

Funkverbindung aus grossen Naturhöhlen

Jacques Hurni (HB9OD), Willstrasse 2, 2560 Nidau

Zusammenfassung

Mit dem nachstehenden Bericht wird versucht, die Frage zu beantworten, welche drahtlos-elektrischen Verbindungsmöglichkeiten der Amateurfunk auf dem heutigen Stand, der Höhlenforschung anbieten kann. 3 Begehungen im Nidleloch (Weissenstein SO) und 4 im Hölloch (Muotatal SZ) mit Amateurfunkgeräten und Aussenstationen lieferten dazu in den Jahren 1987-89 bemerkenswerte Einsichten. In Laborarbeit konnten auch an Felsproben aus den Höhlendecken die bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen wirksamen Eigenschaften der Kalkgesteine untersucht werden. Einige Erfahrungen im Hölloch mit dem speziell für die drahtlose Höhlenübermittlung entwickelten tonfrequenten System «Speläophon» werden ebenfalls beschrieben.

Anlass und Fragestellung

Funkamateure dürfen im Kurzwellenbereich zwischen 160 und 10m-Wellenlänge (1,8-30 MHz) 9 schmale Bänder für Sendeversuche benützen. Bei Sendeleistungen bis zu 1000 Watt sind Morsegrafie, Telefonie, Bild- und Schriftübertragung zugelassen. Unsere ersten Versuche hatten ergeben, dass sich mit handlichen Sprechfunkgeräten im Ultrakurzwellenbereich durch Naturhöhlen nur in Gangrichtung kurze Distanzen bis zu etwa 80m überbrücken lassen. Die kurzen Wellenzüge scheinen sich in den verwinkelten Gängen und Schächten an hundert Reflexionspunkten schnell totzulaufen und die elektrischen Eigenschaften der meist feuchten Kalkgesteine lassen für Ultrakurzwellen nur Eindringtiefen von wenigen Metern zu. Trotz pessimistischen Prognosen entschloss sich eine Gruppe von Funkamateuren aus der Umgebung von Biel, 1987 aus dem leicht zugänglichen Nidleloch am Weissenstein Sendeversuche im 160m-Band, dem langwelligsten Funkamateurbereich, durchzuführen. Schon beim ersten Ansatz kam hier mit etwa 60 Watt abgestrahlter Leistung eine lautstarke Sprechverbindung durch 300m Kalkgestein zustande. Aus diesem Anfang entwickelte sich eine dreijährige Arbeit mit insgesamt 9 Versuchsreihen im Nidleloch und im Hölloch. In deren Verlauf wurde angestrebt, die nachstehenden Fragen zu beantworten:

A: Ist das 160m-Band (1,8 MHz) verwendbar zur drahtlosen Nachrichtenübermittlung aus Naturhöhlen?

B: Welche Amateurfunkgeräte eignen sich mit Bezug auf Wellenbereich, Leistung, Gewicht, Volumen, Stromverbrauch, Robustheit und Verfügbarkeit zum Betrieb in ausgedehnten Naturhöhlen?

C: Welche Antennensysteme sind bei Höhlen-

und Aussenfunkstelle mit gutem Wirkungsgrad und vernünftigem Aufwand anwendbar?

D: Welche Distanzen können mit diesen Mitteln im Gestein durch sichere Zweiwegverbindungen überbrückt werden?

E: Gibt es brauchbare theoretische Ansätze zum Aufstellen von Verbindungsprognosen über Höhlenfunkstrecken?

F: Welche elektrischen Eigenschaften der Gesteine bestimmen vorwiegend die Dämpfung der Signale auf dem Übertragungsweg?

G: Was lässt sich zu den Erfahrungen mit dem tonfrequenten System für Höhlenübermittlung «Speläophon» aussagen?

H: Welche praktischen Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich aus den gewonnenen Erfahrungen?

A. Eignung und Verwendbarkeit des 160m-Bandes

Bei unseren Versuchen wurden fast ausschliesslich Arbeitsfrequenzen im 160m-Band (1,818 und 1,843 MHz) verwendet. Dazu einige Bemerkungen:

- Es ging vor allem darum, abzuklären, ob sich der Amateurfunk zur Übermittlung bei der Höhlenforschung eignet. Das 160m-Band ist der langwelligste für Kurzwellenamateure zugelassene Frequenzbereich. Es ist bekannt, dass langwellige Signale tiefer ins Erdreich eindringen als Wellen mit höheren Frequenzen und kürzeren Wellenlängen. Ausserdem sind leistungsfähige und kompakte Send- und Empfangsgeräte mit diesem Arbeitsbereich in grosser Zahl auf dem Markt verfügbar (siehe auch Abschnitt B).

- Die Ausdehnung von Antennen mit gutem Wirkungsgrad steht in direkter Beziehung zur verwendeten Wellenlänge. Der klassische Dipol muss zur guten Abstrahlung über eine halbe Wellenlänge gestreckt aufgehängt werden. Grössere Wellenlängen ergeben vor allem für den Betrieb in Höhlen sehr unhandliche Gebilde (siehe auch Abschnitt C).

- T. Wadley (1) hat 1950 bei Versuchen im Quarzit südafrikanischer Goldminen einen zur Wellenausbreitung im Fels bevorzugten Frequenzbereich um 1 MHz (300 m) ermittelt. Es ist ein glücklicher Zufall, dass das 160m-Band recht nahe bei diesem Frequenzabschnitt mit kleinster Dämpfung liegt.

B. Geräte und Stromversorgung

Für die Funkverbindungen zwischen den Höhlen- und Aussenstandorten wurden ausschliesslich die kompakten und von vielen Funkamateuren

betriebenen Sende-Empfänger (Transceiver) japanischer Herkunft verwendet. Als interessantes Gerät erwies sich dabei das Modell YAESU FT-747GX, ein 100 Watt Transceiver mit 0,2 Mikrovolt Empfängerempfindlichkeit, den Abmessungen 240×90×240mm und einem Gewicht von nur 3,3 kg. Das gleiche Gerät überstand auch störungsfrei alle mechanischen und klimatischen Belastungen des Höhlenbetriebes. Zur Stromversorgung diente bei jeder Funkstelle ein geschlossener 12 V Blei-Akkumulator mit 17 Ampèrestunden Kapazität und den Dimensionen 180×80×180mm bei 6,6 kg Gewicht. Damit sind etwa 5 Stunden Sprechfunkbetrieb gesichert. Für die Reihenmessungen H-10–H-22 (Tabelle 1) entwickelte und baute Johann Maurer (HB9CVH) einen Bakensender für 1,843 MHz, der während 2 Messperioden vom Standort Domgang im Hölloch über mehrere Tage mit 10 Watt Sendeleistung ein automatisch getastetes Signal ausstrahlte.

C. Antennensysteme

Zum Abstrahlen der elektromagnetischen Wellen wurden bei den ersten Versuchen im Nidleloch 80m lange Halbwellen-Draht-Dipole verwendet. Es ergaben sich Schwierigkeiten wegen den unhandlichen Längen und dem verstimmenden Einfluss von nahen und feuchten Höhlenwänden. Eine zusammensteckbare quadratische Rahmenantenne mit nur 1m Seitenlänge hatte wegen ihres schlechten Verhältnisses von Strahlungs- zu Verlustwiderstand einen unbefriedigenden Wirkungsgrad mit deutlich schwächeren Signalen im Vergleich zu den Dipolen. Eine gute Lösung des Antennenproblems brachte dann das von Philo Gander (HB9CM) konstruierte Antennensystem mit zwei 17m langen Drahtstrahlern und einem symmetrischen Anpassgerät hoher Güte (2). Der so verkürzte Dipol kann auch bei 20cm Annäherung an die Höhlenwände mit dem Anpassgerät einwandfrei abgestimmt werden und ist für Sendung und Empfang ebenso leistungsfähig wie

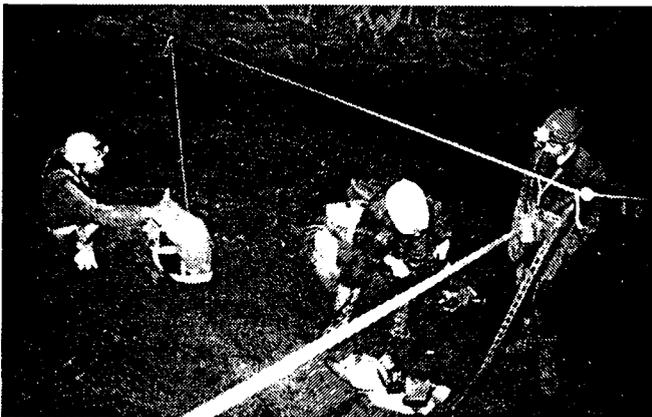


Photo 1: Antennenbau im Titanengang nahe beim Biwak 1. Über 915m zum Eingang 2 war keine Verbindung möglich.

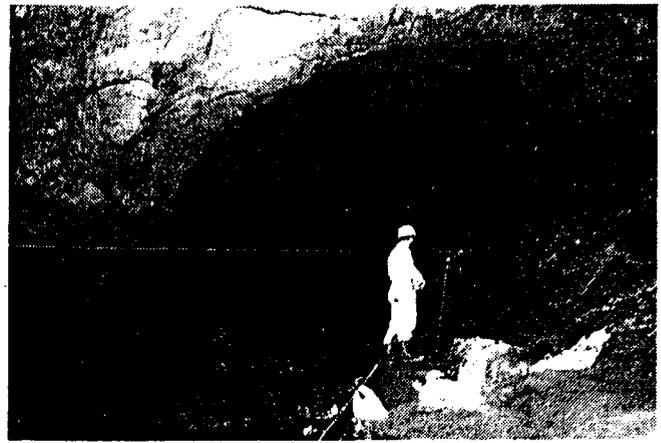


Photo 2: Einrichten des Bakensenders und Antennenbau im Hölloch-Domgang.

ein Halbwelldipol von 2×40m. Bei den Bakenversuchen (H-10) ergab sich für den Empfangsdipol keine bevorzugte Ausrichtung. Ein Drehen der Antenne um 90 Grad aus der Parallelität zum HB9CM-Sendedipol im Domgang brachte keine Veränderung des empfangenen Signales. Mit dem am Boden ausgelegten Dipol war das empfangene Signal um 24 dB schwächer. Die gleiche Lage mit Erdung an beiden Enden des Dipols verminderte das Empfangssignal um weitere 3 dB. In den Schächten der Messstrecke H-10, Eingang 2 – Domgang (440m), sind rund 200m Gefälle mit Drahtseilleitern versehen. Um deren Einfluss als Wellenleiter nachzuprüfen, wurden die Leitern der oberen Schächte eingerollt. Mit und ohne Leitern lieferte der etwa 2m übere Grund aufgehängte Messdipol (die übliche Antennenhöhe bei den Aussenstationen) identische Empfangssignale.

D. Die Verbindungen

Die Daten aller Höhlenverbindungen mit ausreichenden Signalstärken sind in den Tabellen 1 (Hölloch) und 2 (Nidleloch) zusammengefasst. Die Bilder 1 und 2 zeigen in grafischer Darstellung die Ergebnisse der Versuche in beiden Höhlensystemen. Der Dämpfungswert über eine Verbindungsstrecke ist der logarithmische (gehörriichtige) Vergleich der Sendespannung in Volt am 50 Ohm-Lastwiderstand der Antenne mit der Spannung am gleichen Ausgangswiderstand einer identischen Empfangsantenne. Das Spannungsverhältnis entspricht dem Verhältnis der elektrischen Feldstärken (Volt pro Meter) an Sende- und Empfangsantenne. Die 147 Dezibel Dämpfung für die Verbindung H-7 (Styx-Eingang 2) ergibt sich beispielsweise aus 70,7 Volt Sendespannung zu 3,4 Mikrovolt Empfangsspannung. Die Messgrenze liegt bei den verwendeten Geräten um 0,2 Mikrovolt Empfangsspannung. Das ist gleichzeitig auch die für eine sichere Verständigung nötige Signalstärke. **Bei 100 Watt Sendeleistung bedeutet das über die Verbindungsstrecke eine zulässige Dämpfung um 170 Dezibel oder ein**

$3,16 \cdot 10^8$ mal schwächeres Signal am Empfangsort. Ausser bei der Verbindung N-2, wurden zum Verbessern der Messgenauigkeit mittels Laborgeräten für die Leistungs- und Empfangssignalmeter der Transceiver Eichkurven ermittelt und zum Berechnen der Dämpfungen verwendet. Mit diesen Mitteln dürfte eine Endwertgenauigkeit um $\pm 10\%$ erreichbar sein.

Beim Verbindungsversuch H-9, Kanzel-Restaurant Höllgrotten (820m), überdeckte ein starker Industriestörpegel das Höhlensignal. Folgende Höllochversuchsstrecken ergeben keine hör- und messbaren Signale:

Biwak 1 – Eingang 2 (910m)
 Biwak 1 – Restaurant Kreuz (870m)
 Styx – Restaurant Kreuz (1300m)
 Domgang – Fedli 1 (812m), 10 Watt Bakensender
 Domgang – Fedli 2 (554m), 10 Watt Bakensender

Wie stark die lokalen Eigenheiten einer Verbindungsstrecke (Gesteinsart, Schichtung, Feuchtigkeit, Hohlräume) die Wellenausbreitung beeinflussen können, zeigte sich besonders deutlich bei den Bakerversuchen: Das Signal der 10 Watt-Bake im Domgang war beim Aussenmesspunkt Plätsch (H-12) über eine Distanz von 890m noch gut hörbar. Das gleiche Bakensignal konnte am gleichen Tag über die 554m-Strecke Domgang-Fedli 2 im Eigenrauschen des Messempfängers nicht gehört werden. Im ersten Fall begünstigte wohl die ungefähr vertikal zur Messstelle gerichtete Schachtzone die Wellenausbreitung. Dagegen liegt Fedli 2 auf fast gleicher Höhe wie der Domgang querab zu den Schächten. Für die bevorzugte Ausbreitung durch Hohlräume, auch wenn sie enger als $1/10$ der verwendeten Wellenlänge sind, spricht das ausgesprochen starke Signal der Bake am Eingang 2 unmittelbar über der Schachtzone. Der Vergleich H-5 zu H-10 zeigt aber auch, dass eine 70cm hohe Schneedecke bei der Aussenstation die Streckendämpfung nicht vergrösserte.

Mit einer Messserie im Nidleloch wurde auch der Frequenzgang bei je einer Verdoppelung der Sendefrequenz (3,6-7,03-14,03 MHz $\hat{=}$ 80, 40, 20m-Amateurfunkband) untersucht. Genau ausgerichtete HB9CM- und Halbwellendipole und eine vertikale Messstrecke Dillitschkopf-Hauptgang (103m) lieferten die in der Tabelle 2 und in Bild 2 dargestellten Ergebnisse. Danach ergibt das Verdoppeln der Sendefrequenz ein um rund 20 Dezibel schwächeres Signal (10 mal geringere Feldstärke). Es wäre also logisch, tiefere Frequenzen als 1,8 MHz (längere Wellen) zu benutzen. Damit würden aber die Antennen länger oder durch elektrische Verlängerung verlustbehaftet; ausserdem verlässt man dann die für Amateurfunk zugelassenen Bereiche.

E. Streckendämpfung im Fels

Im Verlauf der Versuche tauchte die Frage auf, ob es möglich wäre, die Dämpfung der elektromag-



Photo 3: Der automatisch getastete 10 Watt-Bakensender im Domgang beim Auswechseln der 24 Volt-Speisung für die zweite Messreihe.

netischen Wellen durch eine bestimmte Gesteinschicht im Sinne einer Prognose zu berechnen. Dazu wurde von Wilfred Hirt (HB9SB) aus den Maxwell'schen Feldgleichungen eine mathematische Beziehung abgeleitet. In der Gleichung – sie gilt für ebene Wellen – wird das Gestein als eisenlose (Permeabilität = 1) angenommen.

$$\alpha = 20 \cdot \log \left(\frac{E}{E_0} \right) = 20 \log \left(e^{-\frac{\omega}{c} \cdot \chi \cdot x} \right)$$

mit

$$\chi = \sqrt{\frac{\epsilon}{2} \left[\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \omega} \right)^2 + 1} - 1 \right]}$$

wobei

- α = Streckendämpfung in dB
- E_0 = Elektrische Feldstärke in V/m der Sendean-
tenne gleichgesetzt mit der Sendespan-
nung in V an 50Ω einer angepassten An-
tenne
- E = Elektrische Feldstärke in V/m an der Emp-

7,55867

fangsantenne gleichgesetzt mit der Empfangsspannung in V an 50 Ω bei identischen Sende- und Empfangsantennen

e = Eulersche Zahl ($e = 2.72$)

f = Frequenz in Hz, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

x = Distanz in m

c = Lichtgeschwindigkeit ($c = 2.99 \cdot 10^8$ m/s)

ϵ_r = Relative Dielektrizitätskonstante (frequenzabhängig)

ϵ_0 = Dielektrizitätskonstante des Vakuums ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Farad/m)

σ = Elektrische Leitfähigkeit in Siemens/cm (frequenzabhängig)

χ = Dämpfungsfaktor des Gesteins, die relative Permeabilität μ_r wird mit 1 angenommen (eisenloses Material)

Zum praktischen Gebrauch wurde die Formel als BASIC-Programm notiert. Mit ϵ_r , σ , f und x kann so die Streckendämpfung in Dezibel angenähert berechnet werden.

BASIC-Programm Streckendämpfung

```

10 PRINT:PRINT:PRINT
20 PRINT "Dämpfung des elektrischen Feldes
   im Gestein"
30 PRINT
40 INPUT "Dielektrizitätszahl=";"E
50 INPUT "Leitfähigkeit [SIEMENS/cm]=";"S
60 INPUT "Frequenz [MHz]=";"F
70 INPUT "Distanz [m]=";"D

```

```

80 PRINT
90 REM * Umrechnung Frequenz in [Hz] *
100 F=F*1E6
110 REM * Elektrische Feldkonstante *
120 E0=8.86E-12
130 REM * Winkelgeschwindigkeit *
140 PI=3.1415926
150 W=2*PI*F
160 REM * Lichtgeschwindigkeit *
170 C=2.99E8
180 REM * Umrechnung auf [SIEMENS/m] *
190 S=S*100
200 REM * Leitfähigkeit unter Berücksichtigung
   von E und E0 *
210 K=SQR(E/2*(SQR(((S/(E*E0*W))^2+1)-1)))
220 REM * Verhältnis der elektrischen Felder
   (spannungsbezogen) *
230 V=EXP(-W/C*K*D)
240 REM * Dämpfung in dB *
250 DA=20*LOG10(V)
260 PRINT "Dämpfung=";"DA;" dB"
270 END

```

F. Elektrische Eigenschaften der Gesteine

Zum Berechnen der Dämpfung elektromagnetischer Wellen durch die festen Stoffe Erde und Fels müssen bei vorgegebener Distanz und Frequenz mindestens die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r und die elektrische Leitfähigkeit σ der als eisenlos angenommenen Schicht(en) bekannt

| Verbindung | Datum | von | nach | Distanz D [m] | Dämpfung α [dB] | Elektr. Leitfähigkeit σ bei $\epsilon_r = 10$ [S/cm] |
|------------|----------|---------------|---------------------|---------------|------------------------|---|
| H-1 | 22.10.88 | Kanzel | Pragelstrasse | 263 | 131 | $\cdot 10^{-7}$ |
| H-2 | 22.10.88 | Pragelstrasse | Kanzel | 263 | 142 | 110 |
| H-3 | 22.10.88 | Domgang | Mittlist Weid | 474 | 126 | 120 |
| H-4 | 22.10.88 | Mittlist Weid | Domgang | 474 | 135 | 53 |
| H-5 | 17.12.88 | Domgang | Eingang 2 | 440 | 115 | 57 |
| H-6 | 17.12.88 | Eingang 2 | Domgang | 440 | 112 | 52 |
| H-7 | 17.12.88 | Styx | Eingang 2 | 630 | 147 | 51 |
| H-8 | 17.12.88 | Eingang 2 | Styx | 630 | 159 | 46 |
| H-9 | 22.10.88 | Restaurant HG | Kanzel | 826 | ≥ 170 | 50 |
| H-10 | 6. 8.89 | Domgang | Eingang 2 | 440 | 118 | ≥ 41 |
| H-11 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 1325m | 600 | 153 | 54 |
| H-12 | 7. 8.89 | Domgang | Plätsch 1370m | 890 | ≥ 170 | 51 |
| H-13 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 1 | 670 | ≥ 170 | ≥ 37 |
| H-14 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 2 | 630 | 153 | ≥ 50 |
| H-15 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 3 | 590 | 147 | 48 |
| H-16 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 4 | 500 | 139 | 50 |
| H-17 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 5 | 430 | 136 | 55 |
| H-18 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 6 | 400 | 136 | 64 |
| H-19 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 7 | 390 | 136 | 70 |
| H-20 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 8 | 480 | 147 | 72 |
| H-21 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 9 | 520 | ≥ 170 | 62 |
| H-22 | 7. 8.89 | Domgang | Mittlist Weid 10 | 560 | ≥ 170 | ≥ 65 |
| | | | | | | ≥ 60 |

Tabelle 1: Streckendämpfung und elektrische Leitfähigkeit von verschiedenen Verbindungen im Hölloch. Die Sendefrequenz betrug bei allen Messungen 1.8 MHz.

| Verbindung | Datum | von | nach | Distanz D [m] | Dämpfung α [dB] | Elektr. Leitfähigkeit σ bei $\epsilon_r = 12$ [S/cm] | Frequenz [MHz] |
|------------|----------|---------------|---------------|---------------|------------------------|---|----------------|
| N-1 | 24. 5.87 | Truggang | Restaurant HW | 300 | 155.0 | 10^{-7} 110 | 1.843 |
| N-2 | 3. 7.88 | Märchengang | Schilterwald | 130 | 120.0 | 250 | 1.843 |
| N-3 | 3. 7.88 | Märchengang | Restaurant HW | 410 | ≥ 170.0 | ≥ 93 | 1.843 |
| N-4 | 18.11.89 | Hauptgang | Dillitschkopf | 103 | 100.9 | 270 | 1.843 |
| N-5 | 18.11.89 | Dillitschkopf | Hauptgang | 103 | 110.5 | 310 | 1.843 |
| N-6 | 18.11.89 | Hauptgang | Dillitschkopf | 103 | 122.8 | | 3.600 |
| N-7 | 18.11.89 | Dillitschkopf | Hauptgang | 103 | 131.7 | | 3.600 |
| N-8 | 18.11.89 | Hauptgang | Dillitschkopf | 103 | 138.0 | | 7.030 |
| N-9 | 18.11.89 | Dillitschkopf | Hauptgang | 103 | 146.4 | | 7.030 |
| N-10 | 18.11.89 | Dillitschkopf | Hauptgang | 103 | ≥ 170.0 | | 14.030 |

Tabelle 2: Streckendämpfung und elektrische Leitfähigkeit von verschiedenen Verbindungen im Nidleloch.

sein. In der durchgesehenen Literatur waren für Kalkgesteine diese Werte nicht zu finden. Mit einem professionellen Messgerätesatz wurden darum an der Ingenieurschule Biel (J.P. Hirschi, HB9CXL, D. Schmid) bei 13 Gesteinsproben aus den Höhlendecken die zum Bestimmen dieser Gesteinseigenschaften nötigen Kapazitäten und Widerstände gemessen.

Die **relative Dielektrizitätskonstante** ϵ_r ist der Faktor, um den sich die vom elektrischen Feld erzeugte Ladung im untersuchten Stoff gegenüber der Ladung im Vakuum ($\epsilon_r = 1$) vergrössert. Grössere ϵ_r -Werte der Stoffe ergeben geringere Wellendämpfung.

Die **elektrische Leitfähigkeit** σ eines Gesteins ist der Kehrwert des elektrischen Widerstandes in Siemens/cm bei 1cm² Querschnitt für ein bestimmtes Material. Gute Leitfähigkeit der Gesteine verursacht eine grössere Dämpfung der elektromagnetischen Wellen.

Die Ergebnisse der Messungen an den Gesteinsproben sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Für P-17 und P-26 wurden zudem die Messreihen zu tieferen Frequenzen als 1,8 MHz weitergeführt (Tabelle 3 unten).

Für Marmor, ebenfalls ein Kalkgestein (metamorpher Kalkspat) findet man in der Literatur Dielektrizitätskonstanten zwischen 8.4 und 14 und Leitfähigkeiten zwischen 10^{-5} und 10^{-6} S/cm, also ähnliche Werte, wie bei den untersuchten Kalkgesteinen. Die Ergebnisse der Gesteinsuntersuchungen lassen folgende Überlegungen zu:

- Die Kalke der Höhlengebiete haben unterschiedliche elektrische Eigenschaften, unter anderem für 1,8 MHz
Dielektrizitätskonstanten ϵ_r zwischen 6.5 und 18.2
Leitfähigkeiten σ zwischen $86.0 \cdot 10^{-7}$ und $2.0 \cdot 10^{-7}$ S/cm
- Bei allen Gesteinsproben zeigte sich eine deutliche Frequenzabhängigkeit der ϵ_r - und σ -Werte. Höhere Frequenzen ergaben ausnahmslos kleinere Dielektrizitätskonstanten und grössere Leitfähigkeiten. Beide Tendenzen erzeugen mit

steigender Frequenz eine grössere Dämpfung für elektromagnetische Wellen.

- Als Vergleich zu den Messungen an den Gesteinsproben wurden mit $\epsilon_r = 12$ (Nidleloch) und 10 (Hölloch) über die ermittelten Verbindungs-dämpfungen die Leitfähigkeiten der ganzen Strecken zurückgerechnet und in den Tabellen 1 und 2 eingetragen. Allgemein sind die so ermittelten Leitfähigkeiten etwas grösser als der Durchschnitt aus den Messungen an den Gesteinsproben. In den Erd- und Felsschichten der Höhlengebiete gibt es beträchtliche stehende und fliessende Wassermengen, welche wohl die Leitfähigkeit einer Verbindungsstrecke vergrössern und eine höhere Dämpfung verursachen.
- Zum Prüfen des Einflusses von Feuchtigkeit auf die elektrischen Eigenschaften der Gesteine wurden die Proben P-2 und P-20 mehrere Stunden in Wasser eingelegt und dann gegen Verdunstung versiegelt. Beim Vergleich mit den ähnlichen «trockenen» Gesteinsproben P-1, P-3, P-19, P-23 fällt nur die deutlich niedrigere Dielektrizitätszahl von P-2 auf, während die Leitfähigkeit der befeuchteten Gesteine entgegen den Erwartungen eher tiefer ist als die der trockenen. Die Eindringtiefe von Wasser in die kompakten und meist feinkörnigen Kalksedimente muss also nicht sehr gross sein.

G. Das Speläophon, ein drahtloses Übermittlungssystem für die Höhlenforschung

Am 7. Nationalen Kongress der Schweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung (Schwyz 24.-26. September 1982) wurde von Edouard Marmillod ein von Jacques Duperrex entwickeltes System für drahtlose Nachrichtenübermittlung durch Erde und Fels vorgestellt. Mit dem «Speläophon» ist es möglich, durch 400-500m Kalkgestein drahtlos zu sprechen oder zu telegrafieren. Das System besteht aus zwei tragbaren, 5 kg schweren, batteriegespiessenen Sender-Empfängern. An der Erdoberfläche wird das eine Gerät an zwei in 150m Abstand geerdete Elektroden an-

| Probe | Gestein | relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r [-] | | | | Elektrische Leitfähigkeit σ [S/cm] | | | |
|-------|----------------------|--|---------|---------|---------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | bei der Frequenz | | | | bei der Frequenz | | | |
| | | 1.8 MHz | 3.6 MHz | 5.4 MHz | 7.2 MHz | 1.8 MHz | 3.6 MHz | 5.4 MHz | 7.2 MHz |
| P- 1 | Jurakalk | 15.7 | 14.4 | 13.5 | 13.0 | $\cdot 10^{-7}$ | $\cdot 10^{-7}$ | $\cdot 10^{-7}$ | $\cdot 10^{-7}$ |
| P- 2 | Jurakalk feucht | 6.6 | 6.3 | 6.1 | 5.9 | 51.0 | 68.0 | 95.0 | 110.0 |
| P- 3 | Jurakalk | 13.9 | 12.6 | 11.9 | 11.5 | 17.0 | 24.0 | 35.0 | 41.0 |
| P-15 | Schrattenkalk | 8.1 | 8.1 | 8.0 | 7.9 | 47.0 | 63.0 | 84.0 | 100.0 |
| P-16 | Gurschellakalk | 7.3 | 6.8 | 6.6 | 6.5 | 2.0 | 2.2 | 3.3 | 4.0 |
| P-17 | Seewerkalk | 11.8 | 11.0 | 10.6 | 10.3 | 9.0 | 12.0 | 19.0 | 25.0 |
| P-18 | Burgenkalk | 18.2 | 14.9 | 13.3 | 12.3 | 23.0 | 37.0 | 50.0 | 60.0 |
| P-19 | Schrattenkalk | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.1 | 86.0 | 140.0 | 190.0 | 220.0 |
| P-20 | Schrattenkalk feucht | 7.8 | 7.7 | 7.7 | 7.7 | 3.3 | 5.0 | 7.2 | 8.1 |
| P-23 | Schrattenkalk | 7.8 | 7.4 | 7.3 | 7.3 | 2.3 | 2.8 | 3.1 | 4.8 |
| P-25 | Seewerkalk | 10.6 | 10.3 | 10.0 | 9.9 | 5.0 | 7.4 | 9.8 | 12.0 |
| P-26 | Seewerkalk | 13.1 | 12.1 | 11.5 | 11.1 | 11.0 | 17.0 | 24.0 | 30.0 |
| P-27 | Schrattenkalk | 6.5 | 8.5 | 8.5 | 8.4 | 38.0 | 58.0 | 76.0 | 90.0 |
| | | 10 kHz | 100 kHz | 500 kHz | 1 MHz | 10 kHz | 100 kHz | 500 kHz | 1 MHz |
| P-17 | Seewerkalk | 89.0 | 18.9 | 13.0 | 12.6 | $\cdot 10^{-7}$ | $\cdot 10^{-7}$ | $\cdot 10^{-7}$ | $\cdot 10^{-7}$ |
| P-26 | Seewerkalk | 195.0 | 28.0 | 16.0 | 15.0 | 5.0 | 9.0 | 12.0 | 20.0 |
| | | | | | | 8.0 | 13.0 | 21.0 | 29.0 |

Tabelle 3: Elektrische Eigenschaften von Kalkgesteinsproben bei verschiedenen Frequenzen.

geschlossen. Das Höhlengerät erfordert 2 Elektroden in 30m Abstand. Sprache oder Telegrafiesignale werden im Tonfrequenzband 6000 bis 9000 Hz mit 10 Watt Sendeleistung über die Erd Elektroden durch Erde oder Fels zur Gegenstation gesendet. Mit den eingebauten aufladbaren Batterien kann 1 Stunde gesendet und 3 Stunden empfangen werden.

Im Sendeteil der Geräte wird durch Mischung eines tonfrequenten Trägers von 9 kHz mit Sprachfrequenzen des Mikrofons oder einem 800 Hz Telegrafieton ein Einseitenbandsignal mit einer Bandbreite von 6000 bis 9000 Hz erzeugt. Dieses Signal wird auf 10 Watt Leistung verstärkt und über isolierte Drähte 2 Erdelektroden zugeführt. Die Metallelektroden lassen im Erdinnern tonfre-

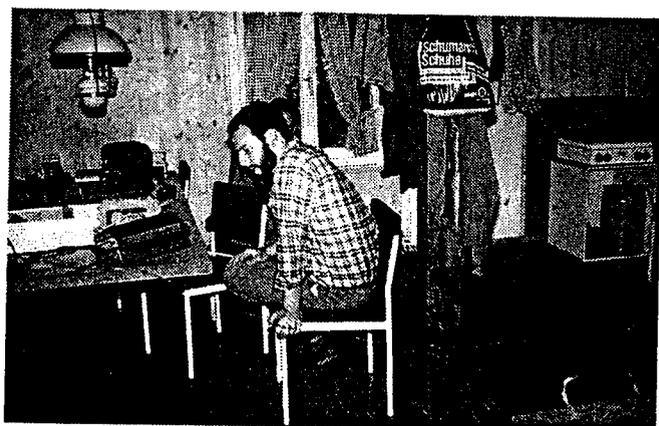


Photo 4: Felix Ziegler (HB9CPZ) am Transceiver (hier als Messempfänger) in der Schutzhütte über dem Hocheingang beim Abhören des starken Signales vom Bakensender 440m tiefer im Domgang.

quente elektrische Ströme fließen, die mit zunehmendem Abstand von den Elektroden schwächer werden. Die Elektroden des Empfangsgerätes greifen auf diesen Strömen analoge Spannungen ab (Bruchteile von Mikrovolt in 400m Abstand). Die Signale werden im Empfänger gefiltert, verstärkt, durch Demodulation wieder in den Sprachfrequenzbereich 300-3000 Hz zurückgeführt und durch nochmalige Verstärkung im Lautsprecher hörbar gemacht. Mit einem Stufenschalter kann die zur optimalen Leistungsabgabe nötige Anpassung des Senderausgangswiderstandes an den unsicheren Erdwiderstand zwischen den Elektroden vorgenommen werden. Störsignale durch fremde Erdströme können am Aussengerät durch Empfang über eine dritte Mittelelektrode kompensiert und merkbar gedämpft werden.

Bei verschiedenen Versuchen wurden mit diesem System Sprechverbindungen durch 300m (Vercors, Binocle) und 452m (Faustloch) Kalkgestein hergestellt. Die Versuche im Hölloch ergaben ähnliche Resultate. Einwandfreie Zweiwegverbindungen kamen von der Kanzel zur Prugelstrasse (263m) und vom Domgang zum Eingang 2 (440m) zustande. Styx-Eingang 2 (630m) ergab in der Höhle ein gutes Signal aber bei E2 keinen Empfang. Riesensaal-E2 (553m) ergab in der Höhle ebenfalls ein gutes Signal. In Gegenrichtung war aber nur äusserst mühsamer Telegrafiebtrieb möglich. Bei diesen zwei Verbindungen überdeckte vor allem der starke Oberflächenstörpegel das Höhlensignal, das wegen dem geringeren Elektrodenabstand in der Höhle an sich wohl schon etwas schwächer ankam. Erstaunlich war auch der hohe Störanteil in der Höhle, der wohl



Photo 5: Messpunkt Plätsch. Die Distanz zum Bakensender im Domgang ist 890m. Bei unseren Versuchen war dies die grösste überbrückte Distanz mit nur 10 Watt Sendeleistung bei der Bake.

auf dauernde Ladungsverschiebungen durch tropfendes und rinnendes Wasser zurückzuführen ist. Bei einer Verschiebung der Höhlenstation näher zum aktiven Wasserdome zeigte sich ein deutlicher Anstieg des Störpegels und der Impulsdichte. Nach unseren Erfahrungen ist das System auch weniger empfindlich auf verschobene Einspeisestrecken zwischen Aussen- und Höhlenstation als theoretisch zu erwarten ist. Zwei Speläophone gehören heute zum Rettungsmaterial der Schweizerischen Gesellschaft für Höhlenforschung.

H. Praktische Anwendung der beschriebenen Übermittlungssysteme

Drahtlose Übermittlung in Naturhöhlen könnte bei folgenden Anlässen nützlich sein:

- Rettungen
- Medizinische Beratung bei Krankheiten und Unfällen in der Höhle
- Anfordern von Material und Nahrungsmitteln bei Forschungsarbeiten
- Übertragen und schnelles Auswerten von Forschungsdaten

- Kontakt zu Angehörigen bei längeren Höhlenaufenthalten
 - Direktreportagen aus tiefen Höhlenbereichen
- In solchen Fällen ist bis zu **Übermittlungsdistanzen um 400m** das **Speläophon** das geeignetere Mittel. Gewicht und Volumen sind kleiner als beim Amateurfunk, das Setzen der Erdelektroden ist einfacher als der Antennenbau. Ausserdem ist das Höhlengerät tauchfähig. Für **Distanzen bis zu 700m** bietet der **Amateurfunk** mehr Sicherheit, vor allem, wenn mit der vollen möglichen Leistung von 100 Watt gearbeitet wird. Für die Höhlenbegehung kann das Funkmaterial mit je 4-6 kg auf 3 Personen verteilt werden (Sender und Anpassgerät / 17 Ah-Akku für etwa 5 Stunden Betrieb / Antennenmaterial). Auch bei ausgedehnten und tiefen Höhlensystemen dürften Aussenstandorte zu finden sein, die nicht mehr als 700m von der Höhlenfunkstelle entfernt sind. Ist der Aussenstandort abgelegen, bietet der Amateurfunk heute kompakte und leistungsfähige Sprechfunkgeräte für die Verbindung zu besiedelten Bereichen mit Telefonanschlüssen an. Die

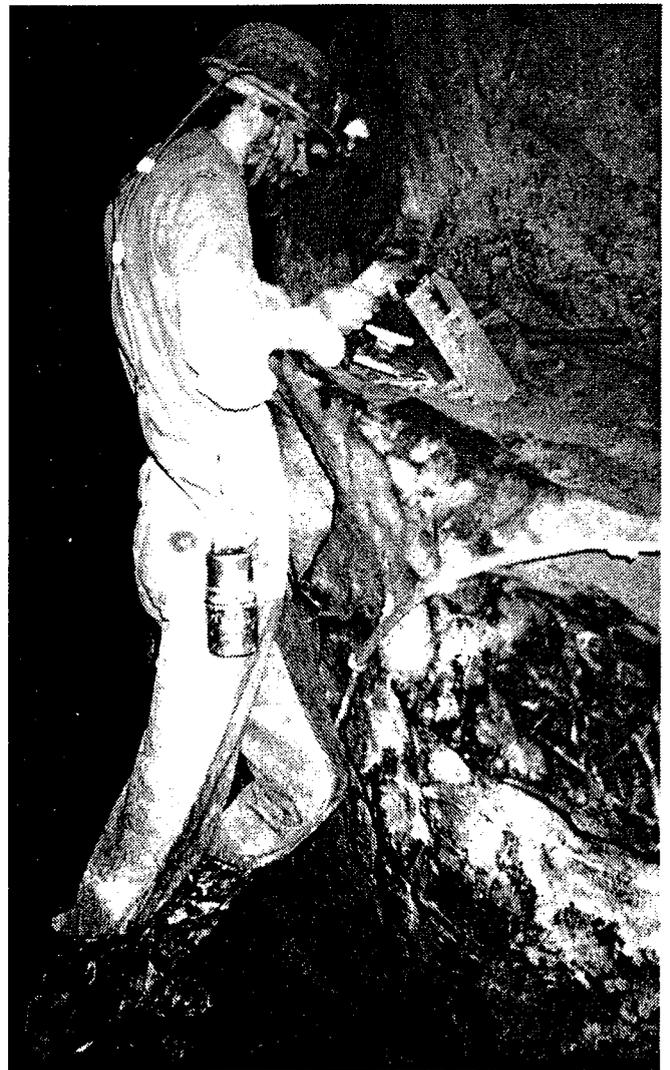
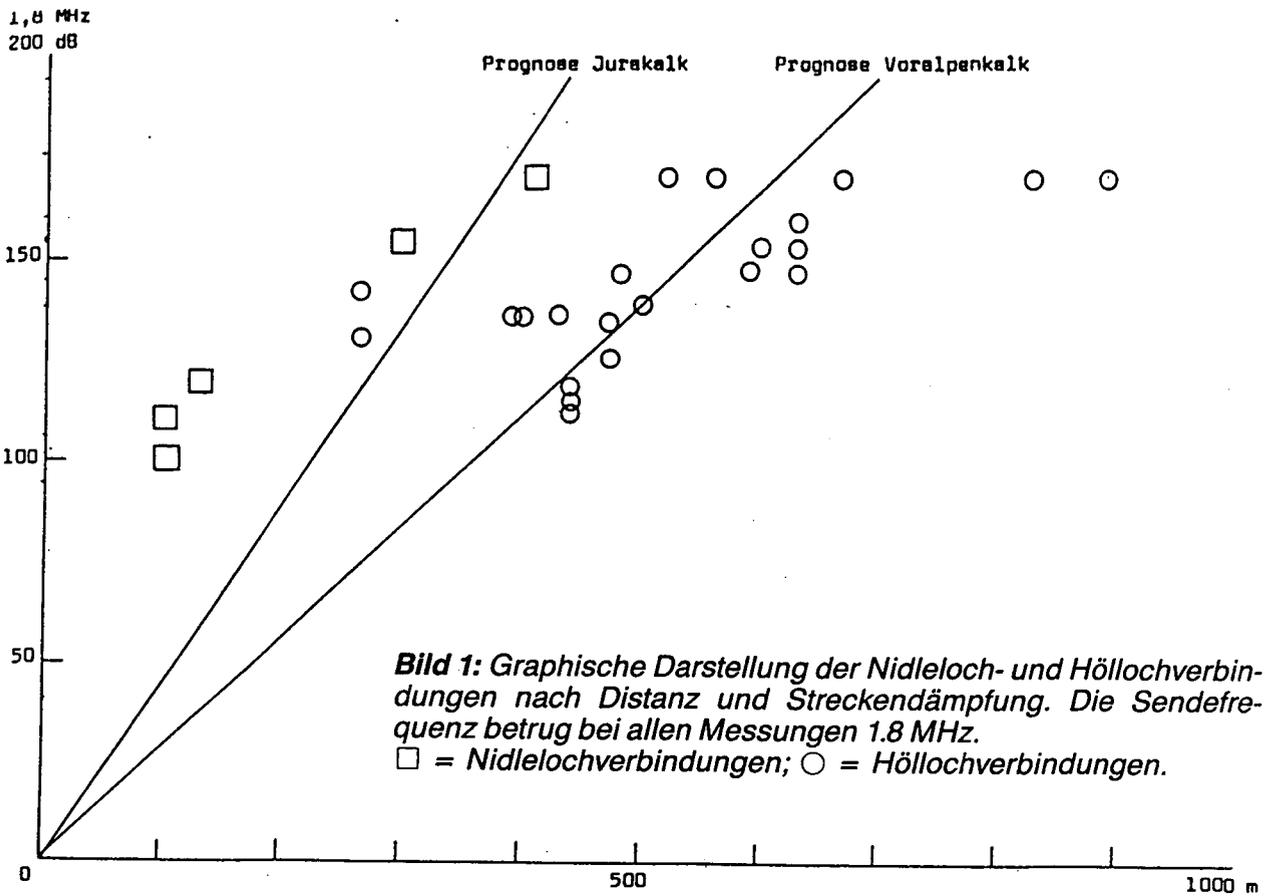


Photo 6: Daniel Burkhalter bei der Verbindung Wasserdome-Eingang 2 (450m) mit dem tonfrequenten Übermittlungssystem «Speläophon».



Antennenstrahler (2x17m) sollten in der Höhle isoliert und ohne Felsberührung festgemacht werden können. Für die Aussenantenne genügen 1.5m Antennenhöhe über dem Grund. Der Sendeleistung und dem Antennenaufwand sind bei der Höhlenstation Grenzen gesetzt. Unter schwierigen Verhältnissen könnten aber bei der Aussenstation längere Antennen verwendet werden, z.B. Dipole mit 1.5 facher Wellenlänge (2x120m für 1.8 MHz). Das ergibt in Sende- und Empfangsrichtung stärkere Signale, bei der Aussenstation unter

Umständen aber auch einen höheren Stör- und Rauschpegel. Ein Abschätzen der Verbindungsmöglichkeiten bei 1.8 MHz ist nach Tabelle 3 möglich. Von der zu überbrückenden Distanz gelangt man über eine der Leitfähigkeitsgeraden zu einem dB-Wert. Liegt dieser unter 170 dB «müsste» die Verbindung mit 100 W abgestrahlter Leistung zustandekommen. Wo auf ganz sichere und schnell eingerichtete Verbindungen Wert gelegt wird, ist es sinnvoll, in einem Höhlensystem durch Vorversuche ein Netz von brauchbaren Verbindungsstrecken zu ermitteln. Für Höhlenübermittlung geeignete Amateurfunkgeräte und Antennensysteme stehen beim Verfasser dieses Beitrages zur Verfügung.

Schluss: old man 3/91

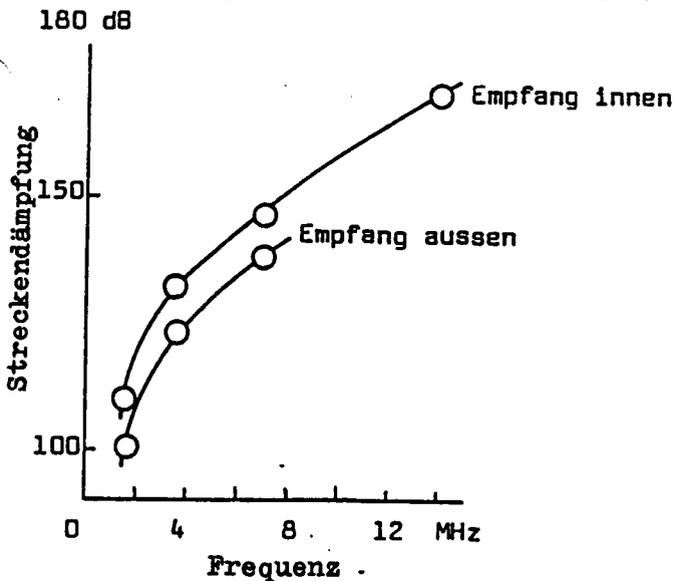


Bild 2: Graphische Darstellung der Nidlelochverbindungen nach Frequenz und Streckendämpfung. Die Distanz betrug 103m.

Korrektur zum Artikel «Ein Laderegler für Solaranlagen» im old man 11/90

In der Abgleichanweisung für den Laderegler hat sich leider ein Fehler eingeschlichen. Bevor der 2. Schritt der Abgleichanweisung durchgeführt werden kann (Einstellen des Trimmers P1) muss der Widerstand R_{13} überbrückt werden.

Anstelle des Lastwiderstandes kann zum Abgleich auch ein Akku an den Ausgang des Ladereglers angeschlossen werden, dann erübrigt sich das Kurzschliessen des Widerstandes R_{13} .



Funkverbindung aus grossen Naturhöhlen

Jacques Hurni (HB9OD), Willstrasse 2, 2560 Nidau

Fortsetzung aus old man 2/91

An den Versuchen beteiligte Gruppen und Personen

Die vorstehenden Ausführungen stützen sich auf die Zusammenarbeit vieler Personen aus den Interessengruppen Amateurfunk und Höhlenforschung. Felix, Werner, Guido und Erwin trugen bei den Höhlenbegehungen nicht nur die Sorge um unsere Sicherheit, sondern oft auch beachtliches Funkgepäck auf dem Rücken. Philo Gander löste für uns das Antennenproblem und der Bakensender von Johann Maurer überstand 5 Monate Aufenthalt im Domgang des Höllochs ohne Schaden und Störung. Die sorgfältige Laborarbeit von Jean Pierre Hirschi, Daniel Schmid und Paul Bieri an der Ingenieurschule Biel erschloss uns die elektrischen Eigenschaften der Höhengesteine. Unter der Regie von Max Moor entstand ein Videostreifen zum Höhlenfunk. Eine Hilfe besonderer Art war die grosse Zuvorkommenheit der Familie Suter im Restaurant Höllgrotten. Die Rufzeichenliste der Amateurfunker, über deren Freizeit, Wissen und Material wir verfügen durften, mag darauf hinweisen, wie viel Arbeit und Hilfsbereitschaft in diesem Bericht unerwähnt blieben: HB9CM, HB9TH, HB9SB, HB9CVH, HB9BYB, HB9BDH, HB9CPZ, HB9SUN, HB9SXV, HE9UPE, HB9AYQ, HB9DBQ, HE9EFY, HB9BRH, HE9QXN, HB9MYV, HB9SF, HB9AXT, HB9MHX, HB9RRH, HB9KM, HB9CXL (†) und OM Abeyà.

Schlussbemerkungen

Der Bedarf an drahtlosen Verbindungen aus Naturhöhlen dürfte nicht allzu gross sein. Wer ernsthaft oder spielerisch Höhlenforschung betreibt, möchte sich oft für eine Weile von den Farcen und Banalitäten des Alltags absetzen. Die Nabelschnur einer Funkverbindung zur Aussenwelt entwertet das Abenteuer und ist wahrscheinlich nur in Ausnahme- oder Notsituationen gefragt. Unsere Sendeversuche in den Höhlengebieten des Juras und der Voralpen waren auch mit prägenden Naturerfahrungen verbunden. Wir bemerkten, dass die Karstwildnis des Bödmerenwaldes fast ebenso schwierig zu begehen ist, wie die verschwiegenen Zonen unter seinen Wurzeln. Im Rauschen der Höhlenbäche und Höhlenwinde vermischten sich Gefahrensignale und Orientierungshilfen. Die fallenden Tropfenschleier im

Wasserdome des Höllochs verwandelten sich im Licht unserer Lampen zu aufglühenden Sternkaskaden. Dem weniger Geübten wurde der Aufstieg durch die Schächte zum hochgelegenen zweiten Eingang bei geflutetem Syphonbereich zur Grenzerfahrung. Beim Hochklettern durch die Windungen des Innominata-Schlauches ergaben sich Gedankenverbindungen zu den Gestalten lebender Organismen, und wenn wir uns durch die Profile enger Mäanderrisse zwängten, berührten wir die fraktale Geometrie der Natur mit ihrer undurchschaubaren Zahl veränderlicher Grössen. Technik, Naturwissenschaft und Grenzerlebnisse vereinigten sich beim Versuch, unsere Fesseln als Gefangene in Platons Höhlengleichnis etwas zu lockern.

Anmerkungen

- (1) Die Dämpfungskurven von T. Wadley sind mit weiteren aufschlussreichen Angaben in einem Artikel von B.A. Austin «Radio communication through rock», ELECTRONICS + WIRELESS WORLD (GB) vol. 93, p. 943-6 (1987) zu finden.
- (2) Philo Gander hat im old man 7/8 1989, dem Organ der Union Schweizerischer Kurzwellenamateure, das in den Höhlen verwendete Antennensystem ausführlich beschrieben.

Weitere Literaturangaben

Baden Fuller A.J., Mikrowellen, Braunschweig 1974; Kuchling H., Taschenbuch der Physik, Thun und Frankfurt 1988; Schröder H., Elektrische Nachrichtentechnik, Berlin 1959; Hirt Rudolf, Drahtlose Telegrafie – einmal ganz anders, old man 6/1988.

Kontest Software HAM III

Dieses leistungsfähige Kontestprogramm für KW- und UKW-Konteste ist erstmals 1986 erfolgreich als «HAM I» UKW-Kontestprogramm eingesetzt worden. Viele Kontester haben dazu beigetragen, dass daraus das umfassendste Kontestprogramm für MS-DOS Computer entstanden ist. Die Bedienung ist einfach und dank Fenstertechnik sehr übersichtlich. In einer Parameter Datei werden beim erstmaligen Benutzen alle Stationsangaben und die persönlichen Wünsche an die Darstellung festgehalten.

⚡ Entwicklung eines drahtlosen Uebermittlungssystems ⚡
fuer Hoellochverhaeltnisse

Vorbemerkung

Die Idee, aus einer Hoehle eine Verbindung zur Aussenwelt zu erstellen, existiert schon lange. Die meisten Projekte, welche eine groessere Distanz zu ueberwinden vermochten, hatten Funkfrequenzen von einigen Kilohertz und liegen somit im Tonbereich.

Cave Radios aus England und den Vereinigten Staaten lagen bei Frequenzen von 3-4 kHz, das 1982 von der SGH/SSS vorgestellte Spelaeophon bei einer Traegerfrequenz von 9 kHz.

In diesen Frequenzbereichen sind jedoch atmosphaerisches Rauschen und Stoerimpulse sehr stark und erschweren den Empfang der sowieso schon schwachen Signale.

Wieso ein eigenes System ?

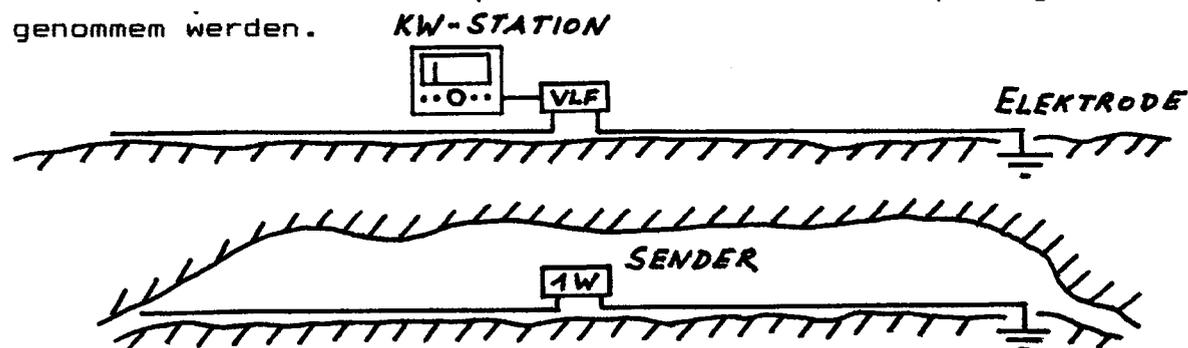
In Zusammenhang mit den Kurzwellenfunkversuchen, wurde von Felix Ziegler und Jaques Hurni auch das Spelaeophon ausprobiert. Das hohe Gewicht, das grosse Volumen und vorallem die fuer das Hoelloch zu knappen Leistungen und technischen Moeglichkeiten, bewogen Felix Ziegler und Christian Ebi sich an die Entwicklung eines massgeschneiderten Geraetes zu wagen.

Messungen zur Wahl der Uebertragungstechnik

Zur Dimensionierung der Senderendstufe mussten wir selber Messungen mit self-made Einrichtungen machen, da ueber solche "Funkgeraete" praktisch keine Literatur zu finden ist.

Die Messungen im Juli und September 1990 bezogen sich immer noch auf ein SGH/SSS-kompatibles Geraet. Je mehr Unterlagen zusammenkamen und technische Grundueberlegungen gemacht wurden, desto staerker kamen wir zum Schluss, dass eine geeignetere Frequenz und eine andere Uebermittlungsart gesucht werden muss.

Bald entstanden eigene Sender auf 81,9 kHz und 40,9 kHz und Felix besorgte einen VLF-Konverter, welcher die tiefen Frequenzen auf das 80 m Amateurfunkband (3,5 MHz) hinaufmischt und dann mit dem sehr empfindlichen Kurzwellenempfaenger aufgenommen werden.



Mit dieser Versuchsanordnung wurden insgesamt an vier Wochenenden verschiedene Versuche unternommen:

- Sender 1 Watt bei Kanzel, Empfang unterhalb Fedli
- Erster Empfang im Biwak 1 mit einer Sendeleistung von 1 Watt
Der Sender stand zwischen Schluecht und Gschwaendeigen auf der Oberflaeche, rund 600 m oberhalb vom B1.
- Sender 1 Watt im B1, verschiedene Empfangsversuche auf der Oberflaeche, diesmal mit einem kleinen Empfaenger der Marke Ziegler.
- Neuer Sender mit 10 Watt (1 Watt reichte ins B1 !) steht mit kleinem Empfaenger, Telegraphist Felix und mfa Erwin in der Hoehle, waehrend draussen (an der Sonne) der kleine Sender, der grosse Empfaenger, Telegraphist Tom und die mfa Guido und Christian sind. Erste Zweiwegverbindung mit diesem System und Erfolg auf den ruhigeren 40.9 kHz.

Stand der Entwicklung

Es bestehen zwei 1 Watt Testsender (Felix, Erwin) und 10 Watt Sender (Christian) mit Telegraphiemoeglichkeit, alle Eigenbau. Zum Empfang besteht die KW-Station mit dem VLF-Konverter und der selbstgebaute Empfaenger von Felix.

Dazu bereits Ordner mit diversen Unterlagen und Schemata, die auf Verwirklichung warten...

Fuer einen Notfall koennte aber bereits eine Verbindung in und aus einer Hoehle mit akzeptablem Aufwand gebaut werden.

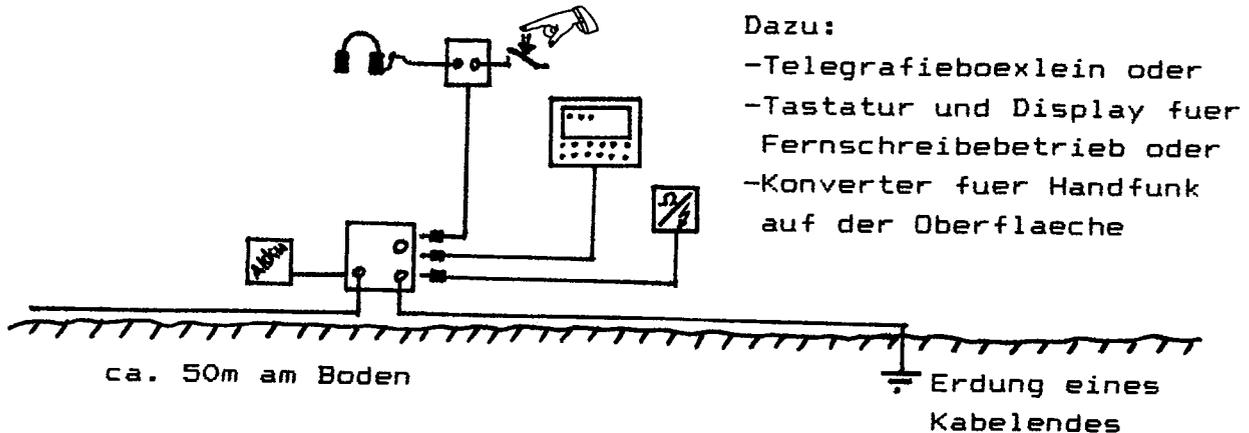
Das Projekt SPELECOM

Schlussendlich werden wir uns auf die folgende Loesung festlegen:

- Kein Sprechfunk, da dies eine unzureichende Verbindung durch einige mehrere hundert Meter Fels ermoeglicht, wie dies bei uns der Fall ist (groessere Bandbreite->mehr Rauschen->hohe Sendeleistung und sehr aufwendige Filtergruppen).
- Das System soll auf dem Prinzip der Fernschreiber basieren. Die eingetippten Zeichen werden in einen Code gewandelt, der dann seriell durch den Fels uebertragen wird.
- Die Sende/Empfangsfrequenz wird auf 47 kHz gelegt.

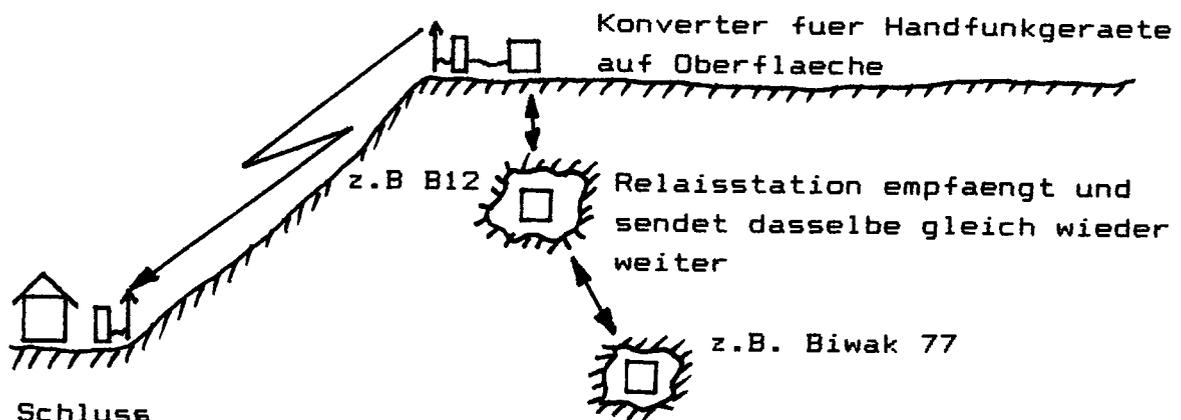
- Der Akku soll nicht, wie im Spelaophon, eingebaut werden. Je nach Einsatz koennen unterschiedlich grosse Akkus mitgeschleppt werden (auch muss so nicht das ganze Geraet aus der Hoehle gebracht werden, um es wieder zu laden...).
- Modularer Aufbau je nach Verhaeltnissen:

Uebermittlungsbox in wasserdichtem Gehaeuse mit Sender und Empfaenger



- Weitere Vorteile und Moeglichkeiten:

- * von jedermann bedienbar
- * ev. Protokollmoeglichkeit mit Drucker
- * Moeglichkeit von Relaisstationen



Zum Schluss

Bis zur Fertigstellung wird es bestimmt noch einige Monate dauern.

Beteiligt an der ganzen Sache waren Jaques Hurni, Wilfried Hirt, Markus Werner, Tom Eppensteiner, Erwin Tschuemperlin, Guido Wild, Felix Ziegler, Christian Ebi
Infos bei Felix, Christian, Guido

Christian Ebi