen im Weingarten und deren Ursache (z.B. welcher Nährstoffmangel) aufzudecken. Die Lokalisierung von problematischen Stellen erlaubt es den Weinbauern nämlich, den Weingarten nach dessen unterschiedlichen räumlichen Bedürfnissen zu pflegen und zu bearbeiten. Dies wiederum kann sich dann positiv auf die Ernteerträge und auf die Qualität der Weintrauben auswirken. (vgl. Martini et al. 2013: 165-181)

Während sich in der Präzisionslandwirtschaft der Einsatz von elektromagnetischen und geoelektrischen Messverfahren, welche relativ schnell (große Fläche) und kostengünstig sind, bereits weitgehend etabliert hat (vgl. Sudduth et al. 2005: 263-283; vgl. Corwin, Lesch 2005: 11-43; vgl. Grisso et al. 2009: 1-6; vgl. Lück et al. 2009: 15-25), wird in den letzten Jahren auch der Gebrauch dieser im Präzisionsweinbau erforscht (vgl. Martini et al. 2013: 165-181; vgl. André et al. 2012: 113-122).

Sowohl mit dem elektromagnetischen als auch mit dem geoelektrischen Verfahren kann die elektrische Leitfähigkeit ermittelt werden, welche eng mit Bodeneigenschaften, wie dem Tongehalt, dem Sättigungsgrad der Poren (Wassergehalt) oder dem Salzgehalt in der Bodenlösung, in Verbindung stehen. (vgl. Corwin, Lesch 2005: 11-43)

Durch den Tongehalt können dann indirekt Rückschlüsse über die Wasser-/Sauerstoff-/Nährstoffversorgung der Pflanze gezogen werden. (vgl. Blume et al. 2010: 379-448)

Die vorliegende Arbeit soll sich nun mit dem elektromagnetischen Induktionsverfahren bei kleiner Induktionszahl und dessen Einsatz im Präzisionsweinbau auseinandersetzen. Das heißt, es sollen zuerst seine Vorteile und Nachteile in diesem Bereich aufgezeigt werden und festgestellt werden, ob damit Leitfähigkeitsänderungen und somit auch räumliche Änderungen der Bodeneigenschaften in Weingärten ausgemacht werden können.

Weiteres soll sie sich mit der Frage beschäftigen, ob und wie gut es mit einem durch die elektrische Leitfähigkeit ermittelten Tongehalt möglich ist, problematische Stellen in einem Weingarten zu detektieren.

Schlussendlich soll auch beurteilt werden, wo sich der Einsatz des elektromagnetischen Induktionsverfahrens im Weinbau besonders lohnen würde.

Um diese Fragen beantworten zu können, wird die scheinbare elektrische Leitfähigkeit mit dem CMD Mini-Explorer (Messung bei kleiner Induktionszahl) in 8 verschiedenen Weingärten im Seewinkel (in Apetlon, Nordburgenland) aufgenommen. Da die Rankenhilfen (Metallpfähle + Metallrahmen) der Weinreben einen starken Einfluss auf den CMD Mini-Explorer haben, werden zur Kontrolle ebenfalls geoelektrische Messungen (ERT, IP) durchgeführt.

Durch die Gegenüberstellung von im HOAL (Hydrological Open Air Laboratory in Petzenkirchen) gemessenen scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten (CMD Mini-Explorer) und dort entnommenen Bodenproben, kann zwischen dem Tongehalt und der elektrischen Leitfähigkeit die Korrelation und eine Regressionsgerade bestimmt werden.

Die Weingärten werden nun mittels dem Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit (EMI, ERT) in „Leitfähigkeitsbereiche“ (Bereiche, in denen die Leitfähigkeit relativ konstant ist) geteilt. Für die jeweiligen „Leitfähigkeitsbereiche“ werden dann mit der Gleichung, der vorher erwähnten Regressionsgerade, die max. möglichen Tongehalte berechnet.

Danach klassifiziert man diese „Leitfähigkeitsbereiche“ anhand des ermittelten max. Tongehaltes in leichte, mittelschwere und schwere Böden (nach Abbildung 1).

Diese Klassifizierung und zusätzliche Informationen, wie eine Bodentypenkarte und/oder Bodenbeschreibungen der Weinbauern, sollen es dann möglich machen den Weingarten in Bezug auf die Pflanzengesundheit (ausreichende Wasser-/Nährstoff-/Sauerstoffversorgung) zu analysieren und somit problematische Stellen aufzudecken.

Schließlich wird das Ergebnis der Analyse mit den Informationen der Weingartenbesitzer Herrn Michael Lang und Herrn Michael Pilles verglichen.

Die Arbeit setzt sich aus insgesamt 6 Kapiteln zusammen.

Zunächst befasst man sich im Kapitel 2 mit dem Aufbau des Erdbodens und dem Zusammenspiel von Boden und Pflanze; hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die Weinpflanze gelegt.

Im Fokus des dritten Kapitels steht die elektrische Leitfähigkeit, ihre Mechanismen (elektronische Matrixleitfähigkeit, elektrolytische Leitfähigkeit und Grenzflächenleit-

fähigkeit) und ihre Beziehung zu einigen Bodeneigenschaften. In diesem Kapitel wird auch die Ermittlung der vorher erwähnten Regressionsfunktion durchgeführt.

Kapitel 4 setzt sich mit den theoretischen Grundlagen des elektromagnetischen und geoelektrischen Verfahren auseinander und deren Anwendung im Feld (z.B. Ausrüstung).

Kapitel 5 liefert alle wichtigen Informationen zur Messkampagne im Seewinkel (Messgebiet, Weingärten und Messprotokolle).

Im Kapitel 6 werden schließlich die Auswertungen der beiden Verfahren präsentiert und diese in Bezug auf die Pflanzengesundheit untersucht.

Ein Fazit und ein kurzer Ausblick auf weiterführende Fragestellungen, die sich daraus ergeben haben, beschließen die Arbeit.

## 2 Der Boden als Standort für die Weinrebe

Der Begriff „Terroir“ wird im Weinbau dazu verwendet, um den Zusammenhang zwischen der geografischen Herkunft eines Weines und dessen Geschmack bzw. Qualität zu beschreiben. Man geht also davon aus, dass die geografische Herkunft einer Weinpflanze Auswirkungen auf das Endprodukt, dem Wein, hat. Beeinflusst wird die Weinrebe an ihrem Standort von Faktoren wie z.B. dem Klima, der Topographie, der Geologie, dem Boden und der Bodenhydrologie (Wasserversorgung). (vgl. van Leeuwen, Seguin 2006: 1-8; vgl. Burns 2012: 96)

In dieser Arbeit geht es um den Einfluss des Bodens und der Bodenhydrologie auf die Weinrebe.

Somit werden nun in diesem Kapitel zuerst einmal die Bestandteile des Bodens (Aufbau) ermittelt und danach der Boden als Lebensraum für Pflanzen genauer betrachtet. Zu guter Letzt werden Faktoren des Bodens bestimmt, die sich insbesondere auf die Weinpflanzen und somit auf die Qualität des Weines positiv bzw. negativ auswirken können.

### 2.1 Der Boden und seine Bestandteile

Als Boden wird der oberste Teil der Erdkruste bezeichnet, welcher für verschiedenste Organismen einen Lebensraum bietet und „eine Mächtigkeit von wenigen Zentimeter bis zu mehreren Zehner Meter“ besitzen kann. (Blume et al. 2010: 1)

Da sich der Boden sowohl aus flüssigen als auch festen und gasförmigen Bestandteilen zusammensetzt, repräsentiert er laut Pott und Hübbe (2007: 119) ein „dreiphasiges System“.

Zwischen diesen drei Phasen kommt es immer wieder zu vielzähligen chemischen und physikalischen Interaktionen. Die festen Bestandteile des Bodens -Humus (organische Substanz) und verschiedenste Mineralien- bilden miteinander das Bodengefüge, welches ein „charakteristisches Hohlraumsystem“ (Blume et al. 2010: 1) besitzt. Bei Humus handelt es sich vor allem um den organischen Abfall von Pflanzen, der den im Boden lebenden Organismen als Nahrung zur Verfügung steht. Über einen großen Zeitraum hinweg bilden und entwickeln sich durch z.B. Ablagerung, Verwitterung, Abtragung oder Transport von Gesteinen, deren Bestandteile Mineralien sind, Böden. Somit enthalten Böden unzählige Mineralien von unterschiedlichsten Arten und Größen. (vgl. Blume et al. 2010: 1-7)

Die mineralische Bestandteile im Boden können stark variieren und werden deshalb einfachheitshalber nach der Größe ihrer Körnung unterteilt. Die Unterteilung erfolgt anhand Sand (0.05-2 mm), Schluff (0.05-0.002 mm) und Ton (weniger als 0.002 mm).

Ein Bodenartdreieck (siehe Abbildung 1) ermöglicht dann mittels dieser Unterteilung die Bestimmung der Bodenart. (vgl. McNeill 1980: 7)

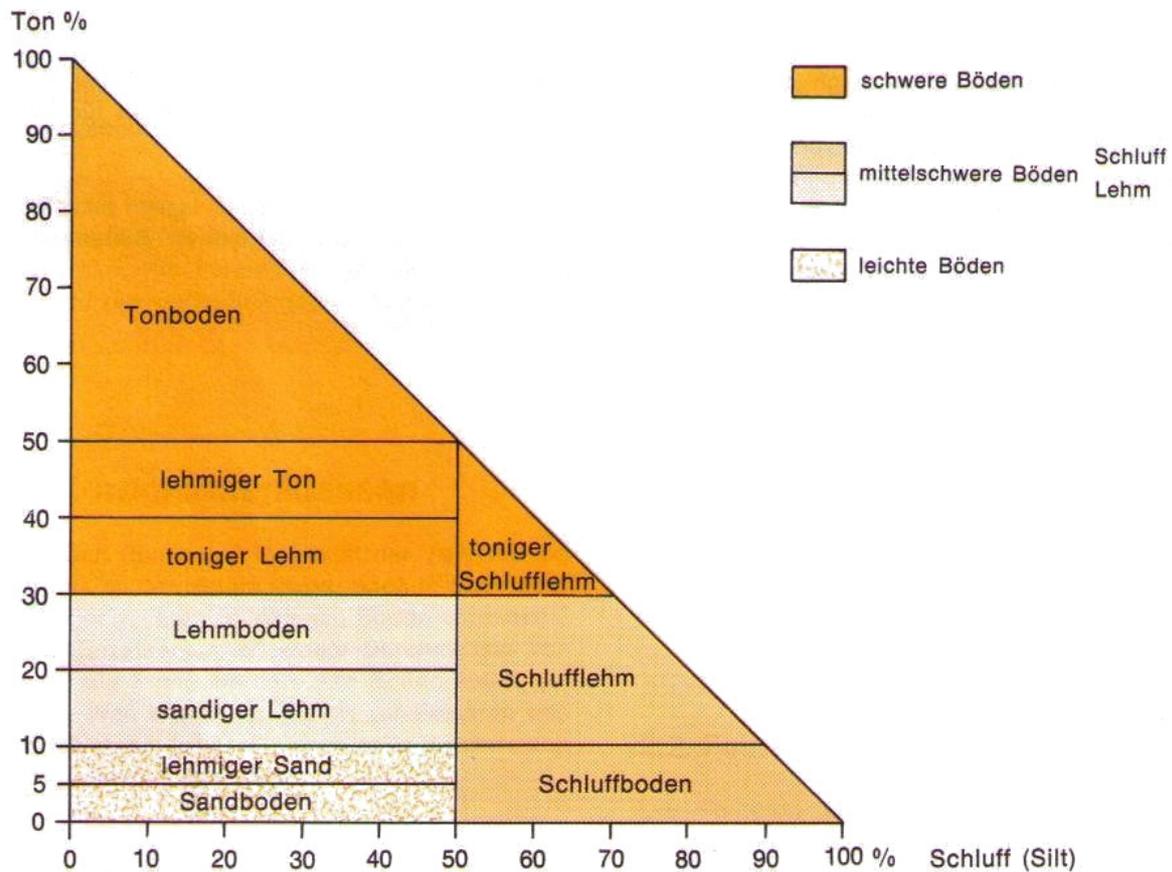


Abbildung 1: Bodenartdreieck (Aus: Jäggli, Furrer, Jäggi 1984: o.S.)

Zwischen mineralischen und organischen Bestandteilen befindet sich ein zusammenhängendes Hohlraumsystem, das aus einzelnen Poren besteht. Diese Poren können eine Varietät an Größen und Formen aufweisen und sind mit einer Bodenlösung (flüssige Phase) -Wasser und darin gelöste Stoffe (z.B. Salze)- und Sauerstoff (gasförmige Phase) gefüllt. (vgl. Blume et al. 2010: 1-6)

## 2.2 Böden als Standorte für Pflanzen

Neben dem Klima (Regen, Sonneneinstrahlung, ...) ist der Boden ein wichtiger Faktor für die Entwicklung einer Pflanze. Im Boden, der der natürliche Standort der Pflanzen ist, werden diese durch ihre Wurzeln verankert und erhalten somit Halt. Außerdem wird die Pflanze durch das Wurzelsystem mit „Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen aus dem Boden“ (Blume et al. 2010: 279) versorgt. Für ein erfolgreiches Anwachsen der Pflanze ist es notwendig, dass „Böden genügend pflanzenverfügbares Wasser speichern können [...], eine ausreichende Durchlüftung [...] und Bodenwärme [...] aufweisen sowie ausreichende Mengen an verfügbaren Pflanzennährstoffen

enthalten“ (Blume et al. 2010: 279). Fällt Regen, so fließt ein Teil dieses Wasser an der Erdoberfläche wieder ab (Oberflächenwasser). Der andere Teil sickert in den Boden und wird zu Bodenwasser. Wie viel Wasser durch Regen zu Bodenwasser wird, hängt von der Topographie, von der Regenstärke und der Bodenart (Wasserleitfähigkeit) ab. Infolgedessen vergrößert sich z.B. der Oberflächenabfluss bei tonreichen Böden (geringe Wasserleitfähigkeit), starkem Regen und steilen Abhängen. (vgl. Blume et al. 2010: 220)

Ein Teil des vom Boden aufgenommenen Wassers sickert in tiefere Bereiche hinab. Der andere Teil verbleibt entgegen der Schwerkraft in den Poren als Haftwasser. Welche Wassermenge der Boden nun in den Poren zurückhalten kann und wie tief das Wasser in diesem sickern kann, hängt von der Wasserkapazität (Wasserhaltefähigkeit) ab. Ist die Wasserkapazität eines Bodens groß, so kann entgegen der Schwerkraft eine größere Wassermenge über einen längeren Zeitraum in den Poren zurückgehalten werden. Die Wasserkapazität eines Bodens wird wiederum durch die Bodenart bestimmt. Da Tonminerale einer der wichtigsten Wasserträger aufgrund ihrer elektronegativen Ladung und der Adsorption (Anlagerung) von positiv geladenen Ionen im Boden sind, besitzen tonige (hoher Feinporenanteil) und lehmige Böden eine viel höhere Wasserkapazität als sandige Böden. Während also in tonreichen Schichten Wasser sehr gut in den Poren festgehalten werden kann, sickert hingegen in sandigen Bodenschichten (hohe Wasserleitfähigkeit) das meiste Regenwasser schnell in tiefere Bereiche hinab. (vgl. Pott, Hübbe 2007: 119-121)

Befindet sich im Erdboden eine Schicht mit geringer Wasserleitfähigkeit (tonige Schicht), so kann oberhalb dieser ein Grundwasserkörper (ganzjährig) oder ein Stauwasserkörper (saisonbedingt) gebildet werden. Diese Anteile des Bodenwassers werden als „freies Wasser“ (Blume et al. 2010: 220) bezeichnet, da sie „nicht durch Bindung an der Bodenmatrix“ (Blume et al. 2010: 220) (feste Bestandteile des Bodens) gehalten werden. (vgl. Blume et al. 2010: 220)

Eine Pflanze kann nun über ihr Wurzelsystem mit dem Haftwasser, und falls vorhanden, mit dem kapillar aufsteigenden Wasser aus dem Grundwasser versorgt werden. Das Wurzelsystem einer Pflanze setzt sich aus Grobwurzeln, Feinwurzeln und aus Wurzelhaaren, die sich in großer Anzahl hinter der Feinwurzel ausbilden, zusammen. Sowohl die Grobwurzeln als auch die Feinwurzeln durchziehen die Grobporen ( $> 10 \mu\text{m}$ ) des Bodens und versorgen sich hauptsächlich mit den darin befindlichen Sauerstoff. Im Gegensatz dazu kann die Pflanze über die Wurzelhaare, die nur für einige Tage funktionsfähig sind, das in den Mittelporen ( $2-10 \mu\text{m}$ ) befindliche Wasser und die darin gelösten Nährstoffe aufnehmen. (vgl. Blume et al. 2010: 379-381)

Jedoch ist nicht das ganze Bodenwasser für die Pflanze verfügbar. Aufgrund der festen Bindung des Wassers an die Bodenpartikel können die Wurzeln nämlich Wasser aus den Feinporen nicht aufnehmen. Da in Schluffböden die Mittelporen überwiegen und somit mehr pflanzenverfügbares Wasser gespeichert werden kann, gelten

sie als „unsere fruchtbarsten Böden“ (Pott, Hüppe 2007: 26). Obwohl Tonböden eine höhere Wasserkapazität als Schluffböden aufweisen, kann in diesen aufgrund der vielen Feinporen ein gewisser Wasseranteil nicht zur Pflanzenversorgung genutzt werden. Infolge der vielen Grobporen und der geringen Wasserkapazität ist der Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser in sandigen Böden im Vergleich zu Schluff- und Tonböden deutlich geringer. Allerdings kann man mittels Durchmischung von organischem Material (Humus) eine Erhöhung des Mittel- und Feinporenanteils in Sandböden erzielen. (vgl. Pott, Hüppe 2007: 100-101, 125-126)

Neben einer konstanten Wasserversorgung ist auch eine gute Durchlüftung des Bodens für die Bodenfruchtbarkeit wichtig. Die Wurzeln werden, wie bereits vorher erwähnt, in den Grobporen mit dem Sauerstoff versorgt (Wurzelatmung) und erhalten dadurch genügend Energie für die Aufnahme und den Transport von Wasser und Nährstoffen. (vgl. Blume et al. 2010: 388)

Das Luftvolumen eines Bodens im wassergesättigten Zustand sollte „etwa 10 Prozent des Gesamtvolumen“ (Pott, Hüppe 2007: 120), welches sich aus Porenvolumen und Substanzvolumen (Mineralien, Humus) zusammensetzt, ausmachen, um die Wurzeln der meisten Kulturpflanzen mit ausreichend Sauerstoff versorgen zu können. Jedoch können Tonböden im wassergesättigten Zustand den Wurzeln oft keine ausreichende Sauerstoffzufuhr gewährleisten, da sich ihre Poren mit Wasser vollfüllen und so kein Platz für Sauerstoff bleibt. (vgl. Pott, Hüppe 2007: 120)

Im Gegensatz dazu sind die Wurzeln in Sandböden bestens mit Sauerstoff versorgt. (vgl. Blume et al. 2010: 388)

Zusätzlich sollte der Boden den Wurzeln für ein erfolgreiches Anwachsen eine ausreichende Bodenwärme bieten können. Wie schnell im Boden chemische Vorgänge dann ablaufen können, hängt ebenfalls mit der Bodentemperatur zusammen. Des Weiteren wird sowohl das Wachstum als auch die Aktivität der im Boden lebenden Organismen durch die Bodenwärme beeinflusst. Vergleicht man nun Tonböden („kalte Pflanzenstandorte“ (Blume et al. 2010: 390)) mit Sandböden („warme Standorte“ (Blume et al. 2010: 390)), so erwärmen sich Tonböden im Frühjahr viel langsamer -was somit den Vegetationsbeginn der Pflanze verzögert- können jedoch die Wärme danach viel länger als Sandböden speichern. (vgl. Blume et al. 2010: 390)

Zuletzt sollte die Pflanze noch reichlich mit Nährstoffen aus dem Boden versorgt werden. Neben Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff benötigt die Pflanze „14...16 weitere unentbehrliche (essenzielle) Elemente“ (Blume et al. 2010: 391), um organische Substanzen aufbauen zu können. Einige dieser essenziell wichtigen Nährstoffe für die Pflanze wären z.B. Stickstoff (N), Phosphor (P), Schwefel (S), Kalium (K), Magnesium (Mg) oder Calcium (Ca). Die Wurzeln können einen Teil an Nährstoffen direkt durch die Bodenlösung aufnehmen. Da der restliche Teil der Nährstoffe weitgehend an die Feststoffe des Bodens gebunden ist, müssen diese zuerst, z.B. durch Ka-

tionenaustausch, mobilisiert werden. Sowohl Nährstoffmangel als auch Nährstoffüberschuss können sich negativ auf die Pflanze und ihre Erträge auswirken. Ein auftretender Nährstoffmangel der Pflanze durch den Boden kann jedoch durch eine mineralische und/oder durch eine organische Düngung wieder behoben werden. (vgl. Blume et al. 2010: 391-392, 395)

## 2.3 Die Weinrebe und Einflussfaktoren auf ihr Wachstum

Die uns heute bekannten Kulturreben, die sich aus insgesamt 18 000 Rebsorten zusammensetzen, stammen von den Wildreben (vor ca. 60 000 000 Jahren) ab, zählen zu den Schlingpflanzen (Liane) und werden durch „Mutationen und natürlichen Kreuzungen“ (Lott et al. 2010: 16) gezüchtet. (vgl. Lott et al. 2010: 15-19)

In Abbildung 2 wird nun das Wurzelsystem einer veredelten Rebe wiedergegeben.

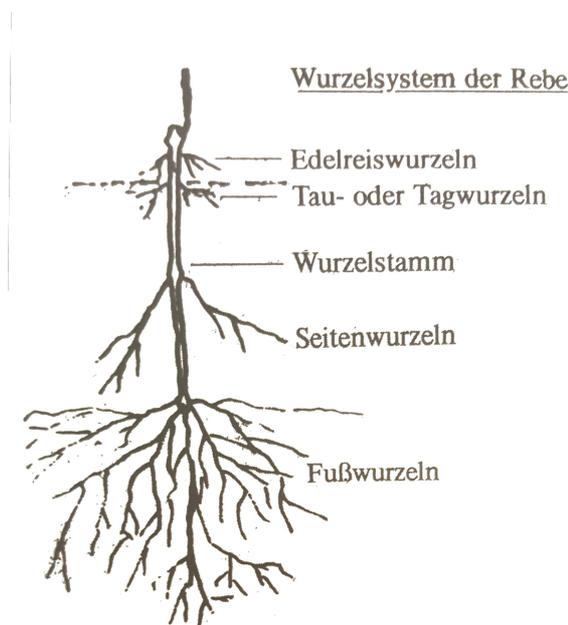


Abbildung 2: „Wurzelbildung einer veredelten Rebe“  
(Aus: Lott et al. 2010: 25)

Das Wurzelsystem einer Weinrebe setzt sich aus den Fußwurzeln, den Seitenwurzeln und den Tau- oder Tagwurzeln zusammen. Die Fußwurzeln können, wenn es der Boden erlaubt, tief in dessen Schichten (mehrere Meter) eindringen und falls benötigt aus diesen Wasser heraufholen. Im Allgemeinen ist es jedoch die Aufgabe der Faserwurzeln, die sich an den Ende der Seitenwurzeln befinden, die Rebe mit Wasser und Nährstoffen zu versorgen. Oberflächennah befinden sich die Tauwurzeln, welche auch Tagwurzeln genannt werden. Diese werden jedoch oft durch benötigte Bodenbearbeitungsmaßnahmen im Weinbau zerstört.

Zum gesunden Anwachsen ist die Weinrebe auf ein mildes Klima angewiesen und mag daher weder zu kalte noch zu heiße Wetterbedingungen. Eine Jahresnieder-

schlagsmenge von 450 mm reicht der Weinrebe vollkommen aus und sie bevorzugt Niederschläge besonders dann, wenn sich ihre ersten Trauben bilden (Juli, August). Weiteres ist die Weinrebe nicht allzu anspruchsvoll hinsichtlich der Bodenart und kann unter anderem sowohl in Gesteinsböden, Kalkböden, Tonböden und in Sandböden gedeihen. (vgl. Lott et al. 2010: 22-23)

Üben jedoch z.B. extreme Witterungen, Nährstoffmangel oder Nährstoffüberschuss immer wieder Stress auf die Rebe aus, so kann es zur Schwächung und Schädigung des Pflanzengewebes kommen und somit die Qualität der Weintrauben beeinträchtigen. Im Extremfall kann es sogar zum Tod der Weinrebe führen.

Lang anhaltende Hitze und Trockenheit kann dazu führen, dass der Boden die Weinrebe nicht mit genügend Wasser versorgen kann und sie dadurch einen Mangel an Wasser und den darin gelösten Nährstoffen erleiden muss. Besonders dafür anfällig sind Weingärten mit dauerbegrünten oder verdichteten Böden (hoher Feinporenanteil). Die Dauerbegrünung (Aussaart von bestimmten Pflanzenarten zwischen den Weingartenreihen ganzjährig) bietet zwar den Weingärten viele Vorteile wie z.B. Schutz vor Verschlammung oder Bildung von Humus, jedoch verbraucht die Dauerbegrünung im Weingarten ca. „20 bis 30 % mehr Wasser“ (Mohr 2005: 42), welches die Weinrebe in Zeiten von Dürreperioden dringend nötig hätte. Leidet nun die Weinreben unter ständigen Wassermangel, wird das „vegetative Wachstum und die Photosynthese“ (Mohr 2005: 242) eingeschränkt. Infolgedessen entwickeln sich die Trauben nicht vollständig und schmecken daher bitter und fade. Jedoch kann sich Trockenheit und damit Wassermangel „in bestimmten Entwicklungsphasen“ (Mohr 2005: 242) der Weinrebe auch positiv auf die Qualität der Weintrauben auswirken. So bewirkt ein „moderater Wassermangel in den ersten Wochen nach der Blüte“ (Mohr 2005: 242), dass Beeren kleiner anwachsen (mehr Geschmack), was sich wiederum „günstig auf Traubengesundheit und Weinqualität“ (Mohr 2005: 242) auswirkt. Um Trockenschäden an Rebe mildern zu können, sollte man bei gefährdeten Standorten trockentolerante Unterlagen wählen und die Bodenpflege des Weingartens dem Problem anpassen. Das heißt, dass einerseits Verdichtungen im Boden beseitigt werden sollten. Diese sind nämlich für die Abnahme der Grobporen verantwortlich und schränken somit die Versickerung von Wasser und die Durchlüftung im Boden ein. Andererseits kann durch Zufuhr von Humus die Wasserspeicherfähigkeit des Weingartens erhöht werden. Auch kann eine installierte Tropfbewässerung von Vorteil sein. (vgl. Mohr 2005: 42-43, 239-242)

Im Gegensatz dazu kann aber auch Wasserüberschuss durch regenreiche Tage die Gesundheit der Rebe gefährden. So kann Staunässe im Weingarten „zu Chlorose oder Kümmerwuchs führen“ (Mohr 2005: 242) und die Traubenqualität durch das Aufplatzen der Trauben beeinträchtigen. (vgl. Mohr 2005: 242)

Besonders tonreiche und verdichtete Böden sind von Vernässung und Verschlammung betroffen. (vgl. Mohr 2005: 42 ; Pott, Hüppe 2005: 120)

Liegt eine „mangelhafte, unausgewogene oder überhöhte Nährstoffversorgung“

(Mohr 2005: 254) im Boden vor, so kann dies ebenfalls negative Auswirkungen auf die Rebe haben. Nährstoffe werden zum Aufbau des Pflanzenkörpers benötigt. Ist die Aufnahme gestört, werden im Allgemeinen „die Form, Farbe oder Funktion einzelner Organe oder des ganzen Rebstocks“ (Mohr 2005: 240) beeinflusst. Demzufolge kann z.B. ein starker Stickstoffmangel (N) dazu führen, dass die Rispe nur schwach mit kleine vorzeitig reifen Beeren behangen ist und der daraus produzierte Wein einen dünnen und bitteren Geschmack vorweist. (vgl. Mohr 2005: 240, 254-263)

Wie man in darauffolgenden Kapitel nun feststellen wird, lassen sich nun einige vorher erwähnte Bodeneigenschaften (z.B. Tongehalt, Wassergehalt, Kationenaustauschkapazität), welche die Gesundheit der Rebe beeinflussen, nun mit der elektrischen Leitfähigkeit (elektromagnetischen und geoelektrisches Verfahren) in Verbindung setzen.

### 3 Die elektrische Leitfähigkeit des Bodens

Die elektrische Leitfähigkeit zählt neben der Dielektrizitätskonstante und der magnetischen Permeabilität zu den physikalischen Eigenschaften, die das Verhalten von elektromagnetischen Feldern beim Durchwandern eines Mediums beschreiben.

Durchwandert die elektromagnetische Welle ein isotrop leitendes Medium, wo elektrische Feldstärke  $\vec{E}$  und Stromdichte  $\vec{j}$  gleichgerichtet und parallel sind, „beschreibt die elektrische Leitfähigkeit nach dem Ohmschen Gesetz [...] das Verhältnis von  $j$  zu  $E$ “ (Berktdold et al. 2005: 89) ( Berechnung siehe Kapitel 4.3.1.1 und Formel 14). (vgl. Berktdold et al. 2005: 89, 94)

Die elektrische Leitfähigkeit (bzw. der spezifische elektrische Widerstand) ist die Fähigkeit eines Mediums (in unserem Fall der Boden), wie gut (bzw. schlecht) dieses Strom leiten kann. Je größer also der Wert der elektrischen Leitfähigkeit ist, desto leichter kann der Strom durch den Untergrund fließen. Der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit ist der spezifische elektrische Widerstand und so ist es im Allgemeinen möglich, die durch die Messung bei kleiner Induktionszahl erhaltenen scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten (elektromagnetisches Verfahren) mit den scheinbaren spezifischen elektrischen Widerständen des Gleichstromverfahrens zu vergleichen. (vgl. McNeill 1980: 6)

Der Wertebereich der elektrischen Leitfähigkeit von natürlichen Materialien erstreckt sich über 25 Dekaden, wobei das Minimum bei  $10^{-18}$  S/m (Diamanten) und das Maximum bei  $10^7$  S/m (Kupfer) liegt. (vgl. Berktdold et al. 2005: 89)

Material	Wertebereich (mS/m)	
	Minimum	Maximum
Kies	<0,1	20 (wassergesättigt)
Sand	<0,1	20 (wassergesättigt)
Schluff	20	50
Lößlehm	10	33,3...
Ton (erdfeucht)	33,3...	333,3...
Ton (trocken)	<1	
Torf, Humus, Schlick	40	66,6...
Sandstein	<0,01(kompakt)	>20(klüftig, feucht)
Kalkstein	<0,01(kompakt)	10(klüftig, feucht)
Tonschiefer	<0,01(kompakt)	20(klüftig, feucht)
Destilliertes Wasser	<1	
Natürliche Wässer	3,3...	100
Meerwasser		4000

Tabelle 1: Elektrische Leitfähigkeit einiger Materialien (nach Berktdold et al. 2005: 98)

Tabelle 1 listet für einige Materialien, die oft in der Geophysik erkundet werden, den Wertebereich ihrer elektrischen Leitfähigkeit (in mS/m) auf.

### 3.1 Leitfähigkeitsmechanismen

Die Gesamtleitfähigkeit im Boden resultiert aus der elektronischen Matrixleitfähigkeit, der elektrolytischen Leitfähigkeit und der Grenzflächenleitfähigkeit. (vgl. Berkold et al. 2005: 90-91; vgl. Rhoades et al. 1999: 198)

#### 3.1.1 Elektronische Matrixleitfähigkeit

Die elektronische Matrixleitfähigkeit (siehe Abbildung 5.3) wird durch die im Boden vorhandenen gesteinsbildenden Mineralien (wie z.B. Silikate, Karbonate oder Sulfate) verursacht. Hierbei übernehmen die freien Elektronen den Ladungstransport und der Strom fließt somit durch die sich berührenden Mineralien hindurch. (vgl. Berkold et al. 2005: 90-91; Rhoades et al. 1999: 198)

Im Normalfall kann die Matrixleitfähigkeit vernachlässigt werden, da sie sehr gering ist (etwa im Wertebereich von  $10^{-11}$  –  $10^{-7}$  mS/m). Enthält jedoch das Medium „Erzminerale oder Kohlenstoff in hochinkohlter Form“ (Berkold et al. 2005: 90) (z.B. Graphit), kommt es zu einem enormen Anstieg der Matrixleitfähigkeit und muss daher berücksichtigt werden. (vgl. Berkold et al. 2005: 90)

#### 3.1.2 Elektrolytische Leitfähigkeit

Sind die Poren des Bodens mit ausreichend Wasser gefüllt, so wird ein Teil der elektrischen Leitfähigkeit von im Wasser enthaltenen Elektrolyt bestimmt. Bei der elektrolytischen Leitfähigkeit (siehe Abbildung 5.2) übernehmen die im Wasser befindlichen Ionen den Ladungstransport und der Strom kann in der Flüssigkeit durch das zusammenhängende Porennetzwerk des Bodens fließen. (vgl. Rhoades et al. 1999: 198)

Eine gute Näherung der elektrolytischen Leitfähigkeit für gesättigte und teilgesättigte tonfreie Sedimente kann mit der „Archie Formel“ (Archie 1942: 54-62, siehe Formel 1) ermittelt werden. Mit dieser wird der Zusammenhang von elektrischer Leitfähigkeit eines Sediments, dem Sättigungsgrad der Poren, der Leitfähigkeit des Elektrolyts und der effektiven Porosität des Sediments formal beschrieben. (vgl. Berkold et al. 2005: 90; vgl. Archie 1942: 52-62)

$$\sigma_0 = \frac{\phi_m}{a} \sigma_w S^n$$

Formel 1: "Archie Formel" (Berkold et al. 2005: 90 nach Archie 1942: 52-62)

mit  
 $\sigma_0$  ... elektrische Leitfähigkeit des Sediments  
 $\phi$  ... effektive Porosität (0–1)  
 $m$  ... Zementationsexponent  
 $a$  ... Proportionalitätsfaktor  
 $\sigma_w$  ... elektroyltische Leitfähigkeit des Porenwassers  
 $S$  ... Sättigungsgrad (0–1)  
 $n$  ... Sättigungsexponent

Der in Formel 1 vorkommende Zementationsexponent sowie der Proportionalitätsfaktor sind Konstanten, die empirisch ermittelt werden.

Der Zementationsexponent hängt sowohl mit der Form, Größe und Art der festen Partikeln als auch mit der Größe und Form der einzelnen Poren und dem gesamten Porennetzwerk zusammen. Nimmt der Verfestigungsgrad des Sediments zu, so führt dies im Allgemeinen zu einem höheren Zementationsexponenten, wobei dessen Wert im Bereich von 1.3 bis ungefähr 3 liegen kann. (vgl. Salem, Chilingarin 1999: 83-84; vgl. Berktold et al. 2005: 91)

Zwar kann der Proportionalitätsfaktor Werte zwischen 0.5 und 1 annehmen, doch wird er häufig Einfachheit halber auf 1 gesetzt.

Der Sättigungsgrad gibt an, in welchem Ausmaß die Poren mit dem Bodenwasser gefüllt sind. Bei einem Sättigungsgrad von 1 (also 100 %) ist der Boden wassergesättigt und kann daher kein Wasser mehr aufnehmen. Ist der Boden nur teilgesättigt, nimmt aufgrund der noch vorhandenen Luft in den Poren die Leitfähigkeit ab. Außerdem wird der Sättigungsexponent „meist mit  $n \approx 2$  angenommen“ (Berktold et al. 2005: 91). (vgl. Berktold et al. 2005: 91)

Zuletzt muss zur Berechnung der Leitfähigkeit nach der „Archie Formel“ (Archie 1942: 54-62) der Wert der effektiven Porosität -also ein Maß für den Porenanteil, der die Bewegung von Flüssigkeit und darin gelöste Stoffe ermöglicht- für ein Sediment zwischen 0 und 1 (0 – 100 %) festgelegt werden. (vgl. Berktold et al. 2005:90; vgl. Anovitz, Cole 2015: 62)

Im Seewinkel, das Messgebiet, entwickelten sich durch die Ablagerung von vor allem sandigen Material und Löß auf vorhanden Schotterdecken die Bodentypen Paratschernosemen und Tschernoseme zum Überfluss. (vgl. Nelhiebel 1980: 41-42; siehe Kapitel 5.1)

Um nun das Verhalten der elektrolytischen Leitfähigkeit im Bezug auf das Messgebiet (jedoch nicht tonfrei) untersuchen zu können, wird die soeben vorgestellte „Archie Formel“ (Archie 1942: 54-62) für sandige Materialien berechnet und mittels Matlab-Plots veranschaulicht.

Zuerst wird die elektrische Leitfähigkeit für reinen lockeren Sand („clean unconsolidated sands“ (Archie 1942: 85; Abbildung 3: Subplot 1)) untersucht. Dafür legt man den Wert des Zementationsexponents ( $m$ ) wie bei Archie (1942: 85) für reinen lockeren Sand auf 1.3 fest.

Für die effektive Porosität ( $\phi$ ) von reinem Sand wird ein Wert von 0.35, -also „35 %“ (Kresic 2007: 630), angenommen. Sowohl Proportionalitätsfaktor ( $a$ ) als auch Sättigungsexponent ( $n$ ) werden, wie von Berkold et al. (2005: 91) empfohlen, auf 1 und 2 gesetzt. Für die elektrolytische Leitfähigkeit ( $\sigma_w$ ) des Porenwasser nimmt man einen Wertebereich von 3.3 mS/m bis 200 mS/m an.

Laut Tabelle 1 umfasst zwar die elektrische Leitfähigkeit von natürlichen Gewässern einen Bereich von nur 3.3 mS/m bis 100 mS/m, da jedoch im Seewinkel mit einer Versalzung des Bodenwasser zu rechnen ist (siehe Kapitel 5.1), wird der Wertebereich vergrößert.

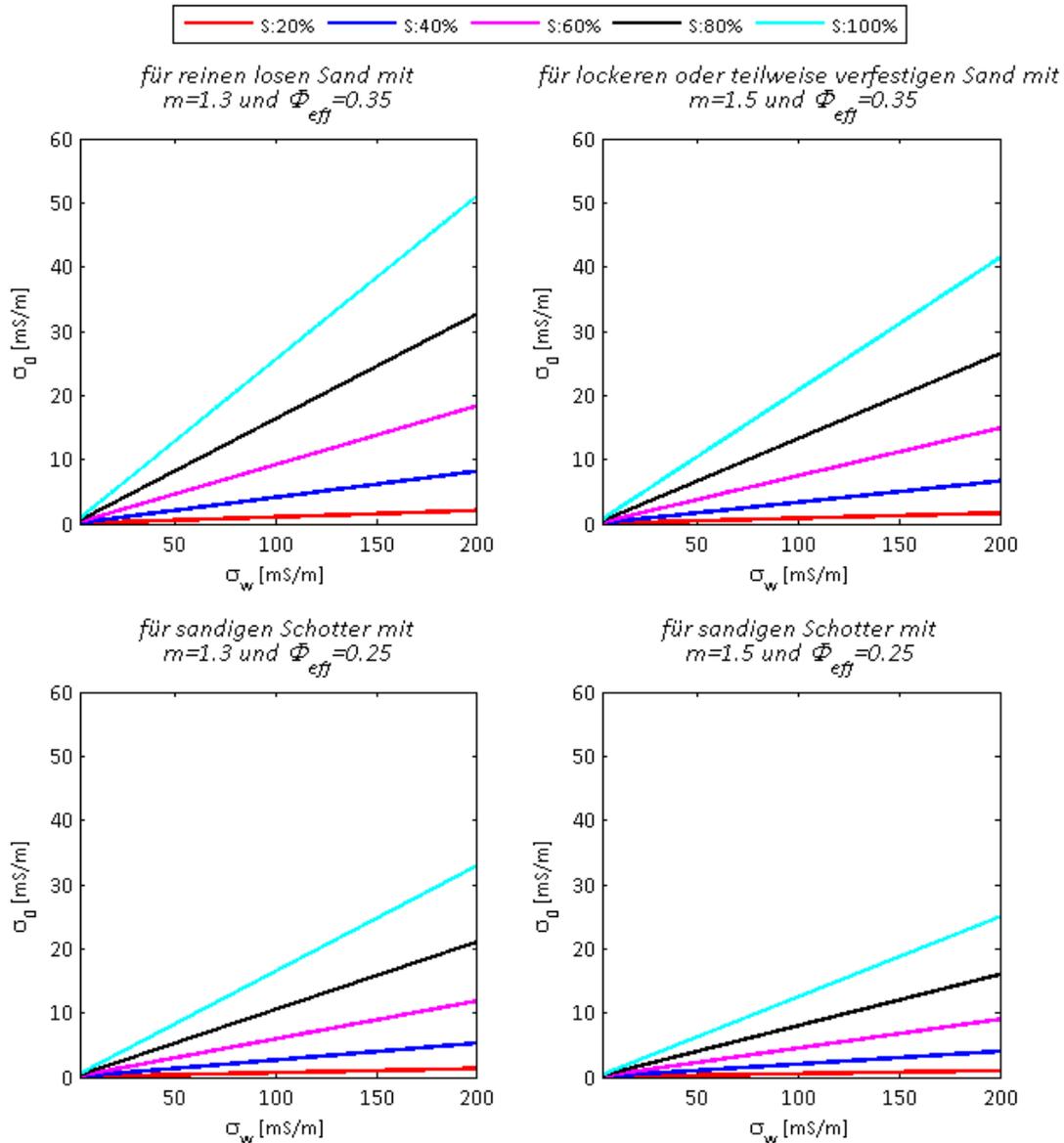
Mit diesen angenommenen Werten für die Funktionsparametern wird dann schließlich die elektrische Leitfähigkeit von reinem losen Sand für 5 verschiedene Sättigungsgrade (20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 100 %) berechnet.

Archie (1942: 57) erwähnt, dass der Zementationsexponent von lockeren oder teilweise verfestigten sandigen Böden („loosely or partly consolidated sands“; Abbildung 3: Subplot 2) höchstwahrscheinlich in einem Bereich von 1.3 bis 2 liegen muss. Zur weiteren Untersuchung wird daher der Zementationsexponent auf 1.5 gesetzt, wobei die anderen Funktionsparameter unverändert bleiben.

Um auch eine Näherung der elektrischen Leitfähigkeit mittels „Archie Formel“ (Archie 1942: 54-62) für sandigen Schotter erhalten zu können, wird die effektive Porosität für eine weitere Untersuchung auf 0.25 („25 %“ → „sandy gravel“ (Kresic 2007: 630)) festgelegt. Einerseits wird dann die elektrische Leitfähigkeit für sandigen Schotter mit einem Zementationsexponent von 1.3 (Abbildung 3: Subplot 3), andererseits mit einem von 1.5 (Abbildung 3: Subplot 4) berechnet. Die restlichen Funktionsparameter (Sättigungsexponent, Sättigungsgrade, Proportionalitätsfaktor, elektrolytische Leitfähigkeiten des Porenwassers) bleiben bei der Berechnung wie schon zuvor unverändert.

Abbildung 3 zeigt nun die mit der „Archie Formel“ (Archie 1942: 54-62) berechneten Funktionsgraphen für die vorher angenommenen Bodenverhältnisse.

## "Archie Formel"



**Abbildung 3:** Erforschung der elektrolytischen Leitfähigkeit von sandigem Material durch Variation der Funktionsparameter in der „Archie Formel“ (Archie 1942: 54-62)

Betrachtet man nun die Subplots in Abbildung 3 für sich alleine, so lässt sich für alle vier angenommenen Materialien eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit ( $\sigma_0$ ) durch die Erhöhung des Sättigungsgrades (**S**) und der elektrolytischen Leitfähigkeit der Porenflüssigkeit ( $\sigma_w$ ) feststellen.

Nimmt man an, dass die Poren, beispielhaft von reinem, losem Sand, zu 25 % mit einem Elektrolyt ( $\sigma_w = 120$  mS/m) gefüllt sind, dann wäre nach der „Archie Formel“ eine elektrische Leitfähigkeit von ca. 2 mS/m zu erwarten. Steigt der Sättigungsgrad um 25 % ( $S= 50$  %), wird für das Material ein Leitfähigkeitswert von etwa 8 mS/m ermittelt. Daher eine Zunahme von 6 mS/m.

Für einen Sättigungsgrad von 75 % und 100 % (wassergesättigt; Grundwasser) erge-

ben sich elektrische Leitfähigkeiten von 17 mS/m und 31 mS/m. Es lässt sich also für tonfreie Sedimente ein quadratischer Anstieg (Sättigungsexponent=2) der elektrischen Leitfähigkeit mit dem Sättigungsgrad beobachten.

Vergleicht man nun alle Subplots miteinander, kann einerseits eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit mit der effektiven Porosität ( $\phi$ ), andererseits eine Abnahme der Leitfähigkeit mit dem Zementationsexponenten ( $m$ ) festgestellt werden. So ist reiner, loser Sand gegenüber den anderen drei angenommenen Materialien am leitfähigsten.

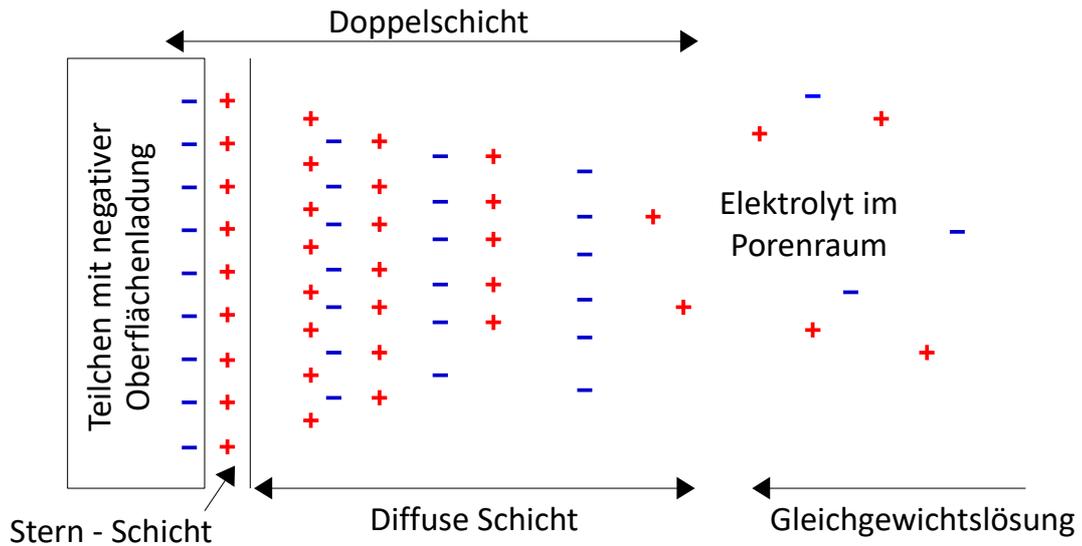
Zum Beispiel lässt sich für reinen, losen Sand, dessen Poren vollständig ( $S=100\%$ ) mit einem Elektrolyt von 200 mS/m gefüllt sind, eine elektrische Leitfähigkeit von fast 51 mS/m berechnen. Im Vergleich dazu beträgt die Leitfähigkeit für lockeren oder teilweise verfestigten Sand (gleiche Bedingungen) ca. 41 mS/m, also 10 mS/m weniger. Für sandigen Schotter ( $m=1.3$ ) beläuft sich die elektrische Leitfähigkeit dann nur mehr auf 33 mS/m.

### 3.1.3 Grenzflächenleitfähigkeit

Die Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit mittels der „Archie Formel“ (Archie 1942: 54-62) ist nur für tonfreie Sedimente gültig. Enthält ein Sediment auch Ton, dann erfolgt die Stromleitung nicht nur durch das Porenwasser, sondern auch durch die Kornoberfläche. Die Grenzflächenleitfähigkeit (siehe Abbildung 5.1) wird vor allem durch die Tonminerale im Untergrund verursacht, jedoch kann sie „bei geringer Mineralisation des Wassers auch in Sande“ (Berkold et al. 2005: 91) vorkommen. Aufgrund der Interaktion von Porenflüssigkeit und Gesteinsmatrix, entsteht an deren Grenzfläche eine elektrische Doppelschicht und der Strom fließt entlang dieser Grenzfläche. (vgl. Berkold et al. 2005: 91)

Zur Ausbildung dieser elektrischen Doppelschicht kommt es, wenn Mineralkörner eine negative Oberflächenladung besitzen und sich die Kationen (positiv geladene Ionen) und Anionen (negativ geladene Ionen) der Porenflüssigkeit um diese Körner ansammeln. Direkt an der Mineraloberfläche befindet sich dann eine feste Schicht aus Kationen, die auch als Stern-Schicht bezeichnet wird. An dieser grenzt die „diffuse Schicht“ (Berkold et al. 2005: 177), welche sich aus einer lockeren Ansammlung von Kationen und Anionen des Elektrolyts zusammensetzt. (vgl. Berkold et al. 2005: 91, 177-178)

Abbildung 4 zeigt nun die elektrische Doppelschicht eines Tonminerals.

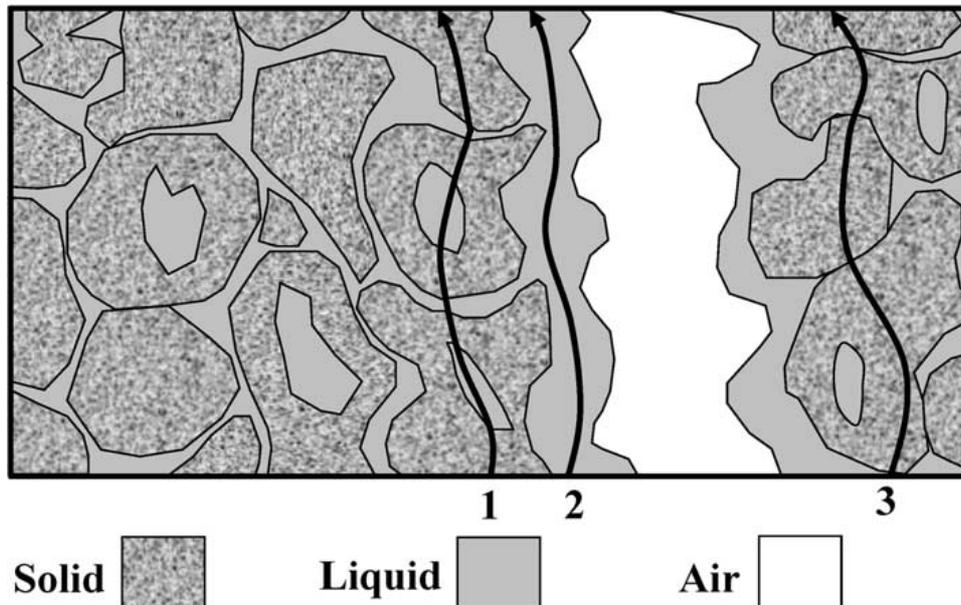


**Abbildung 4:** Verteilung der Ionen in der elektrischen Doppelschicht (eigene Darstellung nach Wienberg 1990: 222)

Bei tonigen Sedimenten kommt es durch die Grenzflächenleitfähigkeit zur einer deutlichen Erhöhung der Gesamtleitfähigkeit. Allerdings sollte in Betracht gezogen werden, dass z.B. ein sandiger Aquifer durch saline Kontamination eventuell nicht von einem tonigen Stauer unterschieden werden kann, da sich die gemessenen Leitfähigkeiten gleichen könnten. (vgl. Berkold et al. 2005: 178)

Zum Abschluss dieses Unterkapitels sollen die 3 Leitfähigkeitsmechanismen in Abbildung 5 noch einmal grafisch dargestellt werden.

## Pathways of Electrical Conductance Soil Cross Section



**Abbildung 5:** Die drei Leitfähigkeitsmechanismen: 1) Grenzflächenleitfähigkeit; 2) elektrolytische Leitfähigkeit; 3) elektronische Matrixleitfähigkeit (Aus: Corwin, Lesch 2005: 15 nach Rhoades et al. 1989)

## 3.2 Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit

Bereits im Kapitel 3.1, in dem die einzelnen Leitfähigkeitsmechanismen vorgestellt werden, ist zu erkennen, dass der Stromfluss durch den Boden und somit die elektrische Leitfähigkeit von Bodeneigenschaften, wie z.B. der Wasserspeicherkapazität (Wasserversorgung), der Bodentextur, der Porosität oder dem Salzgehalt, beeinflusst wird. Dieser Zusammenhang wird daher in der Präzisionslandwirtschaft ausgenutzt, um mit gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten die für die Pflanzenproduktivität wichtigen Bodeneigenschaften bestimmen zu können. (vgl. Grisso et al. 2009: 1-2) Folglich werden nun einige dieser Bodeneigenschaften aufgelistet und ihre Verbindung mit der elektrischen Leitfähigkeit genauer beleuchtet.

Betrachtet man nun den Einfluss, welche die Mineralgröße (Körnung) der Hauptbodenarten Sand, Schluff und Ton im trockenen Zustand auf die elektrische Leitfähigkeit haben, so wird man feststellen, dass dieser sehr gering ist und sich sowohl Sand als auch Schluff und Ton als gute Isolatoren eignen. Jedoch ändert sich dies drastisch für die Tonminerale, wenn diese in Kontakt mit Wasser kommen. Während die Partikel in der Sand- und Schlufffraktion elektrisch neutral erscheinen, besitzen die Schichtsilicate der Tonfraktion ( $< 0.002$  mm) nämlich eine negativ geladene Oberfläche. (vgl. McNeill 1980: 7)

Die negative Oberflächenladung dieser Mineralien wird stets durch Ionen in der elektrolytischen Flüssigkeit der Poren ausgeglichen, was zur Bildung der elektrischen Doppelschicht führt (siehe Kapitel 3.1.3 Grenzflächenleitfähigkeit). Die Kationen, die an der Oberfläche der Tonminerale durch elektrostatische Kräfte haften, können leicht durch anderen Kationen in der Porenflüssigkeit ausgetauscht werden. Dieser Vorgang wird als Kationenaustausch bezeichnet und spielt in der Versorgung der Pflanzen mit Nährstoffen (vor allem Calcium, Magnesium, Kalium, Ammonium) eine sehr wichtige Rolle. Ein wichtiger Kennwert ist hierbei die Kationenaustauschkapazität. Sie entspricht der „gesamten Ladungsmenge an Kationen, die ein Boden in austauschbarer Form adsorbieren“ (Blume et al. 2010: 139) (anlagern) kann. (vgl. Blume et al. 2010: 135-139)

Was soviel bedeutet, dass sie ein Maß für die Kationen ist, welche benötigt werden, um die Tonminerale elektrisch neutral zu machen. Da Tonminerale aufgrund ihrer blättchenartigen Struktur eine große Oberfläche besitzen und sich somit viele Ionen an dieser anlagern können, steigt die Kationenaustauschkapazität und somit auch die elektrische Leitfähigkeit des Bodens bei zunehmenden Tongehalt. (vgl. McNeill 1980: 7)

Zusammenfassend kann aus Tabelle 1 nun der Wertebereich der elektrischen Leitfähigkeit in Bezug auf die drei Hauptbodenarten Sand, Schluff und Ton (erdfeucht) entnommen werden. Hierbei sind die Hauptbodenarten so geordnet, dass Ton die

höchste Leitfähigkeit besitzt und Mineralien der Sandfraktion die geringste. Der Wertebereich der elektrischen Leitfähigkeit von Schluff kann zwischen den von Sand und Ton angesiedelt werden.

Weiteres wird die elektrische Leitfähigkeit von dem Hohlraumsystem des untersuchten Mediums bestimmt. Dabei sind sowohl die Anzahl, Form und Größe der Poren als auch die Form und das Ausmaß des vernetzten Porenraums ausschlaggebend. (vgl. McNeill 1980: 6)

So gilt, je höher das Porenvolumen eines Mediums ist, desto leichter kann Strom durch dieses fließen. Dies wiederum führt zu einem Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit. (vgl. Grisso et al. 2009: 2)

Vergleicht man die drei Hauptbodenarten in Bezug auf deren Hohlraumsystem, besitzen Tonmineralien aufgrund der starken Abweichung von der Kugelform (blättchenartige Form) das größte Porenvolumen und Sandmineralien das niedrigste. (vgl. Blume et al. 2010: 179-180)

Außerdem wird die elektrische Leitfähigkeit wie bereits in Abbildung 3 zu sehen, vom Wassergehalt in den Poren beeinflusst. So steigt die elektrische Leitfähigkeit bei steigendem Sättigungsgrad der Poren. Durch diesen Zusammenhang lassen sich somit auch Rückschlüsse über das Wasserhaltevermögen eines Bodens ziehen. (vgl. Bertold et al. 2005: 91; vgl. Grisso et al. 2009: 2)

Ebenfalls hat die Anzahl der Ionen (gelöste Salze) in der Porenflüssigkeit und deren Geschwindigkeit, welche durch die Viskosität der Flüssigkeit bestimmt wird, eine Auswirkung (siehe Kapitel 3.1.2 elektrolytische Leitfähigkeit) auf die elektrische Leitfähigkeit. Eine höhere Salzkonzentration in der Porenflüssigkeit führt zum Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit. Jedoch kann auch die Ionenzusammensetzung bei gleichbleibender Konzentration aufgrund von unterschiedlichen Ionengeschwindigkeiten (z.B. „  $H^+$ :  $v=36.2 \times 10^{-8}$  ;  $Na^+$ :  $v=5.2 \times 10^{-8}$  “ (McNeill 1980: 10)) Auswirkung auf die elektrische Leitfähigkeit haben. (vgl. McNeill 1980: 10)

Wie hoch der Effekt von Salz auf die elektrische Leitfähigkeit ist, wird in Tabelle 1 verdeutlicht. Laut dieser hat nämlich destilliertes Wasser, das kaum Ionen enthält, eine elektrische Leitfähigkeit von max. 1 mS/m. Im Vergleich dazu kann Meerwasser einen Leitfähigkeitswert von bis zu 4000 mS/m erreichen.

Zuletzt nimmt auch die Bodentemperatur Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit. Im Allgemeinen führt ein Anstieg der Bodentemperatur zu einer Abnahme der Viskosität (Zähflüssigkeit eines Fluids) der Porenflüssigkeit. Resultierend daraus können sich Ionen nun viel schneller in dieser bewegen, was wiederum zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit führt. (vgl. McNeill 1980: 11; vgl. Samouelian et al. 2005: 179)

In McNeill (1980: 11) wurde berichtet, dass eine Temperaturzunahme von ca. 40 °C beinahe zu einer Verdoppelung der elektrischen Leitfähigkeit führt.

### 3.2.1 Empirische Untersuchung über den Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Tongehalt

Um den für die später folgende Auswertung (siehe Kapitel 6) wichtigen Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Tongehalt untersuchen zu können und diesen möglichst genau mit einer Funktionsgleichung beschreiben zu können, wurden durch Bodenproben erhaltene Tongehalte gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten gegenübergestellt und sowohl ihre Korrelation als auch ihre Regressionsgleichung berechnet.

Die Bodenproben und Daten der Leitfähigkeitsmessung wurden im Rahmen des Projektes HOAL (Hydrological Open Air Laboratory) in Petzenkirchen entnommen und gemessen. Die Analyse der Bodenprobe liefert unter anderem den Tongehalt, den Schluffgehalt und den Sandgehalt in verschiedenen Tiefen (max. 70 cm). Weiteres wurde die scheinbare elektrische Leitfähigkeit in Vorstudien (CMD Mini-Explorer) im HOAL aufgenommen. Während die Bodenanalyse Daten für eine exakte Tiefe liefert, erhält man bei dem elektromagnetischen Verfahren nur gemittelte elektrische Leitfähigkeiten für einen jeweiligen Tiefenbereich (0.5 m, 1.0 m, 1.8 m). Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wurde daher für jede Bodenprobe der Durchschnittswert des Tonanteils aber auch des Schluffanteils und des Sandgehaltes ermittelt und anschließend dem Datensatz der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Tiefenbereichs 50 cm grafisch mit Hilfe des Programms QGIS gegenübergestellt.

Abbildung 6 zeigt uns nun diesen grafischen Vergleich.

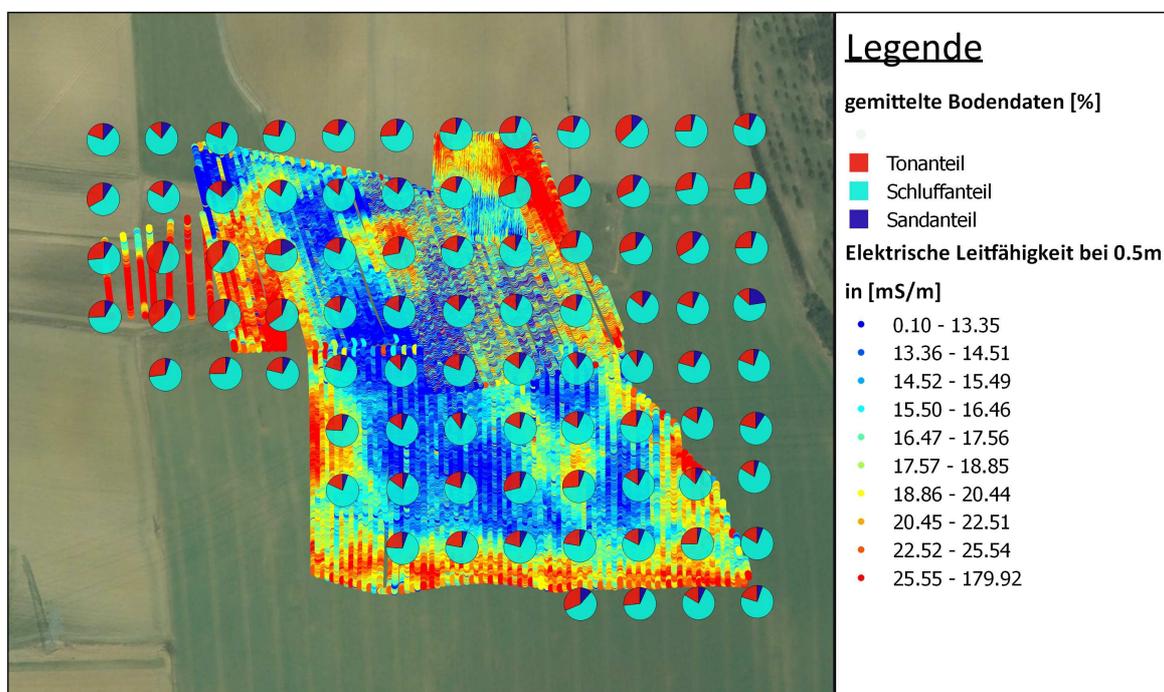


Abbildung 6: Grafischer Vergleich der gemittelten Bodendaten und der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten im Tiefenbereich 50 cm

Bereits in Abbildung 6 lässt sich beobachten, dass einerseits ein hoher Leitfähigkeitswert (gelb bis rot) mit der Zunahme des Tongehaltes einhergeht, andererseits die Abnahme des Tonanteils und somit die Zunahme von Schluff und Sand zur Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit (grün bis blau) führt.

Um den Zusammenhang aber noch mit statistischen Methoden zu beschreiben, wurden in QGIS mit Hilfe des grafischen Vergleichs (Abbildung) für die jeweiligen Standorte der entnommenen Bodenproben ein in unmittelbarer Nähe gemessener Leitfähigkeitswert manuell ausgemacht.

Anschließend wurde mittels Matlab ein Streudiagramm (siehe Abbildung 7) mit den jeweiligen gemittelten Tongehalten und den dazugehörigen scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten erstellt.

### Zusammenhang zwischen Tongehalt und elektrischer Leitfähigkeit

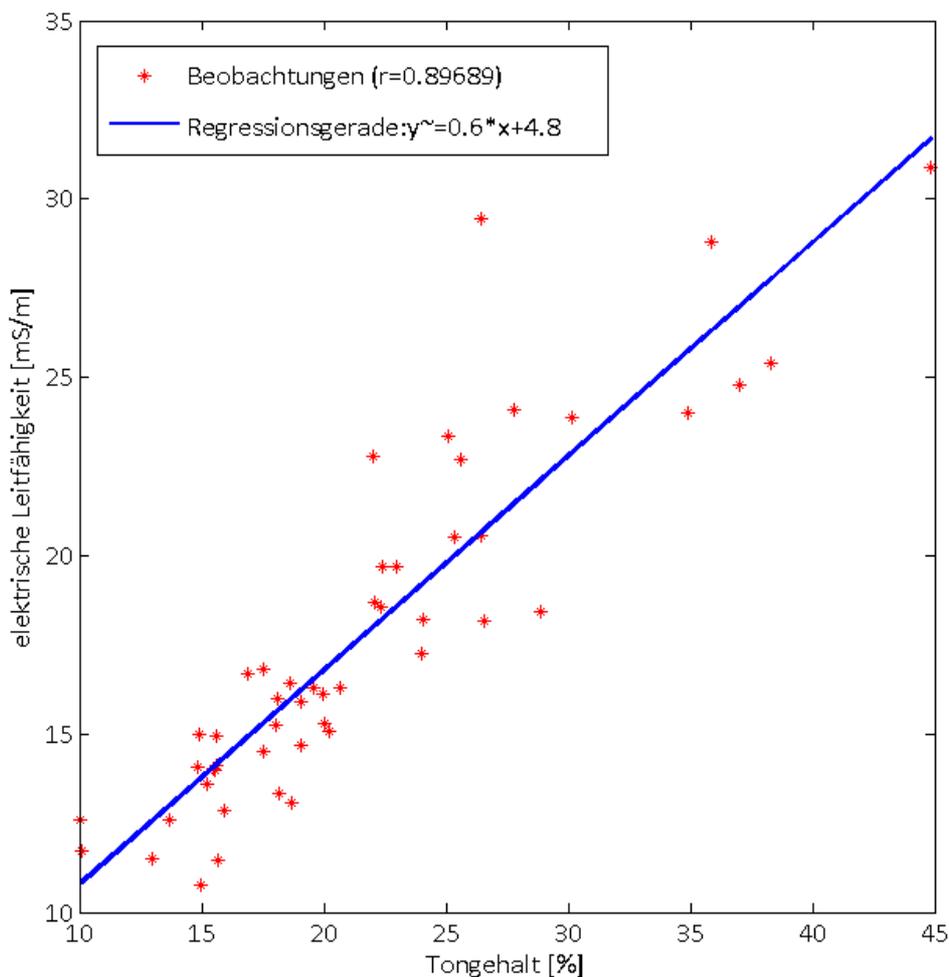


Abbildung 7: Streudiagramm, Korrelation und Regression der zwei Beobachtungen (gemittelter Tongehalt und scheinbare elektrische Leitfähigkeit)

Betrachtet man nun die Punktwolke (rote Sterne) des Streudiagramms, lässt sich die

Form, Stärke und Richtung des Zusammenhanges zwischen den beiden Beobachtungen feststellen. Einerseits liegen die Punkte beinahe (Stärke) auf einer Geraden (Form: linear), andererseits lässt sich ein positiver Trend (Richtung) erkennen. Bestätigen lässt sich dies auch mit der Berechnung des Korrelationskoeffizienten  $r$ .

Der dimensionslose Korrelationskoeffizient  $r$  ist ein Maß dafür, wie stark der lineare Zusammenhang zwischen zwei Beobachtungen ist. Er kann Werte zwischen -1 (negativer Trend) und 1 (positiver Trend) annehmen, wobei für die Werte -1 und 1 ein perfekter linearer Zusammenhang (alle Punkte auf einer Geraden) zwischen den Variablen beobachtet werden kann. Wäre der Korrelationskoeffizient 0, würde zwischen den beiden Variablen kein linearer Zusammenhang bestehen. (vgl. Cleff 2015: 101)

In unserem Fall lässt sich ein Korrelationskoeffizient von 0.89689 berechnen und somit existiert zwischen dem Tongehalt und der elektrischen Leitfähigkeit laut Cleff (2015: 101) ein starker, positiver linearer Zusammenhang ( $r \geq 0.8$ ).

Aus der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen dem Tongehalt und der elektrischen Leitfähigkeit lässt sich nun folgern und bestätigen, dass die Zunahme des Tongehaltes im Boden gleichzeitig zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit (linearer, positiver Zusammenhang) führt.

Um den Zusammenhang zwischen Tongehalt ( $x$ , unabhängige Variable) und elektrischer Leitfähigkeit ( $y$ , abhängige Variable) auch mittels einer linearen Funktionsgleichung ( $y=a*x+b$ ) darstellen zu können, wurde eine lineare Regression durchgeführt. Das heißt, es wurden Regressionskoeffizienten  $a$  und  $b$  so ermittelt, dass die Punktwolke bestmöglich (Kriterium kleinste Quadrate) durch eine Gerade repräsentiert werden kann. (vgl. Bortz 1993: 167-170)

Wie bereits in Abbildung 7 zu sehen, kann der Zusammenhang zwischen dem Tongehalt und der elektrischen Leitfähigkeit am besten mit der Funktion/Regressionsgerade  $y=0.6*x+4.8$  beschrieben werden.

Für die spätere Analyse der Weingartenböden (siehe Kapitel 6) kann nun bei gemessener elektrischer Leitfähigkeit mit Hilfe der Regressionsfunktion ein ungefährender Tongehalt vorausgesagt werden.

Wäre zum Beispiel eine scheinbare elektrische Leitfähigkeit von 40 mS/m aufgenommen worden, würde sich dies nach der ermittelten Regressionsfunktion auf einen max. Tongehalt von ca. 59 % zurückführen.

## 4 Grundlagen der Messmethoden

### 4.1 Die Maxwell-Gleichungen

Dem Physiker James Clerk Maxwell gelang es erstmalig 4 Gleichungen, mit denen „das elektromagnetische Feld vollständig in integraler und differentialer Form“ (Löffler-Mang 2012: 21) beschrieben werden kann, zu formulieren. Aus diesen Gleichungen kann für elektromagnetische Wellen einerseits eine Wellengleichung, andererseits ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum abgeleitet werden. Die Maxwell-Gleichungen setzen sich aus dem Gauß'schen Satz für das elektrische Feld, aus dem Gauß'schen Satz für das magnetische Feld, aus dem Faraday'schen Induktionsgesetz und aus dem Ampere-Maxwell'schen Gesetz zusammen. (vgl. Löffler-Mang 2012: 21-23)

#### 4.1.1 Der Gauß'sche Satz für das elektrische Feld

Der Gauß'sche Satz für das elektrische Feld sagt aus, „dass der Fluss eines elektrischen Feldes durch eine geschlossene Oberfläche [...] gleich ist mit der von der Oberfläche eingeschlossenen Ladung“ (Löffler-Mang 2012: 21).

Wenn also der elektrische Fluss ( $\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{f}$ ) nicht 0 ist, dann muss es innerhalb dieser geschlossenen Oberfläche ( $Q_{\text{eing.}}$ ) eine Ladung geben. (vgl. Schwab 2013: 41)

Was wiederum bedeutet, dass Ladungen die Quellen des elektrischen Feldes sind und von ihnen elektrische Feldlinien ausgehen. (vgl. Berktold et al. 2005: 75)

Hierbei wurde vereinbart, dass positive Ladungen die Quellen und negative Ladungen die Senken des elektrischen Feldes sind. (vgl. Löffler-Mang 2012: 22)

Formel 2 beschreibt nun den Gauß'schen Satz für das elektrische Feld (Integralform) mathematisch.

$$\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{f} = \frac{Q_{\text{eing.}}}{\epsilon_0}$$

**Formel 2:** Integralform des Gauß'schen Satzes für das elektrische Feld (nach Löffler-Mang 2012: 21)

mit  
 $\vec{E}$  ... elektrische Feld  
 $Q_{\text{eing.}}$  ... von einer Oberfläche eingeschlossene Ladung  
 $\epsilon_0$  ... Dielektrizitätskonstante ( $8.8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$ )

### 4.1.2 Der Gauß'sche Satz für das magnetische Feld

Der Gauß'sche Satz für das magnetische Feld sagt aus, „dass der Fluss eines magnetischen Feldes [  $\oiint_A \vec{B} d\vec{f}$  ] durch irgendeine geschlossene Oberfläche immer gleich 0 ist“ (Löffler-Mang 2012: 22). Dies ist gleichbedeutend damit, dass das magnetische Feld quellfrei ist und somit keine Quellen und Senken besitzt. (vgl. Löffler-Mang 2012: 22)

Aufgrund der nicht existenten „magnetischen Monopole (magnetische Ladung)“ (Schwab 2013: 42) -es gibt nur Dipole- ist das magnetische Feld ein Wirbelfeld (Feldlinien sind in sich geschlossen). (vgl. Schwab 2013: 42)

In Formel 3 wird der Gauß'sche Satz für das magnetische Feld in Integralform wiedergegeben.

$$\oiint_A \vec{B} d\vec{f} = 0$$

**Formel 3:** Integralform des Gauß'schen Satz für das magnetische Feld (nach Löffler-Mang 2012: 22)

mit  
 $\vec{B}$  ... magnetische Feld

### 4.1.3 Das Faraday'sche Induktionsgesetz

Das Induktionsgesetz besagt, „dass das Linienintegral des elektrischen Feldes entlang einer geschlossenen Kurve C [...] gleich der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses durch eine von C umrandete Fläche“ (Löffler-Mang 2012: 23) sei. Wenn sich also das magnetische Feld zeitlich in einer geschlossenen Leitschleife ändert, kommt es dadurch zur Erzeugung (Induktion) eines elektrischen Stromes im Leiter. (vgl. Löffler-Mang 2012: 23)

Formel 4 stellt nun das Faraday'sche Induktionsgesetz dar.

$$\oint_C \vec{E} d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \oiint_A \vec{B} d\vec{f}$$

**Formel 4:** Das Faraday'sche Induktionsgesetz (nach Löffler-Mang 2012: 23)

mit  
 $\vec{E}$  ... elektrische Feld  
 $\vec{B}$  ... magnetische Feld

#### 4.1.4 Das Ampere'sche Maxwell'sche Gesetz

Das Ampere'sche Maxwell'sche Gesetz sagt aus, dass „sowohl durch einen Stromfluss  $I$  als auch durch die zeitliche Änderung des elektrischen Flusses“ (Löffler-Mang 2012: 23) ein Magnetfeld erzeugt werden kann. (vgl. Löffler-Mang 2012: 23-24)

Das Ampere'sche Maxwell'sche Gesetz wird nun in Formel 5 gezeigt.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint_A \vec{E} \cdot d\vec{f}$$

Formel 5: Das Ampere'sche Maxwell'sche Gesetz  
(nach Löffler-Mang 2012: 23)

mit	
$\vec{B}$ ... magnetische Feld	
$\mu_0$ ... Permeabilitätskonstante	$(4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Ns^2}{C^2})$
$I$ ... Stromfluss	
$\epsilon_0$ ... Dielektrizitätskonstante	$(8.8 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2})$
$\vec{E}$ ... elektrische Feld	

Außerdem lässt sich in Abbildung 8 die Erzeugung von magnetischen Feldern am Beispiel eines Kondensators noch einmal bildlich verdeutlichen.

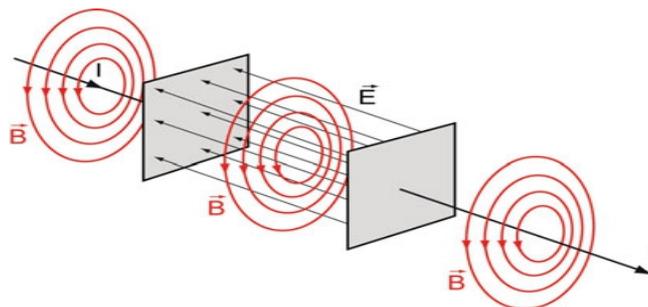


Abbildung 8: "Magnetische Wirbelfeld beim Aufladen eines Kondensators" (Aus: Löffler-Mang 2012: 24)

## 4.2 Elektromagnetisches Induktionsverfahren (Zweispulen-System)

### 4.2.1 Elektromagnetische Wellen

Elektromagnetische Wellen entstehen, wenn man Ladungen beschleunigt. Die Beschleunigung der Ladung bewirkt eine zeitliche Änderung des elektrischen Feldes und dadurch wird ein magnetisches Wirbelfeld erzeugt (siehe Kapitel 4.1.4 Ampere'sche Maxwell'sche Gesetz). Da jedoch aufgrund der Beschleunigung die zeitliche Änderung des elektrischen Feld nicht konstant ist, verändert sich das magnetische Wirbelfeld ebenfalls mit der Zeit. Dies führt wiederum zur Erzeugung eines elektrischen Wirbelfeldes aufgrund des zeitlich variablen magnetischen Flusses (siehe Kapitel 4.1.3 Faraday'sche Induktionsgesetz). Eine elektromagnetische Welle „bewegt sich unabhängig von der ursprünglichen Ladung und erneuert sich wechselseitig (durch  $\vec{E}$  und  $\vec{B}$ )“ (Löffler-Mang 2012: 25). Bei elektromagnetischen Wellen handelt es sich um Transversalwellen. Das heißt, dass sowohl das elektrische Feld als auch das magnetische Feld orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der elektromagnetischen Welle stehen. Aber auch die beiden Felder selbst befinden sich in einem rechten Winkel zueinander und besitzen „eine feste Phasenbeziehung“ (Löffler-Mang 2012: 26). (vgl. Löffler-Mang 2012: 25-27)

In Abbildung 9 wird die Ausbreitung einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle im Raum skizziert.

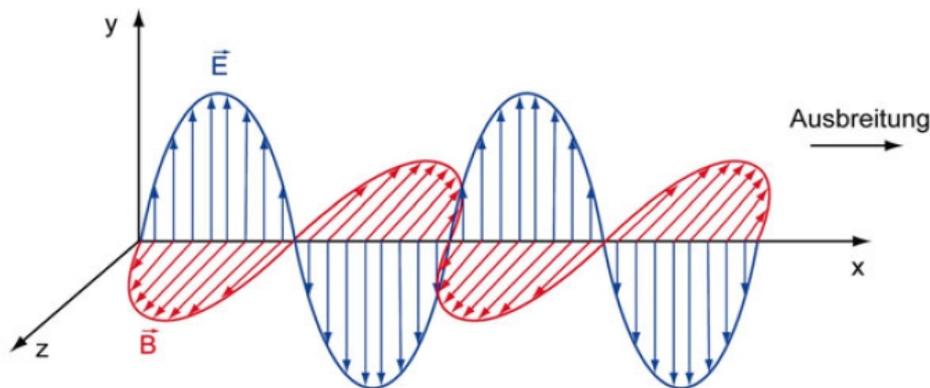


Abbildung 9: "Elektrisches und magnetisches Feld für den Spezialfall einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle"(Löffler-Mang 2012: 27)

Wie vorher erwähnt, konnte man anhand der Maxwell'schen Gleichungen die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen im Vakuum herleiten. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum ließ sich ein Betrag von  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s berechnen, was wiederum zur Erkenntnis führte, dass es sich bei Licht auch um eine elektromagnetische Welle handelt. Elektromagnetische Wellen können sich, je nachdem wie sie erzeugt (Art der Quelle und deren Ladungen) wurden, in ihrer Wellenlänge bzw. Frequenz stark voneinander unterscheiden. Daher ist das Spektrum der elektromagnetischen Wellen, dessen Unterteilung mittels Wellenlänge bzw. Frequenz erfolgt, sehr weitläufig (beinahe 20 Zehnerpotenz). (vgl. Löffler-Mang 2012: 26)

In Abbildung 10 erhält man nun einen Überblick über das elektromagnetische Spek-

trum und dessen Unterteilung.

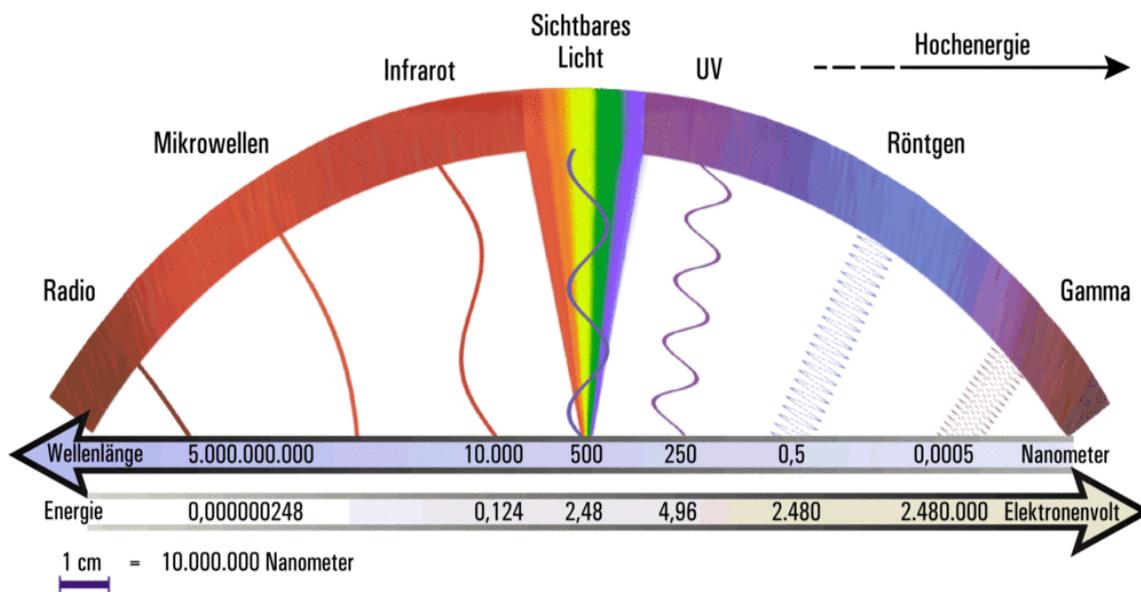


Abbildung 10: Elektromagnetisches Spektrum (Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik 2010: <http://www2011.mpe.mpg.de/heg/www/he-d.html> )

Wie man in Abbildung 10 sehen kann, unterteilt man elektromagnetische Wellen in Gamma-Strahlen (geringe Wellenlänge, hochfrequent), Röntgenstrahlen, UV-Licht, sichtbares Licht, infrarotes Licht, Mikrowellen und Radiowellen (große Wellenlänge, niederfrequent).

Im nächsten Unterkapitel (siehe Kapitel 4.2.2) wird das elektromagnetische Induktionsverfahren (Zweispulen-System) genauer betrachtet.

Dieses Verfahren arbeitet mit elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich von 100 Hz – 60 kHz (niederfrequent). (vgl. Kolodziej 2005: 241)

#### 4.2.2 Prinzip der Methode

Elektromagnetische Messverfahren können sowohl von der Luft aus, in Bohrlöcher oder auch direkt über den Boden zum Einsatz kommen (vgl. Kolodziej 2005: 241) und finden ihre Anwendung z.B. in der Archäologie, zur Erstellung von geologischen Karten oder zur Lokalisierung metallischer Objekte (vgl. McNeill 1980: 5).

Weiteres können die elektromagnetischen Messverfahren in aktive und passive Methoden unterteilt werden. Erzeugen die Messverfahren nicht selbst ein elektromagnetisches Feld, handelt es sich um eine passive elektromagnetische Messmethode. Im Rahmen dieser Arbeit wurde Daten vom Boden aus mit dem elektromagnetischen Induktionsverfahren bei kleiner Induktionszahl, welches eine aktive Messmethode ist, erfasst und daher wird hier ausschließlich auf dieses Verfahren genauer eingegangen. (vgl. Kolodziej 2005: 241)

Das elektromagnetische Induktionsverfahren setzt grundsätzlich zur Messung der

elektrischen Leitfähigkeiten zwei Spulen ein. Eine Sendespule und eine Empfängerspule. In der Sendespule fließt ein Wechselstrom und erzeugt dadurch ein Magnetfeld (siehe Kapitel 4.1.4 Ampere'sche Maxwell'sche Gesetz), welches man auch als Primärfeld bezeichnet. Breitet sich das Primärfeld in einem leitfähigen Untergrund aus, kommt es zu seiner Änderung mit der Zeit, was wiederum zur Entstehung eines „Wirbelstromsystems“ (Kolodziej 2005: 241) (siehe Kapitel 4.1.3 Faraday'sche Induktionsgesetz) im Boden führt. Aufgrund des „Wirbelstromsystems“ (Kolodziej 2005: 241) baut sich schließlich ein zweites magnetisches Feld im Untergrund auf. Dieses Feld, welches auch Sekundärfeld genannt wird, überlagert sich mit dem Primärfeld der Sendespule und die beiden magnetischen Felder werden schlussendlich an der Empfangsspule registriert. (vgl. Kolodziej 2005: 241)

In Abbildung 11 ist die Funktionsweise des elektromagnetischen Zweispulen-Systems grafisch dargestellt. In dieser wird das Primärfeld als  $H_p$  bezeichnet und das Sekundärfeld als  $H_s$ .

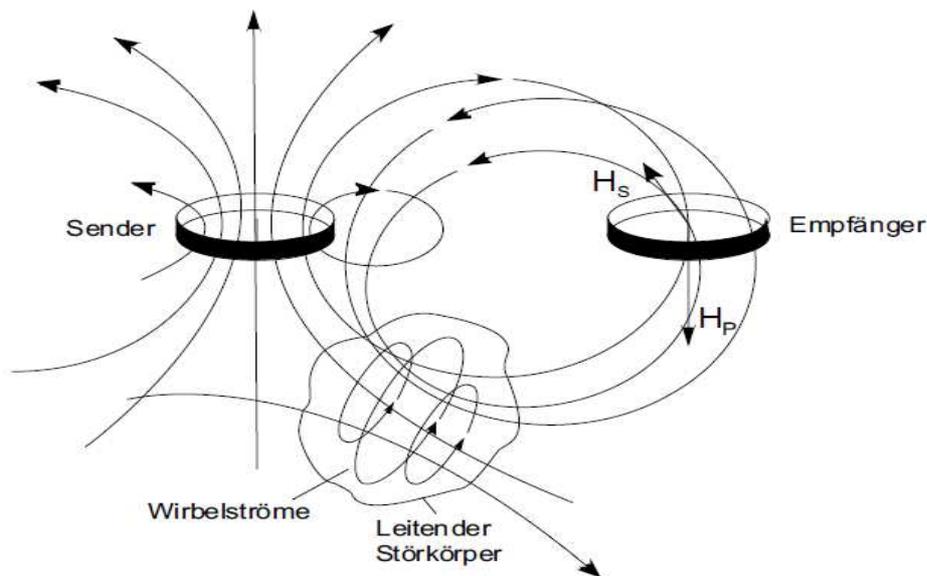


Abbildung 11: Elektromagnetisches Induktionsverfahren (Zweispulen-System)

(Aus: Kolodziej 2005: 241 nach Militzer, Weber 1985: 121)

Da das Primärfeld bekannt ist, kann dieses von dem registrierten Gesamtfeld abgezogen werden und erhält somit das Sekundärfeld, welches vom Untergrund beeinflusst wurde. (vgl. Everett 2013: 208)

Normalerweise ist das Sekundärfeld durch eine sehr komplizierte Funktion mit dem Spulenabstand, der verwendeten Frequenz und der elektrischen Leitfähigkeit verbunden und dadurch wird die Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit erheblich erschwert. Misst man jedoch bei kleiner Induktionszahl, so vereinfacht sich diese Funktion und es lässt sich ohne große Probleme für den Untergrund eine scheinbare

elektrische Leitfähigkeit bestimmen. (vgl. McNeill 1980: 5)

Formel 6 zeigt wie die scheinbare elektrische Leitfähigkeit bei Messung bei kleiner Induktionszahl ermittelt wird. (vgl. McNeill 1980: 5)

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega \mu_0 s} \left( \frac{H_s}{H_p} \right)$$

**Formel 6:** Berechnung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit bei kleiner Induktionszahl (McNeill 1980: 5)

mit

$\sigma_a$  ... scheinbare elektrische Leitfähigkeit [ $\frac{mS}{m}$ ]

f ... Frequenz [Hz]

$\omega$  ...  $2\pi f$

s ... Spulenabstand [m]

$\mu_0$  ... Vakuump permeabilität

$H_s$  ... Sekundärfeld an Empfängerspule

$H_p$  ... Primärfeld an Empfängerspule

### 4.2.3 Leitfähigkeitsmessung bei kleiner Induktionszahl

Um die Messung bei kleiner Induktionszahl zu verstehen, müssen die Begriffe des Realteils und des Imaginärteils des Gesamtfeldes, die Skintiefe und der Response-Parameter (Induktionszahl) eingeführt werden.

Das registrierte Gesamtfeld an der Empfangsspule, welches sich aus Primärfeld und Sekundärfeld zusammensetzt, verfügt zwar „die gleiche Frequenz wie das Primärfeld“ (Kolodziej et al. 2005: 246) der Sendespule „unterscheidet sich jedoch, abhängig den Leitfähigkeitsverhältnissen, in Intensität, Richtung und Phasenlage“ (Kolodziej et al. 2005: 246).

Der Anteil des Gesamtfeldes, der in der gleichen Phase des Primärfeldes schwingt, wird Realteil oder Inphase genannt. Der Anteil, der um  $90^\circ$  phasenverschoben zum Primärfeld ist, bezeichnet man Imaginärteil oder auch Outphase. (vgl. Kolodziej et al. 2005: 245- 246)

Breiten sich die elektromagnetischen Wellen aus, so kommt es abhängig von Leitfähigkeitsstrukturen, der Messfrequenz und der magnetischen Permeabilität zur Dämpfung dieser im Untergrund und daher zur Limitierung der Eindringtiefe. (vgl. Kolodziej 2005: 246-248)

Die Tiefe, in der die Amplitude einer ebenen elektromagnetischen Welle in einem

homogenen Halbraum auf  $1/e$  ( $e$ =Eulersche Zahl) oder auf ca. 37 % der Ursprünglichen abgefallen ist, wird als Skintiefe bezeichnet. (vgl. Huang 2005: G137)

Sie kann mit Formel 7 oder mit einer abgeleiteten „Zahlenwertgleichung“ (Kolodziey 2005: 247 ; siehe Formel 8) berechnet werden.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu \omega}}$$

**Formel 7:** Berechnung der Skintiefe (Huang 2005: G137; Kolodziey 2005: 246)

mit  
 $\sigma$  ... elektrische Leitfähigkeit [S/m]  
 $\mu$  ... magnetische Permeabilität [ $\frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ ]  
 $\omega$  ... Kreisfrequenz ( $2\pi f$ ) [ $\frac{1}{s}$ ]

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

**Formel 8:** „Zahlenwertgleichung“ für die Skintiefe (nach Kolodziey 2005: 246)

mit  
 $\rho$  ... spezifischer elektrischer Widerstand [ $\Omega m$ ]  
 $f$  ... Frequenz [Hz]

Aus Formel 7 und 8 kann man nun ableiten, dass eine höhere Messfrequenz zur Verringerung der Skintiefe führt. Das heißt, je höher die Messfrequenz des Gerätes ist, desto stärker ist die Dämpfung und die Welle kann nicht so tief in den Untergrund eindringen. Im Gegensatz dazu erhöht sich die Skintiefe der elektromagnetischen Welle bei Verminderung der Messfrequenz und die Welle kann somit tiefere Schichten des Untergrundes erreichen. (vgl. Huang 2005: G137; vgl. Kolodziey 2005: 246-248)

Der Vorteil von höheren Frequenzen ist jedoch der, dass je höher die Messfrequenz ist, desto stärker ist die empfangene Amplitude des Gesamtfeldes an der Empfangsspule (höhere Auflösung). (vgl. Huang 2005: G137)

Ebenfalls kann aus den beiden Formel 7 und 8 geschlossen werden, dass leitfähigere Medien die Welle stärker dämpfen und somit die Skintiefe der Welle verringern. Also

je besser der Boden Strom leiten kann, desto geringer kann die Welle in ihm eindringen. (vgl. Huang 2005: G137; vgl. Kolodziej 2005: 246-248)

Es wäre hier noch anzumerken, dass man die Skintiefe, auch Eindringtiefe, nicht mit der Erkundungstiefe („Depth of Investigation“ (Huang 2005)) gleichsetzen darf. Zwar ist die Skintiefe eine gute Abschätzung für die „Depth of Investigation“ (Huang 2005), aber im Gegensatz zur Eindringtiefe ist die Erkundungstiefe eine empirische Größe, die von vielen verschiedenen Faktoren, wie der Leitfähigkeitsstruktur, der Empfindlichkeit des Gerätes, der Messgenauigkeit und -frequenz, der Spulenkonfiguration (horizontale oder vertikale Dipollage, Spulenabstand), dem Noise der Umgebung und der Prozessierung der Daten abhängig ist. Die Erkundungstiefe ist also die max. Tiefe in der das elektromagnetische Instrument Leitfähigkeitsstrukturen noch auflösen kann. Wenn im Untergrund komplexe Leitfähigkeitsstrukturen herrschen oder/und es in der Umgebung einen hohen Störsignalanteil gibt, so ist die Erkundungstiefe meist leider viel kleiner als die Skintiefe. (vgl. Huang 2005: G136)

Der „Response-Parameter“ (Kolodziej 2005: 249), -oder auch Induktionszahl genannt, ist eine dimensionslose Zahl, die die Messfrequenz und den Abstand zwischen Sende- und Empfangsspule in Verbindung mit der Leitfähigkeit des Untergrundes bringt. Geht man von einem homogenen Halbraum aus, so berechnet sich der Response-Parameter aus dem Verhältnis von Spulenabstand und Skintiefe. (vgl. Kolodziej 2005: 249-250)

Dieser Zusammenhang wird formal auch in Formel 9 dargestellt.

$$Q = \frac{r}{\delta}$$

**Formel 9:** Response-Parameter im homogenen Halbraum (Kolodziej 2005: 250)

mit
r ... Spulenabstand [m]
$\delta$ ... Skintiefe [m]

Da nun alle wichtige Begriffe vorgestellt wurden, kann nun auf die Messung bei kleiner Induktionszahl genauer eingegangen werden.

Hierfür ist die Response-Funktion (auch Übertragungsfunktion, siehe Formel 10), welche die „komplexe elektromagnetische „Antwort“ des leitfähigen Untergrundes“ (Kolodziej 2005: 251) wiedergibt, von großer Bedeutung. Sie ermöglicht es nämlich den Einfluss den der Spulenabstand, die Messkonfiguration, die Messfrequenz oder die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes auf die Messung haben, zu analysieren. (vgl. Kolodziej 2005: 251)

$$f(Q) = \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}$$

Formel 10: Response-Funktion (Kolodziej 2005: 251)

mit  
 Q ... Response-Parameter (siehe Formel 9)  
 i ... imaginäre Einheit

In Abbildung 12 wird nun die Response-Funktion grafisch für einen homogenen Untergrund dargestellt.

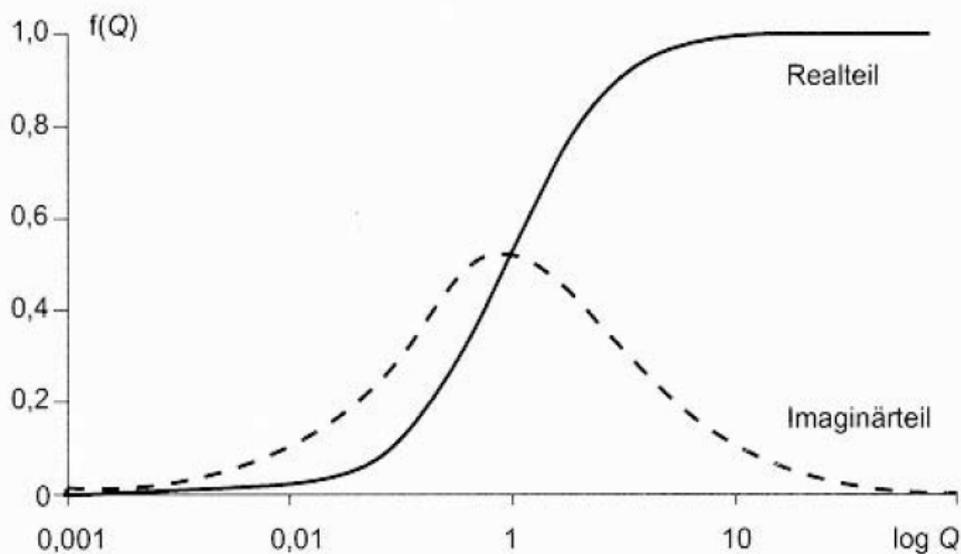


Abbildung 12: "Nach der Leiterkristheorie berechneten Response-Funktion für homogenen Untergrund" ( Aus: Kolodziej 2005: 251 nach Greinwald 1985)

Wie man in Abbildung 12 sehen kann, dominiert der Imaginärteil, wenn die Induktionszahl Werte kleiner 1 annimmt. Für Werte größer 1, ist der Realteil stärker. Nimmt die Induktionszahl einen Wert viel kleiner als 1 an ( $Q \ll 1$ ), dann kann einerseits der Realteil (Inphase) vernachlässigt werden, andererseits enthält der Imaginärteil (Outphase) nunmehr „die gesamte Information zur Leitfähigkeit des Untergrundes“ (Kolodziej 2005: 251). (vgl. Kolodziej 2005: 251)

Verhält sich die Induktionszahl so, dann misst man bei keiner Induktionszahl. Daher nur wenn  $Q$  viel kleiner als 1 ist, ist eine Messung bei kleiner Induktionszahl möglich und nur dann darf Formel 6 zur Berechnung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit angewendet werden. (vgl. Kolodziej 2005: 251, 255; vgl. McNeill 1980: 5)

Formel 9 zeigt, dass die Induktionszahl mit dem Spulenabstand und der Skintiefe (Formel 7 und 8), die wiederum von der elektrischen Leitfähigkeit und der Messfrequenz beeinflusst wird, in Verbindung steht.

Um für einen möglichst breiten Leitfähigkeitsbereich eine Induktionszahl viel kleiner als 1 gewährleisten zu können, muss daher der Spulenabstand gegenüber der Skintiefe viel geringer sein. Dies wird bei Instrumenten, die bei kleiner Induktionszahl messen, durch die richtige Wahl von Spulenabstand und Messfrequenz realisiert. Geräteabhängig kann dadurch dann ein Leitfähigkeitsbereich von 1 bis 1000 mS/m abgedeckt werden. Treten im Untergrund jedoch sehr hohe Leitfähigkeiten auf, sodass der Spulenabstand nicht mehr viel kleiner als die Skintiefe ist, misst man nicht mehr bei kleiner Induktionszahl und Formel 6 verliert seine Gültigkeit. Dies äußert sich dadurch, dass das Instrument dann falsche Werte (z.B. negative Werte) für die scheinbare elektrische Leitfähigkeit berechnet. (vgl. Kolodziej 2005: 253-255)

Für die vorliegende Arbeit kam der CMD Mini-Explorer zum Einsatz, welcher auch bei kleiner Induktionszahl misst und später in diesem Kapitel (4.2.5 Ausrüstung) vorgestellt wird.

Hier sollte noch erwähnt werden, dass auch das GEM-2 für die Anwendung im Weingarten getestet wurde. Da es sich dabei um ein Multifrequenzmessgerät handelt, war die Messung bei kleiner Induktionszahl meist nicht gegeben und daher musste die scheinbare elektrische Leitfähigkeit zuerst aus der Inphase und Outphase mit Hilfe der von der Firma Geophex zur Verfügung gestellten Software EMInvertor berechnet werden. Da jedoch die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten sehr hoch im Vergleich von denen, die mit dem CMD Mini-Explorer gemessen wurden, waren und das GEM-2 auch sehr stark von der Umgebung beeinflusst wurde, blieb es nur bei der Testung. Jedoch kann bei bestehender Interesse im Anhang 1 für die Daten der Inphase und Outphase und die daraus berechneten Leitfähigkeiten für mehrerer Frequenzen für Weingarten 2 Reihe 1 gefunden werden.

#### **4.2.4 Tiefensondierung mit dem elektromagnetischen Induktionsverfahren**

Misst man mit einem elektromagnetischen Induktionsverfahren, erhält man als Endgröße die scheinbare elektrische Leitfähigkeit. Diese darf jedoch nicht mit der elektrischen Leitfähigkeit gleichgesetzt werden. Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit ist nämlich ein gewichteter Mittelwert aller elektrischen Leitfähigkeiten, die in den durch Messfrequenz und Spulenabstand bestimmten Tiefenbereich vorliegen. Das heißt, dass man für einen Tiefenbereich die einzelnen elektrischen Leitfähigkeiten nicht kennt, sondern nur einen Mittelwert aus diesen. Außerdem tragen die elektrischen Leitfähigkeiten abhängig von der Tiefe unterschiedlich zur scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit bei (unterschiedliche Gewichtung).

Um trotzdem Informationen über die vertikale Schichtung der elektrischen Leitfähigkeit für den vorgegebenen Tiefenbereich zu gewinnen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die nun im einzelnen vorgestellt werden. (vgl. Kolodziej 2005: 255-

256)

#### 4.2.4.1 Tiefensondierung durch Änderung der Dipolstellung

Ein vertikaler Dipol entsteht dadurch, dass die Spulenebene von Sendespule und Empfangsspule horizontal ausgerichtet wird. Im Gegensatz dazu, handelt es sich um eine horizontale Dipolstellung, wenn die Spulenebene vertikal positioniert wird. (vgl. Kolodziej 2005: 245)

Wie die Spulen in vertikaler (horizontale Spulenebene, auch HCP) bzw. horizontaler (vertikale Spulenebene, auch VCP) Dipolstellung stehen müssen, wird anhand des CMD Mini-Explorers in Abbildung 13 veranschaulicht.

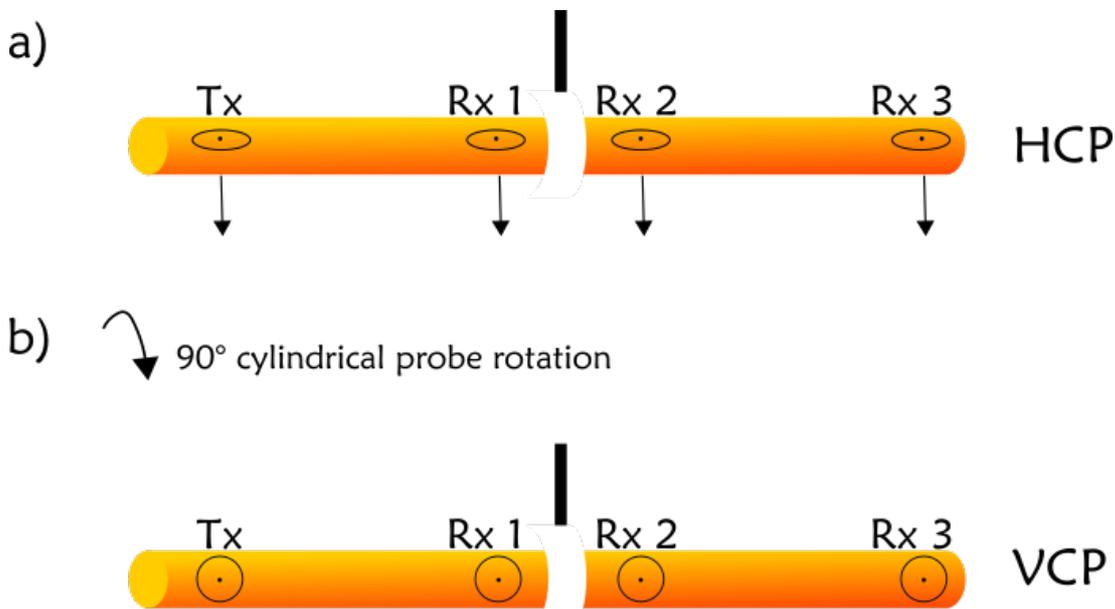


Abbildung 13: a) vertikale Dipolstellung (HCP) b) horizontale Dipolstellung (VCP) (eigene Darstellung nach Bonsall et al. 2013: 224)

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit, die man in der vertikalen Dipolstellung erhält, kann nicht mit der in horizontaler Dipolstellung gleichgesetzt werden. Der Unterschied resultiert daraus, dass die elektrischen Leitfähigkeiten in den beiden Dipolstellungen anders gewichtet werden und sich somit ihr Mittelwert unterscheidet. Die unterschiedliche Gewichtung der elektrischen Leitfähigkeit in vertikaler und horizontaler Dipolstellung kann durch eine Empfindlichkeitsfunktion veranschaulicht werden. (vgl. Kolodziej et al. 2005: 256)

Formel 11 und 12 geben nun die mathematische Beschreibung der Empfindlichkeitsfunktion einerseits für die vertikale, andererseits für die horizontale Dipolstellung wieder.

$$\phi_v(z) = \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{3/2}}$$

Formel 11: Empfindlichkeitsfunktion der vertikalen Dipolstellung (McNeill 1980: 15)

$$\phi_H(z) = 2 - \frac{4z}{(4z^2 + 1)^{1/2}}$$

Formel 12: Empfindlichkeitsfunktion der horizontalen Dipolstellung (McNeill 1980: 15)

mit  
z ... Tiefe/Spulenabstand

Für die drei Spulenabstände des CMD Mini-Explorer wurden sowohl die Empfindlichkeitsfunktionen für die vertikale (Subplot 1) als auch für die horizontale Dipolstellung (Subplot 2) berechnet und mittels Matlab in Abbildung 14 grafisch dargestellt.

### Empfindlichkeitsfunktion des CMD Mini-Explorers

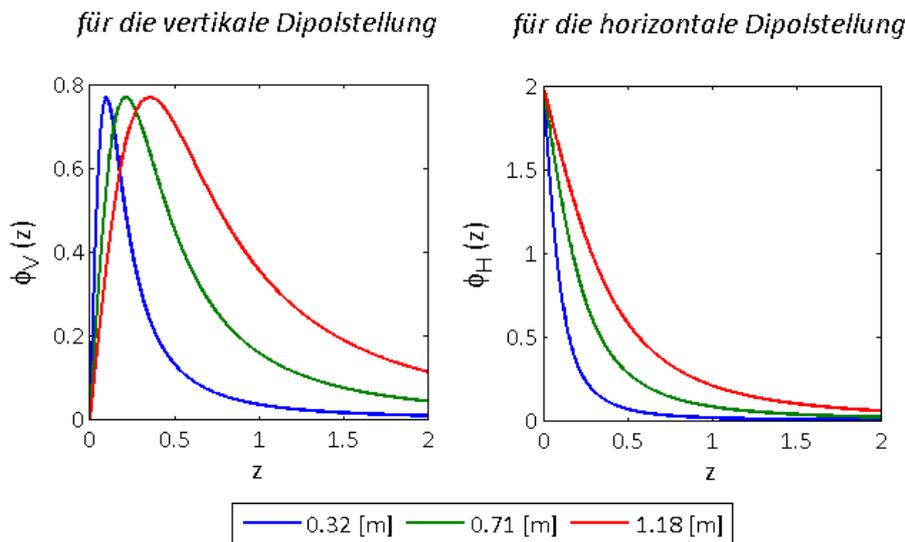


Abbildung 14: Empfindlichkeitsfunktionen des CMD Mini-Explorers für die vertikale (Subplot 1) und horizontale Dipolstellung (Subplot 2)

Die Empfindlichkeitsfunktion beschreibt den relativen Beitrag  $\phi(z)$ , den eine sehr dünne Schicht im homogenen Halbraum in einer normierten Tiefe  $z$  (Tiefe/Spulenabstand) auf das Sekundärfeld und somit auf die scheinbare elektrische Leitfähigkeit hat. (vgl. McNeill 1980: 6-7)

Dieser relative Beitrag  $\phi(z)$  wird in Kolodziej et al. (2005: 256) auch als Empfindlichkeit bezeichnet.

Betrachtet man nun zuerst in Abbildung 14 die Empfindlichkeitsfunktion, welche für die vertikale Dipolstellung (Subplot 1) mit einem Spulenabstand von 1.18 m berechnet wurde, so lässt sich feststellen, dass die Schicht in ca. 50 cm Tiefe ( $\approx 0.4 \cdot \text{Spulenabstand}$ ) den größten Beitrag zur scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit liefert. Nach Erreichen des max. Wertes nimmt die Empfindlichkeit recht langsam für alle Spulenabstände mit der normierten Tiefe ab. Die oberflächennahen Schichten haben hingegen kaum einen Einfluss auf die scheinbare elektrische Leitfähigkeit in der vertikalen Dipolstellung.

Im Gegensatz dazu lässt sich im Subplot 2 der Abbildung 14 ausmachen, dass in der horizontalen Dipolstellung vor allem die oberflächennahen Schichten zur scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit beitragen. Dabei wird für alle drei Spulenabstände der max. Anteil an der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit direkt an der Oberfläche erreicht. Aufgrund der darauffolgenden steilen Abnahme der Empfindlichkeit mit der normierten Tiefe, ist der Anteil, den die tieferen Schichten auf die scheinbare elektrische Leitfähigkeit haben, nicht sehr hoch.

Der Vergleich der Empfindlichkeitsfunktionen von vertikaler und horizontaler Dipolstellung ergibt schließlich, dass Leitfähigkeitsänderungen in den oberflächennahen Schichten am besten mit der horizontalen Dipolstellung aufgelöst werden können. Für die Erkundung der Leitfähigkeitsstruktur in den tiefer gelegenen Bodenschichten empfiehlt sich jedoch die Messung mit der vertikalen Dipolstellung. Misst man nun in beiden Dipolstellungen, erhält man die scheinbare elektrische Leitfähigkeit für zwei Tiefenbereiche und somit Informationen über die vertikale Leitfähigkeitsänderung. (vgl. Kolodziej et al. 2005: 256-257; vgl. McNeill 1980: 6-7)

#### 4.2.4.2 Tiefensondierung durch Änderung des Spulenabstandes

Daneben kann man auch durch Änderung des Spulenabstandes Informationen über die vertikale Leitfähigkeitsänderung gewinnen. Diese Art von Tiefensondierung wird in Won et al. (1996: 129) als „geometrical sounding“ bezeichnet. Ein Beispiel für ein Messinstrumente, das „geometrical sounding“ (Won et al. 1996: 129) erlaubt, ist der CMD Mini-Explorer. Er besitzt insgesamt 4 Spulen -eine Sendespule (Tx) und drei Empfangsspulen (Rx 1,2,3) (siehe Abbildung 13). Die drei Empfängerspulen besitzen jeweils unterschiedliche Abstände zur Sendespule. So ist die erste Empfängerspule 0.32 m von der Sendespule entfernt, die zweite 0.71 m und die dritte 1.18 m.

Untersucht man nun die Empfindlichkeitskurven in Abbildung 14, welche für den CMD Mini-Explorer berechnet wurden, in Bezug auf den Spulenabstand, lässt sich feststellen, dass je größer dieser ist, desto höher ist der Beitrag, den tiefer gelegene Schichten noch auf die scheinbare elektrische Leitfähigkeit haben. Das heißt also, je größer der Spulenabstand eines Instrumentes ist, desto tiefer kann dieses messen. Dies gilt sowohl für die horizontale als auch für die vertikale Dipolstellung.

Mit dem Einsatz von drei Empfängerspulen kann der CMD Mini-Explorer somit für

beide Dipolstellungen Informationen aus insgesamt 6 verschiedenen Tiefenbereiche gleichzeitig bekommen. (vgl. Bonsall et al. 2013: 221-223)

#### **4.2.4.3 Tiefensondierung durch Änderung der Frequenz**

Im Gegensatz dazu wird die Tiefensondierung durch Frequenzänderung in Won et al. (1996: 129) als „frequency sounding“ betitelt.

Wie bereits im Unterkapitel 4.2.3 angemerkt, ist die Skintiefe von der Messfrequenz abhängig.

Arbeitet ein Messinstrument mit einer niedrigen Frequenzen, so kann es auch von tiefer gelegenen Leitfähigkeitsstrukturen Signale empfangen. Misst man mit höheren Frequenzen, kann hingegen das elektromagnetische Signal nicht so tief in den Untergrund eindringen und man erhält Informationen über die Leitfähigkeitsstrukturen der oberflächennahen Bereiche. (vgl. Huang 2005: 137)

Das GEM-2 zum Beispiel ermöglicht die Tiefensondierung durch Frequenzänderung, indem es Wellen aussenden kann, auf denen mehrere Frequenzen (normalerweise 3-5) aus einem Frequenzbereich von 93 Hz bis 22 kHz aufmoduliert sind. (vgl. Won et al. 1996: 129-130; Huang 2005:137)

#### **4.2.4.4 Tiefensondierung durch Änderung der Messhöhe über dem Boden**

Eine weitere Möglichkeit Informationen über die vertikale Schichtung der Leitfähigkeit zu erhalten ist, den Abstand des Instrumentes über dem Boden zu vergrößern. „This has the effect of shifting the response curves [...] upward to the various regions of the earth“ (McNeill 1980: 10). Wird der Abstand also zwischen dem Boden und dem Instrument größer, verschiebt sich sowohl die Empfindlichkeitskurve der horizontalen als auch die der vertikalen Dipolstellung immer mehr in die oberen Bereiche des Erdbodens. Das heißt, dass je größer der Abstand des Messgerätes zum Erdboden ist, desto sensitiver ist das Messinstrument auf oberflächennahe Strukturen und desto kleiner ist die Eindringtiefe. (vgl. McNeill 1980: 10)

Bei Geräten, die 2 Spulen mit fixen Abstand besitzen und mit konstanter Messfrequenz messen, wird durch die Änderung der Messhöhe trotzdem eine Tiefensondierung ermöglicht.

Da die Messung in den Weingärten mit dem CMD Mini-Explorer vorgenommen wurde, ist für diese Arbeit vor allem die Tiefensondierung durch Änderung der Dipolstellung und die Tiefensondierung durch Änderung des Spulenabstandes von Interesse.

#### **4.2.5 Ausrüstung (CMD Mini-Explorer)**

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des elektromagnetischen Indukti-

onsverfahrens am Beispiel des CMD Mini-Explorers der Firma Gf Instruments vorgestellt.

Die einzelnen Bestandteile des CMD Mini-Explorers können nun in Abbildung 15 erfasst werden.

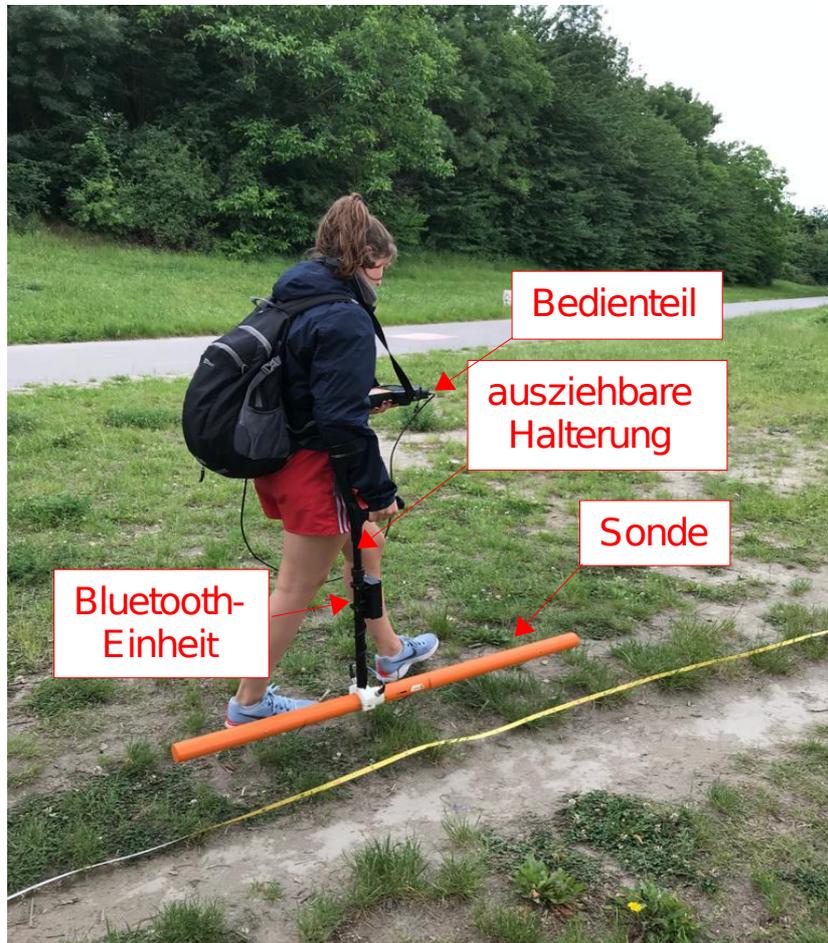


Abbildung 15: CMD Mini-Explorer mit seinen Bestandteilen  
(Fotoquelle: Dipl.-Ing. Theresa Maierhofer, BSc)

Die Grundausrüstung des CMD Mini-Explorers setzt sich aus einer Sonde, einer Bluetooth-Einheit, einer ausziehbaren Halterung und einem Bedienteil zusammen. In der 1.8 kg schweren und 1.275 m langen Sonde sind insgesamt vier Spulen eingebaut. Wie bereits erwähnt, handelt es sich dabei um eine Sendespule und den drei Empfangsspulen (Spulenanordnung: siehe Abbildung 13). Die Sonde misst mit einer Frequenz von 30 kHz bei kleiner Induktionszahl. Die Änderung der Dipolstellung (vertikale, horizontale) kann durch die Drehung der Sonde um 90° bewerkstelligt werden. Die ausziehbare Halterung ermöglicht es den Benutzer, während der Messung die Sonde komfortabel für einen längeren Zeitraum knapp über dem Erdboden zu halten. An dieser ausziehbaren Halterung ist die Bluetooth-Einheit angebracht, welche mit der Sonde verbunden ist. Dadurch wird die Kommunikation zwischen dem Bedienteil und der Sonde via Bluetooth im GHz-Band (keinen Einfluss auf Mes-

sung) ermöglicht. Zusätzlich kann mittels Bluetooth-Verbindung das Instrument mit einem GPS-System verbunden werden und die aufgenommenen scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten somit georeferenziert werden. Der Messvorgang kann dann mit dem Bedienteil gesteuert werden.

Die Leitfähigkeitsaufnahme kann dann entweder punktuell oder kontinuierlich mit einer Samplingrate von bis zu 10 Hz (0.1 – 1 s) erfolgen. Pro Messpunkt erhält man dann die scheinbare elektrische Leitfähigkeit und die Inphase (Verbindung mit magnetischer Suszeptibilität) für drei unterschiedliche Tiefenbereiche. In der vertikalen Dipolstellung wären das die Tiefenbereiche von 0.5 m, 1 m und 1.8 m und in horizontaler Dipolstellung 0.25 m, 0.5 m, 0.9 m. Wird eine neue Messung gestartet, kalibriert sich das Instrument selbstständig.

Die Datensätze werden dann am Bedienteil abgespeichert und können schließlich über ein USB-Kabel auf den PC heruntergeladen werden. (vgl. Bonsall et al. 2013: 219-231; vgl. Gf Instruments o.J.: 1-87)

## **4.2.6 Vorteile & Nachteile des elektromagnetischen Induktionsverfahren (Zweispulen-System)**

### **4.2.6.1 Vorteile**

Zunächst ist es mit dem elektromagnetischen Induktionsverfahren möglich ein Untersuchungsgebiet schnell und mit geringen Personalbedarf (max. 2 Personen) komplett zu kartieren.

Zusätzlich ist das Verfahren ein nicht invasives. Man braucht daher für die Messung nichts im Erdboden befestigen, sondern hält das Gerät einfach über den Boden während man das Messgebiet abläuft. Das hat den Vorteil, dass in asphaltierten Bereichen und in „Gebiete mit abschirmender hochohmiger Bedeckung wie trockene Sande, anstehendes Festgestein oder tiefgefrorenen Boden“ (Kolodziej et al. 2005: 241) ohne großen Aufwand und Vorbereitungen Leitfähigkeitswerte aufgenommen werden können. Im Gegensatz dazu, wäre die Messung mit den geoelektrischen Verfahren bei diesen Verhältnissen erschwert oder gar nicht möglich. Aufgrund „des relativ geringen stromdurchflossenen Untergrundvolumens“ (Kolodziej et al. 2005: 242) ist es ebenfalls möglich, Änderungen der Leitfähigkeit sehr genau lokalisieren zu können. (vgl. Kolodziej et al. 2005: 241-242; vgl. McNeill 1980: 10-11)

### **4.2.6.2 Nachteile**

Leider führen z.B. metallische Objekte, Hochspannungsleitungen oder Sendeeinrichtungen in der Umgebung zu einer großen Beeinflussung des Messinstrumentes und der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit. Daher sollten vor der Messung alle Störquellen in der Umgebung ausfindig gemacht werden und anschließend größtenteils gemieden werden.

Ein weiterer Nachteil ist, dass man bei der Messung bei kleiner Induktionszahl einen limitierten Messbereich von 1 bis 1000 mS/m hat. Wenn also die Leitfähigkeit des Untergrundes nicht mehr vom Wertebereich abgedeckt wird (z.B. metallische Objekte), misst man nicht mehr bei kleiner Induktionszahl und der angezeigte Wert ist fehlerhaft.

Außerdem sollte ein Messinstrument so oft wie möglich kalibriert werden, sodass Temperaturschwankungen während einer Messkampagne größtenteils eliminiert werden können, wobei dieser Nachteil eher für ältere Instrumente (z.B. EM38-B) gilt, bei denen die Kalibrierung noch manuell vorgenommen wird.

Ein weiterer Nachteil ist, dass man, wie bereits im Unterkapitel 4.1.4 erwähnt, nicht die elektrischen Leitfähigkeiten für bestimmte Tiefen erhält, sondern nur einen gewichteten Mittelwert für einen vorgegebenen Tiefenbereich. (vgl. Kolodziej et al. 2005: 264-265; vgl. McNeill 1980: 10-11)

## 4.3 Geoelektrische Verfahren

### 4.3.1 Die Gleichstrommethode

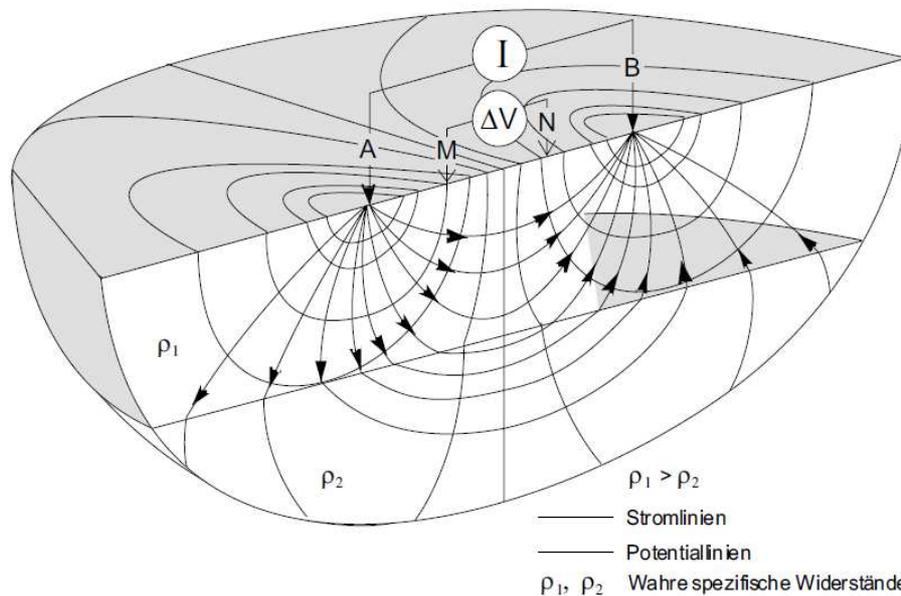
Die Gleichstrommethode ist ein relativ altes Verfahren der Angewandten Geophysik und wird zur Ermittlung von Leitfähigkeitsstrukturen des Untergrunds eingesetzt. In der Gleichstrommethode verwendet man Elektroden -Stäbe die meist aus Edelstahl bestehen- um den spezifischen elektrischen Widerstand zu ermitteln. Diese Elektroden können z.B. auf die Bodenoberfläche oder in einem Bohrloch platziert werden. Zur Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes kamen früher insgesamt vier Elektroden zum Einsatz. Auch heute noch wird sich der Ansatz der Vierpunktanordnung in der Geoelektrik zu Nütze gemacht, wobei nun dank mehrkanaliger Messeinheit mit sehr vielen Elektroden gleichzeitig gemessen werden kann. (vgl. Binley, Kemna 2005: 1-3)

Bei der Gleichstrommethode handelt es sich um ein aktives Verfahren, da es „mit technisch erzeugten [...] stationären Feldern arbeitet“ (Lange 2005: 128).

Verwendet werden jedoch nicht nur Gleichströme, sondern auch sich langsam ändernde Wechselströme. Das Arbeiten mit niederfrequenten Wechselströmen ist jedoch nur dann erlaubt, wenn die „bedeutsamen Induktionseffekte [...] und damit der Skin-Effekt“ (Militzer et al. 1985: 30) vernachlässigbar sind, so dass die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses auf Null gesetzt werden kann (siehe 4.1.3 Faraday'sche Induktionsgesetz). Der Vorteil, den die Verwendung von niederfrequenten Wechselströme (1-100 Hz) mit sich bringt, ist, dass die störenden Polarisierungseffekte an den Elektroden eliminiert werden können. (vgl. Militzer et al. 1985: 30)

Wird nun über zwei Elektroden (**A & B**) Gleichstrom oder niederfrequenter Wechselstrom in den Untergrund eingespeist, bildet sich im Untergrund ein räumliches Potentialfeld aus. Dieses ist dann von den Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund beeinflusst. Anschließend wird die Spannung (Potentialdifferenz) zwischen zwei anderen Elektroden, auch Sonden genannt, gemessen. Letztendlich erhält man durch die Anwendung des Ohm'schen Gesetzes aus der Potentialdifferenz zwischen den Sonden **M** und **N** und der Stromstärke zwischen den Elektroden **A** und **B** einen elektrischen Widerstand. (vgl. Lange: 128-129)

Abbildung 16 zeigt das Messprinzip der Geoelektrik (Vierpunktanordnung) mit den Elektroden **A & B** und den Sonden **M & N**.



**Abbildung 16:** "Prinzip der Widerstandsmessung mit einer Vierpunktanordnung"  
(Aus: Lange 2005: 129)

#### 4.3.1.1 Ermittlung des spezifischen Widerstandes

Die Größe, die man in der Gleichstrommethode erhalten möchte, ist der spezifische elektrische Widerstand (eng. Resistivity,  $\rho$ ). Er ist der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit. Der spezifische elektrische Widerstand ist abhängig von dem elektrischen Widerstand (eng. Resistance, **R**), der Querschnittsfläche und der Länge des zu erkundenden Leiters. (vgl. Everett 2013: 72)

Formel 13 zeigt nun wie der spezifische elektrische Widerstand in Zusammenhang mit den vorher genannten Größen steht.

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

**Formel 13:** Spezifischer elektrischer Widerstand  $\rho$  [ $\Omega\text{m}$ ] (nach Everett 2013: 72)

mit  
 A ... Querschnittsfläche [ $\text{m}^2$ ]  
 R ... Widerstand ( $\frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}$ ) [ $\Omega$ ]  
 L ... Länge [ $\text{m}$ ]

Durch das Ohm'sche Gesetz wird nun die Stromdichte mit der elektrischen Feldstärke und der elektrischen Leitfähigkeit, bzw. mit dem spezifischen elektrischen Widerstand, in Beziehung gesetzt. (vgl. Everett 2013: 73)

Diese Verbindung wird in Formel 14 dargestellt.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \rightarrow \vec{E} = \rho \vec{J}$$

**Formel 14:** Ohm'sche Gesetz (nach Everett 2013: 73)

mit  
 $\vec{J}$  ... Stromdichte [ $\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ ]  
 $\vec{E}$  ... elektrische Feldstärke [ $\frac{\text{V}}{\text{m}}$ ]  
 $\sigma$  ... elektrische Leitfähigkeit [ $\frac{\text{S}}{\text{m}}$ ]  
 $\rho$  ... spezifischer elektrischer Widerstand [ $\Omega\text{m}$ ]

Wird nun Strom über die Elektroden (**A & B**), die als Punkte betrachtet werden können, in den homogenen Untergrund (Leiter) geleitet, so breitet sich dieser gleichmäßig in allen Richtungen aus. Da die Elektroden in der Regel auf der Erdoberfläche platziert werden, wird die elektrische Feldstärke für den Halbraum in Formel 15 dargestellt. (vgl. Militzer et al. 1985: 31)

$$\vec{E} = \rho \vec{J} = \frac{\rho I \vec{r}}{2\pi r^3}$$

**Formel 15:** Elektrische Feldstärke für den Halbraum (nach Militzer et al. 1985: 31)

mit

$\rho$  ... spezifischer elektrischer Widerstand [ $\Omega \text{ m}$ ]

$\vec{J}$  ... Stromdichte [ $\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ ]

$\vec{E}$  ... elektrische Feldstärke [ $\frac{\text{V}}{\text{m}}$ ]

$r$  ... Abstand zur Elektrode [m]

$I$  ... Stromstärke [A]

Das elektrische Feld besitzt ein skalares Potential und kann als Gradient dieses dargestellt werden. Somit kann Formel 15 integriert werden, so dass nun das Potential für den Halbraum berechnet werden kann. Formel 16 zeigt diese Berechnung. (vgl. Miltzer et al. 1985: 32)

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

**Formel 16:** Potential der elektrischen Feldstärke für den Halbraum (nach Miltzer et al. 1985: 32)

$\rho$  ... spezifischer elektrischer Widerstand [ $\Omega \text{ m}$ ]

$I$  ... Stromstärke [A]

$r$  ... Abstand zur Elektrode [m]

$V$  ... Potential [V]

Nun ist es mit Formel 16 möglich, für eine Vierpunktanordnung die Spannung (siehe Formel 17 und 18) zwischen den Sonden **M** & **N** aus den Potentialen  $V_A(\mathbf{M})$ ,  $V_A(\mathbf{N})$ ,  $V_B(\mathbf{M})$  und  $V_B(\mathbf{N})$  zu berechnen.

$$U_{MN} = V_A(\mathbf{M}) - V_A(\mathbf{N}) + V_B(\mathbf{M}) - V_B(\mathbf{N})$$

**Formel 17:** Spannung zwischen Sonden M und N (nach Miltzer et al. 1985: 35)

$$U_{MN} = \frac{\rho I_A}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{BN}} \right)$$

**Formel 18:** Spannung zwischen Sonden M und N (nach Miltzer et al. 1985: 35)

mit  
 $V_A(M), V_A(N), V_B(M), V_B(N)$  ... Potential der Elektrode an der Sonde  
 $r_{AM}, r_{AN}, r_{BM}, r_{BN}$  ... Abstand zwischen Elektrode und Sonde  
 $I_A$  ... Strom an Elektrode A ( $I_B = -I_A$ )  
 $\rho$  ... spezifischer Widerstand [ $\Omega m$ ]

Da Stromstärke und Spannung gemessen werden können -also bekannt sind- formt man Formel 18 um und kann schlussendlich den spezifischen elektrischen Widerstand eines homogenen Halbraumes mit Formel 19 ermitteln.

$$\rho = K \frac{U_{MN}}{I_A}$$

**Formel 19:** Spezifischer Widerstand des homogenen Halbraumes (nach Militzer et al. 1985: 35)

mit  
 $K$  ... Geometriefaktor  $\left( \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \right)$   
 $U_{MN}$  ... Spannung zwischen M und N  
 $I_A$  ... Stromstärke

Der in Formel 19 vorkommende Geometriefaktor ( $K$ ), auch Konfigurationsfaktor genannt, ist „für die verwendete Elektrodenanordnung charakteristisch“ (Militzer et al. 1985: 35).

Da nun aber der Erdboden nicht homogen ist, sondern meist Schichten aus unterschiedlichen Zusammensetzungen besitzt, kommt es zu einer „Veränderung der Potentialverteilung“ (Militzer et al. 1985: 36).

Trotzdem kommt Formel 19 in der praktischen Anwendung zum Einsatz. Das führt dazu, dass nicht ein spezifischer Widerstand berechnet wird, sondern ein scheinbarer spezifischer Widerstand ( $\rho_s$ ). Wenn die Erde also homogen wäre, würde der scheinbare spezifische Widerstand den wahren spezifischen Widerstand entsprechen. (vgl. Lange 2005: 133)

Die Gleichstrommethode findet unter anderem bei der „Abgrenzung von lithologischer Einheiten“, bei der „Katierung von Wasserwegsamkeiten“, bei der „Beobach-

tung von Schadstoffausbreitung“ oder bei der „Ortung von natürlicher [n] und künstlicher [n] Hohlräume“ ihre Anwendung (Lange 2005: 132).

#### 4.3.2 IP (Induzierte Polarisation)

Neben der Gleichstrommethode, die den spezifischen elektrischen Widerstand liefert, ermöglicht es das Verfahren der Induzierten Polarisation, zusätzliche Informationen über die räumliche Änderung der Lithologie im Untergrund (vgl. Radic 2005: 174) aufgrund von „sich auf- bzw. abbauende elektrische Polarisationen im mikroskopischen Bereich“ (Aigner, Militzer 1985: 187) zu gewinnen.

Das Messprinzip der IP ist der der Gleichstrommethode ähnlich. Es kommen Elektroden mit einer Vierpunktanordnung (Grundprinzip) zum Einsatz, wobei zwei Elektroden zur Stromspeisung dienen und die anderen zwei zur Spannungsmessung genutzt werden. (vgl. Radic 2005: 174)

Jedoch wird in der IP zuerst der Stromfluss unterbrochen, um entweder danach den Spannungsabfall an den Sonden zu messen (Zeitbereichs-IP oder Puls-IP) oder „das niederfrequente Impedanzverhalten“ (Aigner, Militzer 1985: 187) des Untergrundes (Frequenz-IP) zu beobachten. (vgl. Aigner, Militzer 1985: 186-187)

Mit der IP können sowohl die Effekte der Elektrodenpolarisation als auch der Membranpolarisation beobachtet werden.

Die Elektrodenpolarisation findet im Untergrund bei Mineralien mit freien Elektronen (z.B. Erze → Kupfer, Mangan, Magnetit oder Pyrit ) statt und wird durch das Zusammentreffen dieser mit einem Elektrolyt verursacht. Durch die Interaktion von Elektrolyt und jenen Mineralien sammeln sich nämlich einerseits die freien Elektronen an die Mineraloberfläche an, andererseits kommt es zur Anhäufung von positiven Ionen (Elektrolyts) an der Phasengrenze von Mineralkorn und Elektrolyt. Durch diesen Prozess (siehe Kapitel 3.1.3 Grenzflächenleitfähigkeit → elektrische Doppelschicht) lässt sich ein Potentialsprung an der Phasengrenze beobachten.

Führt man dem Untergrund nun Strom über die Elektroden zu, fangen sich die Ionen nach einer „materialspezifischen Verzögerungszeit“ (Aigner, Militzer 1985: 188) mit einer für sie typischen Geschwindigkeit zu bewegen an. Dadurch wird aber an der Phasengrenze eine Änderung der Kapazität und des Potentialsprunges herbeigeführt. Wird die Stromzufuhr nun beendet, bewegen sich die Ionen wieder in ihrer Ausgangslage zurück. Dabei wird ein materialspezifischer Reststrom erzeugt, der dann an den Sonden als Restspannung wahrgenommen wird. (vgl. Aigner, Militzer 1985: 187-188)

Der Vorgang der Elektrodenpolarisation wird in Abbildung 17 skizziert.

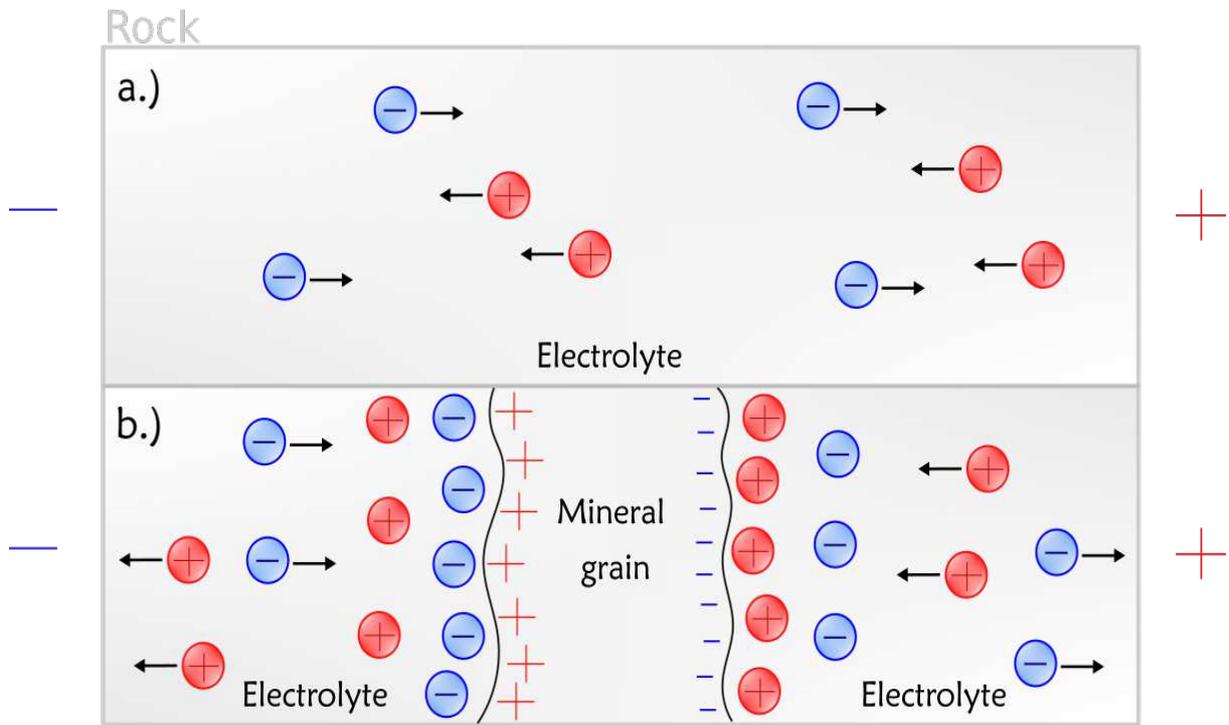


Abbildung 17: Elektrodenpolarisation (eigene Zeichnung nach Telford et al. 1990: 580)

Abbildung 17 bildet im obereren Bereich (a) das Verhalten der Ionen in einer elektrolytischen Flüssigkeit ab, wenn ein Strom angelegt wird. Der untere Abschnitt (b) zeigt das Verhalten beim Anlegen eines Stromes, wenn Elektrolyt und Mineralkorn (Elektrodenpolarisation) miteinander interagieren.

Im Gegensatz dazu, tritt die Membranpolarisation, deren Effekt um einiges geringer ist als der der Elektrodenpolarisation, in Böden mit sehr kleinen Poren auf, welche mit einem Elektrolyt gefüllt sind. Der Effekt der Membranpolarisation kann also vor allem in tonigen Böden beobachtet werden. Nun enthält das in den Poren befindliche Elektrolyt negative Ionen, die grundsätzlich etwas größer sind als die positiven Ionen. Außerdem kommt es um die Mineralkörner (z.B. Tone) zur Ansammlung einer „diffusen Wolke positiver Ladungsträger“ (Aigner, Militzer 1985: 189). Wird schließlich dem Untergrund Strom zugeführt, kommt es zu einer Bewegungseinschränkung der negativen Ionen aufgrund ihrer Größe und der geringen Porengröße. Im Gegensatz dazu können sich die positiven Ionen im Elektrolyt viel einfacher und schneller fortbewegen. Das führt zu einer Anhäufung von negativen Ionen „in ionenselektiven Membranen“ (Aigner, Militzer 1985: 189) (Membranpolarisation). (vgl. Aigner, Militzer 1985: 189)

In Abbildung 18 wird die Membranpolarisation grafisch dargestellt.

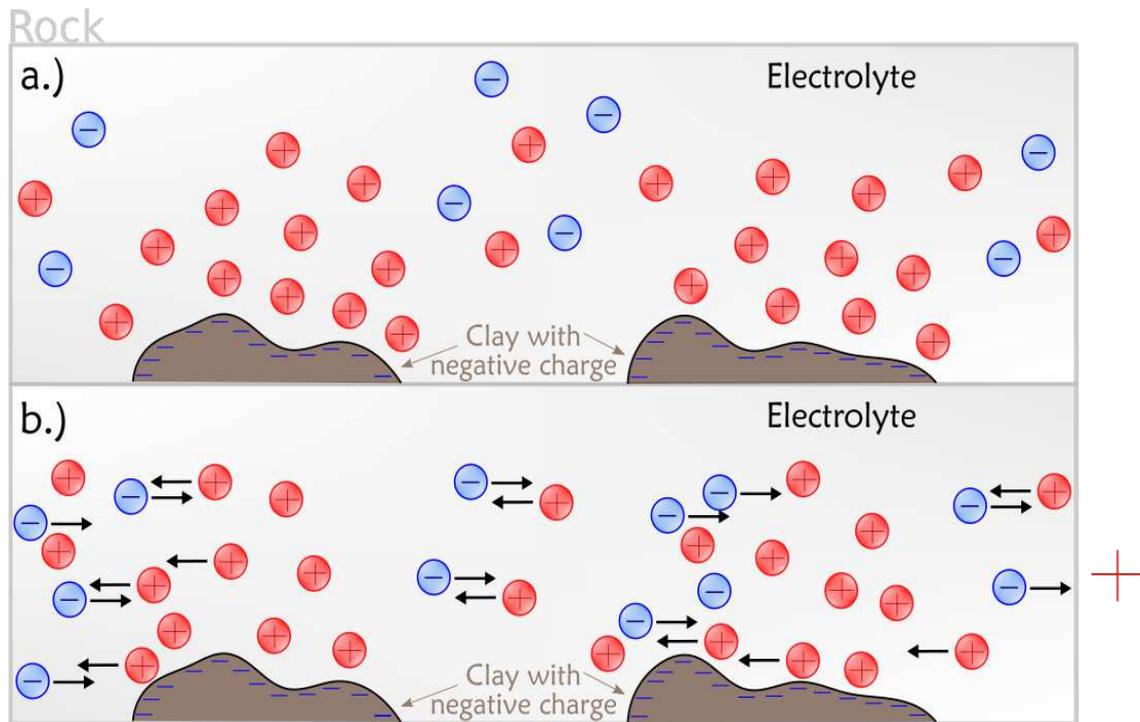


Abbildung 18: Membranpolarisation (eigene Darstellung nach Telford et al. 1990: 580)

Abbildung 18a veranschaulicht die Verteilung der Ionen in einem porösen Sandstein ohne Stromzufuhr, wo sich positive Ionen um die negative geladene Oberfläche von Tonkörnchen ansammeln. Abbildung 18b stellt hingegen die Reaktion der Ionen dar, wenn an das System Spannung angelegt wird. (vgl. Aigner, Militzer 1985: 189)

Die Effekte der Elektrodenpolarisation und der Membranpolarisation können nun entweder mit der Puls-IP (auch Zeitbereichs-IP) oder auch mit der Frequenz-IP beobachtet werden. Die beiden Verfahren der IP haben die gleiche Aussagekraft und man kann ihre Ergebnisse ineinander umrechnen. (vgl. Radic 2005: 174)

#### 4.3.2.1 Bestimmung der Polarisierungseffekte (Puls-IP & Frequenz-IP)

Treten im Untergrund Polarisierungseffekte auf, so nimmt die Spannung nach Abschalten des Stromes nicht sofort den Wert 0 an. In diesem Fall kann an den Sonden ein Spannungsabfall (siehe Abbildung 19), der einer gestreckten Exponentialkurve ähnelt, beobachtet werden. Dies macht sich die Puls-IP zu nutzen. (vgl. Everett 2013: 105)

Um diesen Spannungsabfall nun mit einer materialspezifischen Konstanten wie der Polarisierbarkeit (auch Aufladbarkeit (vgl. Radic 2005: 183)) in Verbindung zu bringen, muss zuerst die Spannung  $U$ , welche ohne dem Vorhandensein von Polarisierungseffekte im Untergrund beobachtet werden kann, eingeführt werden. (vgl. Aigner, Militzer 1985: 190)

Die Spannung  $U$  kann nun in Formel 20 betrachtet werden (Herleitung: siehe Kapitel 4.3.1.1).

$$U = \frac{I}{\sigma} K$$

**Formel 20:** Spannung bei Fehlen von Polarisierungseffekte  
(nach Aigner, Militzer 1985: 190)

mit  
 $K$  ... Geometriefaktor der Elektrodenanordnung  
 $I$  ... elektrische Stromstärke [A]  
 $\sigma$  ... elektrische Leitfähigkeit [ $\frac{S}{m}$ ]

Wird nun Strom in einem polarisierbaren Untergrund eingespeist, kommt es zu einer scheinbaren „Erniedrigung der Leitfähigkeit um den Faktor  $(1-m)$ “ (Aigner, Militzer 1985: 190, -wobei es sich bei  $m$  um eine materialspezifische Konstante handelt. An den Sonden registriert man aufgrund der Polarisierbarkeit des Untergrundes nun eine erhöhte Spannung  $U_0$  („primary voltage“ (Binley, Kemna 2005: 5), Formel 21). (vgl. Aigner, Militzer 1985: 190)

$$U_0 = \frac{I}{\sigma(1-m)} K$$

**Formel 21:** Spannung bei polarisierbaren Untergrund  
(Aigner, Militzer 1985:190)

Schließlich kann die „relative Spannungserhöhung  $U_s$ “ (Aigner, Militzer 1985: 191), auch „Sekundärspannung“ (Aigner, Militzer 1985: 191)(siehe Formel 22), definiert werden und nach der Konstanten  $m$  (siehe Formel 23) umgestellt werden. Die „Sekundärspannung“ (Aigner, Militzer 1985: 191) ist jene Spannung, die man sofort nach Abschalten des Stromes registrieren würde (siehe Abbildung 19). (vgl. Aigner, Militzer 1985: 191)

$$U_s = U_0 - U = \frac{I}{\sigma} K \frac{m}{1-m}$$

**Formel 22:** "Sekundärspannung" (nach Aigner, Militzer 1985: 191)

$$m = \frac{U_0 - U}{U_0} = \frac{U_S}{U_0}$$

Formel 23: Polarisierbarkeit (nach Aigner, Militzer 1985: 191)

Bei der materialspezifische Konstante  $m$  handelt es sich um die Polarisierbarkeit (vgl. Aigner, Militzer 1985: 191), welche über das Ausmaß der im Untergrund vorkommenden Polarisationserscheinungen etwas aussagt (vgl. Radic 2005:183).

Abbildung 19 zeigt nun, wie die an den Sonden zu beobachtende Spannung während eines IP-Messvorganges bei einem polarisierbaren Untergrund verläuft.

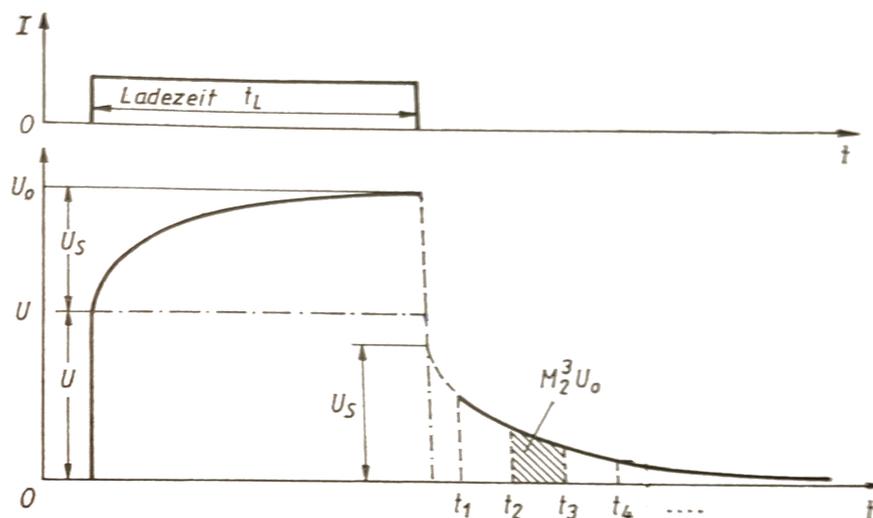


Abbildung 19: Spannungsverlauf eines polarisierbaren Untergrundes (Aigner, Militzer 1985: 191)

In Abbildung 19 wird dem Untergrund in der Zeitspanne von  $t_L$  Strom zugeführt. Würde es im Untergrund zu keinen Polarisationserscheinungen kommen, so könnte während dieser Ladezeit die Spannung  $U$  (siehe Formel 20) gemessen werden und nach Abschalten des Stromes würde auch die Spannung verschwinden. Dieses Verhalten wird in Abbildung 19 anhand der strichpunktierten Linie dargestellt. Wie im Abbildung 19 zu sehen, erhöht sich die Spannung bei einem polarisierbaren Medium von  $U$  auf  $U_0$  (siehe Formel 21) während der Ladezeit  $t_L$ . Beendet man dann die Stromzufuhr, kann nun ein langsamer Abfall der Spannung beobachtet werden. Bis die Spannung wieder den Wert 0 annimmt, können wenige Minuten bis hin zu Tagen vergehen. (vgl. Aigner, Militzer 1985: 191)

Da die Sekundärspannung aus technischen Gründen und aufgrund des Auftretens von elektromagnetischen Störimpulsen nach Abschalten des Stromes nur schwer zu messen ist, wird statt der Polarisierbarkeit  $m$  (vgl. Aigner, Militzer 1985: 191), in der

Praxis die Aufladbarkeit  $M$  [mV/V] (Radic 2005: 184; vgl. Binley, Kemna 2005: 5) bestimmt.

Wie die Aufladbarkeit eines Zeitfensters definiert ist, zeigt uns Formel 24.

$$M_i^{i+1} = \frac{1}{(t_{i+1} - t_i)} \frac{1}{U_0} \int_{t_i}^{t_{i+1}} U(t) dt$$

Formel 24: Aufladbarkeit für ein Zeitfenster (nach Radic 2005: 184; Binley, Kemna 2005: 5)

mit  
 $t_i$  ... Startzeit  
 $t_{i+1}$  ... Endzeit  
 $U_0$  ... Primärspannung (siehe Formel 21)  
 $U(t)$  ... Spannung zum Zeitpunkt  $t$

In Abbildung 19 wird die Aufladbarkeit für das Zeitfenster  $t_2$  und  $t_3$  gekennzeichnet.

Im Gegensatz dazu, macht sich die Frequenz-IP zu Nutze, dass sich der gemessene spezifische Widerstand eines polarisierbaren Mediums in Abhängigkeit von der Messfrequenz verändert. So ist der scheinbare spezifische Widerstand, der bei höheren Frequenzen gemessen wird, niedriger, da das untersuchte Medium „weniger Zeit hat, seine volle Spannung aufzubauen“ (Aigner, Militzer 1985: 192). In der Frequenz-IP wird unter anderem der Frequenzeffekt (**FE**, siehe Formel 25) als Maß für die Polarisierbarkeit bestimmt. (vgl. Aigner, Militzer 1985: 192-193)

$$FE = \frac{\rho(f=0) - \rho(f=\infty)}{\rho(f=\infty)} = \frac{U_0 - U(\infty)}{U(\infty)}$$

Formel 25: Frequenzeffekt (nach Aigner, Militzer 1985: 193)

mit  
 $\rho(f=0)$  ... spezifischer Widerstand bei Messfrequenz 0  
 $\rho(f=\infty)$  ... spezifischer Widerstand bei Messfrequenz  $\infty$   
 $U_0$  ... gemessene Spannung bei Messfrequenz 0  
 $U_\infty$  ... gemessene Spannung bei Messfrequenz  $\infty$

Da die Erzeugung der Frequenzen 0 Hz und  $\infty$  Hz schwer umsetzbar ist, verwendet man zwei Frequenzen aus dem Wertebereich von 0.1 – 10 Hz, die „sich um den Faktor 10 voneinander unterscheiden“ ( Aigner, Militzer 1985: 193).

Eine weitere Möglichkeit die Effekte der Polarisation im Frequenzbereich zu registrieren, ist die Differenz der Phasen (Phasenverschiebung  $\phi$  [mrad]) zwischen dem an den Elektroden injizierten Strom und der an den Sonden gemessenen Spannung zu bestimmen. (vgl. Everett 2013: 107)

### 4.3.3 Ausrüstung & Elektrodenanordnung

Sowohl die Gleichstrommethode als auch das IP-Verfahren benötigen zur Messung ein „Stromversorgungsteil (Geber, Sender)“ (Lange 2005: 138), eine „Spannungsmesseinrichtung (Empfänger)“ (Lange 2005: 138), Elektroden bzw. Sonden, Verbindungskabeln und mehradrige Kabeln. Meist ist das Stromversorgungsteil mit der Spannungsmesseinrichtung in einem Gerät zusammengefasst (Messeinheit). Diese Messeinheit, dessen Energiequelle z.B. eine Autobatterie sein kann, speist über die Kabeln und Elektroden Strom in den Untergrund, misst und speichert dann die an den Sonden ermittelte Spannung. Zusätzlich könnte die Messeinheit zur Speicherung der Daten und zur Steuerung mit einem extern angeschlossenen Laptop verbunden werden. (vgl. Lange 2005: 138)

Für die Messungen in den Weingärten kam die DAS-1 als Messeinheit zum Einsatz. Ihr stehen 8 voneinander unabhängige Kanäle zur gleichzeitigen Registrierung von Messwerten zur Verfügung und es können standardmäßig 64 Elektroden (Multielektrodenanordnung) zur Messung genutzt werden. (vgl. Multi-Phase Technologies 2007: o.S., online)

Abbildung 20 zeigt nun den Aufbau der Geoelektrik im Weingarten.

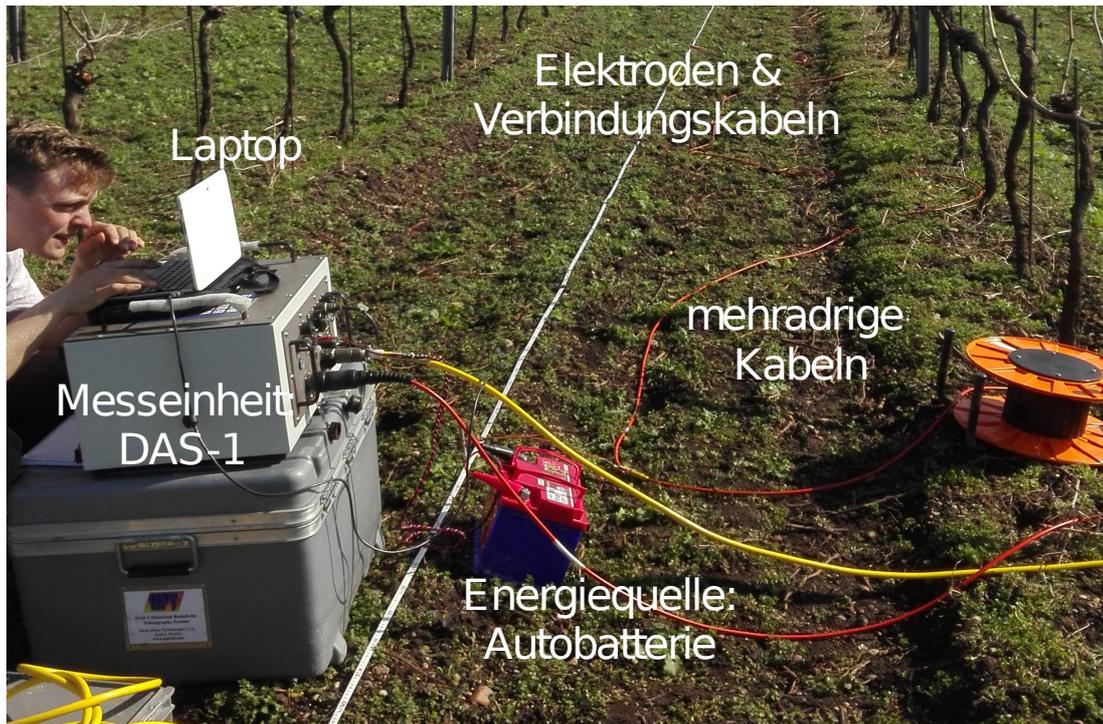


Abbildung 20: Aufbau der Geoelektrik (Eigene Darstellung)

Wie die Elektroden in einer Gleichstrom- oder IP-Messung angeordnet werden, ist von der Aufgabenstellung abhängig. Daher sollte vor der Messkampagne entschieden werden, welcher Elektrodenabstand und welche Elektrodenkonfiguration (Elektrodenanordnung) am geeignetsten sind, um den gewünschten Tiefenbereich im Untergrund hoch auflösen zu können. So kann die Erkundungstiefe („Tiefenbereich mit der höchsten Stromdichte“ (Lange 2005: 133)) mit einem größeren Elektrodenabstand erhöht werden. (vgl. Lange 2005: 133)

Gebräuchliche Elektrodenanordnungen in der Geoelektrik sind zum einen die Schlumbergerkonfiguration, die Wennerkonfiguration oder die Dipol-Dipolkonfiguration.

Die Schlumbergerkonfiguration (siehe Abbildung 21) wurde speziell für die Sondierung konzipiert. Wenn nämlich die Sonden während des Messvorgangs eine fixe Position mit Abstand  $2a$  einnehmen, sie sich innerhalb der stromführenden Elektroden befinden und sich nach jeder Messung ihr Abstand ( $na$ ) zu diesen Elektroden vergrößert, kann man über einen Standort Informationen über die vertikale Schichtung des spezifischen Widerstandes erhalten. (vgl. Everett 2013: 77)

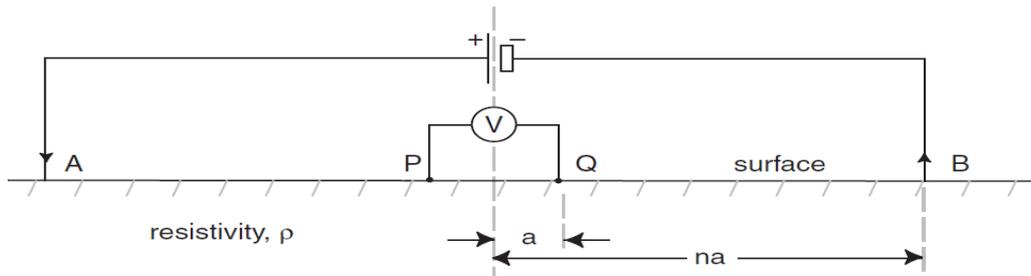


Abbildung 21: Schlumbergerkonfiguration mit Elektorden A & B und Sonden P & Q (Everett 2013: 77)

Im Gegensatz dazu, wird die Wennerkonfiguration (siehe Abbildung 22) zur Kartierung eingesetzt. Mit dieser Konfiguration können laterale Variationen des spezifischen Widerstandes für eine konstante Erkundungstiefe bestimmt werden. Bei der Wenneranordnung platziert man die Sonden mit konstanten Abstand  $a$  zwischen den Elektroden. Nach jeder Messung wird die ganze Anordnung entlang eines Profils weiterbewegt. (vgl. Everett 2013: 78)

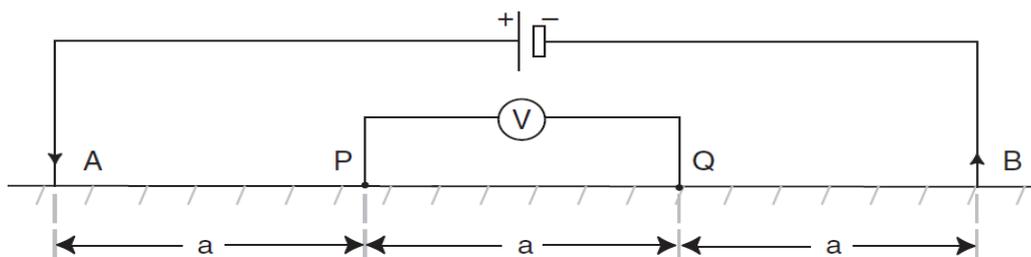


Abbildung 22: Wennerkonfiguration (Everett 2013: 77)

Zum Abschluss soll hier noch die Dipol-Dipol Anordnung (siehe Abbildung 23) erwähnt werden. Mit der Dipol-Dipol Anordnung können sowohl laterale als auch vertikale Widerstandsstrukturen aufgelöst werden. Der Abstand zwischen den zwei Elektroden und auch der zwischen den Sonden bleibt konstant. Jedoch ändert sich während der Messkampagnen die Entfernung  $na$  zwischen den Sonden- und Elektrodenpaar. (vgl. Everett 2013: 78)

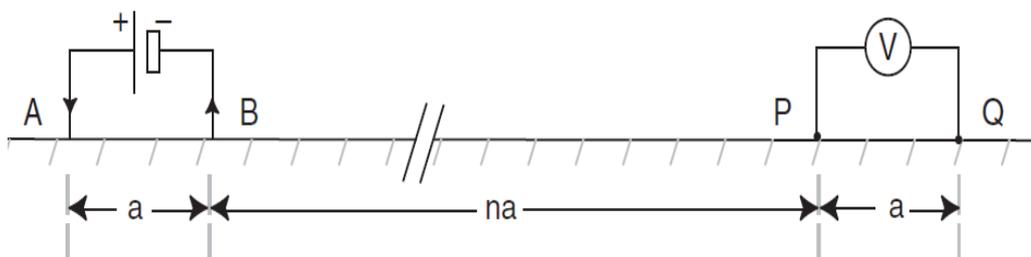


Abbildung 23: Dipol-Dipol Anordnung (Everett 2013: 77)

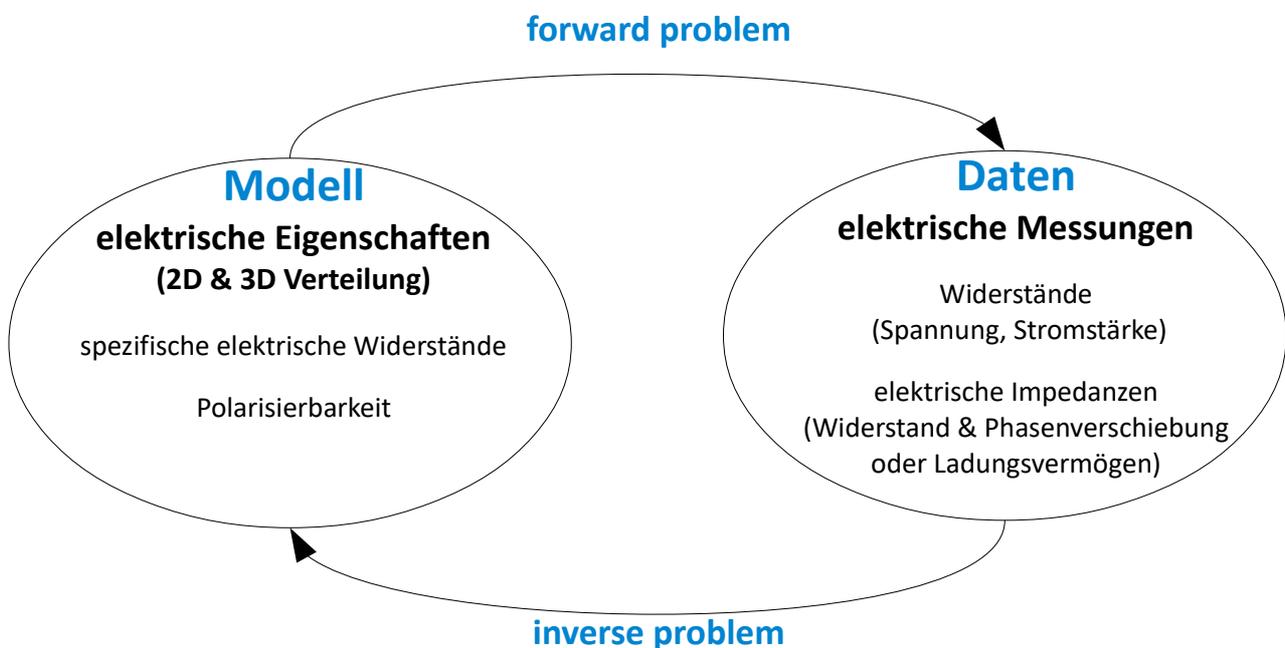
#### 4.3.4 Bildliche Darstellung (Auswertung)

Nach einer geoelektrischen Multielektrodenmessung können die gewonnenen scheinbaren spezifischen Widerstände oder auch z.B. die scheinbaren Phasenverschiebungen als eine sogenannte Pseudosection dargestellt werden. Bei der Pseudosection weist man jedem Messwert eine laterale Position (x-Wert) -Mittelpunkt, der jeweiligen Vierpunktanordnung- und eine Pseudotiefe (y-Wert,  $\sim$  eineinhalbmal der Abstand zwischen dem jeweiligen Sonden- und Elektrodenpaar) zu. Dabei erlaubt die Pseudosection, erste Vermutungen über die Widerstandsverteilung im Untergrund anzustellen und mögliche Fehler in einer Messkampagne aufzudecken. (vgl. Everett 2013: 87; vgl. Binley, Kemna 2005: 9)

In Kapitel 6.1.1.2 (Abbildung 30) kann eine Pseudosection, welches für das Profil im Weingarten 1 mit Matlab erstellt wurde, betrachtet werden.

Jedoch sollte man bei einer Pseudosection im Hinterkopf behalten, dass sowohl die Tiefen als auch die scheinbaren spezifischen Widerstände (oder auch scheinbaren Phasen) nicht die tatsächlichen Gegebenheiten im Untergrund widerspiegeln. Um nun der Realität näher zu kommen werden die Messdaten invertiert und dann bildlich dargestellt. (vgl. Lange 2005: 158-159)

Die Idee der Inversion bezogen auf die geoelektrischen Messverfahren lässt sich am einfachsten mit Zeichnung 1 veranschaulichen.



Zeichnung 1: Konzept der Inversion (nach Binley, Kemna 2005: 16 und Flores-Orozco 2016: 4)

Das Ziel der Inversion ist, dass man über elektrische Messungen an der Erdoberfläche möglichst akkurate Informationen über die Verteilung der elektrischen Eigen-

schaften im Untergrund, die nicht direkt gemessen werden können, erhält. Um dies zu ermöglichen, muss zuerst der physikalische Zusammenhang zwischen den elektrischen Eigenschaften (Modellparameter) und den Messparametern mathematisch beschrieben werden (forward problem). Danach wird mittels mathematischer Verfahren nach der Verteilung der elektrischen Eigenschaften (Modell) gesucht, welche die an der Oberfläche gewonnenen Messdatensätze zu einem tolerierbaren Grad erklären können (inverse problem). So möchte man bei der Gleichstrommethode aus den gemessenen Widerständen (Spannung, Stromstärke) ein möglichst realitätsnahes Modell der Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im Untergrund gewinnen. Jedoch ist die Lösung des Inversen Problems nicht eindeutig. Das heißt, mehrere Modelle können den gleichen Messdatensatz beschreiben. (vgl. Binley, Kemna 2005: 15-16)

### **4.3.5 Vorteile & Nachteile des geoelektrischen Verfahrens**

#### **4.3.5.1 Vorteile**

Im Gegensatz zu den elektromagnetischen Zweispulen-Systemen, welche meist an eine fixe Konstruktion gebunden sind, lassen sich bei den geoelektrischen Verfahren die Elektroden und Sonden je nach Aufgabenstellung beliebig anordnen. Dies führt zur Erhöhung des Informationsgehaltes.

Weiteres bringt eine variable Elektrodenanordnung mit sich, dass man Informationen von sehr tiefgelegenen Schichten des Untergrundes erhält.

Im Vergleich zu den elektromagnetischen Verfahren ist die Geoelektrik ebenfalls viel weniger anfällig auf einwirkende Fehlereinflüsse (z.B. Metallzäune, Wind, Hochspannungsleitung, ...) und somit sind die Messwerte oft viel vertrauenswürdiger. (vgl. Lange 2005: 128-173)

#### **4.3.5.2 Nachteile**

Nachteilig ist jedoch, dass für den Aufbau der Elektrodenanordnung mehrere Personen benötigt werden und sich daher der Kostenaufwand erhöht. Außerdem ist der Zeitaufwand für die Vorbereitung und die tatsächliche Messung eines Profils viel größer als bei dem elektromagnetischen Verfahren.

Ein weiterer Nachteil ist, dass für eine erfolgreiche Messung die Elektroden eine gute Ankopplung an das untersuchte Objekt (Boden) haben müssen. Aufgrund dessen können dann Probleme bei z.B. gefrorenen Böden, Beton, Asphalt und sehr trockenem Sand auftreten. (vgl. Lange 2005: 128-173)

## 5 Messkampagne

Bevor im nächsten Kapitel schließlich die Datenpräsentation und -analyse erfolgt, werden zuvor in diesem Kapitel noch das Messgebiet im Ganzen, die einzelnen Weingärten und der Messablauf vorgestellt.

### 5.1 Der Seewinkel als Messgebiet

Das Messgebiet, der Seewinkel (Nordburgenland, siehe Abbildung 24), ist eine einzigartige Landschaft, „welche westlich des pannonischen Raumes nicht mehr anzutreffen ist“ (Husz 1965: 149) und sich in der Zone befindet, in der „der Ostrand der Alpen“ (Husz 1965: 149) in die Kleine Ungarische Tiefebene übergeht. (vgl. Husz 1965: 149)

Die „ca. 450 km<sup>2</sup> große Steppe“ (Häusler 2007: 5) grenzt an den Neusiedler See, „weist eine Seehöhe von 115 bis 127 m auf“ (Husz 1965: 149) und ist somit eine flache Landschaft. (vgl. Husz 1965: 149)

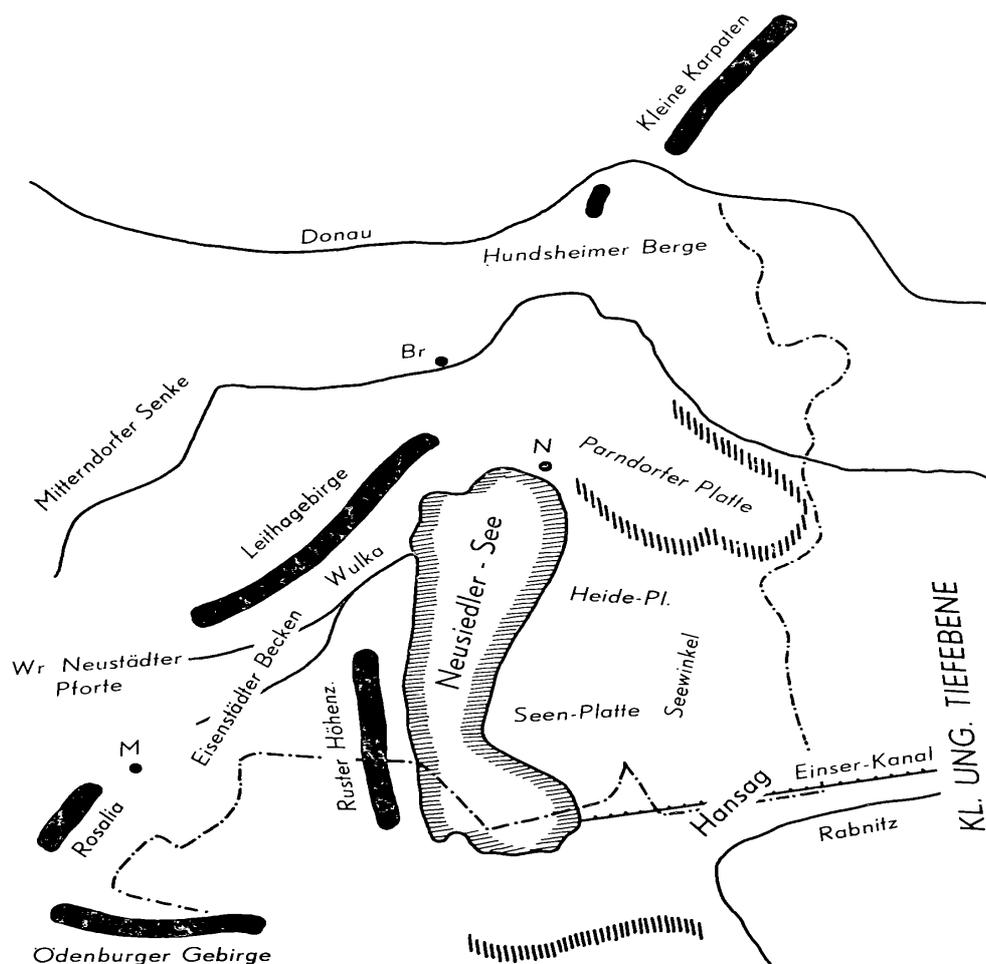


Abbildung 24: Lage des Seewinkels (Aus: Husz 1965: 150)

In Nordburgenland werden die „höchsten Durchschnittstemperaturen Österreichs“ (Häusler 2007: 5) gemessen und es zählt mit einem Jahresniederschlagswert von 670 mm zu einen der niederschlagsärmsten Gebieten in Österreich. Dazu befindet sich der Seewinkel in dem „sonnigsten Teil Mitteleuropas“ (Häusler 2007: 5) .

Aufgrund der hohen Verdunstung von Wassermengen (Neusiedler See) kann im Seewinkel eine hohe Luftfeuchtigkeit festgestellt werden, welche sich positiv auf die Fruchtbarkeit des Bodens auswirkt.

Durch diese günstigen Klima- und Bodenverhältnisse ist der Seewinkel bekannt für seine Gemüse- und Weinbetriebe. (vgl. Häusler 2007: 5)

Der Seewinkel wird hauptsächlich von Schotterdecken des Quartärs, welche auch Seewinkelschotter genannt werden, bedeckt. Bei diesen Schotterschichten handelt es sich vermutlich um Ablagerungen der Paläo-Donau. Darüber hinaus setzt sich der Seewinkelschotter nicht nur aus reinen Schotter-Ablagerungen, sondern auch aus sandig-schluffigen und tonreichen Ablagerungen zusammen. (vgl. Häusler 2007: 17, 28)

Hochwertige Bodentypen, wie z.B. der Paratschernosem oder der Tschernosem, sind im Seewinkel ausreichend vorhanden. Der Paratschernosem ist durch die Ablagerung von „kalkfreien oder kalkarmen Sand“ („Älteren Flugsand“) (Husz 1965: 158) auf den Seewinkelschotter entstanden und besitzt eine rötlich-braune Färbung. (vgl. Husz 1965: 158)

Daneben entwickelte sich der Tschernosem durch Ablagerung von entweder „sandigem Feinmaterial“ oder „Löß oder lößähnlichen Material“ auf die Schotterdecke. (Nelhiebel 1980: 42)

Die Tschernosem sind laut Husz (1965: 158) „die besten Böden des Seewinkels“.

Eine Besonderheit des Seewinkels ist das Auftreten von zahlreichen Salzlacken und die großflächige Entwicklung von Salzböden (mit 25 km<sup>2</sup> - die größte Österreichs). (vgl. Häusler 2007: 5)

Diese Salzböden (lokal Zickböden genannt) und seichten „Sodalacken“ (Krachler et al. 2012: 14) haben sich im Seewinkel durch die Verdunstung des oberflächennahen Grundwassers, welches im Seewinkel vor allem mit (Speise-)Soda, aber auch mit Glaubersalz und Kochsalz, angereicht ist, gebildet. (vgl. Krachler et al. 2012: 14)

Im Seewinkel haben sich die Salzböden Solontschak und Solonetz in direkter Nähe der Salzlacken entwickelt. (vgl. Nelhiebel 1980: 42)

Während beim Solontschak „der Salz führende Bodenhorizont nicht durch Schotter oder Sand bedeckt ist“ (Häusler 2007: 5), befindet sich dieser bei Solonetzböden erst „in etwa 35 bis 70 cm Tiefe“ (Häusler 2007: 5). Wird „der Salz führende Horizont“ (Häusler 2007: 5) mit genügend Schotter und Sande bedeckt, können sich Salzböden zu „tschernosemartige Böden (Schwarzerde)“ (Häusler 2007: 5) weiterentwickeln. Im Gegensatz zu Salzböden eignen sich diese aufgrund des beträchtlichen Hu-

mushorizonts hervorragend zum Ackerbau. (vgl. Häusler 2007: 5)

Es muss noch erwähnt werden, dass es in den letzten Jahrzehnten zu einem enormen Lackensterben gekommen ist, da zu Gunsten von Ackerland, Weinland oder Ortserweiterungen massiv mit Kanalsystemen und Grundwasserabsenkbrunnen in die hydrologischen Verhältnisse des Seewinkels eingegriffen wurde. (vgl. Krachler et al. 2012: 8-10)

Waren es 1858 noch in etwa 139 Lacken (Gesamtfläche von 3600 ha), existierten 2006 nur mehr 48 (Gesamtfläche von 600 ha). 2013 wurde die Anzahl an noch intakter Lacken gar nur mehr auf 26 geschätzt. (vgl. Kohler, Werba 2015: 3, 9)

## 5.2 Die Weingärten

Laut den beiden Weinbauern Michael Lang und Michael Pilles können starke kleinräumige Variationen der Bodenzusammensetzung im Messgebiet auftreten. So unterscheidet sich ihrer Meinung nach die Böden einiger Weingärten stark voneinander und es kann sogar zu einer beträchtlichen Änderung des Bodens innerhalb eines Weingartens kommen.

Diese Aussagen werden durch die Daten der Österreichischen Digitalen Bodenkarte (eBod), welche von dem BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald) auf der Website <https://bodenkarte.at> zur Verfügung gestellt werden, bestätigt.

So können Informationen, wie die Verteilung von z.B. Bodentypen, Bodenarten oder Bodenreaktionen (pH-Wert), auf dieser Webseite kostenlos als Vektorkacheln in QGIS eingebunden werden. Abbildung 25 zeigt nun die Verteilung der Bodentypen auf Datengrundlage dieser Bodenkarte im Messgebiet. Außerdem verschafft uns diese Karte auch einen Überblick der örtlichen Lage aller untersuchten Weingärten.

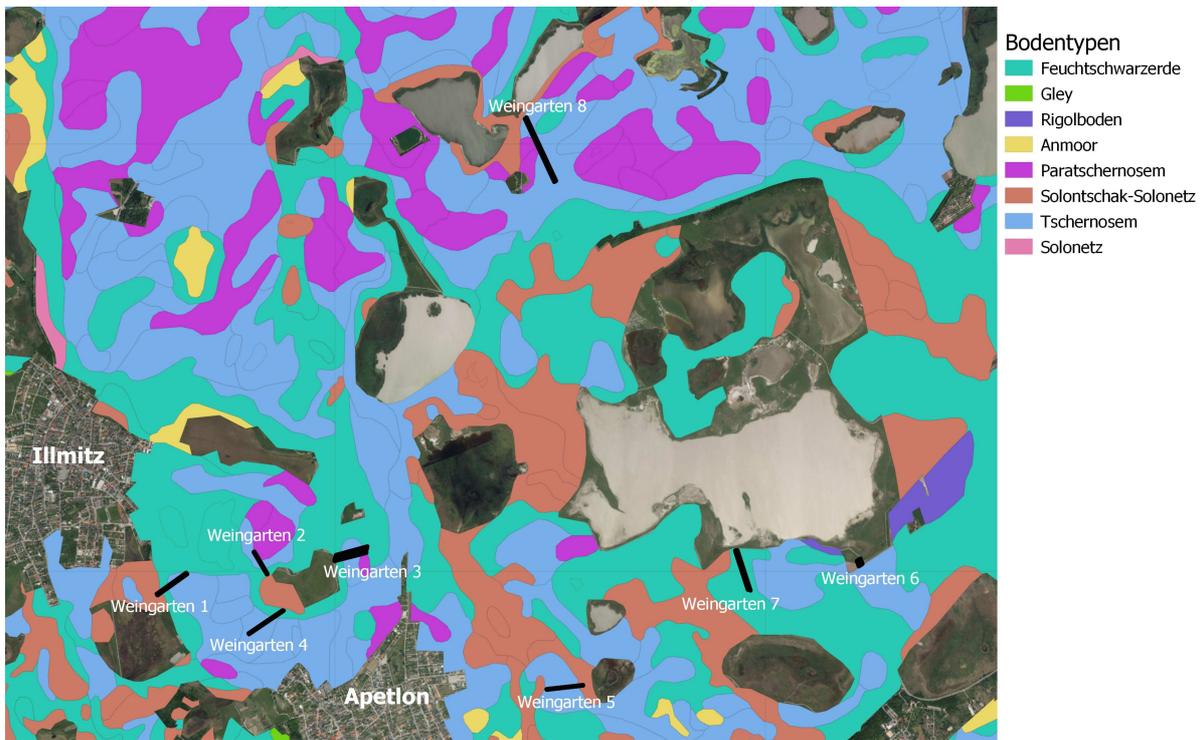


Abbildung 25: Bodentypen des Messgebietes (Datengrundlage: eBOD; Satellitenbild: Esri in QGIS)

Außerdem befinden sich alle Weingärten in nächster Nähe von entweder verlandeten oder noch intakten Lacken. Demnach befinden sich die Weingärten 7 und 6 direkt neben der Langen Lacke. Der Weingarten 8 liegt in unmittelbarer Nähe von der Fuchslochlacke und der Großen Neubruchlacke. Gegenüber von Weingarten 5 erstreckte sich einst die Moschadolacke, welche vor einiger Zeit verlandet ist (vgl. Krachler et al. 2012: 59).

Laut einer Karte des Umweltbundesamtes, die die Lackenentwicklung von 1855-1986 dokumentiert, umkreisten Weingärten 2, 3 und 4 vor vielen Jahren eine Lacke und auch Weingarten 1 war nicht weit von einer entfernt (Karte auf der Website <http://www.nationalpark-neusiedlersee-seewinkel.at> frei verfügbar und dem Anhang 2 beigelegt). Die Nähe zu den verlandeten Lacken würde auch das Auftreten von Solontschak-Solonet Böden (Salzböden) in unmittelbarer Nähe dieser Weingärten erklären (siehe Abbildung 25).

Das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus bietet auf der GIS-Anwendung <https://www.ehyd.gv.at/> Datensätze von Grundwassermessstellen an. Diese Möglichkeit wurde genutzt, um die Grundwasserstände innerhalb eines Jahres für Messstellen in der Umgebung der Weingärten genauer zu analysieren (Analyse mit Matlab und Übersichtskarte der Messstellen werden dem Anhang 3-9 beigelegt). Grob kann aus der Analyse geschlossen werden, dass der erste Grundwasseraquifer in Nähe der Weingärten ab einer Tiefe von ca. 0.7 m bis 3 m angetroffen werden kann. Jedoch sollte hier noch erwähnt werden, dass sich die Daten meist auf das Jahr 2016 beziehen und nicht auf das Jahr 2017. Demnach sind vermutlich gerade die ersten 3 m für die Nährstoff-, Sauerstoff- und Wasserversorgung der Weinrebe

durch das Wurzelsystem im Messgebiet von Bedeutung.

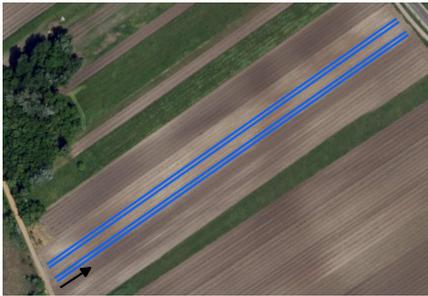
## 5.2.1 Weingarten 1

Im relativ jungen Weingarten 1 wird Grüner Veltliner angebaut. Grundsätzlich stellt diese Rebsorte keine wirklich hohen Ansprüche an den Boden und kann auch sehr gut mit Trockenheit umgehen. Am besten gedeiht sie an mittelschweren Böden. Jedoch tendiert der Grüne Veltliner an schweren und kalkreichen Böden zur Chlorose. (vgl. Lott et al. 2010: 121, 122)

Bei der Befragung des Besitzers meinte dieser, dass der Weingarten für den Anbau von Grünem Veltliner hervorragend geeignet ist und überall auffallend gute und viele Trauben geerntet werden können. Bis vor drei Jahren (2017) düngte Herr Lang alle seine Weingärten mit dem Mist seiner Rinder (organische Düngung) und konnte dadurch überall eine deutliche Verbesserung feststellen, die sich in höheren Ernteträgen bemerkbar machte.

### 5.2.1.1 Messprotokoll Weingarten 1

Über die wichtigsten Informationen zu den Messungen einerseits mit dem elektromagnetischen Verfahren, andererseits mit dem geoelektrischen Verfahren, gibt uns Tabelle 2 Auskunft.

CMD Mini-Explorer	
Datum	5.2.2017
Dipolstellung	vertikal
Messrichtung	 <p>Pfeil neben Reihe 1</p>
Profile	Reihe 1, 2, 5, 6
Wetter	~ 8° C
Anmerkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rankenhilfe der Weinreben: sehr dicke Metallrohre alle ~5 m</li> </ul>

DAS-1	
Datum	23.3.2017
Elektrodenabstand	4 m (64 Elektroden)
Elektrodenanordnung	Dipol-Dipol
Profil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reihe 2</li> <li>• Anfang: Profilmeter 25 des CMD-Profiles</li> </ul>
Wetter	~ 13° C
Messmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichstrommessung</li> <li>• IP-Messung (Frequenz-IP → Phase)</li> </ul>

Tabelle 2: Messprotokoll für Weingarten 1

## 5.2.2 Weingarten 2

Im Weingarten 2 wurde die Sorte Welschriesling ausgesetzt. Die Weinreben des Welschrieslings besitzen eine hohe Kalkverträglichkeit und sind daher weniger anfällig für Chlorose. Außerdem fühlt sich der Welschriesling besonders auf gute und nährstoffreiche Böden wohl. Standorte, deren Böden zu trocken sind, mag er eher weniger. (vgl. Lott et al. 2010: 126-127).

Der Besitzer Pilles Michael berichtet, dass der Weingarten generell sehr gesunde und viele Weintrauben hervorbrähe. Jedoch hat er beobachtet, dass wenn es übers Jahr verteilt zu wenig regnet, die Trauben teilweise sehr klein bleiben und unterentwickelt sind. Am Ende des Weingartens berichtet er sogar von Stockausfällen (schotterreichste Stelle). Herr Pilles meint, dass der Boden seines Weingartens generell sehr schotterreich sei. Außerdem werden alle seine Weingärten ungefähr jedes dritte Jahr mit einem Kunstdünger (mineralischer Dünger) gedüngt.

### 5.2.2.1 Messprotokoll Weingarten 2

Tabelle 3 führt das Messprotokoll des CMD Mini-Explorers und der DAS-1 für Weingarten 2 an.

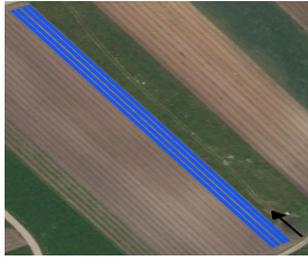
CMD Mini-Explorer		
Datum	14.1.2017	23.08.2017
Dipolstellung	vertikal	vertikal und horizontal
Messrichtung		Pfeil neben Reihe 1
Profile	Reihe 1-4 (gesamter Weingarten)	
Wetter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ~ 5° C</li> <li>• leichter Regen und Schnee</li> </ul>	~ 35° C
Anmerkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rankenhilfe der Weinreben: dünne Metallsteher; einige Holzpfähle</li> <li>• Reihe 1: Rankenhilfe nur einseitig (Feld)</li> <li>• Reihe 4: Metallpfähle nur einseitig (links Holzpfähle)</li> </ul>	
DAS-1		
Datum	23.3.2017	
Elektrodenabstand	3 m (64 Elektroden)	
Elektrodenanordnung	Dipol-Dipol	
Profil	Reihe 3	
Wetter	~ 13° C	
Messmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichstrommessung</li> <li>• IP-Messung (Frequenz-IP → Phase)</li> </ul>	

Tabelle 3: Messprotokoll für Weingarten 2

### 5.2.3 Weingarten 3

Im den von Weingarten 2 nicht weit entfernten Weingarten 3 wurde die Rotweinsorte Blauer Zweigelt gepflanzt. Diese Weinrebsorte, welche aus Österreich stammt, stellt keine hohen Ansprüche an den Boden. Nur zu viel Kalk tut ihr nicht gut. (vgl. Lott 2010: 296-297)

Laut dem Besitzer Lang Michael eignet sich der Standort sehr gut zum Anbau des Roten Zweigelt und er konnte bisher keinerlei Probleme feststellen.

### 5.2.3.1 Messung im Weingarten 3

In Tabelle 4 sind alle relevanten Informationen über die Messung mit dem CMD Mini-Explorer und der DAS-1 dokumentiert.

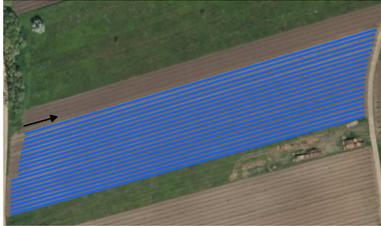
CMD Mini-Explorer		
Datum	24.02.2017	25.08.2017
Dipolstellung	vertikal	horizontal
Messrichtung	 <p>Pfeil neben Reihe 1</p>	
Profile	Reihe 1, 3, 5, 9, 11, 13, 15, 17, 19	Reihe 1-19 (gesamter Weingarten)
Wetter	~ 9° C	~ 30° C
Anmerkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rankenhilfe der Weinreben: dünne Metallsteher</li> <li>• Reihe 1: metallische Rankenhilfe nur einseitig (Holzsteher)</li> <li>• Reihe 19: Rankenhilfe einseitig (Feld)</li> </ul>	
DAS-1		
Datum	23.3.2017	
Elektrodenabstand	4 m (64 Elektroden)	
Elektrodenanordnung	Dipol-Dipol	
Profil	Reihe 13	
Wetter	~ 13° C	
Messmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichstrommessung</li> <li>• IP-Messung (Frequenz-IP → Phase)</li> </ul>	

Tabelle 4: Messprotokoll für Weingarten 3

### 5.2.4 Weingarten 4

In den vier Reihen des Weingartens 4 (Besitzer Pilles Michael) wurden Reben der Weißweinsorte Chardonnay gesetzt.

Diese Weinsorte wird vor allem in Frankreich angebaut und hat relativ hohe Ansprü-

che an den Boden. So gedeihen sie am besten an tiefgründigen, warmen und kalkhaltigen Böden. (vgl. Lott 2010: 97-98)

In diesem Weingarten konnte Herr Pilles beobachten, dass die Weinreben in der zweiten Hälfte (Ende der CMD-Profile) stärker anwachsen und er auch Trauben mit einer höheren Qualität ernten kann.

#### 5.2.4.1 Messung im Weingarten 4

Die wichtigsten Informationen zur Messung in Weingarten 4 können in Tabelle 5 betrachtet werden.

CMD Mini-Explorer				
<b>Datum</b>	14.01.2017	21.01.2017	17.08.2017	18.08.2017
<b>Dipolstellung</b>	vertikal	vertikal	horizontal	vertikal
<b>Messrichtung</b>	 <p>Pfeil neben Reihe 1</p>			
<b>Profile</b>	Reihe 1-4 (gesamter Weingarten)			
<b>Wetter</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ~ 5° C</li> <li>• leichter Regen und Schnee</li> </ul>	~ -5° C	~ 28° C	~ 33° C
<b>Anmerkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rankenhilfe der Weinreben: dünne Metallsteher</li> <li>• Reihe 1: Rankenhilfe nur einseitig (Feld); Auslassung der Rankenhilfe für Traktor in der Mitte</li> <li>• Reihe 4: metallische Rankenhilfe einseitig (Holzsteher)</li> </ul>			

DAS-1	
<b>Datum</b>	23.3.2017
<b>Elektrodenabstand</b>	5 m (64 Elektroden)
<b>Elektrodenanordnung</b>	Dipol-Dipol
<b>Profil</b>	Reihe 2 Anfang: Profilmeter 3 des CMD-Profiles
<b>Wetter</b>	~ 13° C
<b>Messmethode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichstrommessung</li> <li>• IP-Messung (Frequenz-IP → Phase)</li> </ul>

Tabelle 5: Messprotokoll für Weingarten 4

## 5.2.5 Weingarten 5

Im Weingarten 5 (Besitzer Pilles Michael) werden sowohl die Weißweinsorte Grüner Veltliner (erste Hälfte) als auch die Rotweinsorte Blauer Zweigelt gepflanzt.

Bei der Befragung des Besitzers berichtet er, dass im Weingarten, ausgenommen dessen Endstücks, hervorragende und viele Weintrauben geerntet werden können. Im Gegensatz dazu gedeihen die Trauben am Ende des Weingartens nicht gut und bleiben klein. Außerdem gibt er an, dass es in diesem Bereich bei Regenfällen zu Stau-nässe kommt.

### 5.2.5.1 Messung im Weingarten 5

Messprotokoll des Weingartens 5 wird in Tabelle 6 wiedergegeben.

CMD Mini-Explorer			
<b>Datum</b>	27.01.2017	31.08.2017	01.09.2017
<b>Dipolstellung</b>	vertikal	horizontal	vertikal
<b>Messrichtung</b>	 <p>Pfeil neben Reihe 1</p>		
<b>Profile</b>	Reihe 1-3 (gesamter Weingarten)		
<b>Wetter</b>	~ -2° C	~ 30° C	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ~ 22° C</li> <li>• leichter Regen</li> </ul>

<b>Anmerkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rankenhilfe der Weinreben: dünne Metallsteher</li> <li>• Abstand der Rankensysteme zueinander breiter</li> </ul>
<b>DAS-1</b>	
<b>Datum</b>	23.3.2017
<b>Elektrodenabstand</b>	4 m (64 Elektroden)
<b>Elektrodenanordnung</b>	Dipol-Dipol
<b>Profil</b>	Reihe 2 Anfang: Profilmeter 23 des CMD-Profiles
<b>Wetter</b>	~ 13° C
<b>Messmethode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichstrommessung</li> <li>• IP-Messung (Frequenz-IP → Phase)</li> </ul>

Tabelle 6: Messprotokoll für Weingarten 5

## 5.2.6 Weingarten 6

Weingarten 6 (Pilles Michael) ist ein kleiner Weingarten in Nähe der Langen Lacke (noch intakt). Hier wird die alte Weißweinsorte Bouvier angebaut. Bis auf einen Wildschaden konnte der Besitzer Pilles Michael von keinen Problemen im Weingarten berichten. Laut dem Besitzer wachsen die Weinreben sehr gut in einem sandigen Boden mit schwarzer Färbung an.

### 5.2.6.1 Messung im Weingarten 6

Da Weingarten 6 relativ klein ist (Länge ca. 45 m) wurde hier keine geoelektrische Messung durchgeführt. Das Messprotokoll für die elektromagnetische Messung wird in Tabelle 7 dargelegt.

CMD Mini-Explorer	
Datum	04.02.2017
Dipolstellung	vertikal
Messrichtung	 <p>Pfeil neben Reihe 1</p>
Profile	Reihe 1-14 (gesamter Weingarten)
Wetter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ~ 5° C</li> </ul>
Anmerkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rankenhilfe der Weinreben: etwas dickere Metallsteher</li> </ul>

Tabelle 7: Messprotokoll für Weingarten 6

## 5.2.7 Weingarten 7

Ebenfalls in direkter Nähe der Lange Lacke befindet sich der Weingarten 7 (Lang Michael), in dem die Rotweinsorte Blauer Zweigelt ausgesetzt wurde.

Wie schon in Weingarten 6 (Pilles Michael) beschreibt nun auch der Besitzer Herr Lang den Boden in Weingarten 7 als sehr sandig mit dunkler Färbung. Bis auf den Anfang des Weingartens ist die Erde sehr fruchtbar und bringt gesunde und viele Trauben hervor. Am Anfang des Weingartens, wo die dunkle Färbung des Bodens fehlt („weißer Sand“), können fast keine Trauben geerntet werden. Auch berichtet er, dass er in diesem Abschnitt beim Installieren der Metallsteher auf Grund einer harten Schicht (er vermutet Schotterschicht) nicht tief in den Boden bohren konnte.

### 5.2.7.1 Messung im Weingarten 7

Das Messprotokoll für Weingarten 7 wird in Tabelle 8 angeführt.

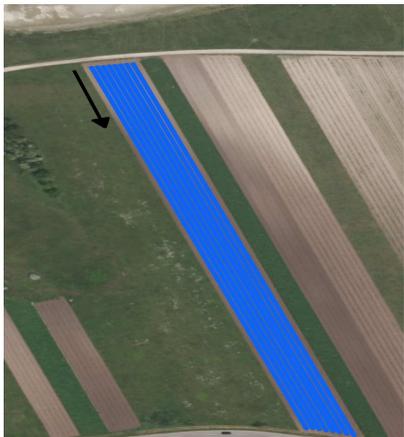
CMD Mini-Explorer	
Datum	29.08.2017
Dipolstellung	horizontal
Messrichtung	 <p>Pfeil neben Reihe 1</p>
Profile	Reihe 1-8 (gesamter Weingarten)
Wetter	~ 25° C
Anmerkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rankenhilfe der Weinreben: dünne Metallsteher</li> </ul>
DAS-1	
Datum	23.3.2017
Elektrodenabstand	5 m (64 Elektroden)
Elektrodenanordnung	Dipol-Dipol
Profil	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reihe 2</li> <li>• Anfang: Profilmeter 7 des CMD-Profiles</li> </ul>
Wetter	~ 13° C
Messmethode	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gleichstrommessung</li> <li>• IP-Messung (Frequenz-IP → Phase)</li> </ul>

Tabelle 8: Messprotokoll für Weingarten 7

### 5.2.8 Weingarten 8

Im letzten Weingarten (Besitzer Lang Michael) wurde die Weißweinsorte Welschriesling ausgesetzt.

Der Besitzer berichtet davon, dass sich Bereiche mit hervorragender Traubenernte mit Stellen, wo es zu Ernteeinbußen kommt, abwechseln. Diese Ernteeinbußen lassen sich vor allem an den schotterreichen Abschnitten (Anfang, Mitte, Ende) entlang des Weingartens beobachten.

### 5.2.8.1 Messung im Weingarten 8

Schlussendlich werden die wichtigsten Informationen zu den Messungen im Weingarten 8 von Tabelle 9 dargelegt.

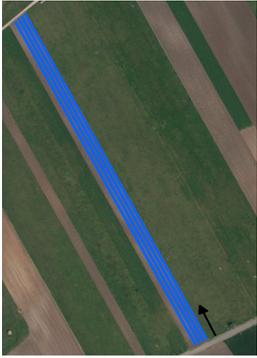
CMD Mini-Explorer			
<b>Datum</b>	30.12.2016	03.01.2017	06.09.2017
<b>Dipolstellung</b>	vertikal	vertikal	vertikal & horizontal
<b>Messrichtung</b>	 <p>Pfeil neben Reihe 1</p>		
<b>Profile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reihe 1-4 (gesamter Weingarten)</li> </ul>		
<b>Wetter</b>	~ -2° C	~ 3° C	<ul style="list-style-type: none"> <li>~ 23° C</li> <li>leichter Regen</li> </ul>
<b>Anmerkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rankenhilfe der Weinreben: Holzsteher (erste Hälfte) &amp; dünne Metallsteher (zweite Hälfte)</li> </ul>		
DAS-1			
<b>Datum</b>	19.01.2017		
<b>Elektrodenabstand</b>	5 m (64 Elektroden)		
<b>Elektrodenanordnung</b>	Dipol-Dipol		
<b>Profil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reihe 1</li> <li>Anfang: Profilmeter 217 des CMD-Profiles</li> </ul>		
<b>Wetter</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>~ -5° C</li> <li>Boden gefroren</li> </ul>		
<b>Messmethode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gleichstrommessung</li> <li>IP-Messung (Frequenz-IP → Phase)</li> </ul>		

Tabelle 9: Messprotokoll für Weingarten 8

	Rebsorte	Bodentypen	Probleme	Bemerkung des Weinbauers über den Boden	Sonstiges
<b>Weing. 1</b>	Grüner Veltliner	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solontschak - Solonetz</li> <li>Feuchtschwarzerde</li> <li>Tschernosem</li> </ul>	Nein		Nähe zu einer verlandeten Lacke (Profilanfang)
<b>Weing. 2</b>	Welschriesling	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feuchtschwarzerde</li> <li>Tschernosem;</li> <li>Paratschernosem</li> </ul>	Ja	sehr schotterreich (besonders am Ende)	Nähe zu einer verlandeten Lacke (Profilanfang)
<b>Weing. 3</b>	Blauer Zweigelt	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feuchtschwarzerde</li> <li>Tschernosem</li> </ul>	Nein		Nähe zu einer verlandeten Lacke (Profilanfang)
<b>Weing. 4</b>	Chardonnay	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feuchtschwarzerde</li> <li>Tschernosem</li> </ul>	Ja		Nähe zu einer verlandeten Lacke (Profilanfang)
<b>Weing. 5</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grüner Veltliner</li> <li>Blauer Zweigelt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tschernosem</li> <li>Solontschak - Solonetz</li> </ul>	Ja	nach Regen steht Wasser am Ende des Weingartens	Nähe zur Moschadolacke (Profilende)
<b>Weing. 6</b>	Bouvier		Nein	„schwarzer Sand“ (humusreicher sandiger Boden)	Nähe zur Langen Lacke (Profilende)
<b>Weing. 7</b>	Blauer Zweigelt	Feuchtschwarzerde	Ja	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anfang des Weingartens: „weißer Sand“ &amp; relativ bald Schotterschicht</li> <li>restlicher Weingarten: „schwarzer Sand“</li> </ul>	direkte Nähe zur Langen Lacke (Profilanfang)
<b>Weing. 8</b>	Welschriesling	Tschernosem	Ja	schotterreiche Stellen (am Anfang, in der Mitte und am Ende des Weingartens)	Nähe zur Fuchslochlacke (Profilende)

**Tabelle 10:** kurze Zusammenfassung über die einzelnen Weingärten

## 6 Auswertung & Analyse

In diesem Kapitel werden nun für alle 8 Weingärten die Auswertungen sowohl des elektromagnetischen Verfahrens als auch des geoelektrischen Verfahrens präsentiert. Anschließend werden diese, basierend auf das in den vorherigen Kapiteln erarbeitete Wissen, in Bezug auf die Gesundheit der Reben analysiert.

### 6.1 Weingarten 1

#### 6.1.1 Auswertung

Exemplarisch für die anderen Weingärten werden anhand Weingarten 1 nun alle Schritte vorgestellt, welche unternommen wurden, um die Messdaten beider Verfahren auszuwerten und bildlich darzustellen.

##### 6.1.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)

Die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten wurden am 5.02.2017 in Weingarten 1 in 4 Reihen in vertikaler Dipolstellung aufgenommen (siehe Tabelle 2: Messprotokoll).

Die Bearbeitung der EM-Messdaten erfolgte mit der Software Matlab. Zuerst wurden negative Leitfähigkeiten aus den Datensatz entfernt. Das Auftreten von negativen Leitfähigkeiten (z.B. beobachtet bei Stellen, wo sich Bierdosen unter dem CMD befanden) deutet darauf hin, dass der CMD Mini-Explorer nicht mehr mit kleiner Induktionszahl messen konnte (siehe Kapitel 4.2.3 Leitfähigkeitsmessung bei kleiner Induktionszahl).

Anschließend wurden anhand von Histogrammen sonstige Ausreißer für die jeweiligen drei Tiefenbereichen detektiert und entfernt. Die Histogramme vor und nach der Filterung der Leitfähigkeit für Reihe 2 können in Abbildung 26 betrachtet werden.

## Histogramme: Weingarten 1 Reihe 2 am 05.02.2017

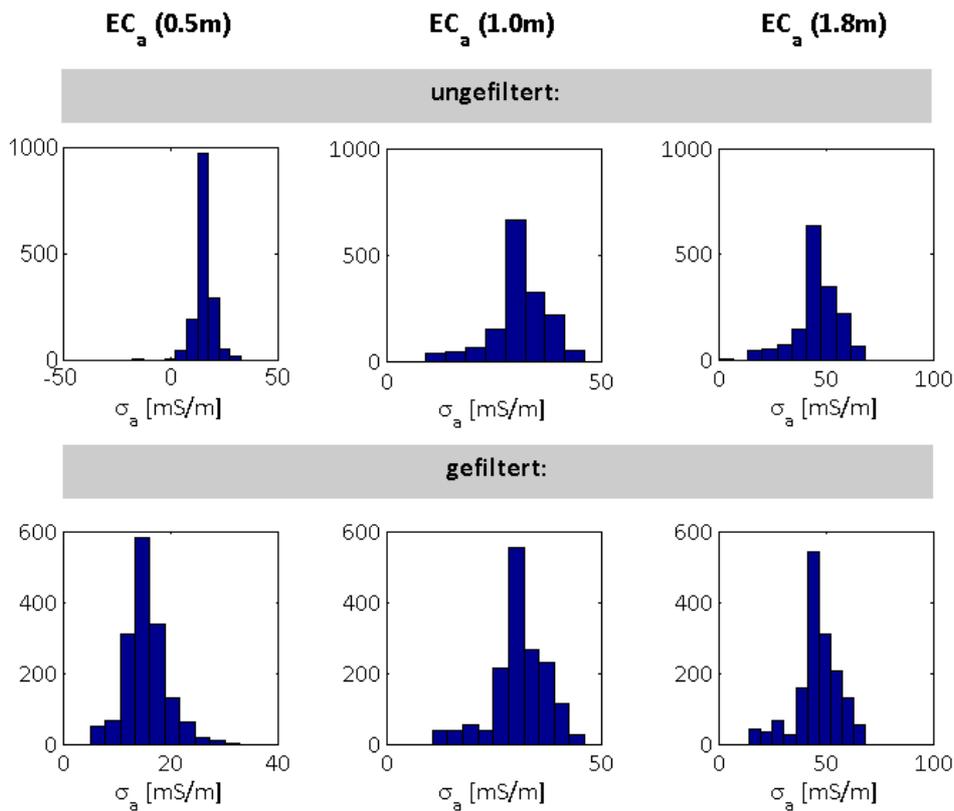


Abbildung 26: Histogramme vor und nach Filterung von negativen Leitfähigkeiten und sonstigen Ausreißer

Um das Rauschen (zufällige Einflüsse) in den bearbeiteten Datensätzen zu verringern, wurden diese schließlich geglättet. Dabei wurden verschiedene Glättungsverfahren, die in Matlab verfügbar waren, getestet. Vor allem der Moving Average Filter (Glättung durch gleitenden Mittelwert) mit einer Fensterbreite von 5 Datenwerten und die „rloess“-Methode (Glättung durch lokal gewichteter Regressionsfunktion) mit einer Bandweite von 3 % aller Datenwerte lieferten relativ gute Ergebnisse. In Abbildung 27 werden für Reihe 2 die Auswirkung der einzelnen Bearbeitungsschritte auf die scheinbare elektrische Leitfähigkeit dargestellt.

### Vergleich: Weingarten 1 Reihe 2 am 5.02.2017

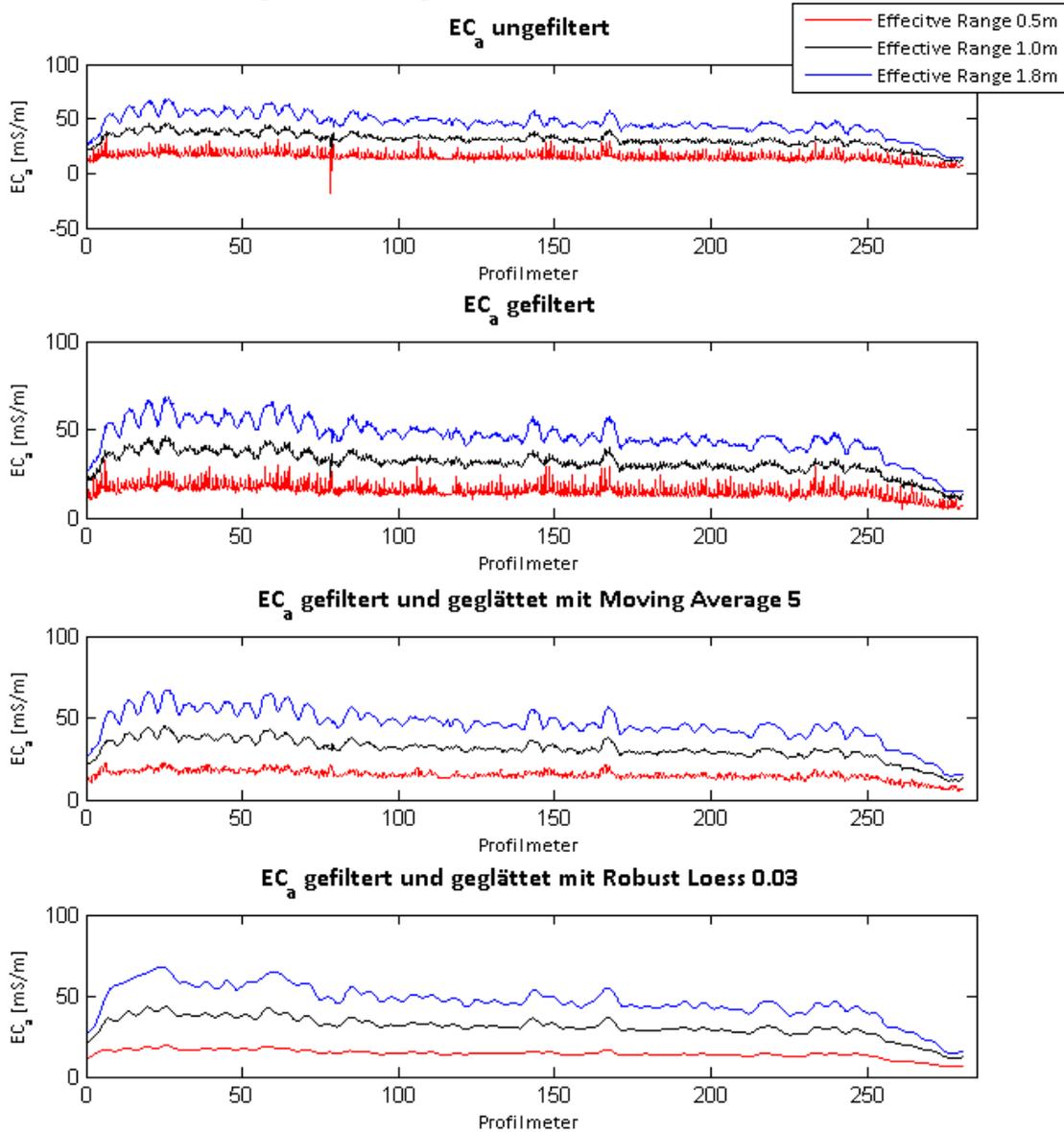


Abbildung 27: Vergleich der einzelnen Bearbeitungsschritte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit in Weingarten 1 Reihe 2

Vergleicht man in Abbildung 27 die Ergebnisse der beiden Glättungsverfahren, lässt sich feststellen, dass die „loess“-Methode ein etwas glatteres Ergebnis liefert als der Moving Average Filter. Da jedoch eine allzu starke Glättung zu einem Informationsverlust führen könnte, entschied ich mich als Endergebnis der EMI-Auswertung gefilterte (negative Leitfähigkeiten + sonstige Ausreißer) und mit dem Moving Average Filter geglättete scheinbare elektrische Leitfähigkeiten zu präsentieren.

Das Endergebnis der 4 Reihen des Weingartens 1 wird nun mittels Line Plots in Abbildung 28 dargestellt.

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 1 am 5.02.2017

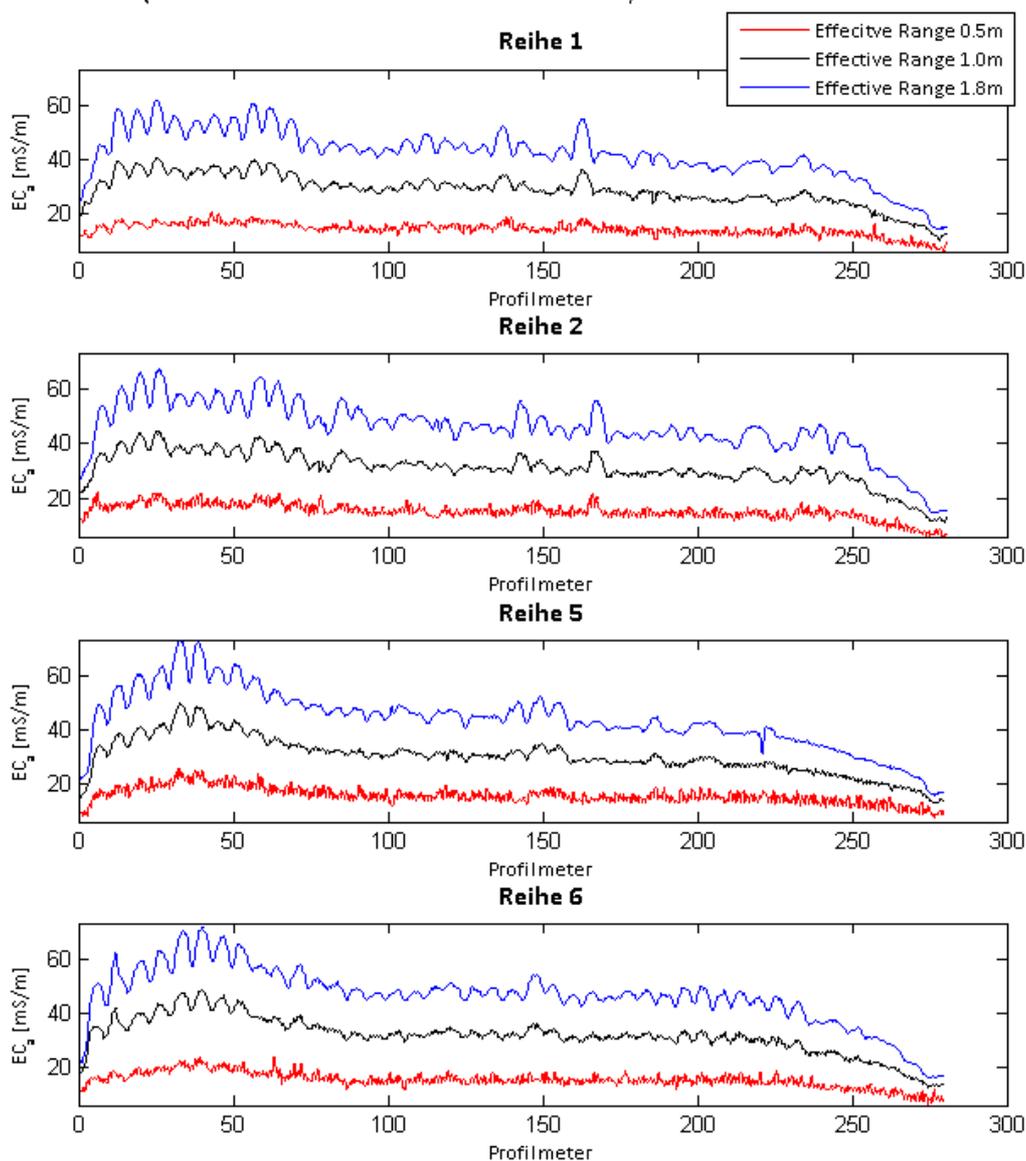


Abbildung 28: Line Plots des Weingarten 1 (vertikale Dipolstellung)

Zuerst lässt sich in Abbildung 28 feststellen, dass die scheinbare elektrische Leitfähigkeit in den 4 Reihen ähnlich verläuft und einen ähnlichen Wertebereich besitzt, -und zwar in allen drei Tiefenbereichen. Das heißt, dass die Leitfähigkeit quer zum Weingarten relativ konstant bleibt.

Betrachtet man nun den Verlauf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit entlang des Weingartens, lässt sich am Anfang des Weingartens 1 in den jeweiligen Tiefenbereichen ein sprunghafter Anstieg der Leitfähigkeit von z.B. grob 20 mS/m für den Tiefenbereich 1.8 m beobachten. Nach dem sprunghaften Anstieg bleibt die Leitfähigkeit in Reihe 1 und 2 in dem Bereich von 10 bis ca. 50 Profilmeter relativ konstant. In Reihe 5 und 6 lässt sich in diesem Bereich wiederum eine relativ geringe Zunahme (wenige mS/m) beobachten. In diesem Bereich werden auch die höchsten Werte der

Leitfähigkeit des jeweiligen Profils und des jeweiligen Tiefenbereichs erreicht. Nach Erreichen des Maximums (bei ca. 50 m) nimmt die Leitfähigkeit sehr langsam ab. Ab 250 m kommt es schließlich bis zum Ende des Weingartens zu einer steilen Verringerung (etwa 20 mS/m für Tiefenbereich 1.8 m) der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit.

Ebenfalls lässt sich eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe erfassen. Hierbei liegt die Leitfähigkeit von Tiefenbereich 0.5 m in einem Wertebereich von ca. 7 bis 25 mS/m. Für den Tiefenbereich 1 m lassen sich Werte von ca. 13 bis 50 mS/m registrieren. Hingegen reicht der Wertebereich der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit für den Tiefenbereich 1.8 m von 16 bis 74 mS/m.

Daneben lassen sich in den Datensätzen, vor allem für die Tiefenbereichen 1 und 1.8 m, periodische Signale (Schwingungen) ausmachen. Diese Ausschläge rühren mit großer Wahrscheinlichkeit von den Metallstehern, die als Rankenhilfe für die Weinreben in einem Abstand von ca. 5 m entlang eines Drahtrahmens angeordnet sind, her. Im Vergleich zu den anderen Weingärten konnten im Weingarten 1 die höchsten Leitfähigkeitswerte gemessen werden. Dies lässt sich höchstwahrscheinlich auch auf die Metallstehern zurückführen. Denn in Weingarten 1 wurden statt den im Weinbau gebräuchlichen dünnen Metallstehern, sehr dicke Metallrohre verwendet.

Schließlich sollte auch noch auf die sprunghafte Zunahme/Abnahme am Anfang/Ende des Weingartens aufmerksam gemacht werden. Diese Beobachtung (auch in fast allen anderen Weingärten) lässt sich dadurch erklären, dass der Anfang/das Ende des Profils der Endpfahl (Metallstehern) ist. Das heißt, dass sich der CMD Mini-Explorer beim Starten der Messung außerhalb des metallischen Rankensystems befunden hat und erst nach einigen Schritten der volle Einfluss des Metalls von Instrument erfasst wurde. Ebenso wurde die Messung erst nach Verlassen des Rankensystems mit dem gesamten Instrument beendet.

#### **6.1.1.2 DAS-1 (ERT, IP)**

Entlang der Reihe 2 wurde ein geoelektrisches Profil (Anfang bei ca. 25 m des CMD-Profiles) mit einem Elektrodenabstand von 4 m aufgebaut und sowohl eine Gleichstrom als auch eine Frequenzbereichs-IP-Messung durchgeführt. Weitere wichtige Informationen (z.B. Elektrodenanordnung usw.) zur Messung findet man im Messprotokoll des Weingartens 1 (siehe Tabelle 2).

Vor der Inversion der Gleichstrom- und IP-Daten, welche hier das Endergebnis der Auswertung ist, müssen noch systematische Fehler (z.B. verursacht durch einen schlechten Bodenkontakt der Elektroden) in den beiden Datensätzen (Widerstände, Phaseverschiebung) mit Hilfe von Pseudosections und Histogrammen aufgefunden und eliminiert werden.

Für die Inversion des Gleichstrom-Datensatzes wurden zuerst die negativen Widerstände eliminiert und danach sonstige Ausreißer in den Widerständen mittels Histogrammen und Pseudosections ausfindig gemacht und entfernt. Abbildung 29 und 30 zeigen nun die Histogramme und die Pseudosections der ungefilterten bzw. gefilterten Widerstände.

### Weingarten 1 Reihe 2

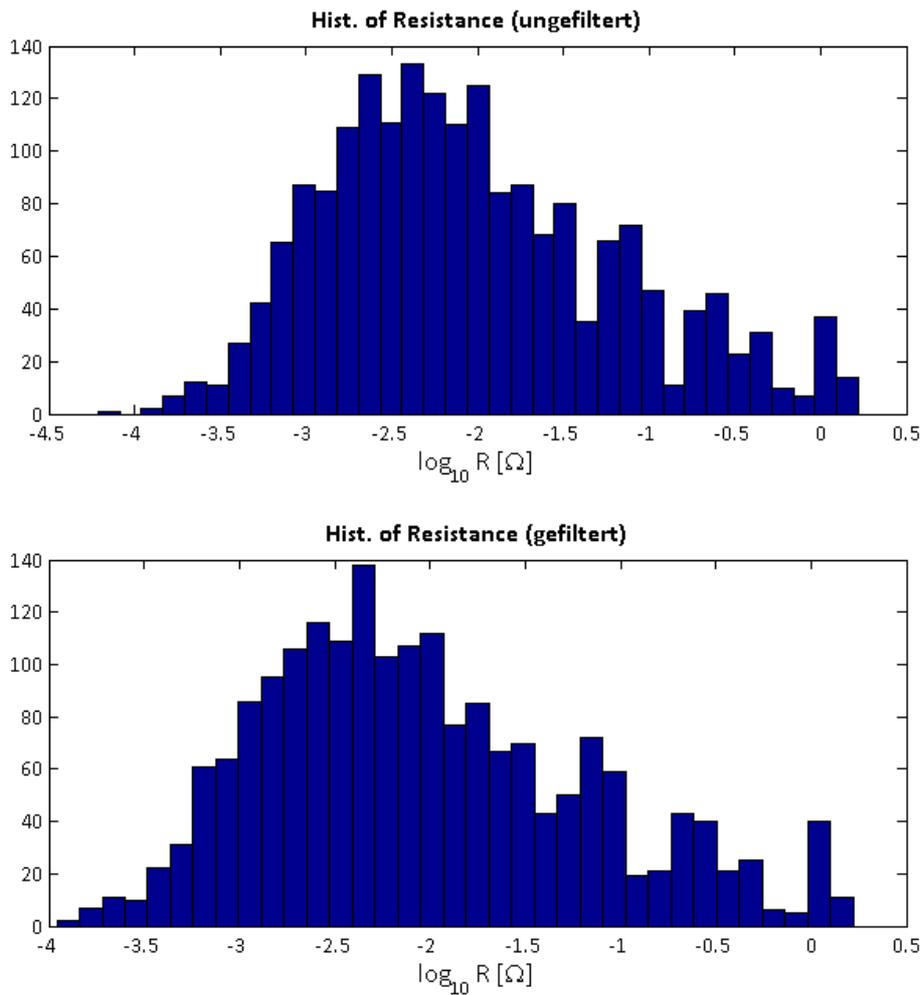


Abbildung 29: Histogramme der ungefilterten und gefilterten Widerstände

### Pseudosection: Weingarten 1 Reihe 2

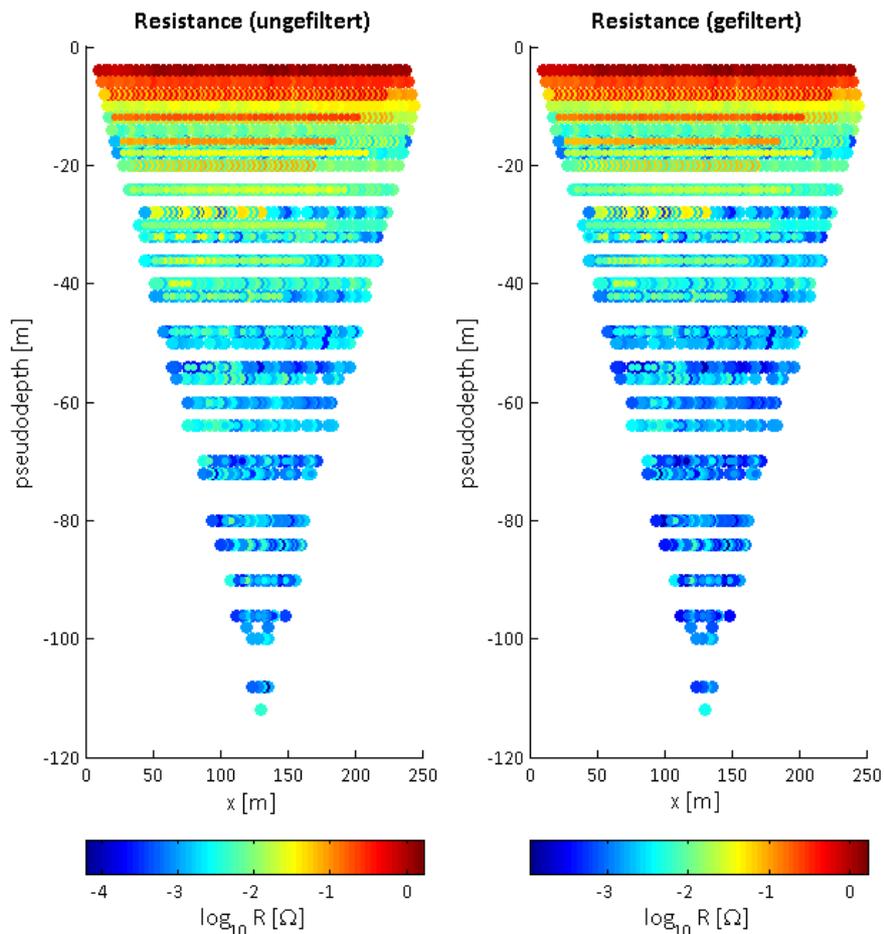


Abbildung 30: Pseudosections der ungefilterten und gefilterten Widerstände

Danach wurden mit dem Datensatz der Gleichstrommethode Inversionen mit unterschiedlichen Werten für den absoluten und den relativen Fehler (Berücksichtigung von zufälligen Fehler in den Widerständen) mit der Software CRTomo durchgeführt. Das beste Inversionsergebnis (data RMS) konnte mit folgenden Einstellungen erreicht werden:

Rel. Fehler [%]	Abs. Fehler [ $\Omega$ ]	Smoothing X:Y	data RMS
5	0.01	1:1	0.9998

Diese Inversion wird nun bildlich in Abbildung 31 dargestellt und zeigt die 2D-Verteilung der elektrischen Leitfähigkeit (umgewandelt zur besseren Vergleichbarkeit mit dem CMD) im Untergrund entlang Reihe 2.

## ERT: Weingarten 1 Reihe 2 am 23.03.2017

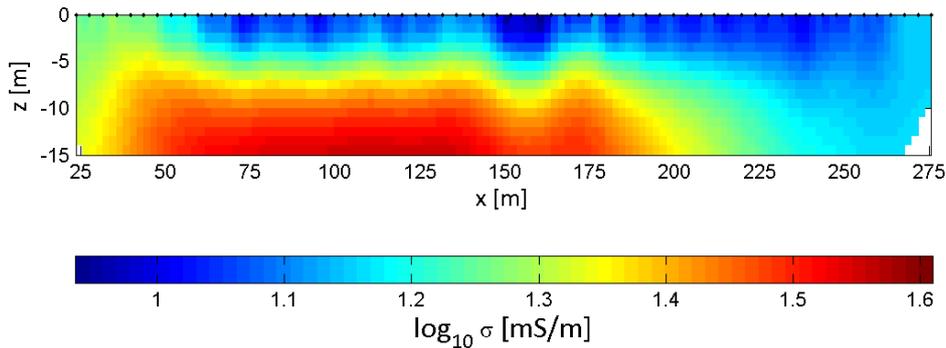


Abbildung 31: Inversionsergebnis der Gleichstrommessung des Weingartens 1

In den oberflächennahen ( $z$ : 0 – ca. 5 m) Schichten kann im Inversionsergebnis beobachtet werden, dass die elektrische Leitfähigkeit in den ersten 25 Profilm Metern Werte zwischen ungefähr 20 und 23 mS/m annimmt. Danach nimmt diese jedoch ab (8 - 15 mS/m). Sehr auffallend im Inversionsergebnis ist die ungefähr 175 m lange Anomalie (ca. 24 - 40 mS/m) am Anfang des Profils, welche ab einem Tiefenbereich von ca. 5 m sichtbar ist. In diesem Bereich wird auch das Maximum der elektrischen Leitfähigkeit erreicht. Ansonsten liegen die elektrischen Leitfähigkeiten in den tieferen Schichten in einem Wertebereich von ca. 13 bis 23 mS/m.

Bei der Auswertung des IP-Datensatzes ist man genau wie bei der Gleichstrommethode vorgegangen. Zuerst wurden systematische Fehler aus dem Datensatz durch das Entfernen von positiven Phasen und sonstigen Ausreißern mittels Histogrammen und Pseudosections (siehe Abbildung 32 und 33) eliminiert.

## Weingarten 1 Reihe 2

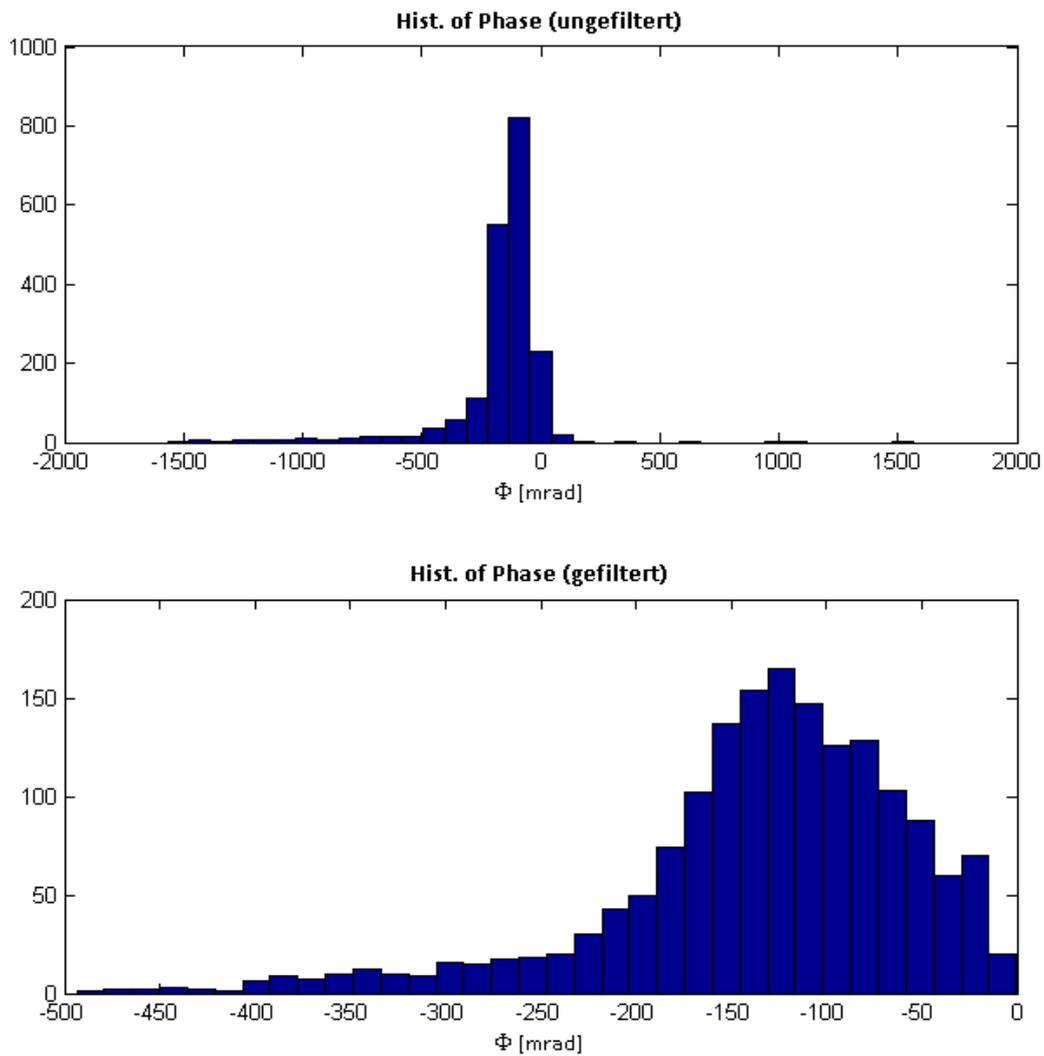


Abbildung 32: Histogramme der ungefilterten und gefilterten Phasen

Wie in den Abbildung 32 und 33 deutlich zu sehen, kommt es zu einer großen Streuung der Phase (höchstwahrscheinlich verursacht durch die Metallsteher; metallische Objekte haben einen sehr hohen IP-Effekt) und somit zu einer hohen Filterung des Datensatzes.

## Pseudosection: Weingarten 1 Reihe 2

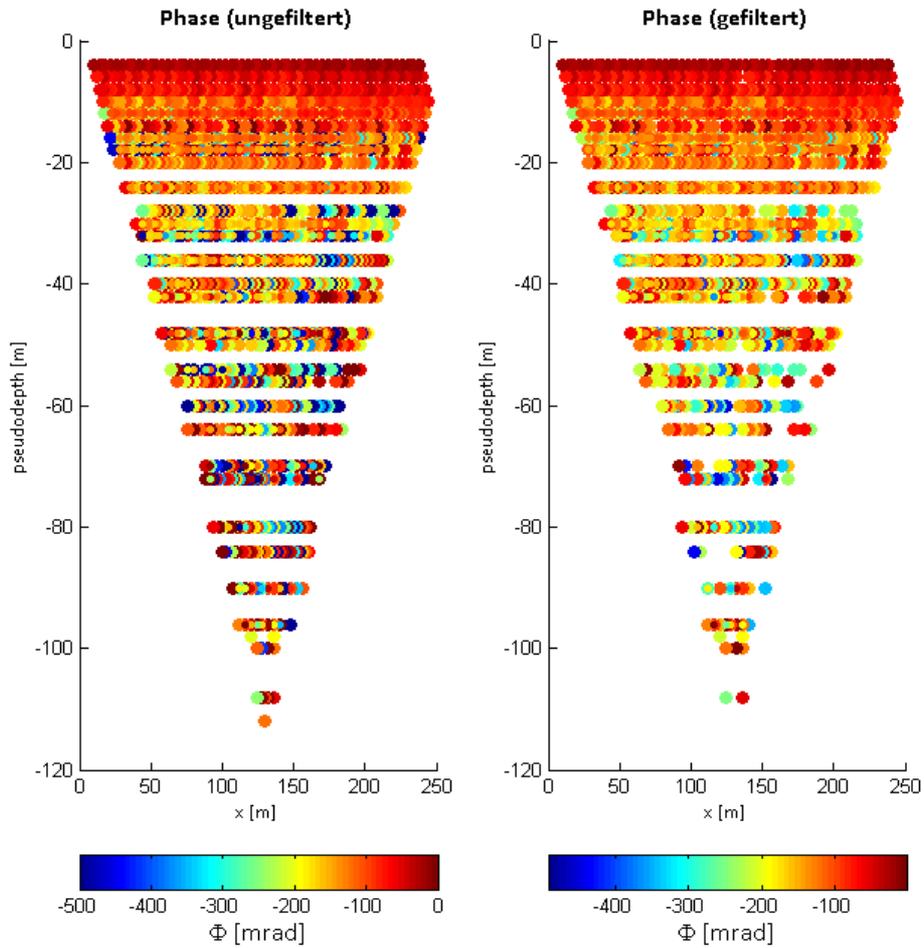


Abbildung 33: Pseudosections der ungefilterten und gefilterten Phasen

Nach der Filterung wurden ebenfalls mehrere Inversionen mit verschiedenen Werten für den Fehlerparameter der Phase durchgeführt. Das beste Inversionsergebnis konnte mit einem Fehlerparameter von 15 mrad ( $\text{pha RMS} \rightarrow 5.127$ ) erreicht werden. Dieses Inversionsergebnis zeigt nun in Abbildung 34 die 2D-Verteilung der Phasenverschiebung im Untergrund entlang der Reihe 2.

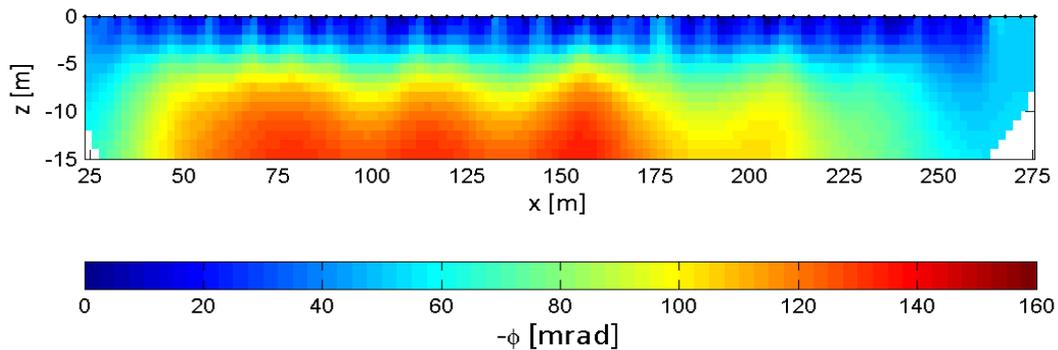


Abbildung 34: Inversionsergebnis der IP-Messung des Weingartens 1

Im Inversionsergebnis der IP lässt sich ebenfalls eine ungefähr 150 m lange Anomalie ab einer Tiefe von ca. 6 - 7 m feststellen. Sie besitzt sehr hohe Phasenverschiebungen (ca. 100 - 140 mrad) und beginnt bei ca. Profilmeter 40 (ausgehend von CMD Mini-Profil). In oberflächennahen Schichten ist zu erkennen, dass die Phasenverschiebung Werte zwischen 0 (meist positive Werte nach Inversion) bis etwa 60 mrad annimmt und sich die Werte sehr unregelmäßig entlang des Profils abwechseln. Für diesen inhomogenen Verlauf können höchstwahrscheinlich wieder die Metallsteher verantwortlich gemacht werden.

Da jedoch die Gleichstrommethode als Kontrollmöglichkeit für das elektromagnetische Verfahren dient und wie in Kapitel 5 erwähnt im Seewinkel vor allem die ersten 3 Meter (Grundwasserspiegel) des Untergrundes von Bedeutung für die Rebe sind, werden nunmehr die elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses in 0.5 und 1.5 m Tiefe grafisch mittels Line Plots dargestellt und dem Ergebnis des elektromagnetischen Verfahrens gegenübergestellt.

Für die darauffolgenden Weingärten sind die 2D-Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit (Inversionen) daher dem Anhang 10 - 15 zu entnehmen.

Da die IP-Messung anscheinend gerade in den für uns wichtigen oberflächennahen Schichten von den Metallstehern beeinflusst wurde (hohe Streuung), werden ihre Inversionsergebnisse für die folgenden Weingärten lediglich dem Anhang 16 – 21 hinzugefügt.

### 6.1.1.3 Vergleich EMI und ERT

In Abbildung 35 wird nun der zuvor erwähnte Vergleich von den scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten der CMD Mini-Explorer Auswertung (EMI) und den elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses (0.5 m & 1.5 m) der Gleichstrommethode (ERT) für Reihe 2 dargeboten.

Zusätzlich wurden für die Analyse wichtige Informationen, wie Bodentypen oder

Lackennähe, der Darstellung beigelegt.

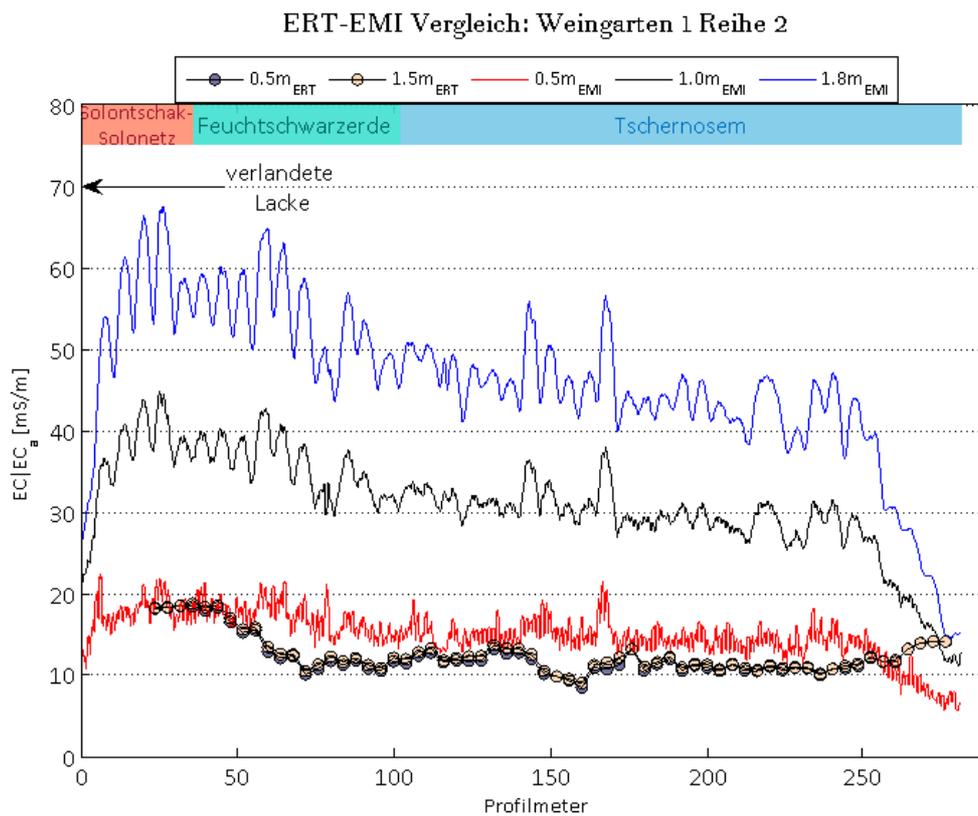


Abbildung 35: Vergleich von EMI und ERT für Weingarten 1 Reihe 2

Zuallererst lässt sich beobachten, dass der Verlauf der Leitfähigkeit bei beiden Verfahren relativ ähnlich ist. Bis Profilmeter 50 werden die max. Leitfähigkeiten des Profils in allen Tiefenbereichen registriert. Danach kommt es zu einer sehr langsamen Abnahme (50 – 250 m) der Leitfähigkeit.

Am Ende des Profils (bei etwa 250 m) können jedoch Unterschiede im Verlauf von EMI und ERT erfasst werden. Während sich bei der EMI eine steile Abnahme der Leitfähigkeit registrieren lässt, kommt es hingegen bei der ERT zu einer leichten Zunahme (einige mS/m) dieser.

Jedoch unterscheiden sich die Wertebereiche der EMI (vor allem für Tiefenbereichen 1 m und 1.8 m) und der ERT (für Tiefe 1.5 m) stark voneinander. So nehmen z.B. die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des Tiefenbereichs 1.8 m einen Wertebereich von 15 – 68 mS/m an. Hingegen liegen die elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnis (Tiefe 1.5 m) in einem Bereich von 9 bis 19 mS/m. Dieser Unterschied lässt sich höchstwahrscheinlich dadurch erklären, dass eine Leitfähigkeitsmessung des CMD Mini-Explorers bei kleiner Induktionszahl (siehe Kapitel 4.2.3) aufgrund der metallischen Objekte (sehr hohe Leitfähigkeit; daher Spulenabstand möglicherweise nicht viel geringer als Skintiefe) nicht gewährleistet ist, so dass Formel 6 eigentlich nicht angewendet werden darf und dadurch falsche Werte für die Leitfähigkeit ermittelt werden.

## 6.1.2 Analyse

Mittels der EMI/ERT-Datensätze und zusätzlichen Informationen (Tabelle 10), die man über Weingarten 1 sammeln konnte, sollen Rückschlüsse auf die Bodenbeschaffenheit gezogen werden, um so Stellen im Weingarten aufzudecken, welche den Weinreben eventuell Probleme bereiten können. Diese Stellen sollen dann mit der Aussage des Weinbauers verifiziert oder falsifiziert werden.

In Kapitel 3 dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die elektrische Leitfähigkeit eng mit den Eigenschaften des Bodens verbunden ist.

So können vor allem Stellen, wo sich der Wassergehalt (Sättigungsgrad, siehe Abbildung 3), der Salzgehalt im Bodenwasser (siehe Abbildung 3) und/oder der Tongehalt (siehe Abbildung 7, hoher Einfluss) ändert, durch Änderung der elektrischen Leitfähigkeit identifiziert werden. Doch welche Bodeneigenschaft für die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit verantwortlich ist, kann ohne zusätzlichen Informationen nicht ausgesagt werden.

In der EMI-Auswertung (siehe Abbildung 28 und Kapitel 6.1.1.1) des Weingartens 1 konnte ein fast konstanter Verlauf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit quer zum Weingarten ausgemacht werden. Dieser Umstand deutet darauf hin, dass die Bodeneigenschaften quer zu den Weingartenreihen relativ ähnlich sind.

Entlang der Weingartenreihen sieht dies schon anders aus.

Hier lässt sich der Weingarten sowohl nach der EMI-Auswertung als auch nach der ERT-Auswertung (siehe Abbildung 35) in zwei „Leitfähigkeitsbereiche“ teilen. Der leitfähigere Abschnitt ( $EMI_{0.5\text{ m}} : \sim 18 - 22.5\text{ mS/m}$ ;  $ERT_{1.5\text{ m}} : 17 - 19\text{ mS/m}$ ) befindet sich am Anfang des Weingartens und ist etwa 50 m lang. Danach kommt es zur Abnahme der Leitfähigkeit. Der zweite „Leitfähigkeitsbereich“ ( $EMI_{1.8\text{ m}} : \sim 12 - 15\text{ mS/m}$ ;  $ERT_{1.5\text{ m}} : 9 - 15\text{ mS/m}$ ) erstreckt sich dann bis an das Weingartenende.

Wie in Abbildung 35 zu sehen, stimmt der leitfähigere Bereich am Anfang des Weingartens gut mit dem Bereich überein, der als Solontschak- Solonetz klassifiziert wurde. Der restlich Weingartenboden (geringere Leitfähigkeit) wurde als Feuchtschwarzerde und Tschernosem ausgewiesen.

Einerseits weißt der Solontschak-Solonetz Boden und die Nähe zu einer verlandeten Lacke auf das Vorhandensein einer schluffigen-tonigen Schicht („salzföhrenden Horizont“ (Husz 1965: 175)) hin (vgl. Krachler et al. 2012: 7-9), andererseits entstand der Bodentyp Tschernosem vor allem aus Materialien wie Sand und Löss (schluffhaltig) (vgl. Husz 1965: 174).

So lässt sich nun anhand der EMI/ERT/Bodentypen folgern, dass der Anfangsbereich (0 – 50 m) des Weingartens den höchsten Tongehalt aufweist. Danach kommt es zu dessen Verringerung und zur Erhöhung des Schluff- und Sandgehaltes im Boden.

Betrachtet man nun die Erhöhung der Leitfähigkeit mit der Tiefe (siehe Abbildung 28 & 34), welche besonders stark in der EMI-Auswertung zu registrieren ist, kann einer-

seits eine Zunahme des Tonanteils mit der Tiefe dafür verantwortlich sein.

Andererseits lässt die Nähe einer verlandeten Lacke und das Vorkommen von Salzböden darauf schließen, dass das Bodenwasser einen hohen Salzgehalt besitzt. Was wiederum bedeutet, dass die deutliche Erhöhung der Leitfähigkeit mit der Tiefe auch durch eine Zunahme der Sättigung in den Poren mit dem salzreichen Bodenwasser verursacht werden kann.

Mittels der in Kapitel 3.2.1 ermittelten Regressionsfunktion (Abbildung 7,  $y \approx 0.6x + 4.8$ ) ist es nun möglich, für die zwei „Leitfähigkeitsbereiche“ in Weingarten 1 einen max. Tongehalt zu berechnen. Dies erlaubt uns schließlich die Einteilung des Weingartenbodens in leichte, mittlere oder schwere Böden (nach Abbildung 1).

Da die Regressionsfunktion nur den Einfluss des Tongehaltes auf die elektrische Leitfähigkeit berücksichtigt, werden für eine möglichst genaue Berechnung elektrische Leitfähigkeiten der ERT in 0.5 m Tiefe genommen.

Zum einen kann man nämlich davon ausgehen, dass der Einfluss des Rankensystems auf die Gleichstrommethode nicht allzu hoch ist und zum anderen, dass der Sättigungsgrad (salzhaltiges Bodenwassers) in den Poren in 0.5 m geringer ist als in tieferen Schichten.

So lässt sich für die ersten 50 m des Weingartens für eine max. elektrische Leitfähigkeit von 18.6 mS/m ein Tongehalt von höchstens 23 % berechnen. Gemäß Abbildung 1 würde dieser Tongehalt einen Lehmboden oder einen Schlufflehm ergeben. Diese zählen zu den mittelschweren Böden.

Für den restlichen Weingarten geht eine angenommene elektrische Leitfähigkeit von 15 mS/m mit einem Tongehalt von höchst 17 % einher. Sandiger Lehm und wiederum Schlufflehm besitzen diesen Tongehalt und zählen auch zu den mittelschweren Böden.

Betrachtet man nun den Weingartenboden in Bezug auf die Pflanzengesundheit, so würde im Normalfall ein mittelschwerer Boden (hoher Mittelporenanteil) für den Grünen Veltliner und seinen Wurzeln eine gute Sauerstoffversorgung und eine optimale Wasser- und Nährstoffversorgung bedeuten (siehe Kapitel 2 und 5.3.1).

Mittels der EMI/ERT-Auswertung können somit keinerlei Stellen detektiert werden, welche der Pflanze Probleme bereiten könnten.

Nun wissen wir von Herrn Lang, dass im gesamten Weingarten keinerlei Probleme im Bezug auf Ertrag, Pflanzengesundheit und Pflanzenwachstum aufzufinden sind und der Boden sich hervorragend als Standort für das Wachstum des Grünen Veltliners eignet.

Somit stimmt die Analyse der EMI/ERT-Auswertung mit der Aussage von Herr Lang überein.

Berechnet man im Nachhinein auch die Tongehalte der zwei „Leitfähigkeitsbereiche“ mit den scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des  $EMI_{0.5\text{ m}}$ , dann ergibt sich für

den ersten Bereich ein max. Tongehalt von 29 % (mit 22.5 mS/m) und für den zweiten Bereich einen von max. 17 % (mit 15 mS/m). Beide Tongehalte lassen sich ebenfalls den mittelschweren Böden zuordnen.

## 6.2 Weingarten 2

### 6.2.1 Auswertung

#### 6.2.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)

Für Weingarten 2 (Messprotokoll: siehe Tabelle 3) wird nun in Abbildung 36 die Auswertung der Messung am 14.01.2017 in vertikaler Dipolstellung präsentiert. Außerdem gibt Abbildung 37 einen Vergleich des am 14.01.2017 und dem am 23.8.2017 in vertikaler Dipolstellung für Reihe 3 ausgewerteten Datensatzes bildlich wieder.

Aus den Line Plots der Abbildung 36 geht hervor, dass vor allem in Reihe 1, aber auch in Reihe 4, im Vergleich zu den anderen beiden Reihen ein kleinerer Leitfähigkeitsbereich erfasst werden kann ( $\sim 10$  mS/m weniger für Tiefenbereich 1.8 m). Dafür kann jedoch höchstwahrscheinlich der unterschiedliche Einfluss von metallischen Objekten auf den CMD Mini-Explorer verantwortlich gemacht werden. Denn wie aus dem Messprotokoll des Weingartens 2 (siehe Tabelle 3) hervorgeht, wird der CMD Mini-Explorer in Reihe 1 (rechts Feld) und Reihe 4 (links alter Weingarten  $\rightarrow$  Holzpfähle) nur einseitig durch die metallischen Pfähle belastet.

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 2 am 14.01.2017

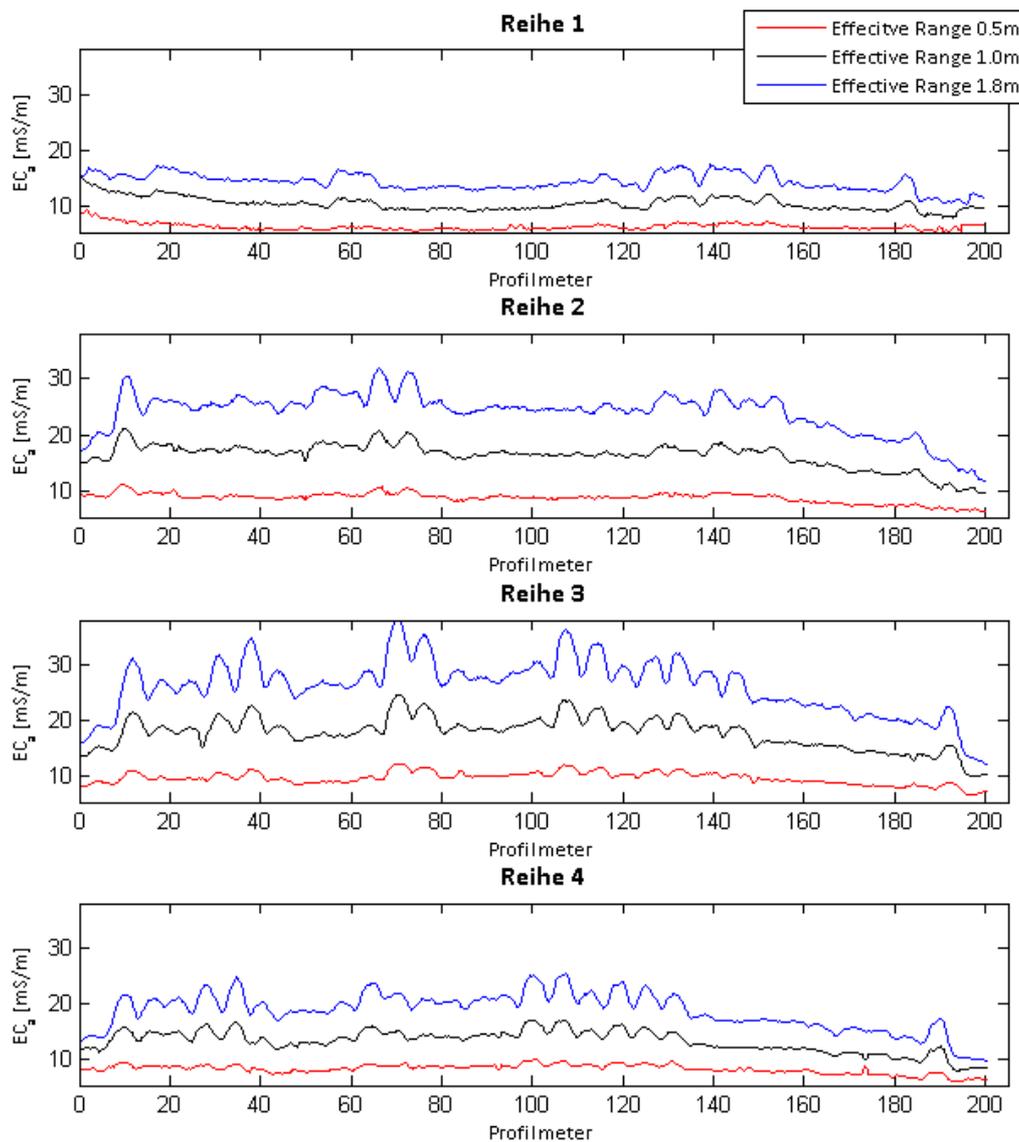


Abbildung 36: Line Plots des Weingarten 2 (vertikale Dipolstellung)

Weiteres lässt sich in Abbildung 36 ausmachen, dass die Schwingungen (periodische Signal) in den Datensätzen öfters unterbrochen werden. Dies rührt daher, dass in allen Reihen auch einige Holzpfähle als Rankenhilfen verwendet wurden.

Zwar ist die Skalierung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit in den Reihen nun unterschiedlich, doch lässt sich trotzdem in allen Profilen ein ähnlicher Verlauf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit feststellen.

So kann grob gesagt werden, dass die scheinbare elektrische Leitfähigkeit entlang eines Profils in allen Tiefenbereichen relativ konstant bleibt (Berücksichtigung von den Holzpfählen) und dem Ende hinzu (ab ca. 140 m) etwas geringer wird. Der Unterschied zwischen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit am Anfang und am Ende des Profils beträgt in allen Reihen und Tiefenbereichen ca. 5 mS/m.

Auch lässt sich in allen Profilen ein deutlicher Anstieg der scheinbaren elektrischen

Leitfähigkeit mit der Tiefe ausmachen.

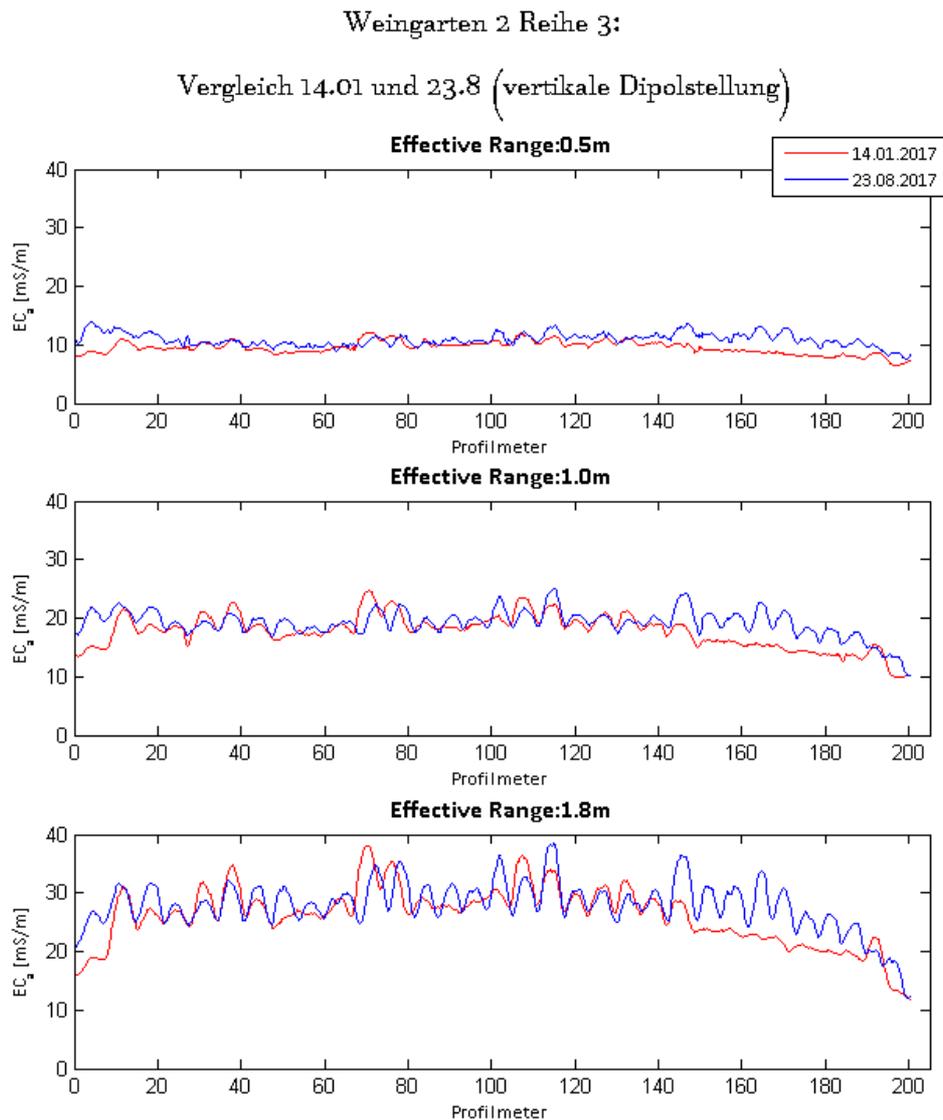


Abbildung 37: Vergleich von 14.01 und 23.08

Ein Vergleich von beiden Datensätzen (14.01. und 23.08.) der Reihe 3 in Abbildung 37 ergibt, dass vor allem am Anfang (ca. 0 – 20 m) und am Ende (ab ca. 140 m) des Weingartens Unterschiede in allen drei Tiefenbereichen registriert werden können. In diesen Bereichen können am 23.08. nämlich um ca. 2 - 4 mS/m höhere Leitfähigkeiten registriert werden.

### 6.2.1.2 Vergleich EMI und ERT

Ein geoelektrisches Profil wurde mit einem Elektrodenabstand von 3 m am 23.3.2017 in Reihe 3 aufgebaut. Genauere Details findet man im Messprotokoll des Weingartens 2 (siehe Tabelle 3).

Das beste Inversionsergebnis des bearbeiteten Datensatzes der Gleichstrommethode wurde mit folgenden Werten für den relativen und absoluten Fehler erhalten:

Rel. Fehler [%]	Abs. Fehler [ $\Omega$ ]	Smoothing X:Y	data RMS
5	0.08	1:1	0.9999

In Abbildung 38 werden nun die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten der EMI-Auswertung (14.01.2017) mit den elektrischen Leitfähigkeiten der ERT (0.5 & 1.0 m) für Reihe 3 des Weingartens 2 verglichen.

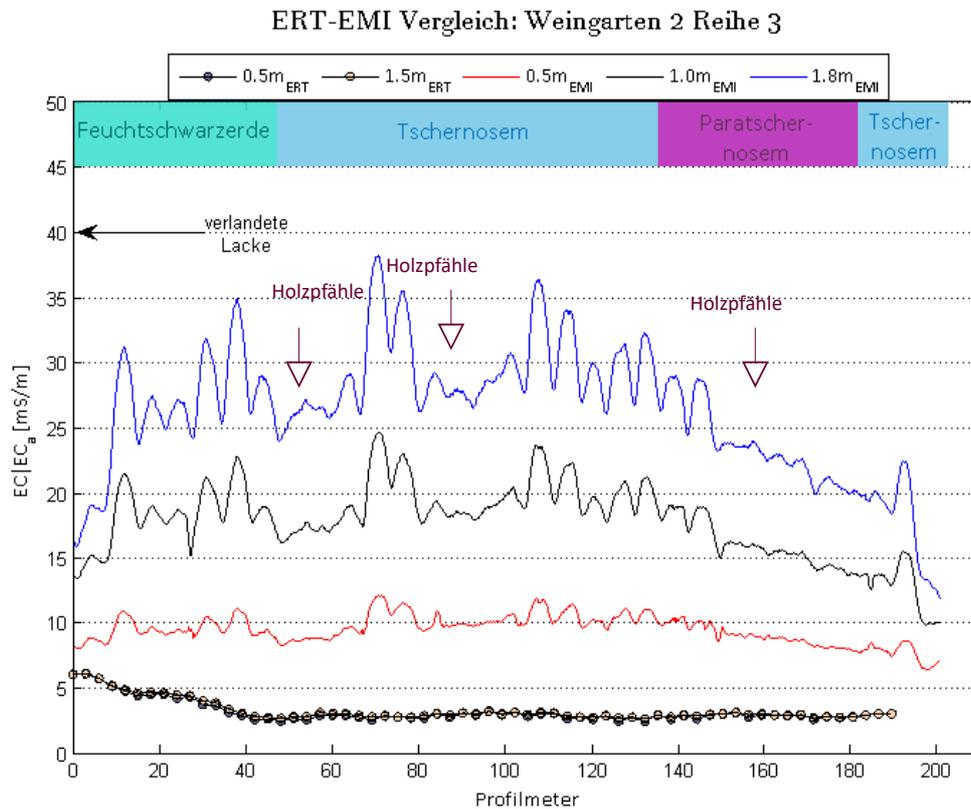


Abbildung 38: Vergleich von EMI und ERT des Weingartens 2 Reihe 3

Der Verlauf der Datensätze der beiden Verfahren stimmt gut überein.

Sowohl in der EMI (Berücksichtigung von Holz- und Metallsteher) als auch in der ERT-Auswertung, lässt sich feststellen, dass der Anfang des Weingartens um einige mS/m leitfähiger ist als das Ende des Weingartens.

In der ERT nimmt die Leitfähigkeit im Bereich von 0 bis 40 Profilmeter leicht ab. Danach verläuft die Leitfähigkeit der ERT relativ konstant bis ans Ende des Weingartens.

Jedoch unterscheidet sich die Wertebereiche der EMI und der ERT etwas voneinander. So nehmen z.B. die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des Tiefenbereichs 1.8 m einen Wertebereich von 12 – 38 mS/m an. Hingegen liegen die elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses (Tiefe 1.5 m) in einem Bereich von nur 3 bis 6 mS/m.

## 6.2.2 Analyse

Bei der Analyse der EMI und ERT Daten des Weingartens 2 geht man nun genauso vor wie bei der für Weingarten 1.

Durch Abbildung 36 (EMI-Auswertung) weiß man, dass sich die Wertebereiche der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit vor allem in Reihe 1, aber auch in Reihe 4, von denen in Reihe 2 und 3 unterscheiden.

Der Umstand, dass der CMD Mini-Explorer nicht in allen Reihen gleich stark von metallischen Objekten beeinflusst wurde, macht es schwierig auszusagen, ob und wie stark die Bodeneigenschaften sich quer zum Weingarten ändern. Da man jedoch in Abbildung 25 (Bodentypenkarte) ausmachen kann, dass die Bodentypen quer zum Weingarten 2 gleich bleiben, folgt die Annahme, dass die Bodeneigenschaften quer zum Weingarten relativ konstant bleiben.

Entlang des Weingartens lässt sich sowohl in der EMI- und der ERT- Auswertung (siehe Abbildung 38) eine leichte Abnahme feststellen. So ist der Anfang des Weingartens um ca. 2-5 mS/m leitfähiger als das Ende.

Wie in Abbildung 38 zu sehen, findet man entlang des Weingartens die Bodentypen Feuchtschwarzerde, Tschernosem, Paratschernosem und am Ende wieder Tschernosem.

Während sich die Feuchtschwarzerde auf „Schwemmlöß“ und der Tschernosem auf „lößähnlichen Sand“ entwickelt haben, entstand der Paratschernosem auf Sand. (Husz 1965: 158-159)

Zusätzlich wurde der Weingartenboden von seinem Besitzer Pilles Michael als sehr schotterreich, -besonders je näher man zum Ende des Weingarten kommt, beschrieben.

Sowohl die Bodentypen, als auch die Beschreibungen des Besitzers lassen sich somit gut mit dem beobachteten Verlauf der EMI/ERT-Auswertung in Verbindung bringen. So kann man annehmen, dass sich am Anfang ein etwas höherer Tongehalt als am Ende des Weingartens vorfinden lässt. Danach nimmt entlang des Weingartens der Anteil an Mineralien der Schluff- und Sandfraktion zu und auch der Grobanteil (Schotter) wird immer höher.

Dass die Leitfähigkeit (siehe Abbildung 36 und 38 ) -besonders in der EMI-Auswertung- mit der Tiefe zunimmt, kann einerseits auf eine Erhöhung des Tonanteils mit der Tiefe hindeuten. Andererseits weist die Nähe zu einer verlandeten Lacke darauf hin, dass das Bodenwasser stark salzhaltig ist und dass die Zunahme der Leitfähigkeit in tiefere Schichten, ebenso durch einen Anstieg des salzhaltigen Porenwassers erklärt werden kann.

Zur Berechnung des max. möglichen Tongehaltes mittels der Regressionsfunktion wird nun 6.2 mS/m als die höchste Leitfähigkeit des Inversionsergebnisses (ERT) in Tiefe 0.5 m ermittelt. Diese Leitfähigkeit würde für den Weingartenboden maximal eine Tongehalt von ca. 2.3 % bedeuten. Nach Abbildung 1 würde der Weingartenbo-

den dadurch zu den leichten (Sandboden) oder mittelschweren (Schluffboden, Schluffanteil > 50 %) Böden zählen.

Würde der Weingartenboden nun einen Schluffanteil von über 50 % aufweisen, wäre im Normalfall sowohl für eine gute Wasser- und Nährstoffversorgung als auch für eine ausreichende Durchlüftung gesorgt und die Weinreben hätten keinerlei Probleme auf Grund des Weingartenbodens.

Überwiegt jedoch der Sandanteil, könnte ein leichter Boden der Weinrebe Probleme bereiten. Aufgrund des hohen Grobporenanteils ist zwar einerseits für eine hervorragende Sauerstoffversorgung der Rebwurzeln gesorgt, andererseits jedoch bedeutet dies bei sporadischen Regenfällen auch eine unzureichende Wasser- und Nährstoffversorgung. Leider fühlt sich gerade der Welschriesling (siehe Kapitel 5.3.2), der in Weingarten 2 gepflanzt wurde, unwohl bei trockenen Standorten.

Mit dem Wissen, dass der Boden mit einem hohen Schotteranteil (Grobporenanteil) durchmischt ist (besonders am Ende), wäre also die Annahme wahrscheinlicher, dass in trockenen Jahren, der Welschriesling aufgrund von Wasser- und Nährstoffmangel im gesamten Weingarten, insbesondere am Ende, nicht allzu gut anwächst.

Tatsächlich kann dies mit der Aussage des Weinbauers bestätigt werden. Er konnte nämlich in Jahren, wo es nicht regelmäßig regnete, beobachten, dass sich im ganzen Weingarten die Weinreben nicht vollkommen entwickeln konnten (Trauben sehr klein, Notreife). Am Endstück des Weingartens 2 führte dies sogar zu Stockausfällen. Regnet es jedoch regelmäßig über das Jahr verteilt, bringt der Weingartenboden hervorragende Weinreben und Weintrauben hervor.

Wie schon zuvor wird im Nachhinein auch der max. Tongehalt mit  $EMI_{0.5\text{ m}}$  berechnet. Dabei kann ein Boden mit einem Tongehalt von max. 9 % (10 mS/m) ebenfalls entweder zu einem leichten (nun sandiger Lehm) oder mittelschweren Boden gezählt werden.

Analysiert man abschließend noch den Vergleich der beiden EMI-Auswertungen (Abbildung 37) an verschiedenen Tagen, macht sich der Einfluss der Temperatur auf die elektrische Leitfähigkeit bemerkbar. In Abbildung 37 lässt sich ein Unterschied von ca. 2-4 mS/m in allen Tiefenbereichen am Anfang und Ende des Weingartens ausmachen.

Am 14.01.2017 konnte während der Messung eine Temperatur von ca. 5°C gemessen werden. Hingegen erreichte man am 23.08.2017 über 35°C. Wie man in Kapitel 3.2.1 erfahren hat, führt eine Temperaturerhöhung von 40 °C annähernd eine Verdoppelung der elektrischen Leitfähigkeit herbei.

In Weingarten 2 hat man nun einen Temperaturunterschied von 30 °C.

Das würde also bedeuten, dass sich z.B. der Anfangswert von 8.3 mS/m (Tiefenbereich von 0.5 m) am 14.01.2017 auf ~14.5 mS/m am 23.08.2017 erhöht. Dies steht auch relativ gut mit dem tatsächlich beobachteten Wert von 11.1 mS/m am 23.08.2017 im Einklang.

Warum der Unterschied der Leitfähigkeiten an den zwei Tagen geringer ausfällt oder sogar im Mittelbereich des Weingartens kaum vorhanden ist, kann vermutlich auf eine ungleiche Sättigung der Poren mit dem Bodenwasser an den zwei Tagen zurückgeführt werden. Denn einerseits ist der Grundwasserstand im Jänner meist um einiges höher als im August (siehe Anhang 4-9) und andererseits hat es am 14.01. vor der Messung leicht geregnet.

## 6.3 Weingarten 3

### 6.3.1 Auswertung

#### 6.3.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)

Präsentiert wird in den Abbildungen 39 & 40 die Auswertung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit, welche am 23.02.2017 in vertikaler Dipolstellung für jede zweite Reihe des Weingartens 3 aufgenommen wurde. Für einen besseren Überblick über die Leitfähigkeitsänderungen im Weingarten 3 ist zuerst ein Scatter Plot (siehe Abbildung 39) für die gesamte Auswertung erstellt worden. Abbildung 40 stellt dann nur die Datensätze für Reihe 1, 9, 13 und 19 detaillierter mittels Line Plots (siehe Abbildung 40) dar.

In den beiden Abbildungen 39 & 40 lässt sich feststellen, dass die beiden äußersten Weingartenreihen (Reihe 1 & besonders Reihe 19) geringere Leitfähigkeiten in allen drei Tiefenbereiche aufweisen als die restlichen Profile. Hierbei sollte jedoch wieder das Messprotokoll (Tabelle 4) berücksichtigt werden, in dem angemerkt wird, dass sich links neben Reihe 1 ein alter Weingarten mit Holzpfehlen befindet und rechts von Reihe 19 ein Feld anschließt. Ansonsten können quer zum Weingarten im Großen und Ganzen nur kleinere Variationen (wenige mS/m) in der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit beobachtet werden.

2D-Scatter Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 3 am 24.02.2017

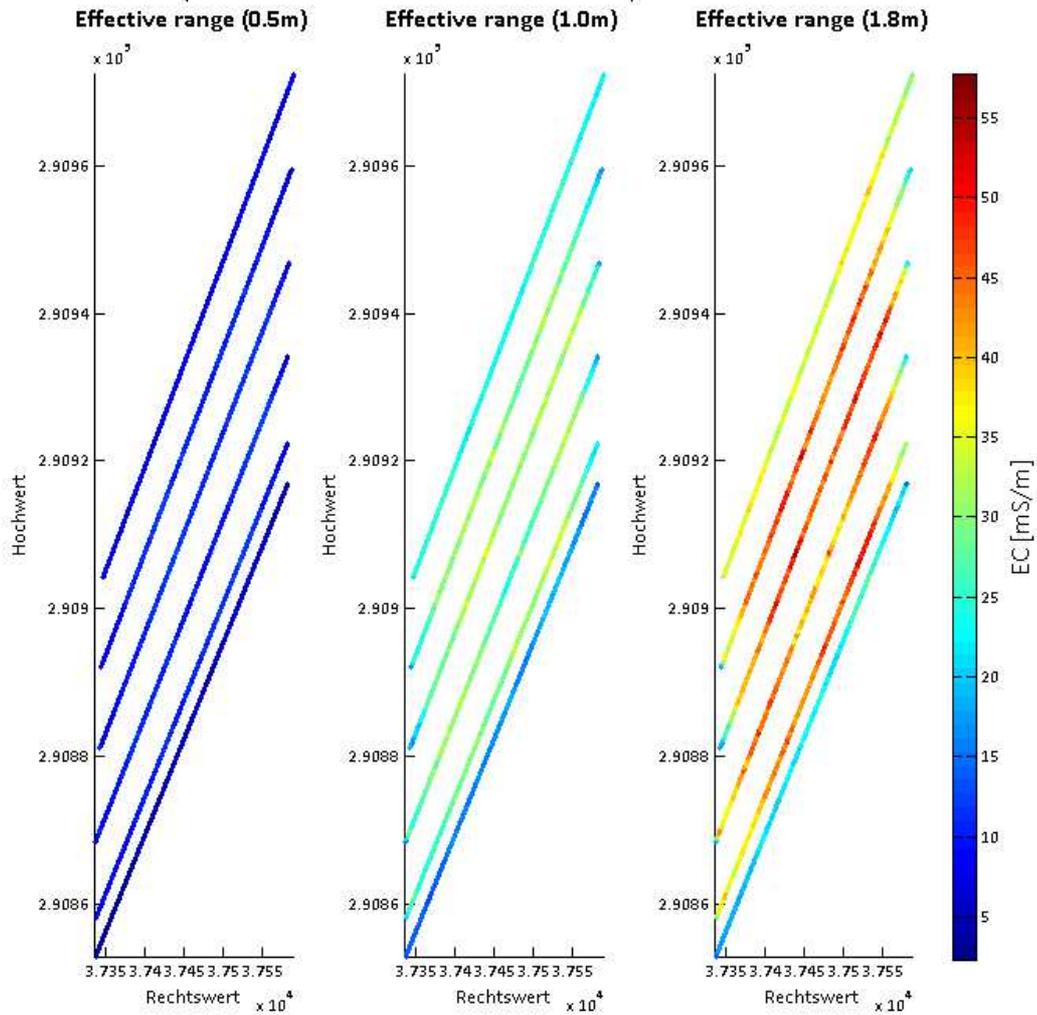


Abbildung 39: Scatter Plot des Weingartens 3 (vertikale Dipolstellung)

Berücksichtigt man in den detaillierten Line Plots (siehe Abbildung 40), die periodischen Ausschläge durch die Metallsteher und die sprunghafte Zunahme/Abnahme am Anfang/Ende des Weingartens aufgrund des nicht vollen Einflusses des Rankensystems (Drahtrahmen und Metallpfähle) auf den CMD Mini-Explorer, scheint sich neben kleineren Variationen, ein recht gleichmäßiger Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit feststellen zu lassen; besonders in Reihe 1 (nur 2 – 4 mS/m Variationen).

In Reihe 13 kommt es z.B. in den ersten 50 m zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit um ca. 5 – 10 mS/m. Danach nimmt diese wieder um einige wenige mS/m ab. Ein erneuter Anstieg der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit um ca. 5 – 10 mS/m lässt sich bei ungefähr Profilmeter 100 feststellen. Nach 100 m kommt es bis zum Profilende zu einer erneuten Abnahme um rund 5 – 10 mS/m.

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 3 am 24.02.2017

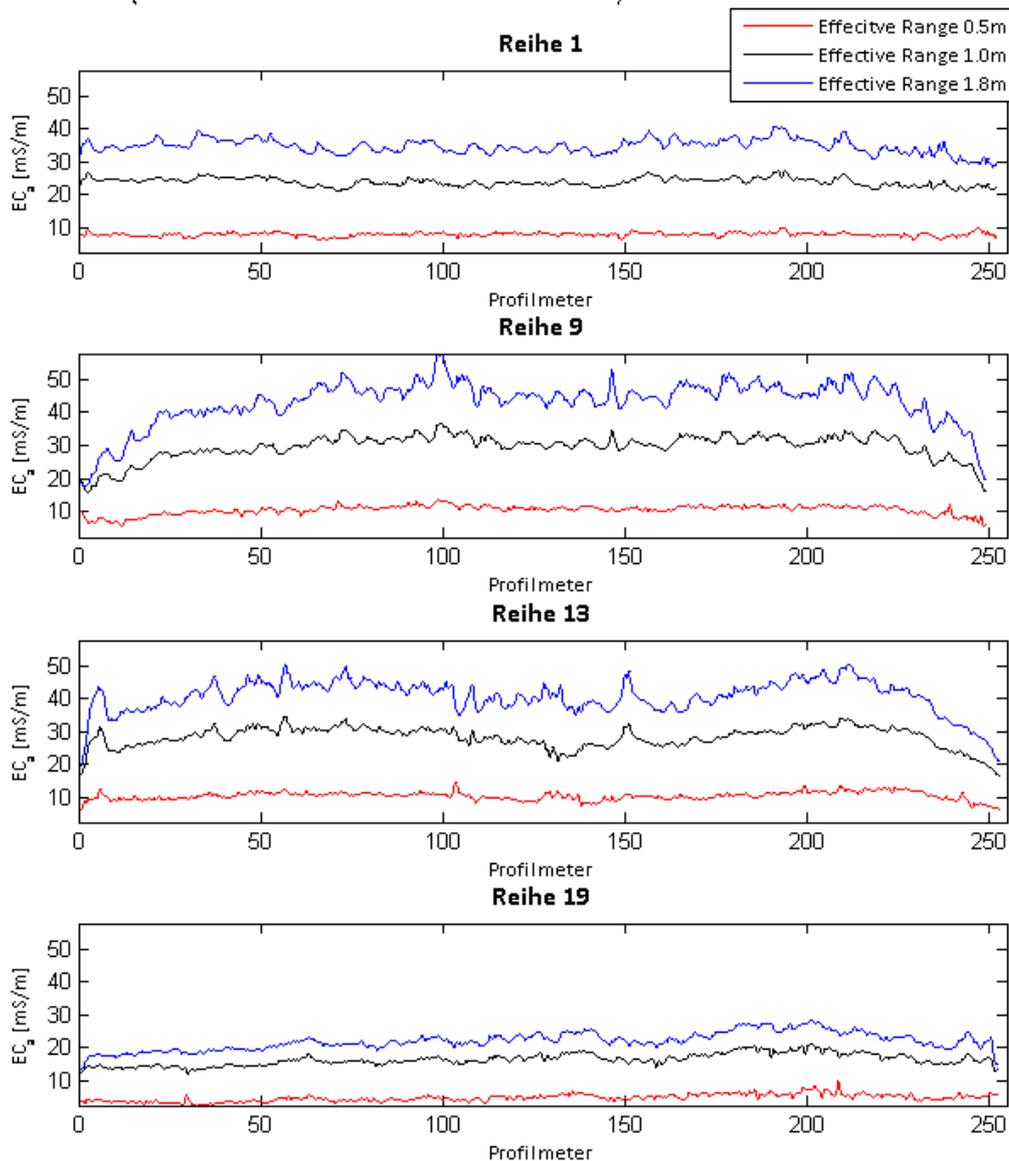


Abbildung 40: Line Plots des Weingartens 3 (vertikale Dipolstellung)

Ebenfalls lässt sich im ganzen Weingarten ein Anstieg der Leitfähigkeit mit der Tiefe erfassen. Hierbei lässt sich z.B. in Reihe 13 ein Unterschied von max. rund 20 mS/m zwischen Tiefenbereich 0.5 m und 1.0 m ermitteln. Hingegen beträgt der Unterschied zwischen den Tiefenbereichen 1.0 m und 1.8 m nur rund 15 mS/m.

### 6.3.1.2 Vergleich EMI & ERT

Ein geoelektrisches Profil wurde mit einem Elektrodenabstand von 4 m entlang Reihe 13 gelegt (siehe Tabelle 4: Messprotokoll).

Das beste Inversionsergebnis des bearbeiteten Datensatz (Gleichstrommethode) wurde mit folgenden Werten für den relativen und absoluten Fehler erhalten:

Rel. Fehler [%]	Abs. Fehler [ $\Omega$ ]	Smoothing X:Y	data RMS
3	0.01	1:1	0.9955

Abbildung 41 zeigt für Reihe 13 den Vergleich von der EMI-Auswertung am 24.02.2017 und den elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses in Tiefe 0.5 und 1.5 m.

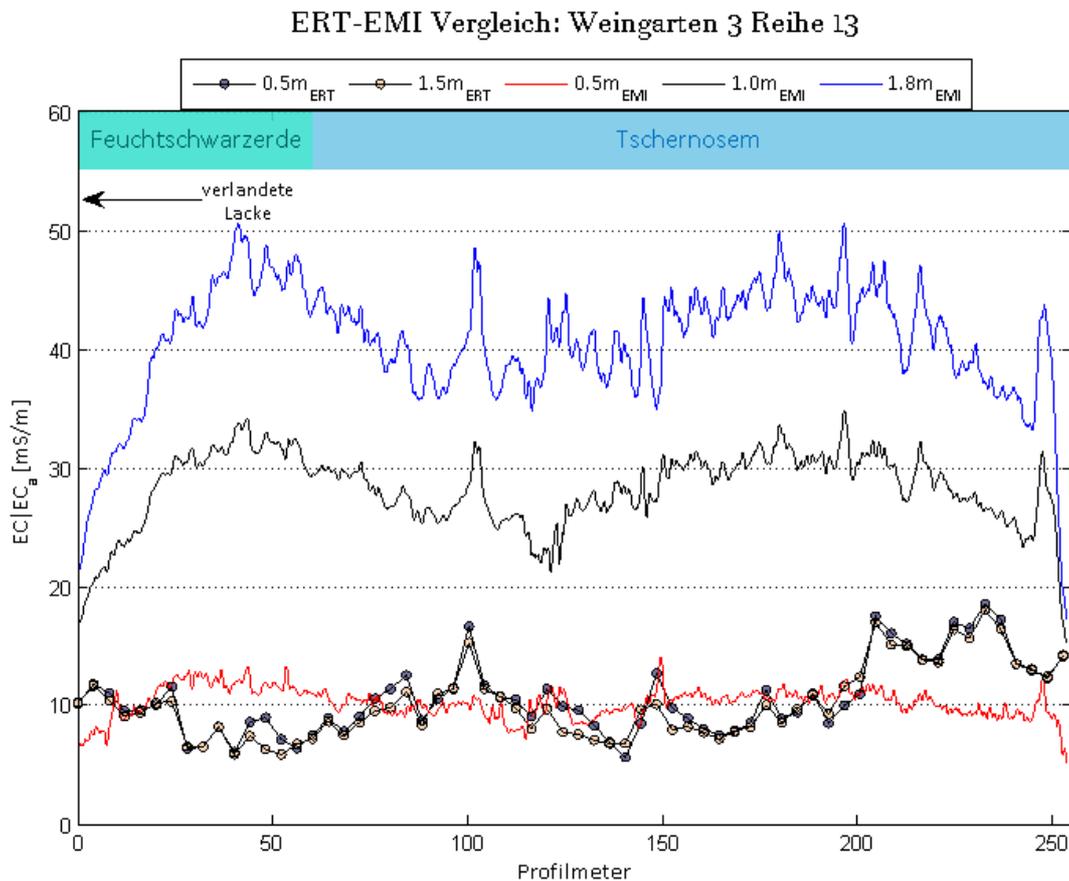


Abbildung 41: Vergleich von EMI und ERT (Weingarten 3, Reihe 13)

Bei dem Vergleich von ERT und EMI lässt sich im Großen und Ganzen ein ähnlicher Verlauf der Leitfähigkeit entlang der Reihe feststellen. Eine Ausnahme stellt hierbei jedoch der Profilanfang (bis Profilmeter 90) dar. Während es bei der EMI zu einer Zunahme der Leitfähigkeit in den ersten 50 m und danach bis Profilmeter 100 zur Abnahme kommt, kann man bei der ERT zuerst eine Abnahme bis Profilmeter 50 und danach eine Zunahme bis Profilmeter 100 der elektrischen Leitfähigkeit beobachten.

Während der Wertebereich der ERT in der Tiefe 0.5 m sehr gut mit dem der EMI-Auswertung des Tiefenbereichs 0.5 m übereinstimmt, lassen sich indessen sehr unterschiedliche Wertebereiche für die elektrischen Leitfähigkeiten (ERT: 6 – 18 mS/m) in der Tiefe 1.5 m und den scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten in dem Tiefenbereich 1.8 m (EMI: 17 – 50 mS/m) ermitteln.

### 6.3.2 Analyse

Berücksichtigt man, dass in den äußersten Reihen (Reihe 1 und Reihe 19) der Metallfluss geringer ausfiel als in den anderen Reihen, kann man quer zum Weingarten (siehe Abbildung 39, 40) einen relativen konstanten Verlauf der Leitfähigkeit wahrnehmen und somit annehmen, dass es quer zu keinen großartigen Änderungen der Bodeneigenschaften kommt.

Auch entlang des Weingarten (siehe Abbildung 40, 41) kommt es zwar zu kleineren Zu- und Abnahmen der Leitfähigkeit (ca. 5 – 10 mS/m), doch Bereiche, in denen Anomalien auftreten, können nicht erfasst werden.

Abbildung 41 zeigt, dass entlang des Weingartens die Bodentypen Feuchtschwarzerde und Tschernosem auftreten. Hierbei lässt sich jedoch nicht wirklich eine Abgrenzung der beiden Bodentypen in den EMI- und ERT-Daten erkennen. Beide Bodentypen entstanden aus Materialien wie Löss, wobei die Feuchtschwarzerde bei der Entstehung grundwasserbeeinflusst war (vgl. Husz 1965: 158-159). Doch wie auch bei den anderen Weingärten zuvor, kann man darauf schließen, dass die Zunahmen/Abnahmen entlang des Weingartens durch Erhöhungen/Verringerungen des Tongehaltes verursacht werden.

Für den Anstieg der Leitfähigkeit mit der Tiefe können/kann wiederum ein höherer Tongehalte und/oder eine höhere Sättigung der Poren mit versalztem Wasser (verlandete Lacke) in den tieferen Schichten verantwortlich gemacht werden.

Für die elektrischen Leitfähigkeiten von 6 mS/m (Minimum, ERT in 0.5 m Tiefe) und 18.6 mS/m (Maximum, ERT in 0.5 m Tiefe) lassen sich nun mittels Regressionsfunktion Tonanteile von 2 % und 23 % berechnen.

Ein Tonanteil von 2 % würde eine Einteilung als leichter Boden (Sandanteil > 50 %, Sandboden) oder als mittelschwerer Boden (Schluffanteil > 50 %, Schluffboden) bedeuten.

Bei einem Tonanteil von 23 % lege ein mittelschwerer Boden (Lehmboden, Schlufflehm) vor.

Wie schon zuvor erwähnt, sind im Normalfall mittelschwere Böden (hoher Mittelporenanteil) ideal für das gesunde Anwachsen einer Pflanze. Bei leichten Böden können jedoch bei sporadischen Regenfällen aufgrund einer unzureichenden Wasser- und Nährstoffversorgung Wachstumsstörungen auftreten.

Da jedoch die Bodentypen Tschernosem und Feuchtschwarzerde entlang des Weingartens auftreten, welche auf Materialien wie Löss (schluffhaltig) entstanden sind und einen hohen Humusgehalt (Mittelporen) aufweisen (Husz 1965: 158-159), kann man annehmen, dass der Weingartenboden eher zu einem mittelschweren Boden (Schluffanteil > 50 %) zählt.

Dies würde daher keinerlei Probleme für den Blauen Zweigelt im Weingarten 3 bedeuten.

Diese Annahme trifft auch mit der Aussage von Herrn Lang überein. Dieser konnte

nämlich keinerlei Probleme im Weingarten feststellen und meinte, dass die Qualität und Quantität der Ernte sehr gut sei.

Wie schon zuvor, wird im Nachhinein auch der Tongehalt mit  $EMI_{0.5\text{ m}}$  berechnet. Dabei kann ein Boden mit einem Tongehalt von min. 5 % (8 mS/m) entweder als ein leichter (lehmiger Sand, Sandanteil > 50 %) oder als ein mittelschwerer Boden (Schluffboden, Schluffanteil > 50 %) klassifiziert werden. Einen Tongehalt von 15 % (14 mS/m  $\rightarrow$  max.  $EMI_{0.5\text{ m}}$ ) ordnet man einem mittelschweren Boden (sandiger Lehm, Schlufflehm) zu.

## 6.4 Weingarten 4

### 6.4.1 Auswertungen

#### 6.4.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)

Für Weingarten 4 (siehe Tabelle 5: Messprotokoll) wird zuerst in Abbildung 42 die Auswertung des 14.01.2017 (vertikale Dipolstellung) gezeigt. Weiteres werden in Abbildung 43 die Auswertungen der Messtage 14.01.2017, 21.01.2017 und 18.08.2017 (Reihe 2) miteinander verglichen.

Abbildung 42 zeigt einen relativ ähnlichen Verlauf der Leitfähigkeit in allen 4 Reihen. Jedoch sind die Leitfähigkeiten der Reihe 1 und Reihe 4 in den Tiefenbereichen 1.0 und 1.8 m um ca. über 10 mS/m kleiner als in Reihe 2 und Reihe 3. Hier sollte wieder erwähnt werden, dass sich neben Reihe 1 ein Feld befindet (einseitige Beeinflussung des Rankensystems) und links neben Reihe 4 ein alter Weingarten ausgesetzt wurde (Holzpfähle).

Den Höchstwert von 48 mS/m (Tiefenbereich 1.8 m) kann in der ersten Hälfte des Weingartens in Reihe 3 erfasst werden.

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 4 am 14.01.2017

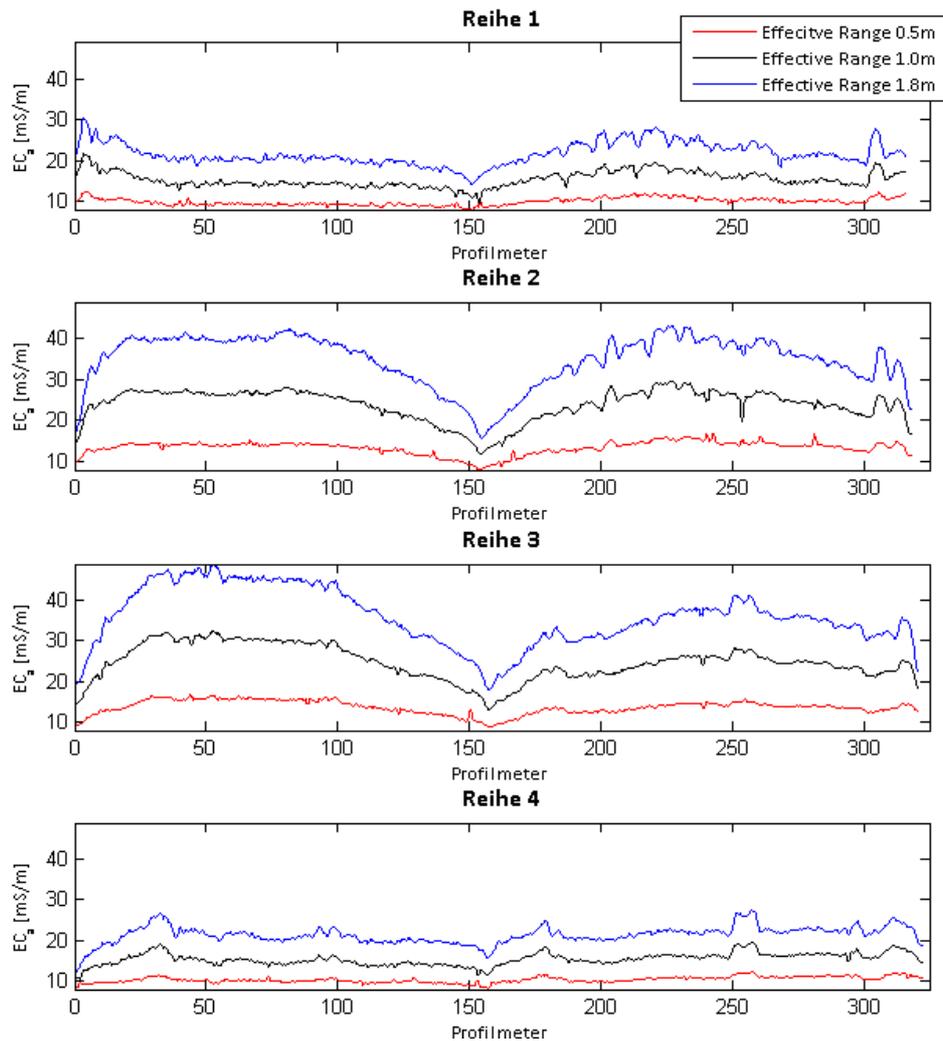


Abbildung 42: Line Plots des Weingartens 4 (vertikale Dipolstellung)

Der Verlauf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit entlang des Weingartens lässt sich wie folgt beschreiben: Zuerst kommt es zu einer sprunghaften Zunahme (fast 20 mS/m für Tiefenbereich 1.8 m Reihe 2) der Leitfähigkeit am Anfang des Weingartens. Wie lange der Bereich der Erhöhung ist, hängt von der Reihe ab. Während in Reihe 1 bereits nach wenigen Profilmeter das lokale Maximum erreicht wird, erlangt man dies in den übrigen Reihen erst nach ca. 30 m und mehr (Profil 3). Nachdem das lokale Maximum erreicht wurde, lässt sich eine sehr langsame Abnahme der Leitfähigkeit feststellen, die dann ab Profilmeter 100 vor allem in Reihe 2 und Reihe 3 steiler wird.

Bei ca. Profilmeter 150 wird in allen vier Reihen ein lokales Minimum erreicht. Nach Profilmeter 150 kommt es dann wieder zum Anstieg der Leitfähigkeit im Wertebereich vor der steilen Abnahme. Am Profilende ( $\sim 310$  m) kann man erneut, vor allem in Reihe 2 und Reihe 3, eine sprunghaft Verringerung der Leitfähigkeit ausmachen. Würde man den Weingarten also bei etwa 150 m teilen, kann entlang der zwei Hälften ein gleicher Verlauf beobachtet werden (symmetrisch).

Hierbei sollte noch die 60 m lange Auslassung des Rankensystems in der ersten Weingartenreihe ab Profilmeter 90 erwähnt werden und den damit teilweise fehlenden metallischen Einfluss auf die Messung in Reihe 1 und Reihe 2. In diesem Bereich (90 bis 150 m) findet in allen Reihen eine Abnahme der Leitfähigkeit statt (Reihe 2 und Reihe 3: steile Abnahme).

Abschließend lässt sich erneut eine Zunahme der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe erfassen.

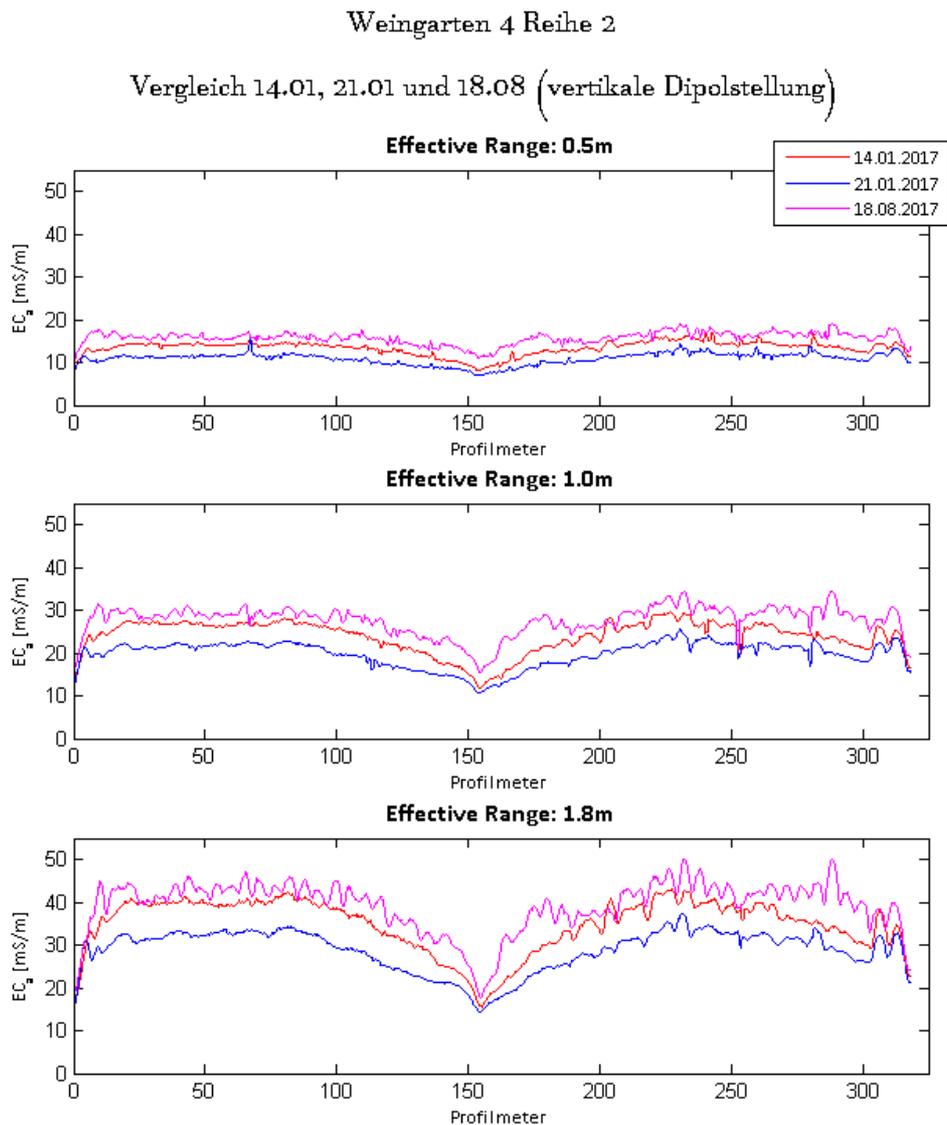


Abbildung 43: Vergleich von 14.01., 21.01. und 18.08. (Weingarten 4)

Beleuchtet man in Abbildung 43 die Änderungen der Leitfähigkeit an den drei Mess-tagen in Reihe 2 genauer, lässt sich feststellen, dass der Boden in allen drei Tiefen-bereichen am 21.01 deutlich widerstandsfähiger (beinahe 10 mS/m weniger im Tiefen-bereich 1.0 und 1.8 m) war als an den anderen beiden Tagen. Am 14.01 und am 18.08 konnten ähnliche Leitfähigkeiten gemessen werden, wobei diese am 18.08. um eine Spur höher (max. 5 mS/m) waren.

### 6.4.1.2 Vergleich EMI & ERT

Ein geoelektrisches Profil wurde mit einem Elektrodenabstand von 5 m am 23.3.2017 in Reihe 2 aufgebaut. Genauere Details findet man im Messprotokoll des Weingartens 4 (siehe Tabelle 5).

Das beste Inversionsergebnis des bearbeiteten Datensatzes (Gleichstrommethode) wurde mit folgenden Werten für den relativen und absoluten Fehler erhalten:

Rel. Fehler [%]	Abs. Fehler [ $\Omega$ ]	Smoothing X:Y	data RMS
3	0.01	1:1	0.9989

Abbildung 44 präsentiert nun den Vergleich von elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses (ERT) der Tiefe 0.5 und 1.5 m mit der EMI-Auswertung (14.01.2017, vertikale Dipolstellung).

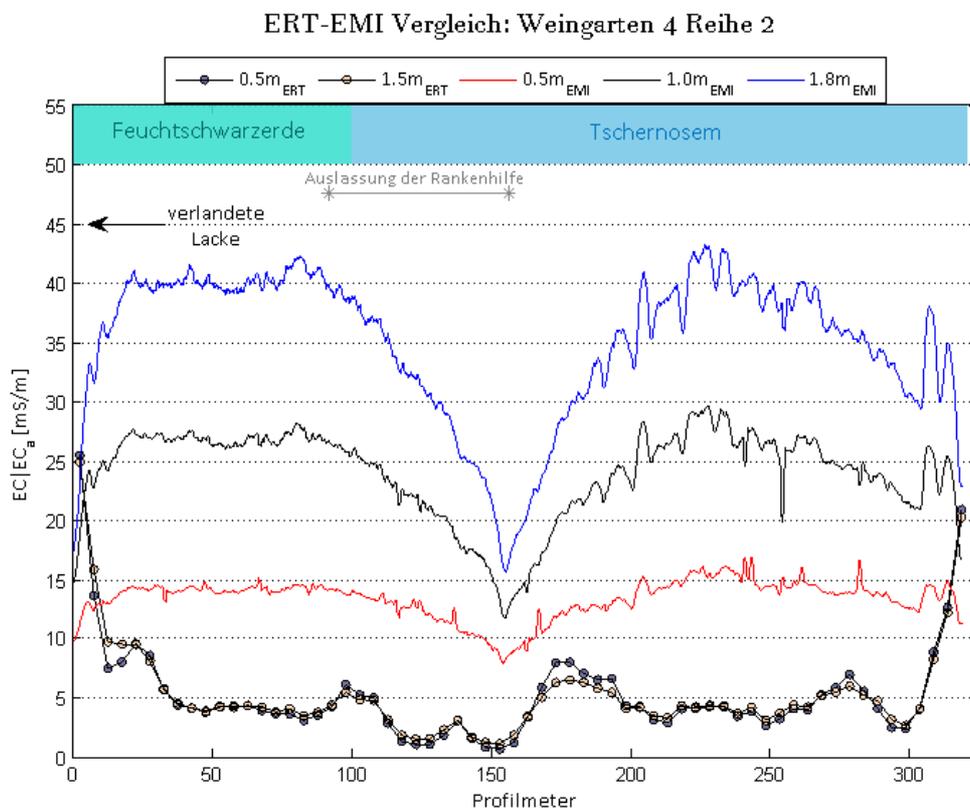


Abbildung 44: Vergleich EMI und ERT (Weingarten 4)

Bis auf dem Profilanfang (bis ca. 10 m) und dem Profilende (ab 300 m) stimmt der Verlauf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (EMI) in den drei Tiefenbereichen gut mit dem, der elektrischen Leitfähigkeit des Inversionsergebnisses (ERT), überein. Werden die Werte am Profilanfang und am Profilende im Inversionsergebnis nicht berücksichtigt, liegt der Wertebereich der elektrischen Leitfähigkeit bei ca. 1.2 bis 9 mS/m (sowohl Tiefe 0.5 und 1.5 m). Im Gegensatz dazu befinden sich zum Beispiel die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des Tiefenbereichs 0.5 m in einem Wertebereich von ca. 10 bis 15 mS/m.

tebereich von 8 bis 17 mS/m. Weiteres nehmen die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des Tiefenbereichs 1.8 m Werte von 16 bis 43 mS/m an.

Daher sind in der Regel die Werte der Leitfähigkeit im Inversionsergebnis (ERT) kleiner als in der EMI-Auswertung.

Jedoch kommt es wie schon vorher angemerkt am Profilanfang und Profilende zu einer Ausnahme.

Am Profilanfang kann im Inversionsergebnis ein Wert von 25 mS/m erfasst werden (höherer Wert als  $EMI_{1.0\text{ m}}$ ) und in den ersten 10 m lässt sich dann eine sprunghafte Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit beobachten bis der vorher erwähnte Wertebereich (1.2 – 9 mS/m) angenommen wird. Ab ca. 300 m kommt es im Inversionsergebnis zu einer sprunghaften Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit. Am Profilende kann dann im Inversionsergebnis ein Wert von ca. 20 mS/m erfasst (höherer Wert als  $EMI_{1.0\text{ m}}$ ) werden.

Die EMI-Auswertung zeigt im Gegensatz dazu ein umgekehrtes Verhalten der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit im Anfangsbereich (Zunahme) und Endbereich (Abnahme) des Weingartens.

Abschließend sollte man noch genauer den Bereich von 90 bis 150 m betrachten. Hier befindet sich nämlich in der ersten Weingartenreihe (zwischen Reihe 1 und Reihe 2) eine 60 m lange Auslassung des Rankensystems, um den Traktor eine Durchfahrt zu ermöglichen.

Wie bereits bei der Auswertung des CMD Mini-Explorers erwähnt, würde die steile Abnahme mit dem nicht vollen metallischen Einfluss erklärbar sein. Und auch im Inversionsergebnis der Gleichstrommethode lässt sich in diesem Bereich um ca. 4 mS/m geringere Leitfähigkeiten (Minimum) beobachten. Ob die Gleichstrommethode von der einseitigen Auslassung beeinflusst wurde oder ob sich zufälligerweise gerade in diesem Bereich die Bodeneigenschaften ändern, lässt sich nicht feststellen.

## 6.4.2 Analyse

Da sich in allen vier Reihen ein ähnlicher Verlauf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit registrieren lässt und mit der Annahme, dass die über 10 mS/m niedrigeren Werte (Tiefenbereich 1.0 und 1.8 m) in Reihe 1 und Reihe 4 wegen der unterschiedlichen Beeinflussung von metallischen Objekten herrührt, kann auf gleichbleibende Bodeneigenschaften quer zum Weingarten geschlossen werden. Dies würde sich auch mit Abbildung 25 decken. Denn in dieser lässt sich feststellen, dass sich die Bodentypen quer zu den Weingartenreihen nicht ändern.

Berücksichtigt man bei der Analyse der EMI-Auswertung (siehe Abbildung 42 & 44) die sprunghafte Erhöhung/Verminderung der Leitfähigkeit (20 mS/m in Reihe 2 & 3) am Anfang/Ende durch den nicht vollständigen Einfluss des Rankensystems auf den CMD Mini-Explorer und nimmt man an, dass die Abnahme (20 mS/m in Reihe 2 & 3)

der Leitfähigkeit bei Profilmeter 90 größtenteils durch die Auslassung des 60 m langen Rankensystems verursacht wurde, kann ein recht konstanter Verlauf der Leitfähigkeit (nur wenige mS/m Variationen) in allen Tiefenbereichen entlang des Weingartens ausgemacht werden, was in guter Übereinstimmung mit der Auswertung des Inversionsergebnisses der Gleichstrommethode steht.

Entlang des Weingartens findet man Feuchtschwarzerde und Tschernosem (siehe Abbildung 44). Die beiden Bodentypen sind sich in ihren Eigenschaften sehr ähnlich, humusreich und aus Materialien wie Löss entstanden.

Anhand der EMI/ERT und der vorkommenden Bodentypen kann man daher folgern, dass sich die Bodenart (Ton Gehalt) auch entlang des Weingartens nicht sonderlich stark ändert.

Die Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe (vor allem EMI) kann wieder durch einen höheren Tongehalt und/oder durch eine höhere Sättigung der Poren mit versalztem Bodenwasser (verlandete Lacke, Abbildung 44) in den tieferen Schichten erklärt werden.

Mittels Regressionsfunktion kann für die elektrische Leitfähigkeit von 9 mS/m (max. Wert in  $ERT_{0.5m}$  ohne Profilanfang & -ende) ein max. möglicher Tonanteil von 7 % berechnet werden.

Mit diesem Tonanteil kann der Weingartenboden nach Abbildung 1 entweder als leichter (Sandanteil > 50 %, lehmiger Sand) oder auch als mittelschwerer (Schluffanteil > 50 %, Schluffboden) Boden eingestuft werden.

Wie schon in Weingarten 2 und 3 erwähnt, können leichte Böden aufgrund des hohen Grobporenanteils (hohe Wasserleitfähigkeit) Probleme für die Pflanze bedeuten. Aufgrund der vorkommenden Bodentypen (Feuchtschwarzerde & Tschernosem) und der Beobachtung von Herr Pilles, dass sporadische Niederschläge keine Auswirkungen auf die Pflanzengesundheit haben, deutet dies eher auf einen mittelschweren Boden hin.

Dies führt schließlich zur Annahme, dass Weingarten 4 ein recht guter Standort zum Anwachsen des Chardonnays ist.

Nach Aussagen des Weinbauers können jedoch in der ersten Hälfte (ca. bis Profilmeter 150) Wachstumsstörungen der Reben beobachtet werden. Die zweite Hälfte des Weingartens bringt jedoch hervorragende Trauben hervor.

Da sowohl die erste Hälfte als auch die zweite Hälfte des Weingartens in den oberflächennahen Schichten einen ähnlichen Verlauf der Leitfähigkeit (EMI & ERT) zeigen, kann anhand der Leitfähigkeit nicht auf die mögliche Ursache geschlossen werden, warum der Chardonnay die zweite Hälfte des Weingartenbodens bevorzugt.

Nachdem der Chardonnay kalkhaltige Böden bevorzugt, wäre eine unzureichende Kalkversorgung in der ersten Hälfte des Weingartens eine mögliche Begründung.

Eine Fürsprache für diese Annahme wäre die Karte des Kalkgehaltes (bezogen auf

Weinbau) in diesem Bereich, welche von der Boku und der Vereinte Winzer Pannonien & AG Redl basierend auf der Österreichischen Digitalen Bodenkarte (ebod) auf der Website <http://www.wein-terroir.at/> zur Verfügung gestellt wird. Abbildung 45 zeigt nun einen Ausschnitt dieser Karte mit dem eingezeichneten Weingarten 4.



Abbildung 45: Ausschnitt aus Karte des Kalkgehaltes des Unterbodens (AG Redl & Boku Wien; Datengrundlage: Digitale Bodenkarte von Österreich, BFW)

Der Weingarten 4 wurde in der Abbildung 45 als weißer Pfeil eingezeichnet. Der hellgrüne Bereich, in dem die erste Hälfte des Weingartens (Anfang) liegt, wird als schwach kalkhaltig (2-10 %, Klassifizierung durch AG Redl & Boku Wien) eingestuft. Im Gegensatz dazu wird die zweite Hälfte als sehr kalkreich (25 - 50 %) klassifiziert.

Berechnet man im Nachhinein auch den Tongehalt mit der  $EMI_{0,5\text{ m}}$ , lässt sich der Weingartenboden mit einem Tongehalt von circa 17 % (15 mS/m) zu den mittelschweren Böden (sandiger Lehm oder Schlufflehm) zählen.

Vor der Analyse des Vergleichs der drei Messtage (siehe Abbildung 43) entnimmt man die Temperaturen, die während der Messung herrschten, aus Tabelle 5. Am 14.01.2017 konnte folglich eine Temperatur von etwa 5 °C gemessen werden. Eine Woche später, also am 21.01, belief sich die Temperatur während der Messung nur auf -5 °C. Daher etwa 10 °C Unterschied.

Wie bereits erwähnt würde ein Temperaturunterschied von 40° C beinahe zur Verdoppelung der elektrischen Leitfähigkeit führen.

Das würde also bedeuten, dass sich z.B. die 30 mS/m in Tiefenbereich 1.8 m (häu-

figster Wert) am 21.01.2017 auf  $\sim 37.5$  mS/m am 14.01.2017 erhöhen. Dies steht auch relativ gut mit dem tatsächlich beobachteten Wert von etwa 40 mS/m am 14.01.2017 im Einklang. Dabei lässt sich der etwas größere beobachtete Unterschied auch einfach dadurch erklären, dass am 21.01. den ganzen Tag Minustemperaturen herrschten und somit das Bodenwasser teilweise gefroren (hohe Viskosität  $\rightarrow$  siehe Kapitel 3.2 Einflussfaktoren auf die elektrische Leitfähigkeit) war.

Im Vergleich dazu konnte im Sommer (18.08) während der Messung eine Temperatur von etwa  $33$  °C gemessen werden. Dies würde in etwa zum 14.01. einen Temperaturunterschied von  $20$  °C entsprechen.

Somit würde sich z.B. die am 14.01. beobachteten 15 mS/m für den Tiefenbereich 0.5 m auf 22.5 mS/m erhöhen. Tatsächlich konnten am 18.08. jedoch nur eine Erhöhung von gerade einmal 3 mS/m (18 mS/m) für den Tiefenbereich 0.5 m festgestellt werden.

Wie bereits in Weingarten 2 erwähnt, könnte die zu kleine Differenz der Leitfähigkeiten am 14.01. und 18.08. auf eine höhere Sättigung der Poren (höherer Grundwasserstand, Regen zuvor) am 14.01 zurückzuführen sein.

## **6.5 Weingarten 5**

### **6.5.1 Auswertung**

#### **6.5.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)**

In Abbildung 46 wird für den 27.01.2017 (vertikale Dipolstellung) die Auswertung des Weingartens 5 präsentiert.

Zu Beginn lässt sich in Abbildung 46 in allen drei Reihen sowohl ein übereinstimmender Wertebereich (Tiefenbereich 1.8 m: 8 – 35 mS/m) als auch ein ähnlicher Verlauf der Leitfähigkeit entlang des Weingartens in allen 3 Tiefenbereichen beobachten.

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 5 am 27.01.2017

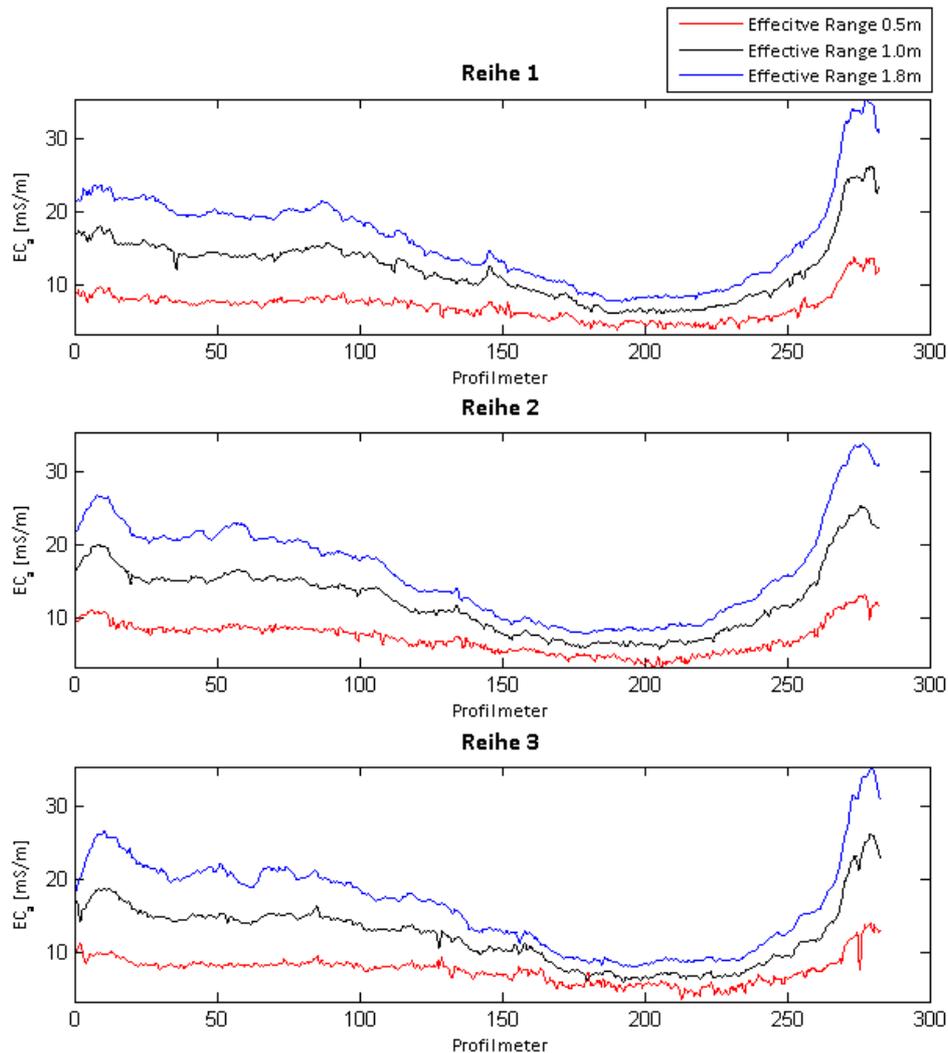


Abbildung 46: Lineplots des Weingartens 5 (vertikale Dipolstellung)

Entlang des Weingartens lässt sich der Verlauf der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit wie folgt beschreiben:

In den ersten 100 m kommt es zu einer sehr langsamen Reduktion der Leitfähigkeit, wobei sich die Leitfähigkeit in diesem Abschnitt um insgesamt 5 mS/m (Tiefenbereich 1.0 & 1.8 m) verringert. Ab Profilmeter 100 wird die Abnahme deutlich steiler (insgesamt weitere 10 mS/m). Nach 80 m (Profilmeter 180) nimmt die Leitfähigkeit dann in allen Tiefenbereichen die niedrigsten Werte entlang des Weingartens an und verläuft bis ca. Profilmeter 230 relativ konstant. In diesem 50 m langen Bereich lässt sich z.B. für den Tiefenbereich 1.8 m ein Wertebereich von ca. 8 bis 11 mS/m ausmachen.

Ab 230 m lässt sich anschließend eine sprunghafte Zunahme der Leitfähigkeit beobachten, wobei kurz vor Profilmeterende die Höchstwerte der Leitfähigkeit (Tiefenbereich 1.8 m: 35 mS/m) in allen drei Tiefenbereichen registriert werden können.

Interessanterweise ist im Vergleich zu den anderen bisherigen Weingärten die Zu-

nahme/Abnahme am Profilanfang/-ende aufgrund des nicht vollen Einflusses des Rankensystems auf den CMD Mini-Explorer deutlich geringer ausgeprägt. Grund dafür ist womöglich der in diesem Weingarten breitere Abstand der Rankensysteme zueinander.

Schließlich lässt sich wiederum eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe erfassen. Hierbei liegt die Leitfähigkeit von Tiefenbereich 0.5 m in einem Wertebereich von ca. 4 bis 14 mS/m. Für den Tiefenbereich 1.0 m lassen sich Werte von ca. 6 bis 26 mS/m registrieren. Hingegen reicht der Wertebereich der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit für den Tiefenbereich 1.8 m von 8 bis 35 mS/m.

### 6.5.1.2 Vergleich EMI & ERT

Ein geoelektrisches Profil wurde mit einem Elektrodenabstand von 4 m entlang Reihe 2 gelegt (siehe Tabelle 6: Messprotokoll).

Das beste Inversionsergebnis des bearbeiteten Datensatzes (Gleichstrommethode) wurde mit folgenden Werten für den relativen und absoluten Fehler erhalten:

Rel. Fehler [%]	Abs. Fehler [ $\Omega$ ]	Smoothing X:Y	data RMS
3	0.01	1:1	0.9976

Abbildung 47 zeigt für Reihe 2 den Vergleich der EMI-Auswertung am 27.01.2017 mit den elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses in Tiefe 0.5 und 1.5 m.

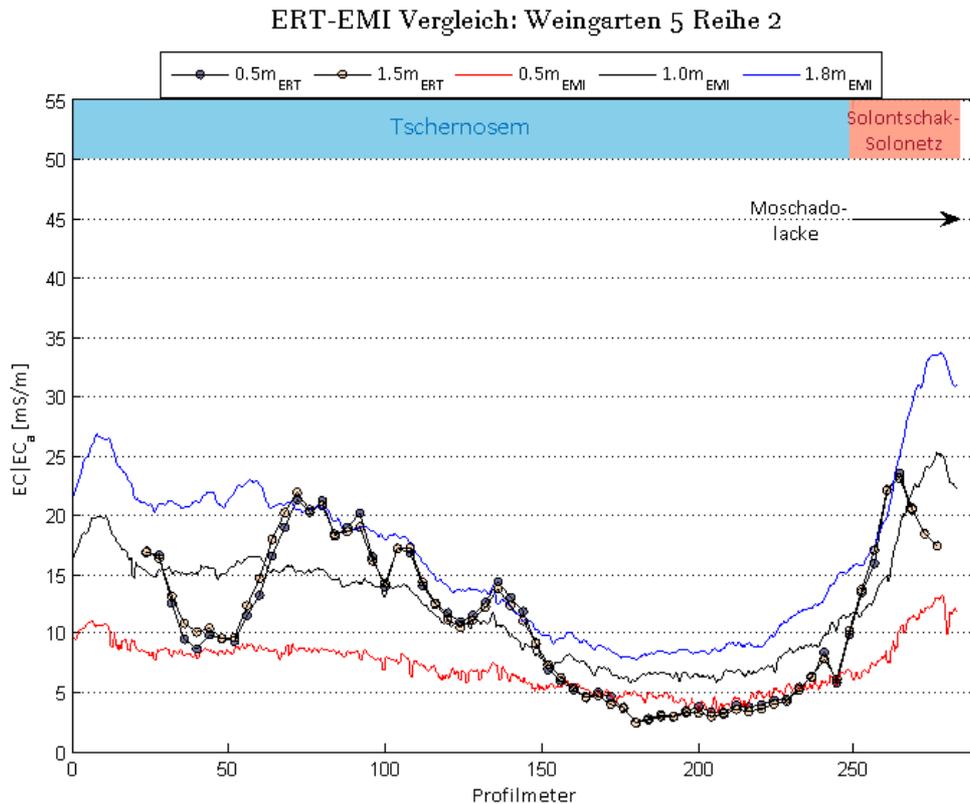


Abbildung 47: Vergleich EMI & ERT (Weingarten 5)

Bei dem Vergleich von ERT und EMI lässt sich weitgehend ein ähnlicher Verlauf der Leitfähigkeit entlang des Profils feststellen. Eine Ausnahme stellt hierbei jedoch der Abschnitt von 30 bis ca. 70 m dar. Während es bei der EMI in diesem Bereich zu einer sehr langsamen Abnahme der Leitfähigkeit kommt, lässt sich in der ERT bei Profilmeter 30 eine steile Abnahme (insgesamt 7 mS/m) der Leitfähigkeit ausmachen. Für 20 m bleibt diese dann recht konstant und nimmt schließlich steil um 12 mS/m zu.

Dieses Mal unterscheiden sich die Wertebereiche der elektrischen Leitfähigkeiten ( $ERT_{1.5m}$  : 3 – 23 mS/m) und der EMI-Auswertung des Tiefenbereichs 1.0 m (6 – 25 mS/m) und 1.8 m (8 – 35 mS/m) nicht allzu stark voneinander.

### 6.5.2 Analyse

Wie in Abbildung 46 zu sehen, lässt sich in den 3 Profilen des Weingartens 5 ein fast identischer Verlauf und Wertebereich der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit in den drei Tiefenbereichen ausmachen. Das führt zur Annahme, dass die Bodeneigenschaften relativ konstant quer zum Weingarten bleiben.

Entlang der Weingartenreihen sieht dies schon anders aus.

Hier lässt sich der Weingarten sowohl nach der EMI-Auswertung als auch nach der

ERT-Auswertung (Ausnahme Profilmeter 30 – 70, siehe Abbildung 47) in drei „Leitfähigkeitsbereiche“ teilen. Der etwas leitfähigere Abschnitt ( $EMI_{1.8\text{ m}} : 18 - 27 \text{ mS/m}$ ;  $ERT_{1.5\text{ m}} : 17 - 21 \text{ mS/m}$ ) befindet sich am Anfang des Weingartens und ist etwa 100 m lang. Danach kommt es zur Abnahme der Leitfähigkeit. Der zweite widerstandsfähige Bereich ( $EMI_{1.8\text{ m}} : 8 - 15 \text{ mS/m}$ ;  $ERT_{1.5\text{ m}} : 3 - 9 \text{ mS/m}$ ) lässt sich zwischen Profilmeter 150 und 250 erfassen. Danach kommt es zu einem rasanten Anstieg der Leitfähigkeit (ausgeprägter in der EMI). Am Profilende (ab 260 m) des Weingartens lässt sich dann der leitfähigste Bereich ( $EMI_{1.8\text{ m}} : 27 - 35 \text{ mS/m}$ ;  $ERT_{1.5\text{ m}} : 17 - 24 \text{ mS/m}$ ) ausmachen.

Wie in Abbildung 47 zu sehen, deckt sich der leitfähigste Bereich am Profilende des Weingartens mit dem Bereich der als Solontschak- Solonetz klassifiziert wurde. Der restliche Weingartenboden wurde als Tschernosem ausgewiesen.

Einerseits weist der Solontschak-Solonetz Boden und die Nähe zu der Moschadolacke (bis vor kurzem noch intakt) auf das Vorhandensein einer schluffigen Schicht („salzführenden Horizont“) hin, andererseits entstand der Bodentyp Tschernosem vor allem auf Materialien wie Sand und Löss (schluffhaltig). Zusätzlich konnte der Weinbauer am Ende des Weingartens bei heftigen Regenfällen beobachten, dass das Wasser steht und nicht in den Boden sickern kann (Stauässe).

So lässt sich nun anhand der EMI/ERT/Bodentypen folgern, dass das Weingartenende (ab ca. 260 m) den höchsten Tonanteil aufweist. Der Boden des Anfangsbereichs (bis Profilmeter ~100) besitzt vergleichsweise einen etwas geringeren Tongehalt. Zwischen Profilmeter 150 und 250 kann der niedrigste Tongehalt des Weingartens erfasst werden und der Boden in diesem Bereich verfügt somit über den höchsten Schluff- und/oder Sandanteil.

Betrachtet man nun die Erhöhung der Leitfähigkeit mit der Tiefe (siehe Abbildung 46 & 47), welche besonders stark in der EMI-Auswertung zu registrieren ist, kann einerseits eine Zunahme des Tonanteils mit der Tiefe dafür verantwortlich sein.

Andererseits weist die Nähe zur verlandeten Moschadolacke wieder auf eine Versalzung des Grundwassers hin.

Somit kann die Erhöhung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit mit der Tiefe auch durch eine Zunahme der Sättigung in den Poren mit salzreichem Bodenwasser verursacht werden.

Für die ERT kann man für den Anfangsbereich (bis 100 m) einen max. möglichen Tongehalt von 27 % (21 mS/m) berechnen, für den Abschnitt 150 bis 250 m einen von 7 % (9 mS/m) und für das Weingartenende einen von 32 % (24 mS/m).

Das würde bedeuten, dass der Boden am Anfangsbereich zu den mittelschweren Böden (Lehmboden, Schlufflehm) zählt.

Im Mittelbereich des Weingartens kann nach dem berechneten Tonanteil der ERT der Boden entweder als leicht (Sandanteil > 50 %, lehmiger Sand) oder als mittelschwer ( Schluffanteil > 50 %, Schluffboden) klassifiziert werden. Das Endstück lässt sich nach dem berechneten Tonanteil einem schweren Boden (toniger Lehm, toniger Schlufflehm) zuordnen.

Ein schwerer Boden bedeutet zwar, dass der Boden fähig ist viel Wasser zu speichern, jedoch steht der Pflanze nicht alles zur Verfügung (Totenwasser, siehe Kapitel 2). Dies bedeutet, dass es auch in schweren Böden zu Problemen in der Wasser- und somit auch in der Nährstoffversorgung der Pflanze kommen kann. Weiteres kann es bei tonhaltigen Böden zu einer ungenügenden Sauerstoffversorgung (Verdichtung) der Wurzeln kommen. Außerdem neigen schwere Böden bei Regenfällen zu Staunässe, die der Weinrebe ebenfalls nicht immer gut bekommt.

EMI/ERT/Bodentypen führen nun zur Annahme, dass das Weingartenende für den Blauen Zweigelt problematisch werden könnte.

Tatsächlich berichtet Herr Pilles von Wachstumsproblemen des Blauen Zweigelts am Ende des Weingartens. Ansonsten konnte er keine Probleme im Weingarten feststellen.

## **6.6 Weingarten 6**

### **6.6.1 Auswertung**

#### **6.6.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)**

Präsentiert wird in den Abbildungen 48 & 49 die Auswertung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit, welche am 4.02.2017 in vertikaler Dipolstellung in Weingarten 6 aufgenommen wurde.

Für einen besseren Überblick über die Leitfähigkeitsänderungen im Weingarten 6 ist zuerst ein Scatter Plot (siehe Abbildung 48) für die gesamte Auswertung erstellt worden. Abbildung 49 stellt dann nur die Datensätze für Reihe 2, 4, 9 und 13 detaillierter mittels Line Plots dar.

2D-Scatter Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 6 am 4.02.2017

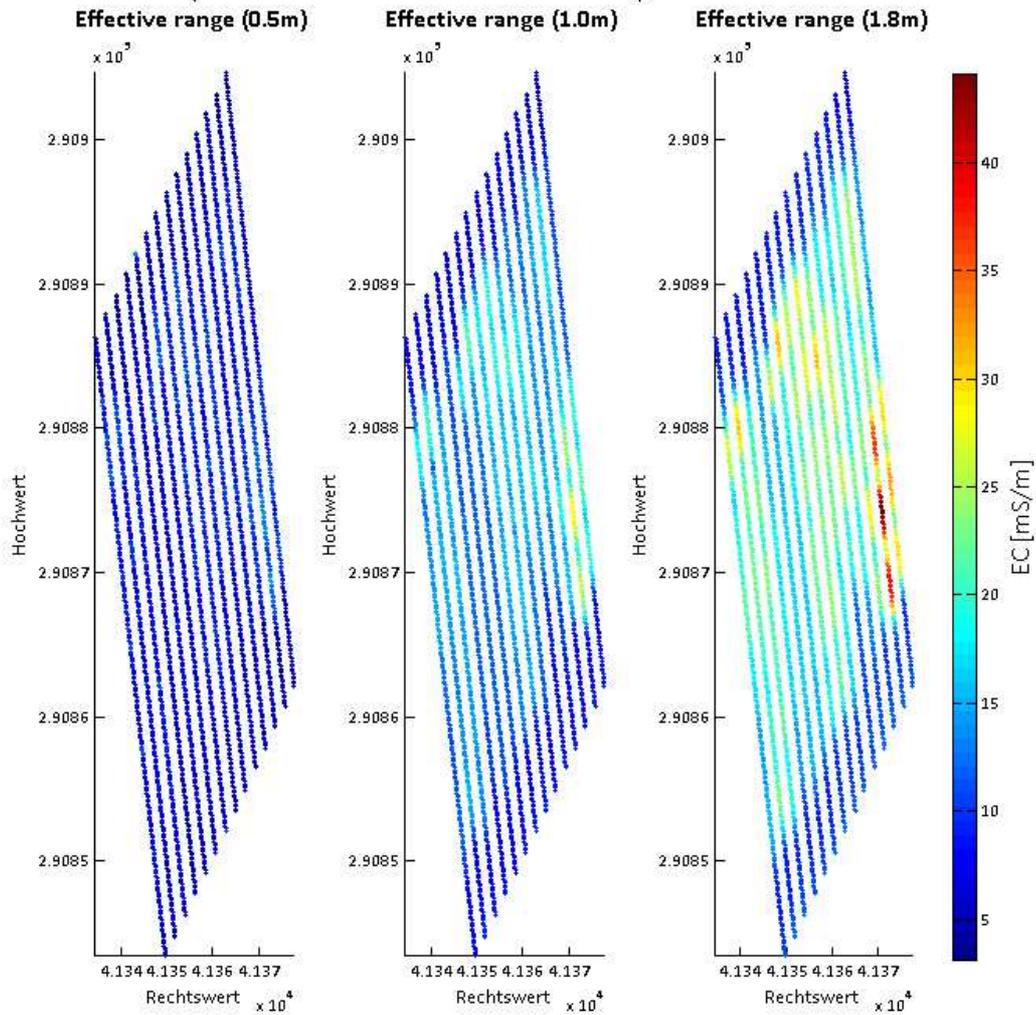


Abbildung 48: Scatter Plot des Weingartens 6 (vertikale Dipolstellung)

Abbildung 48 & 49 zeigen, dass in den einzelnen Reihen grundsätzlich ähnliche Wertebereiche der Leitfähigkeit für die jeweiligen Tiefenbereiche erfasst werden können. Jedoch unterscheiden sich bei einigen Reihen die Verläufe der Leitfähigkeit. Im Weingarten lassen sich nämlich stellenweise leitfähige Anomalien -besonders ausgeprägt im Tiefenbereich 1.8 m- feststellen. Diese Anomalien lassen sich in den ersten Reihen eher am Anfang des Weingartens erfassen. In den mittleren und letzten Reihen treten diese Anomalien dann eher am Ende des Weingartens auf.

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 6 am 4.02.2017

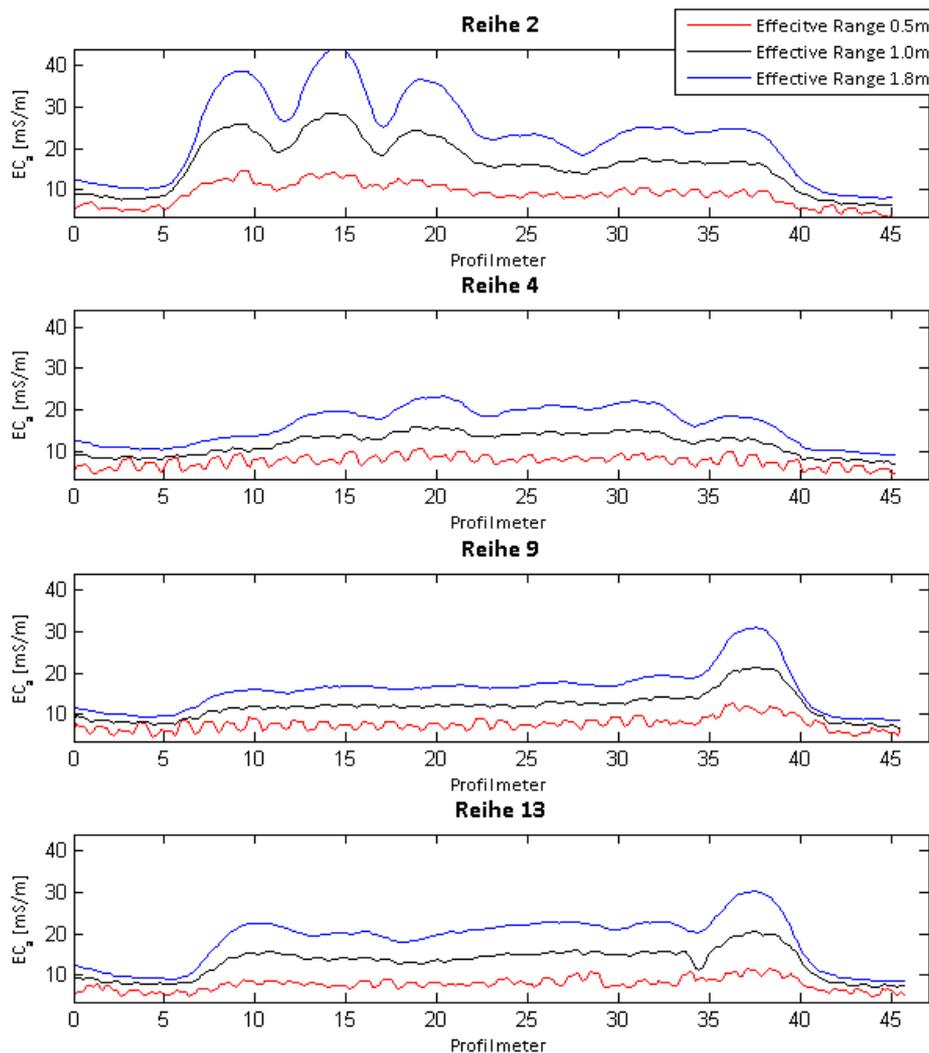


Abbildung 49: Line Plots des Weingartens 6 (vertikale Dipolstellung; Reihe 2, 4, 9 und 13)

Am Anfang/Ende der jeweiligen Profile lässt sich eine in etwa 10 mS/m (Tiefenbereich 1.8 m) Zunahme/Abnahme beobachten; vermutlich durch den nicht vollen Einfluss des Rankensystems.

Bis auf die vorher erwähnten Ausschläge nach oben (10 mS/m Tiefenbereich 1.8 m; etwa 5 m lang) verläuft die scheinbare elektrische Leitfähigkeit entlang des Weingartens (Mittelbereich: zwischen Profilmeter 5 bis 40) relativ konstant.

Für den Tiefenbereich 0.5 m lassen sich in etwa Werte von ca. 3 bis 15 mS/m ausmachen. Hingegen nehmen die Leitfähigkeiten im Tiefenbereich 1.0 m Werte von 5 bis 29 mS/m an und die des Tiefenbereichs 1.8 m liegen in einem Wertebereich von 7 bis 44 (Reihe 5) mS/m.

Außerdem kann in allen Reihen eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe beobachtet werden.

## 6.6.2 Analyse

Ohne das stellenweise Auftreten von Anomalien ( $\sim 10$  mS/m, siehe Abbildung 49) würde die Leitfähigkeit sowohl quer als auch entlang des Weingartens relativ konstant verlaufen. Ohne Berücksichtigung dieser Anomalien führt das zur Annahme, dass sich die Bodenzusammensetzung im Weingarten sowohl quer als auch längs zu den Weingartenreihen nicht sonderlich ändert.

Dies wird insofern durch den Besitzer Pilles Michael bestätigt, indem er den gesamten Weingartenboden als „schwarzen Sand“ (humusreicher sandiger Boden) bezeichnet.

Die auftretenden Anomalien können natürlich auf eine Zunahme des Tongehaltes zurückzuführen sein. Die Ausschläge sehen jedoch überall im Weingarten fast gleich aus ( $\sim 10$  mS/m Zunahme,  $\sim 5$  m lang) und machen daher eine andere Ursache für die Erhöhung der Leitfähigkeit wahrscheinlicher. Welche Ursache das genau ist, konnte nicht festgestellt werden.

Die Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe kann wieder durch einen höheren Tongehalt und/oder durch eine höhere Sättigung der Poren mit versalztem Bodenwasser (intakte Lange Lacke) in den tieferen Schichten erklärt werden.

Da der Weingarten sehr klein ist ( $\sim 45$  m) hat man sich entschieden keine Messung mit dem geoelektrischen Verfahren (ERT, IP) durchzuführen und somit fehlt uns sowohl die Kontrolle der EMI als auch Werte für die elektrische Leitfähigkeit, mit denen der Tongehalt mittels Regressionsfunktion berechnet werden kann.

Um trotzdem den Weingartenboden klassifizieren zu können, wird nun der Tongehalt mit dem max. Wert der  $EMI_{0.5\text{ m}}$  berechnet. Hier soll jedoch wieder angemerkt werden, dass eine Messung bei kleiner Induktionszahl aufgrund der metallischen Objekte nicht gewährleistet ist und es sich bei den scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des CMD Mini-Explorers vermutlich um falsche Werte (falsche Anwendung der Formel 6) handelt.

Mit einer scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit von 10 mS/m lässt sich ein Tongehalt von 8.6 % berechnen. Dieser Tonanteil würde man sowohl in leichten (Sandanteil  $> 50$  %, lehmiger Sand) als auch in mittelschweren Böden (Schluffanteil  $> 50$  %, Schluffboden) vorfinden.

In Bezug auf die Pflanzengesundheit könnte es bei leichten Böden zu Problemen bei der Wasser- und Nährstoffversorgung kommen.

Da der Weingartenboden in Abbildung 25 keinem Bodentyp zugeordnet wurde und der Weinbauer den Boden zugleich als humusreich und sehr sandig bezeichnet hat, kann man nicht sagen, ob nun der Grobporenanteil oder der Mittelporenanteil im Weingarten überwiegt.

Anhand der Analyse der EMI kann man also nur folgern, dass, wenn der Weingartenboden einen Sandanteil von über 50 % aufweist, dies sehr wohl bei sporadischen Re-

genfällen problematisch für den Bouvier sein könnte. Überwiegt der Schluffanteil wäre im Normalfall die Wasser-, Sauerstoff- und Nährstoffversorgung für den Bouvier gesichert.

Nach Aussagen des Weinbauers wachsen die Weinreben hervorragend und er konnte bis jetzt keine Probleme im Zusammenhang mit dem Weingartenboden feststellen.

## 6.7 Weingarten 7

### 6.7.1 Auswertungen

#### 6.7.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)

2D-Scatter Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 7 am 29.08.2017

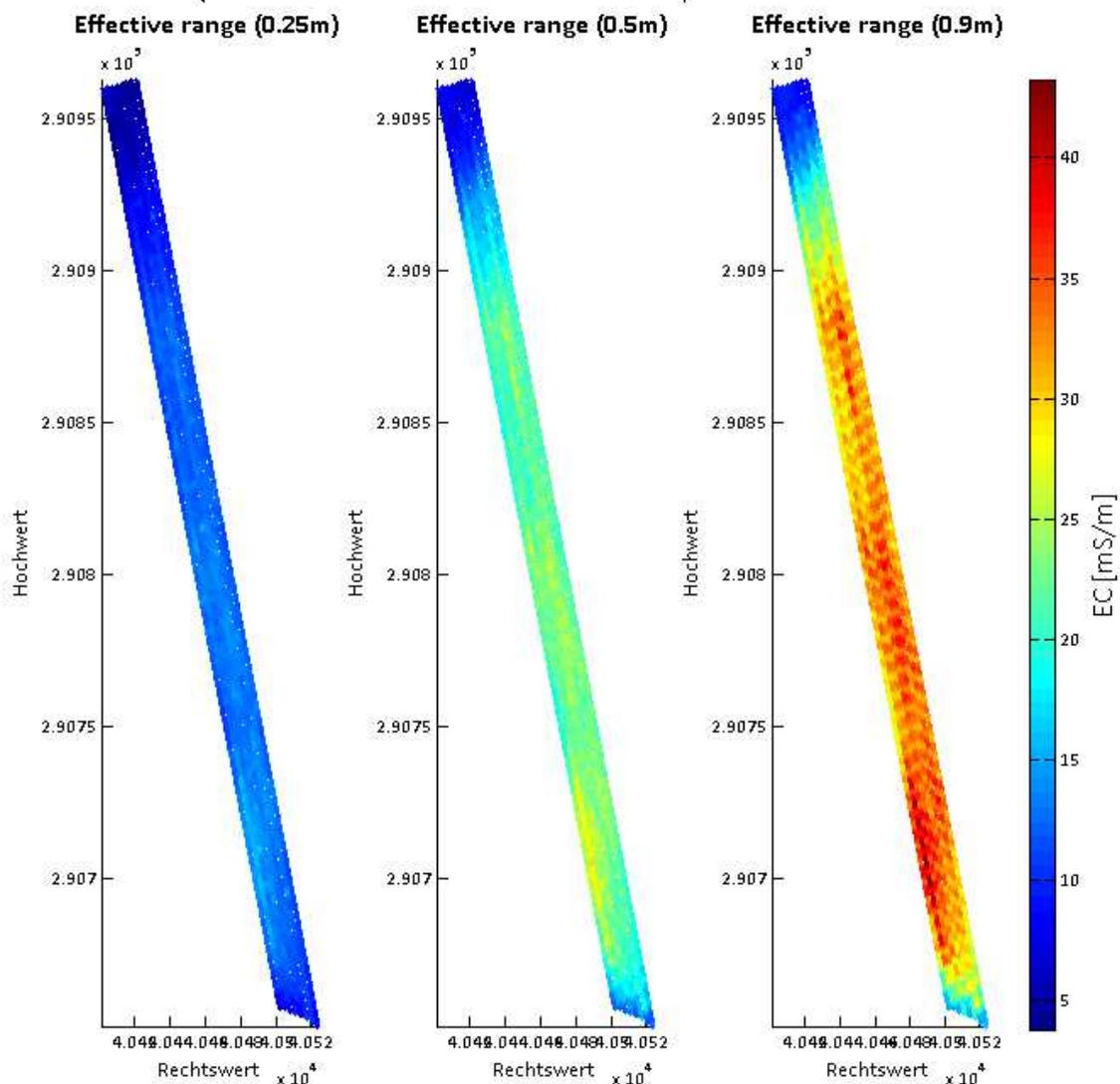


Abbildung 50: Scatter Plot des Weingarten s 7 (horizontaler Dipolstellung)

Präsentiert wird in den Abbildungen 50 & 51 die Auswertung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit, welche am 29.08.2017 in horizontaler Dipolstellung in Weingarten 7 aufgenommen wurde.

Für einen besseren Überblick über die Leitfähigkeitsänderungen im Weingarten 7 ist zuerst ein Scatter Plot (siehe Abbildung 50) für die gesamte Auswertung erstellt worden. Abbildung 51 stellt dann nur die Datensätze für Reihe 2, 3, 5 und 7 detaillierter mittels Line Plots dar.

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 7 am 29.08.2017

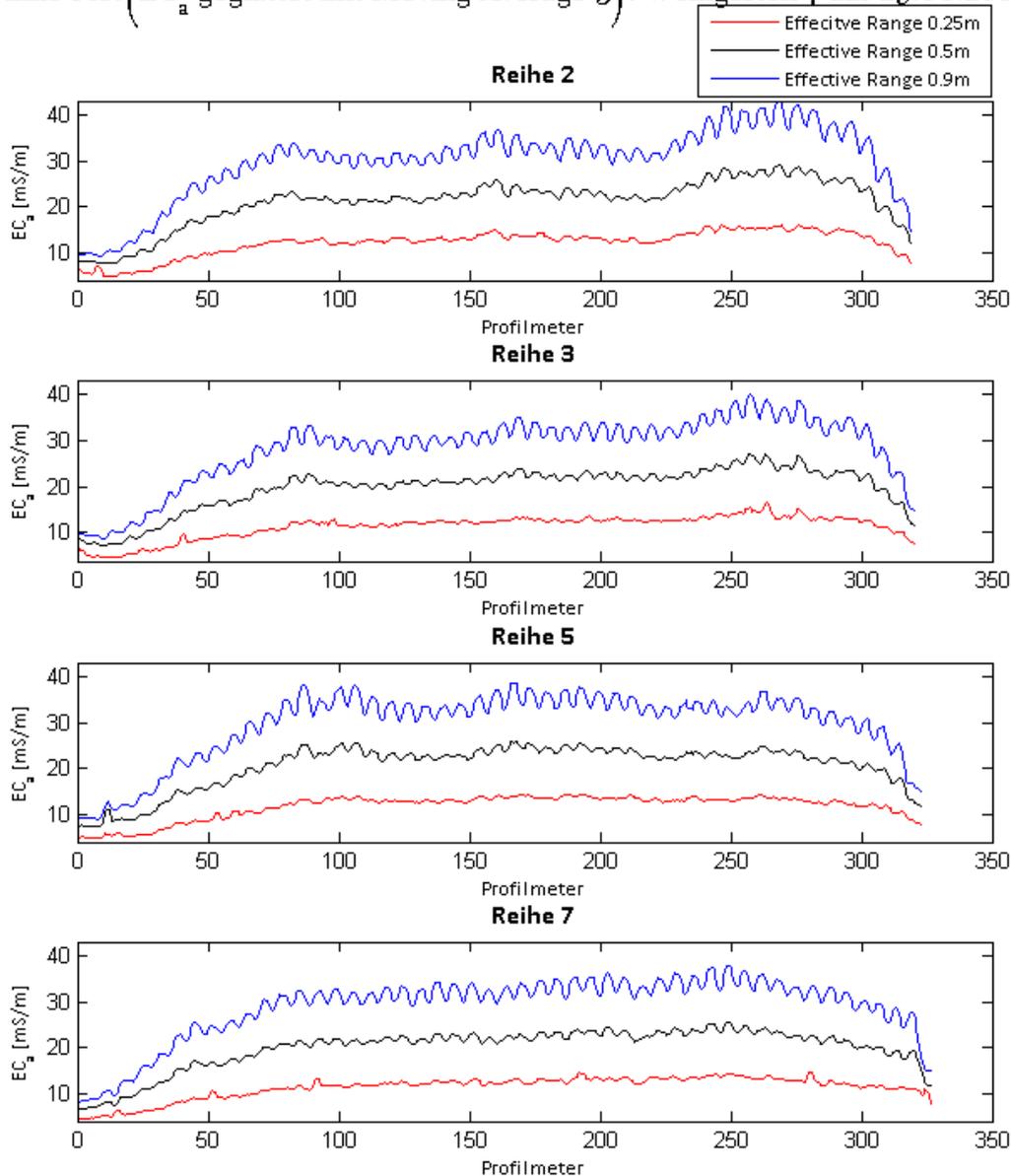


Abbildung 51: Line Plots der Messung am 29.08 in horizontaler Dipolstellung

Abbildung 50 & 51 zeigen, dass für die drei Tiefenbereiche sowohl der Verlauf als auch die Wertebereiche der Leitfähigkeiten in allen Profilen im Große und Ganzen gut übereinstimmen. So nimmt im Weingarten 7 die Leitfähigkeit für den Tiefenbereich 0.25 m Werte von 4 bis 15 mS/m an. Für den Tiefenbereich 0.5 m kann man

hingegen Leitfähigkeiten von 7 bis 28 mS/m erfassen. Die Werte für den Tiefenbereich 0.9 m liegen bei 9 bis ca. 40 mS/m. Weiteres lässt sich somit eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe feststellen.

Der Verlauf entlang der Reihen kann nach Abbildung 51 wie folgt beschrieben werden: In den ersten Metern des Weingartens bleibt die Leitfähigkeit relativ konstant und niedrig ( $EMI_{0.9\text{ m}}$ : max.  $\sim 10$  mS/m). Danach kommt es bis Profilmeter 80 zu einer relativ konstanten Zunahme der Leitfähigkeit (insgesamt in etwa 20 mS/m bei  $EMI_{0.9\text{ m}}$ ).

Im Abschnitt von 80 bis 250 m ändert sich die Leitfähigkeit generell nicht allzu stark (wenige mS/m) und hier werden auch die Höchstwerte der Leitfähigkeit für die jeweilige Reihe erfasst. Eine Ausnahme stellt dabei vor allem Reihe 2 dar. Denn in Reihe 2 verläuft die Leitfähigkeit nur in einem Bereich von 80 bis 225 m in etwa konstant. Danach kommt es zu einer erneuten Zunahme (fast 10 mS/m für Tiefenbereich 0.9 m) der Leitfähigkeit.

Ab ca. Profilmeter 250 kommt es in allen Profilen zur einer recht gleichmäßigen Abnahme der Leitfähigkeit (insgesamt  $\sim 10$  mS/m für Tiefenbereich 0.9 m), die kurz vor Profilende dann steiler wird.

### 6.7.1.2 Vergleich EMI & ERT

Ein geoelektrisches Profil wurde mit einem Elektrodenabstand von 5 m entlang Reihe 2 gelegt (siehe Tabelle 8: Messprotokoll).

Das beste Inversionsergebnis des bearbeiteten Datensatzes (Gleichstrommethode) wurde mit folgenden Werten für den relativen und absoluten Fehler erhalten:

Rel. Fehler [%]	Abs. Fehler [ $\Omega$ ]	Smoothing X:Y	data RMS
2	0.01	1:1	0.9938

Abbildung 52 zeigt für Reihe 2 den Vergleich der EMI-Auswertung (horizontale Dipolstellung) am 29.08.2017 mit den elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses in Tiefe 0.5 m.

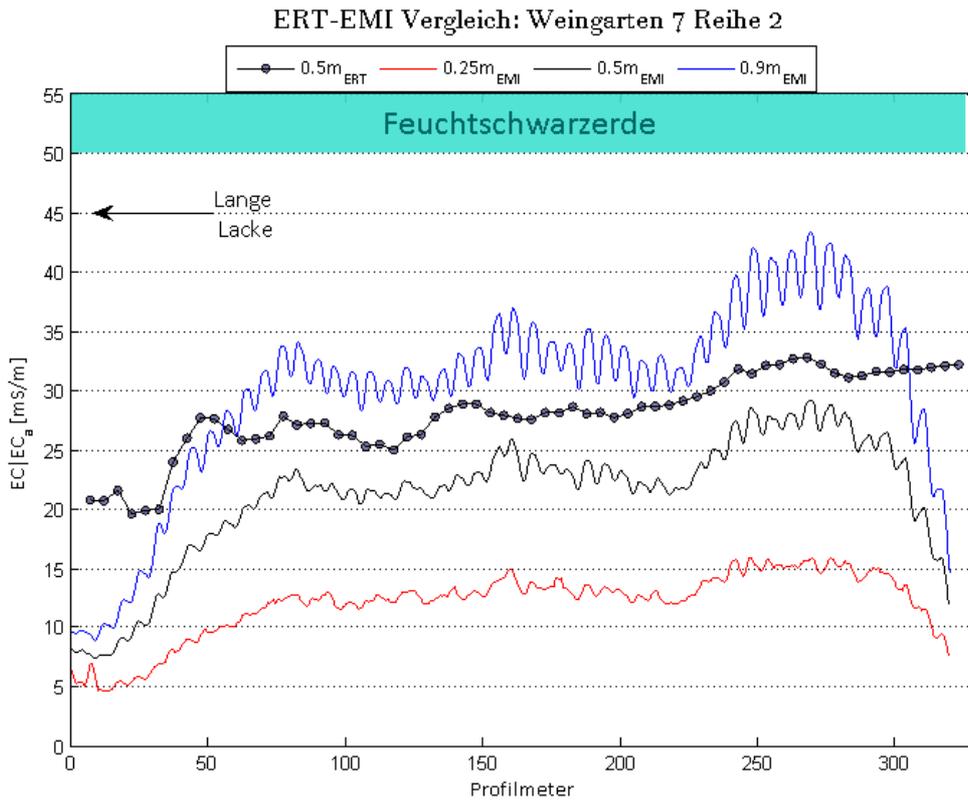


Abbildung 52: Vergleich EMI & ERT (Weingarten 7)

Die Auswertung der beiden Verfahren entlang der Reihe 2 stimmt im Großen und Ganzen gut überein. Am Anfang und Ende des Profils machen sich jedoch Unterschiede bemerkbar.

Während es in der EMI-Auswertung am Anfangsbereich (0 – 80 m) zu einer stetigen Zunahme der Leitfähigkeit kommt, lässt sich in der ERT bei Profilmeter 20 eine geringe Abnahme (3 mS/m) feststellen. Nach etwa 20 m kommt es dann aber auch zu einem Anstieg der Leitfähigkeit um fast 8 mS/m.

Während man bei der EMI am Weingartenende (~ ab 300 m) eine starke Abnahme (insgesamt ~ 20 mS/m) der Leitfähigkeit ausmachen kann, erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit der ERT leicht (insgesamt um ca. 2 mS/m) bis zum Profilende. Sehr interessant ist nun auch, dass im Bereich von 7 bis 50 m höhere Werte (max. 10 mS/m) der Leitfähigkeit in der ERT erfasst werden können. Bis ca. 300 m sind dann die Werte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit der EMI<sub>0,9 m</sub> um max. 5 mS/m größer als die elektrischen Leitfähigkeiten der ERT.

Das Inversionsergebnis der Gleichstrommethode in Tiefe 0.5 m erfasst einen Wertebereich von ca. 19 bis 33 mS/m. Hingegen nehmen die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten der EMI-Auswertung für den Tiefenbereiche 0.25 m Werte von 5 bis 16 mS/m an, für den Tiefenbereiche 0.5 m Werte von 7 bis 29 mS/m und für den Tiefenbereich 1.0 m Werte von 9 bis 43 mS/m.

## 6.7.2 Analyse

In den einzelnen Profilen des Weingartens 7 (siehe Abbildung 50 & 51) lassen sich wie bereits erwähnt ähnliche Wertebereiche und Verläufe der Leitfähigkeit in den jeweiligen Tiefenbereichen feststellen. Das führt wieder einmal zur Annahme, dass quer zum Weingarten die Bodenzusammensetzung in etwa gleich bleibt.

Entlang des Weingartens können nach Abbildung 52 sowohl in der EMI als auch in der ERT zwei „Leitfähigkeitsbereiche“ identifiziert werden.

Ein widerstandsfähigerer Bereich ( $EMI_{0.5m}$ : 7 – 17 mS/m;  $ERT_{0.5m}$ : 19 – 21.5 mS/m) befindet sich am Anfang des Weingartens und erstreckt sich über 40 m. Der zweite leitfähigere Bereich ( $EMI_{0.5m}$ : 20 – 29 mS/m;  $ERT_{0.5m}$ : 25 – 33 mS/m) findet man ab Profilmeter 80.

Entlang des Weingartens findet man den Bodentyp Feuchtschwarzerde (siehe Abbildung 52) vor. Die Feuchtschwarzerde hat sich auf „Schwemmlöß“ unter Grundwassereinfluss entwickelt und ist sehr humusreich (Husz 1965: 158-159).

Nach Aussagen des Besitzers ist der Boden am Anfang des Weingartens sandig (laut Herrn Lang „weißer Sand“) und es kommt relativ bald (ersten Meter) zu einer Schottererschicht. Den restlichen Weingartenboden bezeichnet er als „schwarzen Sand“ (humusreicher sandiger Boden). Die Beschreibung des restlichen Weingartenbodens als humusreich und sandig würde gut in Einklang mit der Klassifizierung als Feuchtschwarzerde stehen und damit den etwas leitfähigen Bereich ( $EMI_{0.5m}$ : 20 – 29 mS/m;  $ERT_{0.5m}$ : 25 – 33 mS/m) ab ca. 80 m erklären.

Außerdem würde der widerstandsfähige Bereich ( $EMI_{0.5m}$ : 7 – 17 mS/m;  $ERT_{0.5m}$ : 19 – 21.5 mS/m) gut mit der Aussage einhergehen, dass der Boden am Anfang sehr sandig ist und die Schottererschicht relativ bald anzutreffen ist.

EMI/ERT/Bodentyp/Aussage des Weinbauers lässt also darauf schließen, dass entlang des Weingartenbodens am Anfang ein hoher Grobporenanteil (Sand, Schotter) herrscht und es ab ca. 20 m zu einem Anstieg des Tongehaltes kommt. Ab ca. Profilmeter 80 bleibt die Bodenzusammensetzung dann relativ konstant.

In den Abbildungen 50, 51 und 52 macht sich in der EMI eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe bemerkbar. Dies kann wiederum bedeuten, dass es in den tieferen Schichten zu einer Erhöhung des Tongehaltes kommt.

Jedoch befindet sich die Lange Lacke in unmittelbarer Nähe, was zur Annahme führt, dass das Grundwasser recht salzhaltig ist.

Somit könnte der Anstieg der Leitfähigkeit auch auf eine höhere Sättigung der tieferen Schichten mit dem salzhaltigen Wasser zurückgeführt werden.

Bevor nun der Tongehalt für die zwei „Leitfähigkeitsbereiche“ mittels Regressionsfunktion berechnet wird, soll noch angemerkt werden, dass interessanterweise die elektrischen Leitfähigkeiten ( $ERT_{0.5m}$ ) im Anfangsbereich (bis ca. 50 m) um ca.

10 mS/m höher sind als die Werte der  $EMI_{0.9\text{ m}}$  (obwohl metallisches Rankensystem). Auch lässt sich feststellen, dass bis jetzt bei keinem Weingarten so hohe Leitfähigkeiten (über 25 mS/m) in der ERT erfasst wurden wie bei Weingarten 7.

Eine Begründung dafür wäre der verglichen zu den anderen Weingärten sehr hohe Grundwasserstand (siehe Anhang 9; unmittelbarer Nähe zur Langen Lacke). Vergleicht man nämlich den Grundwasserstand im Anhang 9 von März (ERT) mit dem von August (EMI), lässt sich feststellen, dass im Frühling 2016 (! Messung war 2017) das Grundwasser bereits nach 60 cm anzutreffen war. Hingegen findet man im August 2016 das Grundwasser erst bei ca. 90 cm Tiefe vor.

Daher sollte man auf jeden Fall bei der Berechnung des Tongehaltes mit  $ERT_{0.5\text{ m}}$  einen eventuellen Einfluss des salzhaltigen Bodenwassers auf die elektrische Leitfähigkeit im Hinterkopf behalten.

Für den ersten „Leitfähigkeitsbereich“ (bis ca. Profilmeter 40) kann man für 21.5 mS/m einen max. möglichen Tongehalt von 28 % berechnen. Dieser Tongehalt lässt sich einen mittelschweren Boden (Lehmboden, Schlufflehm) zuordnen. Für den zweiten „Leitfähigkeitsbereich“ (restlicher Weingarten) würde die Leitfähigkeit von 33 mS/m einen max. möglichen Tongehalt von 47 % bedeuten. Böden mit diesem Tongehalt lassen sich als schwer (lehmiger Ton, toniger Schlufflehm) klassifizieren.

Zusätzlich wird nun aber auch für die zwei „Leitfähigkeitsbereiche“ die Tonanteile mit den scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten der  $EMI_{0.25\text{ m}}$  ( Messung bei kleiner Induktionszahl nicht gewährleistet) berechnet. Für den ersten „Leitfähigkeitsbereich“ ergibt eine scheinbare Leitfähigkeit von 7 mS/m einen max. Tongehalt von 4 %, also einen leichten oder mittelschweren Boden (Sandboden oder Schluffboden).

Eine Leitfähigkeit von 15 mS/m ( $EMI_{0.25\text{ m}}$ ) für den „zweiten Leitfähigkeitsbereich“ würde einen max. Tongehalt von 17 % (mittelschwerer Boden – sandiger Lehm, Schlufflehm) bedeuten.

Das heißt also: Nach der ERT könnte der Bereich ab Profilmeter 50 aufgrund des hohen Tongehaltes dem Blauen Zweigelt Probleme (Wasser-, Nährstoff-, Sauerstoffversorgung und Staunässe) bereiten. Hingegen wäre im Normalfall der Anfangsbereich (bis 50 m) aufgrund des höheren Mittelporenanteils (mittelschwerer Boden) optimal für die Pflanzengesundheit.

Nach der  $EMI_{0.25\text{ m}}$  könnte der Anfangsbereich bei einem Sandanteil > 50 % problematisch für den Blauen Zweigelt werden, da aufgrund des hohe Grobporenanteils bei sporadischen Regenfällen die Weinreben nicht ausreichend mit Wasser und Nährstoffen versorgt werden können. Der restliche Weingartenboden (ab 50 m) würde allgemein keine Probleme für den Blauen Zweigelt darstellen.

Berücksichtigt man die Bodenbeschreibung des Weinbauers (Anfangsbereich: sehr

sandig, Schotterschicht; Restlicher Boden: humusreich, sandig) wäre die Annahme, die man mittels berechneten Tongehaltes von  $EMI_{0.25m}$  gefolgert hat, wahrscheinlicher.

Laut Besitzer gibt es tatsächlich starke Probleme am Anfang des Weingartens. Hier wächst der Blaue Zweigelt jedes Jahr sehr schlecht an und es kommt zu starken Ernteaufällen. Im Gegensatz dazu kann man im restlichen Weingarten sehr gute und viele Trauben ernten.

## 6.8 Weingarten 8

### 6.8.1 Auswertungen

#### 6.8.1.1 CMD Mini-Explorer (EMI)

Line Plot ( $EC_a$  geglättet mit Moving Average 5): Weingarten 8 am 30.12.2016

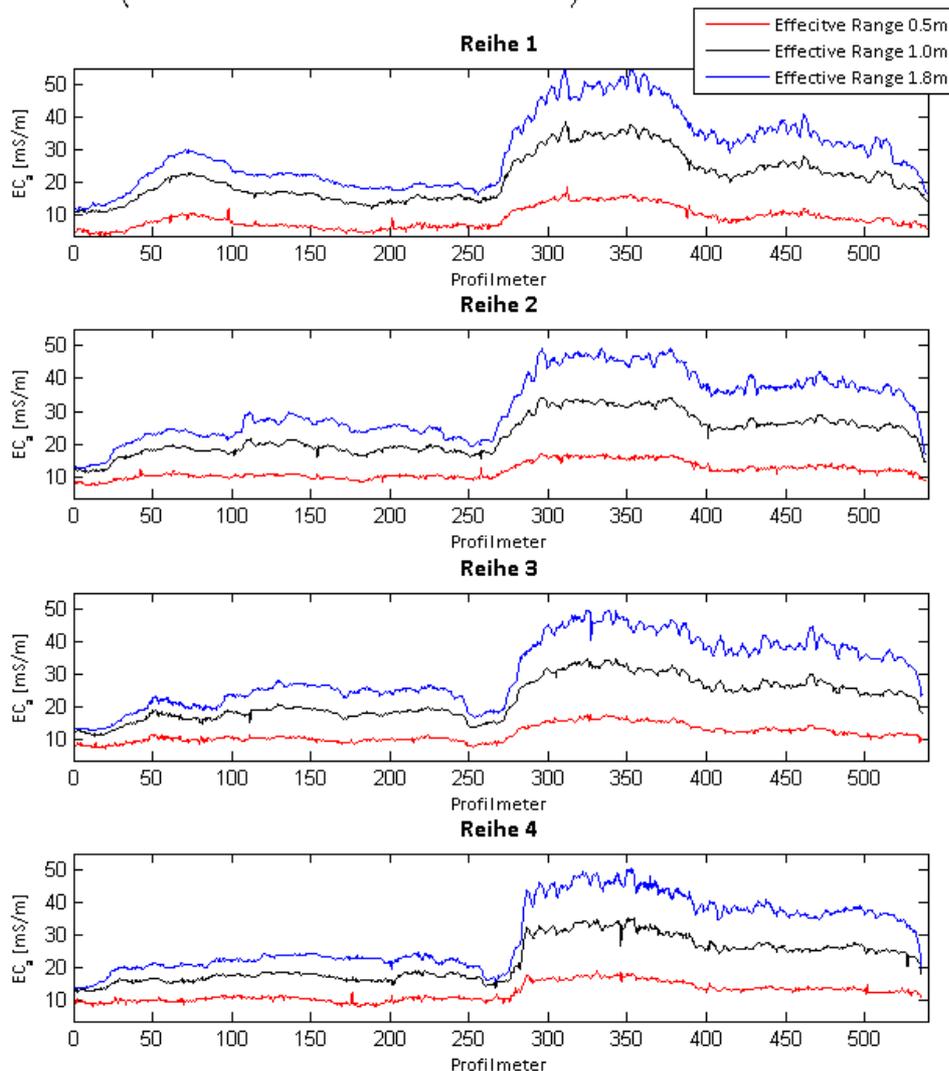


Abbildung 53: Line Plots der Messung am 30.12.2017 in vertikaler Dipolstellung

In Abbildung 53 wird für den 30.12.2016 (vertikale Dipolstellung) die Auswertung des Weingartens 8 präsentiert.

Abbildung 53 zeigt, dass für die 3 Tiefenbereiche in den vier Reihen sowohl ein vergleichbarer Verlauf als auch ein ähnlicher Wertebereich der Leitfähigkeit erfasst werden kann.

Kleinere Ausnahmen lassen sich vor allem in den ersten 100 m entdecken.

So kommt es in Reihe 1, 2 und 3 bis ca. Profilmeter 50 zu einem relativ konstanten Anstieg um ca. 15 mS/m (Tiefenbereich 1.8 m).

Nach Erreichen eines lokalen Maximums (bei 50 m) lässt sich in Reihe 1 eine langsame kontinuierliche Abnahme (Tiefenbereich 1.8 m: ca. 10 mS/m) der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit bis Profilmeter 250 ausmachen.

Hingegen kommt es kurzfristig (50 m lang) in Reihe 2 und Reihe 3 zur Abnahme der Leitfähigkeit ( $\sim 2\text{-}3$  mS/m). Diese erhöht sich jedoch um insgesamt max. 10 mS/m wieder bis Profilmeter 130. Danach kann man ebenso eine Verringerung der Leitfähigkeit (insgesamt 10 mS/m bei Tiefenbereich 1.8m) bis Profilmeter 250 feststellen.

Im Gegensatz dazu kommt es in Reihe 4 bis Profilmeter 30 zu einem steilen Anstieg der Leitfähigkeit ( $\sim 5$  mS/m in Tiefenbereich 1.8 m). Danach nimmt die Leitfähigkeit relativ langsam und konstant um ca. 5 mS/m (Tiefenbereich 1.8 m) bis Profilmeter 220 m zu. Auch hier lässt sich danach bis Profilmeter 250 für den Tiefenbereich 1.8 m eine ca. 10 mS/m Erniedrigung der Leitfähigkeit feststellen.

Einige Meter nach Profilmeter 250 kommt es in allen Reihen zu einem sprunghaften Anstieg der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit von fast 30 mS/m (Tiefenbereich 1.8 m). Hier muss angemerkt werden, dass sich der Weingarten aus einer „alten“ Hälfte und einer „neuen“ Hälfte zusammensetzt. Das heißt, dass ein ca. 250 m langer Weingarten, in dem noch Holzpfosten zur Verankerung genutzt wurden, verlängert wurde und im „neuen“ Teil bereits Metallsteher zum Einsatz kamen.

Somit wird dieser sprunghafte Anstieg nach 250 m höchstwahrscheinlich durch die Metallsteher des Rankensystems verursacht.

Nachdem die Leitfähigkeit Werte des oberen Wertebereichs (in Reihe 1: max.

$EMI_{1.8\text{ m}}$ : 55 mS/m) in den jeweiligen Reihen und Tiefenbereichen annimmt und dann zwischen Profilmeter 300 und 350 relativ konstant verläuft, kommt es in allen Reihen zur stufenweisen Reduktion dieser.

Diese stufenweise Verringerung sieht folgendermaßen aus:

Zuerst nimmt die Leitfähigkeit bis Profilmeter 400 insgesamt etwa 20 mS/m (Tiefenbereich 1.8 m) ab, danach kommt es zu einer leichten Erhöhung (unter 10 mS/m in Tiefenbereich 1.8 m) der Leitfähigkeit. Ab Profilmeter 480 lässt sich bis ans Profilenende erneut eine steile Abnahme von insgesamt 20 mS/m (Tiefenbereich 1.8 m) feststellen

Erneut zeigt sich in Abbildung 53 eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Tiefe. Hier-

bei lässt sich ein Unterschied von rund max. 20 mS/m (im „neuen“ Teil) zwischen Tiefenbereich 0.5 m und 1.0 m ermitteln. Hingegen beträgt der Unterschied zwischen den Tiefenbereichen 1.0 m und 1.8 m nur rund 10 mS/m.

### 6.8.1.2 Vergleich EMI & ERT

Ein geoelektrisches Profil wurde mit einem Elektrodenabstand von 5 m entlang Reihe 1 (ab ca. Profilmeter 218) gelegt (siehe Tabelle 9: Messprotokoll).

Das beste Inversionsergebnis des bearbeiteten Datensatzes (Gleichstrommethode) wurde mit folgenden Werten für den relativen und absoluten Fehler erhalten:

Rel. Fehler [%]	Abs. Fehler [ $\Omega$ ]	Smoothing X:Y	data RMS
5	0.09	1:1	0.9949

Abbildung 54 zeigt für Reihe 1 den Vergleich der EMI-Auswertung (vertikale Dipolstellung) am 30.12.2016 mit den elektrischen Leitfähigkeiten des Inversionsergebnisses in Tiefe 0.5 & 1.5 m.

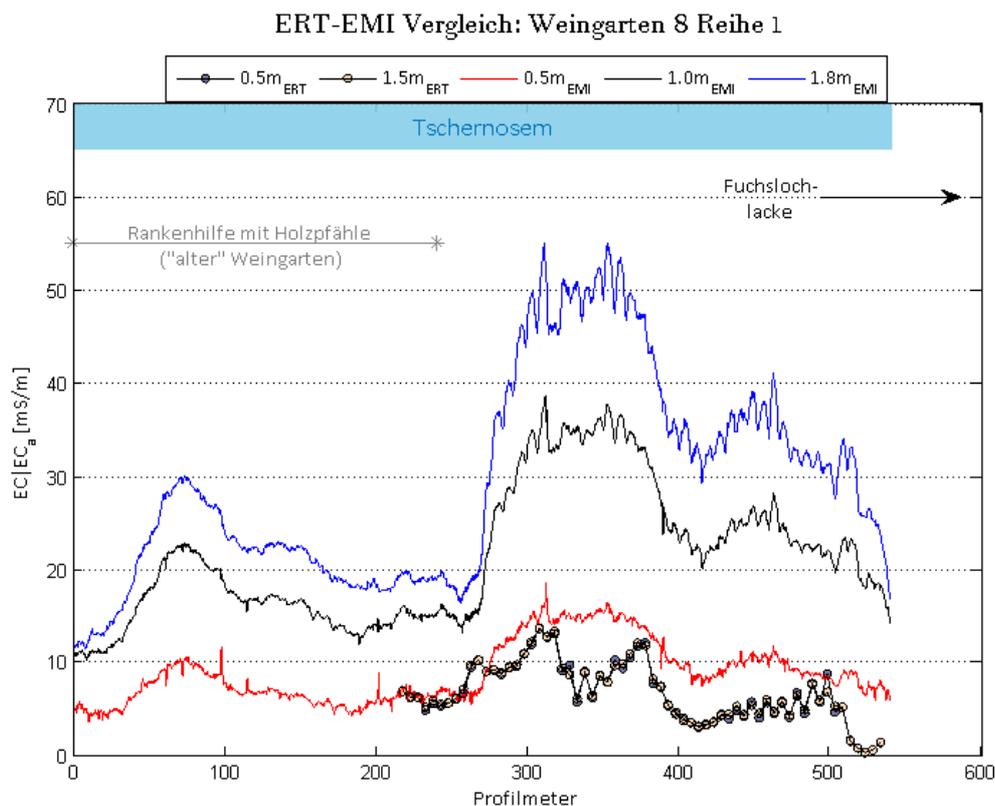


Abbildung 54: Vergleich EMI & ERT (Weingarten 8)

Grundsätzlich verläuft die elektrische Leitfähigkeit der ERT (0.5 m & 1.5 m) gleich wie die scheinbare elektrische Leitfähigkeit der EMI (0.5 m, 1 m & 1.8 m). Unterschiede lassen sich jedoch in Abbildung 54 sowohl zwischen den Profilmetern 320 und 380, als auch ab Profilmeter 500 erkennen.

Während es in der ERT im Abschnitt von 320 bis 380 m zuerst zu einer um insgesamt

5 mS/m hohen Abnahme (bis Profilmeter 350) der Leitfähigkeit kommt und diese danach um insgesamt 4 mS/m wieder zunimmt, verbleibt die scheinbare elektrische Leitfähigkeit der EMI in diesem Bereich für alle 3 Tiefenbereiche relativ konstant.

Ab Profilmeter 500 bis 520 kommt es zwar auch in der EMI zu einer Abnahme der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit, jedoch nimmt diese (vor allem für Tiefenbereich 0.5 m) nicht so steil ab wie die elektrische Leitfähigkeit der ERT. Diese verringert sich in jenem Bereich um ca. 7 mS/m.

Das Inversionsergebnis der Gleichstrommethode in Tiefe 0.5 & 1.5 m erfasst einen Wertebereich von ca. 0.4 bis 14 mS/m.

Hingegen nehmen die scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten der EMI-Auswertung für den Tiefenbereiche 0.5 m Werte von 4 bis 19 mS/m an, für den Tiefenbereiche 1.0 m Werte von 10 bis 38 mS/m und für den Tiefenbereich 1.8 m Werte von 11 bis 55 mS/m.

Da der Weingarten sich aus einem „alten“ Teil (Holzpfähle) und aus einem „neuen“ Teil (Metallpfähle) zusammensetzt, lässt sich einigermaßen der „Effekt“, den die metallischen Pfähle auf den CMD Mini-Explorer haben, beobachten.

Bei Beginn des „neuen“ Teils lässt sich für die Tiefenbereiche 1.0 & 1.8 m eine Leitfähigkeitserhöhung um ca. 30 mS/m beobachten.

Für Tiefenbereich 0.5 m ist eine Erhöhung mit 12 mS/m jedoch nicht allzu hoch.

Es wirkt fast so, dass der Einfluss der Metallpfähle auf die scheinbare elektrische Leitfähigkeit für den Tiefenbereich 0.5 m vergleichsweise zu  $EMI_{1.0 \& 1.8 \text{ m}}$  geringer ist.

Ein weiteres Anzeichen dafür wäre auch, dass die Abnahme (nicht voller metallischer Einfluss auf CMD Mini-Explorer) am Profilende vergleichsweise gering (flacher) ist.

## 6.8.2 Analyse

Im Großen und Ganzen stimmen die Verläufe und die Wertebereiche (Reihe 1 um max. 5 mS/m höher) der Leitfähigkeit (siehe Abbildung 53) in den jeweiligen 4 Reihen für die drei Tiefenbereich relativ gut überein.

Daher kann man schlussfolgern, dass es quer zum Weingarten zu keinen starken Änderungen in der Bodenzusammensetzung kommt.

Der „alte“ Teil (siehe Abbildung 54; bis Profilmeter 250) des Weingartens lässt sich mittels EMI (nach Abbildung 52) in 3 „Leitfähigkeitsbereiche“ unterteilen.

Der erste „Leitfähigkeitsbereich“ ( $EMI_{0.5 \text{ m}}$ : 4 – 5 mS/m) erstreckt sich von Profilmeter 0 bis 30. In diesem Bereich des Weingartens 8 finden man in allen drei Tiefenbereichen die geringsten Leitfähigkeiten der EMI-Auswertung wieder.

Der zweite leitfähigere Abschnitt ( $EMI_{0.5 \text{ m}}$ : 8 – 11 mS/m) kann ungefähr zwischen Profilmeter 50 und 100 lokalisiert werden.

Zwischen Profilmeter 120 und 250 kann man den dritten „Leitfähigkeitsbereich“ ( $EMI_{0.5 \text{ m}}$ : 6 – 7 mS/m; ERT: 6 – 7 mS/m) des „alten“ Weingartens ausmachen. In diesen Bereich beginnt auch das Inversionsergebnis der Gleichstrommethode.

Der „neue“ Teil des Weingartens kann sowohl nach der ERT als auch nach der EMI in zwei weiteren „Leitfähigkeitsbereichen“ geteilt werden.

Den vierten „Leitfähigkeitsbereich“ ( $EMI_{0.5\text{ m}}$ : 13 – 18 mS/m; ERT: 7 – 14 mS/m), der die höchsten Leitfähigkeiten (EMI, ERT) aufweist, trifft man ab Profilmeter 300 an und ist etwa 80 m lang. Im Endbereich (ab Profilmeter 400) befindet sich schließlich ein weiterer widerstandsfähiger Abschnitt ( $EMI_{0.5\text{ m}}$ : 6 – 10.5 mS/m; ERT: 0.4 – 7 mS/m).

Abbildung 52 zeigt, dass der Weingartenboden als Tschernosem klassifiziert worden ist, also ein humusreicher Boden, der auf abgelagerten Löss oder Sand entstanden ist. Zusätzlich weiß man durch das Gespräch mit Herrn Lang, dass es am Anfang, in der Mitte und am Ende des Weingartens schotterreiche Stellen gibt.

Die Beschreibung des Bodens durch den Weinbauern würde auch sehr gut zu den Verlauf der EMI und ERT passen.

Somit kann gefolgert werden, dass die Bereiche von Profilmeter 50 bis 100 und von Profilmeter 300 bis 380 die höchsten Tonanteile des Weingartens aufweisen. In den restlichen Bereichen nimmt der Tonanteil ab und es kommt zur Erhöhung des Schluff-, Sand- und Schotteranteils.

In Nähe des Weingartens befindet sich die intakte Fuchslochlacke und somit kann mit einer Versalzung des Grundwassers gerechnet werden.

So lässt sich einerseits die deutliche Erhöhung der Leitfähigkeit (EMI) mit der Tiefe durch eine höhere Sättigung der Poren mit versalztem Bodenwasser in den tiefergelegenen Schichten erklären. Andererseits kann natürlich auch eine Zunahme des Tonanteils mit der Tiefe dafür verantwortlich gemacht werden.

Um den Weingartenboden in leichte, mittelschwere oder schwere Böden klassifizieren zu können, werden die max. möglichen Tongehalte der 5 „Leitfähigkeitsbereiche“ mit der Regressionsfunktion bestimmt.

Für den „alten“ Teil des Weingartens wird der Tonanteil mit  $EMI_{0.5\text{ m}}$  bestimmt. Für den „neuen“ Teil des Weingartens ermittelt man den Tongehalt einerseits mit  $EMI_{0.5\text{ m}}$ , andererseits mit den Leitfähigkeiten der ERT.

Das heißt, für den ersten „Leitfähigkeitsbereich“ (mit 5 mS/m) erhält man nach der Regressionsfunktion einen max. möglichen Tonanteil von 0.4 % (leichter oder mittelschwerer Boden – siehe Abbildung 1). Der zweite „Leitfähigkeitsbereich“ wird mit einem berechneten Tongehalt (mit 11 mS/m) von 10.4 % einem mittelschweren Boden (sandiger Lehm, Schlufflehm) zugeordnet. Weiteres lässt sich der dritte „Leitfähigkeitsbereich“ mit einem berechneten Tongehalt von 4 % (mit 7 mS/m) entweder als leichten oder als mittelschweren Boden klassifizieren.

Der vierte „Leitfähigkeitsbereich“ im „neuen“ Teil des Weingarten lässt sich nach der ERT (14 mS/m) mit dem berechneten Tongehalt von 15 % einem mittelschweren Boden zuordnen. Auch mit  $EMI_{0.5\text{ m}}$  (18 mS/m) würde dieser Abschnitt mit einem max.

Tongehalt von 22 % noch zu einem mittelschweren Boden (Lehmboden, Schlufflehm) zählen.

Das Ende des Weingartens (ab ca. 400 m) lässt sich sowohl mit der ERT (7 mS/m – Tonanteil: 4 % ) als auch mit der  $EMI_{0.5\text{ m}}$  (10.5 mS/m – Tonanteil: 9.5 mS/m) einem leichten (Sandanteil > 50 %, Sandboden) oder einem mittelschweren Boden (Schluffanteil > 50 %, Schluffboden) zuordnen.

Mit dieser Einteilung und den Informationen über den Weingartenboden (hoher Schotteranteil am Anfang, in der Mitte und am Ende; Tschernosem) lässt sich nun bezüglich der Pflanzengesundheit folgern, dass im zweiten und vierten „Leitfähigkeitsbereich“ ( Profilmeter 50 – 100 und Profilmeter 300 – 380) der Welschriesling im Normalfall gut mit Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff versorgt wird.

In den restlichen Bereichen (Anfang, Mitte, Ende) kann es stellenweise, wenn der Grobporenanteil (Schotter und Sand) zu hoch ist, zu Problemen bei der Wasser- und Nährstoffversorgung kommen und somit den Welschriesling bei seiner Entwicklung stören.

Und tatsächlich berichtet Herr Lang, dass es stellenweise wo ein hoher Schotteranteil sichtbar ist (Anfang, Mitte, Ende), im Weingarten zu Ernteeinbußen kommt. Da, wo der Schotteranteil gering ist, kann er ausgezeichnete und viele Trauben ernten.

## 7 Fazit

Nach der Messung mit dem CMD Mini-Explorer in acht verschiedenen Weingärten im Seewinkel und der Auswertung dieser Messungen, hat sich Folgendes feststellen lassen:

Die Messung mit dem CMD Mini-Explorer ist problemlos alleine und ohne großen Aufwand durchzuführen. So hat man zur Aufnahme der Leitfähigkeiten in einem Weingarten höchstens eine Stunde (Weingarten 8) benötigt. Gegenüber dem geoelektrischen Verfahren hat sich ein weiterer Vorteil des nicht-invasiven elektromagnetischen Induktionsverfahrens bei kleiner Induktionszahl aufgezeigt. Während die Messung mit dem geoelektrischen Verfahren aufgrund eines gefrorenen Bodens massiv erschwert worden ist, ist die Messung mit dem CMD Mini-Explorer bei denselben Bedingungen ohne Probleme verlaufen.

Jedoch stellt das Rankensystem in den „modernen“ Weingärten, welche sich aus einem Drahtrahmen und den Metallpfählen zusammensetzen, ein großes Problem für die Messung der Leitfähigkeit mit dem CMD Mini-Explorer dar. Wegen der metallischen Objekte kann nämlich die Leitfähigkeitsmessung bei kleiner Induktionszahl nicht gewährleistet werden und die mit dem CMD Mini-Explorer ermittelten scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten können somit fehlerhaft aufgrund der Berechnung mit Formel 6 sein.

Jedoch kann der CMD Mini-Explorer in allen Weingärten im Großen und Ganzen einen ähnlichen Verlauf der Leitfähigkeit feststellen wie die Gleichstrommethode. Somit kann der CMD Mini-Explorer im Messgebiet trotz metallischen Objekten Leitfähigkeitsänderungen und folglich Änderungen in den Bodeneigenschaften ausmachen.

Durch die Berechnung der Tongehalte mit elektrischen Leitfähigkeiten ( $ERT_{0.5m}$ ) kann der Weingartenboden in leichte, mittelschwere oder/und schwere Bereiche (Bodenart) eingeteilt werden.

Zusammenfassend lässt sich hierbei feststellen, dass es durch diese Klassifizierung und mit Hilfe von zusätzlichen Bodeninformationen (Bodentypen, Bodenbeschreibung) in 6 Weingärten möglich gewesen ist, alle Stellen, die den Weinreben Probleme bereiten, aufzudecken.

Im Weingarten 4 (siehe Kapitel 6.4 ) und 6 (siehe Kapitel 6.6) ist dies nicht möglich gewesen.

Der gesamte Weingarten 4 lässt sich nämlich nach der Analyse einem mittelschweren Boden zuordnen, welcher der Weinrebe in Normalfall optimale Bedingungen (gute Sauerstoff-, Wasser- und Nährstoffversorgung) zum gesunden Anwachsen bietet. Laut dem Besitzer sind jedoch die Weintrauben in der ersten Hälfte des Weingartens meist unterentwickelt und nicht so qualitativ wie die, der zweiten Hälfte. Nach einer Karte auf der Webseite <http://www.wein-terroir.at/> , die den Kalkgehalt des Bodens zeigt, kann ein möglicher Kalkmangel in der ersten Hälfte des Weingartens als Begründung dienen.

In Weingarten 6 kann anhand des ermittelten Tongehaltes (mit  $EMI_{0.5m}$ ) und der Bodenbeschreibung des Besitzers nicht festgestellt werden, ob nun ein leichter oder ein mittelschwerer Boden vorliegt.

Daraus kann man nun schließen, dass man anhand des mit der elektrischen Leitfähigkeit (ERT) abgeschätzten Tongehaltes sehr gut problematische Stellen, die durch den Boden verursacht werden, in einem Weingarten aufdecken kann.

Zwar kann man durch die Einteilung in leichte, mittelschwere und schwere Bereiche einigermaßen Rückschlüsse auf die Wasser-, Nährstoff- und Sauerstoffversorgung der Weinreben in einem Weingarten ziehen, jedoch kann mit dieser Einteilung nicht die exakte Ursache, warum die Pflanze in einem Bereich Probleme hat, ausfindig gemacht werden.

Das heißt, dass angenommen werden kann, dass z.B. die Weinpflanze bei sporadischen Regenfällen in leichten Böden aufgrund des hohen Grobporenanteils (hohe Wasserleitfähigkeit) nicht ausreichend mit Wasser und den darin gelösten Nährstoffen versorgt wird. Doch welche Nährstoffe der Pflanze genau fehlen, erschließt sich in dieser Arbeit nicht.

Außerdem werden bei geschätzten Tongehalten unter 10 % zusätzliche Informationen über den Boden (z.B. Bodentyp, Beschichtung des Bodens) benötigt, da man sonst nicht zwischen einem leichten (> 50 % Sandanteil) und einem mittelschweren Bereich (> 50 % Schluffanteil) unterscheiden kann.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich höchstwahrscheinlich bei den scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des CMD Mini-Explorers aufgrund der metallischen Objekte um ungültige Werte. Folglich ist eine Abschätzung des Tongehaltes durch die in dieser Arbeit ermittelten Regressionsfunktion nur mit der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit der EMI heikel.

Jedoch findet man bei der Auswertung des Weingartens 8 Hinweise darauf, dass der Einfluss des Rankensystems auf den CMD Mini-Explorer in Tiefenbereich 0.5 m viel geringer ausgeprägt als in den anderen beiden Tiefenbereichen ist (1 & 1.8 m).

Diese Beobachtung lässt sich dadurch bekräftigen, dass die Klassifizierung der Weingärten in leichte, mittelschwere und schwere Böden mit den scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten des Tiefenbereichs 0.5 m (Weingarten 7 → 0.25 m) mit der der ERT (Tiefe 0.5 m) überstimmt.

Da die Messung mit dem elektromagnetischen Zweispulen-System ohne großen Aufwand verbunden ist und die Abschätzung des Tongehaltes mit der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit aufgrund des Rankensystems fehlerhaft sein kann, lohnt sich der Einsatz des elektromagnetischen Induktionsverfahren bei kleiner Induktionszahl im Weinbau meiner Meinung nach besonders, wenn ein frischer Weingarten ausgesetzt werden soll.

Die Verteilung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit kann für den gewünschten Standort nämlich schnell erfasst werden und die daraus resultierende Einteilung in leichte, mittelschwere und schwere Bereich erfolgt dann ohne den Einfluss des Ran-

kensystems. Anhand dieser Einteilung kann der Weinbauer nun schon vorab Maßnahmen (Düngung, ...) treffen, um mögliche Probleme für die Weinreben aufgrund des Bodens zu vermeiden.

So kann beispielhaft in leichten Bereichen vor dem Aussetzen der Weinpflanzen Humus eingebracht werden, um den Mittelporenanteil zu erhöhen und/oder man entscheidet sich in diesen Bereichen für eine trockentolerante Unterlage.

Für Weinbaugebiete wie dem Seewinkel, wo das Grundwasser oberflächennah ist und es eine hohe Salinität aufweist, wäre die Berücksichtigung der elektrolytischen Leitfähigkeit, um den Tongehalt auch für tiefer gelegene Schichten berechnen zu können, in der hier ermittelten Regressionsfunktion eine interessante Aufgabe für die Zukunft.

Außerdem wäre die Erforschung, ob und wie die wichtigsten Nährstoffe der Weinpflanze mit der elektrischen Leitfähigkeit in Verbindung stehen, sehr lohnenswert.

## 8 Literaturverzeichnis

- Aigner, H./ Militzer, H. (1985): Methoden auf der Grundlage physiko-chemischer Felder.  
In: Militzer, H./ Weber, F. (Hrsg.): Angewandte Geophysik. Geoelektrik – Geothermie – Radiometrie - Aerogeophysik. Band 2. Wien, New York: Springer-Verlag. Berlin: Akademie-Verlag
- André, Frédéric/ van Leeuwen, Cornelis/ Saussez, Stéphanie/ Van Durmen, Renaud/ Bogaert, Patrick/ Moghadas, Davood/ Rességuier, Laure/ Delvaux, Bruno/ Vereecken, Harry/ Lambot, Sébastien. (2012): High-resolution imaging of a vineyard in south of France using ground-penetrating radar, electromagnetic induction and electrical resistivity tomography. In: Journal of Applied Geophysics 78: 113-122
- Anovitz, Lawrence M./ Cole, David R. (2015): Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures. In: Reviews in Mineralogy & Geochemistry. Vol. 80: 61-164
- Archie, Gus E. (1942): The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. In: Transaction of the AIME. Vol.146: Society of Petroleum Engineers, 54-62
- Berkthold, Alfred/Buttgenbach, Thomas/Greinwald, Siegfried et al. (2005): Geoelektrik.  
In: Knödel, K./Krummel, H./ Lange, G. (Hrsg.): Geophysik. Methodenhandbuch Deponieuntergrund. Band 3. Berlin: Springer-Verlag, 71-100
- Binley, Andrew/ Kemna, Andreas (2005): DC Resistivity and Induced Polarization Methods.  
In: Rubin, Yoram/ Hubbard, Susan S. (Hrsg.): Hydrogeophysics. Band 20. Netherlands: Springer, 1-30
- Blume, Hans-Peter/Brümmer, Gerhard W./Horn, Rainer/Kandeler, Ellen/Kögel-Knabner, Ingrid/Kretschmar, Ruben/Stahr, Karl/Wilke, Berndt-Michael (2010): Scheffer/Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 16.Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag
- Bonsall, James/ Fry, Robert/ Gaffney, Chris/ Armit, Ian/ Beck, Anthony/ Gaffney, Vince (2013): Assessment of the CMD Mini-Explorer, a New Low-frequency Multi-coil Electromagnetic Device, for Archaeological Investigations. Archaeological Prospection 20: 219–231
- Bortz, Jürgen (1993): Statistik. Für Sozialwissenschaftler. 4. Auflage, Berlin: Springer-Verlag
- Burns, Scott (2012): The Importance of Soil and Geology in Tasting Terroir with a Case History from the Willamette Valley, Oregon. In Dougherty, Percy H. (Hrsg.): The Geography of Wine. Regions, Terroir and Techniques. Pennsylvania: Springer Netherlands , 96-108
- Cleff, Thomas (2015): Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse.  
Eine computergestützte Einführung mit Exel, SPSS und STATA. 3. Auflage, Wiesbaden: Springer Gabler
- Corwin, Dennis L./ Lesch, Scott M. (2005): Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. In: Computers and Electronics in Agriculture 46: 11-43
- Everett, Marc. (2013): *Near-Surface Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press
- Flores-Orozco, Adrian (2016): Processing and inversion of multidimensional complex resistivity imaging surveys. Skriptum zur Lehrveranstaltung „Geophysical exploration with non-seismic methods“ an

der Technischen Universität Wien

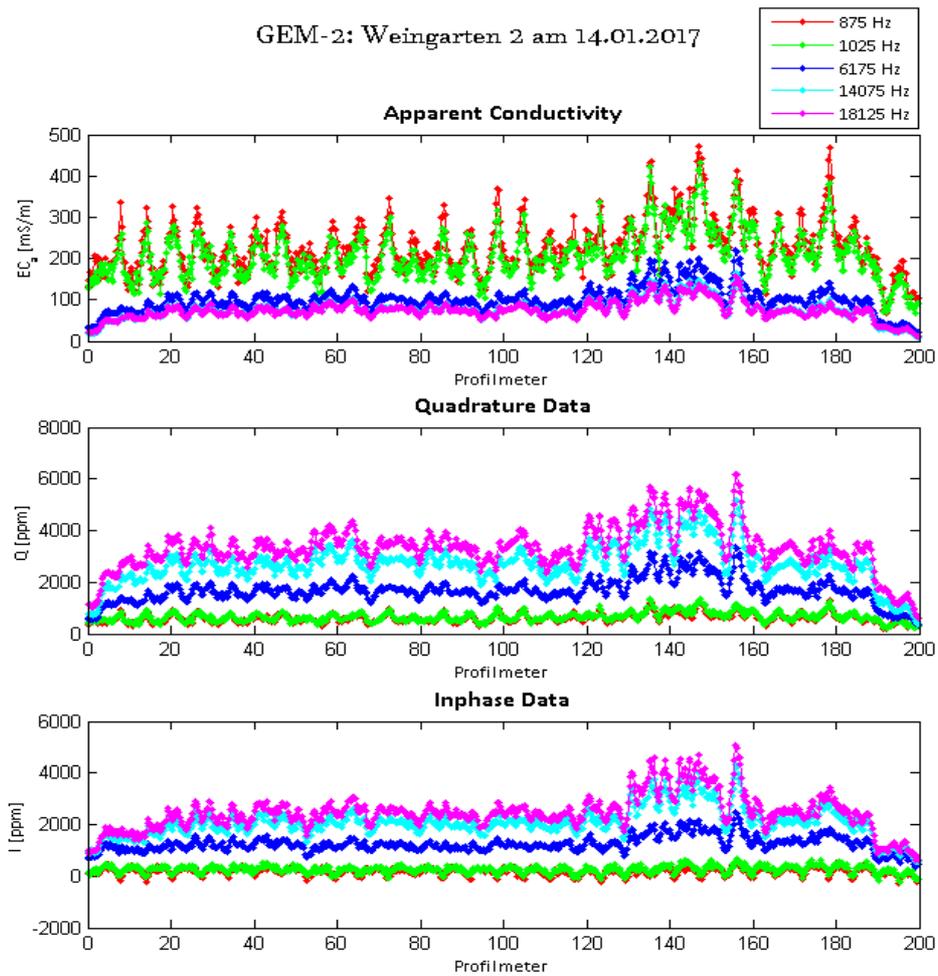
- Gf Instruments, s.r.o (o.J.): CMD. Electromagnetic conductivity meter. User manual v1.8, Brünn
- Grisso, Robert/ Alley, Mark/ Holshouser, David/ Thomason, Wade (2009): Precision Farming Tools. Soil Electrical Conductivity. Virginia Cooperative Extension 442-508: 1-6
- Häusler, Herman (2007): Geologische Karte der Republik Österreich 1:50 000. Erläuterungen zu den Blättern. 79 Neusiedl am See. 80 Ungarisch-Altenburg.109 Pamhagen. Wien: Geologische Bundesanstalt
- Huang, Haoping (2005): Depth of investigation for small broadband electromagnetic sensors. In: Geophysics, Vol. 70, No.6: G135-G142
- Husz, Georg (1965): Zur Kenntnis der Quartären Sedimente des Seewinkelgebietes (Burgenland, Österreich). Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland – 032: 147 - 205
- Jäggi, F./ Furrer, O. J./ Jäggi, W. (1984): Bodenkunde. 2.Auflage: Verlag Wirz Aarau
- Kohler, Bernhard/ Werba, Franziska (2015): Einzigartige Lebensräume. Die Salzlacken im Seewinkel. Broschüre des WWF Österreich, Wien
- Kolodziej, A. W./ Prácser, E./ Rezessy G./ Seidel, K./ Szabadváry, L./ Vértesy L. (2005): Elektromagnetische Zweispulen-Systeme. In: Knödel, K./Krummel, H./ Lange, G. (Hrsg.): Geophysik. Methodenhandbuch Deponieuntergrund. Band 3. Berlin: Springer-Verlag, 241-312
- Krachler R./ Korner I./ Dvorak M./ Milazowszky N./ Rabitsch W./ Werba F./ Zulka P./ Kirschner A. (2012) Die Salzlacken des Seewinkels: Erhebung des aktuellen ökologischen Zustandes sowie Entwicklung individueller Lackenerhaltungskonzepte für die Salzlacken des Seewinkels (2008 – 2011). Krachler R./ Kirschner A./ Korner I. (Redaktion). Verlag & Hrsg. Österreichischer Naturschutzbund, Eisenstadt, Österreich
- Lange, Gerhard (2005): Gleichstromgeoelektrik. In: Knödel, K./Krummel, H./ Lange, G. (Hrsg.): Geophysik. Methodenhandbuch Deponieuntergrund. Band 3. Berlin: Springer-Verlag, 71-100
- Lott, Heinz/ Pfaff, Franz/ Prior, Bernd (2010): Taschenbuch der Rebsorten. 14.Auflage, Mainz: Fachverlag Fraund
- Löffler-Mang, Martin (2012): Optische Sensorik. Lasertechnik, Experimente, Light Barriers. 1.Auflage, Berlin: Vieweg+Teubner Verlag
- Lück, E./ Gebbers, R./ Ruehlmann, J./ Spangenberg, U. (2009): Electrical conductivity mapping for precision farming. In: Near Surface Geophysics 7: 15-25
- Martini, E./ Comina, C./ Priori, S./ Costantini, E.A.C (2013): A combined geophysical-pedological approach for precision viticulture in the Chianti hill. In: Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 54, n. 2: 165-181
- McNeill, J.D. (1980): Technical Note TN-5. Elektrical conductivity of soils and rocks. Ontario Canada: Geonics Limited
- McNeill, J.D. (1980): Technical Note TN-6. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low

induction numbers. Ontario Canada: Geonics Limited

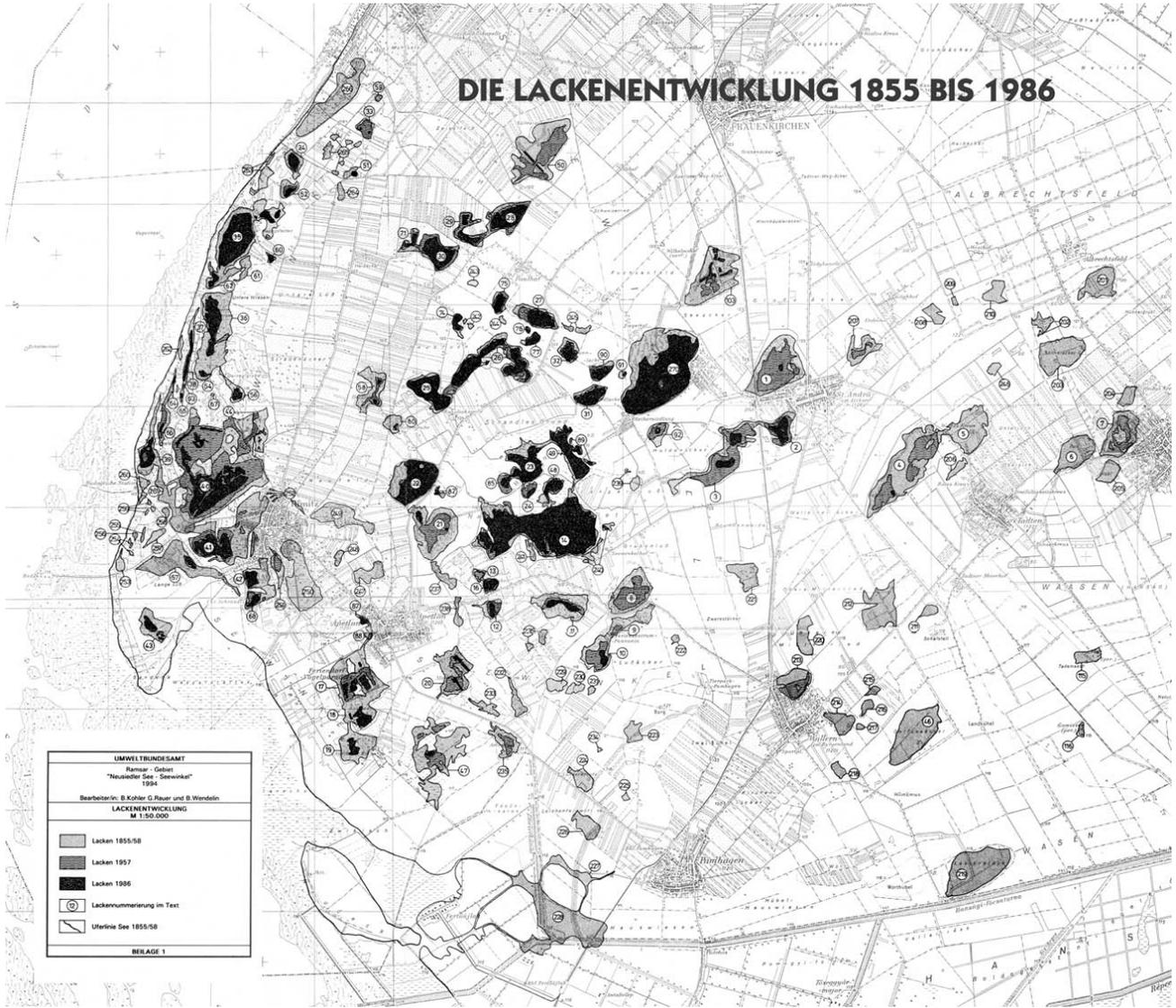
- Militzer, H./ Porstendorfer, G./ Rösler, R./ Weber, F. (1985): Gleichstrommethode.  
In: Militzer, H./ Weber, F. (Hrsg.): Angewandte Geophysik. Geoelektrik – Geothermie – Radiometrie -  
Aerogeophysik. Band 2. Wien, New York: Springer-Verlag. Berlin: Akademie-Verlag
- Mohr, Horst Diedrich 2005: Farbatlas. Krankheiten, Schädlinge und Nützlinge an der Weinrebe.  
Stuttgart: Eugen Ulmer KG
- MPT-IRIS Inc.: MPT-DAS-1. Electrical Impedance Tomography System, bezogen unter:  
<https://www.mpotech3d.com/das1> (Zugriff: 17.06.2020)
- Nelhiebel, Peter (1980): Die Bodenverhältnisse des Seewinkels. BFB-Bericht  
(Biologisches Forschungsinstitut für Burgenland, Illmitz 1–37: 41 - 48.
- Pott, Richard/ Hüppe, Joachim (2007): Spezielle Geobotanik. Pflanzen-Klima-Boden.  
1.Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Radic, Tino (2005): Induzierte Polarisation. In: Knödel, K./Krummel, H./ Lange, G. (Hrsg.):  
Geophysik. Methodenhandbuch Deponieuntergrund. Band 3. Berlin: Springer-Verlag, 71-100
- Rhoades, James D./ Corwin, Dennis L./ Lesch, Scott M. (1999): Geospatial Measurements of Soil Electrical  
Conductivity to Assess Soil Salinity and Diffuse Salt Loading from Irrigation. In: Corwin, D. L./  
Loague, K./ Ellsworth, T.R.: Assessment of Non-Point Source Pollution in the Vadose Zone.  
Geophysical Monograph 108. Washington: American Geophysical Union, 197-215
- Salem, Hilmi S./ Chilingarian, George V. (1999): The cementation factor of Archie's equation for shaly  
sandstone reservoirs. In: Journal of Petroleum Science and Engineering 23: 83-93
- Sudduth, K.A./ Kitchen, N.R./ Wiebold, W.J./ Batchelor, W.J./ Bollero, G.A./ Bullock, D.G./ Clay, D.E./  
Palm, H.L./ Pierce, F.J./ Schuler, R.T./ Thelen, K.D. (2005): Relating apparent electrical conductivity to  
soil properties across the North-Central USA. In: Computers and Electronics in Agriculture 46: 263-  
283
- Schwab, Adolf J. (2013): Begriffswelt der Feldtheorie. Elektromagnetische Felder, Maxwell-Gleichungen,  
Gradient, Rotation, Divergenz. 7.Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg
- Telford, W.M./ Geldart, L.P./ Sheriff, R.E. (1990): Applied Geophysics. Second Edition.  
Cambridge: Cambridge University Press
- Van Leeuwen, Cornelis / Seguin, Gerard (2006): The Concept of Terroir in Viticulture.  
In: Journal of Wine Research, Vol. 17, No. 1/1-10
- Wienberg, Reinhard (1990): Zum Einfluß organischer Schadstoffe auf Deponietone.  
Teil 1: Unspezifische Interaktionen. In: AbfallwirtschaftsJournal 2. Nr.4: 222-230
- Won, I.J./ Keiswetter, Dean A./ Fields, George R.A./ Sutton, Lynn C. (1996): GEM-2: A New Multifrequency  
Electromagnetic Sensor. Journal of Environmental and Engineering Geophysics. Vol. 1: 129-137

# 9 Anhang

GEM-2: Weingarten 2 am 14.01.2017



Anhang 1: Multifrequenz-Verfahren mit GEM-2 in Weingarten 2 Reihe 1

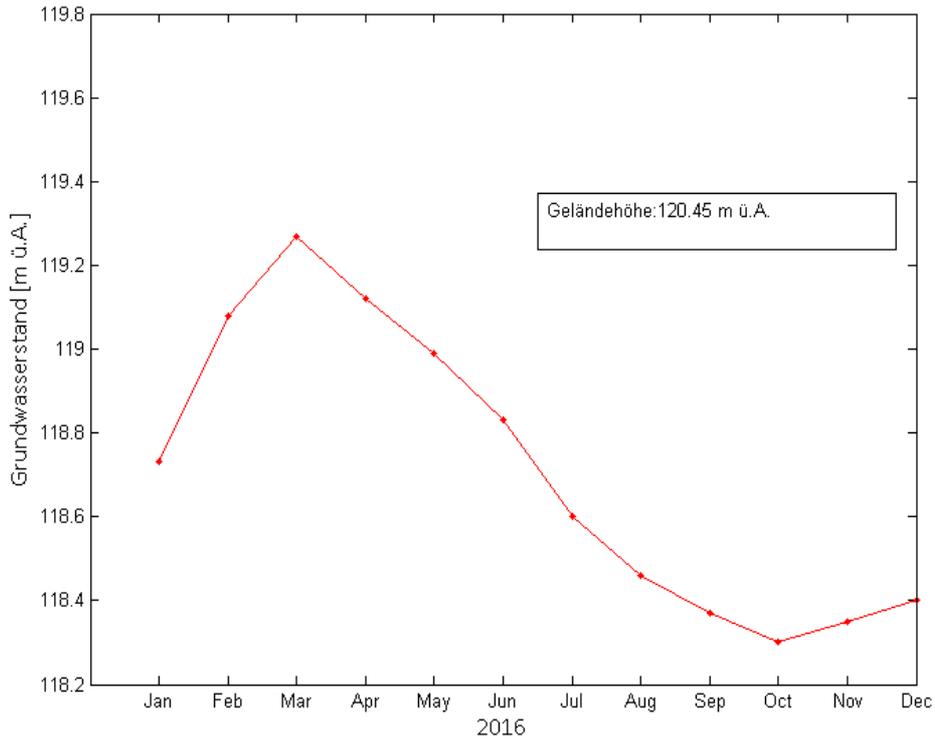


Anhang 2: Karte der Lackenentwicklung (Quelle: Dvorak, Grüll, Köhler, Rauer: Vogelparadies mit Zukunft? Ramsar Gebiet Neusiedler See – Seewinkel; [http://www.nationalpark-neusiedlersee-seewinkel.at/tl\\_files/images/downloads/Lackenentwicklung\\_1855-1986.jpg](http://www.nationalpark-neusiedlersee-seewinkel.at/tl_files/images/downloads/Lackenentwicklung_1855-1986.jpg) )



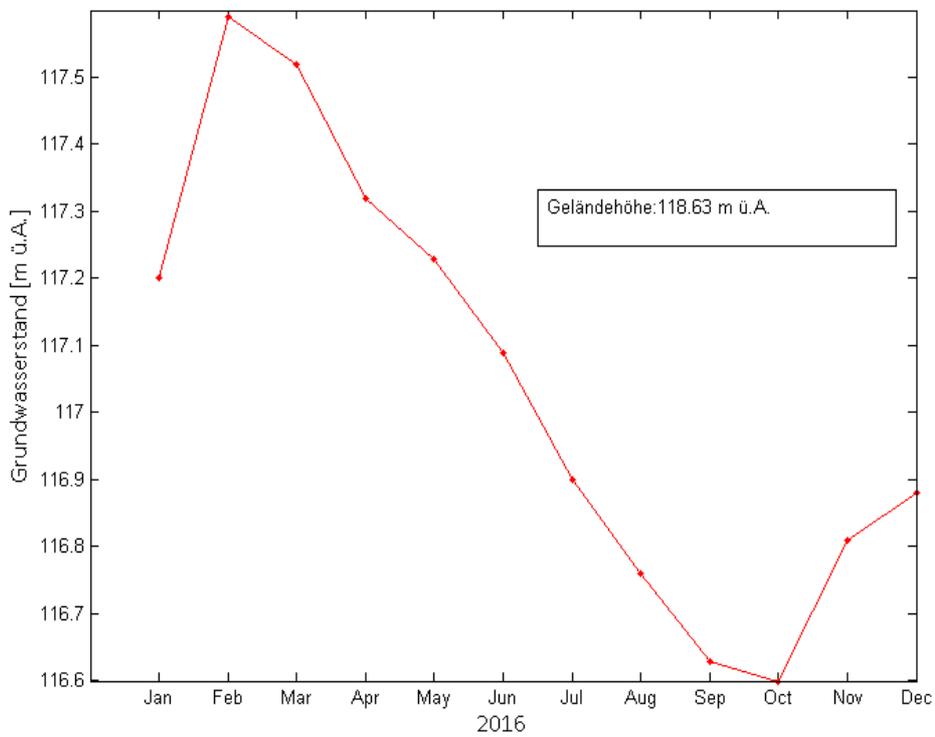
Anhang 3: Übersichtskarte der Grundwasserstationen

Apetlon, Bl 109 A



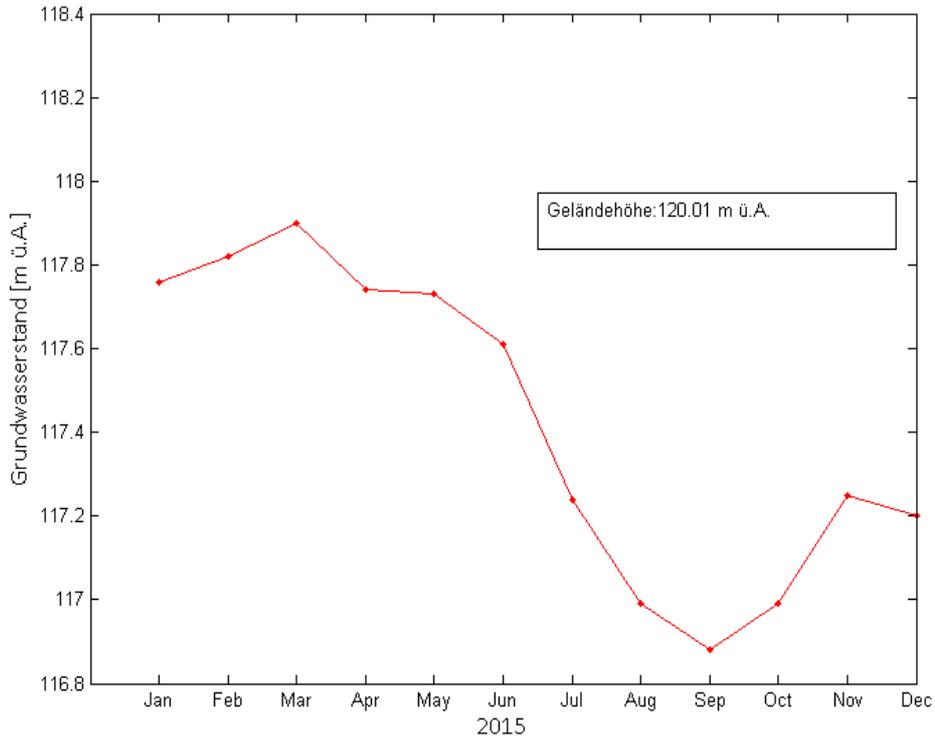
Anhang 4: Grundwasserstand des Jahres 2016 an der Station Bl 109 A (Nähe Weingarten 8)

Apetlon, Bl 126 A



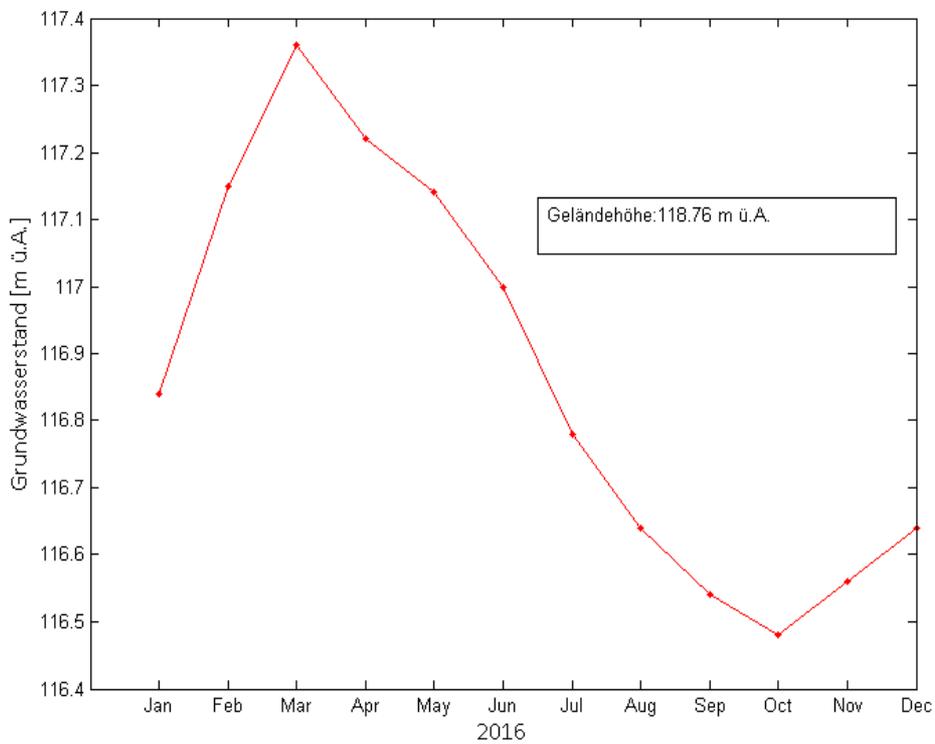
Anhang 5: Grundwasserstand des Jahres 2016 an der Station Bl 126 A (Nähe Weingarten 7)

Apetlon, Bl 167

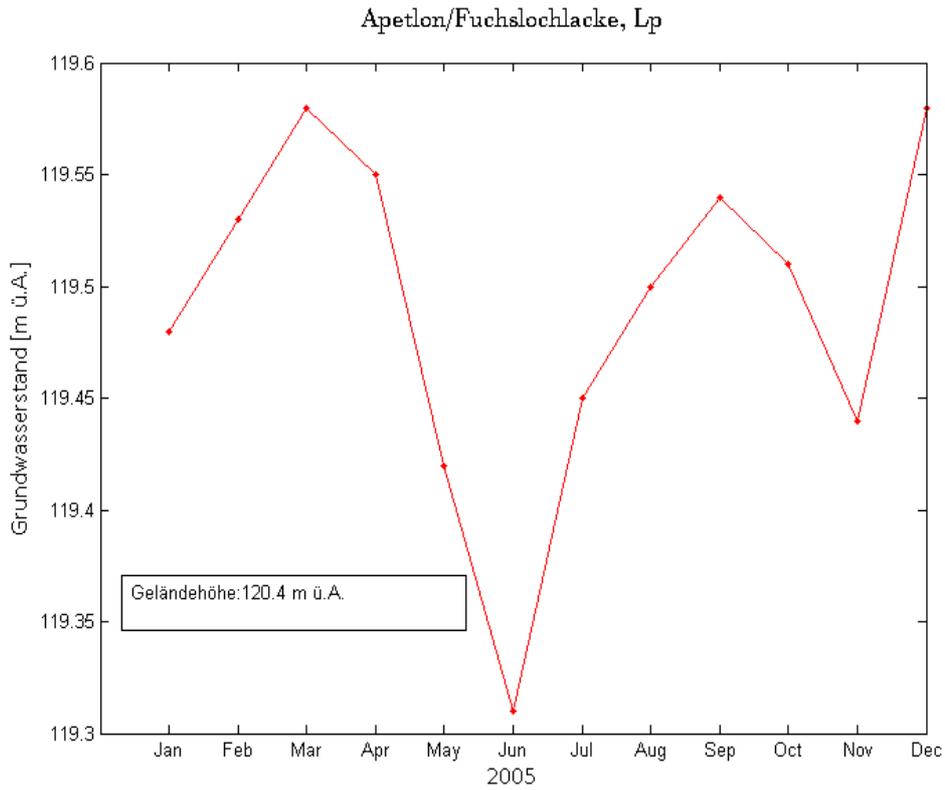


Anhang 6: Grundwasserstand des Jahres 2015 an der Station Bl 167 (Nähe Weingarten 5)

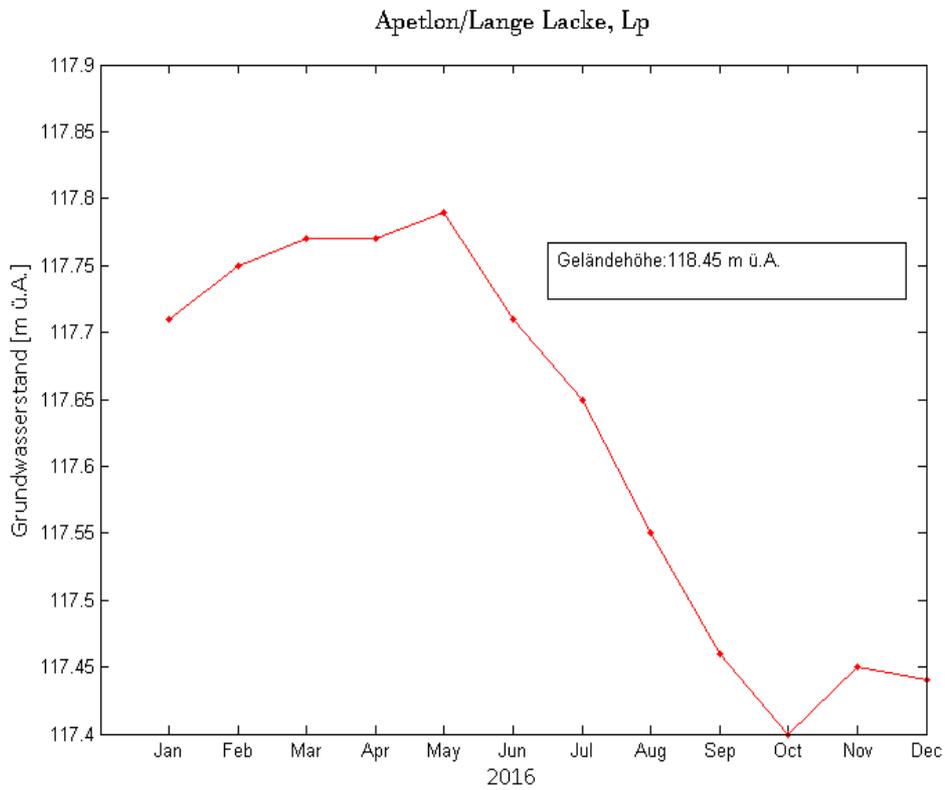
Apetlon, Bl 171



Anhang 7: Grundwasserstand des Jahres 2016 an der Station Bl 171 (Nähe Weingarten 2, 3, 4)

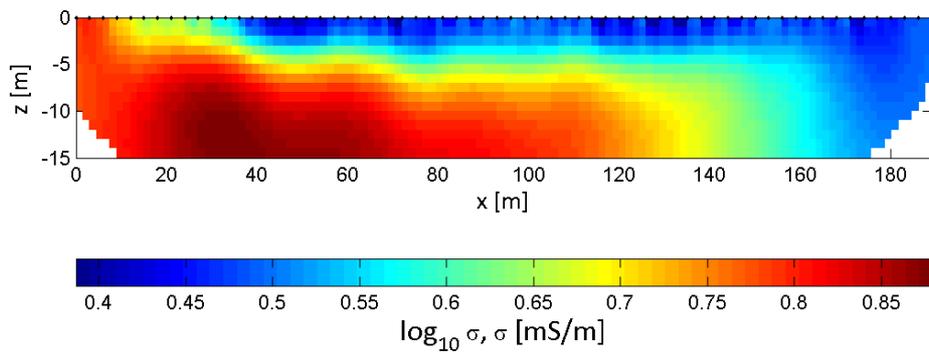


**Anhang 8:** Grundwasserstand des Jahres 2005 an der Station Fuchslochlacke, Lp (Nähe Weingarten 8)



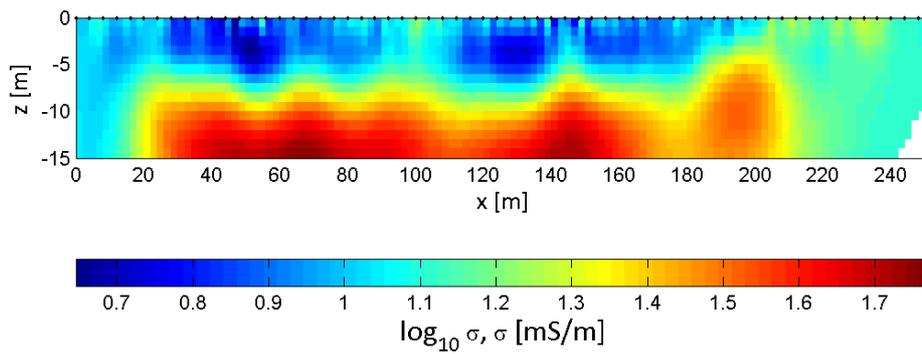
**Anhang 9:** Grundwasserstand des Jahres 2016 an der Station Lange Lacke, Lp (Nähe Weingarten 6 und 7)

### ERT: Weingarten 2 Reihe 3 am 23.03.2017



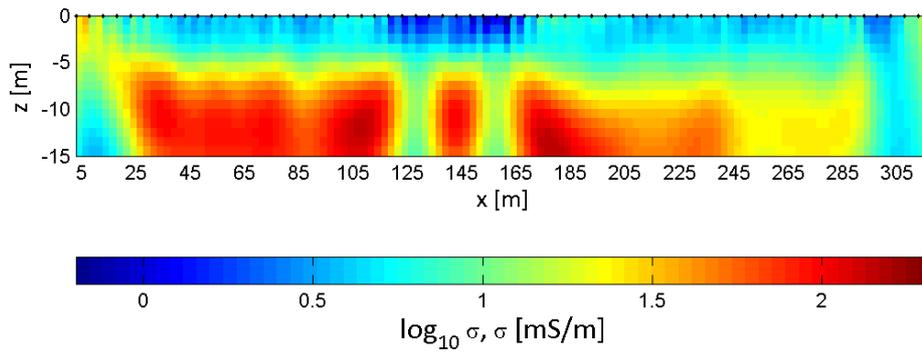
Anhang 10: Inversionsergebnis der Gleichstrommessung des Weingartens 2

### ERT: Weingarten 3 Reihe 13 am 23.03.2017



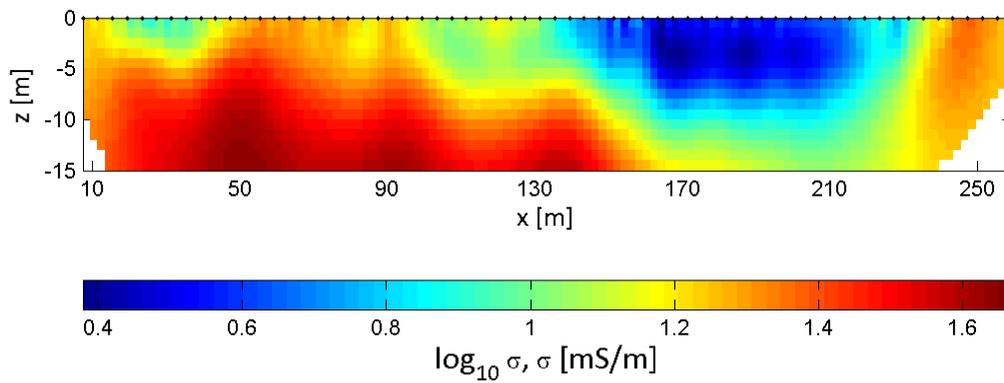
Anhang 11: Inversionsergebnis der Gleichstrommessung des Weingartens 3

### ERT: Weingarten 4 Reihe 2 am 23.03.2017



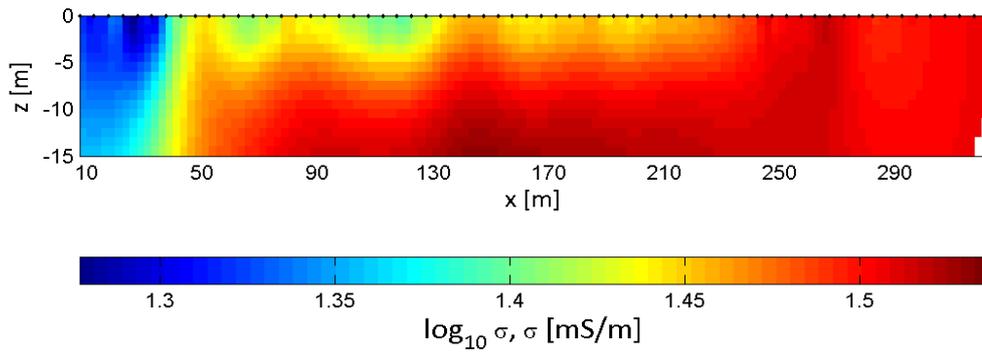
Anhang 12: Inversionsergebnis der Gleichstrommessung des Weingartens 4

### ERT: Weingarten 5 Reihe 2 am 23.03.2017



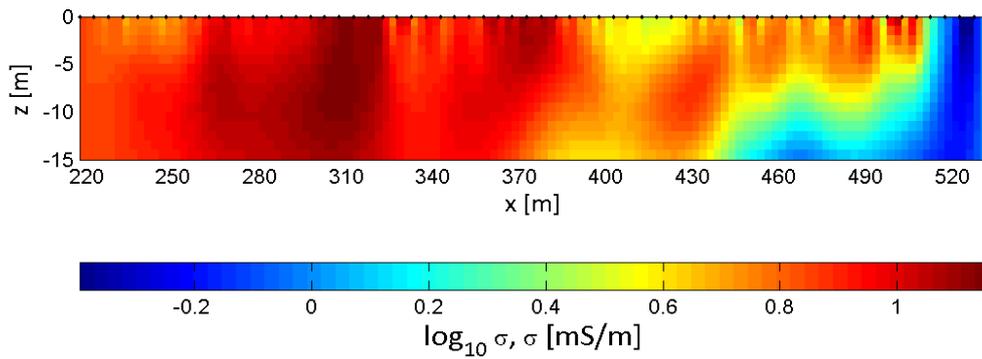
Anhang 13: Inversionsergebnis der Gleichstrommessung des Weingartens 5

### ERT: Weingarten 7 Reihe 2 am 23.03.2017



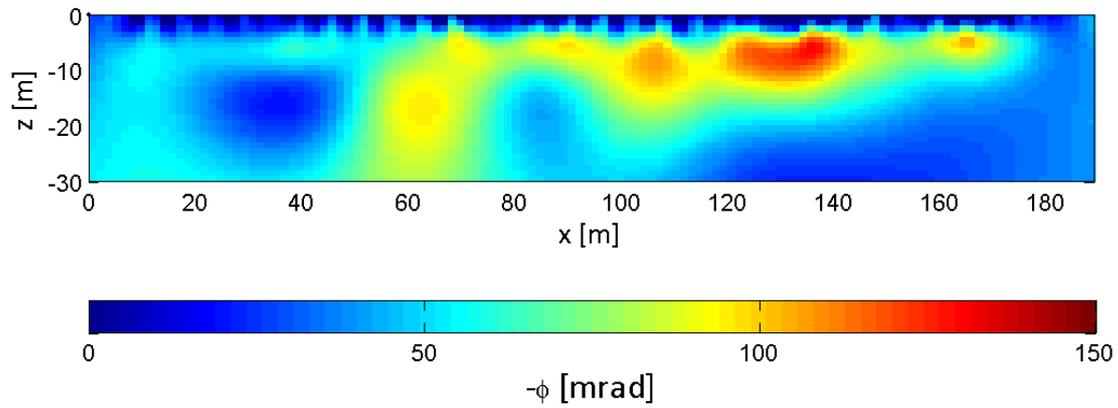
Anhang 14: Inversionsergebnis der Gleichstrommessung des Weingartens 7

### ERT: Weingarten 8 Reihe 1 am 19.01.2017



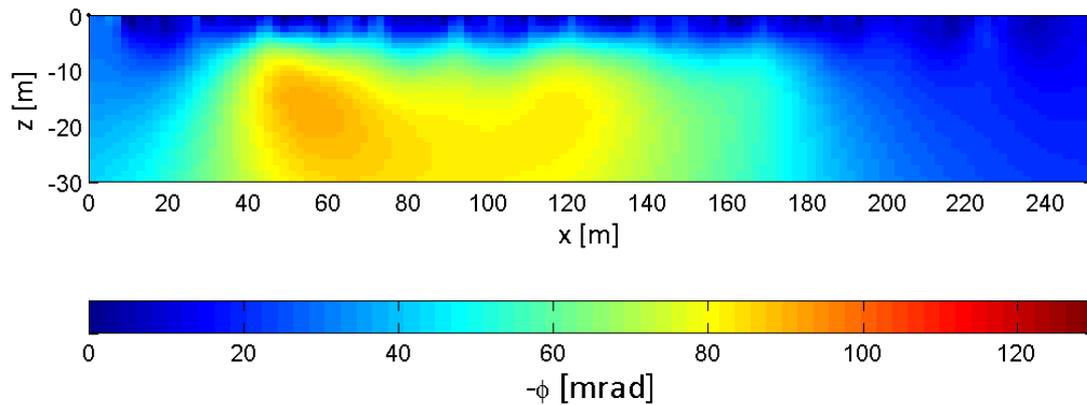
Anhang 15: Inversionsergebnis der Gleichstrommessung des Weingartens 8

## IP: Weingarten 2 Reihe 3 am 23.03.2017



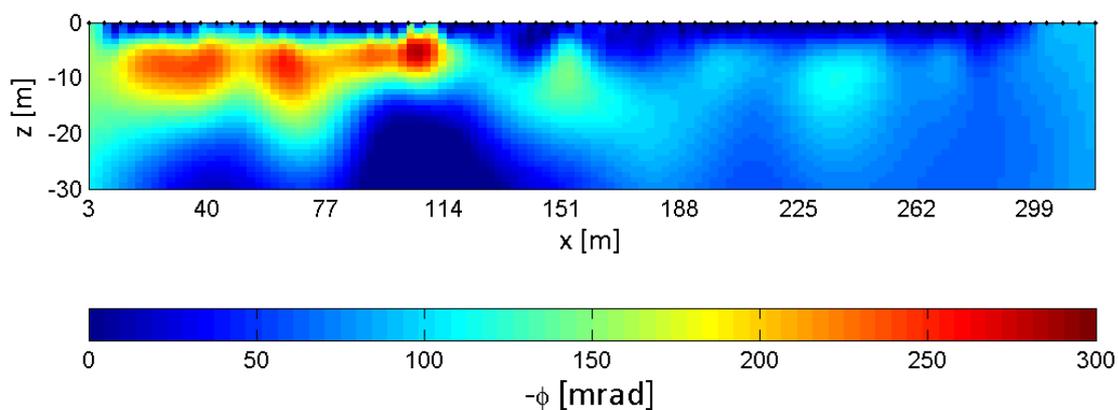
Anhang 16: Inversionsergebnis der IP des Weingartens 2 mit  $\text{err}(\text{pha})=15 \text{ mrad}$   $\rightarrow$   $\text{pha RMS } 3.294$

## IP: Weingarten 3 Reihe 13 am 23.03.2017



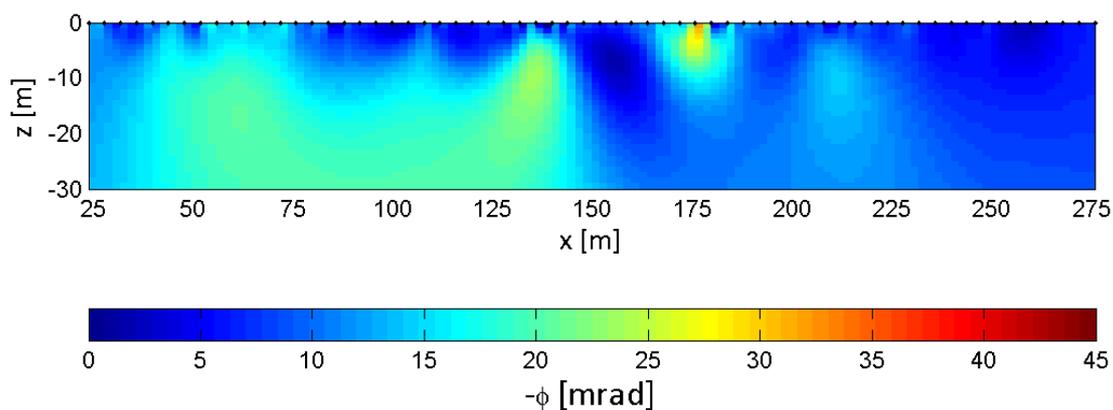
Anhang 17: Inversionsergebnis der IP des Weingartens 3 mit  $\text{err}(\text{pha})=14 \text{ mrad}$   $\rightarrow$   $\text{pha RMS } 3.739$

## IP: Weingarten 4 am 23.03.2017



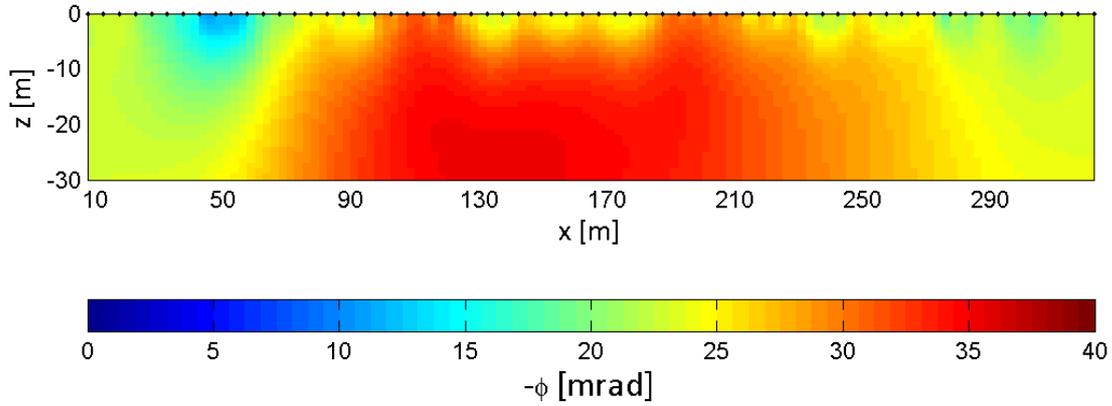
Anhang 18: Inversionsergebnis der IP des Weingartens 4 mit  $\text{err}(\text{pha})=20$  mrad  $\rightarrow$  pha RMS 3.557

## IP: Weingarten 5 Reihe 2 am 23.03.2017



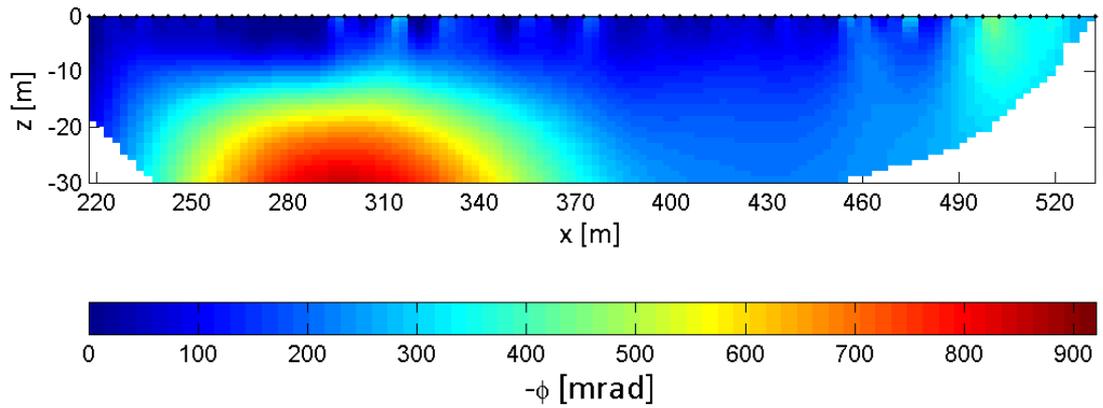
Anhang 19: Inversionsergebnis der IP des Weingartens 5 mit  $\text{err}(\text{pha})=8$  mrad  $\rightarrow$  pha RMS 3.014

### IP: Weingarten 7 Reihe 2 am 23.03.2017



Anhang 20: Inversionsergebnis der IP des Weingartens 7 mit  $\text{err}(\text{pha})=15 \text{ mrad}$   $\rightarrow$   $\text{pha RMS } 4.980$

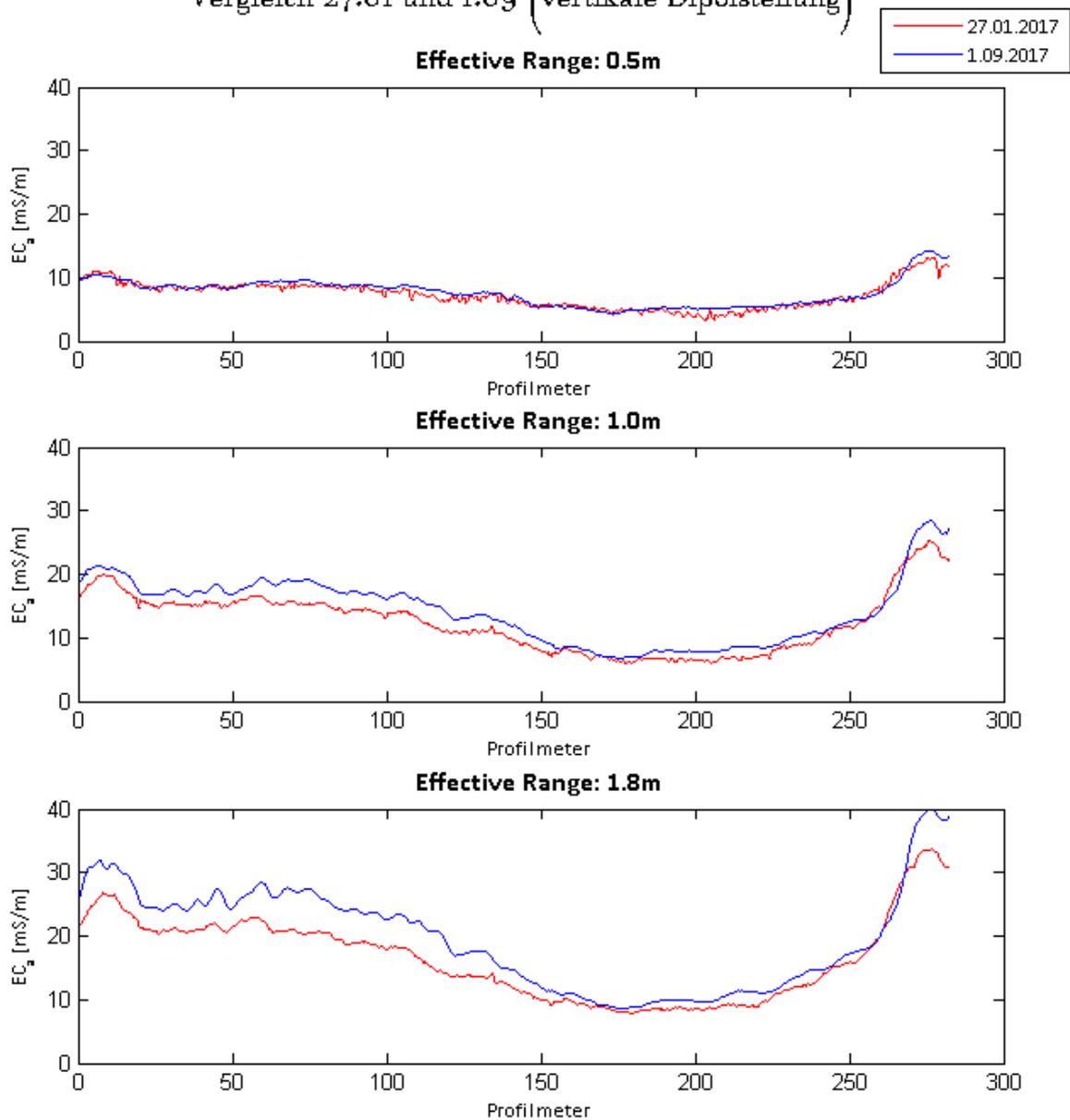
### IP: Weingarten 8 Reihe 1 am 19.01.2017



Anhang 21: Inversionsergebnis der IP des Weingartens 7 mit  $\text{err}(\text{pha})=45 \text{ mrad}$   $\rightarrow$   $\text{pha RMS } 7.763$

## Weingarten 5 Reihe 2

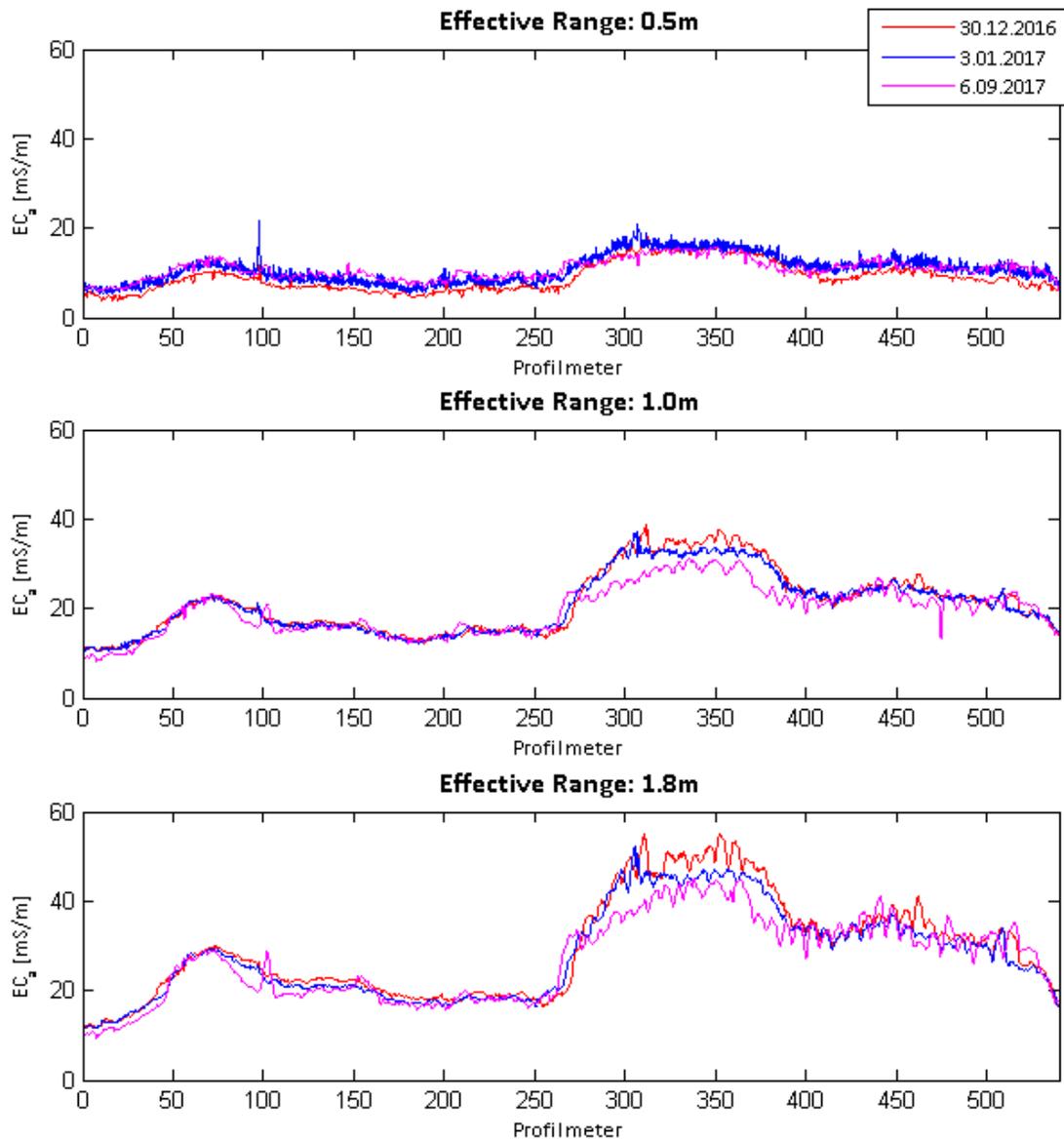
### Vergleich 27.01 und 1.09 (vertikale Dipolstellung)



Anhang 22: Vergleich der EMI-Auswertungen von 17.01 und 01.09.2017 (Weingarten 5 Reihe 2)

## Weingarten 8 Reihe 1

Vergleich 30.12.2016, 3.01.2017 und 6.09.2017 (vertikale Dipolstellung)



Anhang 23: Vergleich der EMI-Auswertungen von 30.12.2016, 03.01.2017 und 06.09.2017 (Weingarten 8 Reihe 1)