



## TECHNIK

Redaktion: Dr. Peter Erni (HB9BWN), Römerstrasse 34, 5400 Baden  
Packet: HB9BWN @ hb9aj Compu Serve: 100602, 1507

### Peilen durch Erde und Fels

Jacques Hurni (HB9OD), Ed. Willstrasse 2, 2560 Nidau

#### Das Problem

Kann man im dreidimensionalen Raum mit Übergängen zwischen Fels, Erde und Luft den Standort eines Markiersenders im Erdinnern durch Peilung ermitteln? Die Frage scheint etwas merkwürdig, hat aber für die Höhlenforschung einige Bedeutung.

- zum Suchen von weiteren Eingängen zu grossen Höhlensystemen am Ende von Vermessungszügen nahe der Erdoberfläche
- zur Kontrolle langer optischer Gangvermessungen von nahen, aber durch Fels getrennten Referenzpunkten
- zum Suchen günstiger Verbindungen zwischen benachbarten, aber noch unverbundenen Höhlen
- zum Ermitteln interessanter Gangverbindungen

und Durchbrüche innerhalb des gleichen Höhlensystems

- zur Richtungskorrektur beim Bohren künstlicher Stollen, beispielsweise zur Umgehung eines wassergefüllten Siphons oder zum Erschliessen besserer Rettungsmöglichkeiten bei Höhlenunfällen.

#### Fern von Spiel und Spass

Ist es die Sache von Funkamateuren, sich diesen Problemen anzunehmen? Nun, es gibt Radioamateure, die auch Höhlenforschung betreiben und Höhlenforscher, die auch Funker und Elektroniker sind, aber nicht so viele, dass sie für die Geräteindustrie zu einem interessanten «Marktsegment» würden. Etwas Pioniergeist für Eigenbau und Feldversuche ist hier also unerlässlich.

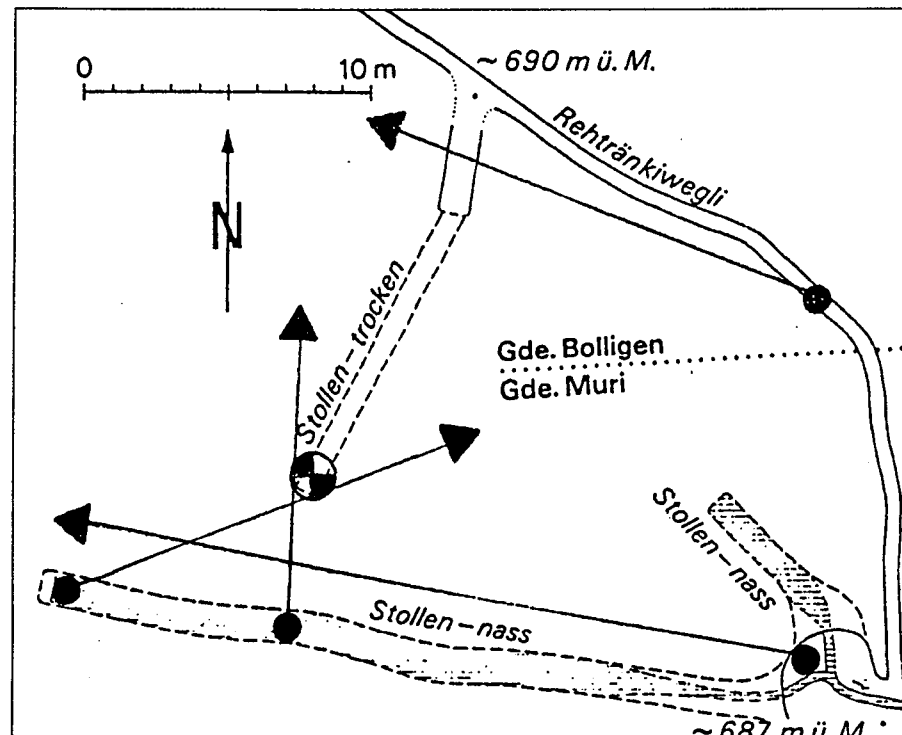


Bild 1: Beispiel einer 1,8 MHz Peilauswertung in zwei Sandsteinstollen am Ostermundigenberg bei Bern. ● Markiersender: mit 1,5m vertikaler Wendelantenne. ● → Peilazimute mit Ferritantenne gemessen.

Bei einigen Kurzwellenamateuren mit Beziehungen zur Höhlenforschung hat dieser Geist schon einige Tradition.

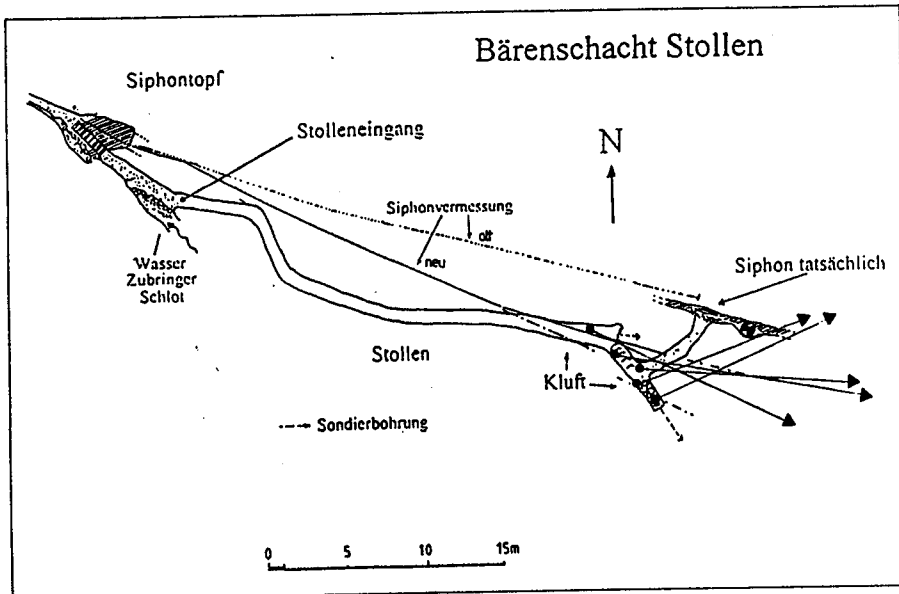
Zum Rettungs- und Forschungsmaterial, das heute der Höhlenforschung in der Schweiz zur Verfügung steht, gehören die von Felix Ziegler, HB9CPZ, entwickelten und gebauten VLF-Erdstromtransceiver für drahtlose Kommunikation durch Erde und Fels über Distanzen bis zu etwa 1000m. Christian Ebi, HB9ZGB, hat die beim Höhlenfunk wirksamen Theorien erprobt und in einem ausführlichen Bericht zusammengefasst [1]. Nachzutragen wäre noch das Ergebnis von Dämpfungsmessungen über zwei Vergleichsstrecken mit verschiedenen Gesteinsarten bei der für Höhlenfunk bevorzugten Frequenz von 46 kHz. Durch 90m Jurakalk und die gleiche Distanz in mehrheitlich hartem Voralpensandstein wurden praktisch identische Dämpfungswerte um 90 dB gemessen (HB9DGV, HB9OD) [2].

Eine erste Anwendung von Kurzwellenpeiltechnik bei der Höhlenforschung ergab sich 1993/94. Beim Muttensee (2446m) im Kanton Glarus gibt es eine mehr als 1000m tief erforschte Schacht-

höhle. Deren Eingang liegt in unwegsamem und unübersichtlichem Gelände. Ein 3,5 MHz-Peilsignal erleichterte den Höhlenforschern die Orientierung auf dem Rückweg zur Schutzhütte, wenn sie bei Nacht, Nebel oder Schneetreiben die Höhle verliessen. Das ist zwar immer noch Freiraumpeilung, hebt sich aber deutlich vom üblichen (Sport)-Peilen unter Funkamateuren ab, und von den Höhlenforschern wird nun vermehrt auch nach den Möglichkeiten zur elektronischen Ortsbestimmung untertags gefragt.

#### 1,8 MHz-Peilversuche in Sandsteinstollen

Versuche, vorerst mit 3,5 und später 1,8 MHz Markiersendern und Peilgeräten im Taubenloch bei Biel, im Eingangsbereich des Hölloches und in Sandsteinstollen am Ostermundigenberg lieferten wenig befriedigende Resultate. Brechungen und Reflexionen der elektromagnetischen Wellen an den Übergängen von Medien mit verschiedenen Dielektrizitätszahlen auf dem Signalweg erzeugten Missweisungen. Noch diffusere Messungen ergaben die Versuche zur vertikalen Ortsbestimmung mit den Ferritantennen der Peilgeräte. Die



**Bild 2:** Die 1,8 MHz-Peilungen im Bärenschachtstollen zur Richtungskorrektur.  $\odot$  Standort des Markiersenders  $\bullet \rightarrow$  Peilrichtungen. 1,5m Vertikalwendel als Sendeantenne. Ferritstabspule zur Richtungspeilung.

gleichen Schwierigkeiten zeigten sich auch beim Verwenden der Barryvox-Lawinensuchgeräte zur genauen Ortsbestimmung im Fels. Immerhin waren die 1,8 MHz-Horizontalpeilungen in zwei Sandsteinstollen am Ostermündigenberg bei sehr kurzen Distanzen und einer vertikalen Wendelantenne am Markiersender einigermassen brauchbar.

#### Bärenschachtpeilungen

In den Jahren 1994/95 arbeitete der Basler Höhlenforscher Werner Janz mit mehreren Helfern an einem künstlichen Stollen im Bärenschacht bei Beatenberg (BE), 600m tief unter dem Eingang. Der Zweck war, eine 40m Siphonstrecke, die stets mit Wasser gefüllt ist, zu umgehen und so die anschliessenden interessanten Höhlenbereiche ohne Tauchgang der Forschung zu erschliessen. Der Tunnelverlauf im glasharten Voralpensandstein stützte sich auf einen neueren Vermessungszug durch den sehr engen Siphon. Ende 1995 hätte der Durchbruch geschehen sollen und tat es nicht. So fragte uns Werner nach elektronischer Hilfe zur Richtungskorrektur. Im November 1995 zwängte sich ein Höhlentaucher mit dem in kleinste Einheiten zerlegten 1,8 MHz Markiersender durch den Siphon und schaltete hinter dem Wasser das Peilsignal an die vertikale Wendelantenne. 4 der 5 Peilungen vom erweiterten Stolleneingang zeigten bei eindeutiger Seitenbestimmung

annähernd in die gleiche Richtung. Da das Azimut des anvisierten Ganges hinter dem Siphon bekannt war, wagte Werner, gestützt auf die Peilungen, bei den weiteren Arbeiten einen Bogen zur Abkürzung, und um die Weihnachtszeit schaffte eine letzte Sprengung den Durchstich. Verschiedene Leute atmeten auf! Das Problem der vertikalen Korrektur stellte sich nicht. Da war man sicher, denn die kommunizierenden Wasserspiegel auf beiden Seiten des Siphons lieferten zentimetergenaue Höhenvergleiche. Heute ist der künstliche Stollen mit einer Metalltür verschlossen. Er soll nur der Höhlenforschung dienen und nicht zu Treckingabenteuern einladen. Ausserdem ist es verpönt, durch Kunstbauten das Klima einer Naturhöhle zu verändern, aber bei Unfällen im hinteren Bereich des Bärenschachtes wäre der Tunnel über der Wasserader die einzige Rettungsmöglichkeit.

#### Die Peilungen am Igluschacht

Der Igluschacht ist ein Gangsystem von etwa 12 km vermessener Länge in einer Höhenlage zwischen 1700 und 2000m über dem Pragelpass (Forschungsgebiet Hölloch-Silber). 10 bis 12 anstrengende Kletterstunden sind nötig, um ans obere Ende zu gelangen, das laut Vermessung sehr nahe der Oberfläche sein müsste. Hier einen neuen Eingang zu finden, würde die weitere Forschung beträchtlich erleichtern und die Rettung

bei einem Unfall in den oberen Gängen überhaupt möglich machen. Aber wo wäre in der Karstwildnis der Silberer der Punkt mit der grössten Annäherung? Gibt es ein elektrisches Verfahren, um diesen Punkt, seine Lage über dem Gangende und den vertikalen Abstand zur Oberfläche genau zu bestimmen? Wir haben es versucht, mit Peilungen im magnetischen Nahfeld eines Markiersenders und einer Arbeitsfrequenz um 1 kHz. Das Verfahren stützt sich auf Empfehlungen englischer Funkamateure und Höhlenforscher.

#### Peiltheorie für das magnetische Nahfeld

Das magnetische Nahfeld einer stromdurchflossenen Ringspule hat eine mathematisch beschreibbare Geometrie. In einer Umgebung ohne ferromagnetische Stoffe mit Permeabilitätszahlen um 1 bleibt diese Geometrie erhalten. Schickt man durch eine solche Spule einen tonfrequenten Wechselstrom, kann das magnetische Streufeld mit einer zweiten Ringspule induktiv nach Stärke und Richtung bestimmt werden. In zwei Schritten lässt sich mit Feldmessungen rückschliessend auch der Ort der Sendespule im dreidimensionalen Raum ermitteln. Eine horizontale Ringspule erzeugt in Aufsicht ein radiales (strahlenförmiges) Feldmuster. In einer vertikalen Messspule wird das stärkste Signal induziert, wenn die Fläche der Spule quer zur Richtung der Feldlinien steht und das schwächste, wenn die Feldlinien die Schmalseite der Spule treffen. Das erlaubt, mit einer Mehrfachpeilung von verschiedenen Annäherungsstandorten, als Schnittpunkt der Messungen den Ort der Sendespule in der Horizontalen zu bestimmen. Um die Position der Sendespule in der Vertikalen zu erhalten, dreht man in einem bestimmten Abstand  $x$  vom Flächennullpunkt die Messspule aus der senkrechten Lage mit Signalmaximum langsam in die Waagrechte, bis sich ein Signalminimum einstellt und misst in dieser Lage den Winkel  $\Theta$  zur Waagrechten. Die nachstehende Gleichung liefert als Ergebnis den Abstand  $d$  der Sendespule unter (oder über) dem Nullpunkt in der Fläche.  $x$  und  $d$  sind Werte in Meter.

$$d = \frac{2 \cdot x}{(\sqrt{9 \cdot \tan^2 \Theta + 8}) - 3 \cdot \tan \Theta}$$

Die Berechnung der Tiefe  $d$  ergibt sich aus der mathematischen Beschreibung des Nahfeldes eines vertikal polarisierten magnetischen Dipols im Raum. Die Gleichung für die magnetische Feldstärke einer flachen Ringspule senkrecht zur Spulenebene lautet:

$$H = \frac{N \cdot I \cdot A}{2 \cdot \pi \cdot d^3}$$

Darin sind  
 $H$  die magnetische Feldstärke in A/m  
 $N$  die Windungszahl der Spule

$I$  der Spulenstrom in A  
 $A$  die Fläche der Spule in  $m^2$   
 $d$  die Distanz von der Spulenebene in m  
 Den Zähler der Gleichung  $N \cdot I \cdot A$  nennt man auch  $M$ , das magnetische Moment. Die Gleichung sagt vor allem aus, dass die magnetische Feldstärke  $H$  sehr rasch, nämlich in der dritten Potenz zum Abstand von der Spulenebene abklingt. Die Signalübertragung erfolgt nicht mit elektromagnetischen Wellen, sondern über magnetische Induktion, ähnlich einem Transformator, aber mit sehr loser Koppelung der Spulen. So folgt denn auch die in der Empfangsspule induzierte Spannung der Gleichung.

$$U = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot N \cdot A \cdot \cos \Theta \cdot \mu \cdot H$$

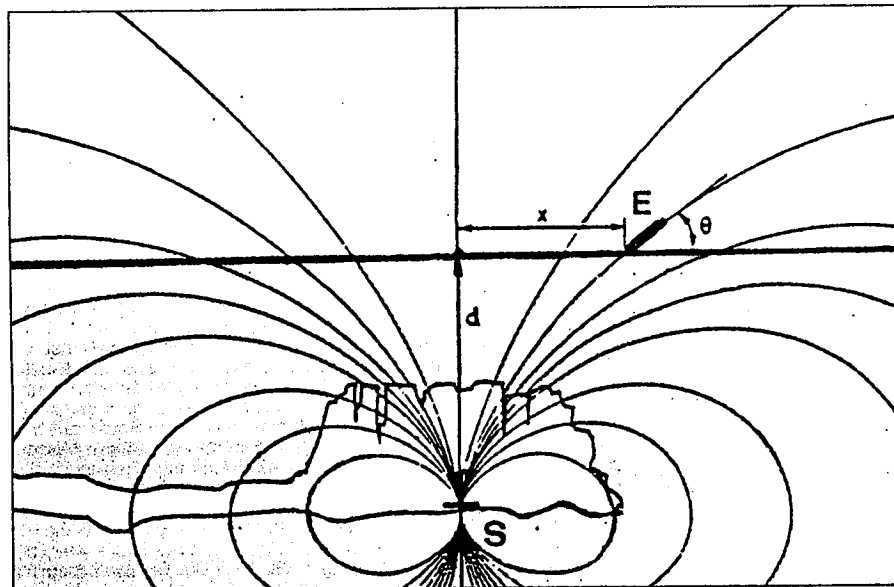
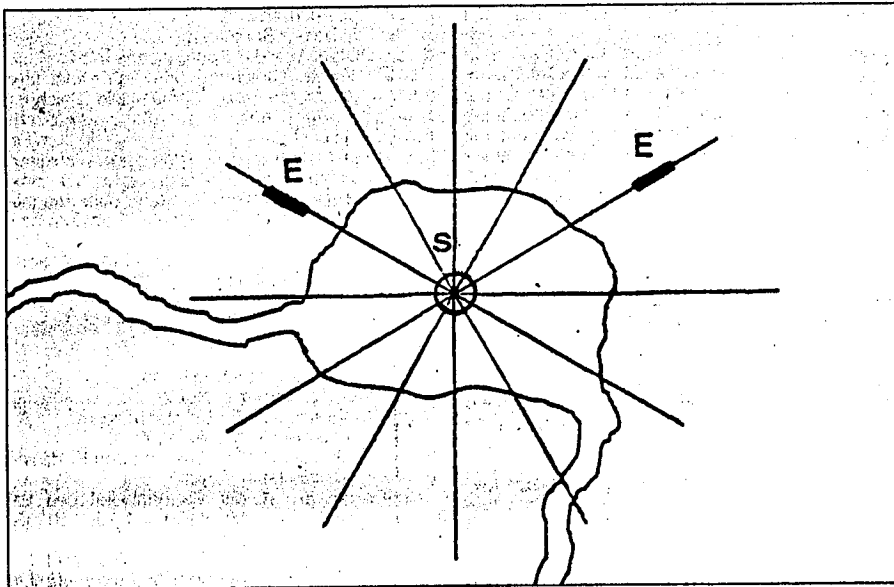
Darin sind

$U$  die induzierte Spannung in Volt  
 $f$  die Arbeitsfrequenz in Hertz  
 $N$  die Windungszahl der Empfangsspule  
 $A$  die Fläche der Ringspule in  $m^2$   
 $\Theta$  der Winkel der Spulenebene zu den Feldlinien  
 $\mu$  die Permeabilität in Vs/Am  
 mit  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ,  $\mu_0$  die Permeabilität des Vakuums ( $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Vs/Am)  
 $\mu_r$  die Permeabilitätszahl (-1 bei nicht ferromagnetischer Umgebung)

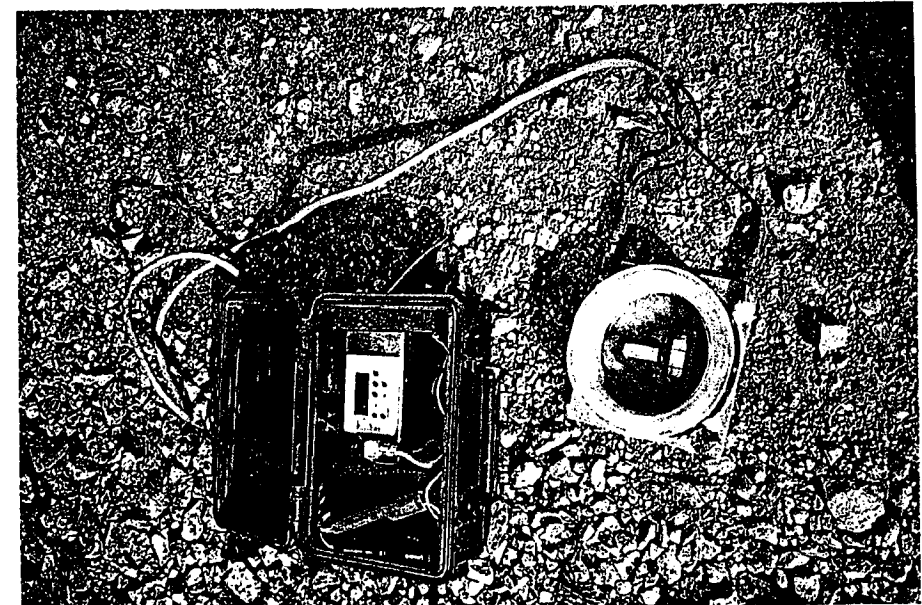
$H$  die magnetische Feldstärke in A/m

#### Markiersender, Empfänger und Antennen

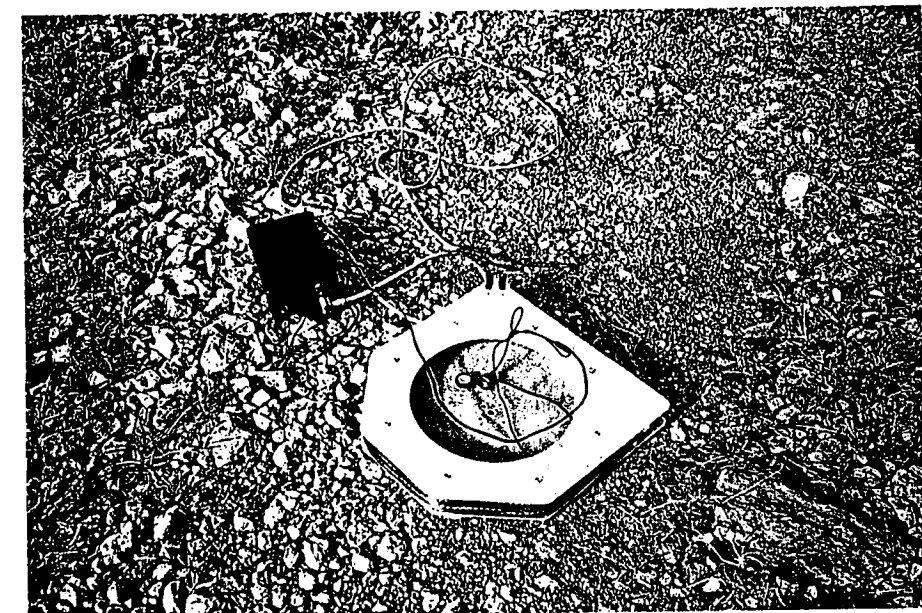
Zur Orts- und Tiefenpeilung über dem Ende des Igluschachtes wurden von Felix Ziegler (HB9CPZ) gebaute Sender, Empfänger und Antennen verwendet. Der Sender arbeitet mit 12 V-Speisung und einer PA-Eingangsleistung von 30 Watt. Die Schaltung enthält einen 5 V-Regler, den Sendechip für 1160 Hz und in der Endstufe einen MOSFET-Leistungstransistor. Mit Schaltuhr, Akku und Antennenspule hat das Sendesystem in einem Kunststoffgehäuse von der Grösse eines Handlexikons Platz. Der Empfänger läuft mit einem rückgekoppelten Eingangsverstärker zur Entdämpfung des Antennenkreises. Es folgt ein NF-Filter und der NF-Verstärker. Der Empfänger hat mit Batterie etwa die Grösse von zwei Streichholzschachteln. Drei Spulenantennen sind verfügbar. Sie können am Sender oder Empfänger angeschlossen werden: Eine 11 cm Spule mit 570 Windungen und einem magnetischen Moment von etwa 9 Am<sup>2</sup> bei 30 Watt Eingangsleistung. Sie wird vorwiegend als Sendeantenne verwendet. Dann eine 21cm Sechseckspule mit 230 Windungen und 12 Am<sup>2</sup>. Die grösste Rahmenantenne ist mit 50 cm quadratisch und erzeugt bei 300 Windungen 64 Am<sup>2</sup>. Die Spulen bilden mit Eigen- und Zusatzkapazitäten auf 1160 Hz abgestimmte Resonanzkreise bei Spulengüten  $Q$  zwischen 13 und 23. Ein am Antennenrahmen angelegter Neigungsmesser, wie er auch zur Höhenvermessung verwendet wird, dient zum Messen der Feldlinienwinkel bei der Tiefenbestimmung.



**Bild 3:** Ortung eines Markiersenders mit Ringspulenantenne S in einem unterirdischen Hohlraum. Die Sendespule erzeugt ein räumliches magnetisches Nahfeld. Mit Empfangsspule E wird zuerst der Nullpunkt senkrecht über der Sendespule gepeilt. Die Tiefe  $d$  lässt sich mit dem Abstand  $x$  zum Nullpunkt und dem Spulenwinkel  $\theta$  zur Horizontalen berechnen. Gepeilt wird in beiden Schritten auf das leichter erkennbare Signalminimum, wenn die Feldlinien die Schmalseite der Empfangsspule treffen und so die kleinste Spannung für den Messempfänger induziert wird.



**Photo 1:** 1160 Hz-Sender mit geöffnetem wasserdichten Kunststoffgehäuse und herausgenommener Spulenantenne. Spulendurchmesser 11 cm.



**Photo 2:** 1160 Hz-Empfänger mit Sechseckspule als Empfangsantenne. Spulendurchmesser 21 cm.



Photo 3: HB9CPZ beim Schnittpunktpeilen über dem Ende des Igluschachtes.



Photo 4: Das Messband zeigt vom ermittelten Flächennullpunkt zur Tiefenmessstelle.

### 3D-Peillpraxis

Im Sommer 1996 wendeten wir das vorstehend beschriebene Peilverfahren zum Ermitteln eines oberen Zuganges in den Iglu-Schacht an. Im Eingangsbereich von zwei kleineren vermessenen Höhlen machten wir die ersten Versuche, um die Genauigkeit des Peilverfahrens zu ermitteln. Der Sender mit der kleinsten Antennenspule (11cm) wurde in die Höhle gesetzt. Die grösste Rahmenantenne (50x50cm) diente zum Empfang. Neigungsmesser, Messband und die in eine handliche Tabelle umgesetzte Formel 1 waren die übrigen Arbeitsgeräte. Ein Serie von 10 Horizontal- und 24 Tiefenpeilungen lieferten als Ergebnis für beide Dimensionen eine Genauigkeit von 5-10% (die Durchschnittswerte der Messserien). Mit den eingesetzten Geräten wurden 40m Abstand zwischen Sender und Empfänger sicher überbrückt. Am folgenden Tag brachten Tony und Markus in 12-stündiger Höhlenklettern das gleiche Sendesystem zum oberen Ende des Iglu-Schachtes. Für den Weg «ausen herum» benötigt man etwa 1 1/2 Stunden! Eine lautstarke Sprechfunkverbindung zu den Höhlengängern bestätigte deren Nähe zur Oberfläche. 3 Horizontalpeilungen ergaben den Punkt senkrecht über dem Sender und 13 Tiefenpeilungen den Durchschnittswert von 22 m. Die zur Richtungs- und Winkelbestimmung ver-

wendeten Signalminimas beim Drehen der Empfangsspule waren sehr scharf und leicht erkennbar. Die Zuverlässigkeit der Horizontalpeilung liess sich durch folgenden Versuch prüfen: Senkrecht über dem Sender darf eine volle Drehung der vertikal gehaltenen Peilantenne keine Veränderung des hier sehr schwachen Signales anzeigen.

### Diskussion

Peilungen im magnetischen Feld eines Tonfrequenzsenders werden durch Kalkgestein kaum verfälscht. Sender und Empfänger sind einfacher als Hochfrequenzgeräte. Die für unsere Peilung aufgewendeten Mittel erschliessen ein Arbeitsfeld mit etwa 50m Kugelradius. Das dürfte für die meisten Fragen nach lokaler Punktbestimmung, wie sie in der Höhlenforschung oft auftreten, genügen. Das hier angewendete Verfahren der magnetischen Peilung wurde von englischen Radioamateuren und Höhlenforschern vorgeschlagen. In England gibt es seit etwa 10 Jahren eine Untergruppe der Funkamateurevereinigung RSGB, die sich sehr intensiv mit «Höhlelektronik» auseinandersetzt. Mike Bedford (G4AEE) hat in den Publikationen [3] und [4] das Verfahren der magnetischen Nahfeldpeilung beschrieben. Wir ste-

hen mit der englischen Gruppe in Erfahrungsaustausch. Die Arbeiten, um von der Oberfläche zum Ende des Igluschachtes vorzustossen, wurden schon am Tag nach der Peilung begonnen.

Zurzeit da diese Zeilen geschrieben werden, gab es noch keinen Durchstich in den Hohlraum. Eine Bestätigung des Peilresultates ist also noch ausstehend.

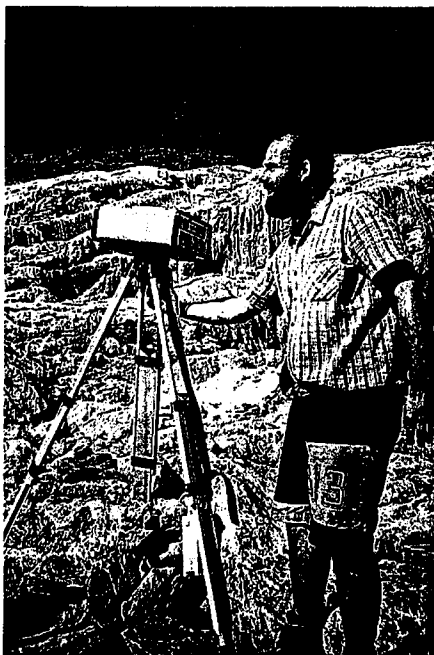
Tiefentabelle für AGH-Peiler auf 1160 Hz

Neigung $\theta$ Gon	2,0m	4,0m	6,0m	8,0m	10,0m	15,0m	20,0m	25,0m	30,0m	40,0m	50,0m
20	1,98	3,97	5,95	7,93	9,92	14,87	19,83	24,79	29,75	39,66	49,85
22	2,05	4,11	6,16	8,22	10,27	15,40	20,54	25,67	30,81	41,08	51,35
24	2,13	4,26	6,38	8,51	10,64	15,96	21,28	26,60	31,92	42,55	53,19
26	2,21	4,41	6,62	8,82	11,03	16,54	22,05	27,56	33,08	44,10	55,13
28	2,29	4,57	6,86	9,15	11,43	17,15	22,86	28,58	34,30	45,73	57,16
30	2,37	4,74	7,12	9,49	11,86	17,79	23,72	29,65	35,58	47,44	59,30
32	2,46	4,92	7,39	9,85	12,31	18,46	24,62	30,77	36,93	49,23	61,54
34	2,56	5,11	7,67	10,23	12,78	19,17	25,57	31,96	38,35	51,13	63,91

Tabelle 1: Ausschnitt der nach Formel 1 errechneten Tabelle zur Tiefenbestimmung. Aus den Neigungswinkeln der Peilantenne und den Distanzen 2-50m zum Punkt senkrecht über dem Sender ergeben sich die Tiefenwerte. Die ganze Tabelle geht von 0-100 Gon (0-90 Grad)



Photo 5: Winkelmessung an der Rahmenantenne zur Tiefenbestimmung des Markiersenders am Ende des Igluschachtes



**Photo 6:** Der genaue Standort, 22m über dem Ende des Igluschachtes wird auch mit einem professionellen GPS-Gerät eingemessen.

#### Literaturhinweise

- [1] Christian Ebi (HB9ZGB), Höhlenfunktechnik, Verlag Arbeitsgemeinschaft Hölllochforschung, Buttikon, 1995.
- [2] Jacques Hurni (HB9OD), Höhlenfunk auf Längswellen, old man 4 und 5, 1995. Ergänzungen zu diesem Bericht: Vergleichsmessungen über je 90m Jurakalk und vorwiegend harten Voralpensandstein ergaben praktisch die gleichen Streckendämpfungen um 90 dB (HB9DGV, HB9OD, 1996).
- [3] Mike Bedford (G4AEE), An Introduction to Radio Location, Cave Radio and Electronic Group Magazine 14, December 1993.
- [4] Mike Bedford (G4AEE), Venturing Underground with VLF Radio, Radio Communication, January 1995.

#### Schlussbemerkungen und Dank

An den im vorstehenden Text beschriebenen Arbeiten beteiligten sich vor allem Angehörige der Arbeitsgemeinschaft Höllloch (AGH) und einige Funkamateure mit den Rufzeichen HB9CPZ, HB9ZGB, HB9DGV, HB9CVH, HB9FMS und HB9SB. Ihnen allen danken wir herzlich. Für weitere Auskünfte und Angaben auch über verfügbare Geräte, wende man sich an Felix Ziegler (HB9CPZ), Christian Ebi (HB9ZGB) oder an den Verfasser dieses Berichtes.