

Beispiele zur Anwendung von Georadar in der Quartärgeologie

Autor(en): **Grasmück, Mark P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **85 (1992)**

Heft 2

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-167016>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Beispiele zur Anwendung von Georadar in der Quartärgeologie

Von MARK P. GRASMÜCK ¹⁾

ABSTRACT

Ground-penetrating-radar – applications in quaternary geology. A series of field tests with ground-penetrating-radar (GPR) were carried out. Possibilities and limitations of this new geophysical tool applied to fluvio-glacial sediments of the Swiss Plateau were studied.

Penetration and reflection of electromagnetic waves in sediments are controlled by their electrical and dielectrical properties. The GPR antennas are towed in a slow pace along the measuring traverses. At the same time a continuous radar section of the underground is plotted. With the aid of well logs, outcrop observations or geometrical methods, true depths of the reflections were estimated. The following examples are described in detail:

- Local thickness variations of a till bed above a gravel deposit.
- Erratic boulders in a lodgement till.
- Crossbedding structures in fluvial deposits.

The tool yielded high resolution images of humid, slightly clayey sediments up to 7 meters depth in a nondestructive way.

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der vorliegenden Arbeit sollen Möglichkeiten des Georadars, eines neuen zerstörungsfreien geophysikalischen Werkzeuges, für die Lösung von oberflächennahen geologischen Problemen in Lockergesteinen gezeigt werden.

Die Ausbreitung und die Reflexion von Radarwellen in Bodenmaterialien werden durch die elektrischen Eigenschaften von Matrix und Porenfüllung bestimmt. Die Georadarantennen werden im Feld als Schlitten den Messprofilen entlang gezogen. Die Echos aus dem Boden werden sofort ausgedruckt und ergeben kontinuierliche Radarprofile des Untergrundes. Durch Vergleich mit Bohrungen und Aufschlüssen, oder mit geometrischen Methoden, werden die Tiefen der Reflektoren bestimmt. So wurde die engräumige Mächtigkeitsänderung einer Grundmoräne über einem Schottervorkommen bildlich klar, ohne die Hilfe zahlreicher Bohrungen. In der Grundmoräne eingelagerte Erratiker wurden gefunden. Innerhalb eines Kieskörpers konnte Kreuzschichtung entdeckt werden.

Feuchte, leicht tonhaltige Quartärsedimente wurden mit dem Georadar bis zu 7 Metern Tiefe in Bildern mit hoher Detailauflösung dargestellt.

Einführung

Die zerstörungsfreie Erkundung der Strukturen von quartären Sedimenten in den obersten Dekametern des Erdbodens erfordert hochauflösende geophysikalische Methoden. Bei den seismischen Verfahren stören die Oberflächenwellen der gebräuchlichen Quellen akustischer Energie die Echos aus dem untiefen Bereich des Bodens.

¹⁾ Ingenieurgeologie ETH, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

Georadar verwendet elektromagnetische Wellen. Wegen ihres, verglichen mit akustischen Wellen, kleineren Impedanzkontrastes von Luft zu Boden, ist eine ungestörtere Aufzeichnung der oberflächennahen Reflexionen möglich. Die beim Georadar verwendeten Wellenlängen sind zwischen 10 und 100 Mal kleiner als in der Seismik. Dies ermöglicht eine hochauflösende Abbildung des Untergrundes. Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen ist abhängig von den elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Materialien die sie durchqueren. Dadurch variiert die Eindringtiefe stark für verschiedene geologische Materialien. Von Fall zu Fall sollte deshalb mit Testmessungen abgeklärt werden, wo die Tiefengrenze liegt.

Bei der Messung, der Auswertung und der Interpretation von Georadarprofilen gibt es viele Ähnlichkeiten zur Seismik.

Über die Anwendung von Georadar zur Erforschung des oberflächennahen Bereiches der Erde existieren mehrere Publikationen (z. B. Cook 1975, Ulriksen 1982, Vaughan 1986, Imai et al. 1987, Davis & Annan 1989, Jol & Smith 1991). In der Schweiz gibt es einige kommerzielle Anwender von Georadar, welche das Gerät für Baugrunduntersuchungen, Archäologie, Deponieabklärungen, Kiesabbau und Grundwasserprospektion anbieten. Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) hat Versuche mit Bohrlochradar mit tomographischen Auswertungen im Felslabor Grimsel gemacht (Falk et al. 1988; Niva et al. 1988).

Der vorliegende Artikel fasst Teile einer an der ETH Zürich ausgeführten Diplomarbeit zusammen (Grasmück 1991).

Am Anfang wird die Messmethode vorgestellt. Darauf folgt eine Auswahl der im schweizerischen Quartär durchgeführten Feldversuche.

Messprinzip des Georadars

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Die Ausbreitung der Radarwellen ist von drei frequenzabhängigen Materialparametern kontrolliert:

1) *Magnetische Permeabilität* μ : Lockergesteine, Festgesteine, Wasser und Eis sind nicht oder nur schwach magnetisierbar. Ausnahmen sind Vererzungen und Metallschrott. Daher wird die magnetische Permeabilität bei den meisten Georadaranwendungen als Konstante angenommen.

2) *Elektrische Leitfähigkeit* σ : Die elektrische Leitfähigkeit in einem Medium wird durch die Anzahl mobiler Ladungsträger bestimmt. In Lockergesteinen, einer Mischung von Gesteinsmaterial, Porenflüssigkeit und Luft, ist die Leitfähigkeit eine Funktion des Wassergehaltes und der gelösten Ionen. Tonminerale können, wegen Wasseraufnahme und ihrer Fähigkeit Ionen in ihre Zwischenschichten einzubauen und wieder frei zu setzen, gute elektrische Leiter sein. In elektrisch leitfähigen Materialien werden Radarwellen durch Induktion zu elektrischen Strömen umgewandelt, und eine weitere Ausbreitung der Wellen wird verhindert.

3) *Dielektrizitätszahl* ϵ : Die dielektrischen Eigenschaften eines Mediums werden durch die stationären Ladungsträger bestimmt. Bei geologischen Materialien spielt dabei das Wassermolekül die wichtigste Rolle. Die Ladungsverteilung im Wassermolekül be-

wirkt ein permanentes elektrisches Dipolmoment. Die Elektronenwolke um das Sauerstoffatom ist dichter als um die zwei Wasserstoffatome (Alonso & Finn 1977). Wird ein elektrisches Feld von aussen angelegt, so richten sich die polaren Wassermoleküle danach aus. Die elektromagnetischen Wellen versetzen die Wassermoleküle in Drehschwingungen, wodurch ein Teil der Energie der Wellen in Reibungswärme verloren geht (Forkmann & Petzhold 1989). Stark wasserhaltige Lockergesteine absorbieren deshalb Radarwellen stärker als trockene.

Georadar macht sich die Reflexion elektromagnetischer Wellen bei Änderungen der elektrischen Eigenschaften im Bodenmaterial zu Nutzen, indem die reflektierten Wellen aufgezeichnet und interpretiert werden. Grenzflächen für elektromagnetische Wellen können zum Beispiel Lithologieänderungen oder der Grundwasserspiegel sein. Gute Reflektoren sind auch Übergänge zu Metallkörpern oder zu luft- beziehungsweise wassergefüllten Hohlräumen. Manchmal sind die Änderungen in den elektrischen Eigenschaften von Auge gar nicht sichtbar, so dass zum Beispiel eine im Bohrkern anscheinend lithologisch homogene Schicht im Radarbild durch variierenden Wassergehalt eine feinere Gliederung zeigen kann, wie dies auch in Bohrlogs immer wieder sichtbar ist.

Eindringtiefe

Aus der Untersuchung der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen folgt, dass der mit Georadar untersuchbare Tiefenbereich in quartären Ablagerungen stark von deren Wasser- und Tongehalt abhängt. Die vor den Messungen gefallen Niederschläge spielen auch eine Rolle. Von Fall zu Fall sollte deshalb mit Testmessungen abgeklärt werden wo die Tiefengrenze liegt. Anhaltspunkte für nicht ideale tonhaltige und feuchte Sedimente geben die im zweiten Teil der Arbeit beschriebenen Beispiele.

Wird die Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen vom theoretischen Standpunkt aus untersucht, so findet man nach der Lösung der Maxwellgleichungen (Von Hippel 1954a, Cook 1975, Olsson et al. 1987, Davis & Annan 1989) folgende Dämpfungsgleichung für die Reflexion einer elektromagnetischen Welle an einem Reflektor von begrenzter Grösse:

$$\frac{P_r}{P_t} = C * e^{-4\alpha z} * \frac{1}{z^4}$$

Konstante	Absorption durch das Material	Sphärische Divergenz = räumliche Ausbreitung der Welle
-----------	-------------------------------------	--

wobei:

- P_t = Sendeleistung
- P_r = Leistung des empfangenen Signals
- α = frequenzabhängige Dämpfungskonstante des Materials
- z = Tiefe des Reflektors

P_r ist bei maximaler Reichweite die für den Georadar minimale, noch vom Rauschen unterscheidbare Leistung der ankommenden reflektierten Energie. Die Konstante C ist abhängig von Wellenlänge, Reflexionskoeffizient und Grösse des Reflektors, aber auch von Antennenparametern welche vom Gerätehersteller nicht spezifiziert werden.

Die Dämpfungsformel erlaubt eine Abschätzung der möglichen Reichweitensteigerung bei einer Erhöhung der Sendeleistung. Die Dämpfungskurven für verschiedene Bodenmaterialien bei 100 Megahertz sind in Figur 1 wiedergegeben. Die Multiplikation mit der Konstanten C bewirkt nur eine Translation der Kurven parallel zur logarithmischen Abszisse. Die vom Material abhängige Wellenlänge zwischen 0,6 Meter für den nassen Ton und 1,9 Meter für den trockenen Sand bewirkt in der logarithmierten Konstante C nur kleine Differenzen. Die in feuchten Quartärsedimenten bei eigenen Messungen erreichten 7 Meter Eindringtiefe geben auf der Kurve für feuchten Sand in Figur 1

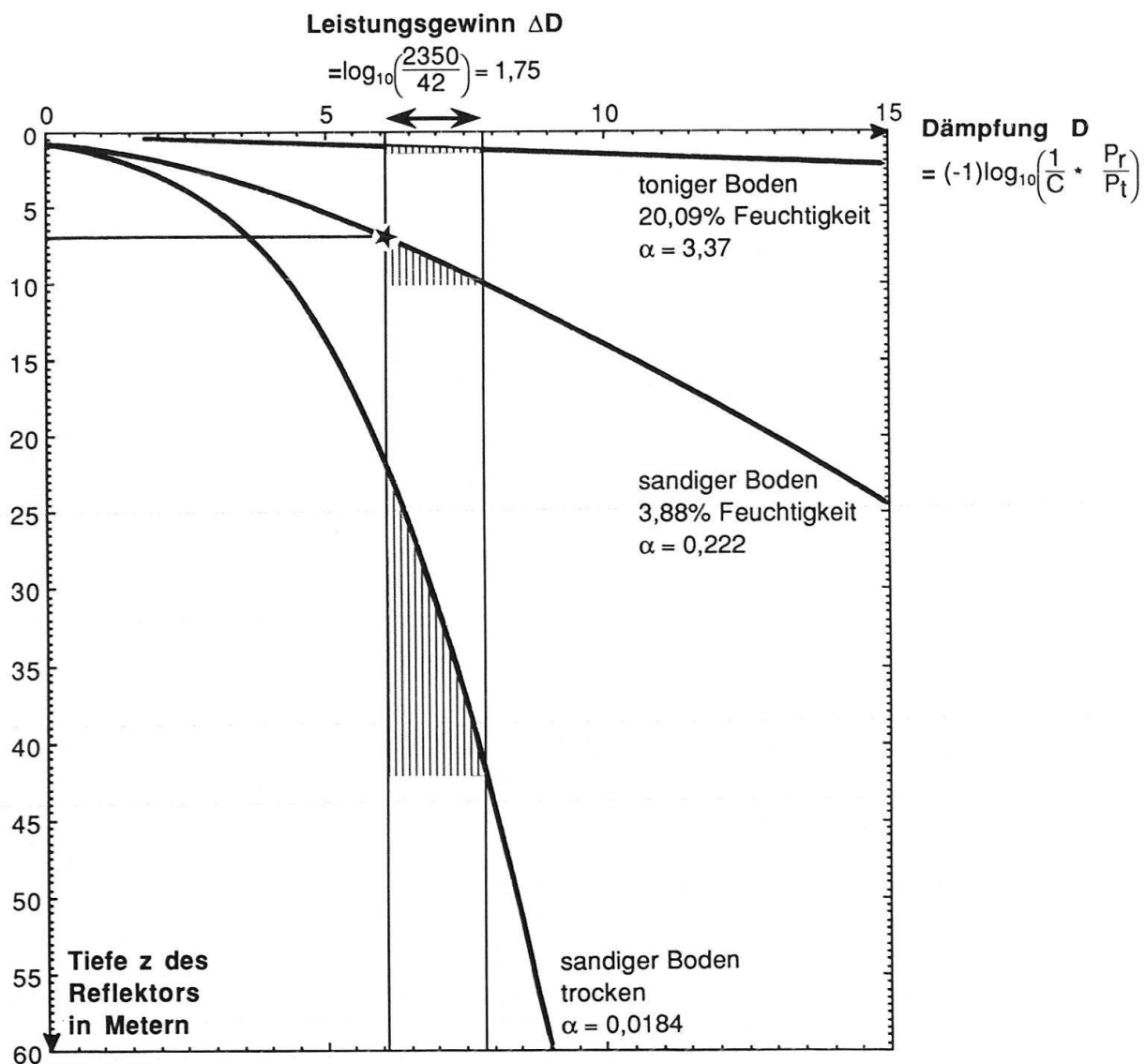


Fig. 1. Dämpfungskurven für verschiedene Bodenmaterialien bei 100 Megahertz und die zu erwartenden Tiefensteigerungen bei einer Erhöhung der Sendeleistung von 42 Watt auf 2350 Watt. Die in nassen tonigen Böden realisierbare Tiefensteigerung ist sehr gering. Die Werte für α basieren auf Daten aus von Hippel 1954b.

einen Anhaltspunkt, welche Dämpfung mit dem 42 Watt Sender überwunden werden kann. Durch den Leistungsgewinn bei Ausbau der Sendespitzenleistung von 42 auf 2350 Watt, wie sie im Handel angeboten wird, wäre theoretisch eine Tiefensteigerung von 3 Metern möglich. Figur 1 zeigt an der Höhe der schraffierten Dreiecke die zu erwartenden Tiefensteigerungen für verschiedene Materialien. Sinnvolle Reichweitensteigerungen durch Erhöhung der Sendeleistung sind nur in für Radarwellen durchlässigem Material wie trockenem Sand möglich. Diese Abschätzungen beruhen auf der Annahme, dass mit der Leistungssteigerung keine anderen Einbußen eintreten, so zum Beispiel eine Zunahme des Rausches.

Georadar-Ausrüstung

Die verwendete Georadar-Ausrüstung (GSSI SIR System-3 = Geophysical Survey Systems Subsurface Interface Radar System-3) besteht aus 3 Funktionseinheiten (Fig. 2):

- Stationäre Kontrollelektronik mit Drucker
- Sendeantenne
- Empfangsantenne

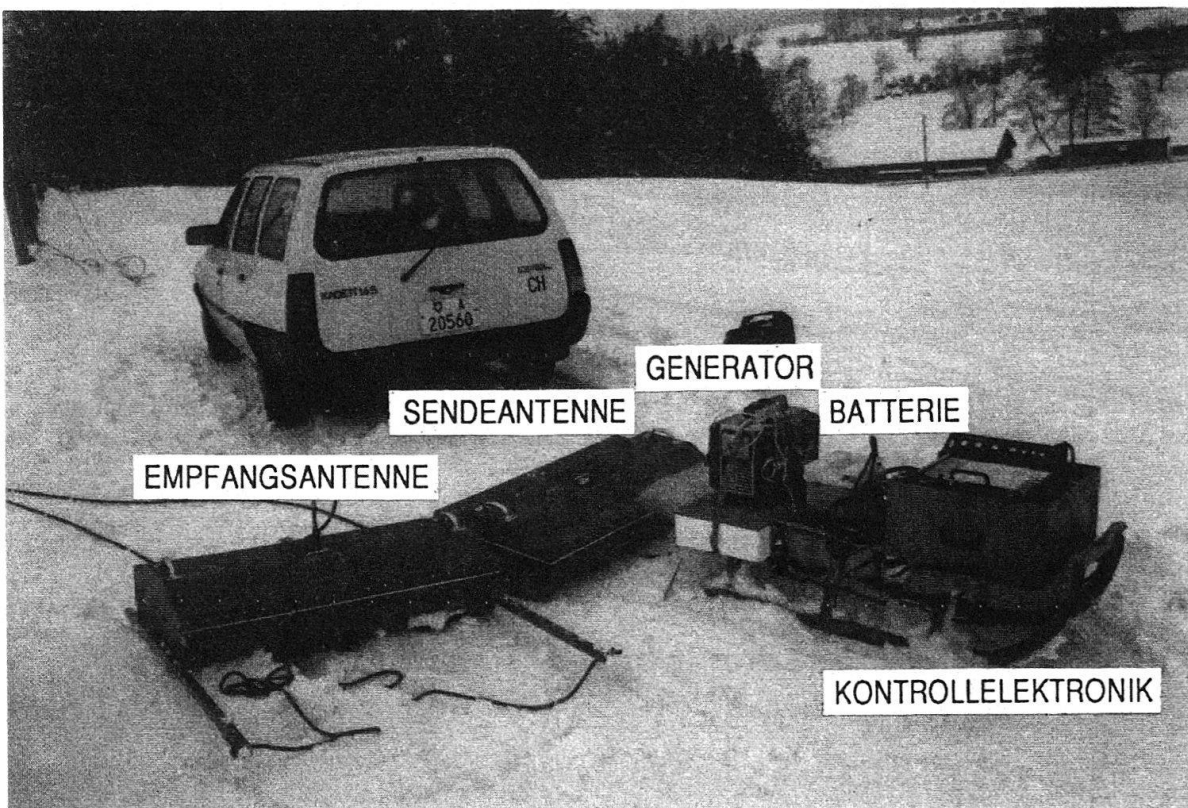


Fig. 2. Die Funktionseinheiten des Georadars im Feld. Die Kontrollelektronik, die 12 Volt Batterie und der Generator sind temporär auf einem Holzschlitten montiert. Die 100 MHz Sende- und Empfangsantenne werden bei der Messung fest miteinander verschraubt und an einem Seil den Profilen entlang gezogen. Die Daten werden über ein 60 Meter langes Kabel an die am Ort bleibende Kontrollelektronik übermittelt. Das gesamte Material findet im vergrößerten Laderaum eines Personenautos Platz.

Die zwei Antennen sind mit einem bis zu sechzig Meter langen Kabel mit der Kontrollelektronik verbunden. Hochvoltpulse werden mit einer Wiederholungsrate von 50 Kilohertz ($5 \cdot 10^4$ Hertz) in die Sendeantenne abgegeben und bewirken, dass die Kupferleiter im Antennengehäuse Radarpulse in den Boden aussenden. Die Pulse sind kurz im Vergleich zur Wiederholungsrate. 50 Kilohertz entsprechen einer Periode von 20 000 Nanosekunden ($1 \text{ nsec} = 10^{-9}$ Sekunden). Die Pulsbreite einer Antenne mit der Zentralfrequenz von 100 Megahertz (10^8 Hertz) ist nur etwa 10 Nanosekunden. Beim Aussenden des Pulses wird der Empfänger aktiviert. Maximal einstellbare Horchzeit ist 1000 Nanosekunden ab Aussendung des Pulses. Nach Verstärkung und Filterung werden die Signale direkt im Feld in Profildruckform ausgedruckt.

Messvorgang im Feld

Die zusammengeschraubten Sende- und Empfangsantennen werden entlang der Messprofile gezogen, während die Kontrollelektronik stationär bleibt. Vor Beginn der Messungen werden die beabsichtigten Traversen in gleichmässigen Intervallen (z. B. 5 Meter) mit numerierten Fähnchen abgesteckt für die spätere Relokalisation der Radarprofile im Gelände. Befindet sich die Mitte zwischen Sende- und Empfangsantenne beim Vorbeiziehen auf der Höhe eines Fähnchens, wird durch Knopfdruck eine Strichmarkierung auf dem Radarprofil ausgedruckt.

Eine Person bedient die Kontrollelektronik, währenddem die andere die Antenne wie einen Schlitten in gleichmässigem Tempo hinter sich her zieht. Bei Messungen zu Fuss liegt der Stundendurchschnitt bei etwa 100 Meter Profillänge. In dieser Zahl sind Nebenarbeiten wie Verschiebung der Geräte und Abstecken der Profile eingeschlossen. In schwierigem Gelände sind 3 Personen nötig, damit das lange Verbindungskabel immer in gleicher Art von den Antennen weg geführt werden kann um Kabelreflexionen zu vermeiden. Drähte von Strommasten oder Zäunen, überliegende Baumkronen, nahe gelegene Böschungen und Wände können manchmal zu Fremdechos führen. Die Antennen sind nach oben abgeschirmt, so dass der grösste Teil der elektromagnetischen Wellen in den Boden eindringt und die Fremdechos abgeschwächt werden.

Antennenwahl

Bei der Wahl der Antennen muss ein Kompromiss zwischen Eindringtiefe, Tragbarkeit und Auflösung eingegangen werden. Es gibt Antennen von GSSI mit Zentralfrequenzen von 80 Megahertz bis 1 Gigahertz. Die verwendeten reisekoffergrossen 100-Megahertz-Antennen sind bei möglichst tiefer Frequenz für maximale Eindringtiefe vom Feldgebrauch her gerade noch geeignet. Eine 100 Megahertz Antenne wiegt 13 Kilogramm mit einer Grundfläche von $0,95 \times 0,55$ Metern. Die 80 Megahertzantenne würde 64 Kilogramm wiegen mit einer Grundfläche von $1,32 \times 0,84$ Metern. Die Dämpfung nimmt nach Davis & Annan 1989 bei Frequenzen über 100 Megahertz stark zu wegen der Relaxation des Wassers, wie im Kapitel über die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beschrieben. Ferner kann die Streuung der Signale durch kleinmassstäbliche Heterogenitäten eine Zunahme der Dämpfung bei steigender Frequenz bewirken (Davis & Annan 1989).

Auflösung

Die Auflösung ist ein subjektives Mass und stark von Störsignalen abhängig. In den meisten praktischen Fällen wird mit einer vertikalen Auflösung von einer Wellenlänge gerechnet (Tabelle 1). Bei den 100 Megahertzantennen liegt diese je nach Material bei 0,5 bis 2 Metern. Bei optimalen Bedingungen sind, wie in der Seismik, Reflektoren bis zu einem Minimalabstand von einer Viertelwellenlänge erkennbar (Widess 1973). Die vertikale Auflösung hängt nicht mit der Präzision der Zeitbestimmung eines Echos zusammen, sondern mit der Unterscheidbarkeit zweier Grenzflächen im Seismik- beziehungsweise Radarprofil (Sheriff 1977).

Die horizontale Auflösung ist schlechter als die vertikale, obwohl alle 2–3 Zentimeter, welche die Antennen weiter gezogen werden, eine neue Signalspur am Radarprofil angefügt wird. Die von der Antenne ausgesandten Pulse entwickeln sich im Erdreich zu Halbkugelwellen. Die aufgezeichneten Echos stammen nicht von Punkten, sondern von Flächen. Die aus der Seismik bekannte Fresnelfläche, auch Fresnelzone genannt (Forkmann & Petzhold 1989), dient als Mass der horizontalen Auflösung (Tabelle 2).

Der Durchmesser der Fresnelfläche beträgt (Herleitung: Pythagoras):

$$d_F = \sqrt{2z\lambda + \frac{\lambda^2}{4}}$$

wobei:

d_F = Fresnelflächendurchmesser

z = Tiefe des Reflektors

λ = Wellenlänge

Material	100 MHz	300 MHz
gesättigter Sand	$\lambda=0,6m$	$\lambda=0,2m$
trockener Sand	$\lambda=1,5m$	$\lambda=0,5m$

Tabelle 1: Wellenlängen elektromagnetischer Wellen in Sand mit Daten aus Davis & Annan 1989.

Material	Tiefe	100 MHz	300 MHz
gesättigter Sand	3m	$d_F=1,9m$	$d_F=1,1m$
	10m	$d_F=3,5m$	$d_F=2,0m$
trockener Sand	3m	$d_F=3,1m$	$d_F=1,8m$
	10m	$d_F=5,5m$	$d_F=3,2m$

Tabelle 2: Fresnel-Flächendurchmesser mit Daten aus Tabelle 1.

Interpretation der Radarprofile

Ziel der Untersuchung ist, die in den Radarprofilen enthaltenen Informationen als geologische Profile des Untergrundes darzustellen (Fig. 3). Radarprofile sind Zeitschnitte durch das untersuchte Material. Um die wahre Tiefe der Reflektoren zu bestimmen, muss eine Umwandlung der in Nanosekunden gemessenen Echozeiten in Tiefen erfolgen.

Bestimmung des Nullpunktes

Um die Tiefe eines Reflektors zu bestimmen ist es nötig, die Bodenoberkante im Radarprofil zu identifizieren. Liegen Sende- und Empfangsantenne nahe beisammen, so durchläuft die Radarwelle näherungsweise den gleichen Weg zwischen Antennen und Reflektor zwei Mal. Wichtig beim Ausmessen der Zweiwegzeiten (englisch „two way time“ oder kurz *twt*) ist es, dass die erste Bodenreflexion als Nullpunkt dient.

Im obersten Teil der Signalspur sind die durch die Luft gelaufenen Anteile des gesendeten Radarpulses sichtbar (Fig. 3). Kurz darauf folgt die erste starke und scharfe Bodenreflexion, welche als Zeitnullpunkt und Bodenoberfläche dient. Jeder Antennentyp hat seine eigene Erstreflexionscharakteristik. Eine weitere Hilfe zur Unterscheidung

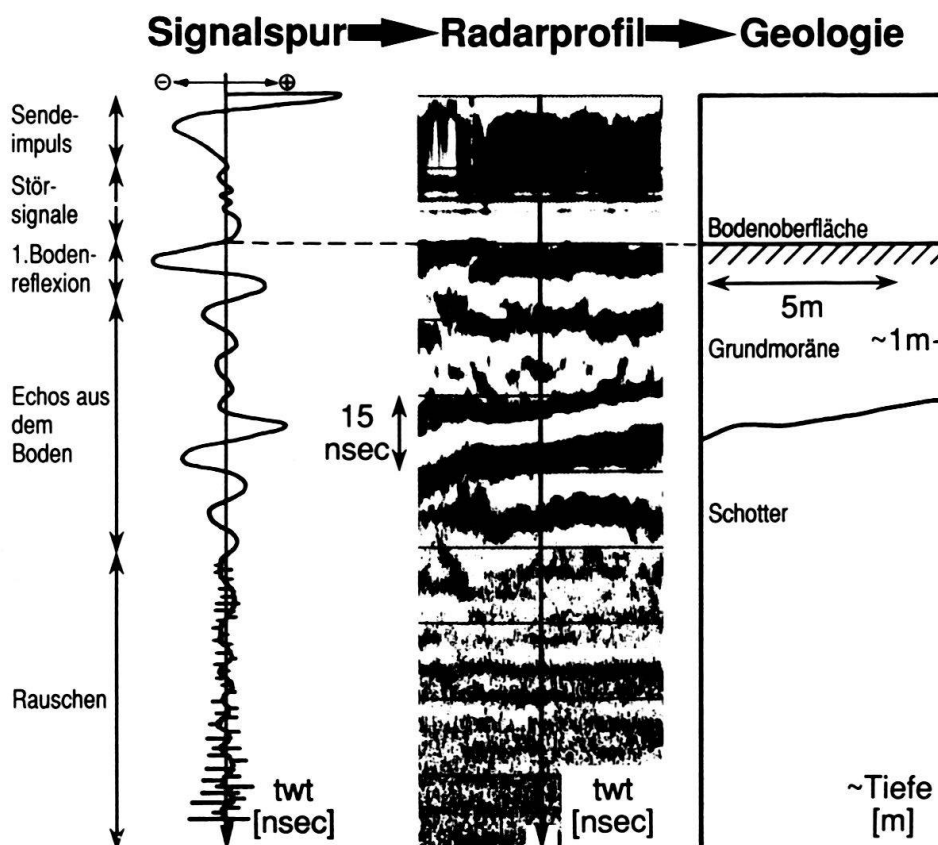


Fig. 3. Signalspur – Radarprofil – geologisches Profil. Das Radarprofil entsteht durch Aneinanderreihung zahlreicher Signalspuren. Negative Amplituden werden dabei schwarz, positive Amplituden weiss dargestellt. Es entsteht ein kontinuierliches Profil des durch die Antennen überfahrenen Untergrundes. (100 MHz Antennenpaar).

von Bodenreflexionen und Störwellen ist die Tatsache, dass die direkt in den Antennen entstehenden Störsignale auf der ganzen Radarsektion parallel verlaufen, unabhängig von den Bodenunregelmässigkeiten. Ein langsames Heben der Antenne um ein paar Meter über den Boden bewirkt eine zeitliche Verzögerung aller Bodenreflexionen im Radarprofil, aber keine zeitliche Änderung bei den Störsignalen, die zum Teil auf Kabelreflexionen beruhen.

Weil der Reflexionskoeffizient an der Grenzfläche Luft-Boden für die elektrische Welle negativ ist, erfährt die reflektierte Welle eine Phasenumkehrung von 180 Grad. Ein positiver Sendeimpuls kehrt also als negativer in die Empfangsantenne zurück. Dies ist ein Grund, warum oft nur die negativen Amplituden in Grauschattierung gedruckt sind, währenddem die positiven Amplituden weiss gelassen werden.

Der planare Reflektor

Liegen Sende- und Empfangsantenne nebeneinander auf einer horizontalen Bodenoberfläche, so ergeben sich bei horizontalen Reflektoren im Untergrund näherungsweise vertikale Strahlengänge. Weil die Abstrahlcharakteristik der verwendeten Georadarantennen mit einem Öffnungswinkel zwischen 30 und 45 Grad keulenförmig ist, werden auch die Echos von schiefen Reflektoren aufgezeichnet. Die Strahlengänge bei schiefen Reflektoren sind nicht vertikal zur Bodenoberfläche, sodass schiefe Reflektoren auf der Radarsektion tiefer, weniger steil und länger erscheinen. Durch Migration wie sie aus der Seismik bekannt ist, kann der Effekt rückgängig gemacht werden.

Der sphärische Reflektor

Durch die Wölbung der Reflektoroberfläche und die keulenförmige Abstrahlcharakteristik der Georadarantennen werden Echos aufgezeichnet, bevor und nachdem sich die Antennen direkt über dem kontrastierenden Störkörper befinden (Fig. 4). Bei kleineren Störkörpern (Durchmesser < 1 Wellenlänge) ergeben sich aus der Geometrie der Strahlengänge die aus der Seismik bekannten Diffraktionshyperbeln (Forkmann & Petzhold 1989). Figur 4 zeigt am Beispiel eines Erratikers die Berechnung der mittleren Geschwindigkeit einer Grundmoräne zur Kalibrierung eines Tiefenmassstabes aus der Form von Hyperbeln. Der Störkörper sollte sich in der vertikalen Profilebene befinden, was mit einem Querprofil kontrolliert werden kann. Häufig erscheinen mehrere überlagerte Hyperbeln. Die Interferenzen kommen wahrscheinlich durch die Überlagerung der Echos von der Ober- und Unterseite des Störkörpers zustande. Bei elektrisch leitfähigen Störkörpern, zum Beispiel aus Metall, kann die Wiederholung der Signatur in der Tiefe als Sendewirkung der im Körper induzierten elektrischen Ströme interpretiert werden. Forkmann & Petzhold 1989 zeigen, dass der Fehler, durch die endliche Krümmung des Reflektors verursacht, grösser als 10% sein kann.

Grobe Tiefenbestimmungen an Hyperbelsignaturen sind in Lockergesteinen immer wieder möglich.

Radar-Fazies-Analyse

Die Tiefenbestimmung in Radarprofilen wird genauer, falls Bohrungen und Aufschlüsse auf den Profilen liegen. Die Radarsektionen werden an bestimmten Punkten

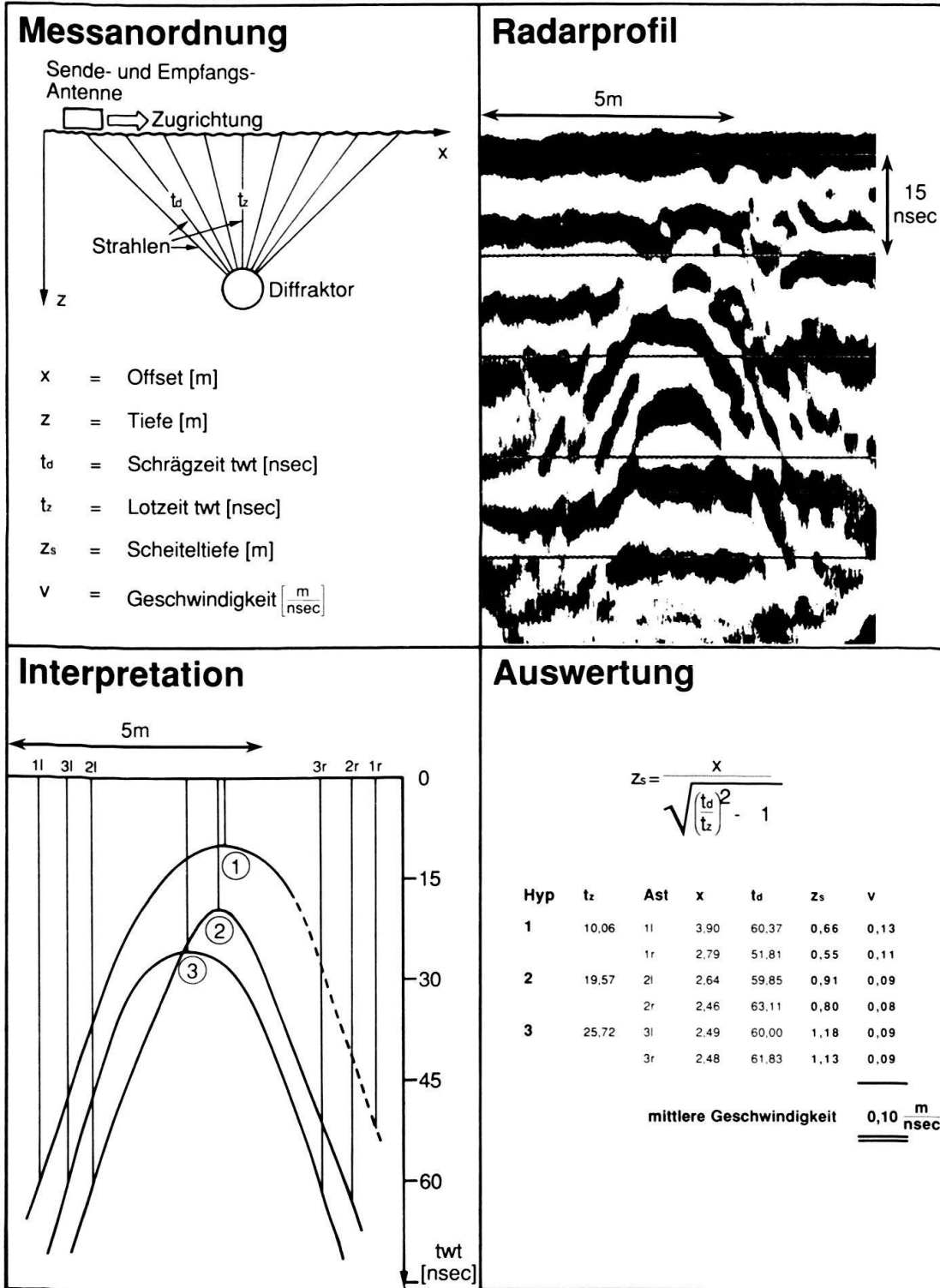


Fig. 4. Kleine sphärische Körper werden mit Georadar auf Grund der Strahlengometrie als Hyperbeln abgebildet. Im Beispiel vom Bümberg (Kanton Bern) sind mehrere Hyperbelsignaturen eines möglichen Erratikers überlagert. An den Hyperbeln wurden die Scheiteltiefen und elektromagnetischen Geschwindigkeiten des umliegenden Moränenmaterials bestimmt. Der an der Bodenoberfläche durch Austrocknung und Versickerung erniedrigte Wassergehalt könnte eine Ursache für die grösseren Geschwindigkeiten sein. (100 MHz Antennenpaar, negative Amplituden schwarz, positive Amplituden weiss).

kalibriert, indem Radarreflexionen geologischen Grenzflächen in bekannter Tiefe zugeordnet werden. Damit eine sichere Zuordnung möglich ist, muss bekannt sein, wie die wichtigsten Lockergesteinstypen einer Region mit der verwendeten Georadarausrüstung abgebildet werden. Beres & Haeni 1991 haben einen Katalog für den nordöstlichen Teil der Vereinigten Staaten mit 80 Megahertzantennen gemacht. Figur 5 zeigt Reflexionsmuster aus dem schweizerischen Mittelland für die 100 Megahertzantennen.

Beispiele aus der Schweiz

Die Messbeispiele konzentrieren sich auf Problemstellungen in Lockergesteinen an zwei Orten der Schweiz (Fig. 6). Der Hauptteil der Feldarbeiten wurde im Januar 1991 ausgeführt. Die Figuren 7 bis 9 stellen eine kleine Auswahl der gemessenen Profile dar.

Die Interpretationen wurden auf Transparentpapier gemacht und separat wiedergegeben um die Originalaufnahmen nicht zu verfälschen. Die Tiefenmassstäbe wurden mit einer mittleren Geschwindigkeit für den ganzen Tiefenbereich berechnet. Die mittleren Geschwindigkeiten gingen aus Tiefenbestimmungen mit Hyperbelsignaturen und durch Kalibration an Aufschlüssen auf allen zu einem Messgebiet gehörenden Radarprofilen hervor. Einzelne an Hyperbeln in den Figuren gemachte Geschwindigkeitsbestimmungen sind mit v_{HYP} bezeichnet. Vergleiche verschiedener Tiefenbestimmungen ergaben in einigen Fällen relative Abweichungen von mehr als $\pm 10\%$. Die Tiefenangaben auf den Interpretationen sollen deshalb primär zur Angabe der Grössenordnungen dienen.

Die Figuren werden nach folgendem Schema besprochen:

- Geographische und geologische Lage der Messgebiete.
- Beobachtungen an den Radarprofilen.
- Resultat der Geschwindigkeitsanalyse.
- Interpretation der Reflektoren und Diffraktoren.

Bümburg: Auskeilen der Grundmoräne auf Schotterdrumlin

– Das Messgebiet (Koord.: 611'500/183'500/575) liegt 5 Kilometer nördlich von Thun und wird zum Teil als Kiesvorkommen genutzt (Fig. 6). Die Drumlinlandschaft um die Kiesgrube herum ist typisch für ein durch das Gletschereis geschaffenes Fließbett mit sanften Undulationen. Die Fließrichtung des Gletschers war, entsprechend den Längsachsen der Drumlins, von Süden nach Norden. Die Mächtigkeit der Grundmoräne über den Schottern schwankt zwischen Null und einigen Metern. Hauptziel dieser Messungen war, den Einsatz des Georadars bei der Untersuchung der Moränendeckschicht über dem Kiesvorkommen zu testen. Als Korrelationshilfen diente die Sondierbohrung RB1 der KAGA (Kies AG Aaretal) aus dem Jahr 1979. Die Bohrung RB1 liegt etwa 50 Meter östlich des Profils in Figur 7 welches in der Fließrichtung des Gletschers liegt.

– Im Radarogramm von Figur 7 fällt ein gleichmässig von Norden nach Süden abfallender starker Reflektor auf. Die Reflexionen im obenliegenden südlichen Keil haben eine fleckige und unklare Erscheinung mit verstreuten Hyperbeln und Zweiwegzeiten von höchstens 60 nsec. Unterhalb des diagonalen Reflektors sind die Reflexionen kontinuierlicher mit maximalen Zweiwegzeiten von 100 nsec und Anzeichen von Hyperbelsignatu-

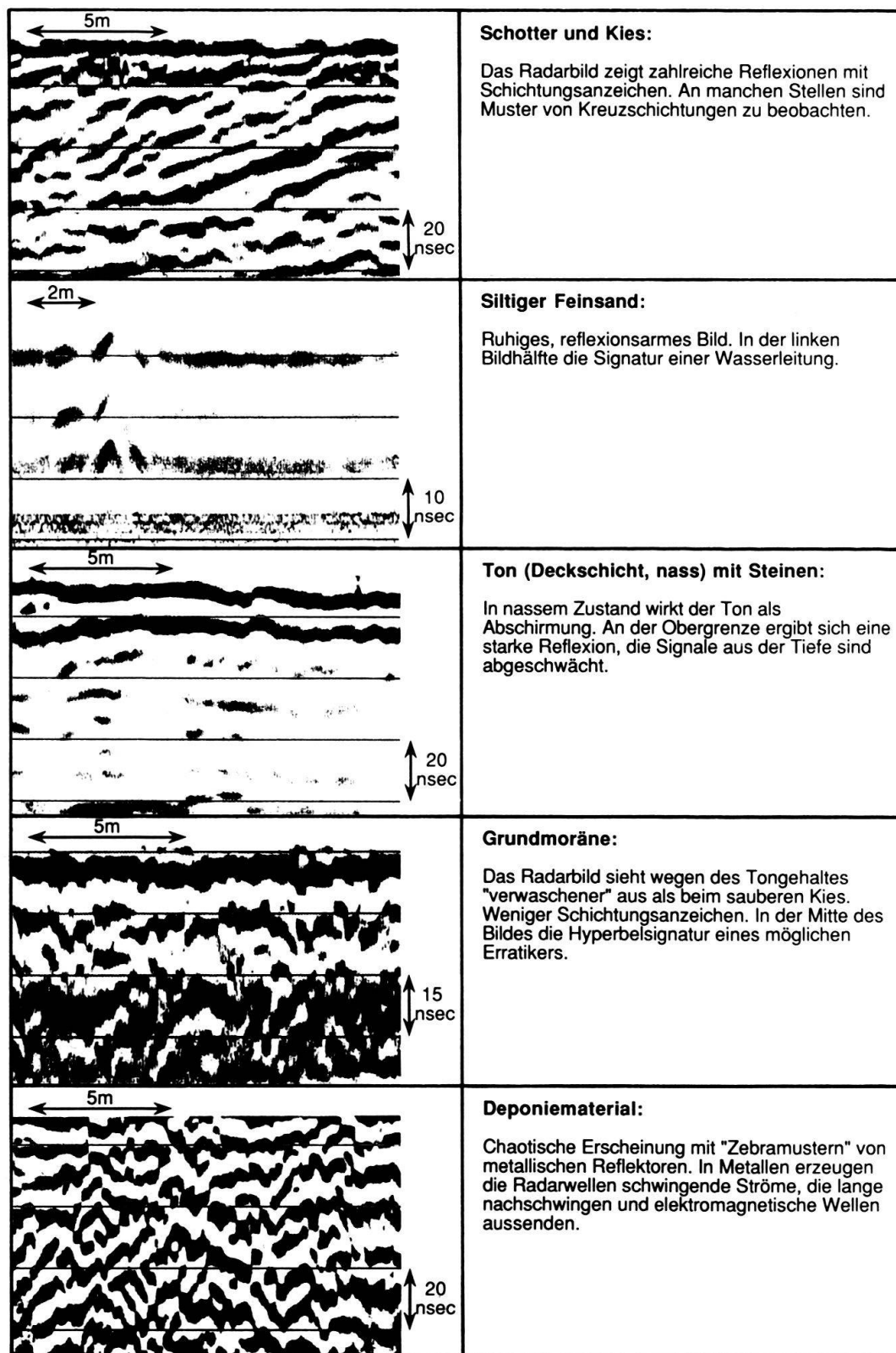


Fig. 5. Charakterisierung der wichtigsten Lockergesteinstypen im Radarprofil für das 100 MHz Antennenpaar an Beispielen aus dem schweizerischen Mittelland. Die negativen Amplituden wurden schwarz, die positiven Amplituden weiss ausgedruckt.

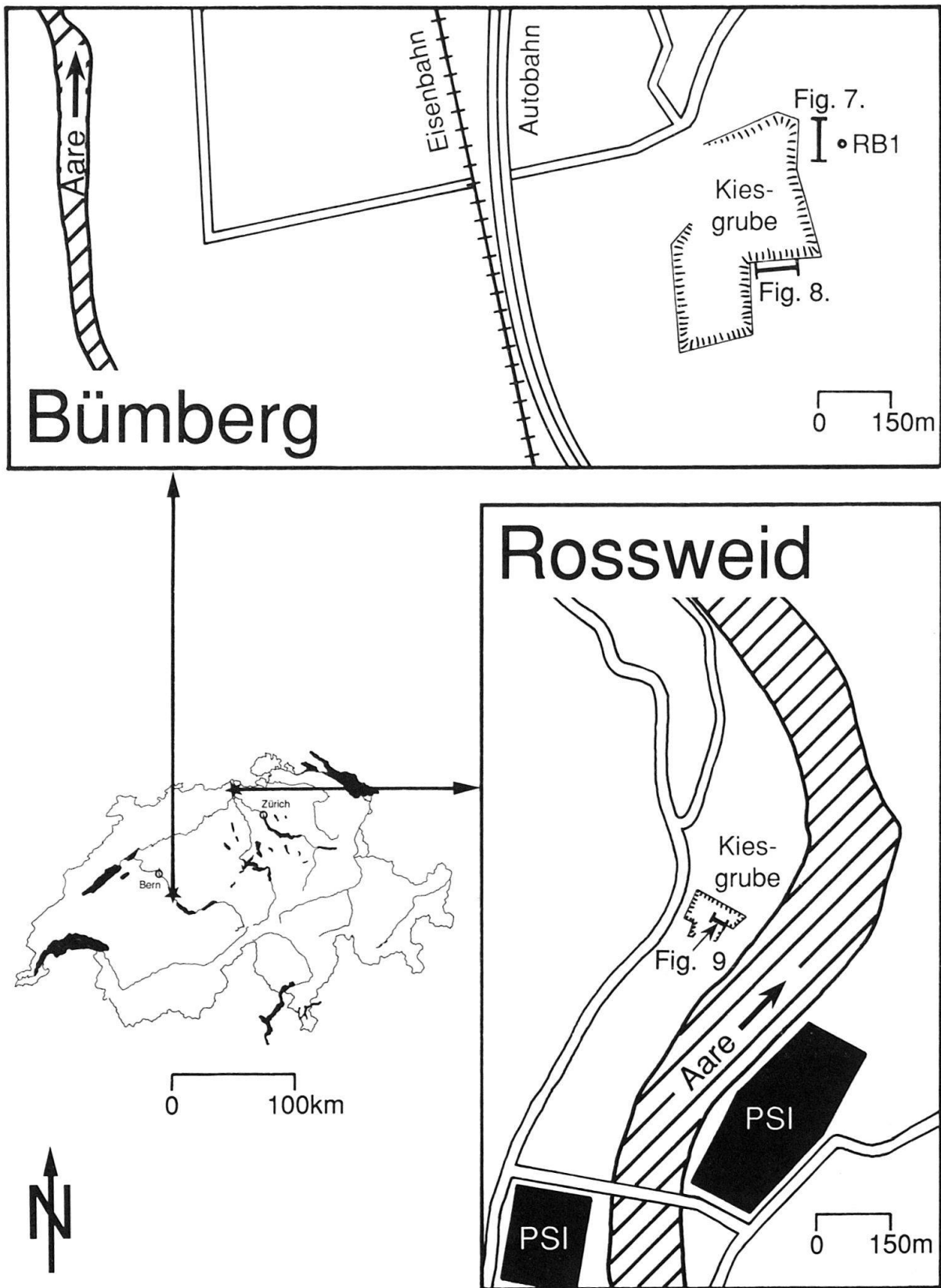


Fig. 6. Karte mit den 2 Lokalitäten wo Georadmessungen ausgeführt wurden und die Lage der Profile (RB1 = Sondierbohrung der KAGA (Kies AG Aaretal) 1979, PSI = Paul Scherrer Institut).

ren. Der am unteren Profilrand liegende verrauschte Bereich zeigt schwache, zum Profilrand parallele Störsignale. Der in Figur 3 verwendete Profilausschnitt stammt von der Mitte des Profils.

– Weil keine Bohrung direkt auf dem Profil lag, wurde eine Tiefenbestimmung an Hyperbelsignaturen gemacht. Beispiele sind in Figure 7 (Interpretation) markiert. Aus den Hyperbeln aller gemessenen Profile ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit von $0,10 \frac{\text{m}}{\text{nsec}}$ für die Grundmoräne und $0,12 \frac{\text{m}}{\text{nsec}}$ für die Schotter. Daraus liessen sich die ungefähren Tiefen abschätzen.

– Die vom Gletscher von Süden her an einen Schotterdrumlin angekleisterte Grundmoräne keilt gegen den höchsten Punkt des Drumlins aus. Die Schotter wurden durch das Eis vorbelastet. Die in der Bohrung RB1 angetroffene Lithologie für die Schotter ist leicht sandiger Kies mit Steinen bis zu einem Durchmesser von 15 Zentimetern welche die Ursache der Diffraktionshyperbeln sein könnten. Im Radarbild ist eine Schichtung schwach erkennbar. Die Eindringtiefe der Radarwellen in den Schottern ist etwa 6 Meter. Die Grenzfläche von Moräne zu Schotter ergibt im Radargramm ein starkes Echo. Als Grenzfläche wurde der erste stark positive (weisse) Wellenbauch interpretiert, da der Übergang von der für die elektromagnetische Welle langsameren Grundmoräne in die schnelleren Schotter für den elektrischen Feldanteil einen positiven Reflexionskoeffizienten ergibt. In der nahe gelegenen Bohrung RB1 wird die Lithologie der Grundmoräne als tonig-siltig-sandiger Kies beschrieben. Die Diffraktionshyperbeln weisen auf vereinzelte Erratiker hin. Durch den Tongehalt der Moräne wird die Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen hier auf etwa 3 Meter vermindert.

Bümburg: Erratiker in Grundmoränenmulde

– Das Profil in Figur 8 wurde quer zur Fließrichtung des Gletschers in etwa 300 Meter Entfernung vom Profil der Figur 7 gemessen. Die Lage ist in Figur 6 angegeben.

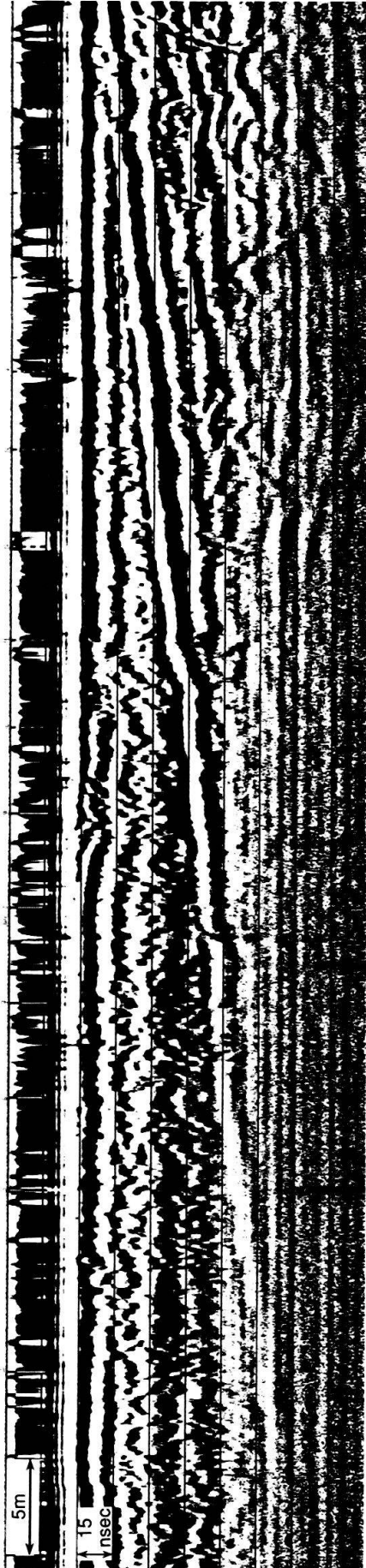
– In der östlichen Hälfte des Radarprofils in Figur 8 ist neben kleineren Hyperbelanzeichen eine grosse und deutliche Überlagerung mehrerer Hyperbelsignaturen zu erkennen. Dieser Profilausschnitt wird in Figur 4 zur Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit verwendet. Diffuse horizontale Reflexionsbänder werden links und rechts durch einen schräg abtauchenden Reflektor abgeschnitten. Unterhalb dieses Reflektors sind die schwarz-weiss Kontraste schärfer.

– Figur 4 zeigt die Tiefenbestimmung am Beispiel der grossen Hyperbeln. Zur Tiefenkalibrierung der Radarsektion wurden die bereits in Figur 7 verwendeten Geschwindigkeiten übernommen.

– Die Interpretation zeigt eine mit Grundmoränenmaterial gefüllte Vertiefung in den Schottern. Wie schon in Figur 7 sind die Reflexionen aus der Grundmoräne von jenen aus den Schottern zu unterscheiden. Für die Moräne typisch ist das Auftreten von Erratikern. Etliche bei der Kiesgewinnung übriggebliebene, ungefähr ein Meter grosse Steine liegen verstreut auf dem Areal. Der mit Georadar mit den grossen Hyperbeln abgebildete, noch in situ liegende Erratiker dürfte von der gleichen Grössenordnung sein.

Bümberg

Radarprofil



Interpretation

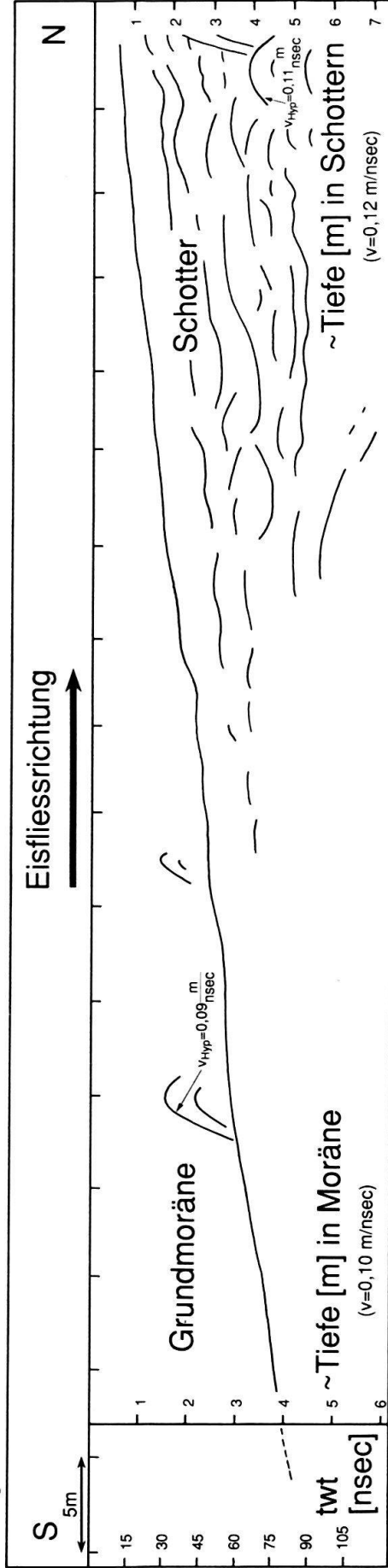
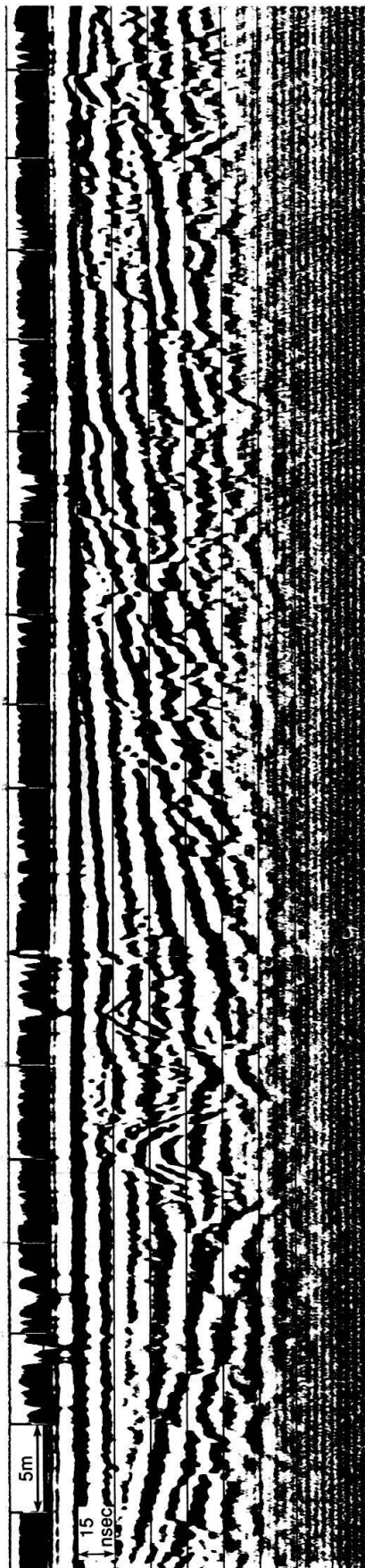


Fig. 7. Radarprofil der Drumlinlandschaft bei Bümberg (Kanton Bern). Das Profil liegt in der Fliessrichtung des ehemaligen Aaregletschers und zeigt wie die Grundmoräne am Schotterdrumlin auskeilt. (100 MHz Antennenpaar, negative Amplituden schwarz, positive Amplituden weiss).

Bümberg

Radarprofil



Interpretation

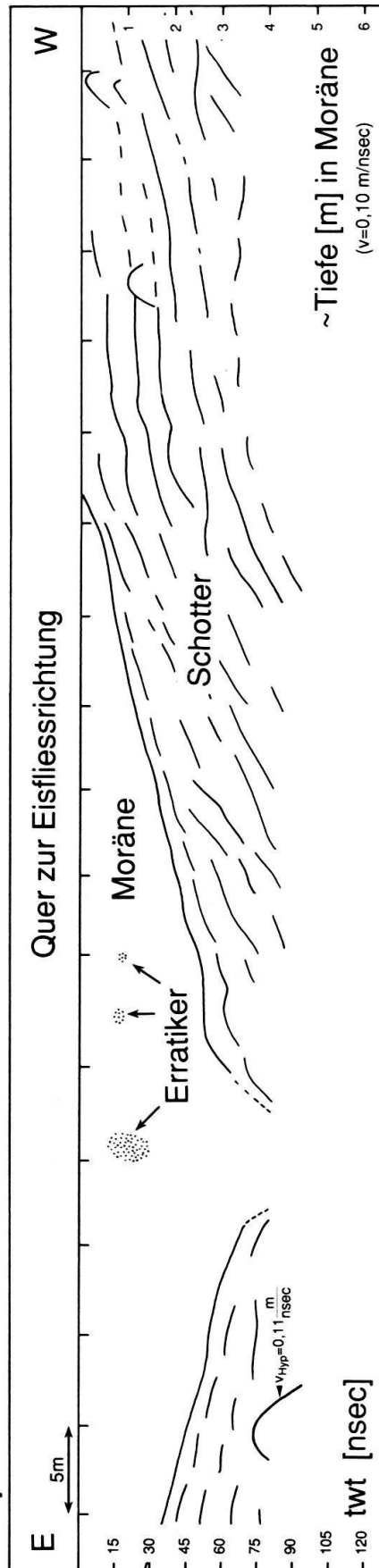


Fig. 8. Radarprofil der Drumlinlandschaft bei Bümberg (Kanton, Bern). Das Profil liegt quer zur Fliessrichtung des ehemaligen Aaregletschers und zeigt eine mit Grundmoräne verfüllte Vertiefung in den Schottern. In der Mitte der Mulde die mögliche Hyperbelsignatur eines grösseren Erratikers. (100 MHz Antennenpaar, negative Amplituden schwarz, positive Amplituden weiss).

Rossweid: Kiesterrasse mit Kreuzschichtung

– Das Messgebiet (Koord.: 659°39'7"/266°02'0"/343) liegt am linken Aareufer in der Nähe des Paul Scherrer Institutes (= PSI in Fig. 6). Es handelt sich um ein bereits teilweise abgebautes Kiesvorkommen in den Niederterrassenschottern. Die Messungen erfolgten in einem Teil der Grube mit abgetragener Deckschicht. Zusätzlich diente eine freigelegte Wand als Aufschluss. Das Profil in Figur 9 wurde auf der Kiesterrasse in etwa 1,5 Meter Abstand zur Kante der aufgeschlossenen Wand gemessen. Der Aufschluss zeigt Lagen von sandigem Kies mit Steinen. Die Gemengeanteile variieren von Schicht zu Schicht. Zwei tonige Kieshorizonte von 10 bis 20 Zentimeter Mächtigkeit sind über den ganzen Aufschluss verfolgbar. Der mergelige Fels befindet sich auf dem Grund des kleinen Sickertümpels am Fuss der Wand.

– Im Radarprofil ist eine Vielzahl von Reflexionen sichtbar. Feinere Reflexionsmuster werden durch Reflexionsbänder, welche über das ganze Profil laufen, in Zonen unterteilt. Die Reflexionsbänder werden mit zunehmender Tiefe breiter, was auf eine dispersionsbedingte stärkere Dämpfung der hohen Frequenzen hinweist.

– Die Geschwindigkeitsanalyse ist Teil der Interpretation. Erster Schritt ist die Identifikation der im Aufschluss erkannten Grenzflächen im Radarprofil. Aus den Schichtmächtigkeiten im Aufschluss und den dazugehörigen Zweiweglaufzeiten im Radarprofil ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit von $0,08 \frac{\text{m}}{\text{nsec}}$ für die Tiefenkalibration des Radarprofils. Die Geschwindigkeiten schwanken zwischen $0,06 \frac{\text{m}}{\text{nsec}}$ bis $0,13 \frac{\text{m}}{\text{nsec}}$ wahrscheinlich auf Grund der variierenden Wassergehalte der Lockergesteine.

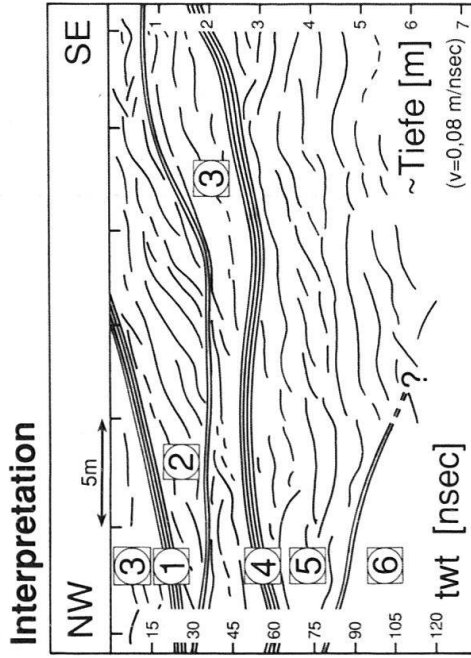
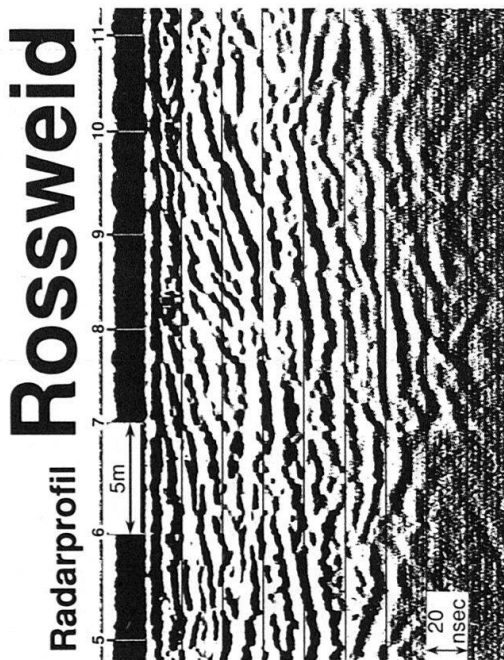
– Die Interpretation des Radarprofils ergibt sich aus dem direkten Vergleich mit dem Aufschluss. Die Kontinuität der Reflektoren lässt sich auf weiteren in einem Netz angeordneten Quer- und Längsprofilen überprüfen. Reflektor ① keilt wie das tonige Kiesband im Aufschluss bei der Profilmarkierung mit der Nummer 8 aus. Die gut sortierten Kiese ② zeigen im Radarprofil Kreuzschichtung. Weil die Radarsektion etwa 2-fach überhöht ist, erscheinen die Strukturen steiler als in Wirklichkeit. Die Trennung zwischen dem gut sortierten Kies mit wenig Sand ② und dem sandigen Kies mit Steinen ③ durchschneidet im Radarprofil alle anderen Reflexionen. ② und ③ sind demnach in 2 verschiedenen Zyklen entstanden. Das zweite tonige Kiesband ④ bildet den Übergang zum reflexionsärmeren Sand mit gerundeten Steinen ⑤. Der Verlauf der Oberkante des Felses ⑥ ist unklar.

Schlussfolgerungen*Ergebnisse der Messungen:*

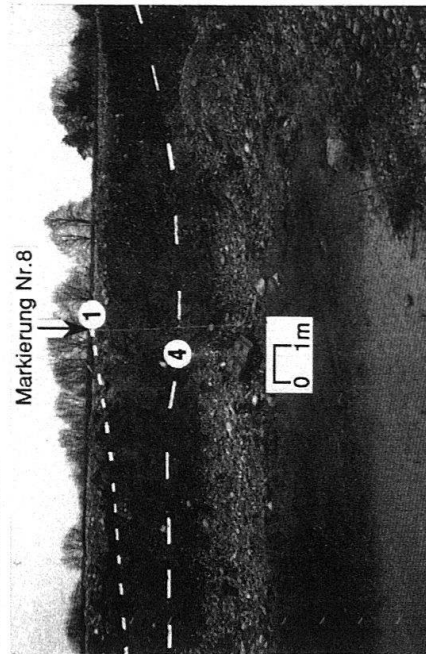
– Georadar erlaubt die zerstörungsfreie Gewinnung von Information über den oberflächennahen Untergrund.

– Die 100-Megahertz-Antenne bietet einen guten Kompromiss zwischen Handlichkeit, Eindringtiefe und Detailauflösung bei Problemstellungen der Quartärgeologie.

– Obwohl keine der Messungen bei idealen Bedingungen, wie zum Beispiel in einem sauberen, trockenen Sand stattfand, ergaben sich Informationen aus leicht tonigen und



Aufschluss



Legende

- ① toniges Kiesband, rot-braun
- ② gut sortierter Kies mit wenig Sand, grau
- ③ sandiger Kies mit Steinen
- ④ toniges Kiesband, hell-braun
- ⑤ Sand mit gerundeten Steinen
- ⑥ Fels

Fig. 9. Radarprofil auf einer Kiesterrasse in der Kiegrube Rossweid (Kanton Aargau). Durch den Vergleich mit dem in 1,5 Meter Abstand parallel liegenden Aufschluss wurde die Interpretation der Reflektoren erleichtert. Im gut sortierten Kies ② ist im Radarprofil eine Kreuzschichtung zu erkennen. (100 MHz Antennenpaar, negative Amplituden schwarz, positive Amplituden weiss).

feuchten Lockergesteinen bis zu einer Tiefe von 7 Metern. Mit dieser Eindringtiefe lassen sich in vielen Fällen Deckschichtprobleme in dem von Moränenmaterial überlagerten Untergrund des schweizerischen Mittellandes lösen.

Verbesserungsmöglichkeiten:

- Eine Vergrößerung der Eindringtiefe in trockenen und tonarmen Materialien durch Ausbau der Sendeleistung ist noch möglich. Von Fall zu Fall sollte mit Testmessungen abgeklärt werden, wo die Tiefengrenze liegt.
- Der günstigste Zeitpunkt für Georadar Messungen ist nach längeren Trockenperioden, oder bei gefrorenem Boden.
- Der Ausbau des Georadarsystems in Richtung digitale Aufzeichnung und Datenverarbeitung auf dem Computer nach ähnlichen Methoden wie in der Seismik würde einige Verbesserungen bringen. Die Korrektur der topografischen Änderungen und eine deutlichere Darstellung der Radarprofile in Farbe würden die Interpretationen erleichtern. Die nachträgliche Optimierung der Verstärkungen und Filter und die Anwendung der aus der Seismik bekannten Verfahren zur Extraktion von mehr Information aus den Daten wäre möglich.

Einsatzmöglichkeiten:

- Am Beispiel der Lockergesteine wird deutlich, dass ein weiter Einsatzbereich für Georadar in der Ingenieurgeologie, Geotechnik und Umwelttechnik besteht. Die Untersuchungen werden zur Zeit vom Autor auf den Fels ausgedehnt.
- Die Übersichtlichkeit der Geräte und die Ähnlichkeiten zu seismischen Verfahren machen Georadar zu einem geeigneten Bestandteil für Studentenpraktika. Erfahrungen sind mit wenig Messaufwand zu sammeln, die Resultate sind rasch verfügbar.

Verdankungen

Die vorliegende Arbeit ist die Zusammenfassung einer am Institut für Ingenieurgeologie an der ETH Zürich ausgeführten Diplomarbeit. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Ch. Schlüchter für die Ermöglichung und Betreuung des Projektes. Den Herren Dr. P. Blümling und Dr. P. Huggenberger sei für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die hilfreichen Ratschläge zur Verbesserung gedankt.

LITERATURVERZEICHNIS

- ALONSO, M. & FINN, E. J. 1977: Physik. Addison-Wesley, Deutschland.
- BERES, M., JR. & HAENI, F. P. 1991: Application of ground-penetrating-radar methods in hydrogeologic studies. Ground Water, J. Assoc. Ground Water Scientists and Engineers. 29, 375–386.
- COOK, J. C. 1975: Radar Transparencies of mine and tunnel rocks. Geophysics 40, 865–885.
- DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. 1989: Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophys. Prospect. 37, 531–551.
- FALK, L., MAGNUSSON, K.-Å., OLSSON, O., AMMANN, M., KEUSEN, H. R. & SATTEL, G. 1988: Analysis of radar measurements performed at the Grimsel rock laboratory in October 1985. Nagra technical report NTB 87–13, Nagra, Baden.
- FORKMANN, B. & PETZHOLD, H. 1989: Prinzip und Anwendung des Gesteinsradars zur Erkundung des Nahbereichs. Freiburger Forschungshefte C 432.

- GRASMÜCK, M. 1991: Georadar – Eine geophysikalische Methode in der angewandten Geologie. Diplomarbeit, ETH Zürich.
- IMAI, T., SKAYAMA, T., & KANEMOREI, T. 1987: Use of ground-probing radar and resistivity surveys for archaeological investigations. *Geophysics* 52, 137–150.
- JOL, H. & SMITH, D. 1991: Ground penetrating radar of northern lacustrine deltas. *Canad. J. Earth Sci.* 28, 1939–1947.
- KAGA (KIES AG AARETAL) 1979: Erweiterung Kiesgrube Bümberg. Bericht der CSD AG, Liebefeld, Bern.
- NIVA, B., OLSSON, O. & BLÜMLING, P. 1988: Grimsel test site – Radar crosshole tomography with application to migration of saline tracer through fracture zones. Nagra technical report NTB 88–31, Nagra, Baden.
- OLSSON, O., FALK, L., FORSLUND, O., LUNDMARK, L. & SANDBERG, E. 1987: Crosshole investigations – results from borehole radar investigations. Nagra technical report NTB 87–32, Nagra, Baden.
- SHERIFF, R. E. 1977: Limitations on resolution of seismic reflections and geologic detail derivable from them. In: *Seismic Stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration* (Ed. by PAYTON, C. E.), Amer. Assoc. Petroleum geologists Mem. 26, 3–14.
- ULRIKSEN, C. P. F. 1982: Application of impulse radar to civil engineering. Dissertation University of Technology, Lund, Sweden.
- VAUGHAN, C. J. 1986: Ground-penetrating radar surveys used in archaeological investigations. *Geophysics* 51, 595–604.
- VON HIPPEL, A. R. 1954a: *Dielectrics and waves*. John Wiley & Sons, New York.
- 1954b: *Dielectric materials and applications*. John Wiley & Sons, New York.
- WIDESS, M. B. 1973: How thin is a thin bed? *Geophysics* 38, 1176–1180.

Manuskript eingereicht am 15. November 1991

Revision akzeptiert am 28. April 1992