



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

„Archäologische Prospektion mit Bodenradar –
Fallstudie Mauerbach“

verfasst von

Anna Katharina Brüstle

angestrebter akademischer Grad

Magistra der Naturwissenschaften (Mag.rer.nat.)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 416

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Geophysik

Betreuerin / Betreuer:

Ao.Univ.-Prof.Dr. Bruno Meurers

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von Bodenradar als archäologische Prospektionsmethode. Dazu wurde im Vorfeld ein Untersuchungsgebiet im Kreuzgarten der Kartause Mauerbach ausgewählt. Die Archäologen des Bundesdenkmalamtes sind schon seit den 1990er Jahren in der Kartause Mauerbach tätig und die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit dienen als Ergänzung zu bereits vorhandenen Aufschlüssen.

Die Resultate der Bodenradarmessung wurden sowohl mit der Software APRadar von den Experten des ArcheoProspections Teams der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), die sich seit Jahren mit der Anwendung von Bodenradar und Magnetik für archäologische Fragestellungen beschäftigen, als auch mit ReflexW 3.5 © Karl-Josef Sandmeier; Sandmeier-geo ausgewertet. Abschließend wurden die Ergebnisse in einem ArcGIS-Projekt für verschiedene Tiefen dargestellt.

Dadurch wird der große Vorteil von Bodenradarmessungen, ein nicht-invasives hochauflösendes Detektieren von vorhandenen Strukturen, erkennbar. Auch ermöglichen die ArcGIS-Darstellungen eine bessere Sichtbarmachung der gefundenen Strukturen sowie die weiterführende Interpretation.

Im Anhang wird zusätzlich eine radiästhetische Erkundungsmethode nach Franz Hippmann beschrieben und deren Ergebnisse in einem ArcGIS-Projekt dargestellt. Dies ermöglichte eine Gegenüberstellung der gesammelten Daten, die jedoch nicht als Verifikation dienen soll.

Summary

The topic of this work is the application of ground penetrating radar as a method for archeological prospection. The investigation area is a part of the cloister garden of the charterhouse in Mauerbach, where archeologists of the Federal Monuments Office are investigating since the 1990ies. The results of this work will be used as an endorsement of the already documented findings.

During this work the GPR-data was processed both with the software APRadar by the experts of the ArcheoProspections team of the Central Institution for Meteorology and Geodynamics (ZAMG) in Vienna, who are well known for their work on the application of geophysical measurements for archaeological purposes, as well as with the software ReflexW 3.5 © Karl-Josef Sandmeier; Sandmeier-geo, Karlsruhe. Afterwards the processed information was implemented for visualization purposes in an ArcGIS-project regarding various depths. The representation of the data in ArcGIS maps shows for a start the widely-known benefit of GPR measurements, as a non-invasive fast detection method with a high resolution, but foremost the depiction allows a better visualization of the found structures as well as the following interpretation.

In the appendix the radiesthetic investigation method by Franz Hippmann is described and the results, after georeferencing, presented as ArcGIS maps. This kind of display allows the comparison of all received data, which will not serve as verification of the applied method.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung-----	iii
Summary-----	iii
I. Einführung in das Untersuchungsgebiet -----	1
Geschichtliches-----	1
<i>Aufbau der Kartause und Leben der Mönche</i> -----	3
<i>Projektgebiet</i> -----	5
II. Methodische Grundlagen des Bodenradar -----	7
2.1. <i>Geschichtliche Anwendung</i> -----	7
2.2. <i>Aufbau des Mess-Systems</i> -----	9
2.3. <i>Methodische Grundlagen</i> -----	11
2.3.1. Elektromagnetik - Maxwell- Gleichungen:-----	11
2.3.2. Die Wellengleichung für elektromagnetische Wellen-----	14
2.3.3. Welleneigenschaften-----	16
2.3.4. Verhalten von elektromagnetischen Wellen -----	20
1.4. Auflösung und Einflussbereich -----	23
1.4.1. Vertikale Auflösung (Tiefenauflösung)-----	24
1.4.2. Horizontale Auflösung -----	25
1.5. Materialeigenschaften: -----	26
III. Datenakquisition -----	31
3.1. Messkampagne -----	31
3.2. Datensampling -----	32
3.3. Datenbearbeitung-----	33
3.3.1. Prozessingschritte-----	34
3.3.2. Teufenbestimmung-----	37
3.3.3. Darstellungsmöglichkeiten für GPR-Daten in der Archäologie-----	38
IV. Daten des Bundesdenkmalamtes -----	41
Schnitt 27:-----	42
Schnitt 28:-----	47
Schnitt 29:-----	50
Schnitt 22-Süd:-----	51
Schnitte in ArcGIS dargestellt:-----	53
V. Durchführung der Bodenradar-Messungen mit ZAMG-ArcheoProspections -----	57

VI.	Darstellung der Ergebnisse -----	61
6.1.	Auswertung des ArcheoProspections Teams der ZAMG -----	61
6.2.	Auswertung mit dem Programm ReflexW 3.5 © Karl-Josef Sandmeier; Sandmeier-geo, Karlsruhe -----	69
	Horizontalschnitte der ReflexW 3.5 Auswertung im ArcGIS -----	73
VII.	Endbetrachtung -----	80
VIII.	Anhang - Radiästhesie -----	83
8.1.	Geschichte der Radiästhesie -----	83
8.2.	Allgemeines -----	85
	Die Geomantie -----	86
8.3.	Die Prospektionsmethode nach Hippmann -----	88
	Anwendungsbereiche: -----	92
8.4.	Fallstudie Mauerbach -----	93
8.5.	Ergebnisse der „energetischen Prospektion“ -----	97
8.6.	Endbetrachtung Radiästhesie -----	106
	Literaturverzeichnis -----	107
	Danksagung -----	111
	Curriculum Vitae -----	113

I. Einführung in das Untersuchungsgebiet

Geschichtliches

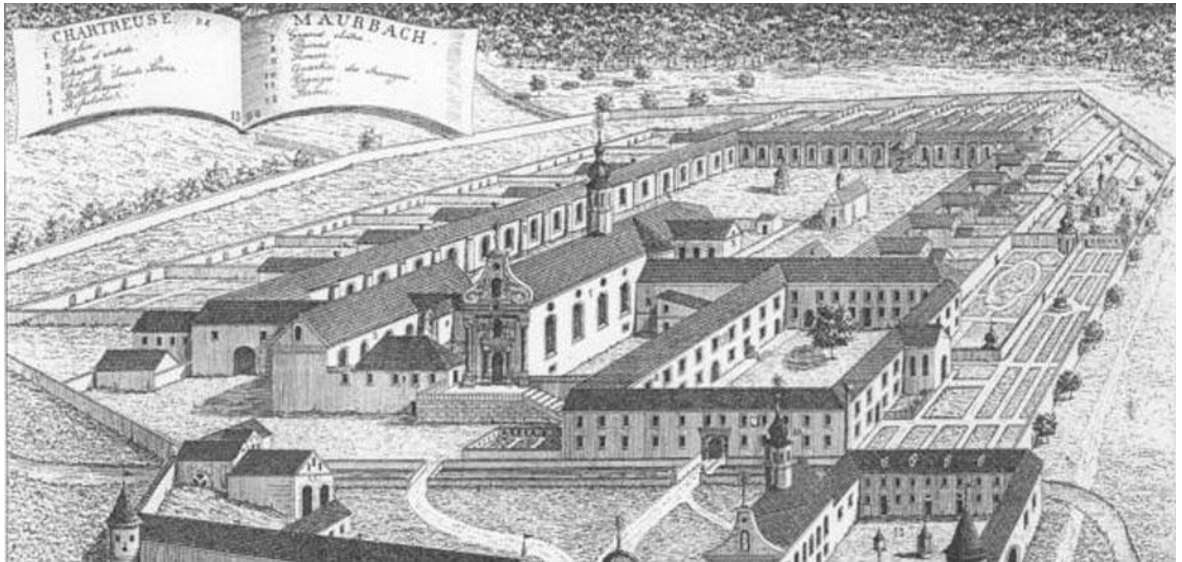


Abbildung 1: Kupferstich der Kartause Mauerbach

[<http://www.kartause.net/page/aggsbach/aggsbach.html>; Datum: 11.10.2012]

Die Gründung der Kartause Mauerbach fällt auf das Jahr 1313 n.Chr. zurück. Damals fasste Herzog Friedrich der Schöne „nach reiflicher Überlegung und mit Beistimmung seiner Brüder Leopold, Albert, Heinrich und Otto“ (Bermann, 1880, S. 317) den Entschluss auf dem Gute Mauerbach „zur Ehre der dreieinigen Gottheit, der seligen Jungfrau Maria, des heiligen Johannes Baptist, des heiligen Antonius und aller heiligen Gottes“ ein Kloster für einen Prior und 12 Mönche und zunächst demselben ein Spital für 12 Arme zu erbauen und die gesamte Anlage dem Kartäuser-Orden zu übergeben.

Der Orden der Kartäuser wurde 1084 vom heiligen Bruno von Köln in der Chartreuse, einem Tal bei Grenoble gegründet (Bundesdenkmalamt). Seitdem bedurfte jede Kartause einer Genehmigung durch den Prior der „Grande Chartreuse“, dem Vorstand des Ordens. Nach Benachrichtigung und Zustimmung des damaligen Vorsteher des Ordens, Prior Haymo zu Chartreuse, wurde der Prior der Kartause Seiz in der Steiermark, Gottfried, zum Vorsteher des neuen Klosters ernannt und das Tal, in dem das Gut Mauerbach lag, in Vallis S. Antonii (Tal des heiligen Antons) umbenannt (Bermann, 1880, S. 318).

Außerdem ist bei (Bermann, 1880, S. 319) zu lesen dass nach einer kurzzeitigen Unterbrechung des Baus aufgrund der Bewerbung Herzog Friedrichs um die deutsche Krone, die Sorge um Mauerbach dem Pfarrer Gerlach zu Traiskirchen, dem Kaplan Friedrichs Mutter, übergeben wurde. Dieser „förderte die von Friedrich erhaltene Mission mit solch Eifer und mit solcher Umsicht, dass die Kartause schon am 17.März 1316 beendet dastand“ und von Prior Gottfried und seinen 12 Mönchen aus der Kartause Seiz im abermals umbenannten Vallis Omnium Sanctorum (im Allerheiligental) bezogen werden konnte.

Ein kurzer Umriss der bewegten Geschichte der Kartause wird ebenfalls auf der Homepage des Bundesdenkmalamtes zur Verfügung gestellt (Bundesdenkmalamt). Demnach kam es, da die Kartause seit jeher eine starke Verbindung zum Hause Habsburg hatte, im 15. und 16. Jhdt. zu Plünderungen durch die Türken, ebenso wie durch Herzog Albrecht und die Ungarn. Zusätzlich erfolgte eine weitgehende Zerstörung der Bausubstanz durch das Neulengbacher Erdbeben 1590.

Nach dem letzten Einfall der Türken 1683 wurde mit dem Wiederaufbau der Innenausstattung (im Hochbarock) und einer weiterführenden Neugestaltung der Ausstattung besonders im Kaisertrakt, dem Kreuzgang und den Zellen begonnen. Besondere Beachtung verdient dabei die damals durchgeführte Ausstattung der Klosterkirche mit Stuck und Grisaille Malerei.

1782 hob Joseph II. die Kartause auf. Dies führte zum Auszug der letzten Kartäuser und einer Räumung der in der Kartause befindlichen Unterlagen. 10.000 Bände der Klosterbibliothek wanderten in die spätere National- und Universitätsbibliothek, Klosterinventar wurde versteigert und Streubesitz ging in einen sog. Religionsfond über. Außerdem wurden die Gebeine des Kartäusergründers Friedrich des Schönen und seiner Tochter exhumiert und nach Wien in den Stephansdom überstellt.

Die Aufhebung der Kartause markiert das Ende einer über 400 Jahren dauernden „vita contemplativa“ in Mauerbach (Bundesdenkmalamt).

Joseph II übergab das Gebäude danach an die Comune Wien zur Unterbringung der „Armen, Gebrechlichen oder sonst eckelhaft Kranken“ aus den Wiener Spitälern (bis zu 800 Patienten). Diese Zweckentfremdung führte zu erheblichen baulichen Veränderungen. Die Laienkirche wurde in einen mehrstöckigen Spitalstrakt umgebaut und der Kreuzgang wurde in weitere Schlafräume unterteilt.

In der Zeit des 2.Weltkriegs (1938-1945) wurde das Kloster als Lazarett genutzt, von 1945-1961 war es ein Obdachlosenasyll für 100 Familien.

Im Jahr 1961 fiel die Kartause durch das Konkordat an die Bundesrepublik Österreich, die ab 1979 die Bundesgebäudeverwaltung mit der baulichen Betreuung und Verwaltung beauftragte. Seit 1984 ist das Bundesdenkmalamt im Bereich der Kartause Mauerbach tätig. Dabei wurden umfangreiche Restaurierungen durchgeführt, die eine Rückführung der zahlreichen Umbauarbeiten während der anderweitigen Nutzungen darstellen. Durch ihren Einsatz konnte bereits ein Großteil der barocken Kartause wiederhergestellt werden.

Zusätzlich wird das Areal zur didaktischen Aufbereitung von Problemen der Baudenkmalpflege herangezogen. Seit 2003 besteht eine weitere Nutzung neu adaptierter Bereiche im Nordtrakt durch die Restaurier-Werkstätten der Abteilung Bodendenkmale.

Aufbau der Kartause und Leben der Mönche

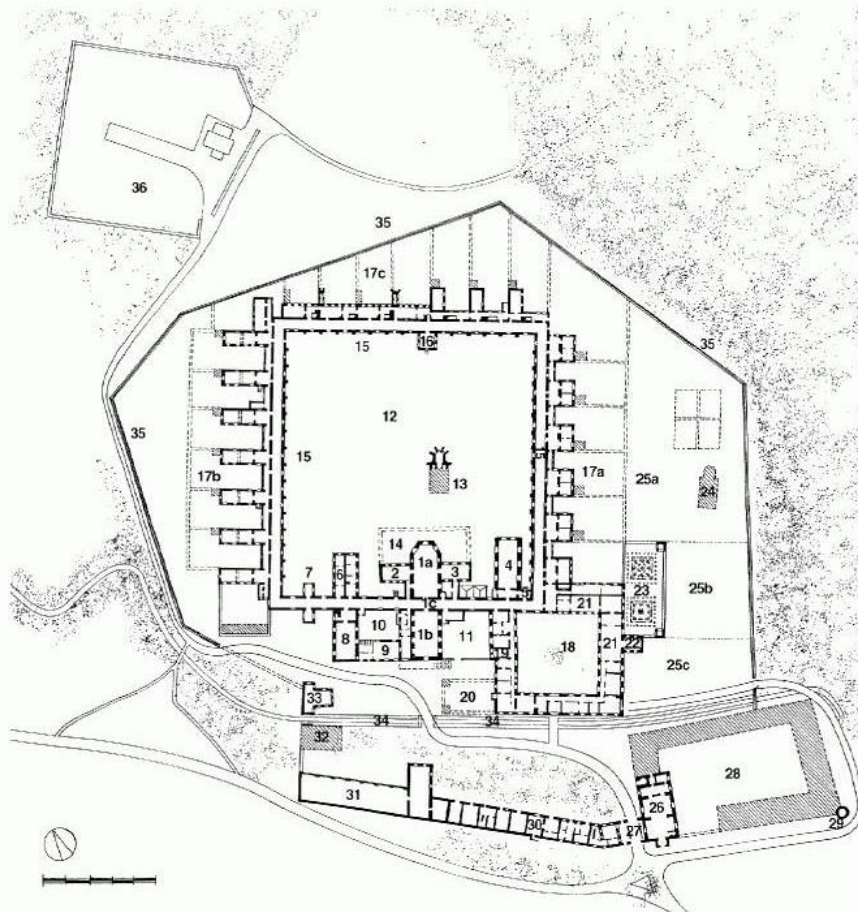


Abbildung 2: Orientierungsplan Kartause Mauerbach

[http://homepage.univie.ac.at/rudolf.koch/geocities/studiolo_2000a/mauerbach/frame458.htm;

Datum: 11.10.2012]

Wie in Abbildung 2 ersichtlich besitzt die Kartause in Mauerbach die typische Form mit Kreuzgang und darum angeordnet abgehenden Zellen, die für die Unterbringungen der Mönche sorgten. Der Kreuzgang zählt zu den längsten in Europa und hat eine Kantenlänge von 110 Metern. Umgeben ist die gesamte Kartause von einer massiven barocken Natursteinmauer, siehe Abbildung 3.



Abbildung 3: Außenansicht der Kartause Mauerbach

[<http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Kartause-mauerbach-zellen.jpg>; Datum: 11.10.2012]

Die Zellen sehen aus wie kleine Häuschen mit einer Unterteilung in 3 Zimmer (Schlafraum, Vorraum, und Gebetsraum) und sind jeweils von einem Gärtchen umgeben. Die Mönche wohnten einzeln in ihren Unterkünften und „teilten ihre Zeit in Gebet, Stillschweigen und Arbeit“. Durch ihr lebenslanges Schweigegelübde verlief das Leben der Mönche eher eremitisch und schweigend, sie sollten in Stille und Einsamkeit die Unio Mystica suchen (Bundesdenkmalamt). Sie verließen nur zu den Messen ihre Zellen (beginnend mit der Frühmesse um Mitternacht) und an Sonn- und Feiertagen sowie am Todestag eines Ordensbruders trafen sie sich zum gemeinsamen Mahl im Refektorium.

Bei (Bermann, 1880, S. 320 f.) ist der Stiftsbriefs, der am 19.Mai 1316 in Wien durch König Friedrich ausgestellt wurde, aufgezeichnet. In ihm sind die Grundrechte und Besitztümer

der Kartause aufgelistet. Dazu gehörten unter anderem der „Berg Mauereck, der Wald „Wispuch“, das Bergrecht zu Gumpoldskirchen und Pfaffstetten, die Zehenten mehrerer umliegender Dörfer und die freie Einfuhr aller Bedarfsmittel wie Kleider, Speisen, Holz und Leder“ Da also jede Kartause ökonomisch unabhängig war, lebten auch Arbeiter und Laien in der Kartause, die zur Bewirtschaftung des Landbesitzes gebraucht wurden.

Projektgebiet

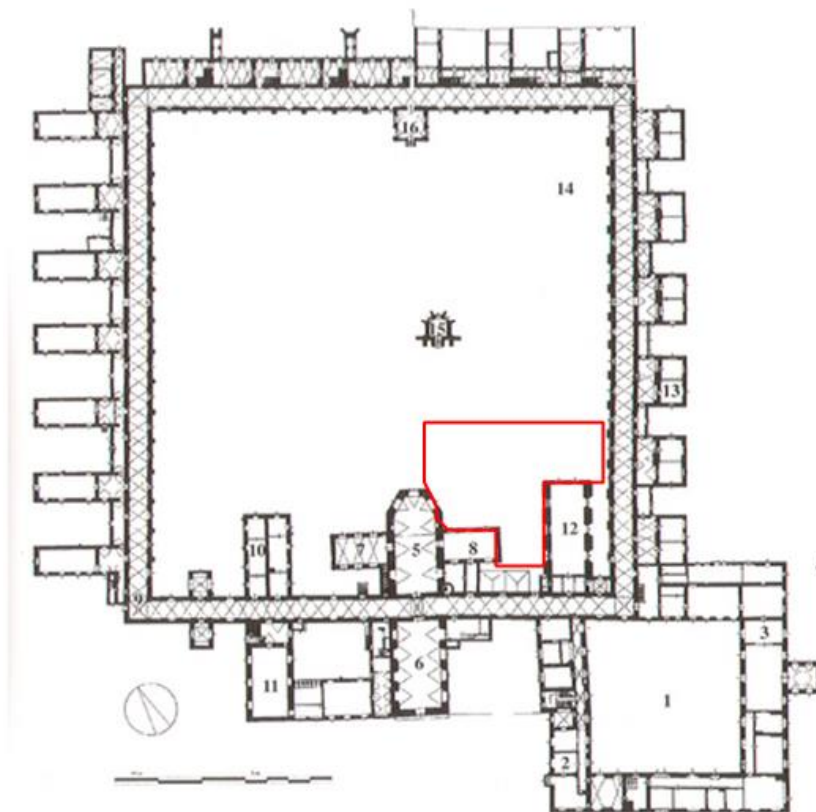


Abbildung 4: Projektgebiet

http://www.bda.at/text/136/1100/6170/1/galerie/Grundriss_Legende-zu-Grundriss; 5.8.2013

Für die vorliegende Arbeit wurde ein Gebiet im südöstlichen Teil des Kreuzgartens definiert – hier dargestellt durch die rote Umrandung im Plan der Kartause. Die Auswahl erfolgte aufgrund der Begehrbarkeit des Areals und aufgrund der Möglichkeit einer Übereinstimmung und Überprüfung mit bereits durchgeführten Grabungsarbeiten der Archäologen des Bundesdenkmalamtes.

II. Methodische Grundlagen des Bodenradar

2.1. Geschichtliche Anwendung

Die geophysikalische Methode des Bodenradar (**Ground Penetrating Radar**) hat ein breites Anwendungsspektrum. Sie wurde ursprünglich entwickelt um lithologische Kontaktflächen, geologische Falten und zusammenhängende Felssysteme aufzulösen. Die Möglichkeit, vergrabene Objekte und Hohlräume zu lokalisieren führte zur Anwendung dieser Methode in der Archäologie. Die ersten Geräte wurden schon Anfang des 20. Jahrhunderts (Hülsmeier, 1904 und Hülsenbeck 1926) (Daniels, 1996, p. 2) entwickelt, jedoch erst in den 60er Jahren - nach der Einführung von kommerziellen Bodenradar-Messgeräten - begann der produktive Einsatz von GPR (Leckebusch, Jürg, 2001, S. 18)

Die Studie in Chaco Canyon, New Mexico (Vickers et al. 1976), 1975 war eine der ersten bekannten Durchführungen dieser Methode (Conyers, 1997, p. 19) (Leckebusch, Jürg, 2001, S. 18).

Die ersten Aufzeichnungen über die Fundstelle Chaco Canyon gehen zurück ins Jahr 1844 durch Gregg (Conyers, 1997, p. 19). Seit 1907 ist das Gebiet als Nationalpark deklariert. Die früheren Studien und



Abbildung 5: Pueblo Bonito aus der Sicht vom Alto Wanderweg

[<http://www.newmexicohistory.org/filedetails.php?fileID=21153>;
Datum: 11.10.2012]

Ausgrabungen, die 1914 durch Nels Nelson begonnen wurden, fanden in einer Anwendung des Bodenradars im Jahr 1975 durch Hayes/Vickers eine Fortsetzung. Heute sind 13 Hauptruinen in diesem natürlichen Canyon bekannt, die dem Volk der Anasazi, den damals dort ansässigen amerikanischen Ureinwohnern, zugeteilt werden.

Daran schlossen sich Studien an, bei denen GPR eingesetzt wurde um vergrabene/verschüttete Steinwände und Keller, hauptsächlich im Osten der USA gelegen, offenzulegen. Diese ersten Erfolge führten zur weiteren Ausdehnung der geophysikalischen

Anwendung und es wurden Studien in Zypern (Hala Sultan Tekke, 1979) und in El Salvador (Joya de Cerén), dem nord-amerikanischen Pompeji, durchgeführt. Alle diese Anwendungen wurden auf trockenem Boden durchgeführt, der nahezu transparent für die elektromagnetische Wellenausbreitung ist (Conyers, 1997, p. 19).

Der erste schwierige Einsatz des Bodenradars in der Archäologie erfolgte in Kanada, in der Provinz Labrador in der Red Bay 1982/1983 (Vaughan 1986) (Leckebusch, Jürg, 2001, S. 18).

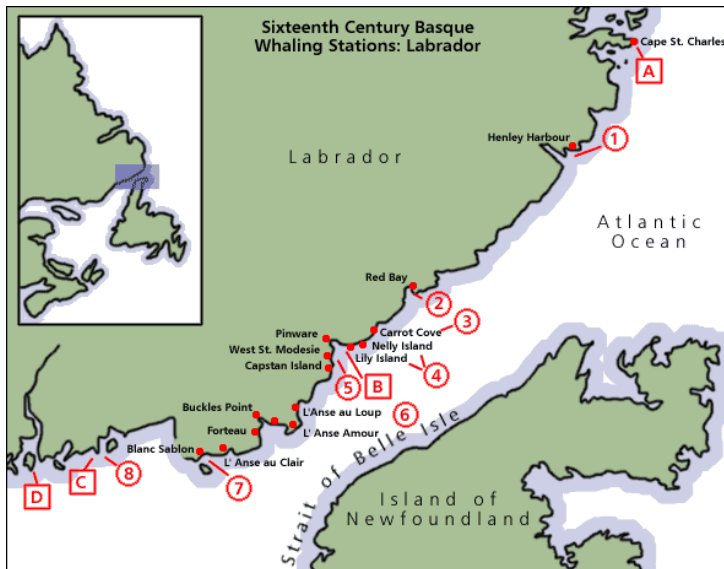


Abbildung 6: Baskische Walfangdörfer in der Provinz Labrador (Kanada) [http://www.heritage.nf.ca/environment/wh_i1.html; Datum: 11.10.2012]

Das Ziel war die Freilegung von verschütteten Gräbern und Hauswänden eines baskischen Walfangdorfes aus dem 16. Jahrhundert.

Lt. (Conyers, 1997, p. 19) bestand die Herausforderung darin, in nassen Böden und mit den vorliegenden natürlichen Eigenschaften, die zu einem

Versmieren der Radardaten führen können, eine möglichst

gute Auflösung zu erreichen. Die Grabbeigaben führten zu keinen nennenswerten Reflexionen, jedoch konnte der gestörte Boden in den Grabhohlräumen aufgelöst werden, sofern keine großen darüber liegenden Felsbrocken die Daten beeinträchtigten.

In Japan wurden ebenfalls Mitte der 80er Jahre einige umfassende Bodenradar-Erkundungen durchgeführt, unter anderem das bis 1993 größte und erfolgreichste Projekt überhaupt (Imai et al. 1987). Das Ziel war verschüttete Häuser und Hügelgräber aus dem 6.Jhdt. v.Chr. zu lokalisieren (Conyers, 1997, p. 20) (Leckebusch, Jürg, 2001, S. 18). Aufgrund der Radargramme war es möglich die früheren Behausungen unter zwei Meter dickem vulkanischem Bimsstein aufzulösen, da die Tonböden der Häuser im Vergleich zu dem darauf liegenden Bimsstein eine starke Diskontinuität aufwiesen.

Diese ersten Untersuchungen mittels Bodenradar wurden also zur Detektion und Lokation von archäologisch interessanten Objekten mit anschließenden Grabungsarbeiten durchgeführt. Da während dieser ersten Phase die Aufzeichnungen nur auf Papier erfolgten war eine spätere Auswertung und anderweitige Darstellungen der Daten nicht möglich. Die

ersten Versuche in dieser Richtung wurden lt. Leckebusch und Conyers (Conyers, 1997, p. 20), (Leckebusch, Jürg, 2001, S. 18) von Goodman und Kollegen (Goodman 1994; Goodman und Nishimura 1993; Goodman et al. 1994; Goodman et al. 1995) durchgeführt, die Pionierleistungen in der Datenaufnahme und im Prozessieren darstellen. Der erstmalige Einsatz von Zeit- und Tiefenschnitten, 2-dimensionalen Simulationsmodellen und 3-dimensionalen Rekonstruktionen der verschütteten Objekte führte zur Freilegung von Keramiköfen, Hügelgräbern und Steingräbern.

Einer der größten Fortschritte des Bodenradars als Anwendung in der Archäologie war die Umwandlung der aufgezeichneten Zeiten in reale Tiefen durch die Bestimmung der Radarwellen-Geschwindigkeit (Imai et al. 1987; Vaughan 1986).

Die ursprüngliche Anwendung des Bodenradars zur Identifizierung von verschütteten Objekten kann durch ein darauffolgendes Processing am Computer und verschiedensten Darstellungsmethoden erweitert werden, um dadurch bessere Interpretationsmöglichkeiten und Informationen über das Zielgebiet zu erlangen.

Die Methode Bodenradar wird besonders in der heutigen Zeit, in der ein großer Teil der Archäologie mit der Rettung und Erhaltung von archäologischen Fundstellen sowie der Kulturgutverwaltung beschäftigt ist, als nicht-invasive Methode hoch geschätzt. Es ist aufgrund der begrenzten finanziellen Mittel oft nicht mehr möglich große Bereiche zur Datenakquisition auszugraben, daher ist gerade die Bedeutung von Methoden, die kostengünstig in relativ kurzer Zeit Informationen über mögliche Fundstellen liefern, gestiegen (Leckebusch, Jürg, 2001, S. 9). Außerdem werden durch die jüngsten Fortschritte dieser Technik neue Möglichkeiten der Einbindung geophysikalischer Daten in die archäologische Interpretation erschlossen.

2.2. Aufbau des Mess-Systems

Bodenradarmessgeräte sind im Grunde genommen simpel, da sie einfach die Amplitude des reflektierten Signals in Kombination mit der Zeit, die während der Aussendung und dem Empfang des Signals vergangen ist, aufnehmen. Die zentrale Einheit des GPR ist daher eine Zeitaufnahmeeinheit, die die Generierung und Aufnahme des Signales kontrolliert.

Die folgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung des Messsystems.

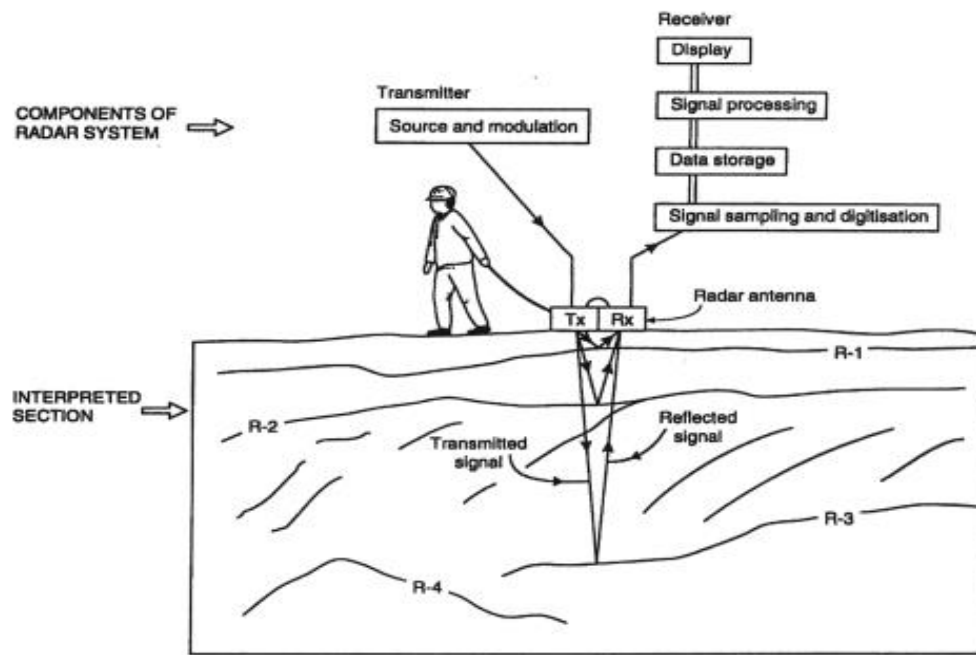


Abbildung 7: schematische Darstellung eines Bodenradar Messsystems [<http://ncptt.nps.gov/investigating-the-whittington-and-ailhaud-st-anne-sites-with-ground-penetrating-radar/>; Datum: 11.10.2012]

Tx ist hier die Sendeantenne (Transmitter). Sie sendet das gewünschte Signal in den Untergrund das von Rx, der Empfangsantenne (Receiver), wieder aufgenommen wird. Die Antennen werden während der Messkampagne in einem Schlitten oder einem Wagen auf einer Linie über den Boden gezogen. Die Skizze zeigt ebenfalls eine schematische Darstellung des zurückgelegten Weges des Signals und seine Reflexion an einer Diskontinuität. Ein solcherart aufgezeichneter Strahlenweg wird als Spur (Trace) bezeichnet und durch die Kombination mehrerer Spuren nebeneinander kann ein 2-dimensionales Profil (Radargramm – in diesem Bild „interpreted section“ genannt) erzeugt werden.

Nach der Aufzeichnung durch die Empfangsantenne werden die Daten digital abgespeichert. Um vorab einen Überblick über die gesammelten Daten zu erhalten ist es schon während der Messung möglich, die Daten anzusehen. Dazu wird ein Display an die Speichereinheit des Messinstrumentes angeschlossen. Eine genauere Ausarbeitung der Daten erfolgt dann später durch geeignete Software.

Bei einer Anwendung von Bodenradar können verschiedene Möglichkeiten der Datenakquisition herangezogen werden. Entweder wird ein kontinuierliches Signal ausgesendet und auch laufend wieder aufgezeichnet, oder aber es wird in bestimmten Abständen (räumlich oder zeitlich) ein Messpunkt gesetzt. Der Vorteil bei räumlich

vorgegebenen Messpunkten ist die leichte und genaue Prozessierbarkeit der Daten nach der Aufzeichnung, dafür ist die Datenerhebung weitaus zeitaufwendiger. Bei einer kontinuierlichen Messung werden innerhalb kurzer Zeit viel größere Datenmengen erhoben.

Für eine gute nachfolgende Darstellung der Messergebnisse sowie einer Interpretation empfiehlt es sich vorab ein Messraster zu erstellen. Damit auch die maximale Aussagekraft erreicht wird sollten die Rasterdimensionierungen auf die zu erwartenden Verhältnisse abgestimmt werden. Am einfachsten ist natürlich die Erstellung eines rechteckigen Gitters. Sind die aufzufindenden Strukturen jedoch rund kann auch eine radiale Netzanordnung von Vorteil sein. Sogar ein rautenförmiges Messraster konnte beispielsweise bei der Anwendung in Zuckerrohrfeldern zu guten Erfolgen führen.

2.3. Methodische Grundlagen

Das Bodenradar nutzt den Wellen-Charakter von elektromagnetischen Feldern indem es elektromagnetische Impulse, hochfrequente elektromagnetische Wellen, in den Untergrund abstrahlt. Diese abgestrahlten Wellen werden an Diskontinuitäten reflektiert und abhängig von den Eigenschaften des untersuchten Materials unterliegt die Welle verschiedenen Einflüssen die sich auf die Amplitude auswirken.

Die Maxwell- Gleichungen beschreiben dabei mathematisch die Physik von elektromagnetischen Feldern bei zeitlicher Veränderung, während die Zustandsgleichungen eine Beziehung der elektromagnetischen Felder zur Erdstruktur und den dort herrschenden Materialeigenschaften herstellen. Eine Kombination dieser beiden Grundlagen liefert die Ausgangssituation für eine quantitative Beschreibung von Bodenradar-Signalen.

2.3.1. Elektromagnetik - Maxwell- Gleichungen:

Im 19. Jahrhundert formulierte der schottische Physiker James Clerk Maxwell die aus Experimenten abgeleiteten Gesetze der Elektrizität und des Magnetismus in knappen mathematischen Gleichungen. Durch diese sogenannten Maxwell-Gleichungen kann die Dynamik elektrischer und magnetischer Felder und ihre gegenseitige Wechselwirkung

beschrieben werden, da sie eine Relation mit deren Quellen, den elektrischen Ladungen und Strömen und sich ändernden Feldern herstellt.

Die differentielle Darstellung der Maxwell'schen Gleichungen:

Die folgende differentielle Darstellungsform der Maxwell-Gleichungen wurde aus (Jol, 2009, p. 6) entnommen.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

D ... dielektrische Verschiebungsdichte [As/m²]

E ... elektrische Feldstärke [V/m]

ρ ... elektrische Ladungsdichte [C/m³]

B ... magnetische Flussdichte [Vs/m²]

H ... magnetische Feldstärke [A/m]

j ... elektrische Stromdichte [A/m²]

t ... Zeit [s]

An der differentiellen Darstellungsform der Maxwell - Gleichungen lässt sich ihr physikalischer Inhalt sehr gut ablesen (Tipler, 1995, S. 995 ff).

Die 1. Gleichung wurde aus dem Gauß'schen Gesetz abgeleitet. Das Gauß'sche Gesetz beschreibt die Divergenz elektrischer Feldlinien bei positiven Ladungen und ihre Konvergenz bei negativen Ladungen. Für die 1. Maxwell-Gleichung heißt das, dass die Quellen des elektrischen Feldes Ladungen sind, wohingegen lt. 2. Maxwell-Gleichung die Divergenz des Magnetfeldes = 0 ist, das heißt dass das magnetische Feld quellenfrei ist.

Formel 3 wurde aus dem Faraday'schen Induktionsgesetz abgeleitet und es setzt das elektrische Feld **E** mit der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes **B** in Beziehung. In dieser Form heißt es dass ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld ein magnetisches (Wirbel-)Feld erzeugt.

Formel 4 wiederum gründet sich auf die allgemeine Form des Ampere'schen Gesetzes und setzt das Magnetfeld **B** mit der zeitlichen Änderung des elektrischen Feldes **E** in Beziehung. Dies führt zu der Aussage dass ein zeitlich veränderliches Magnetfeld ein elektrisches (Wirbel-)Feld verursacht.

Materialgrundgleichungen

Die in den Formeln verwendeten Vektorfeldfunktionen **E**, **B** und **j** stehen über die Material-Grundgleichungen in folgendem Zusammenhang (Jol, 2009, p. 6) (Nabighian, Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory, 2006, S. 133):

$$D = \varepsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$j = \sigma E$$

ε ... Dielektrizitätskonstante [As/Vm] ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$)

ε_0 ... dielektrische Feldkonstante ($\varepsilon_0 = 8.854187 \times 10^{-12}$ As/(Vm))

ε_r ... relative Dielektrizitätskonstante (Materialeigenschaft)

μ ... magnetische Permeabilität des Materials [Vs/Am] ($\mu = \mu_0 \mu_r$)

μ_0 ... magnetische Feldkonstante [Vs/Am] ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Vs/(Am))

μ_r ... relative Permeabilität

σ ... elektrische Leitfähigkeit [S/m]

Die Materialparameter ϵ , σ und μ sind tensorielle Größen, können aber zu skalaren Größen reduziert werden wenn das Medium linear, homogen und isotrop ist. Mehr dazu in dem Kapitel über die Materialeigenschaften.

2.3.2. Die Wellengleichung für elektromagnetische Wellen

Wenn man von der differentiellen Form der Maxwell-Gleichungen ausgeht kann man zunächst eine allgemeine Form der Wellengleichung für das elektrische und magnetische Feld ableiten. Die Lösungen dieser Wellengleichungen werden als elektromagnetische Wellen bezeichnet.

Die Ausgangssituation stellen dabei die beiden Rotations-Gleichungen von Maxwell dar. Die folgenden Herleitungen wurden (Nabighian, *Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory*, 2006, S. 132) entnommen.

$$\begin{aligned}\nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

Wendet man nun den Vektoroperator der Rotation ($\nabla \times$) auf diese beiden Gleichungen an so bekommt man (Nabighian, *Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory*, 2006, S. 135)

$$\begin{aligned}\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) &= -\nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times (\nabla \times \mathbf{H}) &= \nabla \times \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{j}\end{aligned}$$

Durch ein Einsetzen der Material-Grundgleichungen und unter der Annahme dass die Materialparameter μ , σ und ϵ skalare Größen und somit nicht zeit- und frequenzabhängig sind können sie vor die zeitlichen Ableitungen gezogen werden. Unter der Voraussetzung dass die zeitliche Ableitung teilweise stetig verläuft und sie eine 1. und 2. Ableitung besitzen, können die Ausdrücke $\nabla \times \mathbf{E}$ und $\nabla \times \mathbf{H}$ durch die ursprünglichen Formeln der Maxwell-Gleichungen ersetzt werden

Durch Verwendung der Vektor-Identität $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{a}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{a}) - \Delta \mathbf{a}$ wird eine inhomogene Wellengleichung (Telegraphengleichung) hergeleitet (Nabighian, Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory, 2006, S. 136):

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

Diese beiden Formeln stimmen bis auf die Größen $\mathbf{E}$ und $\mathbf{H}$ überein und bilden die jeweiligen Wellengleichungen im Zeitbereich.

Durch die 1D-Fouriertransformation erhält man die äquivalenten Gleichungen im Frequenzbereich - die Helmholtz-Gleichungen (Nabighian, Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory, 2006, S. 136):

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{T}) + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\mathbf{E}(\mathbf{T}) = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{H}(\mathbf{T}) + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\mathbf{H}(\mathbf{T}) = 0$$

ω ... Kreisfrequenz [Hz] ($\omega=2\pi f$)

$\mathbf{E}(\mathbf{T})$... Fourier-transformierte von $\mathbf{E}$

$\mathbf{H}(\mathbf{T})$... Fourier-transformierte von $\mathbf{H}$

Durch die Zusammenfassung der Ausdrücke in den Klammern erhält man die komplexe Wellenzahl k^2 .

$$k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega$$

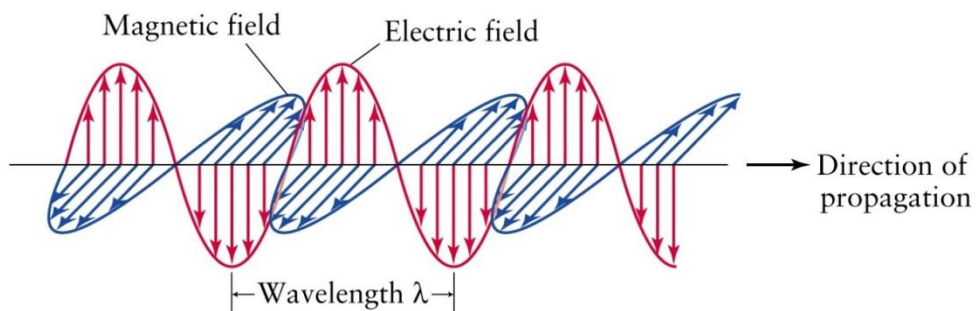


Abbildung 8: Darstellung einer elektromagnetische Welle (Tipler, 1995, S. 1001)

2.3.3. Welleneigenschaften

Die wesentlichen Eigenschaften einer elektromagnetischen Welle sind die Dämpfung α , die Geschwindigkeit v . Die Welleneigenschaften für ein einfaches Medium mit konstanter Permittivität, Leitfähigkeit und Permeabilität werden am leichtesten durch eine sinusförmige Zeitvariation angenommen. Ein erster Ansatz für die Lösung der Wellengleichung im Zeitbereich ist die Darstellung einer ebenen harmonischen Welle, die sich in z-Richtung ausbreitet (Nabighian, Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory, 2006, S. 17)

$$Ez = E_0 \cdot e^{-ikz}$$

bzw.

$$E = E_0 \cdot e^{i(\omega t - kz)}$$

E_0 ... Anfangsamplitude

Wie jede komplexe Zahl lässt sich auch k , die komplexe Wellenzahl, als Summe von Imaginär- und Realteil schreiben.

$$k = \beta + i\alpha$$

Sie werden im Allgemeinen folgendermaßen dargestellt (Nabighian, Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory, 2006, S. 138)

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2} + 1 \right)}$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}\right)^2} - 1 \right)}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Durch das Einsetzen von α und β in die vorherige Lösung der Wellengleichung gelangen wir zu folgender Gleichung (Nabighian, Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory, 2006, S. 138):

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cdot e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)}$$

Die beiden Terme wirken sich auf verschiedene Weise auf die Amplitude aus. Der imaginäre Term $e^{i(\omega t - \beta z)}$ entspricht der Definition einer Wellenausbreitung wobei der Part ωt die Schwingung des jeweiligen Feldes in der Zeit und der Term βz die Änderung im Raum bedingen. β entspricht also der reellen Wellenzahl.

Der reelle Term $e^{-\alpha z}$ stellt eine Dämpfung dar, und zwar exponentiell mit zunehmender Tiefe. α wird als Dämpfungsfaktor bezeichnet und ist für den Absorptionsverlust der Welle maßgebend. Oft wird statt dem Dämpfungsfaktor α der Absorptionskoeffizient α' [dB/m] angegeben. Ihr Zusammenhang besteht durch die einfache Formel:

$$\alpha' = 8.686\alpha$$

In Kombination mit dem Dämpfungsfaktor wird oft eine weitere Größe für die elektromagnetischen Wellen angegeben, nämlich die Skintiefe δ .

$$\delta = \frac{1}{\alpha}$$

Sie stellt die Entfernung dar, in welcher die Amplitude der Welle um den Wert $1/e$ verringert wurde und gibt somit einen guten Überblick über die nützliche Eindringtiefe von Bodenradar-Systemen.

Die komplexe Wellenzahl ist also neben den Materialparametern ϵ , σ und μ auch eine Funktion der Frequenz ist. Da die Wahl der Frequenz dem Ermessen des Anwenders unterliegt ist die Kenntnis über das Verhalten der elektromagnetischen Wellen bei verschiedenen Frequenzen die Voraussetzung zum Verständnis der möglichen elektromagnetischen Methoden.

Dazu können grob 2 Fälle unterschieden werden (Nabighian, Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory, 2006, S. 17)

1. niedrige Frequenzen (Diffusion)

Bei der Verwendung von sehr niedrigen Frequenzen kürzt sich die komplexe Wellenzahl annäherungsweise zu

$$k^2 \approx -i\mu\sigma\omega$$

und die Abhängigkeit von der dielektrischen Permittivität verschwindet, das heißt Verschiebungsströme können vernachlässigt werden. Die Wellenzahl k hat dann den gleichen Wert für Real- und Imaginärteil:

$$k = \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}} - i\sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}$$

Wenn die Frequenzen so niedrig sind dass der 2.Term der Wellenzahl ignoriert werden kann, dann klingt die Welle zu schnell ab um strahlende Felder überhaupt aufzunehmen. Dieser Zustand der Anwendung von elektromagnetischen Methoden heißt „induktiv“.

2. hohe Frequenzen

Im Gegensatz dazu ist bei hohen Frequenzen die Wellenzahl k näherungsweise:

$$k \approx \omega^2\mu\varepsilon$$

In so einem System breiten sich elektromagnetische Felder ohne erhebliche Dämpfung aus und die Wellenlänge hängt nur von der dielektrischen Konstante ε ab.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}}$$

Dadurch können solcherart ausbreitende Wellen dazu genutzt werden, um die Entfernung zu reflektierenden Objekten in Form von 2-way-travel-times zu messen, dem Grundprinzip des Bodenradars.

Der Zwischenbereich, in dem sowohl Verschiebungsströme als auch Leitungsströme auftreten definiert sich für einfache Materialien über die folgende Beziehung (Leitungs- und Verschiebungsströme sind gleichgroß):

$$\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} = 1$$

Diese Beziehung nennt sich Verlustfaktor, da bei einer Zunahme dieses Wertes die Leitungsströme zunehmen und dadurch zu größeren Wärmeverlusten der elektromagnetischen Felder führen.

Meist wird der Verlustfaktor als Verlusttangens ($\tan \delta$) bezeichnet:

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}$$

Bzw. da $\omega = 2\pi f$ als Definition einer Übergangsfrequenz $f(T)$:

$$f(T) = \frac{\sigma}{2\pi \varepsilon}$$

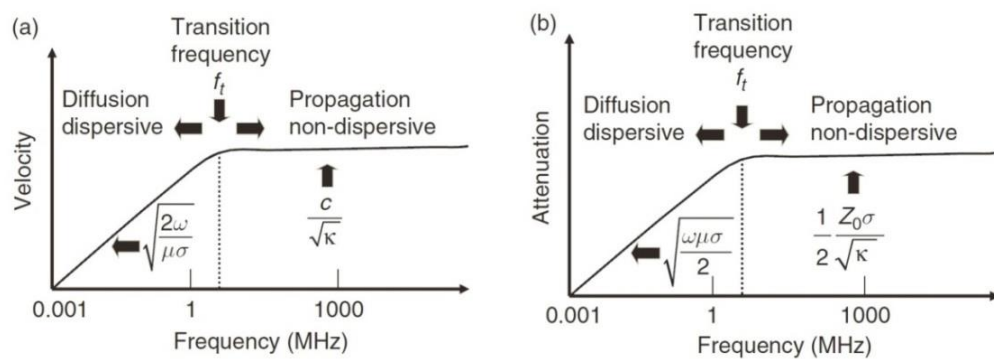


Abbildung 9: Die Veränderung von v und α aufgetragen gegen die sinusartige Frequenz (Jol, 2009, p. 10)

Alle Welleneigenschaften zeigen ein ähnliches Verhalten. Bei kleinen Frequenzen hängen die Welleneigenschaften von $\sqrt{\omega}$ ab, das auf diffusives Feldverhalten hinweist. Bei hohen Frequenzen werden die Eigenschaften frequenzunabhängig (wenn ε , μ und σ frequenzunabhängig sind). Und gerade der Bereich der hohen Frequenzen ist der wichtigste Charakter für die Anwendung von Bodenradar.

In dem hochfrequenten Bereich oberhalb der Übergangsfrequenz bewegen sich alle Frequenz-Komponenten mit der gleichen Geschwindigkeit und erleiden die gleiche Dämpfung, also Ausbreitung ohne Dispersion. In diesem Fall können die Geschwindigkeit, die Dämpfung und die Impedanz folgendermaßen ausgedrückt werden (Jol, 2009, p. 10):

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa}}$$

Die Lichtgeschwindigkeit folgt daher durch:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\sigma}{2} = Z_0 \cdot \frac{\sigma}{2 \cdot \sqrt{\kappa}}$$

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\kappa}}$$

Der Ausdruck ganz recht ist dann gültig, wenn die Änderungen der magnetischen Eigenschaften vernachlässigt werden können.

$$Z_0 \text{ ist die Impedanz im Vakuum: } Z_0(\Omega) = \sqrt{\frac{\mu^0}{\varepsilon^0}} = 377$$

Der Bereich über der Übergangsfrequenz zeigt im Normalfall eine graduelle Zunahme in Geschwindigkeit und Dämpfung mit der Frequenz. Für diesen Anstieg gibt es zwei Hauptfaktoren. Erstens absorbiert Wasser mehr und mehr Energie je näher die Frequenz der Wasser-Relaxations-Frequenz im Bereich von 10-20GHz kommt. Bereits bei 500MHz können Wasserverluste in ansonsten verlustarmen Medien beobachtet werden. Zweitens sind Streuungs-Verluste extrem frequenzabhängig und werden bei hohen Frequenzen wichtig. (Jol, 2009, p. 11)

2.3.4. Verhalten von elektromagnetischen Wellen

Reflexion und Refraktion elektromagnetischer Wellen an Diskontinuitäten

Die Signale die von der Empfangsantenne aufgenommen werden sind reflektierte Wellen. Beim Auftreffen der ausgesendeten Welle auf einer Grenzfläche entstehen eine reflektierte und eine transmittierte Welle. So wie in der Optik folgt die Ablenkung des

elektromagnetischen Wellen-Strahls an Schichtgrenzen dem Gesetz von Snell (siehe Abbildung 10):

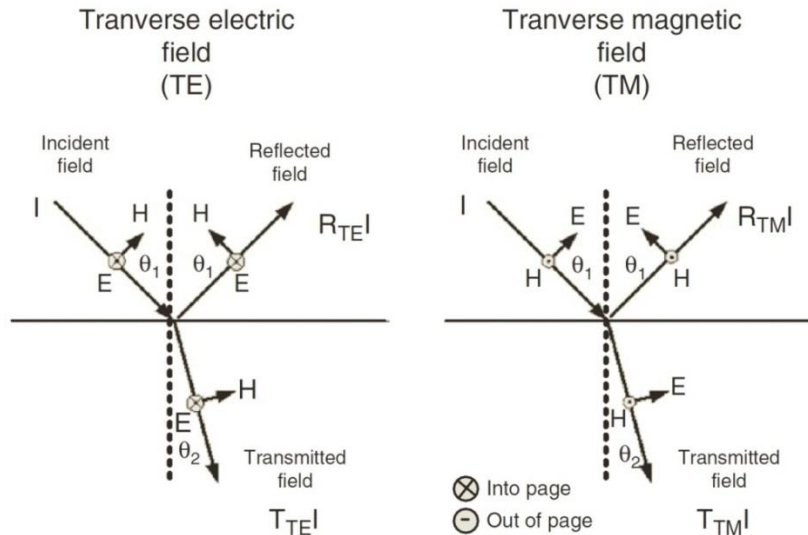


Abbildung 10: Reflexion und Transmission von EM-Wellen (Jol, 2009, p. 13)

Elektromagnetische Vektorfeld-Wellen teilen sich in zwei voneinander unabhängige Komponenten auf, die durch ihre Feldausrichtung in Bezug auf die Schichtgrenzen definiert werden. Die beiden Komponenten heißen: T_E (transversales elektrisches Feld) und T_M (transversales magnetisches Feld)

Gesetz von Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

Wenn die Geschwindigkeit des zweiten Mediums geringer ist als diejenige im ersten ($v_1 > v_2$) kann keine Energie über diese Schichtgrenze hinausgehen und Medium 2 besitzt einen kritischen Winkel. Der sogenannte kritische Winkel wird bestimmt durch die Angabe von $\theta_1 = 90^\circ$ und spielt eine große Rolle in verschiedenen Bodenradar-Ansprechverhalten.

Die Feldstärken des einfallenden, reflektierten und gebrochenen Feldes haben folgenden Zusammenhang:

$$I + R \cdot I = T \cdot I$$

R und I müssen dabei das Gesetz von Snell erfüllen, das elektrische und das magnetische Feld müssen an der Schichtgrenze kontinuierlich sein und der elektrische Strom bzw. die magnetische Flussdichte, die die Schichtgrenze überqueren muss gleichbleiben.

Aus diesen Gesetzmäßigkeiten lassen sich die Impedanzen (Z) und Admittanzen ($Y=1/Z$) bestimmen (Jol, 2009, p. 14).

$$R(TE) = \frac{Y_1 \cdot \cos \theta_1 - Y_2 \cdot \cos \theta_2}{Y_1 \cdot \cos \theta_1 + Y_2 \cdot \cos \theta_2}$$

$$R(TM) = \frac{Z_1 \cdot \cos \theta_1 - Z_2 \cdot \cos \theta_2}{Z_1 \cdot \cos \theta_1 + Z_2 \cdot \cos \theta_2}$$

$$T_{TE} = 1 + R_{TE}$$

$$T_{TM} = 1 + R_{TM}$$

Der kritische Faktor ist, dass man einen elektromagnetischen Impedanz-Kontrast braucht um eine Antwort des Materials zu erhalten. Wenn die elektromagnetische Welle vertikal auf die Grenze einfällt ($\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$) gibt es keinen Unterschied mehr zwischen T_E und T_M Wellen und ihre Reflexionskoeffizienten sind identisch (für die Feldkomponenten).

Das Bodenradar Messsystem arbeitet in der Praxis mit endlich großen Antennen, die elektromagnetische Felder erzeugen. Diese werden dann durch Messsensoren aufgezeichnet. Außerdem liegen diese Antennen am Untergrund auf oder werden mit geringem Abstand dazu über den Boden bewegt. Die eintreffende und reflektierte Welle verbinden sich in der Luft zu einer nach oben gerichteten sphärischen Welle. Im Untergrund teilt sich das Signal in zwei Teile auf, in eine sphärische Welle und eine ebene Welle die sich im kritischen Winkel ausbreitet. Diese Welle verbindet die direkte sphärische Luftwelle und die sphärische Bodenwelle.

Die verschiedenen Wellenformen sind sowohl räumlich als auch zeitlich klar getrennt, sofern die Entfernung von der Quelle im Vergleich zur Wellenlänge groß ist. Bei kurzen Entfernungen ist eine genaue Unterscheidung nicht möglich – die Einsätze sind verschmiert.

Das folgende Bild zeigt die verschiedenen erzeugten Wellen (Jol, 2009, p. 12).

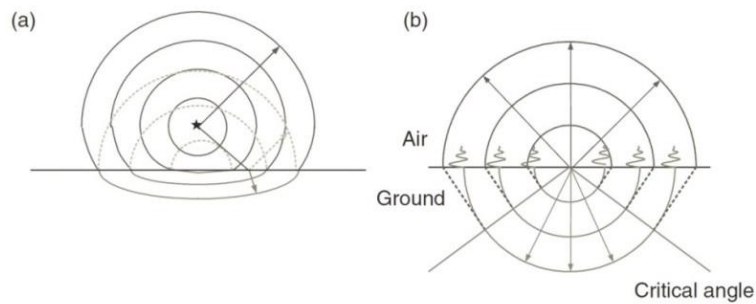


Abbildung 11: Wellenfronten ausgehend von einer bekannten Quelle (Jol, 2009, p. 12)

Signalverläufe zwischen Sende- und Empfangsantenne können schematisch als Strahlenwege behandelt werden.

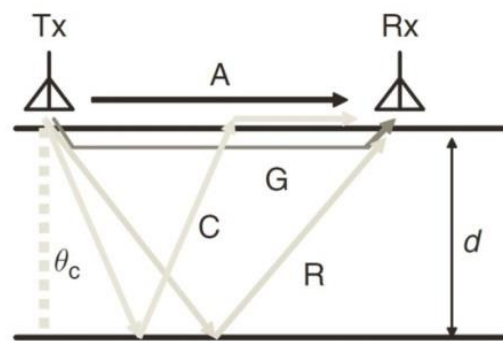


Abbildung 12: Signalausbreitung (Strahlenweg-Schema) (Jol, 2009, p. 12)

Ebene Grenzverläufe stellen dabei die einfachste Möglichkeit zur Beschreibung des Wellenverhaltens dar.

1.4. Auflösung und Einflussbereich

Unter der Bedingung dass das Bodenradar reflektierende Objekte in einer gewissen Entfernung lokalisieren kann stellt sich natürlich die Frage nach der möglichen Auflösung bzw. dem dadurch erhaltenen Informationsgehalt. Folgende Ausführung wurden aus (Jol, 2009, p. 14) entnommen.

1.4.1. Vertikale Auflösung (Tiefenauflösung)

Die vertikale Auflösung beschäftigt sich mit der benötigten vertikalen Distanz zwischen zwei verschiedenen Diskontinuitäten um diese noch voneinander unterscheiden zu können, also wie mächtig die Schicht sein darf um die Reflexionen an Ober- und Unterkante noch voneinander trennen zu können. Folgende Darstellung zeigt die Signale bei unterschiedlichen zeitlichen Ankünften.

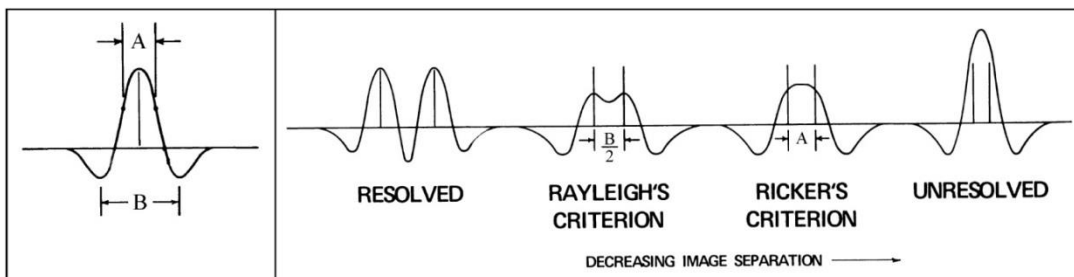


Abbildung 13: Diplomarbeit Bodenradar (Sperner, 1999, S. 11)

Für die Definition einer Auflösungsgrenze gibt es verschiedene Kriterien. Wenn man nun die Impulsbreite B als Charakteristikum eines solchen Impulses anführt ist eine Auflösung von zwei unterschiedlichen Impulsen im Allgemeinen dann möglich, wenn die beiden Impulse durch die halbe Bandbreite voneinander getrennt sind (Rayleigh's Kriterium). Sind sie einander näher, können sie sehr wahrscheinlich nicht als zwei unterschiedliche Einsätze identifiziert werden.

Räumlich ausgedrückt (Jol, 2009, p. 15):

$$\Delta r \geq \frac{Bv}{4}$$

wobei die Pulsbreite B und die Geschwindigkeit v die Auflösungslänge bestimmen. Im Idealfall ist die radiale Auflösung unabhängig von der Entfernung, in der Praxis zeigt sich aber dass die Pulsstreuung und die Dämpfung bei größeren Entfernungen die Auflösung beeinträchtigen.

Als dünne Schichten werden diejenigen bezeichnet, bei denen das Verhältnis von Mächtigkeit zu eintreffender Wellenlänge kleiner oder gleich 1 ist. Dies führt dazu dass die Reflexionen an der Ober- und Unterkante der Schicht nicht mehr differenzierbar sind und deshalb die Schicht als solche nicht mehr erkannt werden kann.

1.4.2. Horizontale Auflösung

Die Radarwellen, die durch die Antennen ausgesendet werden, sind nicht strahlenförmig sondern breiten sich in Form eines elliptischen Kegels aus. Die laterale Auflösung gründet sich auf das Konzept der Fresnel-Zone. Die Länge der lateralen Auflösung hängt von Geschwindigkeit v , Pulsbreite W sowie von der Entfernung ab. Je größer die Entfernung, desto größer die Auflösungslänge (Jol, 2009, p. 15).

Definition:

$$\Delta l \geq \sqrt{\frac{vrB}{2}}$$

Weil die Impulsbreite B in direktem Zusammenhang mit der Bandbreite W steht

$$B = W = \frac{1}{f(c)}$$

wobei $f(c)$ die Mittenfrequenz ($\lambda(c) = \frac{f(c)}{v}$) darstellt

kann die laterale Auflösungslänge folgendermaßen dargestellt werden:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{d\lambda(c)}{2}}$$

Diese Beziehung ist identisch zum Fresnel-Zonen Radius für monochromatische Signale mit der Mittenfrequenz $f(c)$.

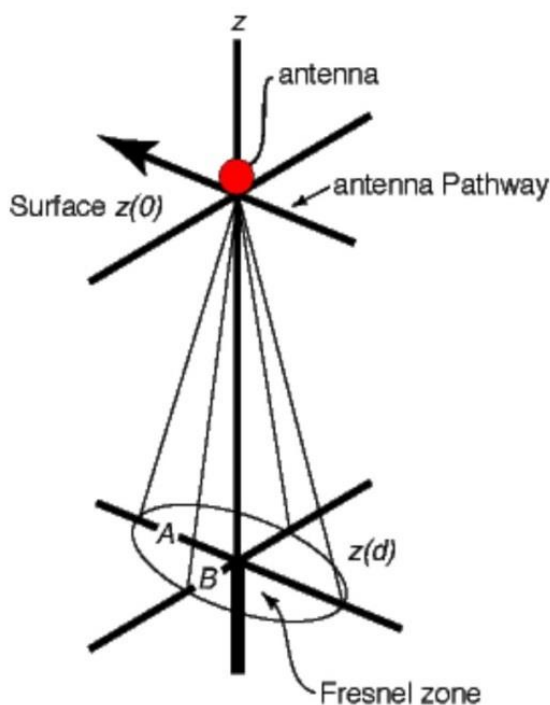


Abbildung 14: FOOTPRINT DER GPR-
ANTENNEN
[[HTTP://WWW.KGS.KU.EDU/CURRENT/2001/MARTINEZ/MARTINEZ5.HTML](http://www.kgs.ku.edu/current/2001/martinez/martinez5.html); DATUM: 6.8.2013]

1.5. Materialeigenschaften:

Der Erfolg einer Bodenradar Messung ist stark abhängig von den gebotenen Bodenverhältnissen und der Mineralogie der Sedimente. Das Bodenradar kann nicht in allen Umgebungen verwendet werden, obwohl durch Anpassung an die bekannten einwirkenden Parameter der Anwendungsbereich bereits wesentlich verbreitert werden konnte.

Die bereits erwähnten Zustandsgleichungen liefern die Mittel zur Beschreibung der Materialantwort auf einwirkende elektromagnetische Felder. Im Falle des Bodenradars sind die elektrischen und magnetischen Eigenschaften wichtig, also folgende 3 Größen:

- μ ... magnetische Permeabilität
- σ ... elektrische Leitfähigkeit
- ϵ ... dielektrische Permittivität

Die magnetische Permeabilität μ gibt über die Formel $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ die Relation zwischen magnetischer Feldstärke und magnetischer Flussdichte an. Sie beschreibt wie sich atomare und molekulare magnetische Momente unter einem einwirkenden Magnetfeld verhalten.

Die elektrische Leitfähigkeit σ stellt einen Zusammenhang zwischen der elektrischen Stromdichte und der elektrischen Feldstärke her (Ohm'sches Gesetz: $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$) und steht für die freie Ladungsbewegung unter Einwirkung eines elektrischen Feldes. Ein solches Einwirken führt zu elektrischen Strömen, ein Widerstand zum Ladungsstrom führt zu einer Energie-Streuung. Die Definition des elektrischen Widerstands lautet: $\rho = \frac{1}{\sigma}$.

Die dielektrische Leitfähigkeit ϵ beschreibt den Zusammenhang zwischen der dielektrischen Verschiebungsstromdichte und der elektrischen Feldstärke ($\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$). Sie steht für eine Ladungsverschiebung im Material aufgrund der Einwirkung eines elektrischen Feldes, was zu einer Energiespeicherung im Material führt. Die Ladungen teilen sich solange auf, bis die Coulomb-Kraft die angelegte Feldstärke ausgleicht (Polarisierung).

Für die Anwendung des Bodenradars ist die dielektrische Permittivität eine wichtige Größe. Meist werden die Ausdrücke „relative Permittivität“ oder „dielektrische Konstante“ verwendet. Dies definiert sich wie folgt:

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$$

ε_0 ... die dielektrische Permittivität von Vakuum (8.89×10^{-12} F/m)

Die Materialeigenschaften μ , ε , σ sind Tensorgrößen und sind durch Tensoren zweiter Stufe darzustellen, deren reale und auch imaginäre Komponenten keineswegs konstant sind sondern eine ganze Reihe von komplizierten Abhängigkeiten zeigen (z.B. Temperatur, Druck, Zeit) (Nabighian, *Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory*, 2006, S. 14 f). Jedoch für praktisch die meisten GPR-Fragestellungen können sie als Feld-unabhängige skalare Größen behandelt werden. Diese Vereinfachung setzt Homogenität, Isotropie, Linearität und eine Unabhängigkeit von äußeren Einwirkungen wie z.B. Temperatur und Druck voraus. Obwohl diese Annahme selten vollkommen zutreffend ist, konnte bei praktischen Anwendungen bisher kaum eine solche Komplexität erkannt werden.

Erdmaterialien setzen sich aus vielen verschiedenen Komponenten zusammen. Selbst ein einfacher Strandsand besteht aus einer Mischung von Erdkörnern, Luft, Wasser, und in Wasser gelösten Ionen. Die Eigenschaften eines einzigen Minerals sind meist nicht messbar, deshalb ist eine Klassifikation von Gesteinsarten mit einer einhergehenden Zuordnung von den gesuchten Parametern erforderlich (Jol, 2009, p. 7).

Eine grobe Aufteilung von Mineralien in **1. Metalle und Halbleiter** und **2. isolierende Materialien** hilft bei der Zuweisung der wichtigsten Parameter. Für die Metalle und Halbleiter ist, allein durch ihren Aufbau, die elektrische Leitfähigkeit von größter Bedeutung. In Metallen können die Elektronen mit geringer Anregungsenergie zur Leitung angeregt werden. Für die isolierenden Materialien ist die benötigte Anregungsenergie für die Leitungselektronen so groß, dass praktische keine Konduktion stattfindet (Beispiele für solche Materialien sind Silikate und Karbonate). In solchen Medien überwiegt oft eine andere Art der Leitung, nämlich die elektrolytische. Die elektrolytische Leitung ist eine Art der dielektrischen Auslenkung, deshalb spielt für solche Medien die dielektrische Leitfähigkeit eine übergeordnete Rolle.

In den meisten GPR-Anwendungen sind hauptsächlich Änderungen von ϵ und σ von Bedeutung, während Variationen von μ selten in Betracht gezogen werden. Deshalb wird für μ meistens die magnetische Permeabilität von Luft ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}$) eingesetzt.

Das Verständnis der physikalischen Eigenschaften stellt einen bedeutenden Faktor in der Interpretation von Signal-Antworten dar. Und obwohl eine Auflösung der Mischungen komplex ist, ist das generelle Bild aus Sicht der Bodenradar-Interpretation relativ simpel. Im Bereich von 10 – 1000 MHz dominiert vor allem die Präsenz von Wasser die Materialeigenschaften. Wasser ist das bei weitem polarisierbarste, natürlich vorkommende Material ($\kappa \approx 80$), und da Wasser in den Porenräumen geologischer Materialien unvermindert präsent ist hat es einen dominierenden Effekt auf die elektrischen Eigenschaften (Jol, 2009, p. 8).

Empirisch gefolgerte Formulierungen wie z.B. die Topp Beziehung oder die Variationen von Archie's Gesetz haben schon lange die Beziehung zwischen Permittivität, elektrischer Leitfähigkeit und volumetrischem Wassergehalt gezeigt.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Literaturwerte der Parameter in verschiedenen Medien (Daniels, 1996, p. 49) (Sperner, 1999, S. 9)

Tabelle 1: Übersicht über die Materialparameter

Material	Leitfähigkeit σ [mS/m]	rel. Permittivität ϵ_r [F/m]	Absorptionskoeffizient α' [dB/m]
Luft	0	1	0
Asphalt (trocken)	1-10	2-4	2-15
Asphalt (feucht)	10-100	6-12	2-20
Lehm (trocken)	1-100	2-6	
Lehm (gesättigt)	100-1000	15-40	
Kohle (trocken)	10	3,5	1-10
Kohle (feucht)	100	8	2-20
Beton (trocken)	1-10	4-10	2-12
Beton (feucht)	10-100	10-20	10-25
Süßwasser	0,1-10	81	0,1
Süßwasser (gefroren)	1	4	0,1-2

Granit (trocken)	0,00001-0,001	5	0,5-3
Granit (feucht)	1-10	7	2-5
Kalk (trocken)	0,000001-0,001	7	0,5-10
Kalk (feucht)	10-100	8	10-25
Permafrost	0,01-10	4-8	0,1-5
Steinsalz (trocken)	0,1	4-7	0,01-1
Sand (trocken)	0,0001-1	4-6	0,01-1
Sand (gesättigt)	0,1-10	10-30	0,03-0,3
Sandstein (trocken)	0,000001-0,001	2-3	2-10
Sandstein (feucht)	0,01-0,001	5-10	10-20
Meerwasser	4	81	1000
Meerwasser (gefroren)	10-100	4-8	10-30
Schiefer (gesättigt)	10-100	6-9	10-100
Schnee (fest)	0,001-0,01	8-12	0,1-2
Boden (sandig, trocken)	0,1-10	4-6	0,1-2
Boden (sandig, feucht)	10-100	15-30	1-5
Boden (lehmig, trocken)	0,1-1	4-6	0,5-3
Boden (lehmig, feucht)	10-100	10-20	1-6
Boden (tonig, trocken)	0,1-100	4-6	0,3-3
Boden (tonig, feucht)	100-1000	10-15	5-30

Das Bodenradar wird am besten in elektrisch-verlustarmen Materialien eingesetzt. Wenn $\sigma = 0$ wäre würde das GPR-Signal bis in große Tiefen eindringen können. In der Realität sind verlustarme Materialien nicht vorherrschend. Tonreiche Umgebungen oder salinare Grundwässer führen zu Bedingungen, die die Eindringtiefe des Signals stark begrenzen.

III. Datenakquisition

Das Bodenradar bietet wie bereits erwähnt ein breites Anwendungsspektrum. Die jeweiligen Faktoren, die die Anwendbarkeit einer Bodenradarerkundung für eine bestimmte Fragestellung gewährleisten, umfassen sowohl den gewählten operierenden Frequenzbereich, ein bestimmtes Modulationsmodell wie auch die Antennenart und ihre Polarisierung. Diese Faktoren hängen wiederum von der Größe und Form des aufzulösenden Objektes, den Durchlässigkeitseigenschaften des Mediums wie auch von den ökonomischen Parametern der Erkundung zusammen. Somit ist der Erfolg einer solchen geophysikalischen Messkampagne von der richtigen Anpassung der Aufnahmeparameter, der Aufnahmemethode und der verwendeten Ausrüstung abhängig. Um dies zu gewährleisten sollten bereits vorab einige Grundkenntnisse über das Messgebiet eingeholt werden.

3.1. Messkampagne

Grundsätzlich wird bei Bodenradaranwendungen zwischen Reflexions-Anwendungen und Transilluminationen unterschieden. Transilluminationen werden in dieser Arbeit nicht behandelt, da die hier ausgewerteten Daten im Rahmen eines Reflexions-Surveys erhoben wurden. Bei einer Messkampagne werden die Rahmenbedingungen den jeweiligen Zielen angepasst, sodass ein möglichst vollständiges Bild des Untergrundes entsteht. Beispielsweise müssen bei einer Untersuchung auf einem Gräberfeld die Ausrichtung und der Abstand der Profile auf die zu erwartenden Verhältnisse angepasst werden, damit die einzelnen Gräber bei einem zu groß gewählten Abstand nicht aufgelöst werden können.

Eine oft verwendete Faustregel besagt, dass die gewählte Profildichte mindestens die Hälfte der Ausdehnung des zu erwartenden Objektes hat. Ebenso sollten auch die Frequenzen eingestellt werden, da eine maximale Reflexion erreicht wird wenn die Ausdehnung der Schicht, an der reflektiert wird, doppelt so breit ist wie die Wellenlänge. Typische Frequenzen bei archäologischen Fragestellungen liegen zwischen 200-800 MHz wobei für spezielle Fragestellungen ebenso sehr hochfrequente bzw. niederfrequente Signale verwendet werden.

Nichtsdestotrotz ist es schwierig Objekte aufzulösen die seicht liegen und eine geringe Ausdehnung haben. Für ein solches Ziel müsste der Profilabstand schon sehr klein gewählt

werden. Es ist leichter kleine Gegenstände aufzulösen die nicht so seicht liegen. Grund dafür ist die trichterförmige Ausdehnung der Radarwellen (Fresnel-Radius).

3.2. Datensampling

Die Aufnahme des elektromagnetischen Feldes bedarf der Anwendung eines geeigneten Sample-Intervalls, da es eine Funktion der Zeit und des Raumes ist. Hierbei muss das Nyquist-Abtasttheorem erfüllt werden, damit aus den diskreten Werten die kontinuierliche Funktion ohne Informationsverlust konstruiert werden kann.

Abtastintervalle:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f}$$
$$\Delta x \leq \frac{v}{2f}$$

Bei Bodenradar-Messgeräten, die die Beziehung von Bandbreite zu Mittenfrequenz $R = \frac{B}{fc}$ mit $R = 1$ erfüllen führt das zu folgenden Intervallen (Jol, 2009, p. 29)

$$\Delta t \leq \frac{1}{3fc}; \Delta x \leq \frac{v}{3fc}$$

Da diese Annahme dem Idealfall entspricht werden in der Praxis die folgenden Abtastraten verwendet (Jol, 2009, p. 29)

$$\Delta t \leq \frac{1}{6fc}; \Delta x \leq \frac{v}{6fc}$$

3.3. Datenbearbeitung

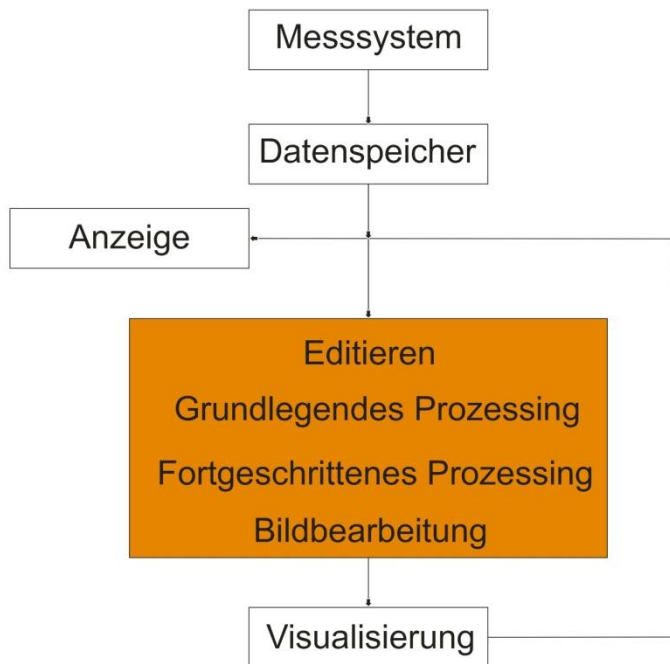


Abbildung 15: Flow-Chart (Schema)

Die obige Abbildung 15 zeigt einen typischen Flow-Chart von Bodenradar-Daten. Der farbige Bereich umfasst das Thema Datenprozessing. Angefangen vom Editieren und grundlegenden Datenbearbeitungsschritten werden in weiterer Folge ausgewählte Prozesse auf die Daten angewendet und schlussendlich auch die so ausgewerteten Daten dargestellt. Die Prozessingschritte sind iterativ, die Daten werden nach jedem Durchlaufen auf Verbesserungen geprüft bzw. eine erneute Anwendung bestimmter Schritte zur Datenverbesserung herangezogen.

Dazu wird, falls größere Datenmengen zu bearbeiten sind, zuerst an einem Ausschnitt ein passender Flow-Chart erarbeitet, der danach auf den kompletten Datensatz angewendet wird.

Die fortgeschrittenen Prozessingschritte haben erhebliche und oft unveränderliche Auswirkungen auf die Rohdaten, einige sind aus der Seismik bekannt (räumliche/zeitliche Filter, Muting, Dip-Filter, Deconvolution, Scheingeschwindigkeitsanalyse) und andere werden speziell bei Bodenradar-Daten angewendet (Background-Removal Filter, etc.).

Das Thema Signal-Prozessing ist so breitgefächert, dass hier nur eine kleine generelle Einführung und Übersicht über verwendete Schritte gegeben werden kann.

3.3.1. Prozessingschritte

Nachfolgend werden lediglich die grundlegenden Prozessingschritte beim GPR vorstellen, entnommen unter anderem aus dem Manual der verwendeten Software ReflexW (Sandmeier, 1998), sowie aus anderer Literatur (Daniels, 1996) (Jol, 2009).

- *De-Wow*

Ist meist der erste Prozessingschritt. De-Wow ist ein Filter im Zeitbereich um langwellige Anteile aus den Daten zu filtern. Das Nahfeld der Sendeantenne enthält niederfrequente Energie die mit elektrostatischen und induktiven Feldern einhergeht. Diese Energie nimmt mit der Entfernung schnell ab, da jedoch die beiden Antennen beim Bodenradar räumlich sehr nahe aneinander liegen führt dies zu einer langsamen Zeit-veränderlichen Komponente in den Messdaten, einem Verbiegen des Grundlevels der Bodenantwort. (Baseline-WOW). Um diese Einflussnahme rückgängig zu machen wird ein Zeitfilter mit hohen Verlusten auf das reflektierte Signal angewendet. (deWOW) (Jol, 2009, p. 34)

In ReflexW wird als Mean-DeWOW für jede Spur ein Mittelwert (bezogen auf ein bestimmtes Zeitfenster) bestimmt und somit der langwellige Bereich herausgefiltert (Sandmeier, 1998, S. 150).

- *Time-Gain*

Aufgrund der angewendeten Frequenzen ist die Dämpfung des Signals sehr groß, Signale aus tieferen Gebieten besitzen kleinere Amplituden und können, bei gleichzeitiger Bearbeitung, in den größeren Amplituden der oberflächennahen Schichten verschwinden. Um diesen Effekt auszugleichen wird eine zeitabhängige Verstärkung auf die Daten angewendet.

Die Dämpfung ist aber stark bodenabhängig. So kann in Umgebungen mit niedriger Dämpfung eine Tiefe von bis zu 10er Metern aufgelöst werden, hingegen in stark verlustreichen Medien auch weniger als 1m.

Es gibt eine Reihe von verschiedenen Daten-Verstärkungsmöglichkeiten. Sie alle sollten aufgrund des physikalischen Umgebungsmodells gewählt werden und möglichst geringe Artefakte in den Daten verursachen, da sie durch ihrer Nicht-Linearität einen erheblichen Einfluss auf die Daten nehmen (Jol, 2009, p. 34).

- **Background- Removal Filter**

Der gebräuchlichste Filteroperator für GPR-Daten. Er soll die Streifenbildung, die durch das Überspringen von Antennen in den Radargrammen auftritt, entfernen. Diese Streifen können Reflexionen überdecken und dadurch unkenntlich machen.

Die meisten Programme wenden bei diesem Filter eine simple arithmetische Berechnung an. Sie subtrahieren den Mittelwert von allen zeitgleich aufgenommenen Reflexionsamplituden, dadurch werden alle horizontalen Reflexionen entfernt. Ist im untersuchten Gebiet die Stratigraphie des Untergrunds relativ horizontal, kann die Anwendung dieses Filters zum Verlust von wichtigen Daten führen. Ebenso kann er bei der Filterung von wenigen Spuren einen Informationsverlust bedeuten, da bei der Anwendung auf kleinräumigen Gebieten die Untergrundstrukturen wenig variabel sein können und dadurch waagrecht erscheinen.

Der Background-Removal Filter kann in Umgebungen mit variablen Bodeneigenschaften (verschieden bewachsene/gepflügte Felder) sehr nützlich sein. Die dort aufgezeichneten Reflexionen können sich in ihrer Amplitude stark unterscheiden, der Filter dient dann zur „Normalisierung“ der relativen Reflexionsstärke (Conyers, 1997, p. 78).

- **Deconvolution**

Die Deconvolution ist ein Prozessingschritt aus der Seismik und dient generell dazu, eine möglichst große Bandbreite und geringe Signalstreuung zu erreichen. Dies erhöht die Auflösung. Das normale Bodenradar-Signal ist von vornherein so gewählt, dass es bei gegebener Bandbreite den kürzest möglichen Impuls liefert. Deshalb liefert die Deconvolution hier keinen großen Vorteil, außer es liegen nicht zu vernachlässigende Echos vom System oder von außen vor (Jol, 2009, p. 35) (Conyers, 1997, p. 81).

- **Migration**

Die Migration ist eine räumliche Deconvolution. Sie versucht die Richtungsabhängigkeit des Transmitters und Receivers aus den Daten zu entfernen, um die Reflexionen im Untergrund geometrisch richtig darstellen zu können.

Voraussetzung ist die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung im Boden. Da diese iterativ herausgefunden wird unterliegt auch die Migration einem ständigen Optimierungsprozess.

Die meisten seismischen Anwendungen der Migration können genauso in die Datenbearbeitung des Bodenradars übernommen werden. Einen außergewöhnlichen Aspekt des Bodenradars stellt die Magnitude der Topographie im Vergleich zur untersuchten Tiefe dar (Jol, 2009, p. 36)

- *Topographische Korrektur*

Die Topographie hat theoretisch aufgrund der seichten Untersuchungstiefen beim Bodenradar eine wichtige Rolle. Wenig ausgeprägte Oberflächenstrukturen können bereits durch eine zeitliche Verschiebung der Daten berücksichtigt werden. Da das durch Bodenradar untersuchte Gebiet eher kleinräumig ist werden gravierende Topographien kaum angetroffen (Jol, 2009, p. 36).

Die Daten in dieser Arbeit wurden zuerst mit ReflexW, einer Seismik- und GPR-Software ausgewertet. Zur endgültigen Darstellung und Interpretation wurden die Daten ins ArcGIS übertragen.

3.3.2. Teufenbestimmung

Die Bestimmung der Tiefe des reflektierten Signals kann mithilfe folgender Möglichkeiten erfolgen:

- *Labormessungen zur Bestimmung der Leitfähigkeit und der dielektrischen Eigenschaften*
- *Messung der 2-way-travel Zeit zu einem in einer bestimmten Tiefe vergrabenen bekannten Objekt*
- *Weitwinkel Messungen mithilfe von getrennten Antennen*
- *Bestimmung der passenden Reflexionshyperbeln in den Radargrammen*

Die Messung der Materialparameter erfordert eine zusätzliche Probennahme im Untersuchungsgebiet und die anschließende Bearbeitung im Labor. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist der Verlust der tatsächlichen in-situ Eigenschaften.

Die zweite Möglichkeit geht von einem künstlich hergestelltem System aus, bei dem die Rahmenbedingungen wie Tiefe und Form bekannt sind. Da aber durch das Vergraben der Untergrund verändert/gestört wurde, sind die Messungen möglicherweise nicht brauchbar.

Die Weitwinkel-Messung (CMP) nutzt den Abfall der Travel-time an einem Reflexionshorizont um die Mikrowellen-Geschwindigkeit zu bestimmen. Dazu braucht man einen flachen Reflektor und weitgehend homogenes Material im Bereich der Messungen.

Der Vergleich von bekannten Reflexionshyperbeln mit den Reflexionen im Radargramm wird weitgehend als aussagekräftigste Methode zur entfernten Bestimmung der Materialeigenschaften angesehen. Dabei ist die „Breite“ der Hyperbel die „DNA“ des Untergrunds, die dann die Abschätzung der Mikrowellen-Geschwindigkeit liefert. Je schmaler die Hyperbel desto langsamer ist die Geschwindigkeit.

Eine häufige Frage für Anwender von GPR ist die Eindringtiefe um die Steuereinheit für die Aufnahmen passend einzustellen. Generell sollte die Aufnahmetiefe mindestens 1,5 - 2mal die Tiefe des Zielobjektes betragen. Außerdem sollte das Prospektionsgebiet weiträumig abgedeckt werden, da erst durch den Vergleich von Gebieten ohne Objekte diejenigen mit aufgefundenen Strukturen sichtbar werden lässt.

3.3.3. Darstellungsmöglichkeiten für GPR-Daten in der Archäologie

Die typische Darstellungsform der Erkundungsdaten sind vertikale Untergrundschnitte entlang des gemessenen Profils. Aufgrund moderner Bearbeitungsmöglichkeiten von digitalen Daten wurden zusätzlich verschiedene Bilddarstellungsformen entwickelt. Die prominentesten sind dabei die Zeit-/Tiefenschnitte. Besonders seit die Leistung der verwendeten Hard- und Software gestiegen ist, werden gute Ergebnisse mit 3D-Volumsdarstellungen und Präsentationen erzielt. Die folgenden Möglichkeiten stellen nur ein Teilbereich der Darstellungsoptionen dar, da in diesem Gebiet ständig Weiterentwicklungen stattfinden. Jedoch haben sich die unterhalb angeführten Möglichkeiten bereits bei einer großen Anzahl von Anwendungen als nützlich erwiesen.

A. Time-Slices

Diese Art der Analyse wird bereits seit den frühen 90er Jahren verwendet. (Goodman & Nishimura, 1993) Dabei werden die vertikalen Radargramme, die bei den Messungen erhoben wurden, lagerichtig aneinander gereiht und zur Bestimmung der Pulsenergie horizontal/vertikal gemittelt. Danach wird zwischen den Teilen interpoliert und somit ein 3D-Volumen erstellt. Die Time-slices sind dann Horizontalschnitte durch den gesamten Messbereich zu einer bestimmten Zeit. Besonders in archäologischen Fragestellungen kann die Anwendung bei Strukturen, die sich nicht in gleicher Tiefe befinden (also zu gleichen Zeiten Reflexionen hervorgerufen haben) aufgrund der Berücksichtigung eines Tiefenintervalls zu besseren Darstellungen führen. Dazu werden die reflektierten Signale über mindestens 1-2 Wellenlängen gemittelt. Senkrechte räumliche Mittelung wird gleich dem gemessenen Profilabstand gewählt.

Die Time-slice Analyse geht vom Mittelwert der quadrierten Amplitude aus. Danach werden mehrere solcher Datensets zu interpolierten Rasterkarten zusammengefasst. Die Interpolation kann mithilfe verschiedener Algorithmen durchgeführt werden. Jol gibt im Abschnitt Archäometrie (Jol, 2009, p. 483) an: „Die Autoren sind der Meinung das der Krigging Algorithmus (besprochen in Isaaks and Srivestava, 1989) zur Auffindung von Interline-Abschätzungen eine bessere Auflösung bei der Entwicklung von Zeitschnitt-Karten für archäologische Anwendungen liefert.“

Ein weiterer natürlicher Vorteil dieser Anwendung liegt darin, dass durch die Mittelung ein Background-Filter auf die Daten angewendet wird. In vielen Fällen haben Radargramme erhebliche Streifenbildung die durch das Design der Ausrüstung oder durch den Nachhall an der Oberfläche verursacht wird. Dadurch können Veränderungen in der Reflektivität unkenntlich werden. Da in den Schnitten nur die Abweichung vom mittleren Hintergrund-Noise abgebildet wird, wird das Störsignal das zur Streifenbildung führt, ebenfalls entfernt.

Beim Datenprozessing wird oft vor der Time-Slice Analyse bereits ein Background-Filter verwendet. Dadurch könnten Eigenschaften parallel zu den Profilen (z.B. Wände) entfernt werden. Zur Daten-Präsentation sind daher Radargramme ohne angewendeten Background-Filter oft hilfreicher um Untergrundstrukturen abzubilden.

B. *Isosurface Rendering:*

Isosurface-Rendering wird bei einer 3-dimensionalen Dateninterpretation verwendet. Dazu werden Amplituden gleicher Größe miteinander verbunden. Dadurch können beispielsweise feine Strukturen von großem, zusammenhängendem Mauerwerk besser herausgearbeitet werden.

C. *Overlay-Analysis:*

Dazu werden starke Reflektoren (also Reflexionen mit großen Amplituden) einer bestimmten Tiefe/Zeit über einen horizontalen Schnitt gelegt. Dadurch lassen sich leichter Konturen über verschiedene Tiefen verfolgen

IV. Daten des Bundesdenkmalamtes

In Abbildung 16: Plan der Kartause mit eingezeichneten Aufschlüssen sind die archäologischen Aufschlüsse der Kartause Mauerbach abgebildet. Im Rahmen jedes archäologischen Aufschlusses wurden Skizzen erstellt, sowohl im Profil als auch bezüglich der Dokumentationsniveaus. Zusätzlich dazu wurden die Schnitte zur visuellen Datensicherung fotografiert.

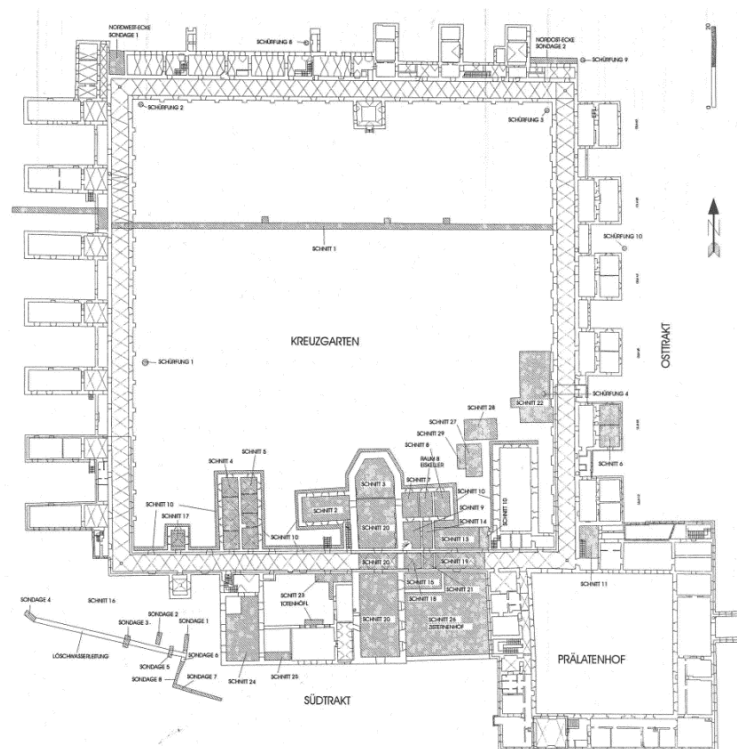
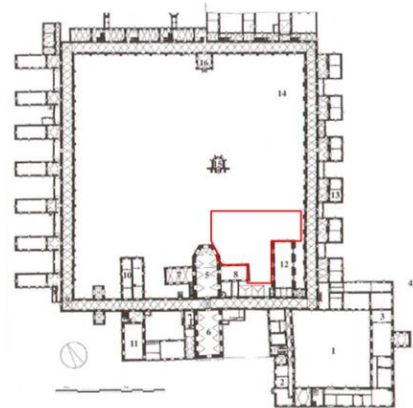


Abbildung 16: Plan der Kartause mit eingezeichneten Aufschlüssen (Kreitner, 1999)

Wie in Abbildung 16 und Fehler! erweisquelle konnte nicht gefunden werden. ersichtlich befinden sich im Untersuchungsgebiet der Diplomarbeit die Schnitte 27, 28 und 29, sowie Teile von Schnitt 22 und Schnitt 10.



Projektgebiet

Die Daten und Aufnahmen der durchgeführten archäologischen Grabungsarbeiten wurden von Herrn Blesl Christoph vom Bundesdenkmalamt zur Verwendung in dieser Arbeit zur Verfügung gestellt. Die hand-gezeichneten Skizzen wurden zur Digitalisierung abfotografiert und die Skizzen anschließend teilweise in das GIS Projekt eingebunden.

Die folgenden Schnitte sind nur ein Auszug der vorhandenen Aufzeichnungen und sollen einen Überblick über die bereits gewonnenen Kenntnisse der Archäologen geben.

Schnitt 27:

Schnitt 27 befindet sich, wie im Plan in der Abbildung 16 dargestellt, im südöstlichen Bereich des Kreuzgartens. Er befindet sich also auch direkt in dem im Zuge dieser Arbeit untersuchten Bereich.



Abbildung 17: Foto Aufschluss 27, (Kreitner, 1999), Blick nach Osten

Im Zuge dieses Aufschlusses wurden sowohl Profile als auch drei unterschiedliche Dokumentationsniveaus skizziert und der Arbeitsbereich fotografiert (siehe Abbildung 17). Abbildung 18 zeigt in diesem Zusammenhang das Nordprofil, also den Südrand von Schnitt 27. Es sind deutlich die Mauerverläufe, hier als M1, M2 und M6 beschriftet) zu erkennen.

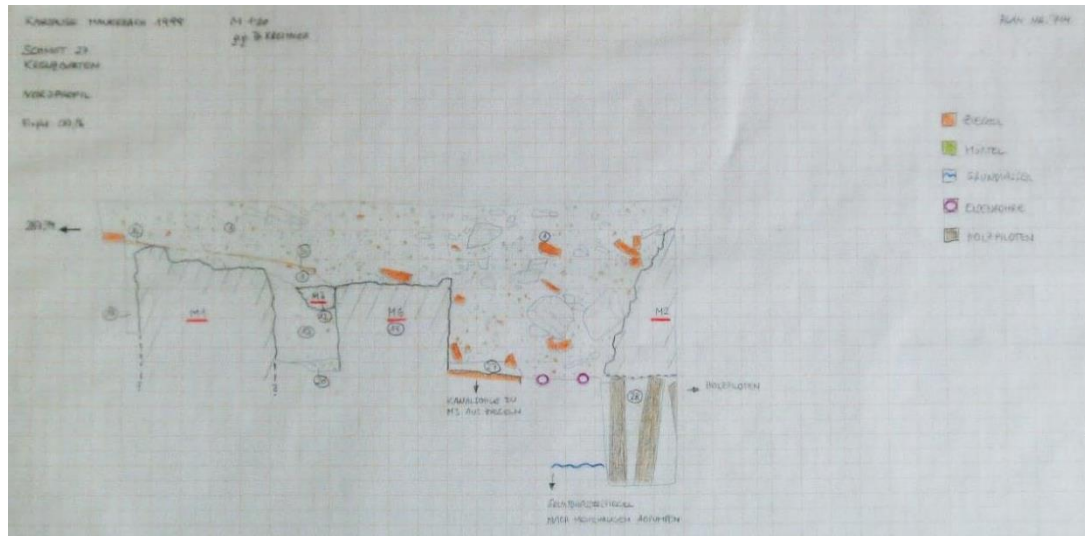


Abbildung 18: Plan Nr. 714 (Kreitner, 1999) Vertikal-Profil von West nach Ost

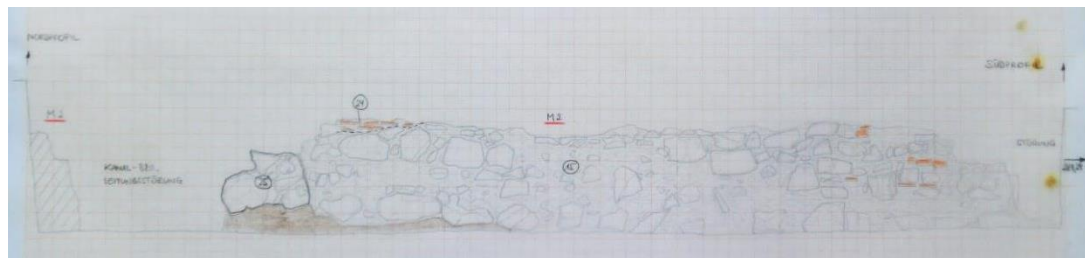


Abbildung 19: Plan Nr. 712 (Kreitner, 1999) Westprofil der Mauer M2

M1 wird, ebenso wie M2 (in Abbildung 19) in den beiliegenden Aufzeichnungen folgendermaßen beschrieben: Das Fundament besteht aus großen Bruchstücken, mit Ausfüllungen von kleinen Steinen, partiell auch Dachziegel- und Mauerziegelbruch. Der Mörtel – das Gussmörtelfundament – ist gelblich und weist Holzkohle und Kalkpartikel auf. Die Farbe der Mauerreste wird als mittel- bis dunkelbraungrau, partiell auch schwarzbraun beschrieben.

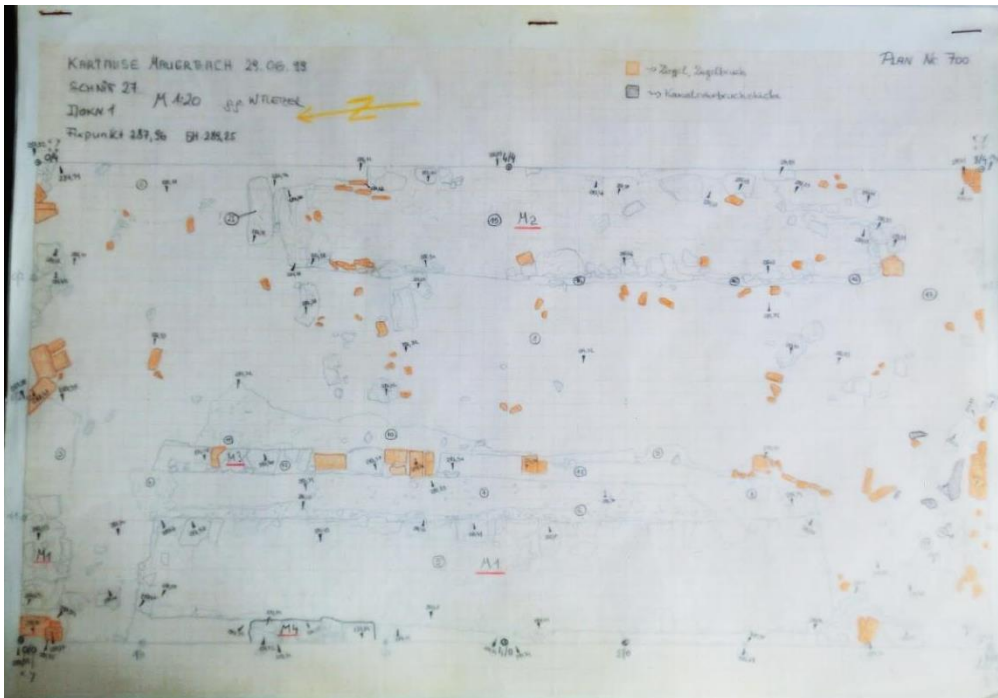


Abbildung 20: Plan Nr. 700 (Fletzer, 1998) Schnitt 27, Dokumentationsniveau 1

Abbildung 20 zeigt einen Horizontalschnitt auf dem ersten Dokumentationsniveau. Der Maßstab ist dabei wie in den vorherigen Skizzen 1:20, als Fixpunkt für die Einmessung der verschiedenen Dokumentationsniveaus wurde 287,96 müA definiert.

An den eingemessenen Punkten, hier als Pfeile mit Angabe der zugehörigen Seehöhe dargestellt, kann man ablesen dass sich das erste Dokumentationsniveau auf ca. 0,5 m unter GOK (sprich Fixpunkt) befindet. In dieser Tiefe liegen die Oberkanten der Mauern M1, M2, M3 und M4. Zwischen den Mauerverläufen sind einzelne Bruchstücke, unter anderem von Ziegeln in Rot dargestellt, im verfüllten Erdbereich zu erkennen.



Abbildung 21: Foto Schnitt 27, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 1

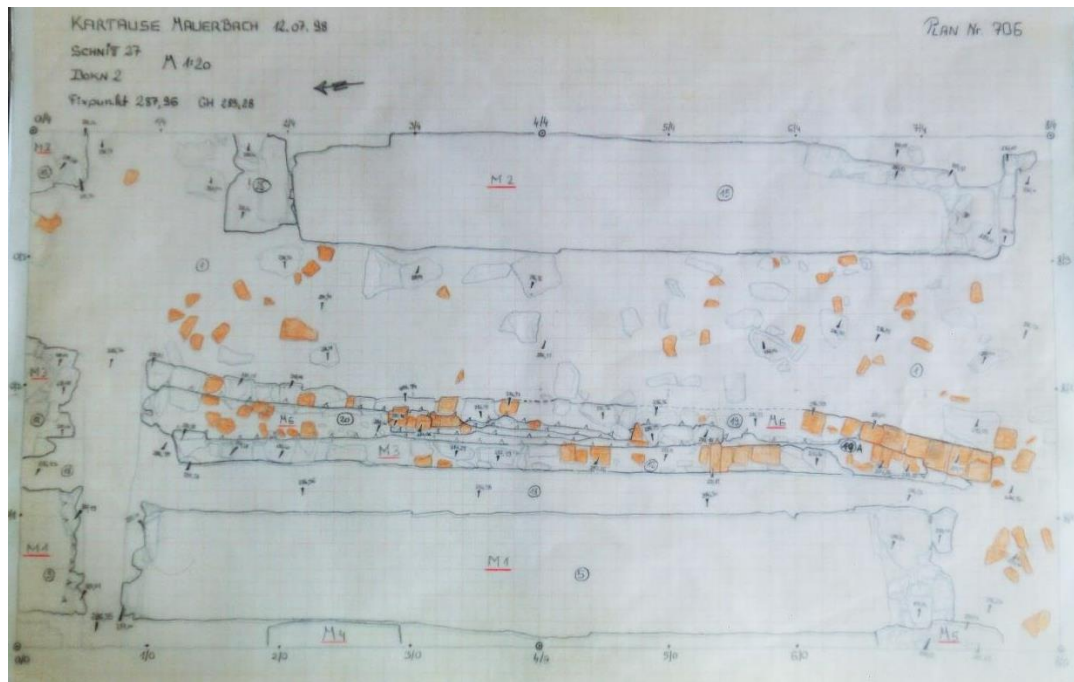


Abbildung 22: Plan Nr. 706 (Fletzer, 1998) Schnitt 27, Dokumentationsniveau 2

Das Dokumentationsniveau 2 ist in Abbildung 22 dargestellt. Die durchschnittliche Tiefe liegt bei 1 m unter dem Fixpunkt 287,96 müA. Die Mauern aus dem vorhergehenden Dokumentationsniveau 1 sind bereits deutlicher zu erkennen, außerdem kommt ein neuer Mauerverlauf, die Mauer M6 an der Ostkante der Mauer M3, zum Vorschein. Wie auf der Skizze erkennbar ist, bestehen die beiden Mauern M3 und M6 aus vielen kleinen Bruchstücken, wobei der Ziegel wieder in Rot dargestellt ist. Im Vergleich dazu treten die Mauern M1 und M2 und auch der kleine Teil von M4 einheitlich aus dem Boden hervor.



Abbildung 23: Foto Schnitt 27, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 2

Abbildung 24 zeigt das skizzierte Dokumentationsniveau 3. Es befindet sich in einer Tiefe von ca. 1,3 m zum Fixpunkt. Es ist deutlich zu erkennen dass der Schutt und die kleinen Bruchstücke, die vorher im Verfüllmaterial zwischen den Mauerverläufen zu finden waren, verschwunden sind. Auch die zuvor noch durch kleine Steine dominierten Mauern M3 und M6. Zudem kommt unter der Mauer M3 Kanalsohle aus Ziegeln hervor, die bereits im Nordprofil in Abbildung 18 zu sehen ist. Entlang dieses Ziegelverlaufs befinden sich zwei Eisenrohre, die als Drainage für den oberen Kreuzgartenbereich dienen. Im südöstlichen Teil der Skizze sind die Holzpiloten zu erkennen (braune Kreise).



Abbildung 24: Plan Nr. 707 (Fletzer, 1998) Schnitt 27, Dokumentationsniveau 3

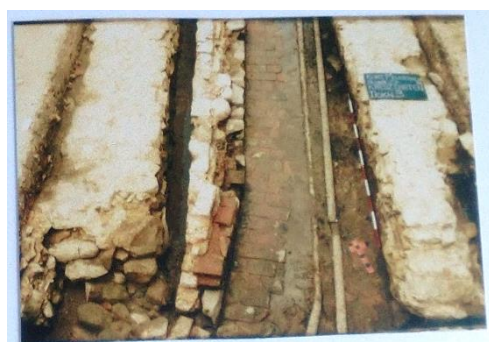


Abbildung 25: Foto Schnitt 27, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 3

Abbildung 25 zeigt den Schnitt 27 auf der Höhe des Dokumentationsniveaus 3. Wie in der Skizze vorher sind die Mauerverläufe von M1 und M2 zu sehen, sowie die Kanalsohle aus Ziegeln entlang von M3+M6.

Schnitt 28:

Schnitt 28 befindet sich nördlich anschließend an Schnitt 27 (siehe Abbildung 16).

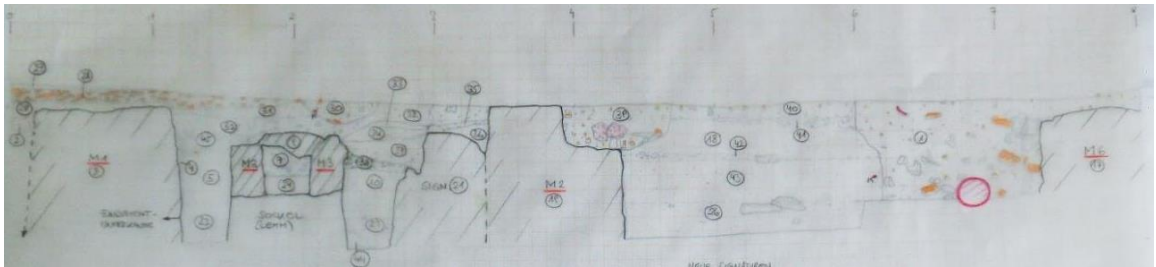


Abbildung 26: Plan Nr. 723 (Kreitner, 1999) Schnitt 28, Nordprofil

Abbildung 26 zeigt den weiteren Mauerverlauf von M1 und M2 in Schnitt 28 (nördlich anschließend an Schnitt 27). Ebenso in Abbildung 27, in den unteren 2 Fotos, zeigt sich der weitere Verlauf der Mauern deutlich.



Abbildung 27: Fotos Schnitt 28, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 1



Abbildung 28_ Plan Nr. 713, Schnitt 28, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 1

Plan Nr. 713 (Abbildung 28) zeigt die Skizze vom ersten Dokumentationsniveau von Schnitt 28. Mauerstrukturen und Putzschacht sind bereits in dieser Tiefe (ca. 0,4 m uGOK) deutlich zu erkennen.



Abbildung 29: Plan Nr. 719, Schnitt 28, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 2



Abbildung 30: Foto Schnitt 28, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 2



Abbildung 31: Foto Schnitt 28, (Kreitner, 1999), Südprofil – Blick in Richtung Schnitt 27

Abbildung 31 zeigt nochmal in Nahaufnahme die Mauerstrukturen M1, M2 in Blickrichtung Süd-Osten (Schnitt 27)

Schnitt 29:

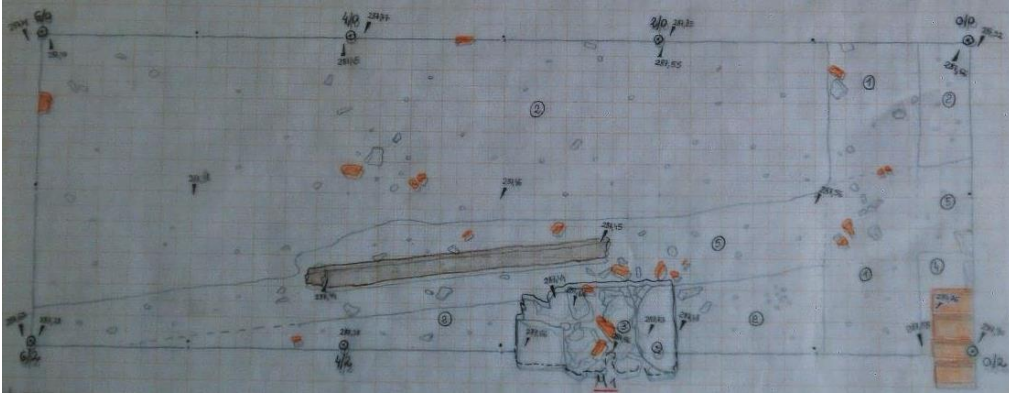


Abbildung 32: Plan Nr. 727, Schnitt 29, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau

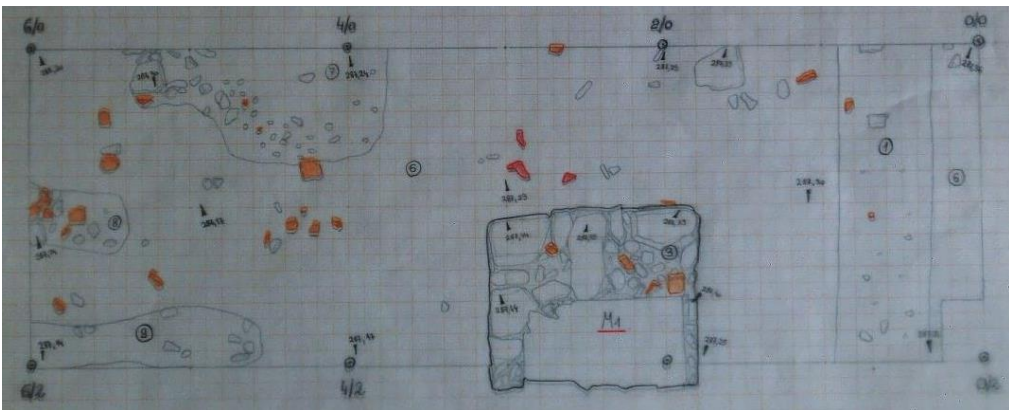


Abbildung 33: Plan Nr. 735, Schnitt 29, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 2

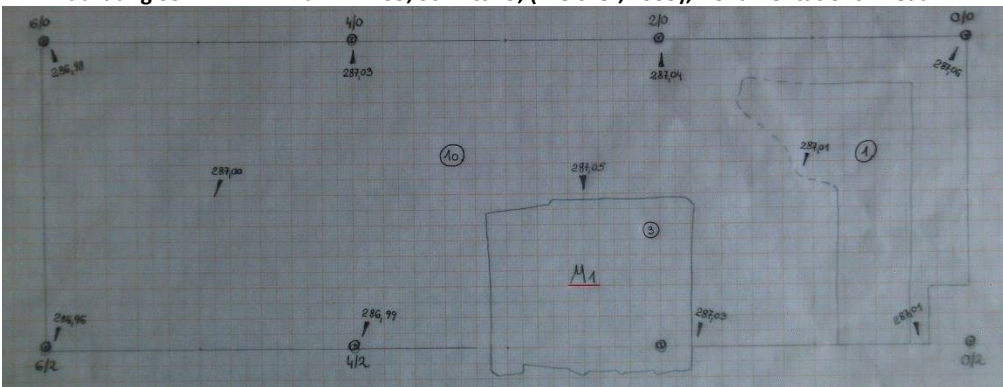


Abbildung 34: Plan Nr. 737, Schnitt 29, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 3

Abbildung 32 bis Abbildung 34 zeigen die Skizzen der verschiedenen Dokumentationsniveaus von Schnitt 29. Schnitt 29 schließt westseitig an Schnitt 27 an, die erkennbaren Mauerstrukturen gehören zu der in Schnitt 27 gezeigten Mauer M1. Es zeigt sich gut dass mit fortschreitender Tiefe die Mauerstrukturen eindeutiger zu erkennen sind.



Abbildung 35: Foto Schnitt 29, (Kreitner, 1999), Dokumentationsniveau 3

Abbildung 35 zeigt Schnitt 29 auf Dokumentationsniveau 3. Mit dem kleinen Mauervorsprung aus der Richtung von Schnitt 27.

Schnitt 22-Süd:

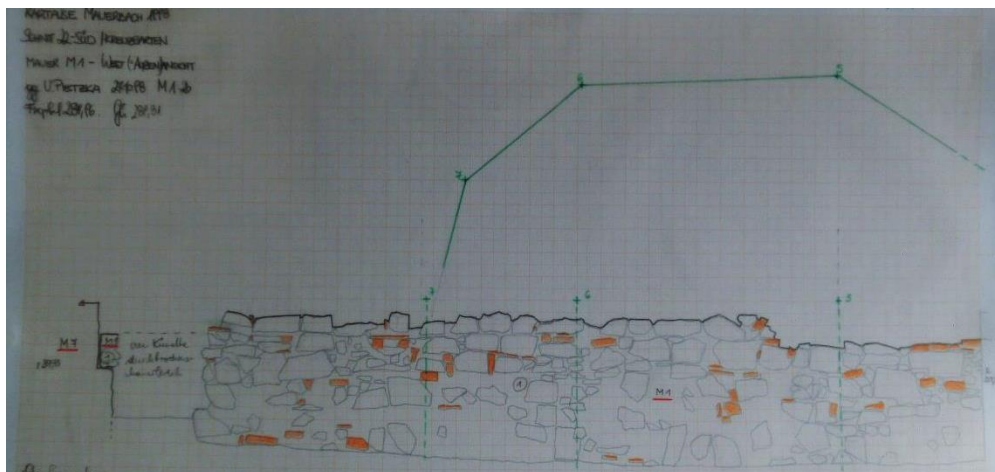


Abbildung 36: Plan Nr. 582, Schnitt 22 Süd, (Pietzka, 1998), West(-Außen)Ansicht

Schnitt 22-Süd liegt, wie im Plan in Abbildung 16 zu sehen, Nordöstlich von Schnitt 27, entlang der Ostmauer des Kreuzgarten. Abbildung 36 zeigt das Profil zugehörig zu den Dokumentationsniveaus von Abbildung 37 bis Abbildung 39.

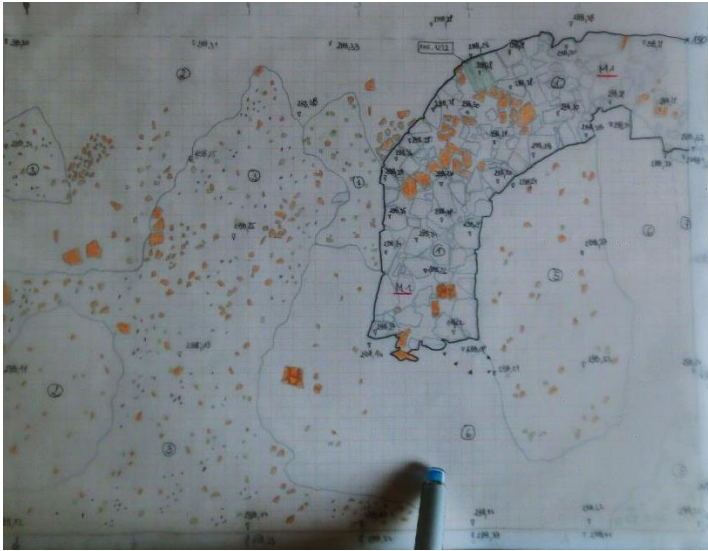


Abbildung 37: Plan Nr. 479, Schnitt 22 Süd, (Pietzka, 1998), Dokumentationsniveau 1



Abbildung 38: Plan Nr. 492, Schnitt 22 Süd, (Pietzka, 1998), Dokumentationsniveau 2



Abbildung 39: Plan Nr. 502, Schnitt 22 Süd, (Pietzka, 1998), Dokumentationsniveau 3



Abbildung 40: Foto Schnitt 22-Süd, (Pietzka, 1998), Dokumentationsniveau 3

Schnitte in ArcGIS dargestellt:

Für die graphische Übereinstimmung der bereits vorhandenen Aufschluss-Daten und der mit 'Bodenradar' gewonnenen Resultate wurden die vier Schnitte der Archäologen des Bundesdenkmalamtes als Tiefenschnitte ins Programm ArcGIS übertragen. Dazu wurden die primären Strukturen in den angefertigten Skizzen der Dokumentationsniveaus verstärkt, damit sie auch in einer kleineren Darstellung sichtbar bleiben.

Mithilfe des Übersichtplans (Abbildung 16) konnte ihre Lage innerhalb des Kreuzgartens bestimmt werden. Abbildung 41 bis Abbildung 43 zeigen alle im Projektgebiet liegenden Schnitte in den verschiedenen Dokumentationsniveaus und liefern eine gute Übersicht über die Grundstrukturen der dort verlaufenden Mauern.

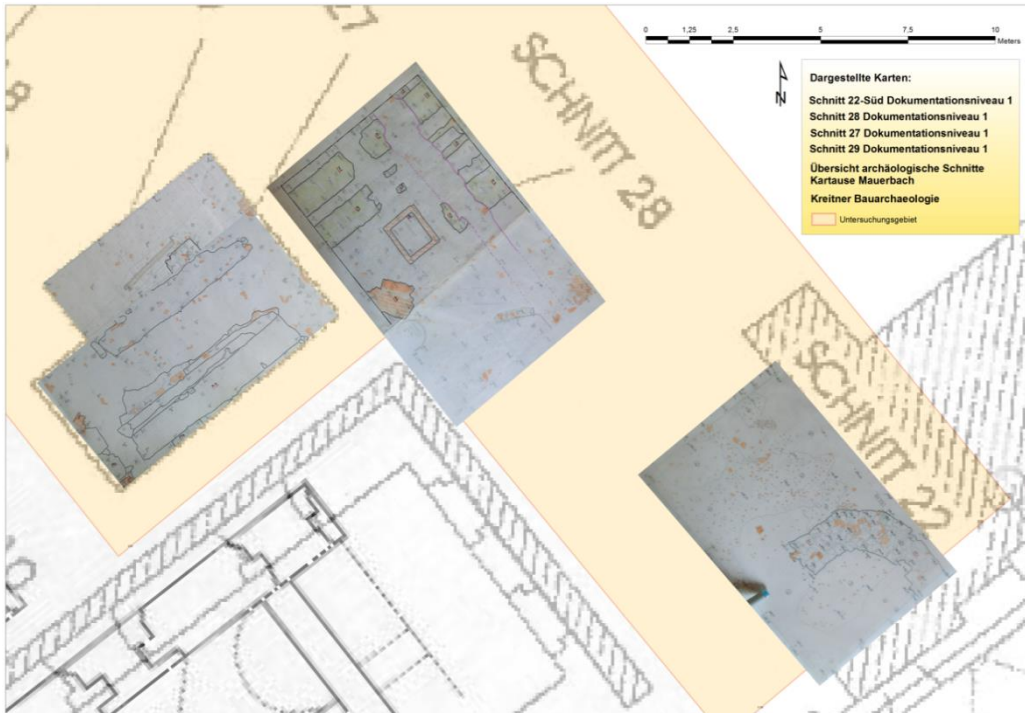


Abbildung 41: Dokumentationsniveau 1

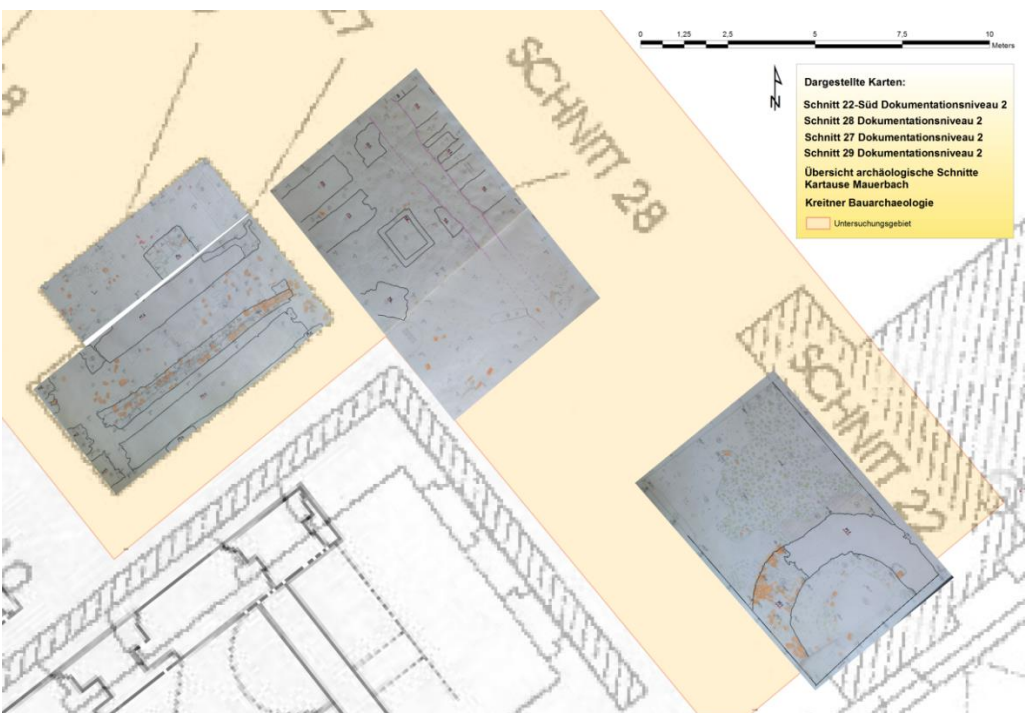


Abbildung 42: Dokumentationsniveau 2

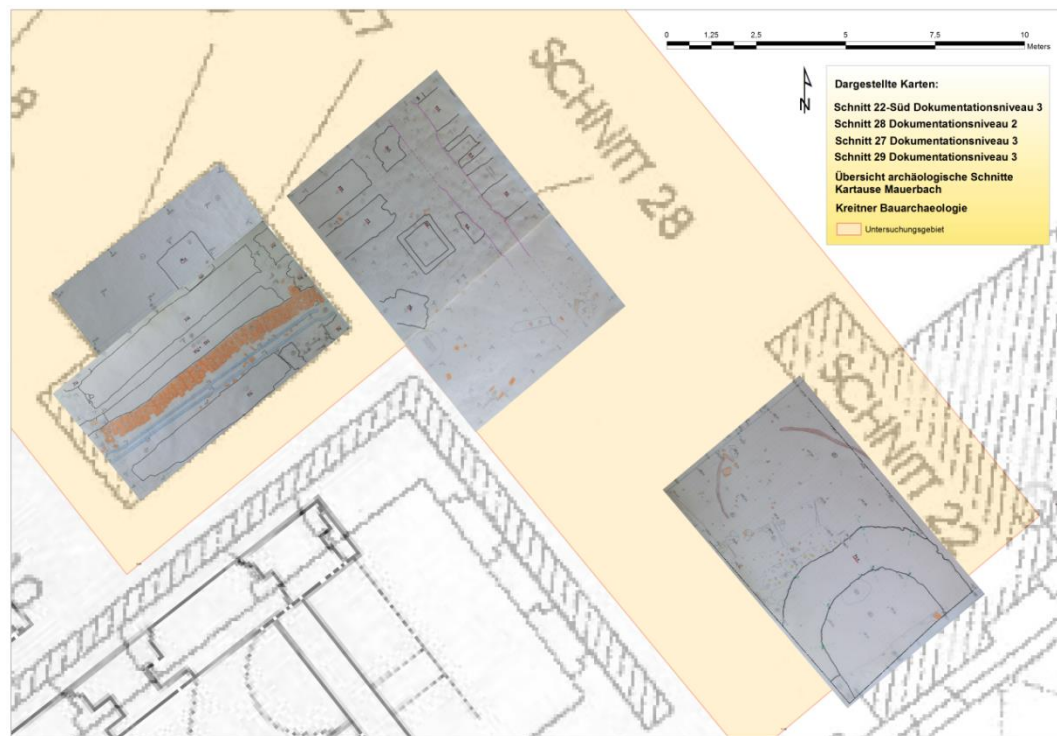


Abbildung 43: Dokumentationsniveau 3

V. Durchführung der Bodenradar-Messungen mit ZAMG-ArcheoProspections



Abbildung 44: Durchführung der Bodenradar-Messungen im Kreuzgarten

Das Messgebiet umfasst, wie in Abbildung 4 dargestellt, den südöstlichen Teil des Kreuzgartens. Abbildung 44 zeigt ein 1-Kanal-Bodenradar-Messsystem des ArcheoProspections Teams der ZAMG sowie eine Momentaufnahme der Datenakquisition.

Die verwendeten Daten wurden (Messprotokoll: Abbildung 45) im Februar 2008 aufgenommen. Die Bodenradar-Messungen wurden mit dem Sensor und der Software pulseEKKO PRO mit einer verwendeten Nominal-frequenz von 500 MHz durchgeführt. Die Aufnahme erfolgte als 3D constant offset mit einem Inline-Abstand der Spuren von 0,5 m und einem Profilabstand von 0,5 m, der jedoch durch die Anordnung der verschiedenen Aufnahmefelder auf 0,25 m reduziert wurde.

Zur Lagebestimmung der Radar-Profile wurde das Messgebiet mit dem Theodoliten eingemessen (Abbildung 45).

FELDPROTOKOLL FÜR GEORADARMMESSUNGEN

Projektcode: /	Datum: 1.2.2008
Messgebiet: Kartause Hauerbach Konz. 97	Wetter: Bewölkt
Mitarbeiter: Lücken Bayrli	Boden: Feucht

Lokal (X/Y)	Ost-Global	West-Global	System: Noq, 500
0/0	-12214.930	345831.643	Record time: 5215
24/0	-12196.398	345846.798	Stacks: 4
0/20	-12202.326	345816.092	Linienabstand: 0,5
11/35	-12184.329	345811.486	Punktabstand:
21/35	-12176.595	345817.826	

Antenne	GridDir	Feldname	X-Beginn	X-Ende	Y-Beginn	Y-Ende	Länge (m)
300	1	KMAX 0 → 19	0		0	20	20m
		KMAX 20 → 41			0	35	25m
		KMAX 42 → 48		24	0	14	14m
500	2	KMAX 0 → 19	-0,25		0	20	20m
		KMAX 20 → 41			0	35	34m
		KMAX 42 → 48		23,75	0	14	15m

Abbildung 45: Feldprotokoll der Radarmessungen

Um sowohl eine lagerichtige Darstellung der Bodenradar-Daten als auch der nachfolgend durchgeführten radiästhetischen Messungen zu gewährleisten, wurden die Eckpunkte des Untersuchungsgebietes und die radiästhetischen Strukturen mit einem Theodoliten vermessen. Dazu wurden Daten des BEV, des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen, sowie die Vermessungspläne des Ziviltechnikerbüros Angst verwendet.

FELDPROTOKOLL FÜR GEODÄTISCHE MESSUNGEN

Projektcode: <i>✓</i>	Datum: <i>1.2.2008</i>
Messgebiet: <i>Karlauise Hauerbach Ponz. 97</i>	Wetter:
Mitarbeiter:	Instrument: <i>TCP 307</i>

Station	Punkt	E (m)	N (m)	H (m)	Hi
	<i>1001</i>	<i>-12194,818</i>	<i>345842,804</i>	<i>—</i>	<i>—</i>

Orient.	Punkt	E (m)	N (m)	H (m)	Hr
	<i>H397</i>				
<i>1</i>	<i>24/0</i>	<i>-12196,398</i>	<i>345846,798</i>	<i>—</i>	<i>—</i>
<i>2</i>	<i>0/0</i>	<i>-12214,380</i>	<i>345831,643</i>	<i>—</i>	<i>—</i>
<i>3</i>	<i>0/20</i>	<i>-12202,326</i>	<i>345816,092</i>	<i>—</i>	<i>—</i>
<i>4</i>	<i>11/55</i>	<i>-12184,329</i>	<i>345811,486</i>	<i>—</i>	<i>—</i>
<i>5</i>	<i>21/35</i>	<i>-12176,595</i>	<i>345817,826</i>	<i>—</i>	<i>—</i>

Skizze:

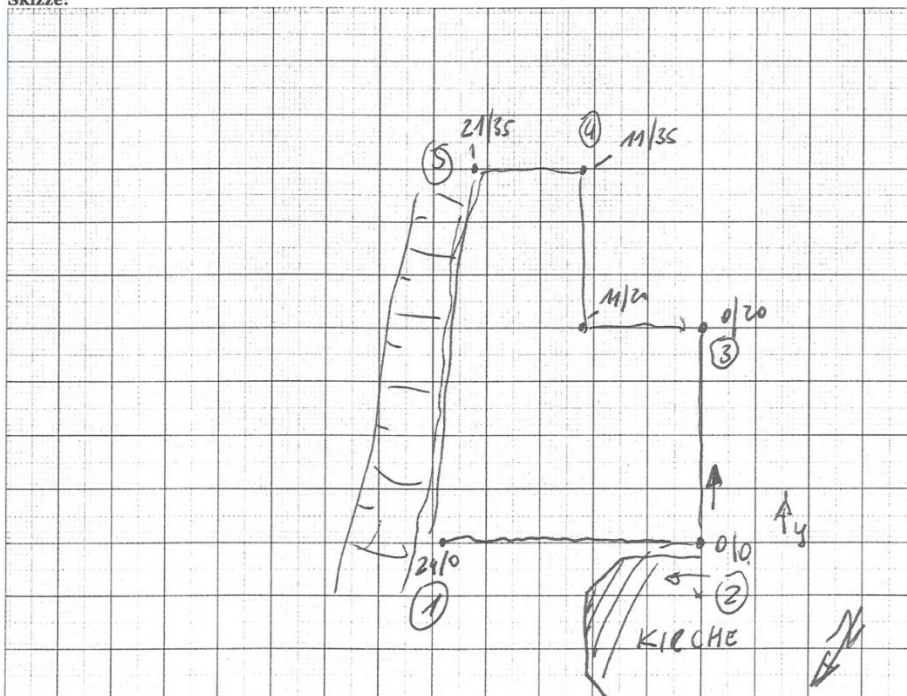


Abbildung 46:

Feldprotokoll der geodätischen Einmessungen

VI. Darstellung der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden beide Auswertungen der im Abschnitt III angeführten Messungen dargestellt. Die aufgezeichneten Daten wurden mit verschiedener Software bearbeitet und dann in das Visualisierungsprogramm ArcGIS eingearbeitet.

6.1. Auswertung des ArcheoProspections Teams der ZAMG

Die erste Auswertung wurde vom Team ArcheoProspections der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik durchgeführt. Dazu wurde die seit 1999 entwickelte Software APRadar (**ArcheoProspectionsRadar**) verwendet. Diese selbst entwickelte Software fand bereits in zahlreichen Untersuchungen des ArcheoProspections Teams ihre Anwendung. Die verwendeten Prozessingschritte sowie die von ZAMG-ArcheoProspections angewendeten Bildverarbeitungsmethoden sind in ihren zahlreichen Arbeiten dokumentiert. Beispielsweise wurde 2009 im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Baugeschichte der Schallaburg in Niederösterreich (Löcker, Eder-Hinterleitner, & Seren, 2011, S. 399-401) geophysikalische Messungen durchgeführt. Ebenso sind die Experten von ArcheoProspections seit 1997 mit archäologisch-geophysikalischen Prospektionsmethoden im Raum Carnuntum tätig (Neubauer W. , Eder-Hinterleitner, Seren, & Melichar, 2002), (Eder-Hinterleitner, et al., 2006), (Seren, Eder-Hinterleitner, Neubauer, Löcker, & Melichar, 2007). Thematisch ähnliche Messungen wurden im Gebiet um Flavia Solva (Groh, Neubauer, Seren, Eder-Hinterleitner, & Löcker, 2002) durchgeführt, ebenso wie generell Untersuchungen im Zusammenhang mit der römischen Baugeschichte (Neubauer, Eder-Hinterleitner, & Seren, Large Scale GPR Surveys of Roman Buildings, 2005) (Eder-Hinterleitner, Seren, Löcker, Neubauer, & Bayirli, 2009) vorgenommen wurden.

Die Auswertung mit APRadar für die vorliegende Arbeit wurde von ZAMG - ArcheoProspections in Form von Bildern der Tiefenschnitte von Amplitudenflächenplänen zur Verfügung gestellt. Diese Amplitudenflächenpläne stellen wiederum Summationsintervalle über jeweils 30cm Tiefenintervalle dar (Eder-Hinterleitner, pers.comm. 2012).

Die Software APRadar beinhaltet im Wesentlichen die gleichen bzw. ähnliche Verarbeitungsschritte wie die im nächsten Kapitel verwendete Software ReflexW. Jedoch wurden die Prozessingschritte in APRadar durch jahrelange Arbeiten im Bereich der Archäologie natürlich auf die angewendeten Messsysteme und Messmethodik optimiert. Auch wurden zur besseren Interpretierbarkeit Bildverarbeitungsroutinen und spezielle Filter in APRadar implementiert. Und die automatisierte Georeferenzierung der Messbilder ermöglicht es, die erhaltene Information gleich lagerichtig in Geographischen Informationssystemen zu nutzen.

Tiefe 0 – 30 cm



Abbildung 47: Übersichtskarte Untersuchungsgebiet; Amplitudenflächenplan ArcheoProspections ZAMG; Tiefe: 0 – 30 cm

Die unterlegten Karten sind aus dem Atlas des Landes Niederösterreich (NÖAtlas4.0) entnommen und gemeinsam mit einer Karte des Bundesdenkmalamtes (Kreitner, 1999) dargestellt.

Angezeigt ist ebenfalls der Radar-Amplitudenflächenplan von 0 – 30cm in den Boden. In dieser Tiefe sind noch keine Untergrundstrukturen erkennbar bis auf den verfestigten Teil des Untergrundes im Bereich der Straße. Die Straße war zwar während den Messungen noch

leicht erkennbar. Dass jedoch ein Weg von der Straße in Richtung Basilika führte wurde erst aufgrund dieser Darstellung ersichtlich.



Abbildung 48: Amplitudenflächenplan ArcheoProspections ZAMG; Tiefe: 30 – 60 cm

Abbildung 48 zeigt einen weiteren Plan, der von den für die Kartause Mauerbach zuständigen Archäologen zur Verfügung gestellt wurde. Er umfasst die derzeit bestehende Kartause und zeigt außerdem in Rot die durch Ausgrabungen und Suchschlitze festgestellten Strukturen der mittelalterlichen Kartause. In grau sind die vermuteten Untergrund-strukturen dargestellt.

Tiefe 30 – 60 cm

Bereits in der Tiefe von 30 – 60 cm sind die Längsmauern, der bereits in den archäologischen Schnitten zu sehen war, zu erkennen.

Der hinterlegte Plan der Archäologen (in Rot) zeigt auch den voraussichtlichen weiteren Verlauf der Strukturen.

Um eine übersichtlichere Interpretation der Radardaten zu ermöglichen wurden im ArcGIS die erkennbaren Strukturen durch Shape files hervorgehoben.

Dadurch sind die Strukturen insgesamt leichter zu erkennen.

Dadurch kann im linken Bild im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes bereits eine bisher unbekannte Struktur (ähnlich zwei Zimmern) erkannt werden.

Abbildung 49: ArcheoProspections ZAMG 30 – 60 cm Tiefe

Tiefe: 60 – 90 cm

Abbildung 50:

ArcheoProspections ZAMG: 60 – 90 cm Tiefe

Mit fortschreitender Tiefe, hier bereits in 60 – 90 cm Tiefe, verstärken sich die Reflexionen der Längsmauern und im östlichen Bereich, der sich mit dem Schnitt 22-Süd der Archäologen abdeckt, kommt gebogene Mauerstruktur zum Vorschein.

Westlich der zwei parallel verlaufenden Mauern kommt hier eine weitere Mauerstruktur zum Vorschein (nördlich der Zimmerstruktur).

Tiefe 90 – 120 cm

In der Tiefe von 90 – 120 cm verursachen die Strukturen im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes bereits geringere Reflexionen. Dominant sind immer noch die Reflexionen der bekannten Längsmauern im Zentralbereich. Auch die gebogene Struktur im östlichen Bereich ist stark zu erkennen.

Abbildung 51: ArcheoProspections ZAMG; 90 – 90 cm Tiefe

Tiefe 120 – 150 cm

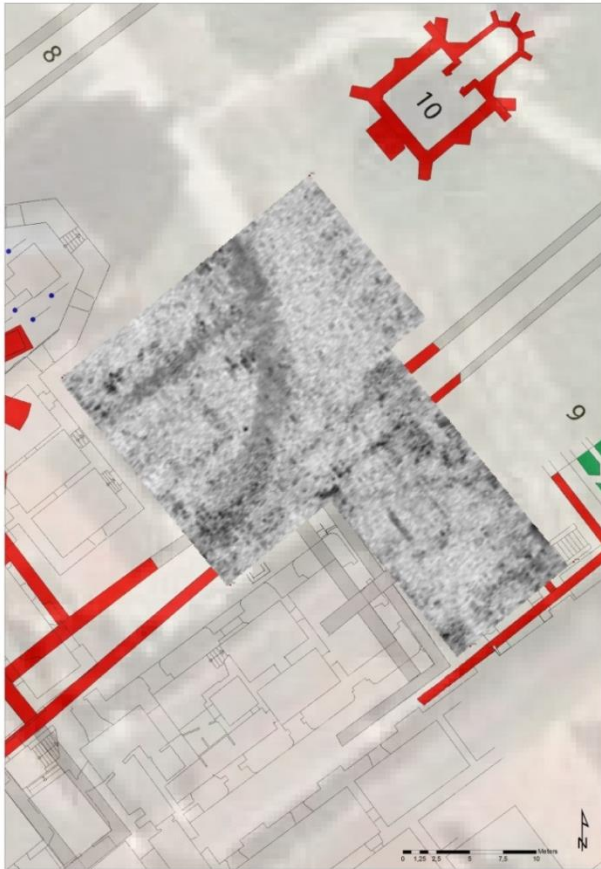


Abbildung 52:

ArcheoProspections ZAMG: 120 – 150 cm Tiefe

In 120 – 150 cm Tiefe setzen sich die Strukturen der Längsmauern M1 und M2 fort, sind jedoch als schmalere Reflexionen erkennbar. Auch sind im östlichen Bereich die Mauerstrukturen in mehrere Stücke unterteilt.

Auch die Reflexion der raumartigen Struktur im westlichen Teil der Untersuchungsgebiets ist noch gut zu erkennen aber nimmt im Vergleich zur Tiefe 90 – 120 cm bereits ab.

Tiefe 150 cm –

Die Tiefe 150 cm – zeigt nur noch ganz vereinzelt Überreste bzw. Schatten der reflektierten Strukturen. Im Hintergrund ist außerdem bereits die Multiple des Weges, aus dem Radarbild 0 – 30 cm Tiefe, zu erkennen.

Abbildung 53: ArcheoProspections ZAMG: 150 cm - Tiefe

6.2. Auswertung mit dem Programm ReflexW 3.5 © Karl-Josef Sandmeier; Sandmeier-geo, Karlsruhe

Auswerteschritte:

- *Import und 1. Darstellung der Rohdaten*
- *Überprüfen der Plausibilität*
- *Lagerichtige Darstellung*

Die lagerichtige Darstellung war für die Auswertung mit ReflexW einer der zeitaufwendigsten Schritte. Durch die Anordnung der Profile, versetzte Linien um einen geringeren Profilabstand zu erreichen, wurden 2 Aufnahmefelder um 180° gedreht aufgezeichnet. Dazu wurden die bestimmten Profile im ReflexW um ihre x-Achse gedreht. Um zudem eine folgerichtige Darstellung zu erreichen, musste auch die Nummerierung der Profile umgekehrt werden.

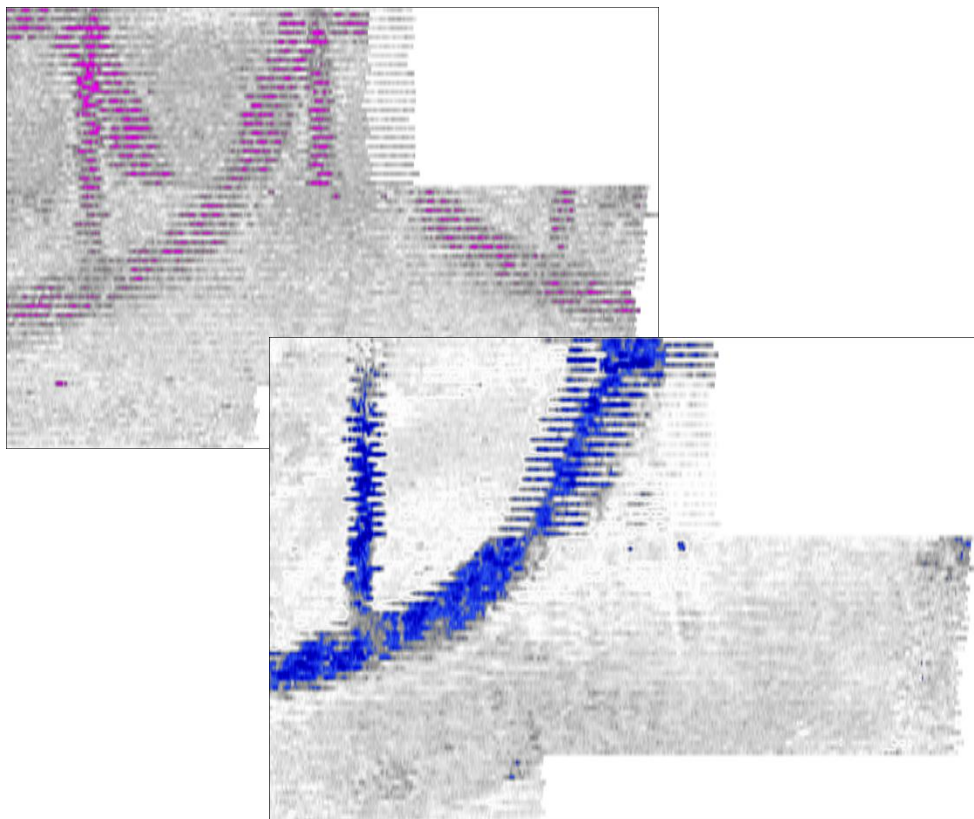


Abbildung 54: Screenshot ReflexW – Profile

Abbildung 54 zeigt in einem Screenshot die gedrehten Profile. Zur Darstellung wurde in der 3D-Ansicht von ReflexW die oberste Reflexion, hier der verdichtete Bereich des Weges, verwendet. Zuerst die Darstellung mit den Originalen Daten (also den um 180° verdrehten Profilen), darauffolgend eine Abbildung nachdem die Profile um ihre x-Achse gedreht wurden.

- **Bestimmung der Processing-Schritte**

In der Auswertung im Programm ReflexW wurden die folgenden Prozessingschritte verwendet:

X-flip:

um die gedrehten Profile richtig darzustellen

Traceincrement – resampling:

da das Mess-System nicht mit konstanter Geschwindigkeit über das Untersuchungsgebiet gezogen wird, ist der resultierende Spurenabstand ebenfalls nicht konstant und wird im Processing neu gesampelt

Move starttime:

Dieser Filter verwendet die Zeit-Specification im Fileheader und verschiebt die Startzeit der Daten auf 0.

Mute:

Entfernt die unbrauchbaren Spuren

Bandpass

Eingestelltes Fenster: 250 – 1000 MHz

Verstärkung (Gain):

Energydecay; Nach der Bestimmung einer durchschnittlichen Abnahmekurve aller Spuren wird jede Spur mit dem durchschnittlichen Werte dieser Kurve gefiltert. Dies dient zur Verstärkung von kleinen Amplituden im Vergleich zu Bereichen mit großen Amplituden (Sandmeier, 1998, S. 153).

DeWOW**Time-cut**

Gibt das Ende der Spur vor

Migration

Kirchhoff–Migration. Die Geschwindigkeit wird in der geringen Tiefe als konstant angenommen

- **Sequence-Processing für alle Profile**

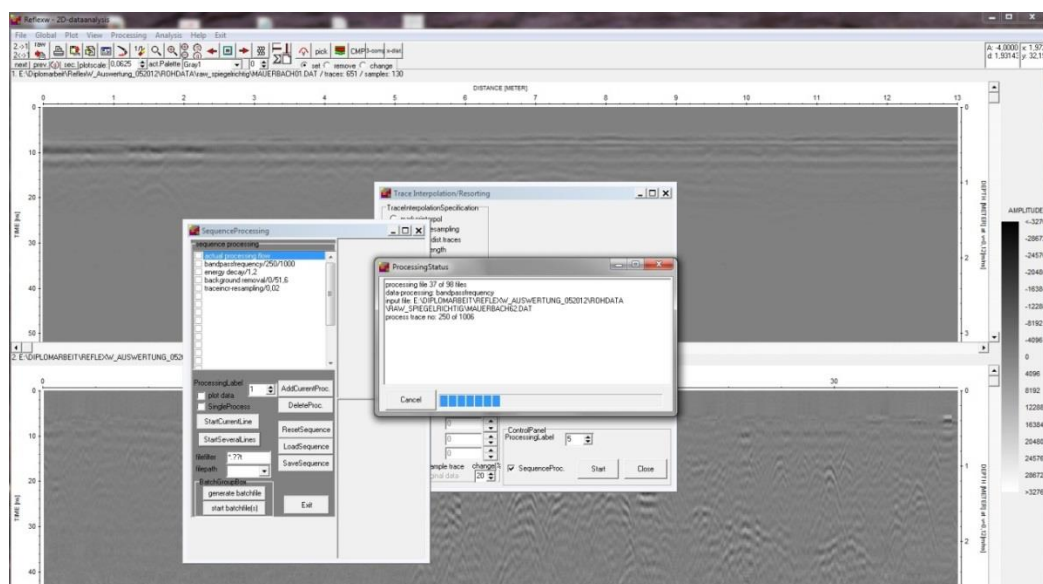


Abbildung 55: Screenshot: Sequence-Processing in ReflexW

- **Erstellen eines 3D-Datenmodells**
- **Horizontalschnitte**

Nach der Generierung von dreidimensionalen Datenblöcken können diese in beliebige Richtung virtuell geschnitten werden. Am meisten verwendet werden Horizontalschnitte (Tiefenschnitte) um eine archäologische Interpretation zu ermöglichen. Auch können

Animation mit mehreren Horizontalen Schnitten dabei helfen bestimmte Strukturen wie Säulen, Stiegen und Brunnen in den Bildern zu erkennen.

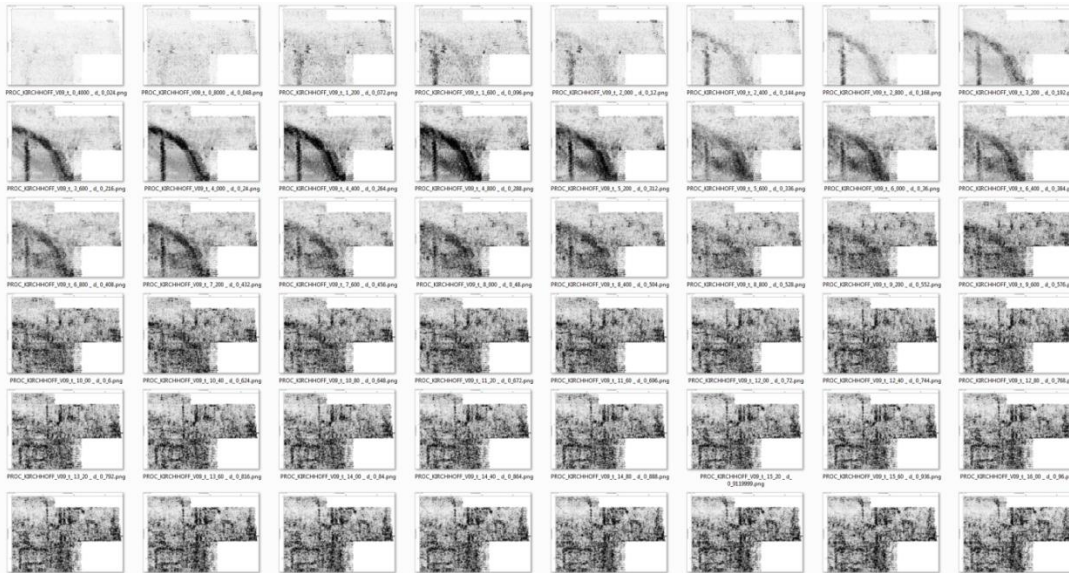


Abbildung 56: Screenshot Horizontalschnitte ReflexW

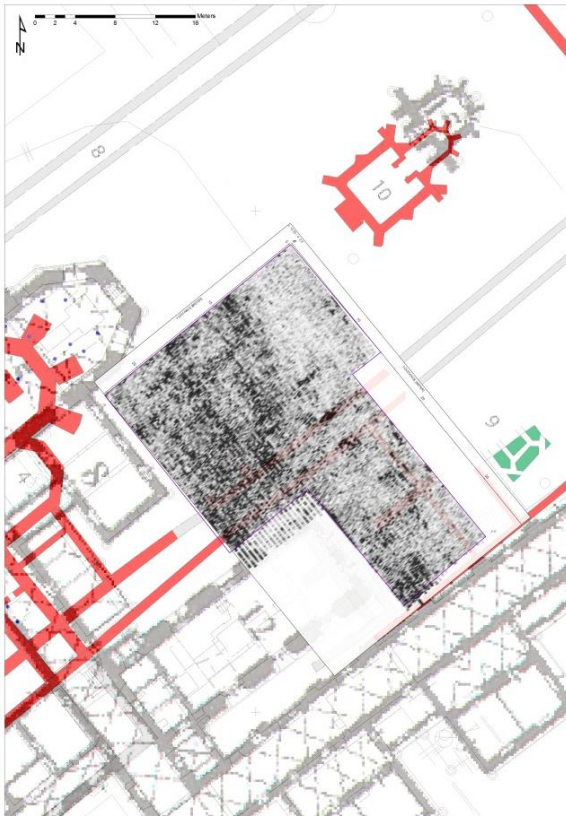
Horizontalschnitte der ReflexW 3.5 Auswertung im ArcGIS



Abbildung 57: Darstellung der GPR-Daten in ArcGIS

Abbildung 57 zeigt die mit ReflexW prozessierten GPR-Daten in ihrer lagerichtigen Darstellung im ArcGIS (NÖAtlas4.0) (Kreitner, 1999). Man kann in dieser geringen Tiefe bereits, wie auch in den Daten der ArcheoProspections Auswertung, die starke, oberflächliche Reflexion des Weges erkennen.

Tiefe: 0,6 m



Bei dieser Auswertung sind in einer Tiefe von ca. 60 cm Teile der Strukturen zu erkennen.



Abbildung 58: ReflexW: Amplitudenflächenplan in 60 cm Tiefe

Tiefe: 0,8 m



In einer Tiefe von 80 cm sind mehrere starke Reflexionen erkennbar.

Man sieht die beiden, bereits mehrfach erwähnten Längsmauern im Mittelbereich. Außerdem ist die raumartige Struktur im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes zu erkennen.

Die noch nicht näher identifizierte Längsstruktur nördlich davon tritt ebenfalls hervor.

Abbildung 59:

ReflexW: Amplitudenflächenplan in 80 cm Tiefe

Tiefe: 1,12 m



Die Radardaten in der Tiefe von ca. 110 cm setzen die Strukturen der vorherigen Abbildungen fort. Es sind sowohl die Längsstrukturen zu erkennen, also auch die raumförmigen Strukturen im Westteil. Außerdem treten die Reflexionen einer bogenförmigen Struktur im östlichen Teil des Gebietes hervor.

Abbildung 60: ReflexW: Amplitudenflächenplan in ca. 110 cm Tiefe

Tiefe: 1,50 m



In diesem Horizontalschnitt sind bereits die Längsstrukturen im westlichen Bereich (nördlich des Raumes) verschwunden. Auch die weiteren Längsmauern sind schmaler zu erkennen. Der Raumartige Reflexion setzt sich auch in dieser Tiefe noch fort, die gebogenen Mauerstruktur im Osten hat sich verstärkt.

Abbildung 61:

ReflexW: Amplitudenflächenplan in 150 cm Tiefe

Tiefe: 1,82 m

In der Tiefe von ca. 180 cm nehmen die Reflexionen generell ab. Die Längsmauern sind noch zu erkennen, ebenso wie ein Teil des Raumes im Westen. Im Ostteil kann man auch noch Reste der vormals stärkeren Strukturen erkennen. Auch die gebogene Reflexion am Ostrand des Untersuchungsgebietes ist noch vorhanden.

Abbildung 62: ReflexW: Amplitudenflächenplan in ca. 180 cm Tiefe

Tiefe: 2,09 m



Die Radarbilder dieser Tiefe zeigen kaum mehr Reflexionen der Mauerstrukturen. Teile des Raumes sowie der Längsmauern sind zu erkennen, das ganze Radarbild wird jedoch von der Multiplen des Weges (in Braun dargestellt) überlagert. Auch die gebogene Struktur im Osten ist verschwunden.

Abbildung 63:

ReflexW: Amplitudenflächenplan in ca. 210 cm Tiefe

VII. Endbetrachtung

Der graphische Vergleich der beiden unterschiedlichen Auswertungen der Radardaten sowie der bereits vorhanden archäologischen Schnitte zeigen im Allgemeinen die gleichen Strukturen.

Am deutlichsten sind die Längsmauern, von den Archäologen in Schnitt 27 und Schnitt 28 als M1 und M2 bezeichnet, zu erkennen. Auch die halbkreisförmige Mauerstruktur aus Schnitt 22-Süd ist im östlichen Bereich der Radarbilder deutlich zu erkennen.

Zusätzlich zu den bereits bekannten Strukturen konnte im westlichen Teil des Untersuchungsgebietes eine neue Struktur mit raumartigem Charakter aufgenommen werden. Auch eine neue längsförmige Struktur nördlich der 2-räumigen Reflexion tritt in den Radardaten hervor.

Die Radarbilder der ersten Auswertung (von ArcheoProspections) zeigen eindeutige Reflexionen, das ist vermutlich auf die summierte Darstellungsweise, die in ReflexW nicht möglich war, zurückzuführen.

Trotz des Bemühens einer lagerichtigen Darstellung der mit ReflexW prozessierten Daten konnten zwar die Profile in der richtigen Reihenfolge und Drehung dargestellt werden, die unterschiedliche Länge der Profile konnte jedoch nicht richtig angepasst werden (wie in den mit ReflexW prozessierten Bildern erkennbar). Dies ist vermutlich auch ein Grund für die ungenaueren Reflexionen in diesen Bildern.

Dabei muss auf jeden Fall die Erfahrung des ArcheoProspections Teams zum Thema archäologische Prospektion hervorgehoben werden, und damit einhergehend natürlich auch die Software APRadar, die auf archäologische Fragestellungen abgestimmt ist. Im Gegensatz dazu ist die Software ReflexW für seismische Fragestellungen entwickelt worden, die zusätzlich die Möglichkeit bietet Bodenradardaten zu prozessieren. Spezielle Techniken für die feinräumige archäologische Anwendbarkeit sind darin nicht enthalten.

Für die Fallstudie Mauerbach lieferte die Anwendung des Bodenradars sowohl übereinstimmende als auch neue Ergebnisse. Übereinstimmungen konnten mit allen archäologischen Schnitten im Untersuchungsgebiet erzielt werden, die primären Mauerstrukturen sind durchwegs als Reflexionen zu erkennen. Die neuen Ergebnisse beziehen

sich auf die Bisher unbekannten Strukturen im bisher noch nicht ausgehobenen westlichen Bereich des Gebietes. Außerdem werden die Vorteile einer Prospektion mit Bodenradar – das nicht-intrusive Lokalisieren von Strukturen mit einer guten Auflösung, sowie die schnelle Ausführung – deutlich.

Wie jedoch auch Leckebusch in seinen Überlegungen anführt (Leckebusch, Jürg, 2001, S. 18) liefert erst eine Grabung die eindeutige Gewissheit über die vorhandenen Strukturen im Untergrund.

VIII. Anhang - Radiästhesie

Es gibt viele Publikationen von Untersuchungen in diesem Bereich, nur wenige können auf eine wissenschaftliche Herangehensweise zurückgreifen. Aufgrund von unvollständig belegten oder sogar widersprüchlichen Nachweisen radiästhetischer Beobachtungen ist dieser Bereich in die Esoterik/ den Okkultismus einzuordnen. Auch die missverständliche Ausdruckweise der Radiästheten, die beispielsweise von Energie, Wasseradern und Strahlen sprechen, führt zu einer Kluft mit den Naturwissenschaften. Weiters hat das Fehlen eines wissenschaftlichen Hintergrundes einen Wildwuchs an radiästhetischen Methoden und Gedankenmodellen gefördert.

So formuliert schon Dr. Volker Fritsch in seinem 1955 (Fritsch, 1955, S. 12) erschienen Buch vernünftig: *“Soll auf diesem Gebiet endlich einmal Klarheit geschaffen werden, so ist es unbedingt notwendig, auch von klaren Voraussetzungen auszugehen. Ebenso notwendig ist es, alle Messungen und Beobachtungen mit jenen Maßstäben zu messen, die in der Wissenschaft notwendigerweise gefordert werden müssen. Es kann der einfachste Mann zu diesen Bestrebungen wertvolle Beiträge leisten, wenn er nur ehrlich gewillt ist, unvoreingenommen zu beobachten und das, was er beobachtet hat, wahrheitsgetreu mitzuteilen“.*

Die Terminologie im folgenden Abschnitt ist an die radiästhetische Literatur angelehnt und ist deshalb nicht in einem physikalisch-naturwissenschaftlichen Kontext zu verstehen.

8.1. Geschichte der Radiästhesie

Die Bezeichnung Radiästhesie wurde von Abbé A. Bouly im Frankreich der 1930er Jahre geprägt und leitet sich aus dem lateinischen Wort radiare = Strahlen aussenden/strahlen und dem griechischen Wort αισθάνομαι (aisthanomai) = empfinden ab. Wörtlich übersetzt bedeutet Radiästhesie also Strahlenempfindlichkeit. Gemeint ist damit allerdings die Fähigkeit mithilfe einer Rute oder anderen „strahlen“-empfindlichen Instrumenten die unsichtbare Ausstrahlung „feinstofflicher Energien“ aufzufinden. Dabei fungiere der Mensch (Rutengeher/Radiästhet) selbst als Messinstrument und die Rute bzw. der Pendel dienten als Anzeigehilfen.

Vermutlich findet die Radiästhesie bereits seit Beginn der menschlichen Zivilisation Verwendung. Dies belegten lt. E. Worsch (Worsch, 2001, S. 14) 8.000 Jahre alte Zeichnungen im Atlasgebirge (Nordafrika), die einen Wüschelrutengänger darstellen. Er nimmt dabei weiters an, dass die Nutzung der Wüschelrute einsetzte als die Menschen sesshaft wurden und deshalb die Suche nach günstigen Siedlungsplätzen einen großen Stellenwert einnahm. Damals hätten viele Menschen die Fähigkeit - auch ohne Rute - günstige und ungünstige Orte zu unterscheiden besessen. Worsch spricht dabei von einem natürlichen Instinkt, einem sog. „sechsten Sinn“. Die Rute selbst als Anzeigeobjekt sei erst später dazu genommen worden.

Worsch zitiert weiters auch Schneider (1981), der als historischen Nachweis über die Radiästhesie die Schriftensammlung „Corpus Agrimensorum, Codex Arcerianus der Herzog August-Bibliothek in Wolfbüttel (5.-6.Jhdt. n.Chr.) anführt, in der eine Sammlung von Vorschriften für die etruskischen und römischen Feldmesser/Agrimensoren aus der Zeit 50 bis 200 n.Chr. enthalten sind. Diese enthalten auch Anweisungen für die Auguren (Hellseher) der Etrusker, nach welchen Maßstäben und Ausrichtungen die Grenzlegungen und der Straßen- und Städtebau zu erfolgen habe. Daraus ergibt sich lt. Worsch, dass bereits in der antiken Römerzeit ein Verständnis von Gitterlinien und -netzen auf der Erdoberfläche vorhanden war, das beim Bau von Siedlungen und Verbindungswegen berücksichtigt wurde.

Die ersten eindeutigen Belege von Wüschelruten finden sich in den Aufzeichnungen des aus dem Erzgebirge stammenden Arztes Georgius Agricola (1494-1555) über den Bergbau der damaligen Zeit „De Re Metallica“ (Betz, 1990, S. 30). Agricola selbst stand der Radiästhesie jedoch kritisch gegenüber. Auch sein Fachkollege Paracelsus (1493 – 1541) zählte das Rutengehen zu den „artes incertae“, den unsicheren Künsten (Worsch, 2001, S. 15). Der Gelehrte Athanasius Kirchner (1601 – 1680) hingegen war lt. Prokop und Wimmer (Prokop, 1985, S. 4) ein Anhänger dieser Kunst und formulierte als Erster die Möglichkeit dass nicht die Rute, sondern „der Mensch auf die Ausdünstungen der Erzgänge“ reagiere.

Neben der bekannten gegabelten Form hätte es bereits in der Steinzeit die nur aus einem Stab bestehende Rute (Deutebein) gegeben. Dieser wurden mystische Eigenschaften nachgesagt und ihre Handhabung galt als von den Göttern inspirierte Kunst die mit viel Macht einherging. So könnten sich verschiedene Arten von Herrscherstäben (Krummstab der Pharaonen, Zepter, Bischofsstab) daraus entwickelt haben (Worsch, 2001, S. 15). Auch erwähnt Worsch weiters (Worsch, 2001, S. 15f) eine Göttin der Quellen und Herrin über das Wasser im chaldäisch-babylonischen Raum, die zugleich den Namen „Herrin des magischen

Stabes“ trug, was für ihn eine direkte Anspielung auf die Bedeutung der Wünschelrute darstellt.

Prokop & Wimmer (Prokop, 1985, S. 4) hingegen überzeugt dieser Zusammenhang nicht, sie stellen fest: *„andere und ältere historische Dokumente sind nicht so überzeugend und haben Zweifel aufkommen lassen, ob tatsächlich die Wünschelrute oder eine Art Zauberstab gemeint ist“*.

Die Radiästhesie sei in der Zeit vom Mittelalter bis weit in die Neuzeit hochgeschätzt worden, selbst Goethe erwähnt das „magische Reis“ in seinen Werken. In der Aufklärungszeit war ihr Umgang jedoch verpönt bzw. nur höheren Kreisen vorbehalten. Ab dem 18. Jhdt. geriet die Radiästhesie zunehmend in Vergessenheit, erst in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts kam man auf diese Methode der Wasser- / Erzsuche zurück. Der Schritt der Radiästhesie hin zur Geobiologie/Geopathie wurde durch R. Schneider (BRD, Wertheim) begründet, der durch die Einführung der Griffhängenruten bzw. der Lecher-Antennen den Zusammenhang bestimmter radiästhetischer Reizzonen mit Krankheiten herstellte (Worsch, 2001, S. 17).

8.2. Allgemeines

Die radiästhetisch differenzierbaren Zonen werden definiert als „geopathogene Bereiche und neutrale Bereiche“. Diese geopathogenen Bereiche stellen sogenannte Reizzonen dar, die vom Radiästheten aufgrund der in diesem Bereich auftretenden „Erdstrahlung“ abgegrenzt werden könnten. Diese Reizzonen führten zu geopathogenen Effekten, also störenden Einflüssen auf Lebensvorgänge hervorgerufen durch die Eigenschaften des Untergrundes. Da verschiedene geopathogene Erscheinungen die gleiche Ursache haben können, ist es schwierig eine eindeutige Beziehung zwischen Ursache und Wirkung herzustellen.

In der Literatur werden zahlreiche Beobachtungen angeführt, die solche geopathogenen Effekte darstellen. Beispielsweise soll ein Einfluss auf das Pflanzenwachstum bestehen. Auch werden krankmachende Wachstumsvorgänge wie Krebs sowie Wucherungen an Bäumen mit Reizzonen in Zusammenhang gesetzt.

Die folgenden Phänomene werden als die bekanntesten Ursachen für Reizzonen angesehen:

- Wasserader
- Geologische Störung, Falte
- Gitternetz

Die Bezeichnung Wasserader wird von den Naturwissenschaften oft als Beispiel für falsche Termini herangezogen. Wasseradern treten nur unter bestimmten geologischen Voraussetzungen, also in einer Umgebung mit wasserlöslichen Gesteinsarten wie Karst und Kristallin, auf. In ungestörten Untergrundverhältnissen herrschen ansonsten Porengrundwasserleiter vor, die keine derartig scharf abgegrenzten Eigenschaften aufweisen. Die Radiästheten selbst geben bereits an, dass sich der Begriff auch für Grundwasser eingebürgert hat, obwohl dies eigentlich falsch ist (Worsch, 2001, S. 12).

Geologische Störungen im Untergrund, Falten und Verwerfungszonen - generell Inhomogenitäten - im Boden werden auch als Ursache von Reizzonen angesehen.

Der dritte Punkt, der oben angeführt wird, sind die Gitternetze. Unter Radiästheten selbst gibt es unterschiedliche Meinungen zur Existenz von Gitternetzen. Die gebräuchlichste Vorstellung geht von orthogonal zueinander stehenden Reizstreifen aus, die netzförmig die Erde umspannen würden. Dabei gäbe es eine weitere Unterteilung nach den Eigenschaften des Reizstreifens in Grob- bzw. Feingitter. Besonders zwei Gitternetze finden oft Erwähnung in der einschlägigen Literatur, nämlich das „Curry-Netz (Diagonal zum Hartmann)“ und Hartmann-Netz“(N-S). Diese beiden finden aufgrund globaler Beobachtungen den größten Konsens.

Die Geomantie

Die Geomantie - griechisch: γεομάντεια (geo-mánteia); gaia/gê = Erde, manteia = Deutung/Weissagung – stellt einen weiteren, sehr spezifischen Bereich der Radiästhesie dar.

Früher wurde der Ausdruck Geomantie ausschließlich für eine Orakel-Methode verwendet, deren Anwendung spirituellen Zwecken diene. Es gibt Überlieferung von Aufzeichnung dieser Art in vielen Kulturen, beispielsweise Sand-Orakel im arabischen Raum (Ilm-al-Raml) oder in Afrika (Ifa-Divination, Sikidy in Madagaskar).

Erst im 19. Jahrhundert wird das Wort Geomantie im Sinne einer tellurischen Geomantie aus dem Englischen in den deutschen Sprachraum tradiert, zu einer Zeit als das chinesische Feng-Shui in Europa populär wurde.

Es gibt viele Versuche die Geomantie zu definieren. Von dem Deuten der sichtbaren und unsichtbaren Strukturen in Relation zu Mensch, Kosmos und Ort (divinatorische Geomantie) über die Harmonisierung von Wohnort und Tätigkeit des Menschen mit seiner Umwelt (Pennick, 1987) bis zum Ausmachen von „Energiezentren“ auf der Erdoberfläche und die

künstliche Veränderung der Landschaft durch die Verbindung mit anderen Zentren[(Pieper, 1993)].

Im Allgemeinen ist offensichtlich mit Geomantie der Zugang zu den „feinstofflichen“ Kräften der Natur gemeint, sowohl ihre Nutzung als auch die Vermeidung von negativen Auswirkungen. Ausgangspunkt ist dabei die Auffindung „energiereicher“ Zonen und ihrer Zentren. Diese könnten sich oft meterbreit ausdehnen und sich mehrfach kreuzen. Diese Kreuzungen, die im alten China als Orte der Kraft bezeichnet werden bei denen sich Yin und Yang (positiv) im Einklang befinden, galten seit jeher als bevorzugte Lage für jedwede Art von Kultplätzen. Die Nutzung erstreckt sich von heidnischen Tempeln in Luxor und Karnak in Ägypten (ca. 2.000 v.Chr.) über Menhire und Steinkreise der Megalithkulturen (3.000 – 2.000 v.Chr.). Selbst in der romanischen und gotischen Zeit war diese Art der Standortbestimmung offenbar noch sehr weitreichend bekannt. Grund für diese Annahme sind die vielen Kirchen, Dome und Kathedralen wie beispielsweise in Pisa, Mailand und Reims, die in dieser Zeit errichtet wurden und die ausschließlich auf solchen positiven „Energiezentren“ stehen. Durch die Wahl des Standortes sollte vermutlich eine stimulierende Wirkung auf den Priester ausgeübt werden, der dadurch wiederum eine größere Anziehungskraft auf die Gläubigen ausstrahlen sollte.

Ausgehend von diesen Zentren erstrecken sich „Energienlinien“ (sogenannte Ley-Linien) in einem Gitternetz über die gesamte Erde. Entlang dieser „positiven Energieströme“ liegen römische und etruskische Siedlungen und Grenzen. Das bekannteste Beispiel dafür stellt der Limes dar, der Grenzwall zwischen dem römischen Reich und den Germanen, der sich auf einer 3 - 4m breiten geomantischen Zone befindet.

Am Bekanntesten ist die chinesische Geomantie, auch Feng-Shui genannt. In China war sie Teil der Lehre von den Natur- und Humanwissenschaften. Der Städtebau wurde danach ausgerichtet, Straßen und Häuser nach den Erdlinien respektive den Magnetlinien ausgerichtet.

Erstes Wissen über das Feng-Shui (übersetzt: „Wind und Wasser“), die Lehre von den feinstofflichen „Qi-Strömungen“ der Erde und ihrer Wirkung auf den Menschen kamen im 16.Jhdt. über Jesuiten-Missionare nach Europa. Eine Zusammenfassung ihrer Aufzeichnung ist das in Latein geschriebene Werk „China Monumentis“ eines ihrer Ordensbrüder, des deutschen Spät-Renaissance-Universalgelehrten Athanasius Kirchner (1602-1680). Feng-Shui selbst kommt darin jedoch nur verzerrt und bruchstückhaft vor. Erste detaillierte Kenntnisse dieser Kunst wurde von christlichen Missionaren zwischen 1870 und 1890 (Edkins, Eitel, Gray,

Hubrig, Genähr, Dore) niedergeschrieben. Die umfassendste Beschreibung im 19.Jhdt. findet sich in „The religious system of China“ (1897) und „Universismus“ (1918), beides Werke des holländischen Sinologen und Ethnographen Johannes Jacobus Maria de Groot (1854-1921).

Die Tatsache dass es bisher keine eindeutige Definition von Geomantie gibt zeigt, dass sich dieses Gebiet in seiner Entwicklung befindet. Es gibt keine überlieferte geomantische Tradition in unserer Kultur. Das Wissen über diesen Bereich der Radiästhesie wird hauptsächlich aus dem traditionellen chinesischen Geomantiekonzept Feng-Shui gezogen. Das Thema „europäische Geomantie“ wird derzeit in vielen interdisziplinären Projekten behandelt, beispielsweise in der Diplomarbeit von Fr. Mag. Streit Eva-Maria (Streit, 2011) und stützt sich auf Untersuchung und Auffindung von Strukturen und Gesetzmäßigkeiten.

In diesem Zusammenhang hat auch Herr DI Franz Hippmann eine Vorgehensweise entwickelt und diese in dem bereits mit dem Bodenradar untersuchten Bereich angewendet.

8.3. Die Prospektionsmethode nach Hippmann

Einen neuen Zugang zu den bisher beschriebenen Methoden findet Hippmann in seinen Studien zur „Energetik“. Er fragt darin nicht nur nach dem was, das auf die Geräte wirkt, sondern untersucht vor allem wie sich die Sichtbarmachung realisiert und versucht ein System in die offensichtlich unterschiedlichen Anzeigen zu bringen. Dabei konzentriert er seine Studien aber auf die Untersuchung einer systembegründenden Ursache und differenziert sich damit klar von einer symptomorientierten Radiästhesie.

Die Arbeitsweise von Hr. Hippmann ist empirisch, also in selbstständigen Studien und Feldversuchen definiert worden und die folgende Beschreibung stellt eine Momentaufnahme der gegenwärtig dokumentierten Arbeiten in diesem Bereich dar. Als Hilfsmittel bzw. Anzeigehilfen verwendet Hippmann handelsübliche längenveränderliche Antennen, die leicht drehbar auf Kugellagern in Handgriffen gelagert sind.

Damit konnte er seiner Auffassung nach bereits eine Einteilung der inneren Struktur seiner „ursächlichen Energieform“ definieren, die bestimmt wird durch ihre jeweilige wirkungsabhängige Prädisposition. Die Anordnung und das Potential der in sich 4-fach strukturierten „Energieform“ ergäben ein dazugehöriges „energetisches“ Profil und bedingen, aufgrund ihrer Zusammensetzung, die weiteren Auswirkungen auf das Umfeld.

Hippmann zieht daraus seine Definition der behandelten „Energieform“ als „Ur-energie, die alle natürlichen Erscheinungen/Dinge geformt hat und in diesen als dauerhafte Kraft noch erhalten ist (Hippmann, Notizen, 2012).“ Zum Ablesen ihrer Erscheinungsbilder und Lokationen werden die Anzeigehilfen in der jeweils passenden „energetischen“ Dimension herangezogen.

Im Rahmen seiner Untersuchungen wäre Hippmann auch immer wieder auf Hinweise gestoßen, dass diese „Ur-Energie“ bereits früheren Kulturen bekannt war, das heißt dass diese Kulturen bereits bestimmte Teile der „Energiestruktur“ fokussieren und in weiterer Folge ihre Wirkung nutzen konnten. Hippmann erwähnt in diesem Zusammenhang etwa die Fertigkeit ihre Siedlungsplätze „energetisch“ zu verbessern indem sie vorherrschende Kräfte in bestimmten Siedlungsbereichen verstärkten oder abschwächten.

Seiner Meinung nach war „der Umgang mit diesen Kräften kult- und in weiterer Folge kulturbegründend, da die Anwendung eines Wissens um energetische Kräfte und ihrer Strukturen kultartigen Charakter besitzt“. Ein Kult bestehe dabei aus einer Gruppe mit gemeinsamer Überzeugung, also „Willensbildungen und –äußerungen“. Dieses Fokussieren menschlicher Kräfte erzeugt lt. Hippmann die „energetischen“ Felder, die dann in der dinglichen Umgebung gespeichert bleiben und durch die Dreh-Ruten erkennbar werden.

Einen guten Einblick in seine Vorgehensweise erlauben die folgenden graphischen Darstellungen (Hippmann, Strukturen und Wesen der Energie: Ein radiästhetischer Weg in die Energetik, 2000, S. 7). Darin sind unter anderem die verschiedenen Position und Anzeigen der Drehruten abgebildet.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Anzeigemöglichkeiten während einer Prospektion nach Hippmann. Die Mauern stellen dabei Strukturgrenzen dar, die durch die jeweilige Anzeige der Drehruten erkennbar werden. Diese Art der Anzeige war aufgrund der Beschaffenheit des Untersuchungsgebiets in Mauerbach natürlich am verbreitetsten.

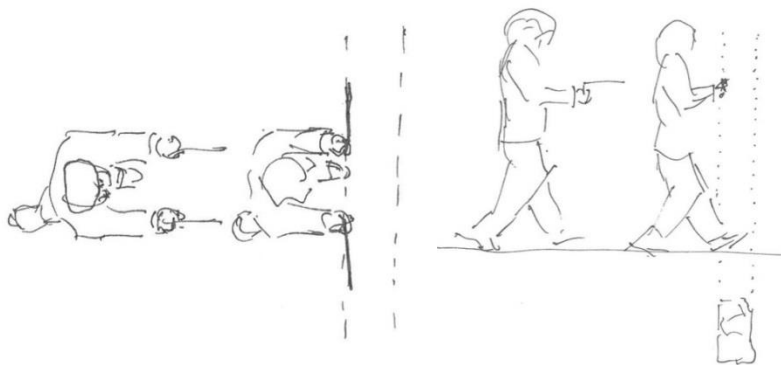
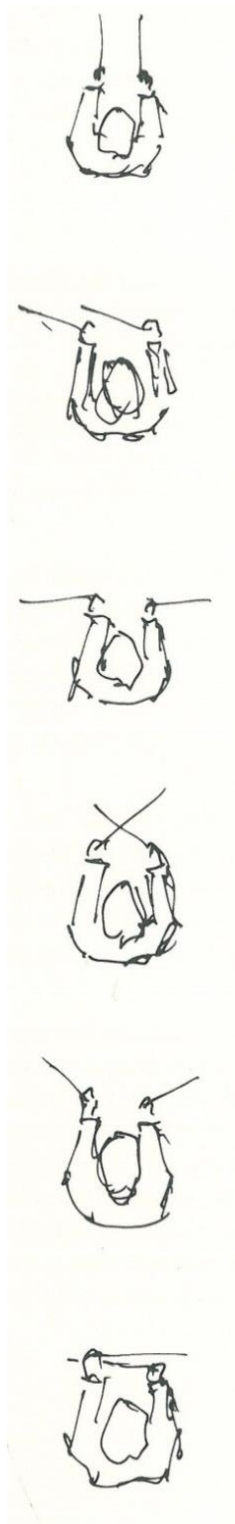


Abbildung 64: Durchführung und Anzeige lt. Hippmann – Schema (Hippmann, Notizen, 2012)



1. Position: Referenzlage/Nullpunkt, ebenfalls Ausgangs- und Suchstellung.

2. Position: Richtungsanzeige

3. Position: Volle Öffnung, Anzeige einer Feldgrenze

4. Position: Flächenanzeige; das Befinden im Feld

5. Position: V-Stellung, ebenfalls das Befinden im Feld, jedoch mit anderer Qualität

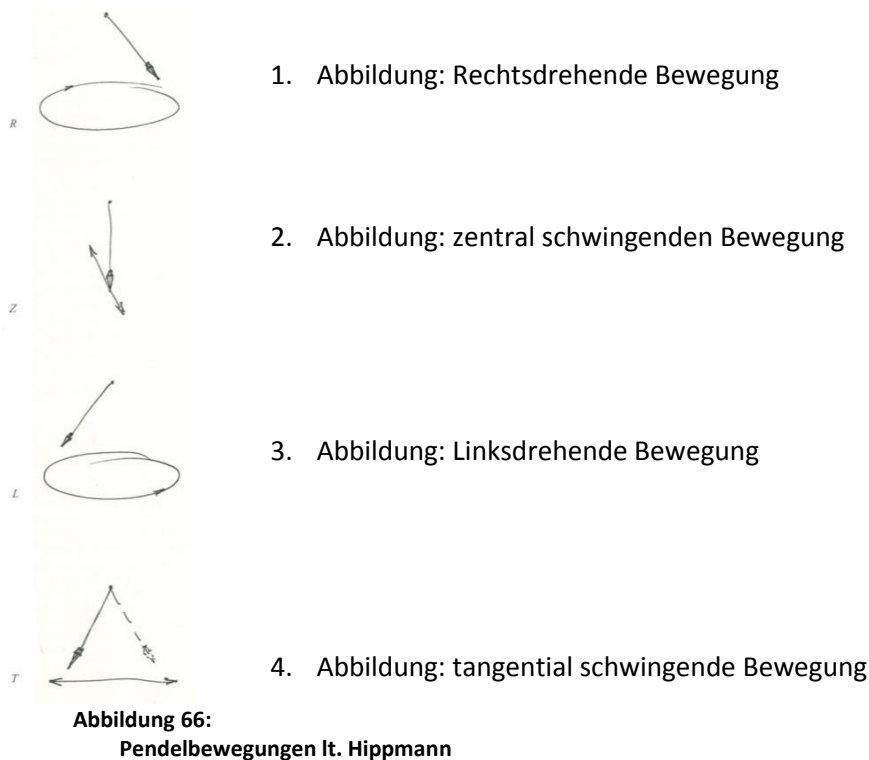
6. Position: Grenzanzeige, oft am Ende einer Anzeigenreihe

Abbildung 65: Anzeigepositionen lt. Hippmann (Hippmann, Strukturen und Wesen der Energie: Ein radiästhetischer Weg in die Energetik, 2000, S. 7)

Zusätzlich kann ein siderischer Pendel zur Anzeige der vorhandenen „energetischen“ Situation und damit der inneren Beschaffenheit des beobachteten Bereiches verwendet werden. Dadurch erschließt sich dem Radiästheten die Möglichkeit einer Fernerkundung - durch die bildliche bzw. planliche (oder sogar symbolische) Darstellung der Realität des Untersuchungsgebiets.

Beim Auspendeln eines Gegenstandes durchläuft der Pendel in variabler Stärke verschiedene Anzeigen. Dadurch ist es möglich, „energetische“ Profile für die jeweiligen System bzw. behandelten Gegenstände zu erstellen.

Hier dargestellt sind die vier Grundfiguren des siderischen Pendels (Hippmann, Strukturen und Wesen der Energie: Ein radiästhetischer Weg in die Energetik, 2000, S. 11)



Die folgende Abbildung stellt ein Beispiel eines „energetischen Profils“ nach Hippmann dar. An der Y-Achse wird dabei die Anzahl an Wiederholungen der jeweiligen Pendelbewegung notiert, die X-Achse listet die vier Pendelbewegungen auf. Das hier gezeigte Beispiel zeigt ein Profil das sich in allen vier Bewegungsformen im mittleren Bereich befände, der lt. Hippmann den für Menschen günstigsten Bereich darstellt.

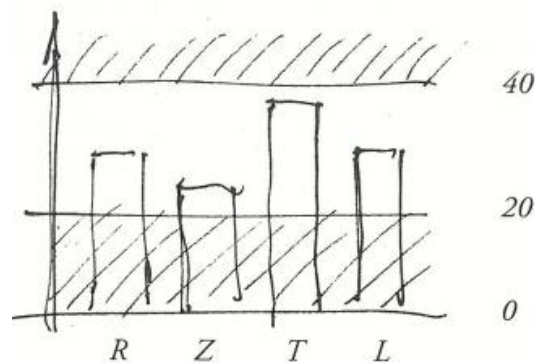


Abbildung 67: „energetisches Profil“ (Hippmann, *Strukturen und Wesen der Energie: Ein radiästhetischer Weg in die Energetik*, 2000, S. 47)

Anwendungsbereiche:

Hippmanns Methode bezieht sich also auf die Auflösung und Definition von Strukturänderungen, die bisher in Form einiger praktischer Anwendungen der Methode in ausgesuchten Teilgebieten durchgeführt wurden. Die neueste Zusammenarbeit erfolgte mit im Themenbereich Architektur, mit dem Ziel der Erforschung und Auffindung von Naturmaßen/Grundmaßen und deren Wirkung auf den Probanden (Streit, 2011).

Die weiteren Anwendungen gehen über die klassischen Bodenuntersuchungen, über eine ebenfalls archäologische Fragestellung in der Ruprechtskirche in Wien bis hin zur Leckage-Suche und unterirdischen Verölungen in Zusammenarbeit mit einem großen Kohlenwasserstoffunternehmen.

Besonders im Bereich der Bodenuntersuchungen, Erdölindustrie, konnte die Erkundung von oberflächennahen Kontaminationen in Zusammenarbeit mit einer Diplomandin der Montanuniversität Leoben eine gute Genauigkeit erzielen (Hacker, 2003). Der Einsatz in diesem Gebiet beruht auf der Überlegung, dass unbeeinträchtigter Boden energetische Merkmale besitzt, die von denen eines gestörten Untergrundes unterschieden werden können.

Genauso stellten Siedlungen und Wege künstliche Eingriffe in den Untergrund dar und könnten somit als Kontamination desselbigen betrachtet werden. Auch in diesem Anwendungsgebiet konnte die energetische Methode nach Hippmann in der Fallstudie Ruprechtskirche Übereinstimmungen erzielen. Seitens des ausführenden Wünschelrutengängers könne bei der Anwendung für archäologische Fragestellungen sogar

eine Unterscheidung von einzelnen Objekten in Wohn-, Kultur- und Kulturbereiche vorgenommen werden.

Dies sei möglich da variablen Strukturen verschiedene „Energieformen“ zugrunde lägen. Diese Überlegung führte Hippmann sodann zu dem Begriff der „Energetik“, der für ihn damit aus dem Bereich der Esoterik hervortritt.

Die „Energetik“, die Hr. DI Hippmann mit seinen Arbeiten definiert, befasse sich mit der „Erforschung jener Wirkweisen der Natur, die bisher der Messbarkeit und damit den bekannten Untersuchungsmethoden nicht zugänglich sind“ (wörtliches Zitat Hippmann).

Aus wissenschaftlicher Sicht behandelt die Methodik von Hippmann einen Bereich der mit bekannten naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten nicht erklärt werden kann.

8.4. Fallstudie Mauerbach

Für Hippmann ergab sich durch die Arbeit in der Kartause Mauerbach zunächst die Möglichkeit seine Studien von bearbeiteten, also „energetisch“ veränderten Gegenständen zu intensivieren. Im Folgenden sind einige Auszüge aus dem Notizbuch von Hippmann entnommen, um eine kurze Beschreibung seiner Vorgehensweise zu liefern. Zudem dienen sie als Dokumentation seiner Arbeiten während der radiästhetischen Untersuchungen der Kartause.

Abbildung 68: Notizen zu „energetisch“ verändertem Baustein der Kartause stellt Hippmanns Beginn seiner Arbeiten mit Fokus auf Mauerbach dar. Zu sehen sind eine Skizze eines bearbeiteten Steins, der für die Kartause Mauerbach üblichen Gesteinsart und sein „energetisches Profil“ bezogen auf die Oberflächenseiten. Laut Hippmann verfüge jeder Stein über seine eigene „energetische“ Visitenkarte und könne anhand dieser im definierten System, hier der Untersuchungsbereich, unterschieden und seiner räumliche Lage zugeordnet werden.

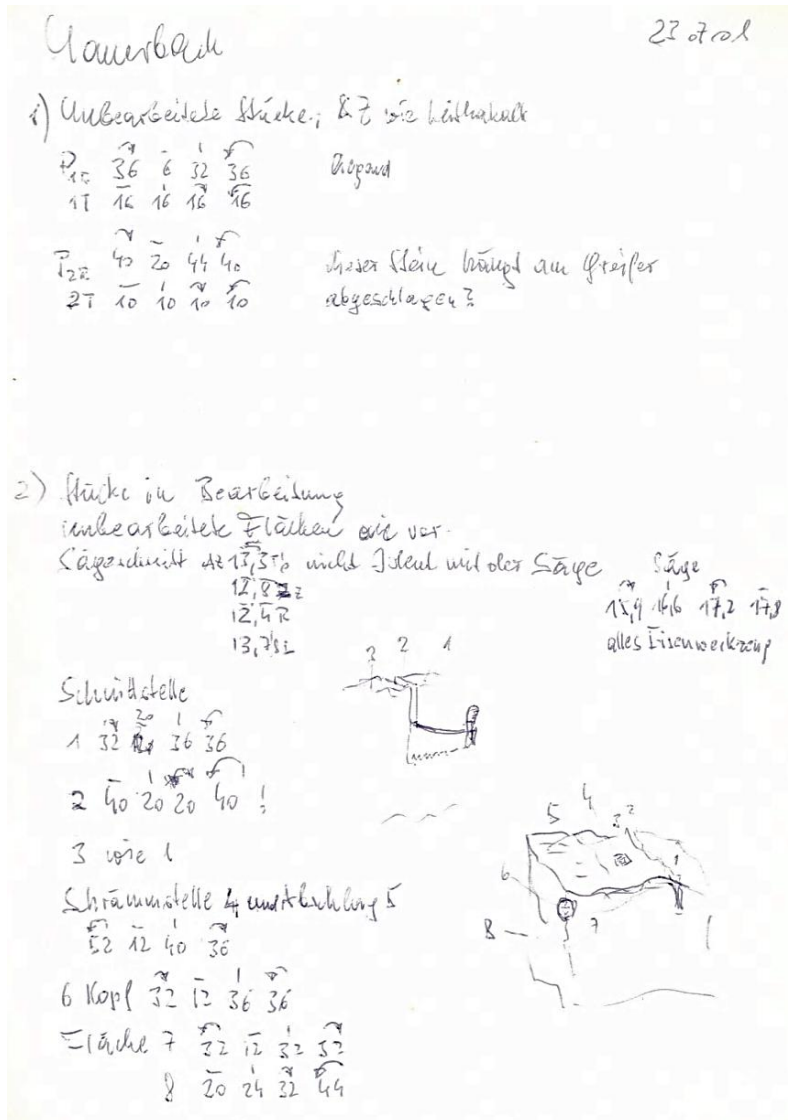


Abbildung 68: Notizen zu „energetisch“ verändertem Baustein der Kartause

Der gesamte Gegenstand teile sich dabei lt. Hippmann in verschiedene Bereiche ein, je nachdem welche äußeren Einwirkungen auf den Stein ausgeübt wurden. Dabei hätte beispielsweise der Bereich der Schnittstelle mit Säge „energetisch“ ein anderes Profil als der unbehandelte Bereich.

Zelle ges.	4 → 38 8 64 28	12,1
Garten	6 38 10 30 22	8,6
Arbeitsraum	8 36 10 28 28	7,15
Kehricht	2 ← 12 28 56 22	6,0
Wasserlauf (kan.)	12 10 16 16	9,6

Abbildung 69: Detailbereiche des untersuchten Systems

Abbildung 69 zeigt die von Hippmann deduktierten „energetischen Profile“ einer Wohneinheit am Kreuzgarten. Hippmann führt in seinen Überlegungen weiter aus, dass nicht nur die physikalischen durch Werkzeug verursachte Einwirkungen auf den Stein feststellbar seien. Seiner Meinung nach hätten permanente „mental-energetische“ Einwirkungen den gleichen Einfluss auf einen Gegenstand wie ein real-physikalisches Bearbeiten. Im Bereich der Kartause Mauerbach stellen die „energetischen Willensbildungen und –äußerungen“ die Ordensregeln dar, die besonders im Mittelalter –durch ihre Träger „energetisch“ konzentriert – in den Bauresten bzw. der Umgebung gespeichert wurden.

Durch diesen Ansatz sei es seiner Meinung nach nicht nur möglich Baureste und Strukturen zu erkennen sondern diese auch unterschiedlichen „Energiesstrukturen“, sprich Bau- und Gesinnungsphasen zuzuordnen.

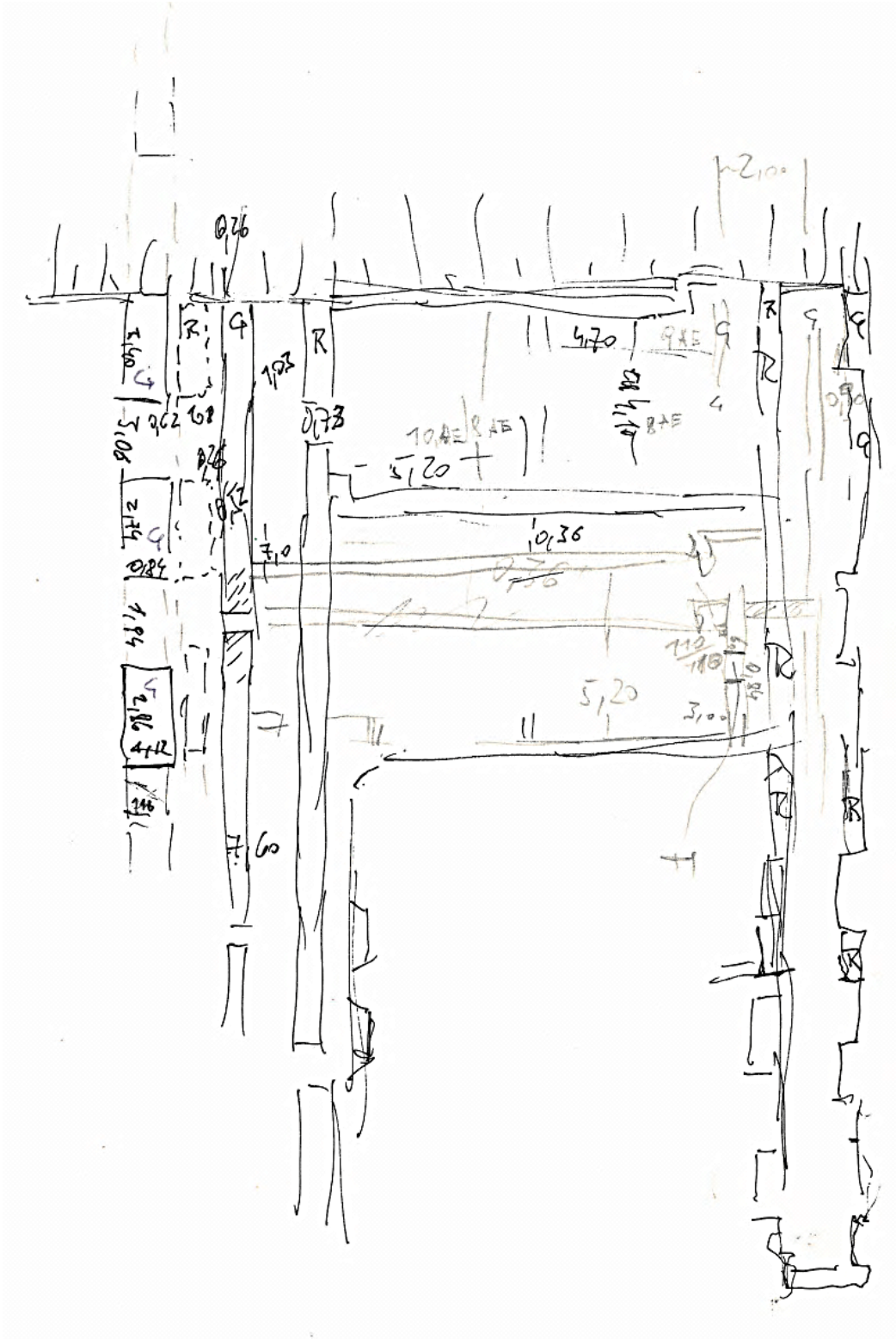


Abbildung 70: radiästhetische Strukturen der Kartause

Abbildung 70 zeigt eine erste Skizze der radiästhetischen Strukturen der Kartause Mauerbach, wie sie die „energetische Untersuchung“ von Hippmann ergab.

8.5. Ergebnisse der „energetischen Prospektion“

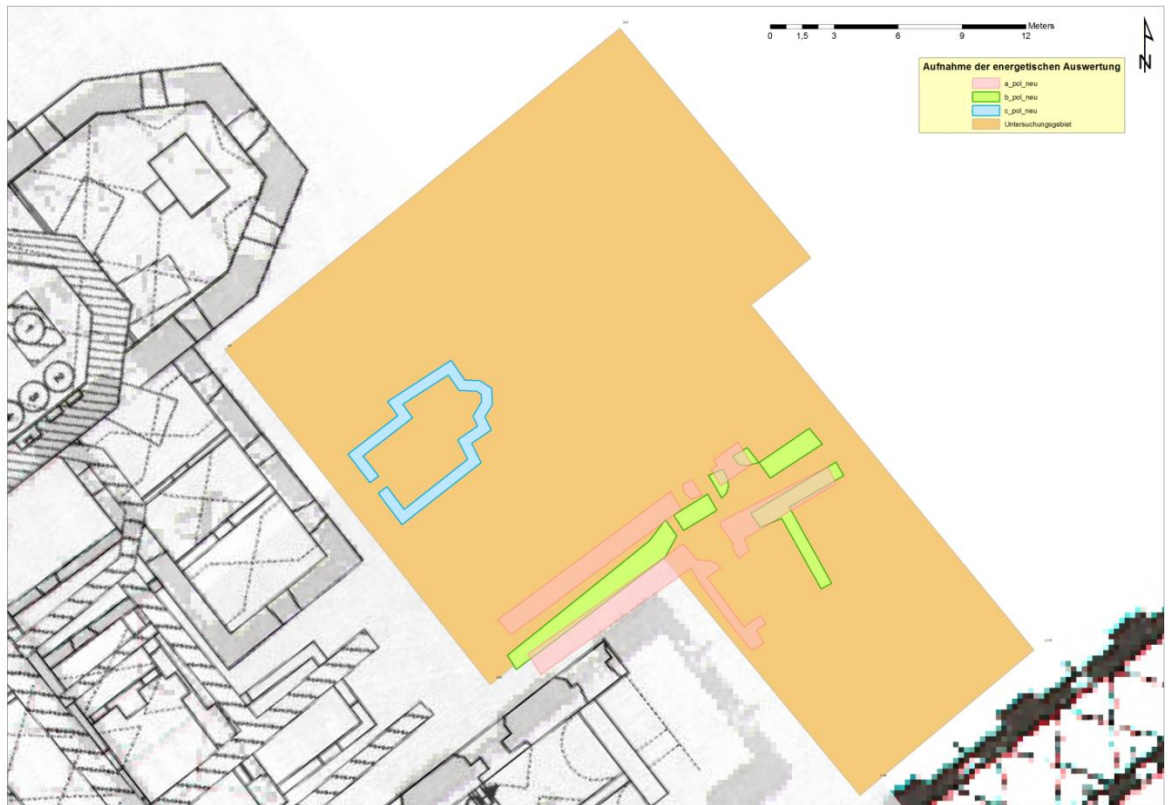


Abbildung 71: geodätisch eingemessene Mutungen von Hippmann

In Abbildung 71 sind die mit Theodolit eingemessenen „energetischen“ Ergebnisse dargestellt. Hippmann hat dabei aufgrund seiner Vorarbeiten zu den Steinen Auszugslängen für seine Antennen definiert, und die durch die Bewegung der Antennen angezeigte Struktur wurde mithilfe von Schnüren und Nägeln am Boden aufgespannt. Diese Arbeiten wurden einen Tag vor der abgesprochenen Einmessung der radiästhetischen Ergebnisse durchgeführt, um Hippmann die nötige Zeit zu geben seine Arbeiten gewissenhaft durchzuführen. Unglücklicherweise wurden über Nacht seine ausgesteckten Strukturen entfernt, weshalb aus Zeitmangel lediglich ein Teil der auffindbaren Strukturen neu ausgesteckt und mit dem Theodoliten eingemessen werden konnten. Die blaue Struktur repräsentiert den Teil C und hat eine Fläche von 10,17 m². Der Grüne Bereich ist Teil B, setzt sich aus mehreren Polygonen zusammen und seine Gesamtfläche beträgt 20,27 m². Hippmann datiert diese Struktur auf etwa 1320 – 1420 n.Chr. Das „energetische Profil“ des Teil B steht lt. Hippmann für Mönchtum und ein kontemplatives Leben im Kloster. Die Anwendung des siderischen Pendels auf diese Struktur weist hartnäckig auf ein Ereignis um 1420 hin, das einen Neubau auslöste.

Die rote Struktur, also Teil A, setzt sich ebenfalls aus mehreren Polygonen zusammen und hat insgesamt eine Fläche von 32,06 m². Obgleich ihrer strukturellen Ähnlichkeit mit Teil B liefere Teil A ein deutlich differenziertes Pendelbild, also „energetisches Profil“, das auf einen straff geführten, mehr der Arbeit zugewandtem, Orden hinweise.

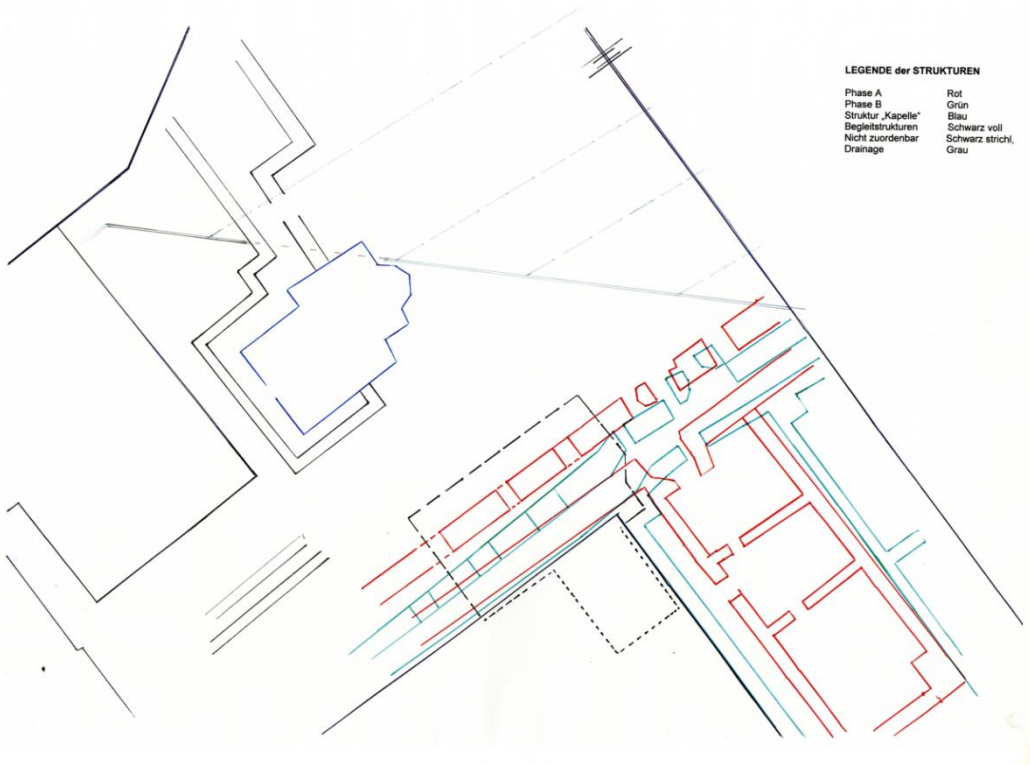


Abbildung 72: Mutungen Erweiterung

Als Nachbearbeitung seiner Ergebnisse erhielt Hippmann die Möglichkeit, die Strukturen die nicht mit dem Theodolit eingemessen werden konnten in einer Skizze nachzureichen. Abbildung 72 zeigt dabei seine Erweiterung der bisherigen Mutungen.

Um eine Aussage über die Übereinstimmung der beiden Verfahren, ReflexW und Hippmann, treffen zu können wurden die Ergebnisse im ArcGIS sowohl graphisch als auch rechnerisch verschnitten. Abbildung 73 stellt also sowohl die Ergebnisse nach der Auswertung mit ReflexW als auch die „energetischen“ Strukturen nach Hippmann dar. Abbildung 74 stellt die Einarbeitung der nachgereichten radiästhetischen Strukturen aus Abbildung 72 dar. In beiden Abbildungen sind in lila die Strukturen aus den mit ReflexW prozessierten Daten aufsummiert über die einzelnen Tiefenschnitte zu erkennen. Die umrandeten Bereiche sind die

geodätisch eingemessenen Strukturen der radiästhetischen Erkundung, die farbig verfüllten Bereiche stellen die zusätzlichen Strukturen aus dem nachgereichten Plan dar.



Abbildung 73: Ergebnis ReflexW und die eingemessenen radiästhetischen Strukturen

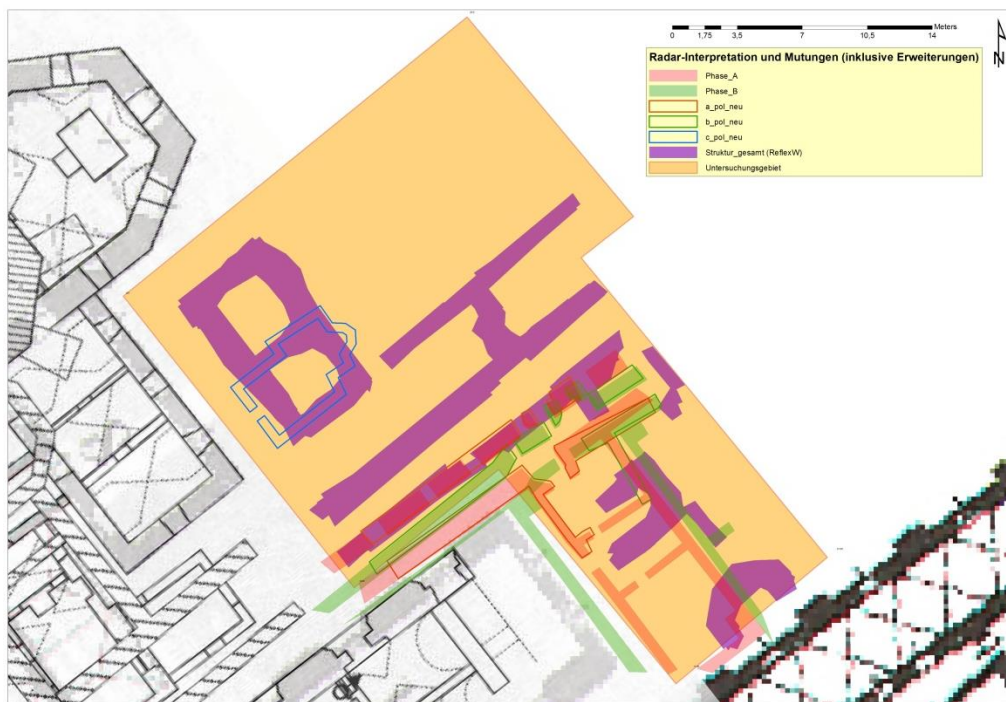


Abbildung 74: Ergebnis ReflexW und radiästhetische Strukturen (inklusive Erweiterungen)

Um eine gewisse Unschärfe zu erlauben wurde vorab noch ein Toleranzbereich der halben Mauerdicke (bestimmt durch ReflexW) definiert (siehe Abbildung 24).

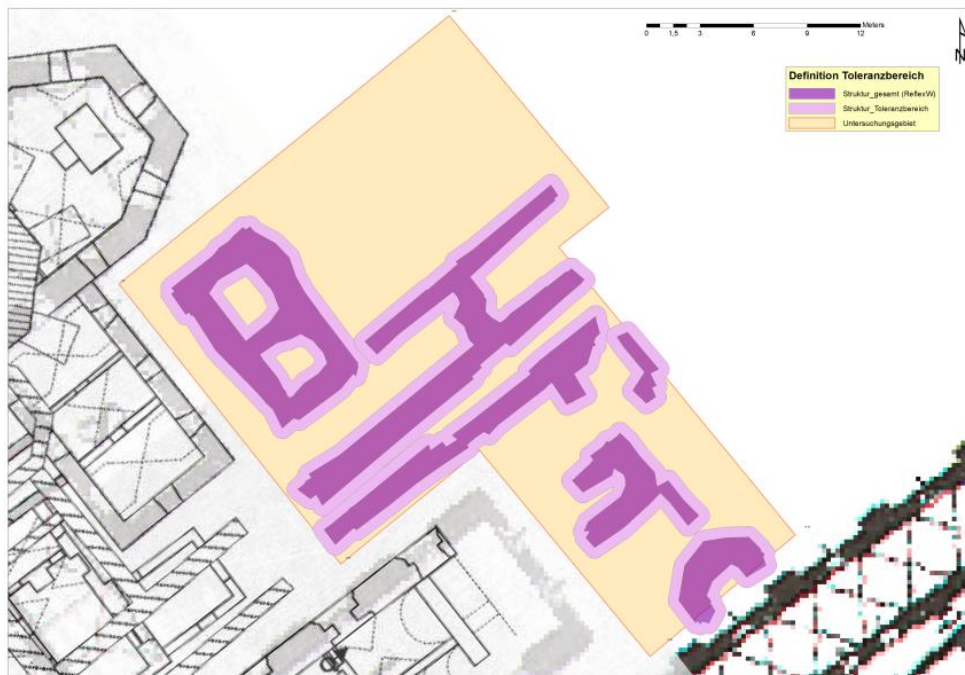


Abbildung 75: Definition Toleranzbereich

Tabelle 2: Berechnungsblatt Koinzidenzfaktor liefert dabei eine Auflistung aller Bereiche, ihrer Flächen und dem daraus berechneten Koinzidenzfaktor. Bei der Bestimmung des Übereinstimmungsfaktors wurden die Bereiche A und B, aufgrund ihrer Eigenschaften einzeln mit der Gesamtstruktur verglichen. Der von Hippmann als Teil C ausgewiesene Bereich wird gesondert betrachtet.

Tabelle 2: Berechnungsblatt Koinzidenzfaktor

ReflexW		Fläche [m²]		Gesamt [m²]		
Bereich 1	Räume im östlichen Bereich	42,68				
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich	69,75				
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich	30,67		143,11		
ReflexW + Toleranzbereich		Fläche [m²]		Gesamt [m²]		
Bereich 1	Räume im östlichen Bereich	73,86				
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich	142,99				
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich	67,29		284,14		
Mutungen		Fläche [m²]		Phase A + Phase B	Gesamt	
Bereich 1	Räume im östlichen Bereich	10,17				
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich b_pol	20,26				
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich a_pol	32,06		52,33	62,50	
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich					
Mutungen + Erweiterung		Fläche [m²]		Phase A + Phase B	Gesamt	
Bereich 1	Räume im östlichen Bereich					
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich Phase A	55,10				
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich Phase B	43,55		98,64	98,64	
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich					
Koinzidenz Mutungen und ReflexW		Fläche [m²]		Koinzidenz [%]	Koinzidenz [%] A+B	Koinzidenz [%] alles

Bereich 1	Räume im östlichen Bereich	6,44		63,33		
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich a_pol	11,15		55,01		
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich b_pol	2,81		8,77	26,68	32,64
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich					
Koinzidenz Mutungen und ReflexW+Toleranzbereich		Fläche [m²]		Koinzidenz [%]	Koinzidenz [%] A+B	Koinzidenz [%] alles
Bereich 1	Räume im östlichen Bereich	9,39		92,25		
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich a_pol	12,86		63,45		
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich b_pol	10,31		32,14	44,27	52,08
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich					
Koinzidenz Mutungen_Erweiterung und ReflexW		Fläche [m²]		Koinzidenz [%]	Koinzidenz [%] A+B	Koinzidenz [%] alles
Bereich 1	Räume im östlichen Bereich					
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich a_pol	17,43		31,64		
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich b_pol	5,34		12,26	23,09	23,09
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich					
Koinzidenz Mutungen_Erweiterung und ReflexW+Toleranzbereich		Fläche [m²]		Koinzidenz [%]	Koinzidenz [%] A+B	Koinzidenz [%] alles
Bereich 1	Räume im östlichen Bereich					
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich Phase A	24,63		44,70		
Bereich 2	Mauernverlauf im mittleren Bereich Phase B	14,31		32,85	39,47	39,47
Bereich 3	Mauerreste im westlichen Bereich					

Phase A



Abbildung 76: graphische Übereinstimmung Mutungen/Radar, Phase A

Abbildung 76 zeigt graphisch die Übereinstimmung der durch Hippmann definierten und der durch die Auswertung der Bodenradar-Daten erhaltenen Strukturen. Man kann erkennen dass der Längsverlauf seiner Phase A, mit den Längsmauern, die auch in den archäologischen Schnitten verzeichnet sind, übereinstimmen. Die Mutungen wurden den Bodenradardaten nachfolgend aufgenommen, ein Teil der Phase A lt. Hippmann liegt außerhalb des Bodenradar-Bereiches.

Phase B



Abbildung 77: graphische Übereinstimmung Mutungen/Radar, Phase B

Abbildung 77 zeigt die Phase B lt. Hippmann. Die Strukturen haben zwar ähnliche Form, doch die graphische Darstellung zeigt dass sie betreffend ihrer Lage nur wenig übereinstimmen.

Phase C



Abbildung 78: Graphische Übereinstimmung Mutungen/Radar, Phase C

Abbildung 78 zeigt die Darstellung der Radar-Strukturen gemeinsam mit den Mutungen der Phase C in ArcGIS.

Die graphische Form der von Hippmann definierten Phase C ist zwar nicht ident mit von den reflektierten Strukturen, jedoch besitzt auch er raumähnlichen Charakter.

Die geografische Lage betreffend zeigt Phase C eine große Übereinstimmung mit den Bodenradar-Daten.

8.6. Endbetrachtung Radiästhesie

Die von Hippmann aufgefundenen Strukturen zeigen eine ähnliche Form wie die Reflexionen aus den Radar-Daten. Die Längsstruktur von Phase A deckt sich teilweise mit den Mauerstrukturen des Bundesdenkmalamtes und den interpretierten Radardaten. Die graphische Form von Phase A und Phase B ist sehr ähnlich, jedoch ist Phase B nach Osten versetzt. Dadurch ist auch in den ArcGIS-Darstellungen von Phase B zu erkennen, dass ihre räumliche Lage mit den Bodenradar-Strukturen nicht übereinstimmt.

Das erstaunlichste Ergebnis der durchgeführten radiästhetischen Erkundungen liefert meiner Meinung nach die Struktur der Phase C.

Im westlichen Bereich des Untersuchungsgebiets waren vor dieser Arbeit keine Informationen verfügbar und auch die durch das Bodenradar aufgezeigten Reflexionen waren unvermutet und werden eine gute Ergänzung zum bisherigen archäologischen Wissen darstellen. Dass Hippmann eine Struktur in diesem Bereich definiert, die eine lagerichtige Übereinstimmung aufweist, ist bemerkbar. Hingegen muss darauf hingewiesen werden, dass die von Hippmann gemuteten Strukturen Eigenschaften aufweisen, die sich in ihrer Form nicht in den Radardaten wiederfinden lassen. Das lässt vermuten, dass das Ergebnis der radiästhetischen Begehung eine starke persönliche Komponente aufweist.

Abschließend kann man vermerken dass strukturelle Übereinstimmungen der geophysikalischen Daten mit den Mutungen von Hippmann durchaus gegeben sind. Die lagerichtige Übereinstimmung ist teilweise bei Phase A und bei Phase C zu bemerken (siehe Tabelle 2), jedoch ist aus mathematischer Sicht der erzielte Übereinstimmungsfaktor in einem derartig kleinräumigen Untersuchungsgebiet mit der vorhandenen Menge an gefundenen Strukturen nicht außergewöhnlich. Abgesehen von der Statistik ist das Ergebnis der radiästhetischen Erkundung meiner Meinung nach aufgrund der Art und Form der gefundenen Strukturen sehr interessant.

Literaturverzeichnis

- Bermann, M. (1880). *Alt- und Neu-Wien, Geschichte der Kaiserstadt und ihrer Umgebungen*.
Wien: M. Hartlebens Verlag.
- Betz, H.-D. (1990). *Geheimnis Wünschelrute: Aberglaube und Wahrheit über Rutengänger und Erdstrahlen*. Frankfurt am Main: Umschau Verlag Breidenstein GmbH.
- Bundesdenkmalamt. (kein Datum). *Geschichte der Kartause Mauerbach*. Abgerufen am 14. August 2013 von <http://www.bda.at/text/136/1124/5595/>
- Conyers, L. B. (1997). *Ground-Penetrating Radar, An indtroduction for archaeologists*.
California: AltaMira Press.
- Daniels, D. (1996). *Surface-Penetrating Radar*. London: The Institution of electrical engineers.
- Eder-Hinterleitner, A., Ertl, C., Ferschin, P., Kandler, M., Löcker, K., Melichar, P., et al. (2006).
Das Forum des Municipium Aelium Karnuntum. In F. Humer, *Legionsadler und Druidenstab. Vom Legionsadler zur Donaumetropole* (S. 280 - 295). Katalog des NÖ Landesmuseums, Neue Folge 462.
- Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., Löcker, K., Neubauer, W., & Bayirli, E. (2009). Data Processing and Image Enhancement of GPR Surveys of Roman Villas in Austria. *8. International converence on Archaeological Prospection, Proceedings*, (S. 299 - 302). Paris, Frankreich.
- Fletzer. (1998). *Aufschlüsse Kreuzgarten Kartause M 1:20*. Mauerbach: Bundesdenkmalamt.
- Fritsch, V. (1955). *Das Problem geopathogener Erscheinungen vom Standpunkt der Geophysik*.
München: J.F. Lehmanns Verlag.
- Groh, S., Neubauer, W., Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., & Löcker, K. (2002). Geophysikalische Messungen im nordöstlichen Stadtteil von Flavia Solva: Interpretation und archäologisch-historische Auswertung. In *Sonderschriften des ÖAI* 71 (S. 79 - 132).
- Hacker, B. (2003). Vergleichende Betrachtung alternativer Methoden zur Erkundung von Kontaminationen aus der Erdölproduktion. Leoben, Steiermark, Steiermark: Montanuniversität Leoben.
- Hippmann, F. (2000). *Strukturen und Wesen der Energie: Ein radiästhetischer Weg in die Energetik*. Wien: Hippmann.
- Hippmann, F. (2012). *Notizen*. Wien.
- Jol, H. M. (2009). *Ground Penetrating Radar, Theory and Application*. Amsterdam: Elsevier Science.

- Kreitner. (1999). *Aufschlüsse Kreuzgarten M 1:20*. Mauerbach: Bundesdenkmalamt.
- Leckebusch, Jürg. (2001). *Die Anwendung des Bodenradars (GPR) in der archäologischen Prospektion, 3-D-Visualisierung und Interpretation*. Rahdend./Westf.: Verlag Marie Leidorf GmbH.
- Löcker, K., Eder-Hinterleitner, A., & Seren, S. (2011). Untersuchungen mittels Bodenradar auf der Schallaburg. In S. Kulturbetriebsges.n.b.H, *Die Schallaburg* (S. 399 - 402). Weitra: Bibliothek der Provinz.
- Nabighian, M. N. (2001). *Electromagnetic methods in applied geophysics - Applications part A and part B*. Tulsa: Society of exploration geophysicists.
- Nabighian, M. N. (2006). *Electromagnetic methods in applied geophysics - Theory*. Tulsa: Society of exploration geophysicists.
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., & Seren, S. (2005). Large Scale GPR Surveys of Roman Buildings. *Proceedings of the 33rd int. Symposium on Archeometry. Geoarchaeological and Bioarchaeological studies, Vol. 3*, (S. 23 - 30).
- Neubauer, W., Eder-Hinterleitner, A., Seren, S., & Melichar, P. (2002). Georadar in the Roman Civil Town Carnuntum/Austria: An approach on the archaeological interpretation of GPR data. *Archaeological Prospection 9*, S. 135 - 156.
- NÖAtlas4.0, N. (kein Datum). *NÖ Atlas 4.0*. Abgerufen am 13. November 2013 von <http://atlas.noel.gv.at/webgisatlas/>
- Pennick, N. (1987). *Einst war uns die Erde heilig, Die Lehre von den Erdkräften und Erdstrahlen*. Zürich: Oesch verlag.
- Pieper, W. (1993). *Geomantie*. Löhrbach: Werner Pieper's MedienXperimente.
- Pietzka. (1998). *Aufschlüsse Kreuzgarten M 1:20*. Mauerbach: Bundesdenkmalamt.
- Prokop, O. &. (1985). *Wünschelruten, erdstrahlen, Radiästhesie: Die okkulten Strahlenfähigkeitslehren im Lichte der Wissenschaft*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Sandmeier, K. (1998). *Manual ReflexW Version 3.5*. Karlsruhe: Sandmeier-geo.
- Seren, S., Eder-Hinterleitner, A., Neubauer, W., Löcker, K., & Melichar, P. (2007). Extended comparison of different GPR systems and antenna configurations at the Roman site Carnuntum. *Near Surface Geophysics*, S. 389 - 394.
- Sperner, S. (1999). *Untersuchungen zur Auflösung von dünnen Schichten mit dem Radar-Reflexionsverfahren*. Berlin: Technische Universität, Institut für angewandte Geowissenschaften.

- Streit, E.-M. (Juni 2011). Du aber hast alles nach Mass, Zahl und Gewicht geordnet. *Die Anwendung und Bedeutung von Maßen, Zahlen und Proportionen in der Architektur, und deren Auswirkungen auf das Befinden des Menschen*. Wien, Wien, Wien: Technische Universität Wien.
- Tipler, P. A. (1995). *Physik*. Heidelberg-Berlin-Oxford: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Worsch, E. (2001). *Erdstrahlen und deren Einfluss auf die Gesundheit des Menschen*. Graz: Leopold Stocker Verlag.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Ao. Univ.-Prof.Dr. Bruno Meurers für die Möglichkeit eine Arbeit zu diesem Thema durchführen zu können bedanken.

Danke auch an Herrn Mag. Christoph Blesl vom Bundesdenkmalamt, der mir die bisherigen Daten der Archäologen zur Kartause Mauerbach zur Verfügung gestellt hat.

Mein Dank gebührt auch den Mitarbeitern des ArcheoProspections Teams der ZAMG, besonders Herrn Mag. Klaus Löcker und Herrn DI Alois Eder-Hinterleitner, für die Benutzung des Bodenradars, die Bereitstellung der geophysikalischen Messdaten und weitere Hilfestellungen mit dem Messsystem und den Auswertungen bedanken.

Ebenso möchte ich mich hiermit herzlich bei Herrn DI Franz Hippmann bedanken, der mir mit viel Geduld seine Arbeitsweise und damit einhergehend eine mir bisher unbekannte Betrachtungsweise erklärt und nähergebracht hat.

Mein besonderer Dank gilt jedoch meinen Eltern Anna und Reinhold Brüstle, die mir mein Studium ermöglicht haben und die trotz einiger zeitlicher Verzögerungen immer unterstützend an meiner Seite waren, sowie meinem Lebensgefährten Markus Paulhart, der mir neben seiner Geduld auch den hin- und wieder notwendigen Anstoß gab.

Curriculum Vitae

Anna Katharina Brüstle

Born on 01.01.1984 in Vöcklabruck (Upper Austria)

Academic education:

2007/08 winter semester:	diploma program Slavic Russian
2005 summer semester:	Geophysics studies (A416) at the University of Vienna
2002 -- 2004:	1st term of Meteorology and Geophysics studies at the University of Vienna
2002 June:	school-certificate examination

Career path at the Geological Survey of Austria:

2008: Part-time employment at the Geophysics department, later at the department for Hydrogeology and Geothermal Energy

Job description: data research, modeling, database support, support of measurement equipment (TRT, iButtons, Nimo-T), data acquisition, supporting project administration

2006 summer – 2008 spring:

Freelance collaborator and traineeship at the Geological Survey – Geophysics department

Job description: geothermal data processing, literature research, archival work

Assistance in the following projects:

2006 - 2008	THERMALP – geothermal energy in the Eastern Alps
2007	TRANSTHERMAL – geothermal Potential in the border-area of Austria – Slovenia
Since 2008	OMV THERMAL – deep geothermal utilization in the Vienna Basin

THERMTEC – Thermal- tectonic modeling of orogenetic processes at the case study of the Tauern window

THERMALP – detailed study of the southern Vienna Basin

GEO POT – geothermal low-enthalpy potential in Austria

GNB BC23 – geothermal low-enthalpy potential in Burgenland, module 2: database development

CGS-Europe – Pan-European Coordination Action on CO₂ Geological Storage (Coordination and Support Action)

CO₂-Stop – Assessment of CO₂ storage Potential in Europe

GEOSOL – Success factors for solar micro heating networks with seasonal geothermal heat storage

TRANSENERGY – Transboundary Geothermal Energy Resources of Slovenia, Austria, Hungary and Slovakia

Publications:

Oral Presentations:

General overview on natural CO₂ sinks in Austria based on existing literature data – A first step towards the evaluation of possible monitoring sites; Authors: Goetzl G., Bruestle A.K., Bottig M.; CGS-Europe Knowledge sharing workshop Natural analogues (Maria Laach 17. – 19.10.2011)

Erfolgsfaktoren für solare Mikrowärmenetze mit saisonaler geothermischer Wärmespeicherung; Project Geosol (Sparkling Science); Peter Biermayer, Gregor Götzl, Julia Weilbold, Anna Katharina Brüstle, Gerald Stickler

Geothermische Speicherkonzepte; Impulsvortrag im Rahmen des Schülerworkshops HTL Wr.Neustadt/8-11-2010; Authors: A.K. Brüstle, G. Götzl

Poster Presentations:

How to enhance the performance and reduce the impact of shallow geothermal systems by implementation of alternating seasonal heating and cooling services. Numerical analyzes based on finite element simulations concerning the total heat budget of different heat-exchange methods; Authors: Goetzl G., Markiewicz R., Bruestle A., (2009), Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010 (submitted poster).

Geological and Geothermal 3D Modeling of the Vienna Basin - Pilot Area of the project TRANSENERGY; Authors: S. Hoyer, M. Bottig, F. Zekiri, M. Fuchsluger, G. Götzl, G. Schubert and A. Brüstle; Geological Survey of Austria (stefan.hoyer@geologie.ac.at); EGU General Assembly 2012 (submitted Poster)

Building a complex geological model using Parametric Surfaces; Authors: Stefan Hoyer¹, Magdalena Bottig¹, Fatime Zekiri¹, Gregor Götzl¹, Anna Katharina Brüstle¹, Gerhard Schubert¹, Annamaria Nador² 1. Geological Survey of Austria, A-1030 Vienna; 2. Geological Institute of Hungary, H-1143 Budapest

Additional qualification:

Languages:

German (native language)

English (fluent)

Russian (mediocre)

French (mediocre)

Spanish (basics)

PC skills:

MS Office

Esri – ARCGIS

Comsol Multiphysics

Golden Software / Grapher, Surfer , Didger

Matlab

ReflexW

SPW

AVS Express

Geographix

Adobe Acrobat Pro & Photoshop