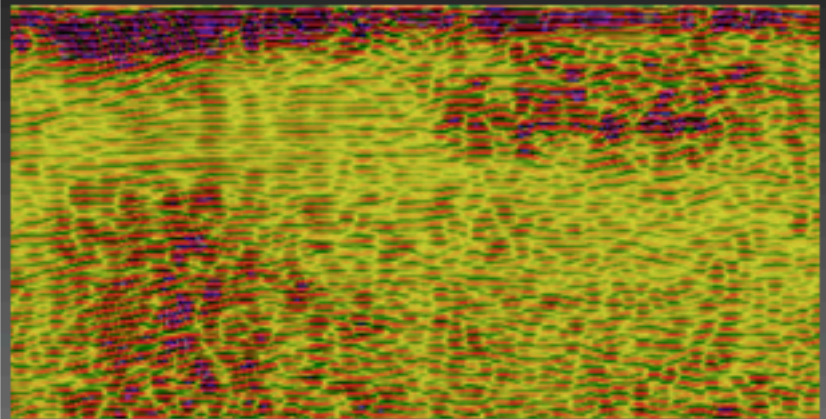
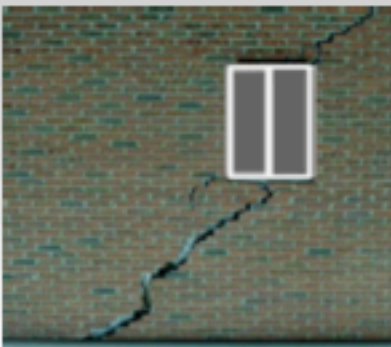
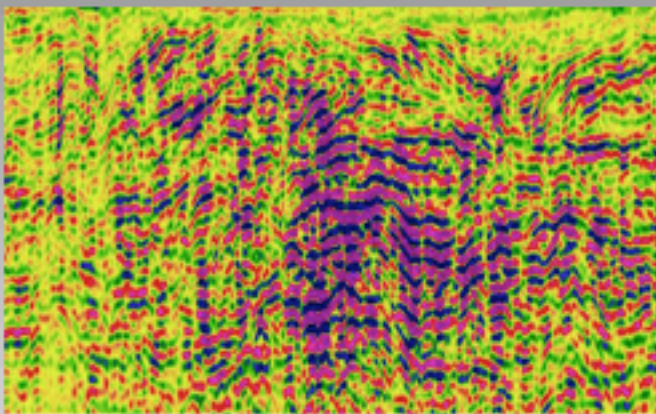


Bergschäden Geophysik Bodenradar



von Prof. Dr. Dr. habil Kord Ernstson
für



VORWORT



Ohne Bewegung der Erdoberfläche gibt es keine Schäden an Häusern und anderen Einrichtungen an der Erdoberfläche. Gibt es Bewegung, Senkung, Hebung, Torsion, konkave oder konvexe Wölbung o.a., so bleibt das nicht folgenlos. Schäden sind fast unabwendbar.

Tritt der Steinkohlen- oder Salz- oder Braunkohlenbergbau als Verursacher auf, sind es die „Bergschäden“, die so manche Immobilie heftigst geschädigt hat und noch immer tut. Andererseits ist natürlich nicht jeder Schaden an einem Haus durch Bergbau verursacht. Für die Beurteilung, ob ein Schaden also durch Bergbau verursacht ist oder zumindest sein kann, ist daher die genaue Untersuchung der Oberfläche unabdingbar.

Vielfach hat man in der Vergangenheit an den Ecken der Häuser Bolzen angebracht und die relative Lage zueinander ermittelt. Durch spätere Nachmessungen sind dann zumindest relative Höhenveränderungen (Schieflagen) feststellbar. Gleichmäßige Absenkungen sind – wie auch Torsionen und Wölbungen – nicht oder kaum feststellbar. Die so gern vom Bergbauunternehmen geäußerte Feststellung, dass gleichmäßige Absenkungen oder sogar Schieflagen nicht schadensrelevant sind, verkennen, dass die „neuen“ Lagen der Immobilien in der Regel nicht gleichmäßig zustande gekommen sind. So wurde vielfach kolportiert, dass ein Haus im Zentrum eines Steinkohlenabbaus einfach wie im Fahrstuhl abgesenkt wird. Inzwischen ist aber von allen Seiten anerkannt, dass beim Abbau die Senkung sich wie eine Welle an der Oberfläche auswirkt und das Objekt dort regelrecht „durchwinkt“ wird und sehr wohl Schäden erleidet, häufig sogar heftiger als im Randbereich eines Abbaus.

Der Salzbergbau hat jahrzehntelang behauptet, durch ihn würden überhaupt keine Schäden entstehen; im Braunkohlentagebau werden Schäden häufig nur dann als Bergschäden anerkannt, wenn in unter dem Objekt „bewegungsaktive“ Störungen oder sogenannte „Torflinsen“ vorhanden sind. Letztere schrumpfen bei Wasserverlust, wodurch dann Hohlräume und Bewegungen an der Oberfläche entstehen.

Für die Anerkennung als Bergschaden ist die Untersuchung der Oberfläche wie auch der tagesnahen Erdschichten daher eminent wichtig. Neben der o.g. Verbolzung der Gebäude werden zur Untersuchung des Untergrundes häufig Bohrungen oder Rammkernsondierungen eingesetzt, die dann punktuell Aussagen zulassen. Unklar ist dabei immer, ob man mit dem gewählten Punkt der Bohrung die entsprechende Unstetigkeit im Untergrund getroffen hat. Unter den Gebäuden sind diese Methoden überhaupt nicht möglich.

Hier kommt nun das im folgenden vorgestellte Verfahren des „Bodenradar“ im Rahmen geophysikalischer Messungen ins Spiel. Auf Anregung der Bürgerinitiative Rheinische Initiative Bergschaden e.V. (RIBS) konnte der Landesverband den renommierten Wissenschaftler Prof. Dr. Dr. habil Kord Ernstson gewinnen, das Verfahren für ein breiteres Publikum aufzubereiten. Prof. Ernstson zeigt auf, wie mit überschaubaren finanziellen Mitteln der Untergrund um eine, sogar unter einer Immobilie soweit untersucht werden kann, dass die bergbauliche Einwirkung auf das Haus so nahe liegend ist, dass eine Anerkennung als Bergschaden vom Bergbauunternehmer kaum noch verwehrt werden kann.

Der Geophysiker und Geologe Kord Ernstson ist außerplanmäßiger Professor an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg.

Bergschäden - Geophysik - Bodenradar

Zusammenfassende Einführung

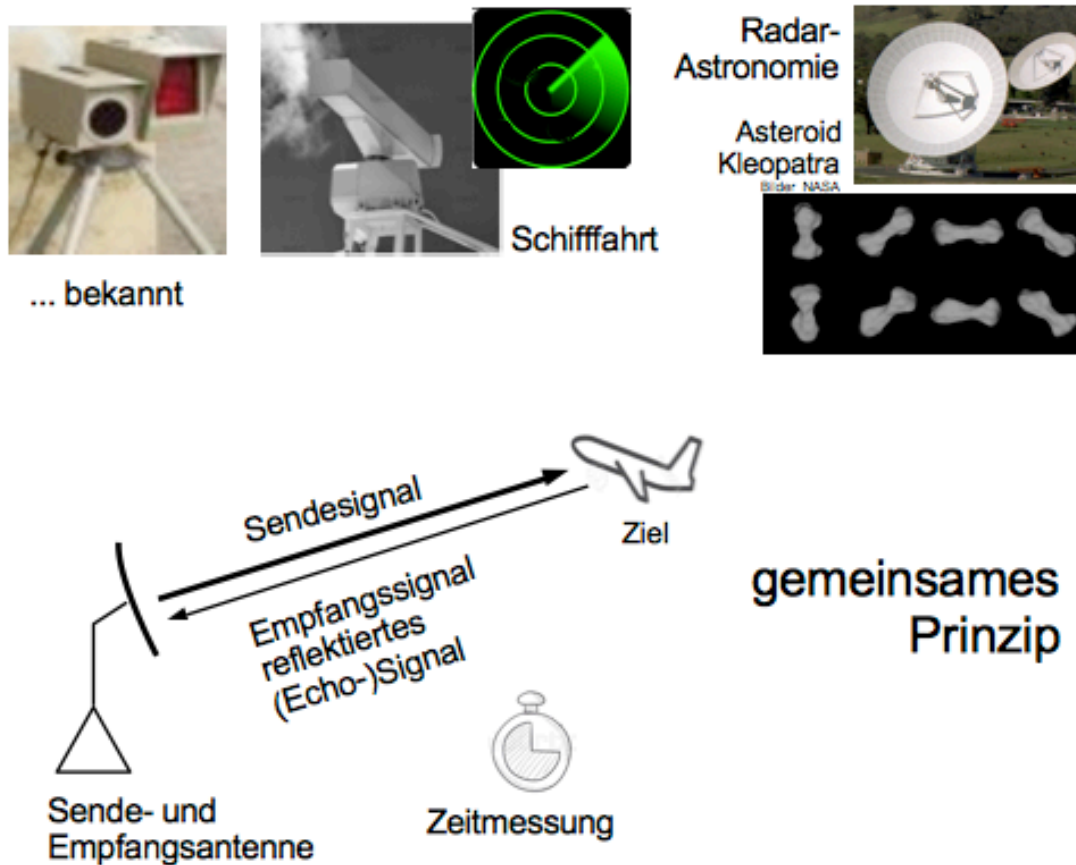
Bergschäden sind ein technisch induziertes Problem, das sich zunächst im geologischen Untergrund abspielt, der wiederum auf technische Konstrukte, sprich Gebäude, Straßen, Brücken usw. "ausstrahlt". Auch bei anderen geologischen, rein natürlich ablaufenden Prozessen kommt es zu solchen Schäden, wobei tektonische Verwerfungen und Verkarstung vor allem zu nennen sind. Weit verbreitet und von Ingenieurbüros in der Regel praktiziert, werden durch den geologischen Untergrund induzierte Schäden allein mit Rammsondierungen, Rammkernsondierungen, Schürfen oder Bohrungen untersucht. Das entspricht in den meisten Fällen schon lange nicht mehr dem gegenwärtigen Stand von Wissenschaft und Technik, der die vielfältigen geophysikalischen Verfahren mit zerstörungsfreier, kontinuierlicher und bei geeigneten Verfahren hochauflösender und dabei kostengünstiger Methodik der Untergrunderkundung in der Regel als unverzichtbar hält. Dabei können in der Folge und von der Geophysik als optimal vorgezeichnete Orte, die nicht wie bei Bohrungen auf nicht erkannten geologischen Singularitäten stehen, auch die direkten Bohraufschlüsse sinnvoll, aber durchaus nicht immer mehr nötig sein. In dieser Broschüre wird dieses Thema mit einem Schwerpunkt beim Bodenradar abgehandelt, das sich mit hochleistungsfähigen Geräten und Auswerteverfahren gerade bei den Untersuchungstiefen von Bergschäden zu einem beinahe unverzichtbaren Verfahren geworden ist, das mittlerweile auch dabei ist, der Seismik den Rang bezüglich Aussagekraft, instrumentellem Aufwand und Kosten abzulaufen. Hier wird dennoch auch die Seismik nicht ausgeklammert, aber auch von den vielen weiteren geophysikalischen Verfahren die geoelektrischen Verfahren angesprochen, die gerade in vielen Fällen mit hydrogeologischen und hydraulischen Aspekten in der Kombination mit dem Bodenradar beste Ergebnisse erzielen. Als ein weiterer Schwerpunkt der Ausführungen wird das Digitale Geländemodell abgehandelt, das zusammen mit dem Bodenradar, aber in vielen Fällen auch vorbereitend derart unschätzbare Informationen über den Baugrund liefern kann, dass es immer noch unbegreiflich ist, dass es bei den meisten Büros entweder gar nicht bekannt ist oder allenfalls bekannt aber praktisch nie zur Anwendung kommt.

Inhalt

1	Was ist Bodenradar, was ist Radar? Das gemeinsame Prinzip	4
2	Das Radar-Prinzip in der Geophysik - Anwendungsbereiche	5
3	Die Messgeräte	6
4	Wie werden die Messergebnisse dargestellt? Radargramme	7
5	Wie tief kann ich mit Bodenradar-Messungen schauen, und was kann ich mit der Methode an Strukturen und Objekten auflösen?	8
6	Der enge Zusammenhang mit dem Auflösungsvermögen von Bodenradar-Messungen	9
7	Antennen mit verschiedenen Frequenzen ergänzen sich.	10
8	Gute und schlechte Bodenradar-Signale - Die Qualität der Messergebnisse	11
9	Grenzflächenwellen - Stoneley-Wellen, Scholte-Wellen	12
10	Wo überall kann ich Bodenradar-Messungen machen?	13
11	Störfaktoren	14
12	Was Bohrungen nicht sehen. Bodenradar und Bohrungen - Rammsondierungen - Rammkernsondierungen	16
13	Besondere Messsituationen - aber kein grundsätzliches Problem: Bodenradar-Messung in Gebäuden	18
14	Besondere Messsituationen: Bodenradar als "Video"	19
15	Geologie - Hydrogeologie und Bodenradar	20
16	Der 3D-Blick in den Untergrund - Radar-Tomographie	21
17	Bergschäden: Bodenradar und ergänzende Geophysik - Seismik - Geoelektrik	22
18	Geoelektrik und Bodenradar - gemeinsame Untersuchungen	24
19	Bergschäden: Bodenradar und das Digitale Geländemodell	27
20	Ein Beispiel: Bodenradar und Digitales Geländemodell bei starken Hausschäden	32
21	Zusammenfassende Schlussfolgerungen	39

Bodenradar - Georadar - Ground Penetrating Radar (GPR)

1 Was ist Bodenradar, was ist Radar? Das gemeinsame Prinzip



Geschwindigkeit der Radarwellen = Weg/Zeit

Weg = Geschwindigkeit x Zeit

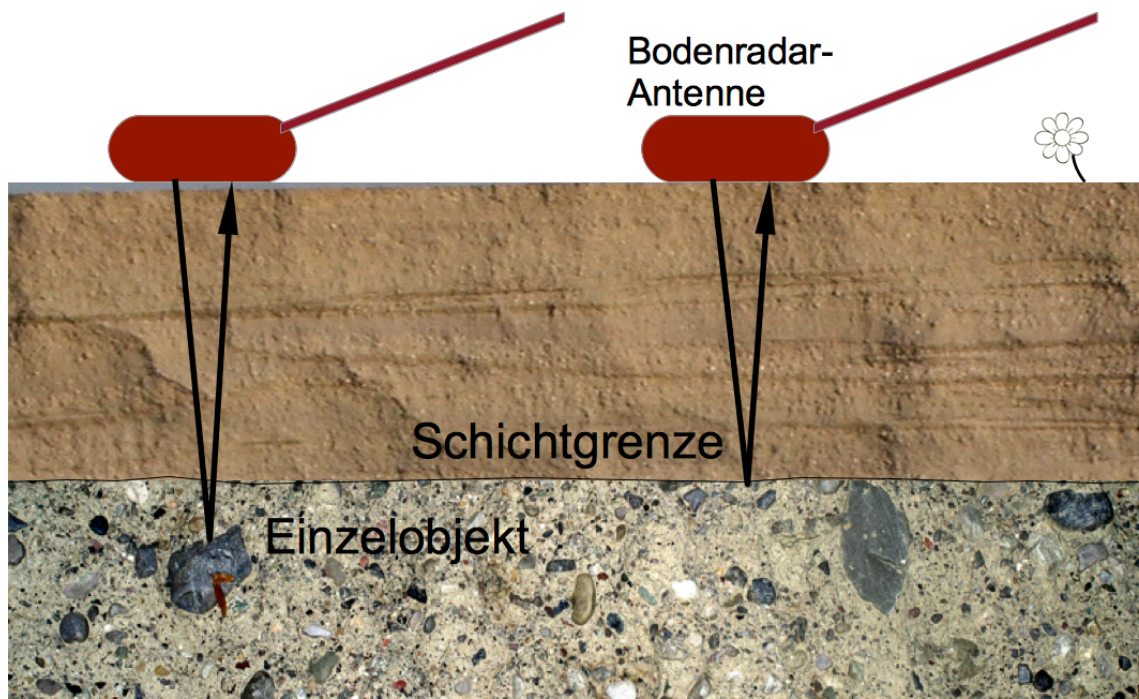
Beispiel Flugzeug 3 km Höhe
Geschwindigkeit der Radar-Signale in Luft
(annähernd Lichtgeschwindigkeit) 300 000 km/s;
Laufzeit hin und zurück 20 μ s (Mikrosekunden).

Abb. 1. Das gemeinsame Prinzip aller Radar-Messungen.

2 Das Radar-Prinzip in der Geophysik - Anwendungsbereiche

Geologie - Ingenieurgeologie - Hydrogeologie - Baugrunderkundung für Neubauten - Baugrunderkundung bei bestehenden Gebäuden - Schadensermittlung oberflächennahe Geothermie - Kampfmittelräumung - Archäologie

Von an der Erdoberfläche (z.T. auch in Bohrungen) geführten Antennen werden hochfrequente elektromagnetische Signale in den Untergrund abgestrahlt (Sendeantenne), an Diskontinuitäten (Einzelobjekten, Schichtgrenzen) reflektiert und - zurück an der Oberfläche - mit einer Empfangsantenne registriert. Eine hoch präzise Zeitmessung der Laufzeit zwischen Senden und Empfangen zusammen mit der Geschwindigkeit der Signalausbreitung bestimmt die Länge des Laufweges, also Objekt- oder Schichttiefe.



Geschwindigkeit der Radar-Signale im Boden/in Gesteinen größenordnungsmäßig 0,1 Meter/Nanosekunde (m/ns); Beispiel Schichtgrenze in 5 m Tiefe, Laufzeit (hin und zurück) größenordnungsmäßig 100 ns.

SS

Abb. 2. Das Prinzip - angewandt auf das Bodenradar in der Geophysik.

3 Die Messgeräte

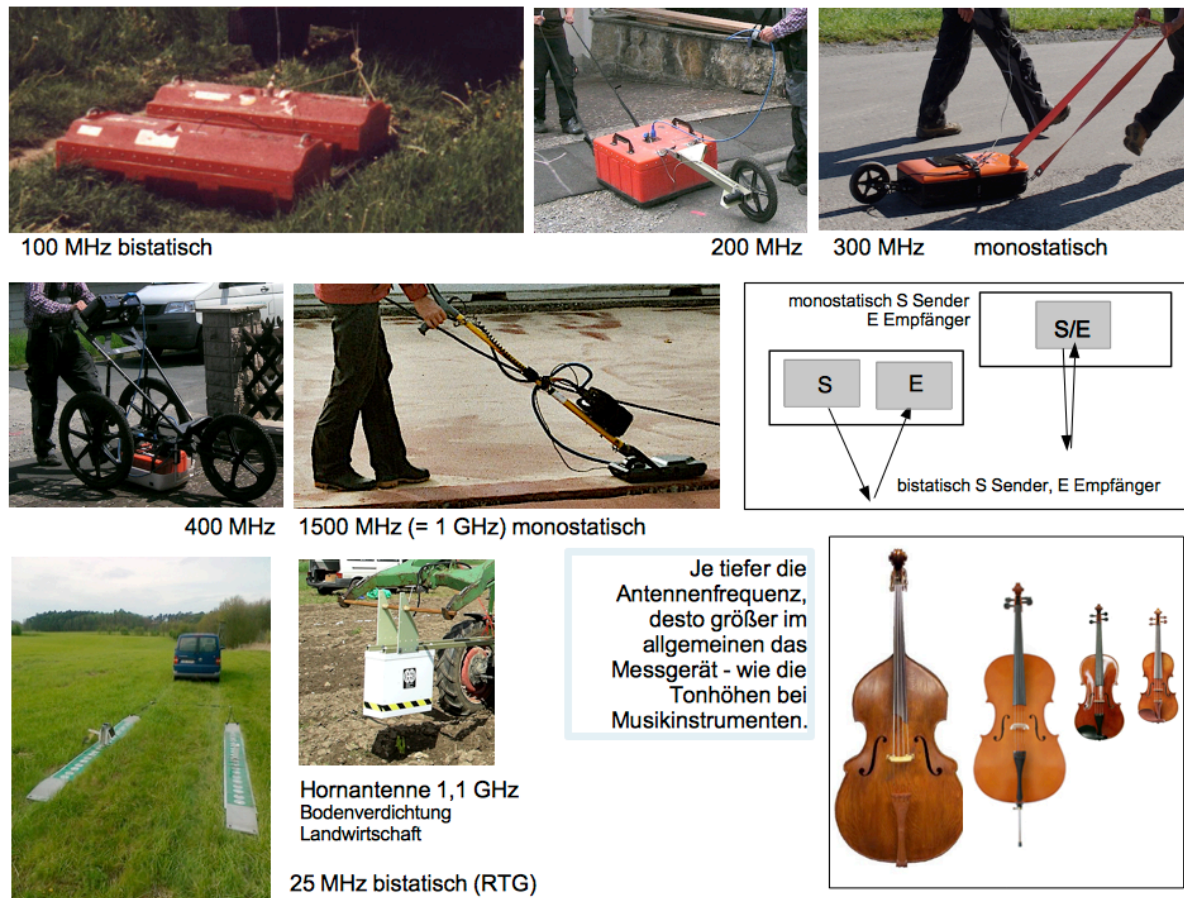


Abb. 3. Verschiedene Typen moderner Bodenradar-Messapparaturen.

Was nicht funktioniert und womit Schindluder getrieben wird. - Während die hier gezeigten Messgeräte zu den Ausrüstungen gehören, die in der Geophysik ihren - z.T. seit sehr langer Zeit - respektablen Ruf haben, gibt es eine Reihe von Radargeräten, bei denen das eher fraglich ist. Meist sind es einfache, und häufig billigste Geräte, die vor allem in der Schatzsucher-Szene Verbreitung finden (mit bereits einschlägig verräterischen Namen wie GOLD RADAR), denen sehr häufig unglaubliche Fähigkeiten und Erfolgsgeschichten zugeschrieben werden und die unglücklicherweise auch bei Bauingenieur-Arbeiten von Geophysik-Laien mit durchweg fraglichen Ergebnissen eingesetzt werden. erinnert wird an die in den Medien eine Zeitlang hochgehaltene Geschichte von dem angeblich mit Georadarmessungen erkannten Nazi-Goldzug in einem polnischen Bergwerk, wo das benutzte Gerät, für das niemals Details zur Funktionsweise bekannt wurden, den Zug in ca. 50-60 m Tiefe erkannt haben wollte und sogar ein Auswertebild des Radar mit dem manifestierten Goldzug in dieser Tiefe zeitweise im Internet die Runde machte. Scharlatanerie und vernichtende Urteile aus der Wissenschaft.

4 Wie werden die Messergebnisse dargestellt? Radargramme

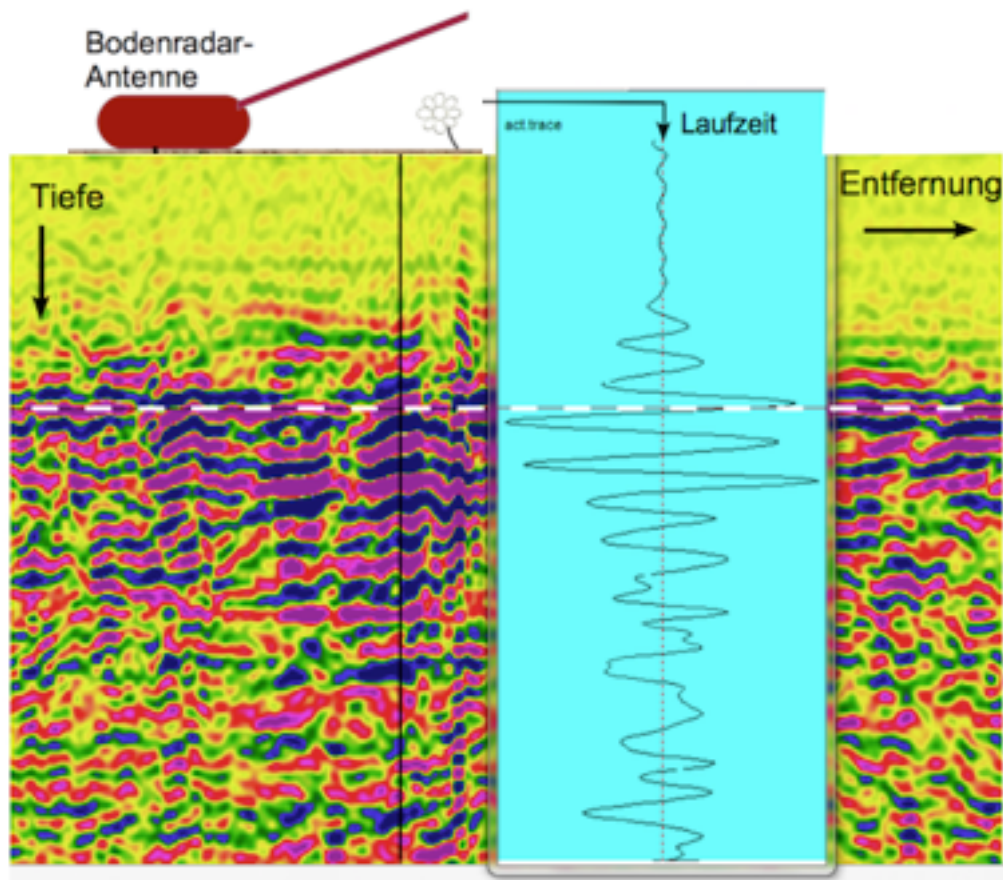


Abb. 4. Beispiel für ein Radargramm beim Bodenradar mit dem Wellenzug einer einzigen Spur. Das Radargramm selbst setzt sich aus unzähligen solcher Spuren zusammen, die beim Bewegen der Antennen registriert werden. Der einzelne Wellenzug verdeutlicht die Begriffe wie Frequenz, Wellenlänge, Amplitude, aber auch, wie die Farben (positive Amplitude rot-violett, negative Amplitude blau-grün) und deren Intensitäten zustande kommen. Beim normalerweise kontinuierlichen Bewegen der Geräte-Antenne kann der Abstand der registrierten Spuren je nach gewünschter horizontaler Auflösung frei gewählt werden. Ein Abstand mit einem Signal und der Information aus der Tiefe alle 3 cm (!) ist nicht ungewöhnlich.

5 Ein enger Zusammenhang beim Bodenradar: Wie tief kann ich mit Bodenradar-Messungen schauen, und was kann ich mit der Methode an Strukturen und Objekten auflösen?



Abb. 5. Zur Untersuchungstiefe von Bodenradar-Messungen. Die Untersuchungstiefe hängt merklich einmal von der Frequenz der Radarantenne, zum anderen von der elektrischen Leitfähigkeit der Untergrundschichten ab. Günstige Verhältnisse bieten tonarme, trockene Gesteine mit hohen elektrischen Widerständen, eher ungünstige Verhältnisse tonige, bindige Schichten mit hoher elektrischer Leitfähigkeit. Das liegt daran, dass die Energie der Radarsignale beim Durchlaufen der Schichten mehr oder weniger stark geschwächt wird, was bei elektrisch gut leitenden Schichten sehr viel stärker ausgeprägt ist. Eine allgemeine Gesetzmäßigkeit für reale Böden und Gesteine gibt es nicht, und Probemessungen helfen in der Regel rasch weiter. **Ein wichtiger Punkt** bei den Radar-Messungen und der Untersuchungstiefe wird sehr häufig vergessen: Die Datenverarbeitung nach der Messung bringt bei einem gewieften, erfahrenen Radar-Spezialisten in der Regel gute Informationen aus weitaus größeren Tiefen als bei unerfahrenen Anwendern.

6 Der enge Zusammenhang mit dem Auflösungsvermögen von Bodenradar-Messungen

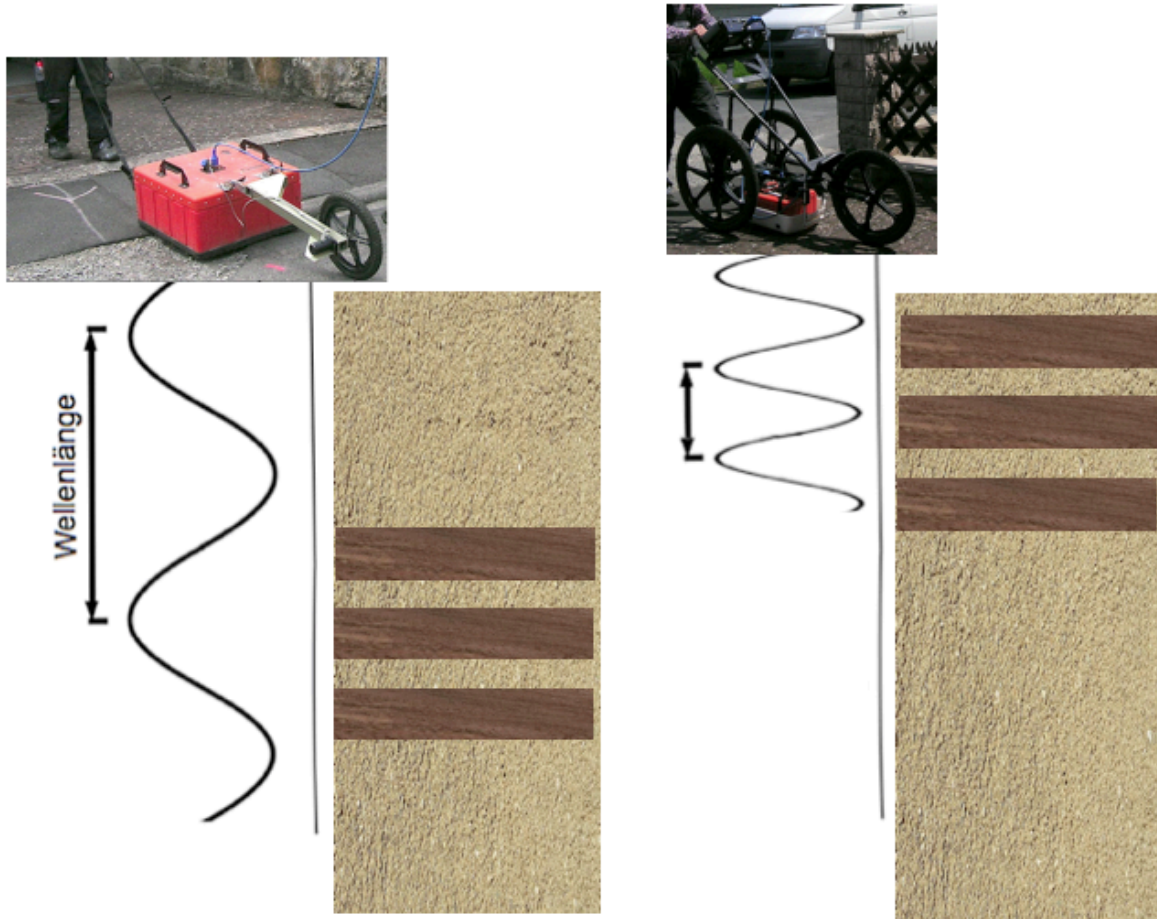


Abb. 6. Zum Auflösungsvermögen von wellenförmigen Signalen. Untersuchungstiefe und Auflösungsvermögen zeigen polarisierendes Verhalten. Möchte man bei Messungen beide Vorteile nutzen, hilft in vielen Fällen ein direktes Nacheinander mit Antennen verschiedener Frequenzen. Beim geringeren Auflösungsvermögen der niederfrequenten Antennen genügen dann auch größere Abstände der Messprofile.

7 Antennen mit verschiedenen Frequenzen ergänzen sich.

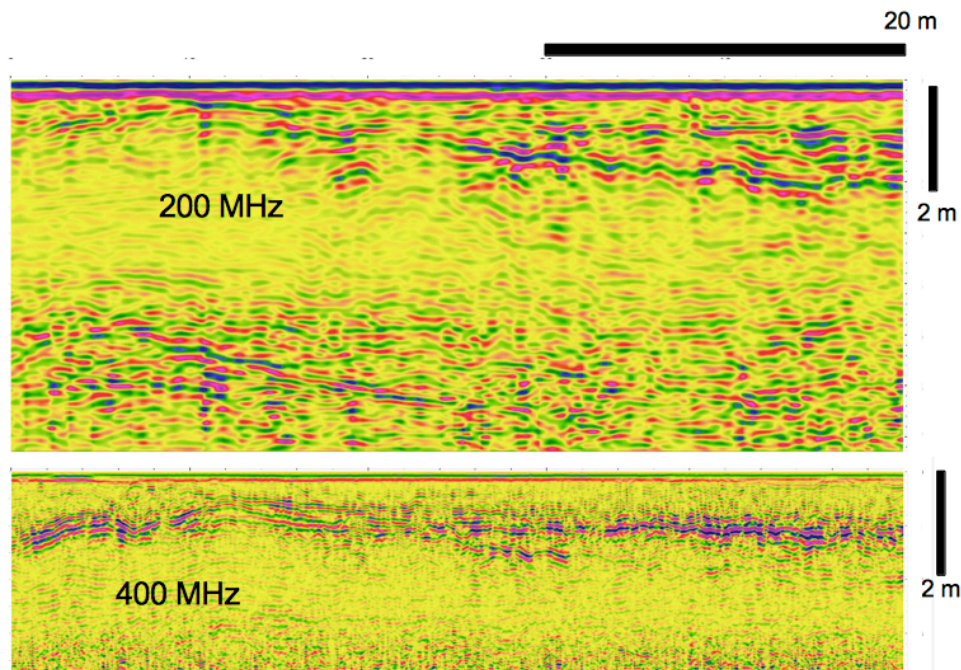


Abb. 7. Kombinierte Bodenradar-Messung mit 200- und 400 MHz-Antennen zu einer Kanaldamm-Untersuchung. Untersuchungstiefen und Auflösungsvermögen ergänzen sich.

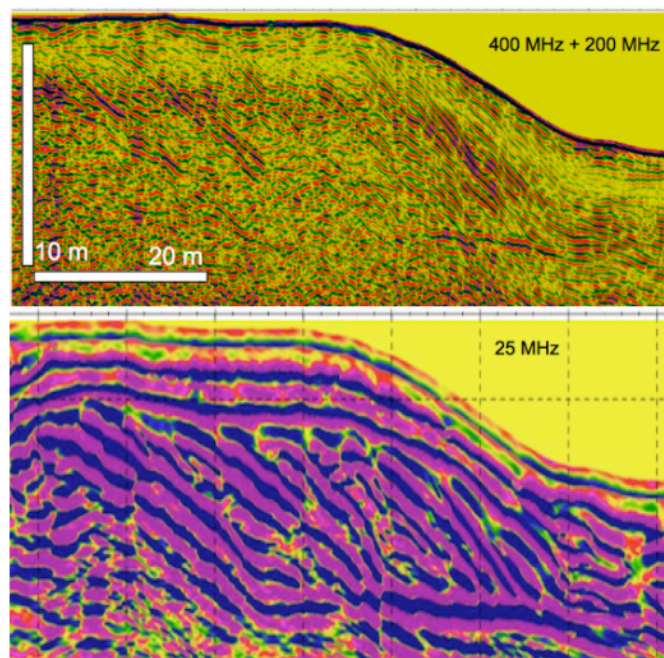


Abb. 8. Dasselbe Bodenradar-Profil mit drei verschiedenen Frequenzen. Oben: Radargramm aus der Datenüberlagerung von 400 MHz und 200 MHz. Unten: Die sehr niedrige Frequenz betont vor allem die Hauptstrukturen. Bemerkenswert die relativ hohe Eindringtiefe auch bei den höheren Frequenzen.

8 Gute und schlechte Bodenradar-Signale - Die Qualität der Messergebnisse

Sieht man von der logischen Schlussfolgerung ab, dass schlechte Geländearbeiten und schlechtes Datenprocessing in aller Regel auch schlechte Qualität der Ergebnisse zeitigen, hängt die Qualität und Aussagekraft natürlich von den Boden- und Gesteinsverhältnissen ab, was für alle Messungen in der Geophysik gilt. Gesteine kann ich nur unterscheiden, wenn sie sich hinreichend in ihren petrophysikalischen Parametern unterscheiden. In der Gravimetrie ist es die Dichte der Gesteine, in der Geoelektrik der spezifische Widerstand und in der Seismik sind es Dichte und Schallgeschwindigkeit. Beim Bodenradar als analoges Laufzeitverfahren zur Seismik ist dieser Parameter die Dielektrizitätszahl der Gesteine, meist mit dem Buchstaben ϵ bezeichnet. Sie ist für das Bodenradar insofern besonders wichtig, weil sie für Wasser den abnormalen hohen Wert von 81 besitzt, was ganz grob eine Größenordnung höher ist als das ϵ von Gesteinen. Das Grundwasser in den Gesteinen unter dem Grundwasserspiegel, in der vadosen Zone und im Kapillarsaum im Zusammenspiel mit der Korngröße spielen deshalb eine enorm wichtige Rolle bei der Beurteilung von Erfolg oder Misserfolg der Messungen, wenn die eingangs erwähnten praktischen Belange der Feld- und Auswertetechnik ausgeklammert werden. Kalkulierbare Gesetzmäßigkeiten gibt es wegen des meist sehr komplexen Aufbaus von Gesteinsmatrix und Porenfüllung nicht; pauschal zeigt die folgende Abbildung, wo z.B. gute Radar-Reflexionen aus dem Untergrund zu erwarten sind. In kaum einem anderen Gebiet der Geophysik-Messungen gilt der Satz zutreffender als beim Bodenradar: Probieren geht über Studieren. Mit anderen Worten: Vor größeren Messprojekten ist es fast immer sinnvoll, kurze Testmessungen zu praktizieren, um zu vermeiden, dass dem Auftraggeber am Ende der Messungen Bericht und große Rechnung übereicht werden mit dem Hinweis, dass die Untergrundverhältnisse leider keine aussagekräftigen Resultate erbracht haben, oder was dazu verleitet, Auswertungen und Interpretation vorzulegen, die das Radar aber gar nicht erbracht hat.



Abb. 9. Gute Radar-Reflexionen an Schichtgrenzen mit stark wechselnder Lithologie oder mit stark wechselndem Wassergehalt. Feucht und trocken, luftgefüllt - die Grenzflächenwellen (Stoneley-Wellen bzw. Scholte-Wellen) beim Bodenradar werden im nächsten Abschnitt erläutert.

9 Grenzflächenwellen - Stoneley-Wellen, Scholte-Wellen

In der Reflexionsseismik sind seismische Wellen, die sich in einem besonderen Modus entlang von Grenzen zwischen verschiedenen Materialien fortpflanzen, schon seit längerem betrachtet worden (sog. Stoneley-Wellen). Man hat sie insbesondere bei Tiefbohrungen beobachtet, wo sie sich im Bereich der Bohrlochwand zwischen luft- oder wassergefüllter Bohrsäule und dem umgebenden Gestein ausbreiten, wofür man nach dem Entdecker den Namen Scholte-Wellen gewählt hat. Da sich Bodenradar-Wellen wie seismische Wellen ausbreiten, nimmt es nicht Wunder, dass Stoneley- bzw. Scholte-Wellen auch bei Bodenradar-Messungen auftreten. Das hat der Autor in den vergangenen Jahren stark propagiert, weil sich zeigt, dass dieser Wellentyp auch bei den relativ geringen Untersuchungstiefen und beim hohen Auflösungsvermögen ein wichtiges Interpretationsmerkmal in den Radargrammen geworden ist. Nicht nur, dass sie an vertikalen Schichtgrenzen als Stoneley-Wellen auftreten, sondern dass vor allem auch in klüftigem Gestein genau der Sachverhalt der Scholte-Wellen in Bohrloch-Wandungen erfüllt ist. Das leuchtet sofort ein, wenn offene Klüfte z.B. in geologischen Störungszonen mit Wasser oder Luft gefüllt sind, sodass sich in den Kluftwandungen zum Gestein die Scholte-Wellen ausbreiten können.

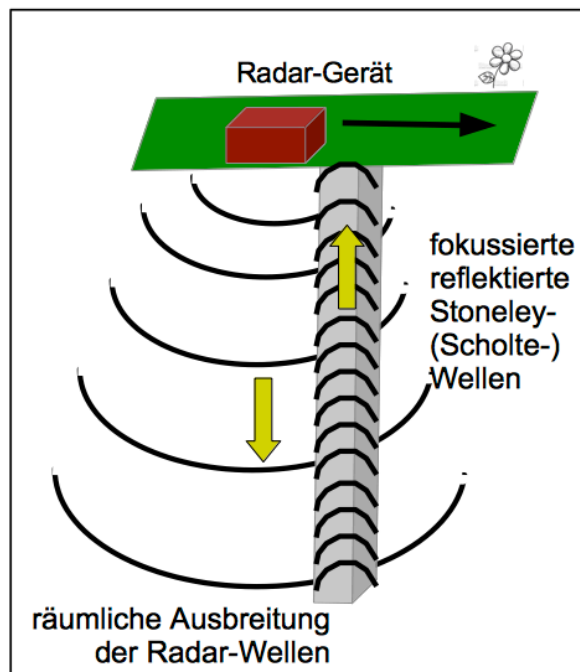


Abb. 10. Prinzip der Entstehung von Bodenradar-Grenzflächenwellen in wasser- oder luftgefüllten Räumen (Hohlräume, offene Klüfte). Typisch ist die Beobachtung von hyperbelartigen Beugungseffekten (Diffraktionen).

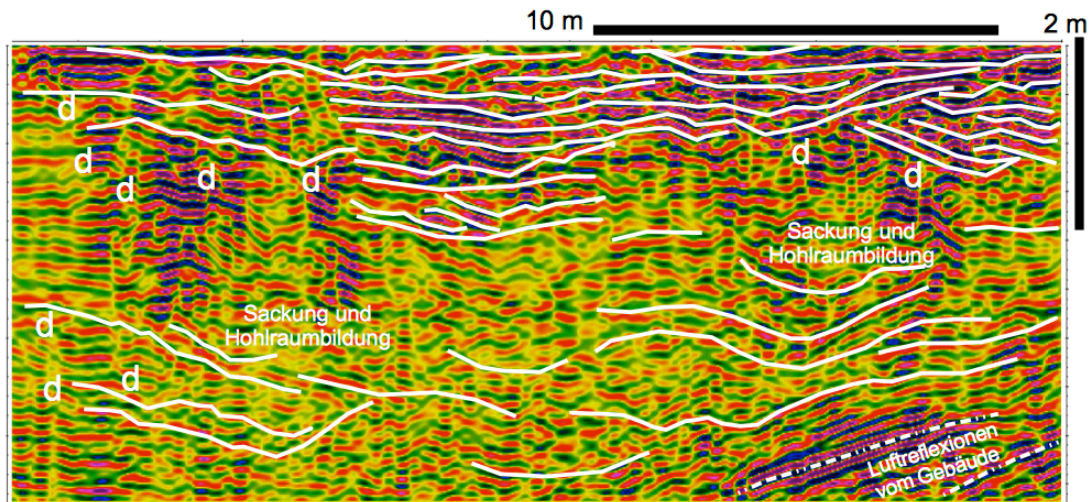


Abb. 11. Ein typisches Beispiel: 4.5 m Registriertiefe mit hoher Auflösung eines stark "bewegten" Untergrundes. Hier fokussiert sich die Interpretation (Nachzeichnung von Reflektoren) vor allem auf die schüsselförmigen Einbrüche, die ganz offensichtlich im Laufe der Zeit vom Menschen sukzessive aufgefüllt wurden, um eine ebene Oberfläche wieder herzustellen. Ursache der Einbrüche dürfte eine intensive Tektonik mit Verkarstung bzw. pauschal einer Subrosion sein. Menschliche Konstrukte (Gänge, Kellerräume) können beteiligt sein. Mit dem Buchstaben d sind die vielen (aber längst nicht alle) Diffraktionen gekennzeichnet, die sich an möglichen Hohlräumen, an wasserführenden oder trockenen Kluftzonen aber auch an Kanten menschlicher Konstrukte gebildet haben. Hinweise auf die zuvor genannten Stoneley- bzw. Scholte-Wellen sind reichlich.

10 Wo überall kann ich Bodenradar-Messungen machen?



Abb. 12. Die Unterlage: Von vornherein gibt es keine Beschränkungen bei der Unterlage für die Messungen, wobei aber zu bedenken ist, dass es gute und weniger gute Unterlagen gibt, die die Energie-Ankopplung zwischen Antenne und Boden erheblich mitbestimmen können. Beim im Bild gezeigten stahlarmierten Beton hängen Erfolg oder "aussichtslos" von der Maschenweite der Armierung und der Frequenz der Antenne ab. Dafür gibt es keine Formel, aber eine Probemessung gibt rasch Auskunft.

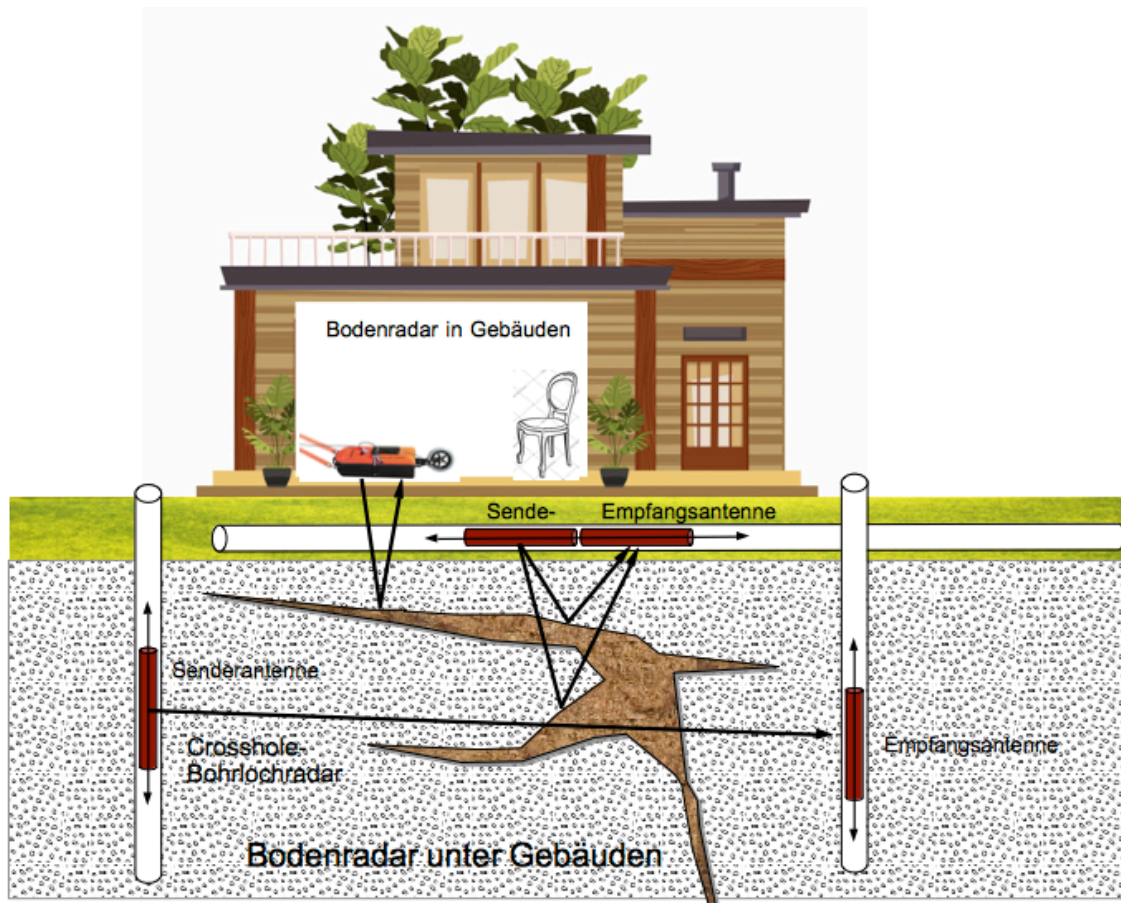


Abb. 13. Bei Gebäudeschäden besonders interessant: Messungen mit speziellen Radar-Bohrlochantennen. Zusammen mit Messmöglichkeiten in Gebäuden (später mehr dazu) können Crosshole-Messungen auch unter Gebäuden mögliche problematische Zonen erkunden. Bohrloch-Messungen mit Radarantennen sind natürlich überall wo angebracht auch mit Einzelsondierungen praktikierbar.

11 Störfaktoren

Im allgemeinen besitzen die Bodenradar-Antennen nach oben und zur Seite Abschirmungen, sodass theoretisch die Signale nur nach unten abgestrahlt werden sollten. Dennoch kommt es immer vor, dass auch von oberirdischen Reflektoren Signale durch die Luft zu den Geräten gelangen und in den Radargrammen sichtbar werden. Wände und Dächer von Gebäuden, Leitungen (Abb. 15) oder nahestehende Bäume (Abb. 14) können dazugehören. Sie werden in der Regel daran erkannt, dass sich die Luftsignale praktisch mit bekannter Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, was dann an der typischen Hyperbelkrümmung des Luft-Reflektors erkannt wird und beim Datenprocessing beseitigt werden kann, wie die folgenden Bilder zeigen.

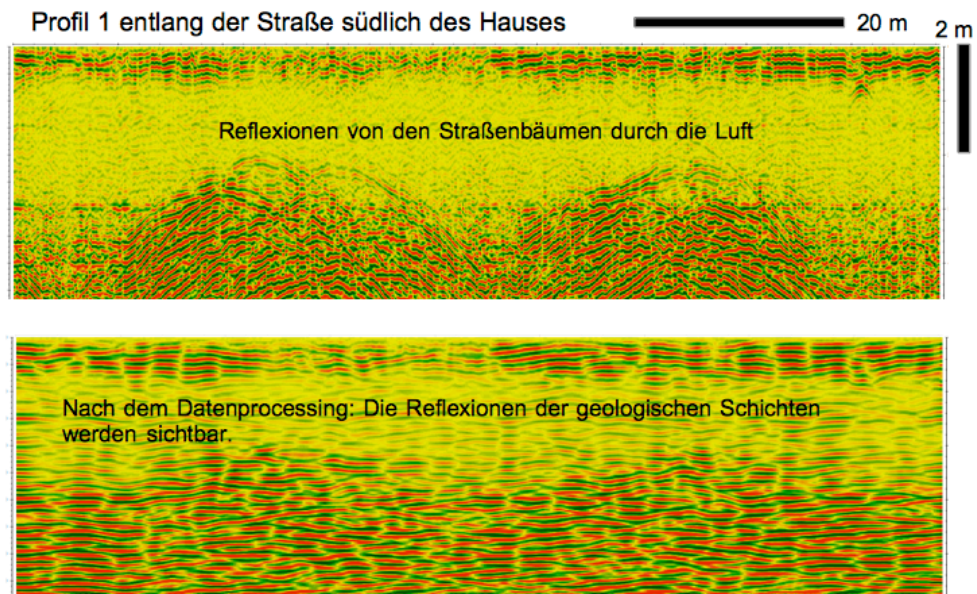


Abb. 14. Luft-Reflexionen von Bäumen.

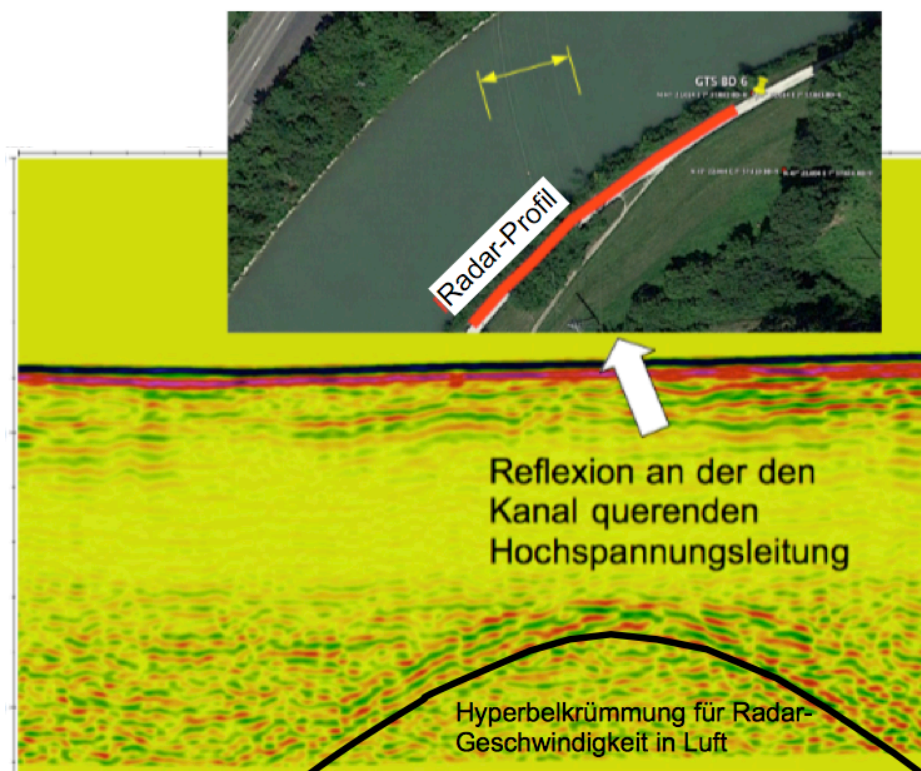


Abb. 15. Luft-Reflexion einer Hochspannungsleitung

12 Was Bohrungen nicht sehen. Bodenradar und Bohrungen - Rammsondierungen - Rammkernsondierungen

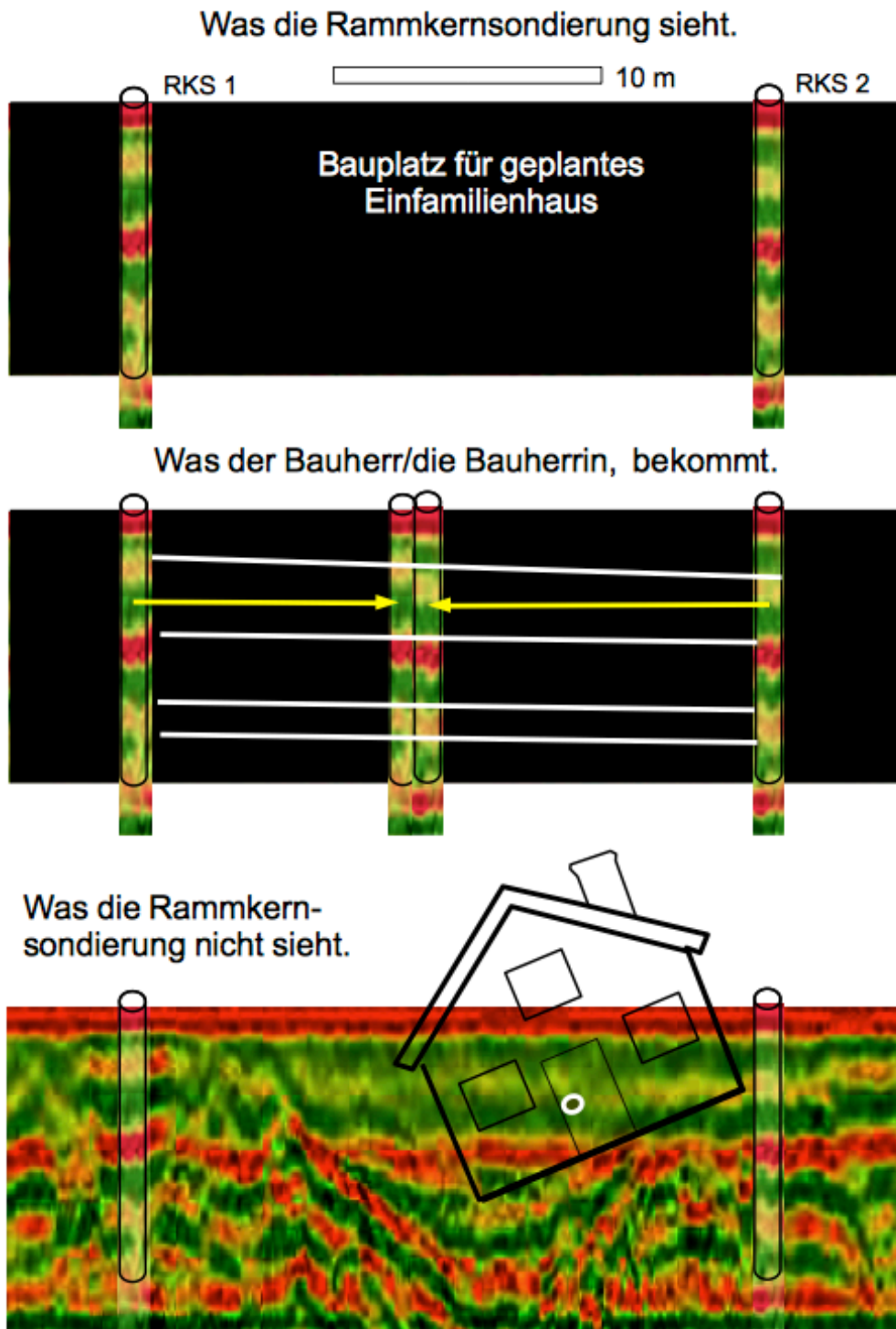
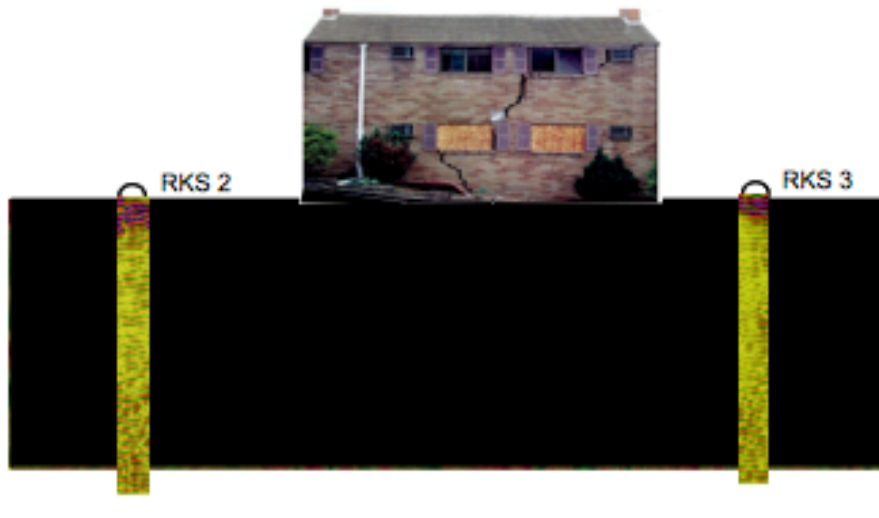


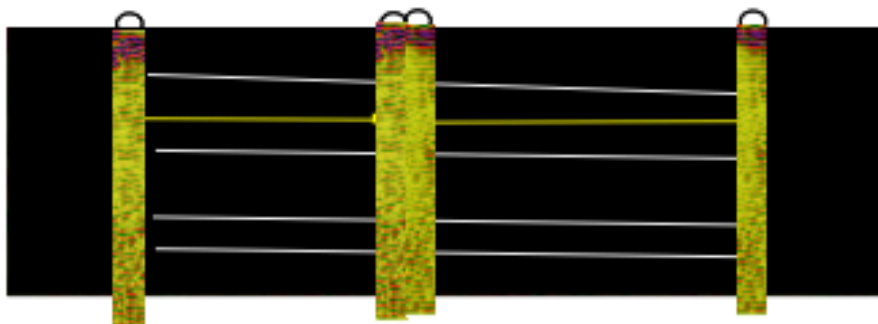
Abb. 16. Der entscheidende Unterschied: Rammkernsondierungen und Bodenradar/Geophysik

Variation des Themas

Bergschaden: Was die Rammkernsondierung sieht.



Was der Gutachter zu sehen bekommt und im Gutachten steht.



Was die Rammkernsondierung nicht sieht.

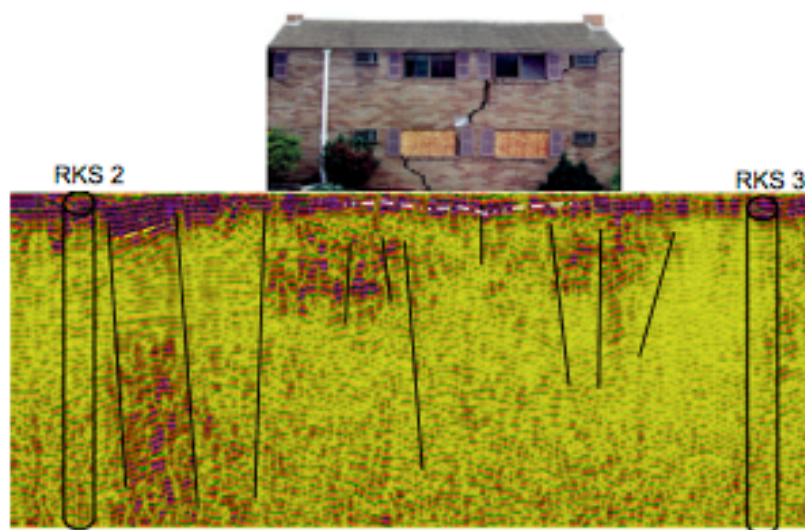


Abb. 17. Erhebliche Schichtversätze im Untergrund: Bohraufschlüsse und Bodenradar.

13 Besondere Messsituationen - aber kein grundsätzliches Problem: Bodenradar-Messung in Gebäuden

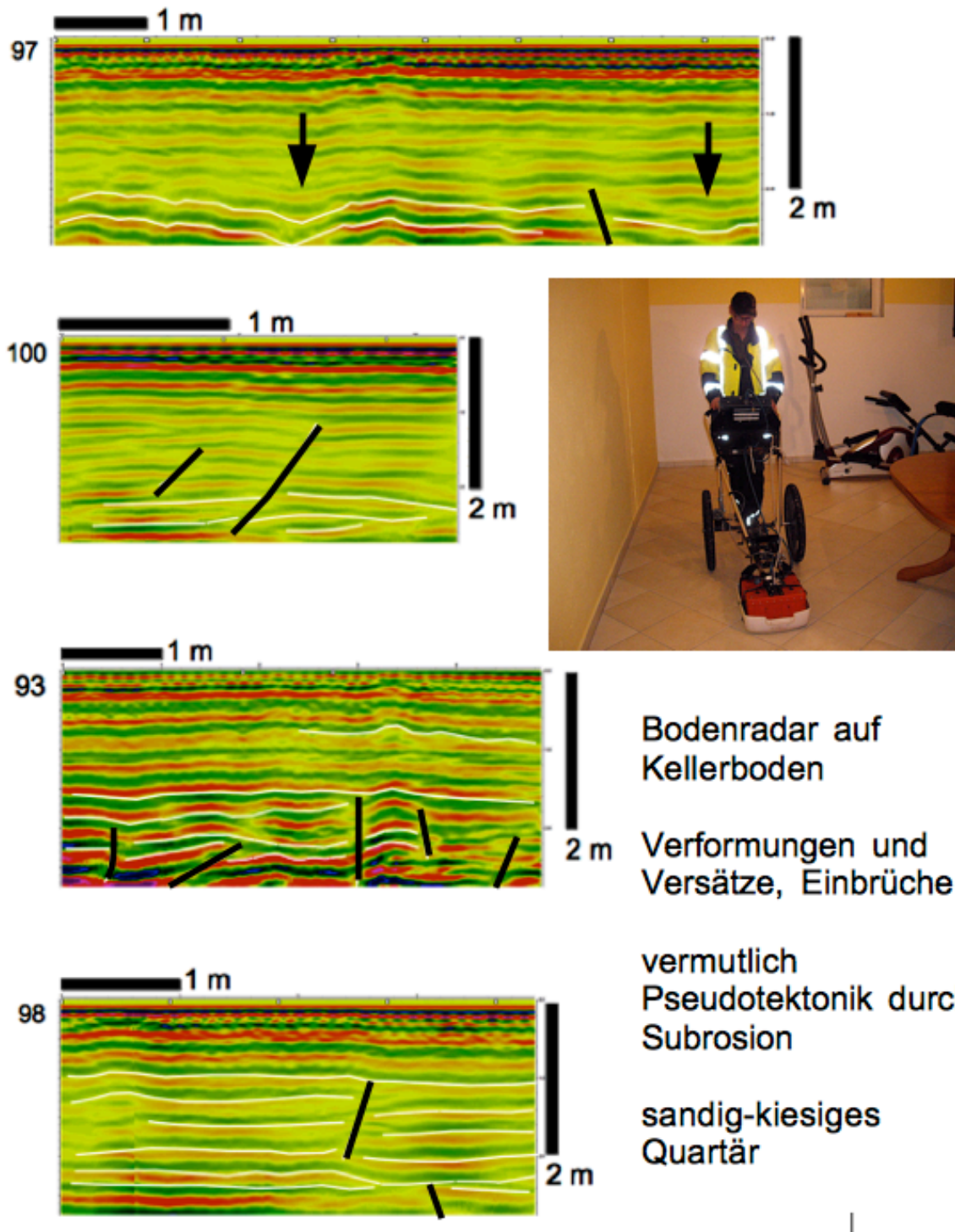


Abb. 18. Problematischer Baugrund: Bodenradar im Haus.

14 Besondere Messsituationen: Bodenradar als "Video"

Burghof: mit der Zeit wandernde Absenkung und Planierung

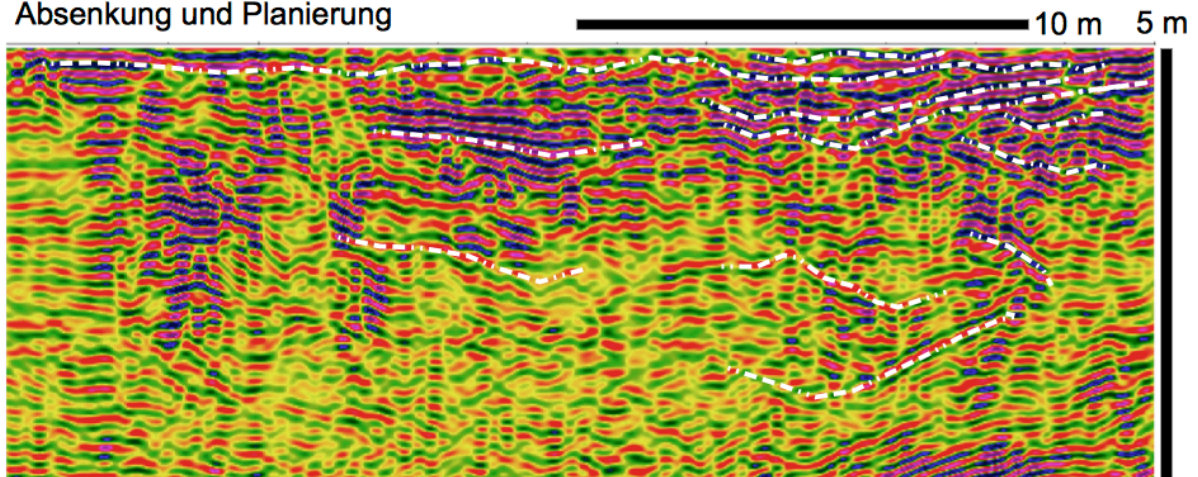


Abb. 19. Geologische Geschichte im Bild des Radargramms. (Siehe auch Abb. 11.)

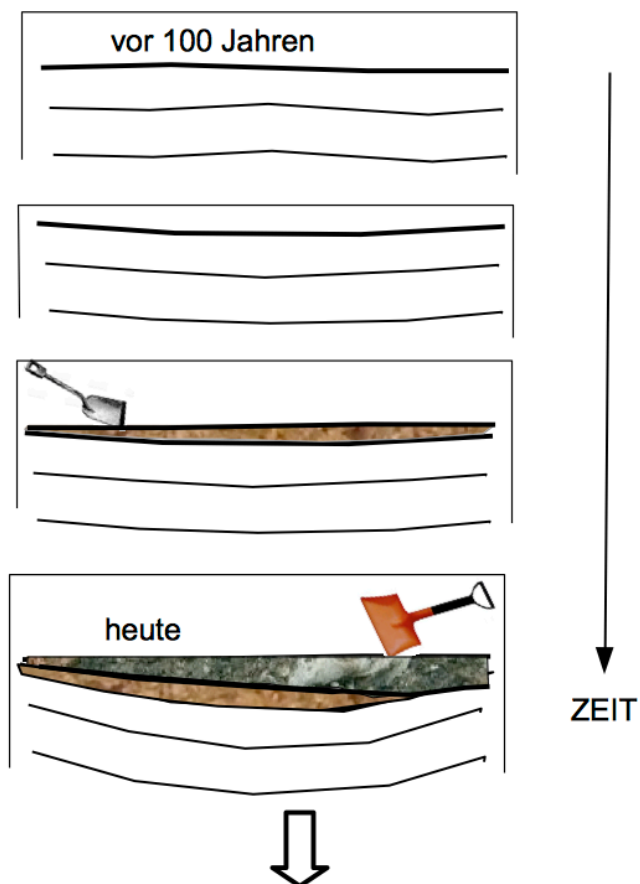


Abb. 20. Das Modell dazu.

Bodenradar-"Video": 100jährige Kanaldamm-Geschichte im Bild des Bodenradar

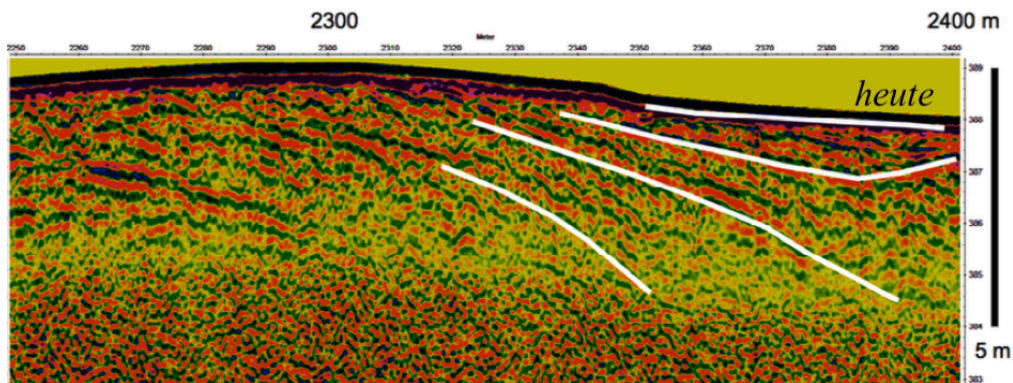


Abb. 21. In den vergangenen 100 Jahren der Dammexistenz hat es eine kontinuierliche Untergrundabsenkung mit einer sukzessiven Auffüllung durch den Menschen als Kompensation gegeben.

15 Geologie - Hydrogeologie und Bodenradar

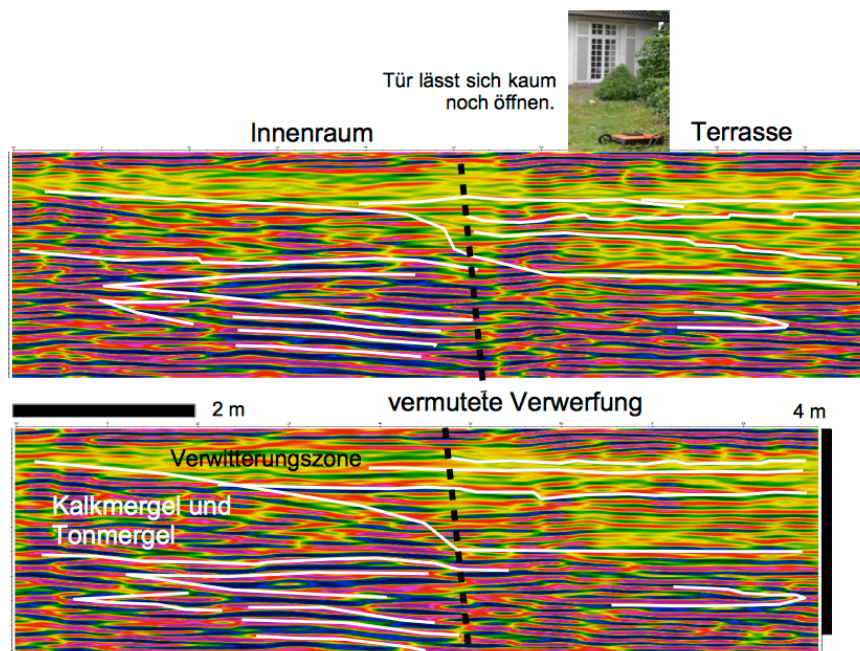


Abb. 22. Erhebliche, zunehmende Hausschäden. Zwei parallele Bodenradar-Profile von innen nach außen durch die Terrassentür. Das horizontal und vertikal stark wechselnde Reflektivitätsmuster in den Radargrammen deutet auf stark unterschiedliche Wasserführung über dem in 7 m Tiefe liegenden Grundwasserspiegel in einer die Verwerfung begleitenden Bruchzone. Rammkernsondierungen sehen das Schadensbild nicht.

16 Der 3D-Blick in den Untergrund - Radar-Tomographie

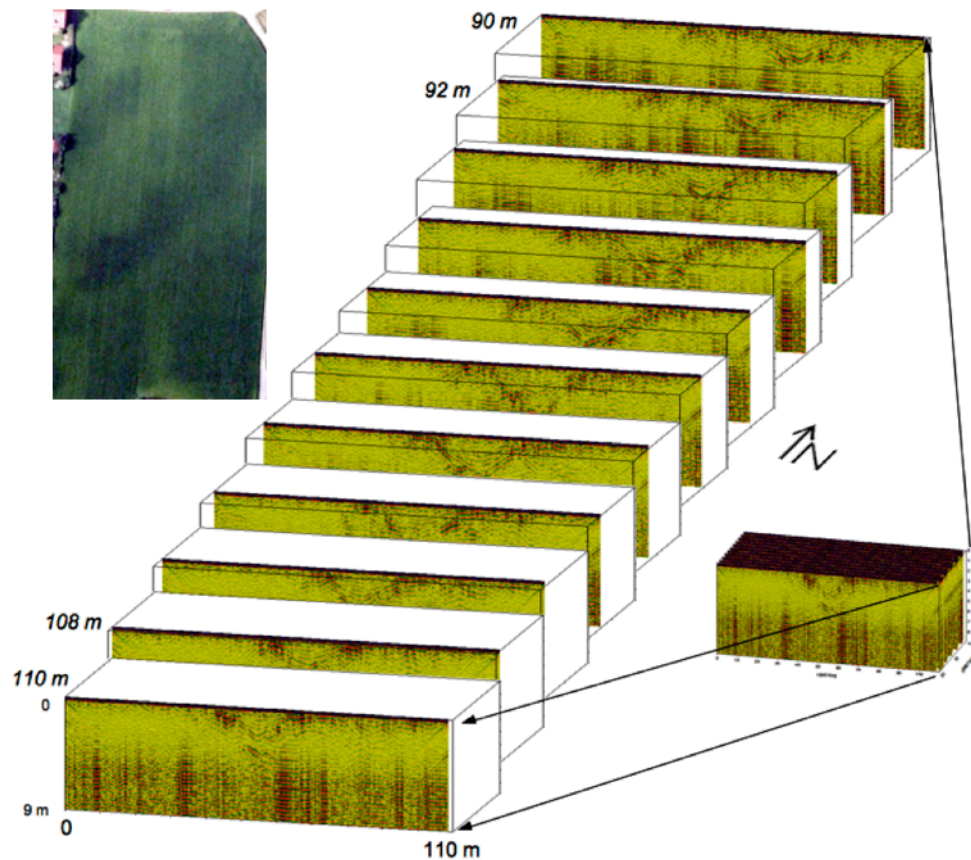


Abb. 23. Subrosionszonen im Google Earth Luftbild und tiefreichende Geländeeinbrüche im Radarbild, 200 MHz.

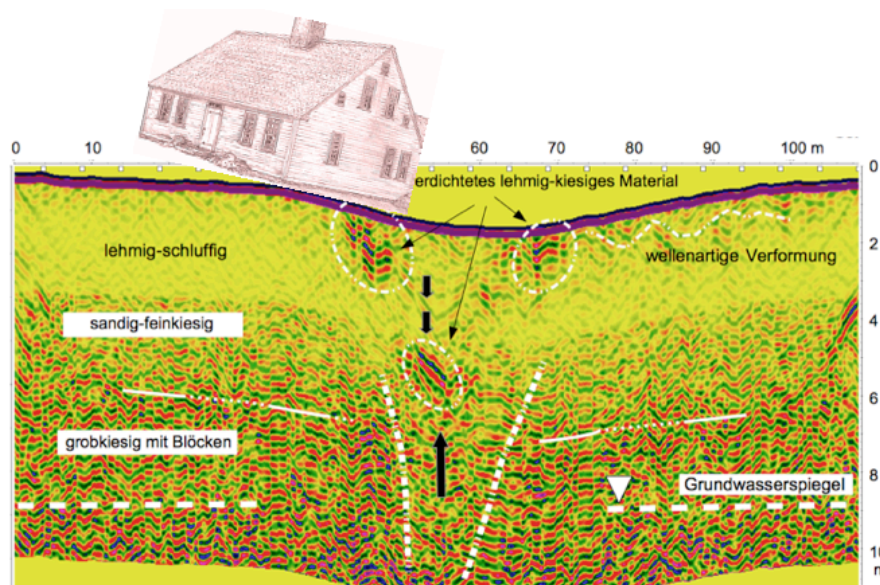


Abb. 24. Größenverhältnis EFH – Subrosion-Einbruchstruktur Ausschnitt derselben Subrosionszone: Radar-Tomographie für Profile im 2 m-Abstand.

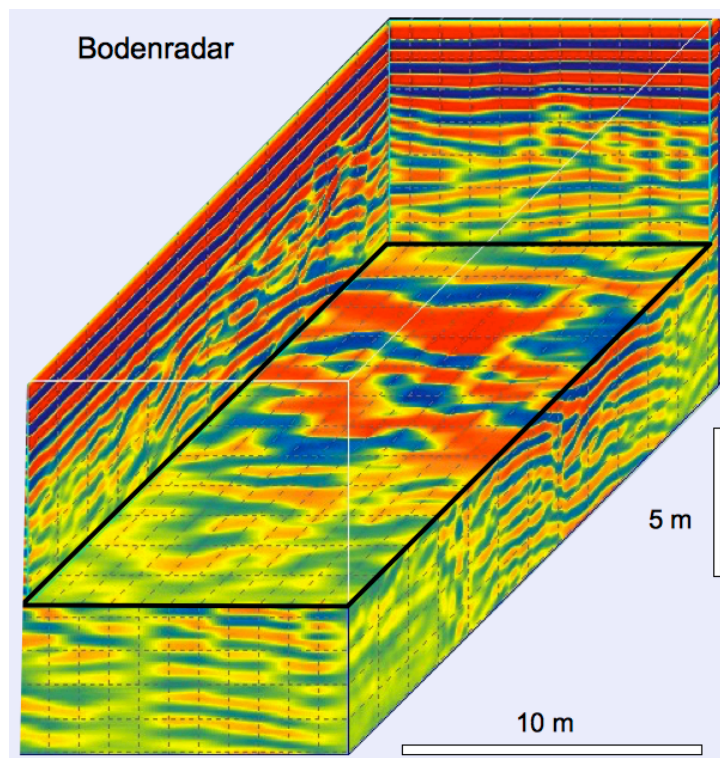


Abb. 25. In einem Block der Bodenradar-Tomographie kann man sich am Computer mit der entsprechenden Software beliebig hin und her bewegen und sich Besonderheiten in horizontalen und vertikalen (Bild oben) Schnitten genauer anschauen.

17 Bergschäden: Bodenradar und ergänzende Geophysik - Seismik - Geoelektrik

Seismik

Refraktionsseismik, Reflexionsseismik, Oberflächenwellen-Seismik sind die klassischen seismischen Verfahren, die auch bei oberflächennahen Erkundungen eingesetzt werden können. Zu nennen ist ein hochauflösendes Geosonar, das mit einem Diesel-Messwagen von 500 kg Gewicht vom GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam primär für Forschungszwecke bei (auf der Internetseite genannten) Projekten u.a. der Deicherkundung, Tagebau-Rekultivierungsflächen und in Tunneln eingesetzt wird.

Im Dienstleistungsbereich für geringe Untersuchungstiefen ist der technische Aufwand in der Regel geringer (Bild unten), aber die Gelände- und Auswerteprozeduren bleiben im Prinzip die gleichen. Physikalisch gesehen sind Seismik und Bodenradar sehr ähnliche Laufzeitverfahren, mit dem Unterschied, dass bei der Seismik Schallimpulse und beim Bodenradar elektromagnetische Impulse in

den Untergrund "geschickt" und von dort nach oben reflektiert werden. Auswerteprozeduren und Darstellungen der Ergebnisse sind dementsprechend auch sehr ähnlich (siehe folgendes Bild mit Radargramm und Seismogramm)-

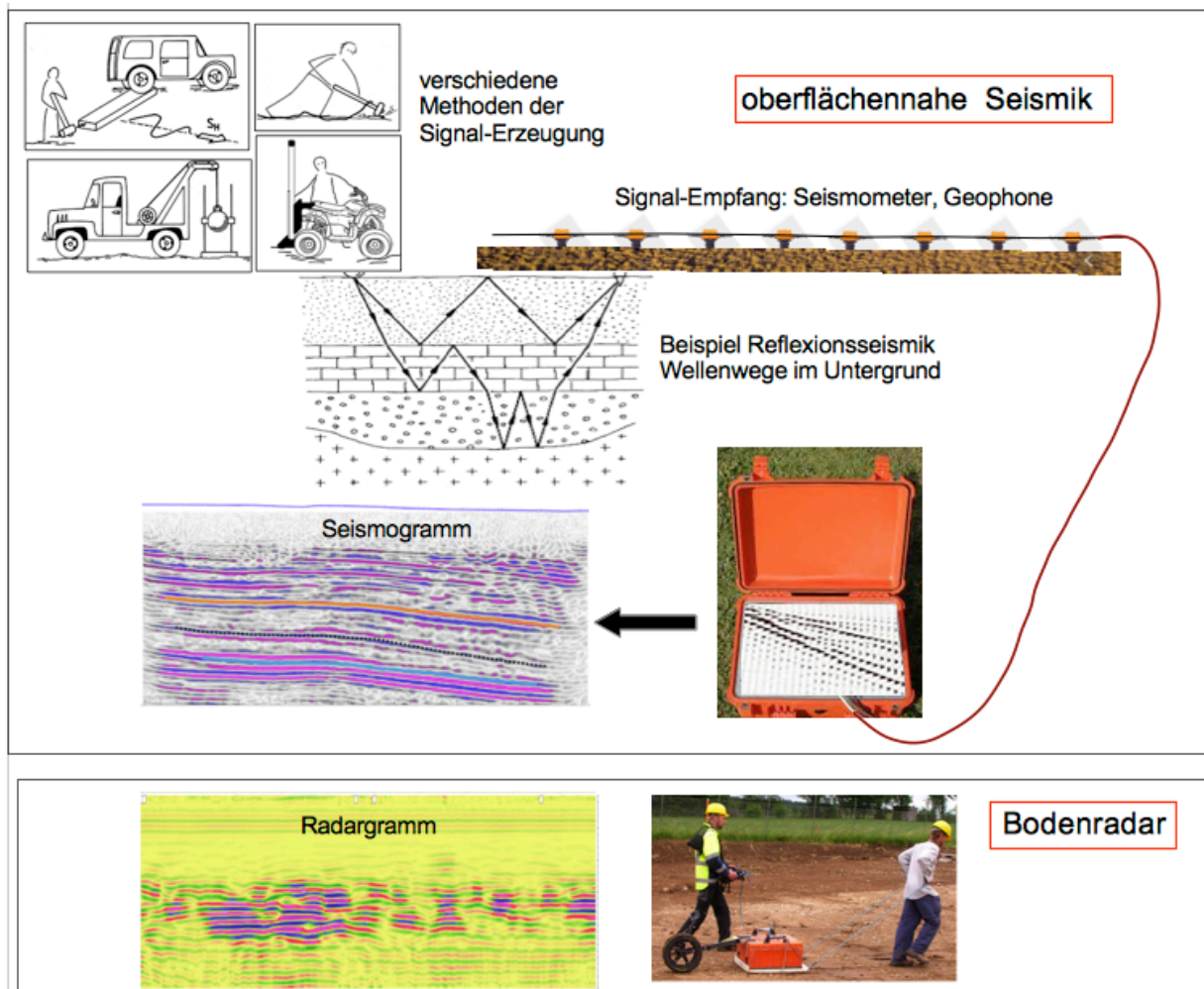


Abb. 26. Aufwand für Reflexionsseismik und Bodenradar in einem einfachen Vergleich.

Bei Messungen zu Belangen von Bergschäden beim allgemeinen eher geringeren Untersuchungstiefen kommen die Refraktionsseismik und die Reflexionsseismik mit Kompressionswellen- und - in neuerer Zeit - Scherwellen-Anregung zur Anwendung. Gerade beim Einsatz im obersten Dekameter ist die Anwendung nicht unproblematisch. Bei der Refraktionsseismik ist es das relativ geringe Auflösungsvermögen und die stärkere Beschränkung durch physikalisch vorgegebene Bedingungen an die Schichtparameter, bei der Reflexionsseismik mit den anders gearteten Wellenwegen das häufig sehr viel vom Auswerter verlangende Datenprocessing mit Interpretation.

Mit dem Aufkommen immer leistungsfähigerer Bodenradar-Messsysteme und Auswerteverfahren, die der Seismik in nichts nachstehen (sofern von versierten Anwendern praktiziert), ist fast vorauszusehen, dass für den Untersuchungsbereich

der obersten Dekameter die Seismik in sehr vielen Fällen durch das Bodenradar ersetzt werden, zumindest eine ganz starke Konkurrenz erhalten wird.

Schaut man sich das obige Bild (Abb. 26) an, so wird sofort klar:

- die hohe Mobilität des Bodenradar mit kontinuierlicher Messung auch auf langen Strecken im Vergleich mit der Seismik (obgleich in seltensten Fällen und nur bei geeigneten Untergründen sogar mobile Schallaufnehmer-Ketten von einem Fahrzeug gezogen werden).
- das hohe vertikale und vor allem horizontale Auflösungsvermögen des Bodenradars, wenn bei kontinuierlicher Messung Registrier- und Informationsraten bis hinunter zu 3 cm problemlos möglich sind (man stelle sich das technisch bei der Seismik vor!).
- die Messungen mit dem Bodenradar in bebauten Arealen, bis unmittelbar an Gebäude heran und selbst innerhalb von Gebäuden.

Widerstandsgeoelektrik

Geoelektrik: Messung des spezifischen Widerstandes und der induzierten Polarisierung von Gesteinen oder anderen Materialien über direkte Einspeisung von Gleichströmen oder sehr niederfrequenten Wechselströmen in den Untergrund.

Widerstands-Tiefensondierung. - Messung über einem geschichteten Untergrund zur Ermittlung von Schichtmächtigkeiten bzw. Tiefenlage von Horizonten sowie der vertikalen Widerstandsverteilung.

Widerstands-Horizontalsondierung. - Messung von lateralen Widerstandsänderungen, meist zur Erfassung steil stehender Strukturen.

Electrical Imaging. - Kombination von Tiefen- und Horizontalsondierung zur Untersuchung und Modellierung zweidimensionaler Widerstandsstrukturen.

Widerstands-Tomographie. - Untersuchung dreidimensionaler Widerstandsstrukturen

18 Geoelektrik und Bodenradar - gemeinsame Untersuchungen

Zwei methodisch völlig unterschiedliche Messverfahren, die sich in sehr vielen Fällen sehr gut ergänzen.

Vorteil Geoelektrik (im Vergleich mit Bodenradar):

- untersucht andere Gesteins- und Material-Parameter: Widerstand und induzierte Polarisierung
- unterscheidet (pauschal) elektrisch schlecht leitende Grundwasserleiter (z.B. Sande, Kiese, ton-arme Festgesteine) und elektrisch gut leitende Grundwasserstauer (bindige Schichten, Tone Mergel) (Radar nur sehr bedingt)

- mit der induzierten Polarisation Beurteilung hydraulischer Eigenschaften
- erzielt leicht größere Untersuchungstiefen

Nachteil Geoelektrik (im Vergleich mit Bodenradar):

- geringeres, mit der Tiefe stark abnehmendes Auflösungsvermögen
- teilweise schwierigere Auswertung und Interpretation (grobe Fehler bei unerfahrenen Anwendern)
- größerer Aufwand im Gelände (Kabel-Auslagen!)
- stärkere Einschränkung durch Bebauung und Versorgungsleitungen



Abb. 27. Geoelektrische Widerstandsmessungen - Electrical Imaging. Einschub das Messgerät LIPPMANN 4point 10W für spektrale induzierte Polarisation mit acht Frequenzen.

Gemeinsame Untersuchung mit Bodenradar und Geoelektrik

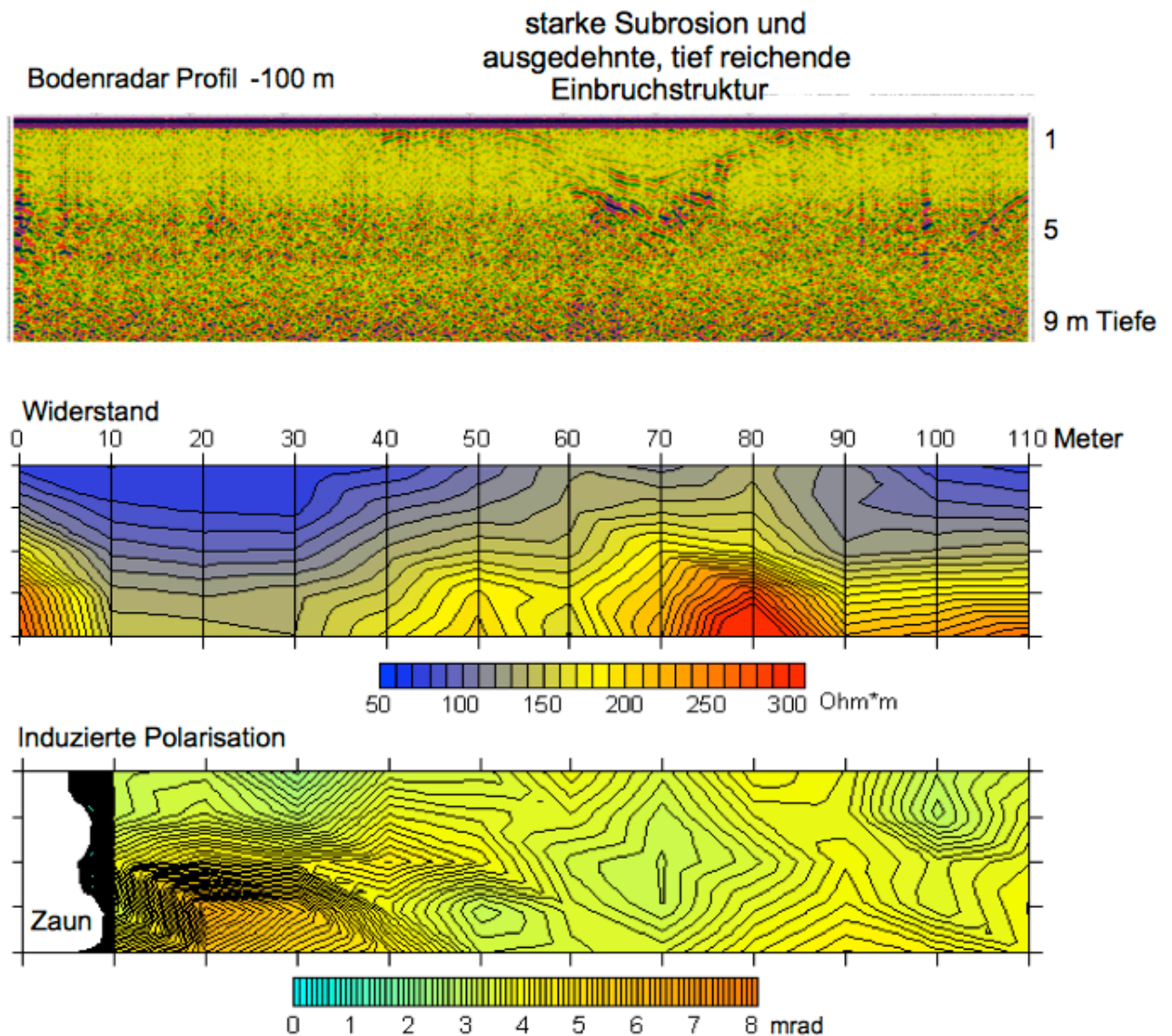


Abb. 28. Kombinierte Messung Bodenradar und komplexe Widerstandsmessung (Electrical Imaging) für Widerstand und induzierte Polarisation über einer mächtigen und tiefreichenden Subrosionszone. Die gemeinsame Interpretation der verschiedenen Parameter-Bilder auf demselben Messprofil erlaubt weitgehende Schlüsse über den einbettenden Untergrund.

19 Bergschäden: Bodenradar und das Digitale Geländemodell

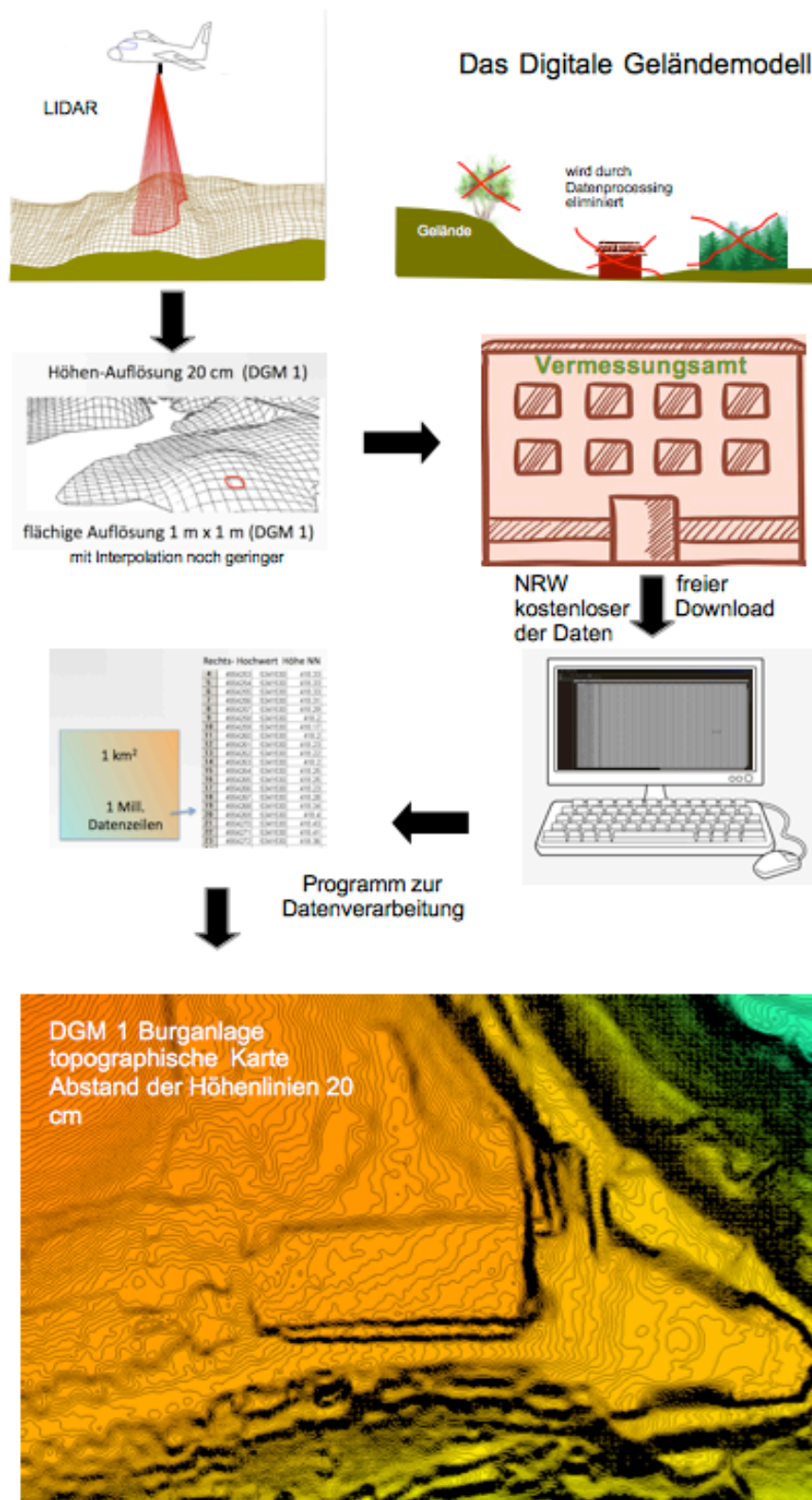


Abb. 29. Prinzip des Digitalen Geländemodell: Von der Luftaufnahme zu den Kartenbildern.

Das Digitale Geländemodell (DGM) beschreibt die Geländeoberfläche mit Datensätzen eines dreidimensionalen Koordinatensystems mit Rechts (X)- und Hochwerten (Y) der üblichen Gauß-Krüger- oder UTM-Netze bzw. von geographischer Länge und Breite, sowie der Geländehöhe (Z) über Normalhöhennull (NHN) an regelmäßigen Gitterpunkten. Die Daten werden aus einer Befliegung mit einem Laser-Scanning (LIDAR, engl. Light Detection and Ranging) gewonnen, wobei aus den Primärsignalen des DOM (= digitales Oberflächenmodell) durch ein Datenprozessing alle Gebäude und die Vegetation herausgerechnet werden, sodass das DGM selbst in Waldgebieten die Oberfläche des Bodens sehr genau wiedergibt (Abb. 31). Die Lagegenauigkeit der Punkte beträgt beim DGM 1 ca. $\pm 0,5$ m bei einer Höhengenaugigkeit besser als $\pm 0,2$ m, was durch Interpolation weiter verringert werden kann. Größere Datensätze stehen als DGM 2 oder DGM 5 zur Verfügung.

Der "Verbraucher" kann mittlerweile die Daten für ganz Deutschland erwerben, wobei das in NRW kostenlos online möglich ist!

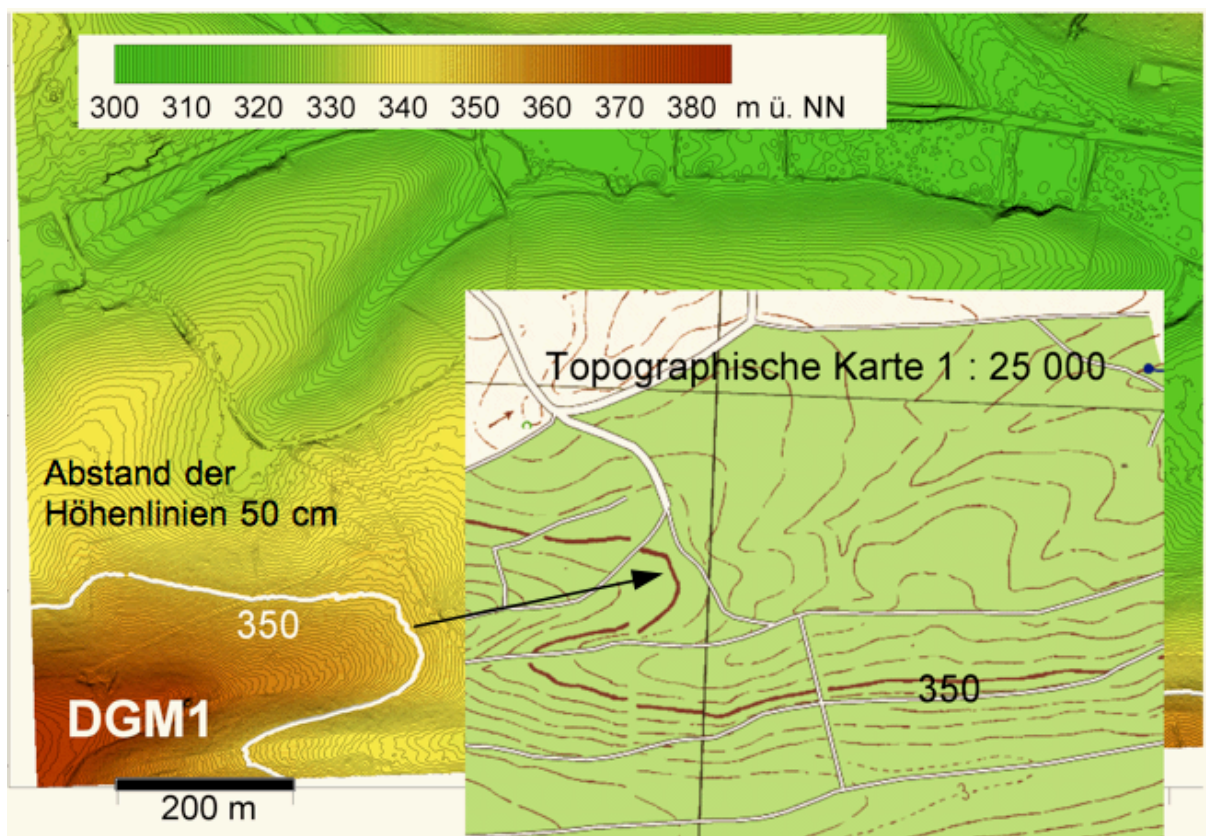


Abb. 30. Beispiel für einen Vergleich eines Ausschnitte der offiziellen topographischen Karte 1 : 25 000 mit einer aus dem DGM 1 gewonnenen topographischen Karte, für die hier ein Abstand der Höhenlinien von 50 cm gewählt wurde, was noch verkleinert oder aber auch vergrößert werden kann.



Abb. 31. Digitales Geländemodell DGM 1 im dichtesten Wald: Die Schummerungskarte zeigt einen Hangrutsch mit intensiven Fließstrukturen - Lehrbeispiel für jedes Ingenieurbüro.

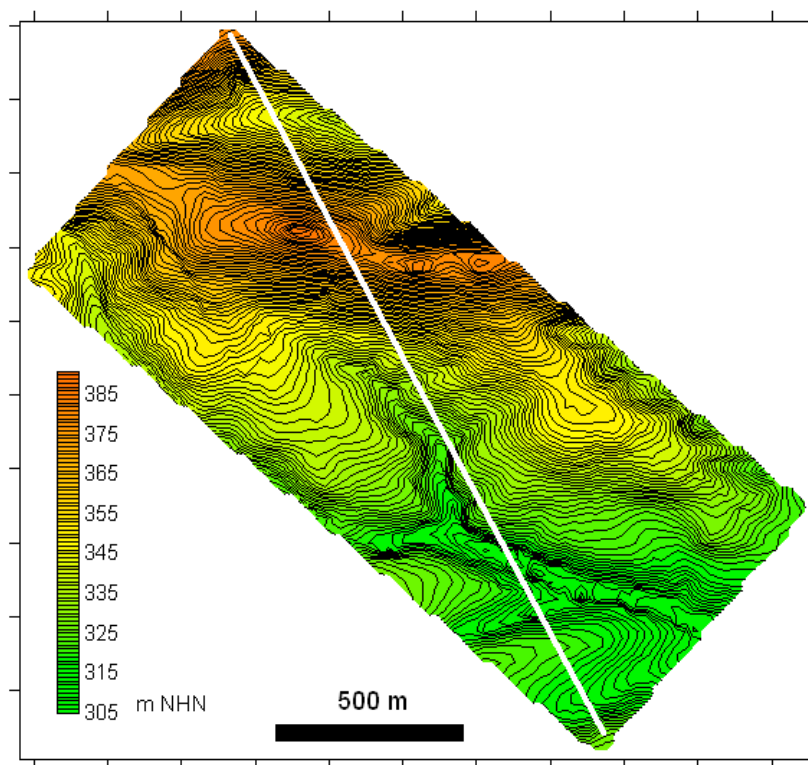


Abb. 32. Aus topographischen Karten des DGM 1 können beliebige Geländeschnitte konstruiert werden, was hier für die weiße Profillinie im folgenden Bild realisiert wurde. Für alle Kartendarstellungen können beliebige Farbskalierungen und Maßstäbe ausgewählt werden. Voraussetzung ist ein dafür ein geeignetes Programm (hier SURFER) und Erfahrung im Umgang damit.

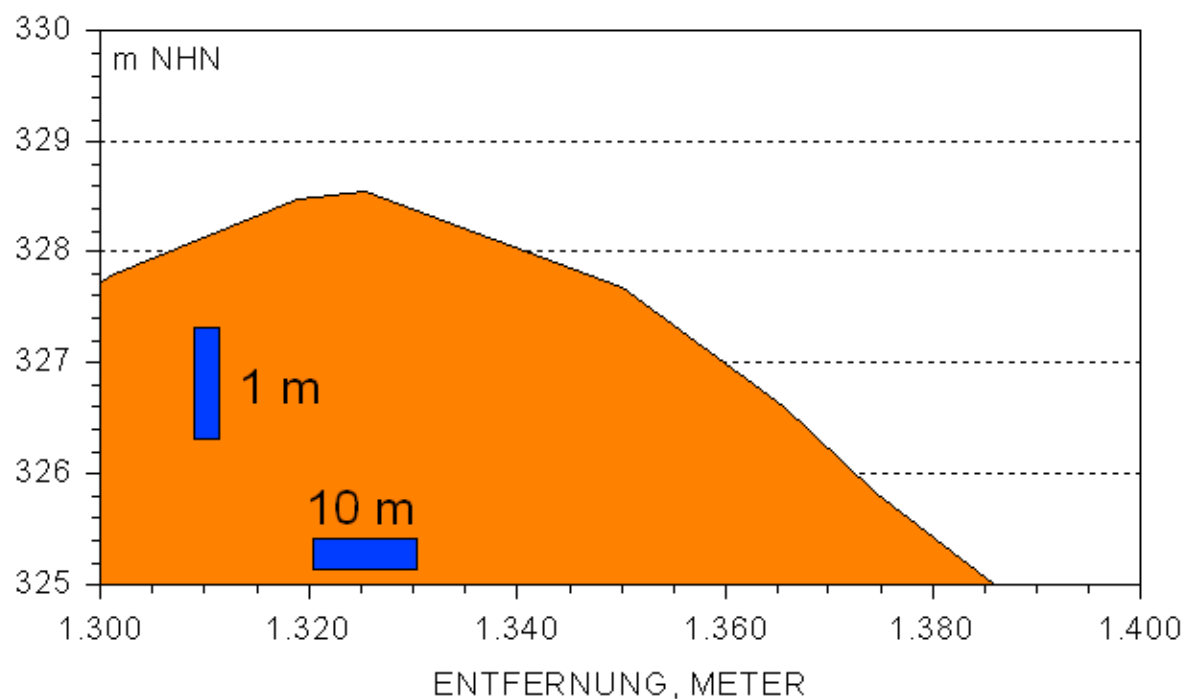
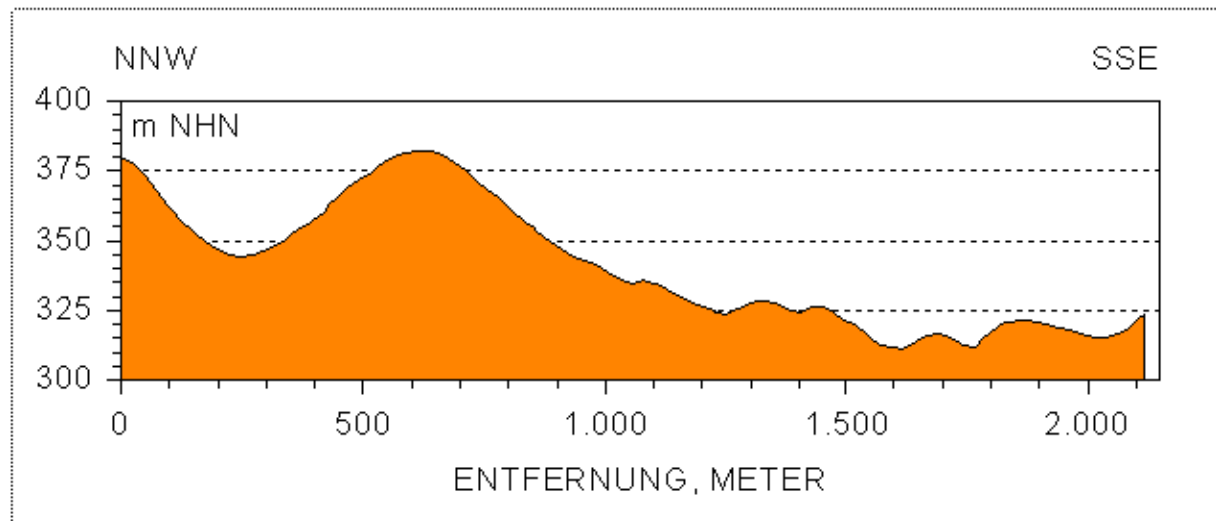


Abb. 33. Das Höhenprofil für die Strecke der vorhergehenden Karte in Abb. 32. Wie bei den Karten des DGM 1 können die Profile die Höhen auch bis in den Bereich von 20 cm und mit Interpolation noch stärker aufgelöst werden. Einen solchen Ausschnitt zeigt das Höhenprofil darunter

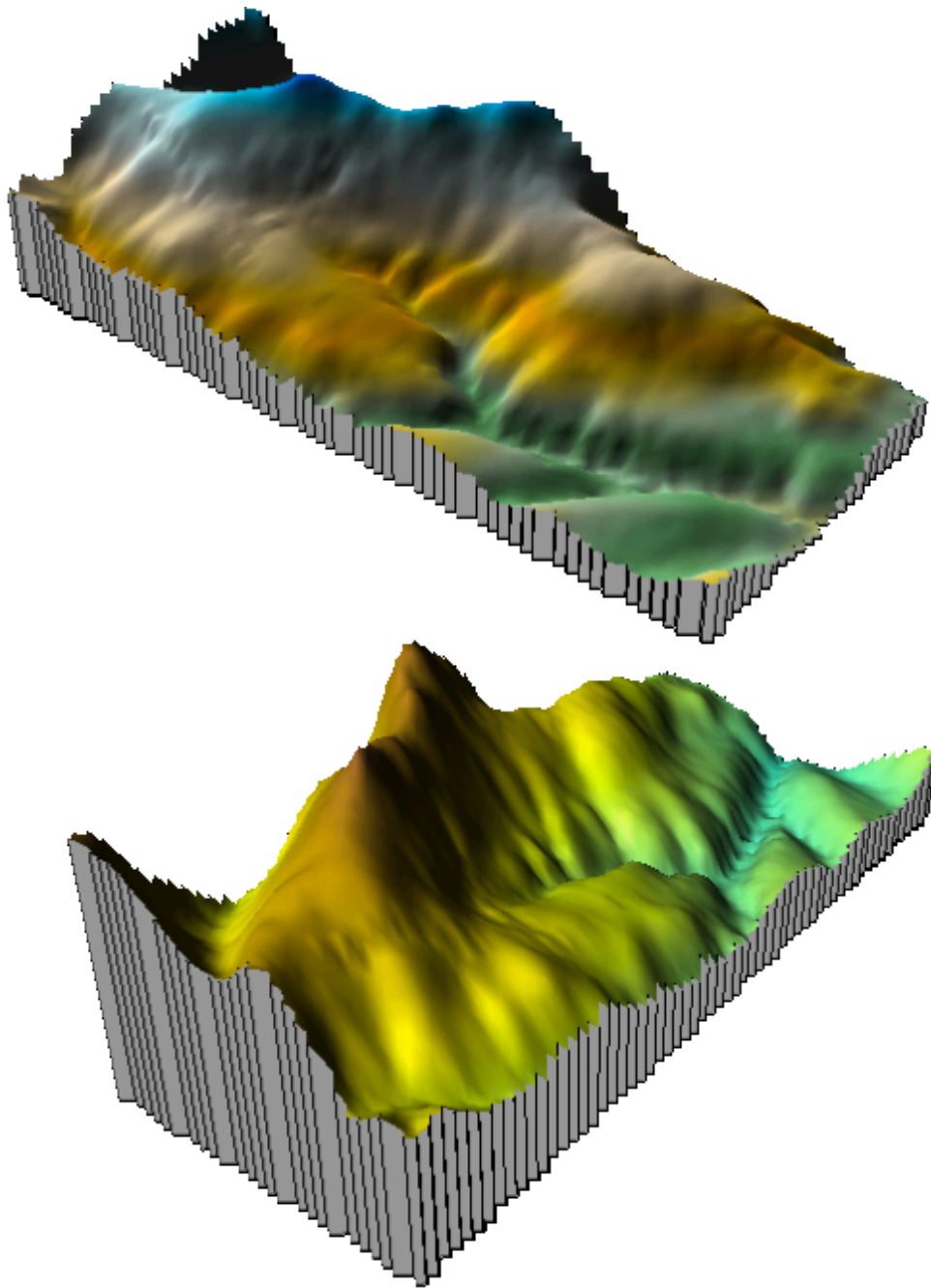


Abb. 34. Aus den Daten des Digitalen Geländemodells können unter vielen anderen Möglichkeiten auch 3D-Darstellungen der Topographie erstellt werden. Außer beliebigen Farbskalierungen können durch Rotation und Kippung beliebige Blickwinkel erzeugt werden. Hier zwei 3D-Ansichten der obigen Karte.

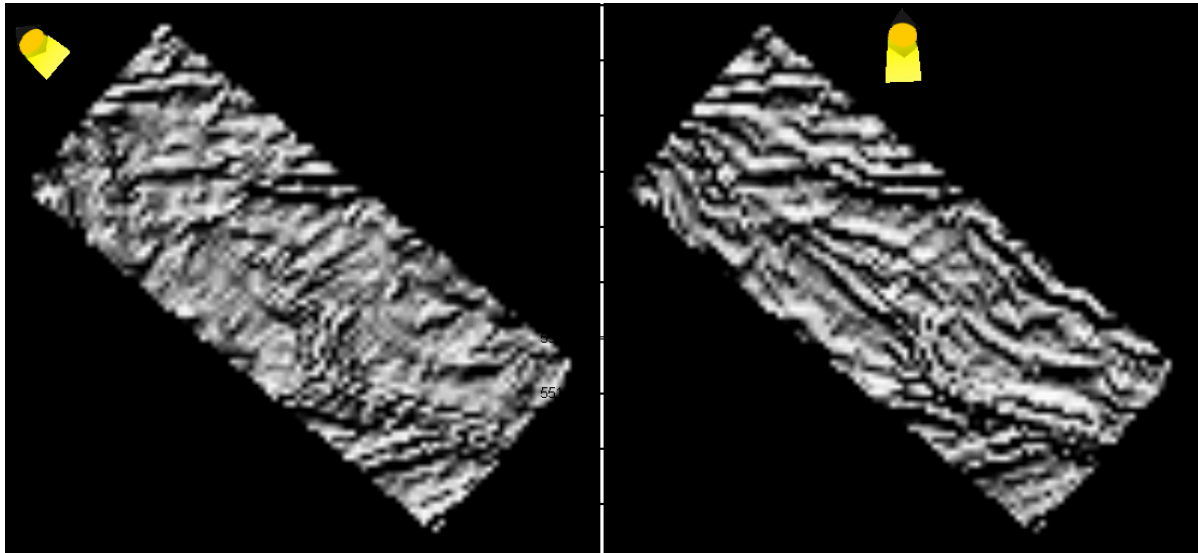


Abb. 35. Erfahrene Anwender können aus den Daten noch sehr viel mehr "herausholen". Hier sind für die obige Karte spezielle Richtungsfilter berechnet und in einer weiteren Möglichkeit als Schummerungskarte (beleuchtetes Relief) dargestellt. Hier erkennt man ohne Zweifel, dass der Prozess geologische Hauptstörungen einer intensiven Tektonik "herausgearbeitet" hat. Der Hintergrund ist leicht zu verstehen, wenn in dem betrachteten Gelände weiche und harte Schichten miteinander abwechseln und Verwerfungen an den Hängen weiche neben harte Schichten verschoben haben, was die Verwitterung und Erosion dann als morphologische Signatur herauspräpariert.

20 Ein Beispiel: Bodenradar und Digitales Geländemodell bei starken Hausschäden

Damit kann es beginnen: Luftbildaufnahmen mit z.B. Google Earth und der Analyse auch historischer Karten in verschiedenen Jahren und zu verschiedenen Jahreszeiten (Abb. 38). Für das zu besprechende Beispiel zeigt Abb. 36 das Google Earth-Luftbild für ein Haus mit starken, fortschreitenden Risssschäden. Hier lässt sich bereits in geologischer Betrachtung eine Mitursache ahnen: offensichtlich eine breite geologische Störungszone, die mehr oder weniger genau auf das Haus zuläuft.

Sehr viel präziser wird dann das Bodenradar mit seinen Messungen am Haus.



Abb. 36. Die Lage des betroffenen Hauses (roter Pfeil) in einer bereits fotografisch erkenntlichen breiten geologisch-tektonischen Störungszone (weiße Pfeile) mit Verwerfungen und Subrosion (Karst-Lösung, Feinkornausspülung). Bei solchen Luftbildern ist es sehr wichtig, zu welcher Jahreszeit und in welcher Vegetationsperiode die Aufnahme gemacht wurde. Im ungünstigen Fall der Bodenfarben sieht man überhaupt nichts, zu günstigen Zeit sehr viel, wie hier ersichtlich. Das Digitale Geländemodell ist davon nicht betroffen, da es von der Vegetation überhaupt nicht beeinflusst wird (siehe die folgenden Bilder).

Einschub: Das Digitale Geländemodell und Luftbilder (z.B. Google Earth)

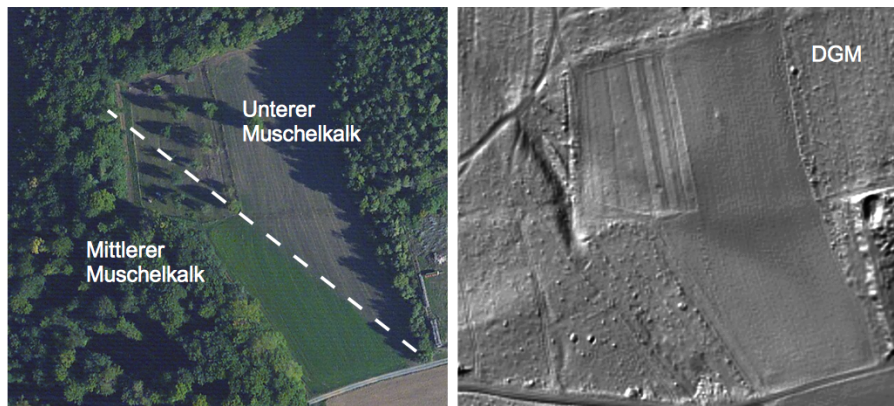


Abb. 37. Eine im Google Earth-Bild gut erkennbare Verwerfung im Muschelkalk, die sich ganz offensichtlich auch in der Schummerungskarte des Digitalen Geländemodells DGM 1 abzeichnet.



Abb. 38. Dieselbe Verwerfung in Google Earth in verschiedenen Jahren und bei unterschiedlichem Vegetationsstand. Zu manchen Zeiten ist die Verwerfung im Luftbild überhaupt nicht sichtbar. Im DGM 1 sieht man sie immer.

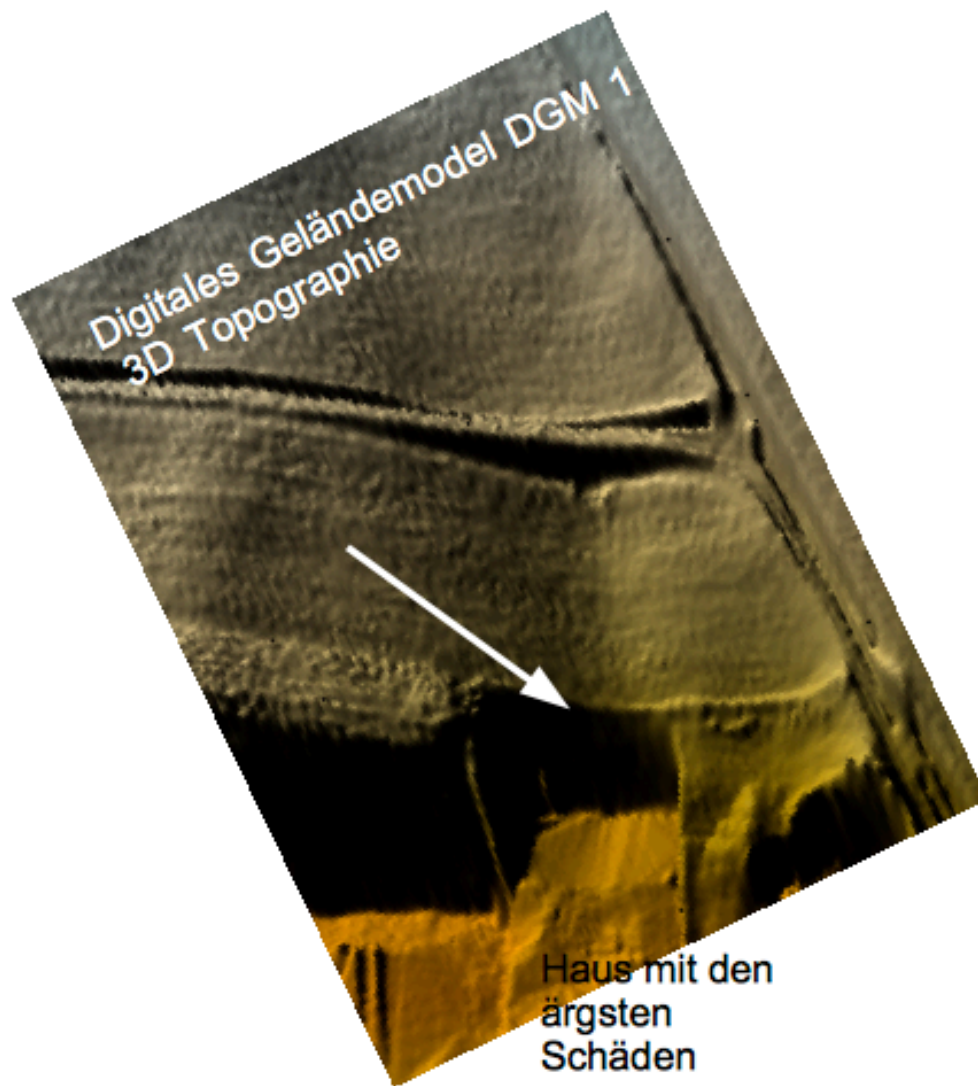


Abb. 39. Das Lage des Hauses direkt in der Subrosionszone. Das Digitale Geländemodell DGM 1 zeigt deutlich die Einmuldung als Folge von Sackungen im Gestein.

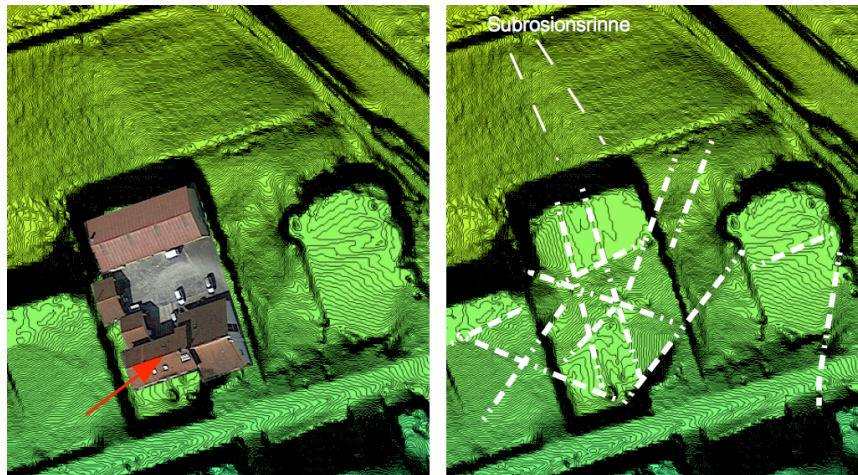


Abb. 40. Das DGM sieht geringste tektonische und subrosive Bodenversätze an der Oberfläche; das Bodenradar kann sie quantitativ in die Tiefe fortsetzen. Beim DGM 1 ist der "Trick" einer Art optischen Filterung möglich, der linienhafte Strukturen fürs Auge besonders deutlich machen kann. Dazu wird der Abstand der Isolinien derart eng gewählt (hier durch Interpolation 2,5 cm), dass sie auch bei schwächsten Geländeänderungen streifenartig bis hin zu schwarzen Balken werden. Man erkennt, dass nicht nur die Subrosionszone von Bedeutung ist, sondern Systeme begleitender tektonischer Störungen an den wachsenden Hausschäden beteiligt sein dürften (siehe den Vergleich der beiden Bilder mit dem in das DGM 1 hineinprojizierten Haus). Die größten Schäden sind bisher am Haus mit dem roten Pfeil aufgetreten.

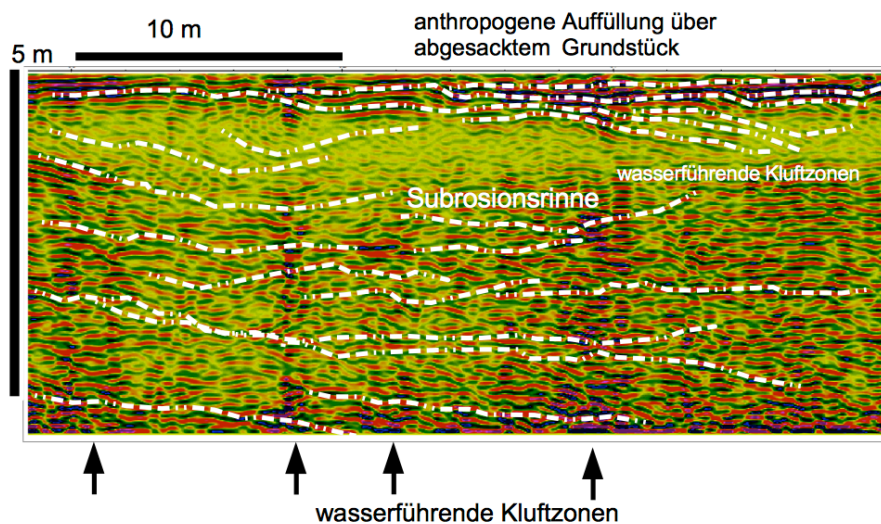


Abb. 41. Beispiel eines Radargramms (300 MHz), das im Hof des betreffenden Hauses gemessen wurde. Die auswählend markierte Interpretation sieht einen ziemlich stark gestörten Untergrund bei einem sonst und normal gut geschichteten Muschelkalk-Untergrund. Eine starke Klüftung in der tektonischen Bruchzone, die das Haus quert, wird auch in den vertikalen Strängen deutlich erhöhter Radar-Reflektivitäten sichtbar, die, wie in Abschnitt 9 erläutert, Grenzflächen-Wellen (Scholte-Wellen) widerspiegeln.

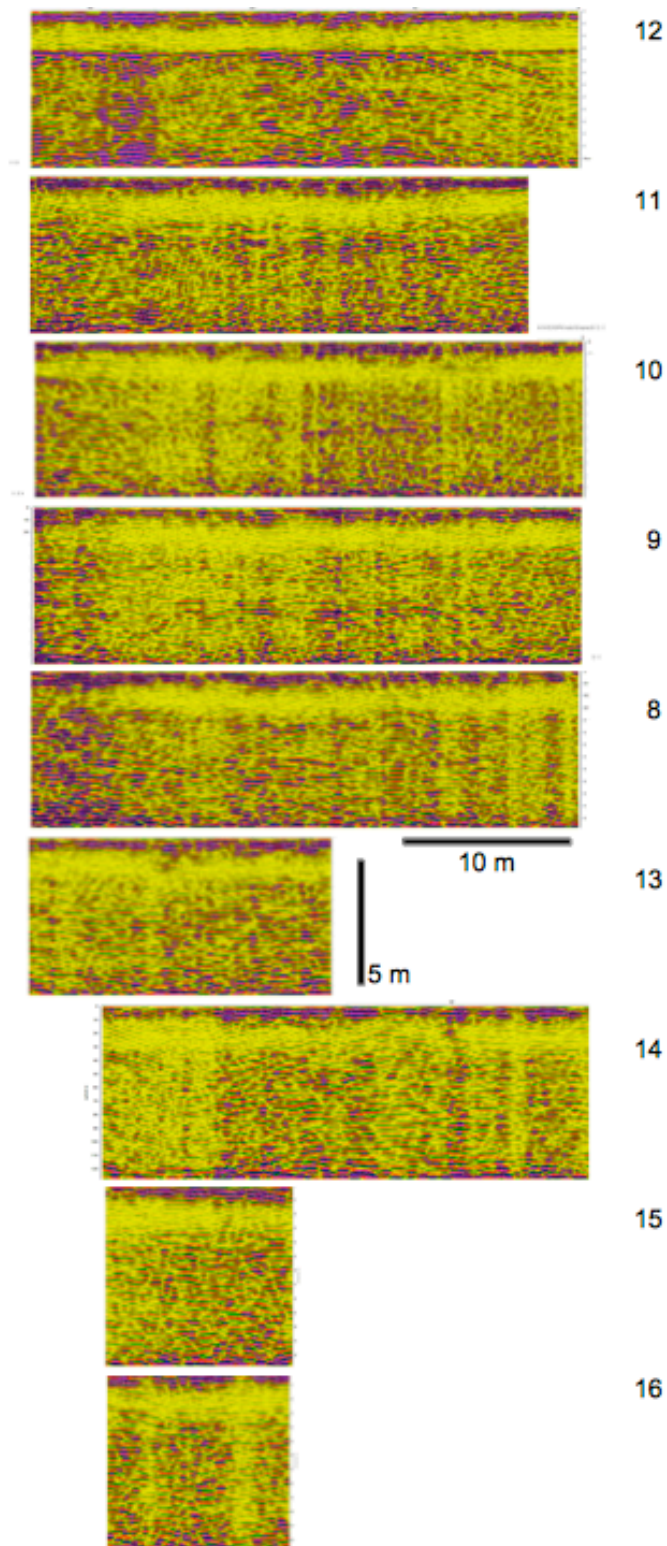


Abb. 42. Zu einem Bodenradar-Projekt gehören immer mehrere Profile, die mehr oder weniger dicht parallel oder bei speziellen Detailuntersuchungen auch im Kreuz verlaufen. Die Zusammenstellung hier zeigt die Profile, die im Abstand von jeweils 4 m im Hof des Hauses gemessen wurden. Teilweise gute Korrelationen von Strukturen von Profil zu Profil und abrupte Versätze charakterisieren das in DGM 1 bereits angesprochene tektonische Muster direkt im Bereich des Hauses.

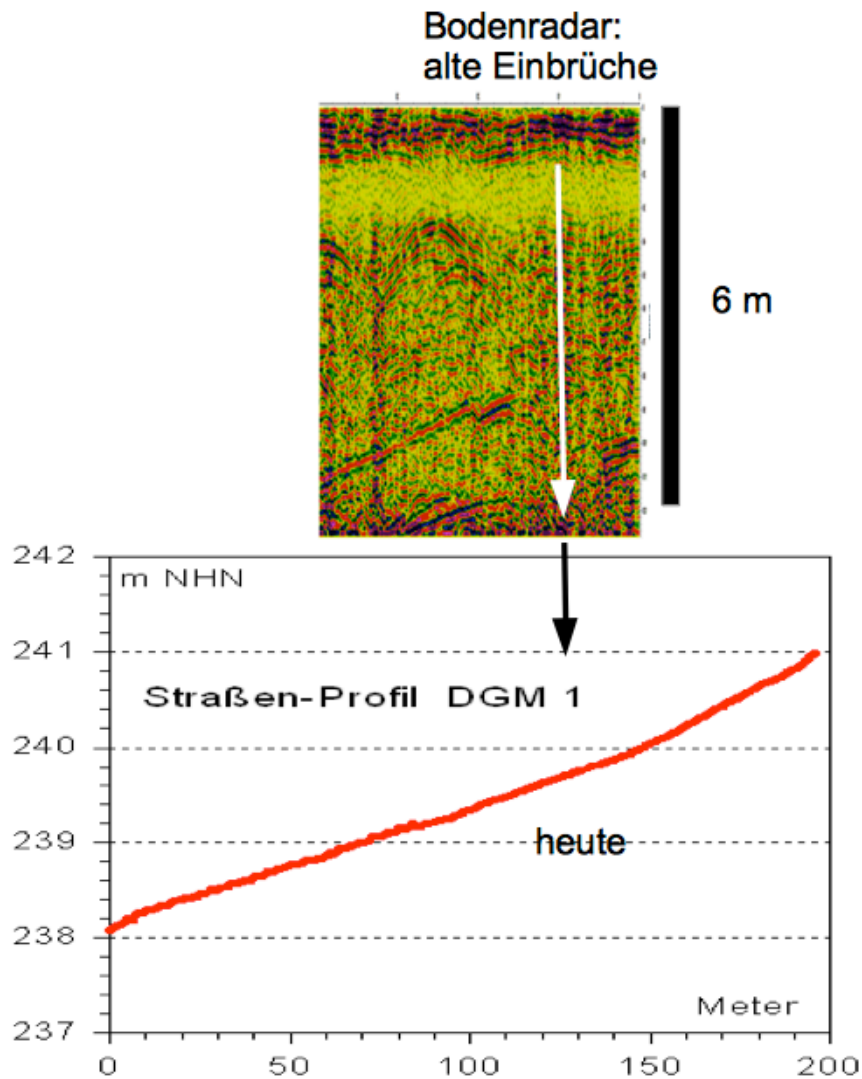


Abb. 43. Radar-Profil südlich vom Haus entlang und auf der Straße. Wie in den Beispielen der Abb. 19 und 21 sieht man hier wieder das Bodenradar-"Video" der geologischen Vorgeschichte mit der zeitlichen Abfolge der Straßenabsenkung und Wiederauffüllung. Im Profil des Digitalen Geländemodells erkennt man an der leichten Einmuldung die heute noch aktive Einsenkung, und ein zukünftiger Straßeneinbruch ist hier vorhersehbar. Für die Risschäden am Haus bedeutet der Befund, dass Tektonik und Subrosion direkt unterm Haus hindurchziehen.

21 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

-- Die bisher bei Bergschäden praktizierten Bodenuntersuchungen durch Ingenieurbüros mit Bohrungen, Rammsondierungen und Rammkernsondierungen entsprechen schon seit langem nicht mehr einem modernen Stand von Wissenschaft und Technik.

-- Die punkt- bzw. bleistiftförmigen Aufschlüsse ergeben Daten genau an diesem Punkt bzw. entlang dieses Bleistifts, aber sie sehen nicht, was 1 m oder weniger genau daneben los ist, schon gar nicht, was bei einem Abstand der Sondierungen von häufig 20 - 30 m in einem größeren Volumen dazwischen geologisch und bodenmechanisch gegeben ist.

-- In geotechnischen Gutachten werden Schichtinformationen dann über diese größeren Strecken interpoliert, wobei ein kritischer Bereich dazwischen vom Gutachter ignoriert wird. Bekannt geworden ist das Beispiel beim Bau der Würzburger Fachhochschule, als man während des Baus bei Gründungsarbeiten plötzlich feststellte, dass das werdende Gebäude direkt auf einer markanten geologischen Störungszone gebaut wurde. Mehrkosten laut Zeitungsberichten 1 Mill. Euro für komplett neue statische Berücksichtigung. Der Leiter des verantwortlichen staatlichen Bauamtes rechtfertigte den riesigen Mehraufwand mit dem Umstand, dass beim Baugrund-Bohren des Ingenieurbüros mit 40 m Bohrabstand diese geologische Störungszone leider durch das Bohrraster gefallen sei und die Mehrkosten unvermeidlich gewesen seien.

-- Fehlinterpretationen von geologischen Gegebenheiten im Untergrund wegen Fehlplanungen von Ingenieurbüros durch den Verlass auf weitabständige Bohrungen und Sondierungen mit zum Teil ganz erheblichen Mehrkosten (nicht immer gerade 1 Mill. Euro) sind Legende, ohne dass daraus Lehren gezogen werden.

-- Messungen der Geophysik mit dem breiten Spektrum an Messverfahren, die dem jeweiligen Projekt schlüssig angepasst werden können, sollten zwingend vor allen Bohr- und Sondierungsvorhaben durchgeführt werden.

-- Geophysikalische Messungen erfassen Untergrund-Parameter zerstörungsfrei und kontinuierlich, wenn gewünscht z.B. beim Bodenradar im 3 cm-Abstand. Da fällt nichts durch ein Raster, wenn sinnvoll geplant und im Gelände durchgeführt.

-- Sie können bei starken lateralen Schwankungen der Untergrundverhältnisse durch eine vielfach gegebene Volumen-Integration mittlere interessierende Größen liefern, währen bei Bohrungen und Sondierungen je nach Ansatz schon alle paar Meter was komplett Anderes angetroffen wird.

-- Geophysikalische Messungen sind kostengünstig, wobei Bohrungen und Geophysik nicht gegeneinander aufgerechnet werden dürfen, weil der jeweilige methodische Ansatz ein völlig anderer ist. Was sich aber grundsätzlich unabhängig von der kontinuierlichen Detailgenauigkeit rechnet, ist, häufig

hohe Bohrkosten stark zu reduzieren, wenn man nach der Geophysik den Bohrumfang stark reduzieren kann und darüber hinaus die Bohrungen dort platziert, wo es nach der Geophysik Sinn macht und man nicht unkontrolliert IRGENDWO bohrt und sich mit einem Stand auf einer unerkannten geologischen Singularität befindet.

-- Kein Mensch aus der Erdölindustrie und der tiefen Geothermie käme auf die Idee, ohne vorbereitende intensive Geophysik eine Bohrung abzuteufen. Im Kleinen und bei Bergschäden tun die Ingenieurbüros und ihre Auftraggeber genau das: irgendwo im großen Abstand die Rammkernsondierungen und Bohrungen hinsetzen.

-- Genauso im Argen liegt die Platzierung von Grundwassermessstellen mit demselben Dilemma, dass sie in aller Regel irgendwo hingesezt werden (wo das Bohrgerät gut hinkommt), aber nicht zuvor mit der Geophysik geklärt wird, ob die Messstelle nicht auf einer geologischen Singularität steht und alle daraus gewonnen Daten Makulatur sein können.

-- der Schwerpunkt dieser Ausführungen liegt bei der Anwendung des Bodenradar bei Bergschäden. Das hat seinen Grund darin, dass es mit neuesten, hochleistungsfähigen Geräten und Auswerteprozeduren das im Gelände hochauflösende, kostengünstig zu operierende und an die Problematik bestangepasste Verfahren sein dürfte.

-- In Fällen, wo auch andere geologische Parameter der Gesteinsfazies und struktureller Gegebenheiten wichtig sein können, sind professionell durchgeführte Messungen der Oberflächen-Seismik, seit einiger Zeit erfolgreich auch mit der Scherwellenseismik, in Betracht zu ziehen. Korrekte Durchführung seismischer Messungen mit einem adäquat leistungsfähigen Equipment, sowie ein Datenprozessing mit Auswertung und Interpretation gerade im meist oberflächennahen Bereich der Bergschäden erfordert fachlich versierte Anwender.

-- Häufiger als die Seismik können Messungen der Widerstandsgeoelektrik eine feine synchrone Ergänzung zum Bodenradar sein, was damit zusammenhängt, dass sie zusammen mit den geoelektrischen Parametern sozusagen führend im Bereich der Hydrogeologie und Hydraulik sind, was bei Bergschäden ja häufig eine nicht unerhebliche Rolle spielt.