

Georadar im Bohrloch Testsondierung einer 500 lb Fliegerbombe im Testfeld des NLBL

Durchführungszeitraum: 11.07.2017

Berichtsnummer: 90130-2017-02

Verfasser:

Dr. Michael Horn

Schollenberger Kampfmittelbergung GmbH

Abteilung Geodäsie Geoinformation und Geophysik

Auftragnehmer
SCHOLLENBERGER
Kampfmittelbergung GmbH

Industriestraße 4a

29227 Celle

Tel. 05141 88884-0

Fax: 05141 88884-40

Interne Auftragsnummer: 90130

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Angaben zum Testfeld | 3 |
| 1.1 | Räumliche Lage..... | 3 |
| 1.2 | Untersuchungsobjekt..... | 3 |
| 1.3 | Bodenbeschaffenheit..... | 4 |
| 1.4 | Bohrraster..... | 5 |
| 2 | Sondierung | 5 |
| 2.1 | Reichweitenmessung – Ermittlung der Umgebungsparameter und Reichweite | 5 |
| 2.1.1 | Begründung der Durchführung..... | 5 |
| 2.1.2 | Durchführung | 6 |
| 2.1.3 | Ergebnis in Testfeldes | 6 |
| 2.2 | Reflexionsmessung - Sondierung des Bohrrasters..... | 8 |
| 2.3 | Interpretation | 11 |
| 2.4 | Konsequenz für die Wahl des Bohrrasters | 12 |
| 3 | Informationen zur Einsetzbarkeit | 13 |
| 3.1 | Einsatzgebiete | 13 |
| 3.2 | Zeitlicher Rahmen | 14 |
| 3.3 | Bodenbeschaffenheit..... | 14 |
| 3.4 | Störkörper in Radarmessungen..... | 15 |
| 3.5 | Objektfunde und Berechnungen..... | 16 |
| 3.6 | Wahl der Antennenfrequenz..... | 16 |
| 4 | Reichweitenmessung genauer..... | 17 |

1 Angaben zum Testfeld

1.1 Räumliche Lage

Das Testfeld liegt auf dem Standortübungsplatz der Bundeswehr. Die Fläche ist vollständig durch Vegetation bedeckt (Abb. 1).



Abb. 1: Blick auf die Testfläche

1.2 Untersuchungsobjekt

Am 17.05.2017 wurde auf der Fläche ein Testobjekt waagrecht in ca. 4 m unter Geländeoberkante (GOK) eingebracht (Abb. 2 a). Dabei handelt es sich um eine 500 lb (ca. 250 kg) schwere amerikanische Fliegerbombe aus dem zweiten Weltkrieg (Abb. 2 b).



Abb. 2: (a) Testobjekt in der Grube (Tiefe ca. 4 m unter GOK); (b) Testobjekt: Fliegerbombe (500 lb)

1.3 Bodenbeschaffenheit

Aus Abb. 2 a geht hervor, dass der Untergrund aus größtenteils schwach feuchte, Sand besteht und bis 4 m unter GOK kein Grundwasser ansteht. Während der nachfolgenden Bohrarbeiten ergaben sich ebenfalls keine Hinweise auf eine Änderung der Bodenbeschaffenheit bis 6 m unter GOK. In den oberen Bodenschichten ist durch den Übungsbetrieb mit einer erhöhten Belastung durch Metallobjekte zu rechnen. Darüber hinaus sind keine tieferen Störkörper bekannt. Diese Bedingungen sind als optimal zu bezeichnen. Trockener und schwach feuchter Sand ist ein nahezu ideales Ausbreitungsmedium für die Radarwelle (neben Luft und Vakuum). Die hier beschriebenen Ergebnisse sind somit nur unter den hier beschriebenen Bodenverhältnissen gültig und nur bedingt auf andere Untersuchungsflächen übertragbar. Vorbereitend für eine Sondierung mittels Bohrlochradar sollte daher stets eine geophysikalische Vorerkundung durch eine „Reichweitenmessung“ der Radarwellen (siehe 2.1) durchgeführt werden.

1.4 Bohrraster

Nach der 2017 geltenden Arbeitsanweisungen des Kampfmittelbeseitigungsdienstes Niedersachsens (KBD Nds.) zur Sondierung eines Bombenverdachtspunktes (BVP's) wurde vorbereitend für die Sondierung ein 1,5 mal 1,5 Meter Bohrraster abgeteuft, dessen Mittelpunkt über der in den Boden eingebrachten Bombe liegt (Abb. 3 a/b). Für die Durchführung einer Reichweitenmessung wurden fünf zusätzliche Bohrlöcher in Verlängerung der Mittelachse des Bohrfeldes abgeteuft (Abb. 3 b). Alle Bohrlöcher wurden mit DN60 PVC-Rohren verrohrt und mit Kappen verschlossen. Die Bohrlochtiefen erreichen eine Tiefe von ca. 6,0 m unter GOK, lediglich Bohrung C1 ist etwas flacher (ca. 5,6 m unter GOK).



Abb. 3: (a) Durchführung der Bohrarbeiten; (b) Abgeteuftes Bohrraster und Lage des Testobjektes (rote Markierung). Aufmaß mittels RTK-DGPS System.

2 Sondierung

Für die Durchführung der Messung wurde das Bohrlochradar der Firma IDS (IDS Fastwave) mit je einer 150 MHz und 300 MHz Antenne eingesetzt. Einige der folgenden Aussagen sind Gerätespezifisch und können für andere Messgeräte abweichend sein.

2.1 Reichweitenmessung – Ermittlung der Umgebungsparameter und Reichweite

2.1.1 Begründung der Durchführung

Vorbereitend für die Sondierung mittels Bohrlochradar wurde eine Reichweitenmessung durchgeführt. Diese ermöglicht eine fundierte und belastbare Einschätzung der Reichweite der Radarwellen im Boden. Weiterhin kann so die

Geschwindigkeit der Welle im Boden näherungsweise bestimmt werden. Diese Messungen werden innerhalb des Bohrloches schrittweise jeden Meter ab GOK bis zur maximal erreichbaren Teufe durchgeführt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Mittelpunkt zwischen Sender und Empfänger als Tiefenreferenz dient (siehe Kapitel 4 zur genaueren Betrachtung). Da sich die Bodenbeschaffenheit mit der Tiefe ändern kann (Schichtung, Grundwasser, Einfluss einer Auffüllung), und diese direkten Einfluss auf die Reichweite der Radarwellen (sprich ihre Eindringtiefe) hat, ist eine solche Reichweitenmessung unabdingbar, um den Bohrlochabstand zu ermitteln. Die geringste Reichweite in einer Schicht ist dabei ausschlaggebend. Eine wasserführende Schicht zum Beispiel kann die Reichweite massiv einschränken, so dass ein deutlich kleinerer Bohrlochabstand nötig wird.

Es ist zu beachten, dass bei einer Reichweitenmessung die einfache Strecke der Radarwelle erfasst wird. In einer Reflexionsmessung muss die Welle den Weg vom Bohrloch zum Objekt und wieder zum Bohrloch zurücklegen (doppelte Strecke). Daher muss die ermittelte Reichweite mindestens halbiert werden, zusätzlich sollte ein Sicherheitspuffer von min. 0,5 m in der Reflexion eingerechnet werden.

2.1.2 Durchführung

Um eine Reichweitenmessung durchzuführen werden zwei Bohrlöcher benötigt, die Strecke x dazwischen muss bekannt sein. Als Referenz wird zuerst eine Messung in Luft durchgeführt. Dies dient zur Ermittlung der Verzögerung der Elektronik durch die Apparatur. Danach erfolgt die Messung in jeweils einem Meter Abstand über die gesamte Teufe.

2.1.3 Ergebnis in Testfeldes

Im Testfeld wurde die Reichweitenmessungen aus dem Bohrloch E2 zu den Bohrlöchern E1 sowie F1 – F5 durchgeführt (Siehe Bohrplan in Abb. 3 b). Die Bohrlochabstände sind in Tabelle 1 aufgelistet, ebenso ob eine Welle empfangen wurde.

Tabelle 1: Ergebnis der Reichweitenmessung

| Strecke | Abstand [m] | Radarwelle Empfangen 150 MHz | Radarwelle Empfangen 300 MHz |
|---------|-------------|------------------------------|------------------------------|
| E2 – E1 | 1,75 | Ja (gesamte Teufe) | Ja (gesamte Teufe) |
| E2 – F1 | 2,70 | Ja (gesamte Teufe) | Ja (gesamte Teufe) |
| E2 – F2 | 3,93 | Ja (gesamte Teufe) | Ja (gesamte Teufe) |
| E2 – F3 | 5,42 | Ja (gesamte Teufe) | Ja (gesamte Teufe) |
| E2 – F4 | 6,89 | Ja (gesamte Teufe) | Ja (gesamte Teufe) |
| E2 – F5 | 8,25 | Ja (gesamte Teufe) | Ja (gesamte Teufe) |

Die Welle beider Antennenfrequenzen wurde selbst in 8,25 Metern noch in ausreichender Amplitude empfangen. Als Reichweite in der Reflexionsmessung kann daher unter Berücksichtigung eines Puffers von 0,5 m eine Mindestdistanz von theoretisch 3,63 m erreicht werden, möglicherweise sogar weiter. Dies kann aber nicht verifiziert werden, da keine weiteren Bohrlöcher vorhanden sind.

Die Geschwindigkeit der Welle wird über die Laufzeit zwischen beiden Antennen ermittelt. Da die Geschwindigkeit direkt vom Medium abhängt (über die relative Dielektrizitätszahl ϵ_r) kann eine Änderung des Bodenaufbaus direkt erfasst und in der späteren Auswertung berücksichtigt werden. Abb. 4 zeigt ein Beispiel für die Reichweitenmessung zwischen den Bohrlöchern E2 und F3.

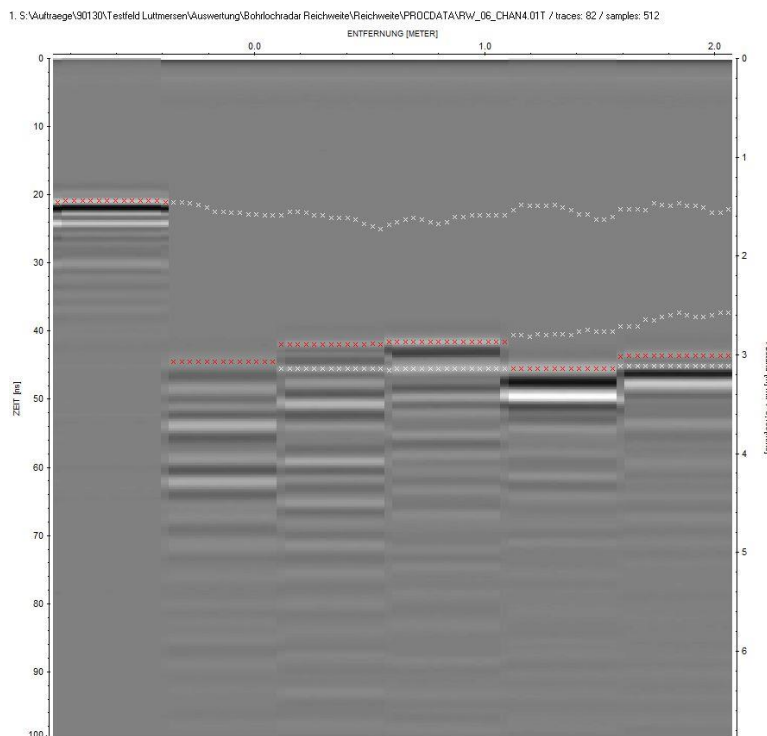


Abb. 4: Ergebnis der Reichweitenmessung E2 – F3, die roten Kreuze zeigen die Picks der Ankunft der direkten Welle

Die ganz linke frühere Ankunftszeit ist die Messung der Welle durch die Luft. Da die Strecke und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in Luft bekannt sind, kann mit dieser Messung die durch die Apparatur und den Versuchsaufbau entstehende Verzögerungszeit ermittelt werden. Die weiteren Messungen im Bohrloch zeigen, dass die Bodeneigenschaften kaum variieren und eine konstante Geschwindigkeit für die gesamte Teufe angenommen werden kann. Die Auswertung der Reichweitenmessung ergibt eine mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit von 0,138 m/ns. Dies ist ein sehr einfacher Fall, es ist möglich, dass deutliche Geschwindigkeitsänderungen mit der Tiefe vorkommen und die Daten so aufwendiger zu prozessieren sind.

2.2 Reflexionsmessung - Sondierung des Bohrrasters

Jedes Bohrloch der Reihen A bis E wurde sowohl mit der 150 MHz Antenne (Bsp. siehe Abb. 5) als auch der 300 MHz Antenne mittels Reflexionsmessung sondiert (Bsp. siehe Abb. 6). Daraus ergeben sich insgesamt 38 Radargramme.

1. S:\Auftraege\90130\Tstfeld Luttmersen\Auswertung\Bohrlochradar 150 MHz\PROCDATA\C2_UP__01T / traces: 207 / samples: 512

2.

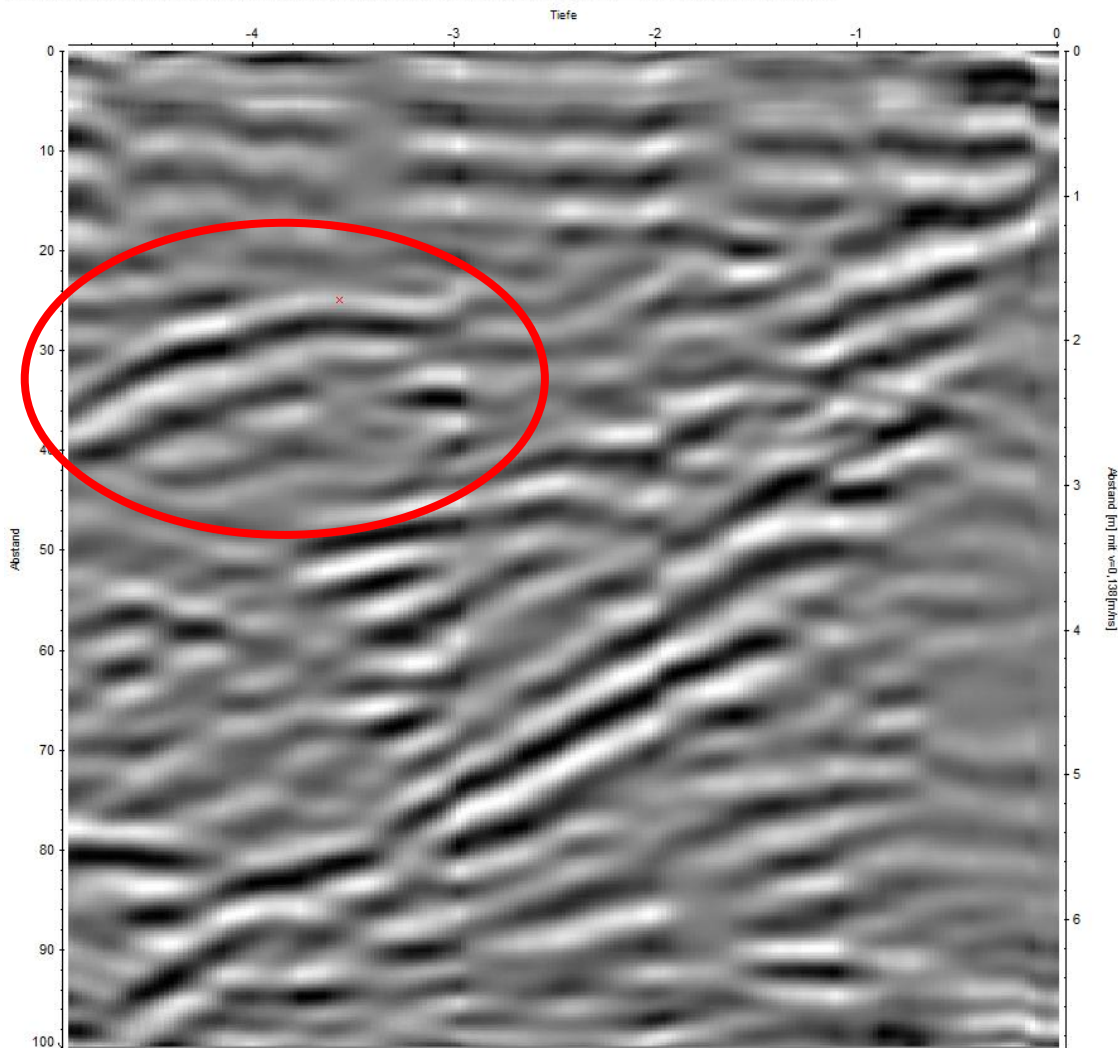


Abb. 5: Radargramm der Reflexionsmessung in Bohrloch C2 mit der 150 MHz Antenne. Das rote X und der Kreis markiert das Zentrum der Diffraktionshyperbel des Testobjektes

1. S:\Auftraege\90130\Testfeld Luttmersen\Auswertung\Bohrlochradar\Bohrlochradar 300 MHz\PROCDATA\C2_UP___00T / traces: 217 / samples: 512

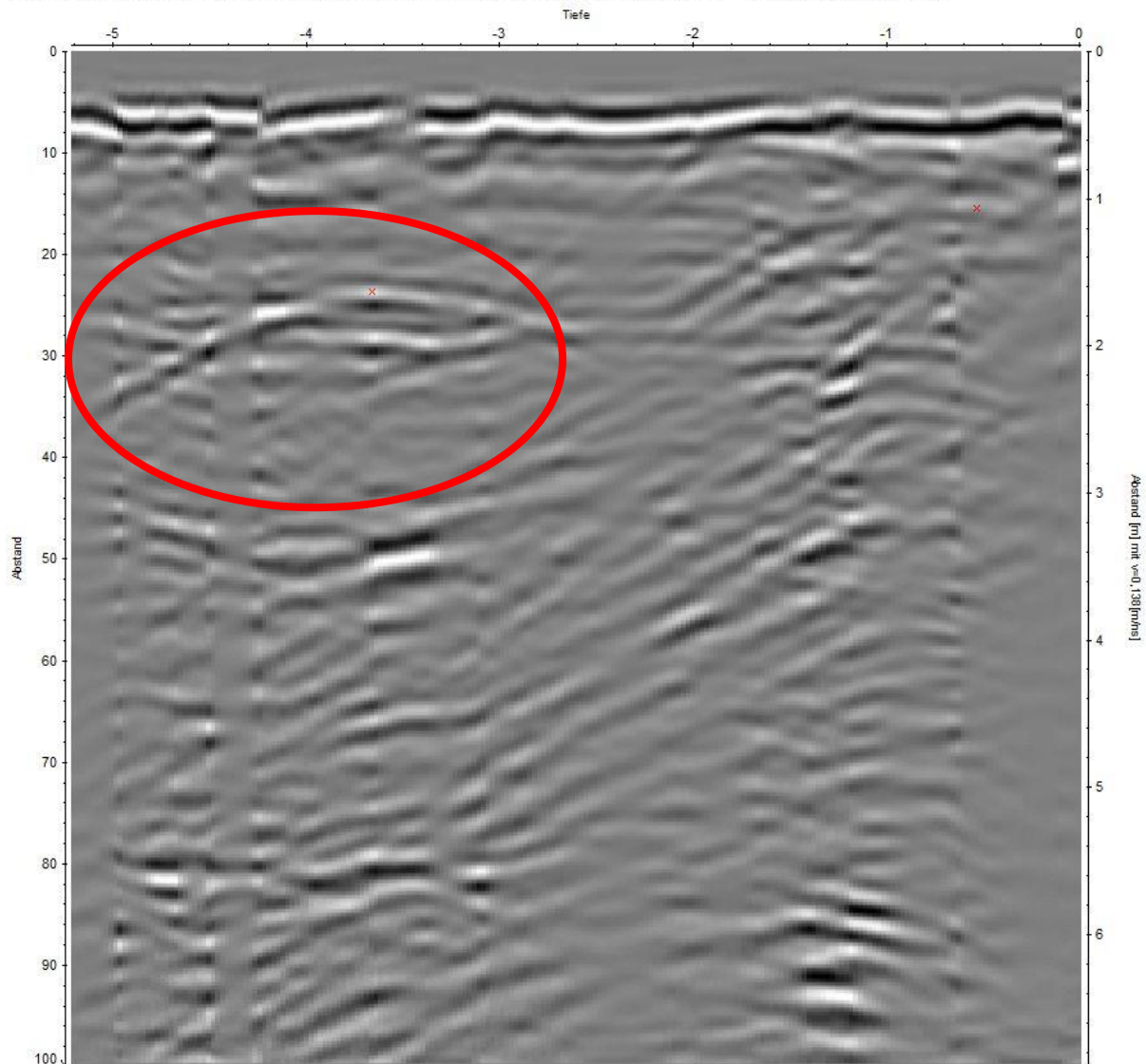


Abb. 6: Radargramm der Reflexionsmessung in Bohrloch C2 mit der 300 MHz Antenne, Das rote X und der Kreis markiert das Zentrum der Diffractionshyperbel des Testobjektes

Der Vergleich der beiden Abbildungen zeigt eine deutlich gröbere Auflösung der 150 MHz Antenne im Kontrast zu der 300 MHz Antenne. Die Diffractionshyperbel ist in Abb. 6 durch eine weitere Reflexion gestört, dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich um eine Bohrlochreflexion. Dennoch zeigen beide Radargramme klar das Vorhandensein eines Störkörpers in einer Tiefe von ca. 4 m unter GOK.

2.3 Interpretation

Insgesamt wurde das Testobjekt mit der 150 MHz Antenne in 9 Bohrlöchern identifiziert, mit der 300 MHz in 7 Bohrlöchern (Abb. 7).

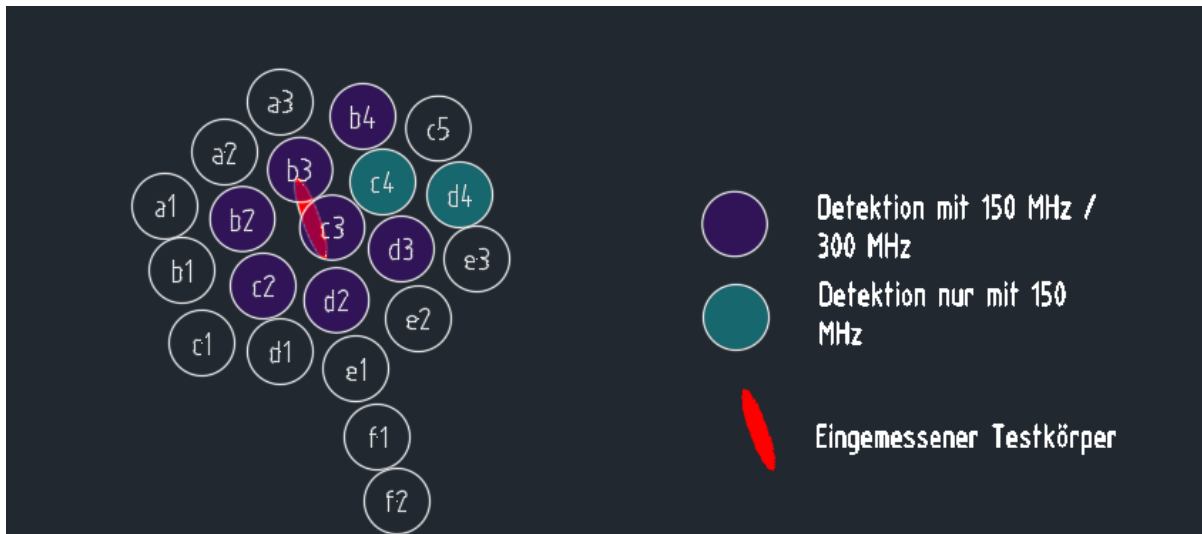


Abb. 7: Ergebnis der Sondierung

Die Bombe wird zuverlässig in etwa 0,5 – 2,0 Meter Abstand vom Bohrloch detektiert. Da das Bohrlochradar keine Richtungsinformation liefert, muss die Position trianguliert werden. Dies geschieht dadurch, dass um die Position der Bohrlöcher Kreise mit einem Radius gezeichnet werden, der dem Abstand der Diffraktionshyperbel zum Bohrloch entspricht. Dadurch ist eine Triangulation der Position über mehrere Bohrlöcher möglich, die die Lage der Bombe gut wiedergibt. Siehe hierzu die Triangulation für die 300 MHz Antenne in Abb. 8.



Abb. 8: Ergebnis der Triangulation für die 300 MHz Antenne, in lila sind die Abstände der detektierten Diffractions-Hyperbeln eingezeichnet, blaue Punkte zeigen die Bohrlöcher ohne Identifizierung, rote Symbole die Bohrlöcher mit einer Diffractions-Hyperbel.

Die Schnittpunkte dreier Kreise ergeben sich entlang der Achse des Bombenkörpers. Daher kann von einer zuverlässigen Detektion gesprochen werden. Für die 150-MHz-Messung ergibt sich ein analoges Bild. Des Weiteren zeigen die Daten, dass es eine Rolle spielt, von welcher Seite die Radarwelle auf den Festkörper trifft (siehe Abb. 8). Wird die „Breitseite“ des Körpers getroffen ist eine weiter entfernte Detektion möglich als beim Auftreffen der Welle auf die Spitze bzw. das Heck.

2.4 Konsequenz für die Wahl des Bohrrasters

Das Ergebnis dieser Messung zeigt, dass trotz einer theoretisch ermittelten Reichweite für die Reflexionsmessung von 3,63 m, das Testobjekt in den Bohrlöchern des äußeren Rings nicht zuverlässig detektiert werden kann. So zeigen sich bei der Messung mit der 150 MHz Antenne nur in 2 Bohrpunkten (B4, D4) des äußeren Bohrringes mit einem maximalen Abstand zum Objekt von 3,2 m, charakteristische Diffractions-Hyperbeln, die dem Testobjekt zugeordnet werden können. Für die Reflexionsmessung der 300 MHz Antenne ist das Testobjekt sogar

nur in einer Bohrung des äußeren Bohrringes mit einem Abstand von 2,4 m zum Testobjekt detektierbar. Dies ist bei der Wahl des Bohrlochabstandes für ein Bohrraster unbedingt zu berücksichtigen.

Auf Basis dieser Ergebnisse sollte daher kein Bohrraster mit einem Bohrlochabstand größer als 3,0 m gewählt werden, um eine sichere Detektion zu ermöglichen. Bei einer Detektion eines kampfmittelverdächtigen Objektes sind außerdem Zusatzbohrungen einzukalkulieren, um die genaue Position des Objektes bestimmen zu können.

3 Informationen zur Einsetzbarkeit

3.1 Einsatzgebiete

Die Messung mittels Bohrlochradar ist im Gegensatz zur Bohrlochmagnetik nicht anfällig für ferromagnetische Störkörper. Sie ist in der Regel also dort einzusetzen, wo eine Sondierung mittels Geomagnetik auf Grund eines hohen Störeinflusses nicht oder nur schwer zu realisieren ist.

Hierzu zählen z. B. die Messungen vor Spundwänden, in Bereichen bewehrter Pfahlgründungen oder in der Nähe von Stromleitungen.

Auf Grund der erhöhten Reichweite der Radarmessung, kann das Bohrlochradar ebenfalls in Gebieten eingesetzt werden, in denen das Einbringen klassischer Bohrraster, z.B. durch vorhandene Infrastrukturen und Gebäude, beschränkt ist (bitte hier Abschnitt 2.4 beachten).

Einschränkungen für die Messung mittels Bohrlochradar bilden häufig stark gestörte Böden und aufgeschüttete Bereiche. Deren Inhomogenitäten führen zu einer hohen Anzahl an Reflexionen in den aufgenommenen Radargrammen, die im ungünstigen Fall eine Identifizierung von kampfmittelverdächtigen Einzelobjekten nicht zulassen. Zu beachten ist ebenfalls, dass technisch bedingt die oberen **1,0 – 1,5 m unter GOK** durch die direkte Welle im Bohrloch überlagert werden. **Dieser Bereich ist in der Regel nicht auswertbar.** Für eine Freigabe über die gesamte Teufe, sollte somit immer eine Kombination mit Oberflächengeoradar oder TDEM erfolgen.

Es ist zu beachten, dass Spundwände oder Fundamente vom Bohrlochradar nicht durchdrungen werden!

3.2 Zeitlicher Rahmen

Grundsätzlich muss der eigentlichen Sondierung mindestens eine, bei wechselnden Bodenverhältnissen auch mehrere Reichweitenmessungen vorausgehen, die zeitlich berücksichtigt werden müssen. Die notwendige Anzahl dieser Messungen ist für jede Räumstelle individuell zu bewerten.

Der Messaufwand ist im Vergleich zur Geomagnetik wesentlich zeitaufwendiger, da mehr Equipment (Computer, Messradstativ, Kontrolleinheit etc.) von Bohrloch zu Bohrloch bewegt werden muss, so dass die Sondierleistung nicht mit der der Bohrlochgeomagnetik gleichzusetzen ist. Für ein Bohrraster von 19 Löchern sind beispielsweise circa eine Stunde zu veranschlagen.

Zusätzlich müssen alle sondierten Bohrlöcher eingemessen werden. Je nach Umgebung kann dies per RTK DGPS Rover oder muss per Tachymetereinsatz (in Städten, an Gebäuden etc.) erfolgen.

Für die Durchführung der Arbeiten sind stets zwei Personen nötig, davon sollte immer ein Geowissenschaftler dabei sein, um die Radargramme vor Ort zu begutachten und eventuell Messparameter zu verändern.

Bei der Auswertung ist zu beachten, dass diese deutlich länger dauert als bei der Bohrlochmagnetik. Ein Tag Messzeit mit dem Bohrlochradarsystem zieht mindestens zwei Tage Auswertung nach sich.

3.3 Bodenbeschaffenheit

In idealen Böden lassen sich auch größere Bohrraster von 2 bis 3 Meter Abstand realisieren (theoretisch mehr, siehe aber Einschränkung in Abschnitt 2.4). Radarwellen breiten sich am besten in trockenen Sandböden aus. Wichtig ist hier die sogenannte relative Dielektrizitätszahl ϵ_r des Bodens. Diese ist proportional zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle, darüber hinaus werden an Grenzschichten unterschiedlicher Dielektrizität Radarwellen teils reflektiert bzw. transmittiert, es tritt also einen Energieverlust der transmittierten Welle auf. Darüber hinaus ist die Leitfähigkeit des Bodens für eine Dämpfung der Radarwelle verantwortlich.

Heterogene Wasserverteilungen im Boden können sich negativ für die Ausbreitung der Radarwellen auswirken. Solche Zonen können zu Zonen ohne Reflexionen in den Radargrammen führen, hier ist dann keine Aussage möglich. Eine homogene Wasserverteilung hat in der Regel wenig bis keinen Einfluss auf die Sondierbarkeit, wirkt sich allerdings auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit aus.

Bauschutthalden sind ebenfalls nicht mit einem Georadar (egal ob von der Oberfläche oder aus dem Bohrloch) zu sondieren. Diese, oft extrem inhomogenen Bereiche, erzeugen eine Vielzahl an Reflektoren, so dass ein einzelnes Objekt nicht auszumachen ist. Ähnliches gilt für frisch bewegten Boden oder frische heterogene Aufschüttungen. Solche Bereiche sind in der Regel nicht auswertbar.

Generell hilfreich sind daher Bodengutachten, auf deren Basis schon im Vorfeld die Erfolgsaussichten einer Sondierung mittels Bohrlochradar abgeschätzt werden können.

3.4 Störkörper in Radarmessungen

Im Gegensatz zu elektromagnetischen oder geomagnetischen Verfahren ist bei Radarmessungen ein Störkörper anders zu verstehen. Radar wird nicht von metallischen Objekten neben der Sonde gestört. Eine Pfahlgründung z. B. ist selbstverständlich als Reflexion zu sehen, allerdings nur als eine Reflexion im konstanten Abstand. Daher kann so durchaus festgestellt werden, ob sich vor der Pfahlgründung ein Einzelobjekt befindet oder nicht.

Der limitierende Faktor ergibt sich hierbei aus der Anzahl möglicher Störkörper. So kann eine große Zahl von Objekten eine Vielzahl von Reflexionen im Radargramm hervorrufen, sodass eine Identifizierung von Einzelobjekten erschwert bzw. unmöglich wird.

3.5 Objektfunde und Berechnungen

Generell sollte beachtet werden, dass das Georadar immer dort ein Einzelobjekt identifizieren kann, wo die Welle auf einen Kontrast in der relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r im Vergleich zum umgebenden Medium (dem Boden) trifft. Daher können nicht nur Metalle eine Reflexion erzeugen sondern beispielsweise auch ein nasses Stück Holz oder ein Hohlraum.

Eine Berechnung von Objekten wie in der Geomagnetik nicht möglich. Es kann lediglich eine Tiefe und ein Abstand vom Bohrloch ermittelt werden.

3.6 Wahl der Antennenfrequenz

Grundsätzlich lässt sich mit einer geringeren Antennenfrequenz eine größere Reichweite erzielen. Dies geht allerdings auf Kosten des Auflösungsvermögens. Aus der Abb.7 geht hervor, dass der Vorteil der 150 MHz Antenne gering ist und kaum eine Mehr-Reichweite aufweist. Daher wird im Regelfall die 300 MHz Antenne bevorzugt.

4 Reichweitenmessung genauer

Streng genommen ist die Reichweitenmessung zwischen beiden Antennen-Mittelpunkten nicht korrekt, da die ausgesendete Welle direkt vom Sender zum Empfänger läuft, was nicht dem geraden Weg (Abstand x der Bohrlöcher) zwischen beiden Antennen entspricht (siehe hierzu Abb. 9).

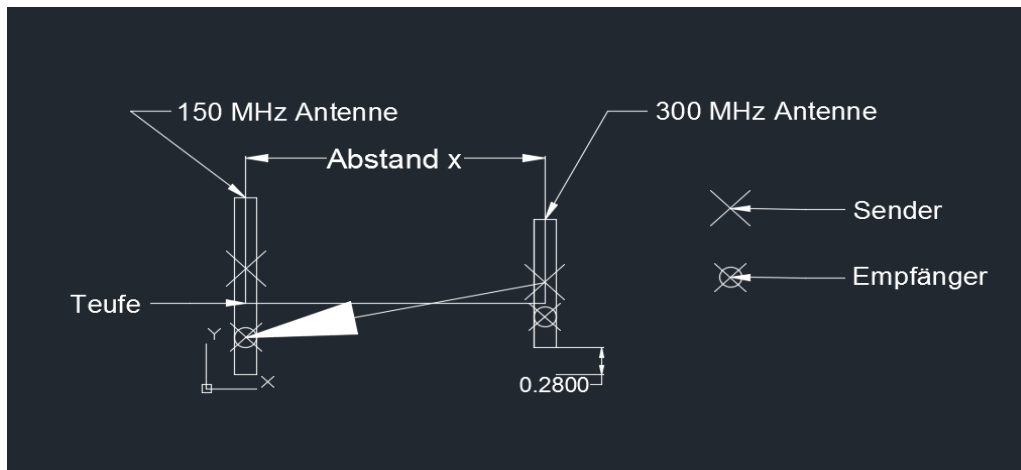


Abb. 9: Korrekte Sendergeometrie, der Pfeil gibt den Verlauf der Welle zwischen Sender und Empfänger einer 300 MHz Welle bei der Reichweitenmessung wieder.

Im Feld wird lediglich der Abstand x zwischen den Bohrlöchern erfasst. Daher muss der zurück gelegte Weg der Welle durch die Geometrie korrigiert werden. Die vertikale Distanz zwischen Sender und Empfänger bei der 150 MHz Antenne beträgt 70 cm, bei der 300 MHz Antenne 35 cm. Da als Teufenmittelpunkt der Mittelpunkt zwischen Sender und Empfänger gewählt wurde, kann so über ein rechtwinkliges Dreieck die genaue Strecke D berechnet werden, die die Welle zurücklegt. Die Formel hierzu lautet:

$$D = \sqrt{x^2 + (0,35 + 0,175)^2}$$

Dies begründet sich dadurch, dass die vertikale Distanz genau dem halben Abstand von Sender und Empfänger der 150 MHz Antenne sowie dem halben Abstand von Sender und Empfänger der 300 MHz Antenne ergibt. Zusammen mit dem Abstand x ergibt sich ein rechtwinkliges Dreieck, in dem der Satz des Pythagoras Anwendung findet.

Real ergeben sich bei einem Bohrlochabstand von einem Meter eine Wegdifferenz von 12 cm, bei einem Abstand von 8 Metern liegt die Differenz um die 2 cm. Gerade bei kurzen Abständen ist die Streckendifferenz daher wichtig, auf lange Distanz ist sie eher zu vernachlässigen.