

Struktur, Eigenschaften und Gefährdungspotenziale des
oberflächennahen Untergrunds in historischen
Erzbergbaugebieten des zentraleuropäischen Mittelgebirgsraums

Von der Fakultät für Physik und Geowissenschaften
der Universität Leipzig
genehmigte

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt

von Magister Artium Frank Russow

geboren am 10.11.1967 in Darmstadt

Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Heinrich
Prof. Dr. Gerry Garland
Prof. Dr. Karl-Josef Sabel

Tag der Verleihung:

Bibliographische Beschreibung:

Russow, Frank

Struktur, Eigenschaften und Gefährdungspotenziale des oberflächennahen Untergrunds in historischen Erzbergbaugebieten des zentraleuropäischen Mittelgebirgsraumes

Universität Leipzig, Dissertation

270 S., 213 Lit., 49 Abb.; 17 Phot.; 77 Tab.

Referat:

Thema der vorliegenden Arbeit ist die Identifikation, Differenzierung und Bewertung von vorhandenen Schwermetallreservoirs im Hangbereich historischer Erzbergbaugebiete im Nordpfälzer Bergland und dem Spessart. Dazu wurden auf der Grundlage von 115 Bodenprofilen entlang von 14 Hangsequenzen die holozäne Umweltgeschichte, die Verbreitung und Struktur sowie ausgewählte ökologische Eigenschaften der quartären Hangsedimente erstmalig integrativ analysiert. Besondere Beachtung fanden hierbei die Schwermetallgehalte der quartären Hangsedimente und ihr immanentes Gefährdungspotenzial, das für die Untersuchungsgebiete zum ersten Mal auf Grundlage der aktuellen rechtlichen Grundlagen bestimmt wurde. Die Anwendung einer hochauflösenden Boden- und Sedimentaufnahme mit exemplarischer Beprobung ermöglichte die Analyse vieler Details, Merkmale und Eigenschaften der Sedimente und Bodenbildungen dieser (stark) gestörten Standorte im Mittelgebirgsbereich.

Zusammenfassung der wissenschaftlichen Ergebnisse zur Dissertation

*Struktur, Eigenschaften und Gefährdungspotenziale des oberflächennahen Untergrunds in
historischen Erzbergbaugebieten des zentraleuropäischen Mittelgebirgsraums*

der Fakultät für Physik und Geowissenschaften der Universität Leipzig
eingereicht von

Magister Artium Frank Russow

angefertigt an

Institut für Geographie / Abteilung Physische Geographie

April 2005

Zusammenfassung

Problematik, Aufgabenstellung und Zielsetzung

In zentraleuropäischen Mittelgebirgsräumen wurden im Abstrombereich ehemals bergbaulich genutzter Standorte häufig erhöhte Schwermetallgehalte in den Auensedimenten festgestellt (z.B. FOELLMER 1999; ULIQUE et al. 1998). Die an die sedimentäre Matrix gebundenen Schwermetalle können situativ mobilisiert werden, deshalb sind sie ein Risiko für aquatische und terrestrische Ökosysteme (z.B. FÖRSTNER 1993).

Dagegen fehlen Arbeiten über die Zwischenspeicherung der Schwermetalle im quartären Sedimentkörper von Hangbereichen mit unverritzten und explorierten Erzmineralisationen, wenn man von Einzeluntersuchungen über Dispersionshöfe (SEIM & TISCHENDORF 1990) und Halden (z.B. MANZ 1995; WIEBER 1994) absieht. Als Folge einer komplexen jungholozänen Umweltgeschichte ist aber standörtlich mit exponierten schwermetallreichen Basislagen des sekundären Dispersionsbereichs sowie belasteten Solumsedimenten in verschiedenen Hangsegmenten zu rechnen. Auch die in diesen Hangsedimenten gespeicherten Schwermetalle können ein schutzgutbezogenes Gefährdungspotenzial (vgl. BBODSCHG 1998; BBODSCHV 1999) aufweisen. Diese Aspekte blieben im Untersuchungsfeld zur Schwermetallproblematik bisher unbeachtet.

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel der Identifikation, Differenzierung und Bewertung von vorhandenen Schwermetallreservoirs im Hangbereich historisch-subrezenter Erzbergbaugebiete im Nordpfälzer Bergland (Typlokalitäten: Hangsequenzen Grüner Löwe, Kupferberg, Schartenrück, Kurzhang-I, Kurzhang Bank, Pfarrfeld Große Halde, Pfarrfeld Kleine Halde sowie Spitzenberg-I bis -IV) und dem Spessart (Typlokalitäten: Hangsequenzen Burgberg-I bis -III).

Dazu stellt sich die Aufgabe, die holozäne Umweltgeschichte, die Verbreitung und Struktur sowie ausgewählte ökologische Eigenschaften der quartären Hangsedimente erstmalig integrativ zu analysieren. Besondere Beachtung finden hierbei die Schwermetallgehalte der quartären Hangsedimente und ihr immanentes Gefährdungspotenzial, das für die Untersuchungsgebiete zum ersten Mal auf Grundlage der aktuellen rechtlichen Grundlagen bestimmt wird.

Die Anwendung einer hochauflösenden Boden- und Sedimentaufnahme mit exemplarischer Beprobung ermöglicht die Analyse vieler Details, Merkmale und Eigenschaften der Sedimente und Bodenbildungen dieser (stark) gestörten Standorte im Mittelgebirgsbereich. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse beruhen auf der Ansprache von 115 Bodenprofilen entlang von 14 Hangsequenzen.

Ergebnisse

Verbreitung und Struktur des oberflächennahen Untergrunds in historischen Erzbergbaugebieten

Die ungestörte Decklagenabfolge (Terminologie: AG BODEN 1994) der Hangbereiche aller Hangsequenzen ist Hauptlage über Basislage. Die häufig erosiv gekappte Hauptlage koinzidiert mit Ah- und Bv-Horizonten (vgl. SEMMEL 2002: 172). Örtlich liegt die Hauptlage dem Festgestein, vereinzelt dem saprolithischen Zersatz auf. In manchen Profilen der Hangsequenzen des Spessarts ist die Basislage im Gegensatz zu den bei SABEL (1996) präsentierten generalisierten Profilen mehrgliedrig ausgeprägt. In der Basislage sind C-Horizonte entwickelt. Die Mittellage fehlt in den Untersuchungsgebieten. Bei wenigen Hangsequenzen des Nordpfälzer Berglands überdeckt die Oberlage die Hauptlage. Das Auftreten der Oberlage fällt dabei mit Podsolierungserscheinungen (Ahe-Horizonte) zusammen (vgl. SEMMEL 2002: 178). Bei der Hangsequenz Grüner Löwe konnte erstmals bewiesen werden, dass die Oberlage entgegen der Definition (vgl. AG BODEN 1994: 363f.) nicht nur im periglazialen Milieu gebildet wird, sondern auch im Jungholozän entstehen kann, was von VÖLKEL et al. (2002: 51) vermutet wurde.

Die hochauflösende Standortanalyse führte zum Nachweis von Solumsedimenten in verschiedenen Hangsegmenten vieler Hangsequenzen. Kolluviale Umlagerungsbildungen treten entgegen der Darstellungen in vielen Lehrbüchern (z.B. AHNERT 1996: 174; EITEL 1999: 16) bei vielen Hangsequenzen des Nordpfälzer Berglands auch am Ober- und Mittelhang auf. Somit werden Ergebnisse jüngerer Arbeiten bestätigt, wonach diese Sedimente in allen Hangabschnitten anzutreffen sind (z.B. BUBENZER 1999: 76f. NILLER 1998: 279f.). Die kolluvialen Umlagerungsbildungen bedecken i.d.R. die Hauptlage, manchmal aber auch direkt das Festgestein. In wenigen Profilen aus dem Nordpfälzer Bergland überdeckt eine Umlagerungsbildung die Basislage, ähnliche Abfolgen werden u.a. auch bei BUBENZER (1999) beschrieben. Eine Besonderheit stellt Profil K5 der Hangsequenz Kupferberg dar. Dort überwandert eine kolluviale Umlagerungsbildung ein Haldensubstrat. Die Umlagerungsbildungen tragen i.d.R. A- und M-Horizonte, in einem Profil der Hangsequenz Kupferberg wurde ein Ovh-Horizont angetroffen.

Halden sind als charakteristische Merkmale historischer Erzbergbaugebiete (z.B. BEUGE & DEGNER 2000: 109) in den Untersuchungsgebieten oft anzutreffen. In den Haldensubstraten fehlen häufig Oberboden- und O-Horizonte (vgl. MANZ 1995), örtlich werden aber auch A-Horizonte nachgewiesen (vgl. SCHMIDT 2000). Angesprochen werden dann mit Regosolen und Lockersyrosem weitverbreitete Böden historischer Erzbergbaureviere (vgl. z.B. WEISE et al. 1997).

In verschiedenen Hangsequenzen ermöglicht die hochauflösende Standortaufnahmetechnik die Ansprache biogener Sedimente (vgl. JOHNSON 1990; RUSSOW & HEINRICH 2001), die in vielen Lehrbüchern (z.B. AHNERT 1996; EITEL 1999; ZEPP 2002) negiert werden. In ihren Eigenschaften

ähneln diese Sedimente den Solumsedimenten, der Oberlage oder der Hauptlage. Einspülmassen verfüllter Windwurfmulden und aufgeworfenes Hügelmaterial der ehemaligen Wurzelteller werden bei den Hangsequenzen Schartenrück und Kupferberg als floralturbate Sedimente angesprochen. Faunalturbate Sedimente sind die durch Füchse und Dachse an die Oberfläche aufgeschleppten mineralischen Lockermaterialdecken der Hangsequenzen Kupferberg und Spitzenberg-I.

Die detaillierte Standortanalyse zeigte auch, dass sich im Hangbereich wichtige Parameter (z.B. Bodenart, Humusgehalt, Carbonatgehalt und Bodenreaktion) als Folge von Mineralisation und Nutzungsgeschichte kleinräumig deutlich verändern. Somit sind die auf Basis dieser Kenngrößen abgeleiteten ökologischen Eigenschaften des oberflächennahen Untergrunds in den Hangbereichen der untersuchten historischer Erzbergbaugebiete hochvariabel, was in der Arbeit vielfach dokumentiert wird. Eine induktive Zuordnung von einer ökologischer Eigenschaft zu einer quartären Deckschicht gelingt nicht. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Humusgehalte in der Arbeit wohl durchgängig zu hoch bestimmt wurden. Deshalb sind ökologische Bodeneigenschaften, zu deren Ableitung der Humusgehalt herangezogen wurde (effektive Kationenaustauschkapazität, Gesamtfilterwirkung in Abhängigkeit von KAK und Luftkapazität), fehlerbehaftet.

Die Genese des oberflächennahen Untergrunds in historischen Erzbergbaugebieten

Die hochauflösende Boden- und Sedimentansprache ermöglicht erste genetische Untersuchungen von Hangbereichen historischer Erzbergbaugebiete des zentraleuropäischen Mittelgebirgsbereichs. Der These von GERRARD (1992: 48), dass „*in temperate regions [...] the application of the catena concept is most in question*“ wird durch die Anwendung einer geeigneten Methodik widersprochen.

Bei der Hangsequenz Schartenrück wurden Profile ohne Hinweise auf Erosions- und Akkumulationsprozesse aufgegraben, was für Mittelgebirgsstandorte nach JÄGER (1994: 61f.) unwahrscheinlich ist. Dort wird der präanthropogene sedimentologische Ausgangszustand angetroffen. Aber auch bei allen anderen Hangsequenzen lässt sich anhand der außerhalb der engeren Abbaugebiete angetroffenen, wenig überformten Profile ein präanthropogener Relief- und Regolithzustand rekonstruieren.

Viele Profile zeigen Erosionsschäden oder eine kolluviale Überdeckung und belegen somit eine Aktivitätsphase (vgl. BORK et al. 1998: 18), die entweder mit der bergbaulichen Nutzung in direktem Zusammenhang steht („Aufschließen“ der Lagerstätte) oder ihr aber zeitlich vorgelagert ist (mittelalterliche Rodungsphase im Sinne von BORN 1989: 38). Eine solche Differenzierung wird in den aufgenommenen Profilen mangels datierbarem Material i.d.R. nicht realisiert. Lediglich in Profil GL19 der Hangsequenz Grüner Löwe wurde in einer etwa 200-300 Jahren alten kolluvialen Umlagerungsbildung ein kaum alteriertes Kupfererzfundstück gefunden. Hier lässt sich mit einiger Sicherheit auf eine bergbaulich induzierte Erosions-Akkumulationsdynamik schließen.

Bergbau hat bedeutende umweltgeschichtliche Folgen (vgl. JÄGER 1994: 71). Der oberflächennahe Untergrund des betroffenen Hangbereichs wird charakteristisch maskiert bzw. ge- und zerstört. Die bergbauliche Nutzungsphase dokumentiert sich durch typische Formen wie Tagebaue, Pingen, Halden etc. (vgl. ZEPP 2002: 302ff.), spezifische Boden-Sediment-Komplexe (Haldensubstrate, transformierte Deckschichten) und die Spuren einer bestimmten geomorphodynamischen Prozessdynamik (z.B. RUSSOW 2004). Auf den bergbaulich genutzten Hangbereichen werden deshalb die Hinweise auf zeitlich vorgelagerte umweltgeschichtliche Phasen im Sinne einer Intensitätsauslese (vgl. ROHDENBURG 1989: 135f., ZEPP 2002: 79) vernichtet.

In den Untersuchungsgebieten herrscht in der postmontanen Nutzungsphase weitgehend geomorphodynamische Stabilität infolge der Waldbedeckung (vgl. ROHDENBURG 1989: 120f.). Das bergbaulich geprägte Relief blieb erhalten, der Boden-Sediment-Komplex wurde strukturell kaum mehr überprägt. Lediglich floral- und faunalturbate Prozesse bewirken eine punktuelle bis flächenhafte Störung der Standorte bei gleichzeitiger Genese einer biogenen Sedimentdecke (vgl. RUSSOW & HEINRICH 2001; RUSSOW 2004). Bei der Hangsequenz Grüner Löwe konnte sich auf der ehemals tagebaulich genutzten Fläche keine den Boden-Sediment-Komplex konservierende Vegetation flächenhaft etablieren. Diese Fläche verharrt deshalb im Aktivitätszustand (vgl. ROHDENBURG 1989: 120f.) und unterliegt rezenten morphodynamischen Prozessen.

Das Schwermetallreservoir und sein Gefährdungspotenzial im Boden-Sediment-Komplex der Hangbereiche historischer Erzbergbaugebiete

In vielen Hangsequenzen der Untersuchungsgebiete existiert ein Schwermetallreservoir, das sich in Haldensubstrate, (kolluviale) Umlagerungsbildungen und periglaziale Deckschichten differenziert.

In den Haldensubstraten wurden, konvergierend zu zahlreichen einschlägigen Untersuchungsergebnissen (z.B. MANZ 1995; WIEBER 1994), überwiegend hohe Schwermetallgehalte analysiert. Die Existenz einer unverritzten sekundären Dispersionsaureole (vgl. SEIM & TISCHENDORF 1990: 535) bedingt bei Profilen der Hangsequenz Spitzenberg-IV hohe Schwermetallgehalte in der Hauptlage (vgl. SABEL 1989a,b). Hohe Schwermetallgehalte in kolluvialen Umlagerungsbildungen resultieren aus der Aufarbeitung von Haldenmaterialien bei der Genese der Kolluvien bzw. der Ablagerung belasteter Solumsedimente aus dem Bereich der präexistenten sekundären Dispersionsaureole (Hangsequenz Kupferberg; Spitzenberg-IV). Die These einer Belastung der akkumulierten Sedimentdecke durch postsedimentären Lösungseintrag (vgl. SCHMIDT 2000) wurde bei Hangsequenz Burgberg-II bestätigt.

Wichtiges Ergebnis der schwermetallanalytischen Untersuchungen ist die Nicht-Prognostizierbarkeit der Schwermetallbelastung in den Bodenproben der Untersuchungsgebiete. Aufgehaldetes

Material wird bezüglich der Schwermetallführung überschätzt, wenn die Halde nicht in Bezug zur ehemaligen Sekundärdispersion steht (Hangsequenzen Kurzhang-I, Kurzhang Bank). Makroskopisch sichtbare Erzbröckchen in Solumsedimenten führen nicht zwangsläufig zu hohen Schwermetallgehalten im Sediment, wenn die Sedimente junges Alter aufweisen (Pfarrfeld Große Halde, Pfarrfeld Kleine Halde). Andererseits wurden durchaus hohe Schwermetallgehalte in periglazialen Deckschichten und Kolluvien festgestellt. Allgemeingültige Aussagen über die Schwermetallspeicherung in den Sedimentdecken und Haldensubstraten der Hangbereiche sind demnach unmöglich, jedes Erzbergbaurevier verlangt eine eigene Einschätzung über hochauflösende Standortbeprobungen.

Bei einigen Hangsequenzen ist in den quartären Hangsedimenten ein bedeutsames Schwermetallreservoir realisiert, dessen Identifikation die Einschätzung seines schutzgutbezogenen Gefährdungspotenzials erfordert (vgl. BBodSchG 1999, BBodSchV 1999). Für das Schutzgut Grundwasser wird für die Standorte unter Waldbedeckung folgende Einschätzung vorgenommen:

- Eine Grundwassergefährdung ist für die Hangsequenzen Grüner Löwe, Kupferberg, Spitzenberg-III, Spitzenberg-IV sowie Burgberg-I , Burgberg-II und Burgberg-III wahrscheinlich.
- Bei der Hangsequenz Spitzenberg-I ist eine Grundwassergefährdung zu erwarten.
- Bei der Hangsequenz Burgberg-I wurde am Unterhang infolge eines Nutzungswandels die Gefährdung des Schutzguts Nutzpflanze eingeschätzt. Die Maßnahmenwerte für Arsen werden hier überschritten, entsprechend sind Maßnahmen einzuleiten.
- Bei den hier nicht explizit genannten Hangsequenzen ist kein Gefährdungspotenzial ableitbar.

Kritisch zu werten ist die gesetzliche vorgeschriebene Anwendung der S4-Elution zur Beurteilung der Mobilisierbarkeit der Schwermetalle. Dieses Verfahren ist wohl kaum auf reale Böden anzuwenden, die aggressiveren Wässern (saure Niederschläge) für längere Zeiten ausgesetzt waren (vgl. HIRNER et al 2000: 82f.). Die in den S4-Eluaten gemessenen Schwermetallkonzentrationen unterschätzen deshalb vermutlich das reale Mobilitäts- und Gefährdungspotenzial.

Literatur

- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung.- 4. Aufl.: 392 S.; Hannover.
- AHNERT, F. (1996): Einführung in die Geomorphologie.- 440 S.; Stuttgart.
- BBODSCHG = Gesetz zum Schutz des Bodens (1998): BGBl. I., Nr. 16: 502-510; Bonn.
- BBODSCHV = Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (1999): BGBl. I. Nr. 36: 1554-1582; Bonn.
- BEUGE, P. & DEGNER, T. (2000): Umweltgeochemische Belastungen durch den Bergbau im Erzgebirge – Bewertung und Lösungsansätze.- In: BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN [Hrsg.]: Bergbau-Folgeschäden und Ökosysteme.- Rundgespräche der Kommission für Ökologie 20: 103-113; München.
- BORK, H.-R., BORK, H., DALCHOW, C., FAUST, B., PIORR, H.-P. & SCHATZ, T. (1998): Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa.- 328 S.; Gotha.

- BORN, M. (1989): Die Entwicklung der deutschen Agrarlandschaft.- 2. Aufl.: 185 S.; Darmstadt.
- BUBENZER, O. (1999): Sedimentfallen als Zeugen der spät- und postglazialen Hang- und Talbodenentwicklung im Einzugsgebiet der Schwülme (Südniedersachsen).- *Kölner Geogr. Arb.* **72**: 132S.; Köln.
- EITEL, B. (1999): Bodengeographie.- 244S.; Braunschweig.
- FOELLMER, A. (1999): Schwermetalleinträge durch den Schwarzwälder Bergbau in die südliche Oberrheinebene zwischen Möhlin und Sulzbach.- *Freiburger Geowiss. Beitr.* **13**: 171 S.; Freiburg.
- FÖRSTNER, U. (1993): Riverine and estuarine sedimentation of pollutants and leaks from sludges and wastes: analytical, prognostic, experimental and remedial approaches.- *Land Degradation and Rehabilitation* **4**: 281-296; Oxford.
- GERRARD, J. (1992): Soil Geomorphology. An integration of pedology and geomorphology.- 269S.; London.
- HIRNER, A.V., REHAGE, H. & SULKOWSKI, M. (2000): Umweltgeochemie.- 836 S.; Darmstadt.
- JÄGER, H. (1994): Einführung in die Umweltgeschichte.- 245 S.; Darmstadt.
- JOHNSON, D.L. (1990): Biomantle evolution and the redistribution of earth materials and artifacts.- *Soil Science* **149** (2): 84-102; Hagerstown.
- MANZ, M. (1995): Umweltbelastungen durch Arsen und Schwermetalle in Böden, Halden, Pflanzen und Schlacken ehemaliger Bergbauggebiete des Mittleren und Südlichen Schwarzwaldes.- *Karlsruher Geochem. H.* **7**: 227 S.; Karlsruhe.
- NILLER, H.-P. (1998): Prähistorische Landschaften im Lößgebiet bei Regensburg. Kolluvien, Auenlehme und Böden als Archive der Paläoumwelt.- *Regensburger Geogr. Schr.* **31**: 429 S.; Regensburg.
- ROHDENBURG, H. (1989): Landschaftsökologie - Geomorphologie.- 220 S.; Cremlingen-Destedt.
- RUSSOW, F. (2004): Die Zwischenspeicherung von Schwermetallen im Hangbereich historischer Erzbergbauggebiete – Die Hangsequenz Kupferberg.- *Geo-Öko* **25**: 145-156; Bensheim.
- RUSSOW, F. & HEINRICH, J. (2001): Jungholozäne Überprägungen von quartären Deckschichten und Böden des Mittelgebirgsraumes durch biomechanische Prozesse in Mitteleuropa.- *Geo-Öko* **22**: 37-58; Bensheim.
- SABEL, K.-J. (1989a): Zur Renaissance der Gliederung periglazialer Deckschichten in der Deutschen Bodenkunde.- *Frankfurter geowiss. Arb.* **D10**: 9-16; Frankfurt.
- SABEL, K.-J. (1989b): Schwermetallgehalte der Böden zwischen Rhein-Main-Gebiet und Vogelsberg.- *Jber. wetterau. Ges. Naturkunde* **140/141**: 5-13; Hanau.
- SABEL, K.-J. (1996): Gestein, Relief und Böden im Spessart.- *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg* **194**: 69-76; Frankfurt.
- SCHMIDT, G. (2000): Umweltbelastung durch Bergbau: Der Einfluß der Halden des Mansfelder Kupferschieferbergbaus auf die Schwermetallführung der Böden und Gewässer im Einzugsgebiet Süßer See.- *Hallesche Stud. z. Geogr.* **3**: 117 S; Halle.
- SEIM, R. & TISCHENDORF, G. (1990) [Hrsg.]: Grundlagen der Geochemie.- 632 S.; Leipzig.
- SEMMEL, A. (2002): Hauptlage und Oberlage als umweltgeschichtliche Indikatoren.- *Z. Geomorph. N.F.* **46**: 167-180; Stuttgart.
- ULIQUE, A., BEUGE, P. & KLUGE, A. (1998): Stoffliche Belastung von Auenböden Sachsens.- *Wiss. Mitt. Inst. Geol. d. TU Bergakademie Freiberg, Sonderheft* **7**: 102-109; Freiberg.
- VÖLKEL, J., LEOPOLD, M., MAHR, A. & RAAB, T. (2002): Zur Bedeutung kaltzeitlicher Hangsedimente in zentraleuropäischen Mittelgebirgslandschaften und zu Fragen ihrer Terminologie.- *Petermanns Geogr. Mitt.* **146** (2): 50-59; Gotha.
- WEISE, A., ABO-RADY, M., PÄLCHEN, W., HOFFMANN, R., TENHOLTERN, R., HERTWIG, T., BURGHARDT, W., HILLER, D.A., BAHMANI-YEKTA, M., RICHTER, B., BERTHOLD-KRAICZY, A. & HÖKE, S. (1997): Exkursion Bergbauböden im Raum Freiberg.- *Mitt. Dt. Bodenkundl. Ges.* **84**: 77-114; Oldenburg.
- WIEBER, G. (1994): Das ehemalige Erzrevier an der Unteren Lahn - Hydro- und geochemische sowie umweltgeologische Verhältnisse unter Berücksichtigung der Rückstände aus der Erzaufbereitung.- *Giessener Geol. Schr.* **52**: 284 S.; Gießen.
- ZEPP, H. (2002): Geomorphologie.- 354S.; Paderborn.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde von Herrn Prof. Dr. J. Heinrich vom Institut für Geographie der Universität Leipzig angeregt und betreut. Für seine Ideen, seine Diskussionsbereitschaft, die gemeinsamen Geländeaufenthalte und die gewährte Freiheit bei der Ausgestaltung des Themas möchte ich Ihm ganz besonders danken.

Frau Dr. A. Krüger (Institut für Geographie der Universität Leipzig) hat sich in besonderem Maße um diese Arbeit verdient gemacht, indem Sie umfangreiche analytische Untersuchungen meiner Bodenproben beim Umweltforschungszentrum Halle-Leipzig ermöglichte und für verschiedenste Fragen meinerseits eine Antwort bereit hielt. Vielen herzlichen Dank hierfür!

Bei den Herren Dr. P. Morgenstern, Dr. R. Wennrich und Dr. H. Borsdorf vom Umweltforschungszentrum Halle-Leipzig bedanke ich mich für die Durchführung schwermetallanalytischer Untersuchungen.

Frau Dr. B. Schneider und besonders Herrn Dipl.-Geogr. M. Steinert (Institut für Geographie der Universität Leipzig) möchte ich für die gewissenhafte Bearbeitung meiner Bodenproben danken.

Einige Bodenproben wurden im Geographischen Institut der Universität Halle untersucht. Dafür und für die „*companionship*“ über die Jahre möchte ich mich bei Herrn Dr. M. Sauerwein (Geographisches Institut der Universität Halle) bedanken.

Mein Dank gilt auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Gewährung einer Sachbeihilfe unter dem Geschäftszeichen He 2566/5-1.

Bei Herrn Dr. J. Haneke (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz in Mainz) möchte ich mich für die gemeinsamen Geländebegehungen im Imsbacher Revier, vielfältige Hinweise auf interessante Standorte, die fachlichen Diskussionen und das Interesse an meiner Arbeit besonders bedanken.

Bei den Herren Prof. Dr. G. Garland (University of Natal in Durban / South Africa), Prof. Dr. H. Thiemeyer (Geographisches Institut der Universität Frankfurt) und Herrn Prof. Dr. K.-J. Sabel (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie in Wiesbaden) möchte ich mich für die Bereitschaft zur Begutachtung dieser Arbeit bedanken. Herr Prof. Dr. Sabel gab mir darüber hinaus wertvolle Hinweise zu Bodenaufbau und Bodenverbreitung im Spessart. Danke schön!

Von den Herren Dipl.-Geogr. J. Jung und Dipl.-Geogr. S. Huck sowie Herrn Dipl.-Min. M. Preuschoff habe ich bei Geländebegehungen und Diskussionen vieles über den Spessart gelernt. Herr Preuschoff nahm überdies die mineralogische Ansprache von Fundstücken aus dem Spessart vor. Dafür möchte ich mich bedanken.

Die Photographien der Mineralphasen ausgewählter Fundstücke aus dem Spessart und aus Imsbach wurden am Mineralogischen Institut der Universität Leipzig von Herrn Dr. Höbler vorgenommen, bei dem ich mich hiermit bedanken möchte.

Den Herren PD Dr. H.-P. Harres (Institut für Hydrogeologie der TU Darmstadt), Prof. Dr. H. Neumeister (Geographisches Institut der Universität Leipzig), Prof. Dr. O. Seuffert (Geographisches Institut der TU Darmstadt), Dr. M. Weidenfeller und Dr. E.-D. Spies (beide vom Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz in Mainz) schulde ich Dank für gute Ratschläge.

Ohne die Unterstützung meiner Familie wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Meinen Eltern möchte ich für die vielfältige logistische Unterstützung und die stete Ermutigung herzlichst danken. Meinem Bruder Ralf möchte ich für die aufreibende Arbeit des Korrekturlesens des Manuskripts meinen Dank aussprechen.

Ganz besonders zu danken habe ich indes meiner lieben und verständnisvollen Frau Petra Krammer, die immer an mich glaubte, sowie meinen beiden Töchtern Carla und Eva, die fortan an Wochenenden und Abenden hoffentlich mehr von Ihrem Papa haben werden.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
<i>Vorwort</i>	- i -
<i>Inhaltsverzeichnis-</i>	- ii -
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	- viii -
<i>Verzeichnis der Photographien</i>	- x -
<i>Tabellenverzeichnis</i>	- xi -
<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	- xiv -
1. EINLEITUNG	1
2. EINFLUSS DES ERZBERGBAUS AUF DEN OBERFLÄCHENNAHEN UNTERGRUND IM HANGBEREICH DES MITTELGEBIRGSRAUMS	4
2.1 Der Oberflächennahe Untergrund im zentraleuropäischen Mittelgebirgsrelief	4
2.2 Holozäne Umweltgeschichte des Oberflächennahen Untergrunds in historischen Bergbaugebieten	10
2.2.1 Die postglaziale Ausgangssituation in Hangbereichen mit Vererzungen	10
2.2.2 Die Rodungsphase: erste schwerwiegende anthropogene Überformung	13
2.2.3 Die Phase des Erzbergbaus	16
2.2.3.1 Bergbaubedingte spezifische Transformationen des Oberflächennahen Untergrunds	17
2.2.3.2 Bergbaubedingte unspezifische Transformationen des Oberflächennahen Untergrunds	18
2.2.3.3 Decklagenausprägungen am Ende der Bergbauphase	18
2.2.4 Postmontane Landnutzung	21
2.3 Bodenprofile aus Hangbereichen mit Vererzungszonen (Literaturübersicht)	22
3. SCHWERMETALLGEHALTE IM BODEN: GEFÄHRDUNGSABSCHÄTZUNG	24
3.1 Rechtliche Grundlagen, Definitionen	24
3.2 Vorgehen bei der Gefährdungsabschätzung	25
4. ARBEITSMETHODIK	33
4.1 Untersuchungen im Gelände	33
4.2 Standardanalytik im Labor	34
4.3 Spezialuntersuchungen	37
5. UNTERSUCHUNGSGEBIETE: NORDPFÄLZER BERGLAND UND BUNTSANDSTEIN-SPESSART	39
5.1 Das Nordpfälzer Bergland	39
5.1.1 Naturräumliche Skizze des Nordpfälzer Berglands	39
5.1.2 Allgemeine Landnutzungsgeschichte des Nordpfälzer Berglands	40
5.1.3 Erzvorkommen im Nordpfälzer Bergland	41
5.2 Buntsandsteinspessart	42
5.2.1 Naturräumliche Skizze des Buntsandsteinspessarts	42
5.2.2 Allgemeine Landnutzungsgeschichte des Buntsandsteinspessarts	44
5.2.3 Erzvorkommen im Spessart	45
6. ERGEBNISSE UND DISKUSSION	47
6.1 Imsbach	47
6.1.1 Hangsequenz Grüner Löwe	51
6.1.1.1. Daten zur Hangsequenz	51

6.1.1.2 Gliederung des Hangbereichs	52
6.1.1.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	55
6.1.1.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	57
6.1.1.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	62
6.1.1.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	64
6.1.1.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	68
6.1.1.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	72
6.1.2 Hangsequenz Kupferberg	75
6.1.2.1 Daten zur Hangsequenz	75
6.1.2.2 Gliederung des Hangbereichs	75
6.1.2.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	78
6.1.2.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	78
6.1.2.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	81
6.1.2.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	83
6.1.2.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	86
6.1.2.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	88
6.1.3 Hangsequenz Kurzhang-I	91
6.1.3.1 Daten zur Hangsequenz	91
6.1.3.2 Gliederung des Hangbereichs	92
6.1.3.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	94
6.1.3.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	94
6.1.3.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	97
6.1.3.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	98
6.1.3.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	100
6.1.3.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	101
6.1.4 Hangsequenz Kurzhang Bank	103
6.1.4.1 Daten zur Hangsequenz	103
6.1.4.2 Gliederung des Hangbereichs	104
6.1.4.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	105
6.1.4.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	106
6.1.4.3.2 Bodenbildungen im Hangbereich	107
6.1.4.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	108
6.1.4.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	110
6.1.4.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	111
6.1.5 Hangsequenz Schartenrück	113
6.1.5.1 Daten zur Hangsequenz	113
6.1.5.2 Gliederung des Hangbereichs	114
6.1.5.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	116
6.1.5.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	117
6.1.5.3.2 Bodenbildungen im Hangbereich	118
6.1.5.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	119
6.1.5.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	121
6.1.5.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich der Hangsequenz Schartenrück	122
6.2 Pfarrfeld/Ayaschächte	123

6.2.1 Hangsequenz Pfarrfeld Große Halde	125
6.2.1.1 Daten zur Hangsequenz	125
6.2.1.2 Gliederung des Hangbereichs	126
6.2.1.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	127
6.2.1.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	128
6.2.1.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	131
6.2.1.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	132
6.2.1.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	135
6.2.1.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	136
6.2.2 Hangsequenz Pfarrfeld Kleine Halde	139
6.2.2.1. Daten zur Hangsequenz	139
6.2.2.2 Gliederung des Hangbereichs	140
6.2.2.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	140
6.2.2.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	141
6.2.2.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	144
6.2.2.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	144
6.2.2.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	146
6.2.2.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	147
6.3 Spitzenberg	149
6.3.1 Hangsequenz Spitzenberg-I	153
6.3.1.1. Daten zur Hangsequenz	153
6.3.1.2 Gliederung des Hangbereichs	153
6.3.1.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	156
6.3.1.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	157
6.3.1.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	160
6.3.1.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	161
6.3.1.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	164
6.3.1.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	166
6.3.2 Hangsequenz Spitzenberg-II	168
6.3.2.1. Daten zur Hangsequenz	168
6.3.2.2 Gliederung des Hangbereichs	169
6.3.2.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	169
6.3.2.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	170
6.3.2.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	172
6.3.2.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	172
6.3.2.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	175
6.3.2.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich	176
6.3.3 Hangsequenz Spitzenberg-III	178
6.3.3.1. Daten zur Hangsequenz	178
6.3.3.2 Gliederung des Hangbereichs	179
6.3.3.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	179
6.3.3.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	180
6.3.3.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	182
6.3.3.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	182

6.3.3.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	185
6.3.3.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	186
6.3.4 Hangsequenz Spitzenberg-IV	188
6.3.4.1. Daten zur Hangsequenz	188
6.3.4.2 Gliederung des Hangbereichs	189
6.3.4.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	189
6.3.4.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	190
6.3.4.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	192
6.3.4.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	193
6.3.4.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	195
6.3.4.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	197
6.4 Burgberg	199
6.4.1 Hangsequenz Burgberg-I	203
6.4.1.1. Daten zur Hangsequenz	203
6.4.1.2 Gliederung des Hangbereichs	204
6.4.1.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	205
6.4.1.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	205
6.4.1.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	211
6.4.1.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	213
6.4.1.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	218
6.4.1.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	221
6.4.2 Hangsequenz Burgberg-II	223
6.4.2.1. Daten zur Hangsequenz	223
6.4.2.2 Gliederung des Hangbereichs	224
6.4.2.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	225
6.4.2.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	226
6.4.2.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	229
6.4.2.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	230
6.4.2.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	233
6.4.2.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	234
6.4.3 Hangsequenz Burgberg-III	236
6.4.3.1. Daten zur Hangsequenz	236
6.4.3.2 Gliederung des Hangbereichs	236
6.4.3.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich	237
6.4.3.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds	238
6.4.3.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs	242
6.4.3.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen	243
6.4.3.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich	246
6.4.3.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte	248
7. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	250
8. AUSBLICK	256
9. FEHLERBETRACHTUNG	257

10. LITERATURVERZEICHNIS

260

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Decklagenausprägung außerhalb des Schwermetalldispersionshofs	12
Abbildung 2: Schwermetallführung der Decklagen im Dispersionsbereich	12
Abbildung 3: Die Ausprägung quartärer Deckschichten oberhalb des Dispersionshofs am Ende der Rodungsphase	14
Abbildung 4: Decklagenstrukturen im Dispersionsbereich am Ende der Rodungsphase	15
Abbildung 5: Umlagerungsbildungen und Decklagen unterhalb des Dispersionsbereichs zum Ende der Rodungsphase	16
Abbildung 6: Haldensubstrate über Festgestein	19
Abbildung 7: Haldensubstrate überlagern quartäre Deckschichten	20
Abbildung 8: Mögliche Profilabfolgen unterhalb des Dispersionshofs	20
Abbildung 9: Lithostratigraphie des Rotliegenden im Nordpfälzer Bergland	39
Abbildung 10: Lithostratigraphie des Unteren Buntsandsteins	43
Abbildung 11: Lage des Untersuchungsgebiets Imsbach	47
Abbildung 12: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Imsbach mit den zugehörigen Hangsequenzen	50
Abbildung 13: Hangsequenz Grüner Löwe	51
Abbildung 14: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Grüner Löwe	56
Abbildung 15: Hangsequenz Kupferberg	76
Abbildung 16: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Kupferberg	78
Abbildung 17: Hangsequenz Kurzhang-I	91
Abbildung 18: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Kurzhang-I	94
Abbildung 19: Hangsequenz Kurzhang Bank	103
Abbildung 20: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Kurzhang Bank	105
Abbildung 21: Hangsequenz Imsbach Schartenrück	113
Abbildung 22: Die Überformung des Hangsedimentkomplexes auf einer Windwurflläche der Hangsequenz Schartenrück	115
Abbildung 23: Aufgrabung eines Mulden-Hügel-Paars mit fossilisiertem Ah-Horizont	116
Abbildung 24: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Schartenrück	116
Abbildung 25: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Pfarrfeld	124
Abbildung 26: Hangsequenz Pfarrfeld Große Halde	125
Abbildung 27: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Pfarrfeld Große Halde	128
Abbildung 28: Hangsequenz Pfarrfeld Kleine Halde	139
Abbildung 29: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Pfarrfeld Kleine Halde	141
Abbildung 30: Lage des Untersuchungsgebiets Spitzenberg	149
Abbildung 31: Geologische Übersicht des Spitzenbergs	150
Abbildung 32: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Spitzenberg	152
Abbildung 33: Hangsequenz Spitzenberg-I	153
Abbildung 34: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Spitzenberg-I	157
Abbildung 35: Hangsequenz Spitzenberg-II	168
Abbildung 36: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Spitzenberg-II	169
Abbildung 37: Hangsequenz Spitzenberg-III	178
Abbildung 38: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Spitzenberg-III	180
Abbildung 39: Hangsequenz Spitzenberg-IV	188
Abbildung 40: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Spitzenberg-IV	190
Abbildung 41: Lage des Untersuchungsgebiets Burgberg	199
Abbildung 42: Bodenformenverteilung an der Buntsandsteinschichtstufe	200
Abbildung 43: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Burgberg mit den zugehörigen Hangsequenzen	201

Abbildung 44: Hangsequenz Burgberg-I	203
Abbildung 45: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Burgberg-I	206
Abbildung 46: Hangsequenz Burgberg-II	223
Abbildung 47: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Burgberg-II	225
Abbildung 48: Hangsequenz Burgberg-III	236
Abbildung 49: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Burgberg-III	238

Verzeichnis der Photographien

	Seite
Photo 1: Skutterudit (CoAs_3) und Siderit (FeCO_3)	45
Photo 2: Siderit (FeCO_3)	46
Photo 3: Erythrin ($\text{Co}[\text{AsO}_4] \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$)	46
Photo 4: Malachit und Azurit als Überzüge auf Rhyolith	48
Photo 5: Blick vom Grubenweg auf den Tagbebaubereich des Grünen Löwen	52
Photo 6: Blick vom Fahrweg nach N auf die Haldenfläche	53
Photo 7: Erosionsrinnen am hangabwärtigen Rand des Fahrwegs	54
Photo 8: „Steinbruch“ am Unterhang der Hangsequenz Grüner Löwe	55
Photo 9: Blick vom Fahrweg auf den Unterhang der Hangsequenz Kupferberg	77
Photo 10: Schachtpinge der Hangsequenz Kurzhang-I	92
Photo 11: Rutschungsprozesse entlang der Hangsequenz Kurzhang-I	93
Photo 12: Pinge im Bereich der Hangsequenz Kurzhang Bank	104
Photo 13: Lineare Erosionsformen am unteren Mittelhang der Hangsequenz Pfarrfeld Große Halde	126
Photo 14: Pinge mit hangabwärtiger Ringhalde im Bereich der Hangsequenz Spitzenberg-I	154
Photo 15: Pinge und Halde im Bereich der Hangsequenz Spitzenberg-I	154
Photo 16: Halde im Bereich der Hangsequenz Spitzenberg-I	155
Photo 17: Biomechanische Sedimentbereitstellung durch die Grabungstätigkeit von Dachsen und Füchsen	156

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Faktoren der Deckschichtengenese	8
Tabelle 2: Bergbaubedingte Umweltauswirkungen	17
Tabelle 3: Vorsorgewerte für Metalle [mg/kg TM]	26
Tabelle 4: Prüfwerte anorganischer Schadstoffe für den Wirkungspfad Boden-Mensch	27
Tabelle 5: Prüf- und Maßnahmenwerte anorganischer Schadstoffe für Ackerbau- und Nutzgartenflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität	27
Tabelle 6: Maßnahmenwerte anorganischer Schadstoffe für Grünlandflächen	28
Tabelle 7: Prüfwerte zur Beurteilung von Ackerbauflächen im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen	28
Tabelle 8: Beurteilungswerte für den Pfad Boden-Grundwasser	30
Tabelle 9: Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser	30
Tabelle 10: Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Zone	31
Tabelle 11: Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen im Rahmen der Orientierenden Untersuchung	32
Tabelle 12: Sedimentologische Geländebefunde der Profilaufnahmen GL1-GL10	58
Tabelle 13: Sedimentologische Geländebefunde der Profilaufnahmen GL11-GL19	59
Tabelle 14: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Grüner Löwe	65
Tabelle 15: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Grüner Löwe	66
Tabelle 16: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben des Grünen Löwen	68
Tabelle 17: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen K1-K8	79
Tabelle 18: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Kupferberg	83
Tabelle 19: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Kupferberg	83
Tabelle 20: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Kupferberg	86
Tabelle 21: Schwermetallgehalte der S4-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Kupferberg	87
Tabelle 22: Verhältnis eluierbarer Anteil zum Gesamtgehalt relevanter Bodenproben des Kupferbergs	87
Tabelle 23: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen KH1-KH6	95
Tabelle 24: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Kurzhang-I	98
Tabelle 25: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen von Kurzhang-I	99
Tabelle 26: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben von Kurzhang-I	100
Tabelle 27: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen KB1-KB5	106
Tabelle 28: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Kurzhang Bank	108
Tabelle 29: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen von Kurzhang Bank	109
Tabelle 30: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben von Kurzhang Bank	111
Tabelle 31: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen SR1-SR7	117
Tabelle 32: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Schartenrück	119
Tabelle 33: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Schartenrück	120

Tabelle 34: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Schartenrück	121
Tabelle 35: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen PG1-PG7	129
Tabelle 36: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Pfarrfeld Große Halde	133
Tabelle 37: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Pfarrfeld Große Halde	134
Tabelle 38: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Pfarrfeld Große Halde	135
Tabelle 39: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen PK1-PK7	142
Tabelle 40: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Pfarrfeld Kleine Halde	144
Tabelle 41: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Pfarrfeld Kleine Halde	145
Tabelle 42: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Pfarrfeld Kleine Halde	147
Tabelle 43: Richtkonzentrationen zur Bewertung von Schwermetallkonzentrationen	151
Tabelle 44: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen SB1-SB7	158
Tabelle 45: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-I	161
Tabelle 46: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Spitzenberg-I	162
Tabelle 47: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-I	164
Tabelle 48: Schwermetallgehalte der S4-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-I	165
Tabelle 49: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen SP1-SP8	170
Tabelle 50: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-II	173
Tabelle 51: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Spitzenberg-II	174
Tabelle 52: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-II	176
Tabelle 53: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen SK1-SK5	181
Tabelle 54: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-III	183
Tabelle 55: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Spitzenberg-III	183
Tabelle 56: Schwermetallgesamtgehalte (RFA) ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-III	185
Tabelle 57: Schwermetallgehalte der S4-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-III	186
Tabelle 58: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen KF1-KF6	191
Tabelle 59: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-IV	193
Tabelle 60: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Spitzenberg-IV	194
Tabelle 61: Schwermetallgesamtgehalte (RFA) ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-IV	196
Tabelle 62: Schwermetallgehalte der S4-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Spitzenberg-IV	196
Tabelle 63: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen BU1-BU13	207
Tabelle 64: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-I	214

Tabelle 65: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Burgberg-I	215
Tabelle 66: Schwermetallgesamtgehalte (RFA) ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-I	218
Tabelle 67: Schadstoffgehalte im S4-Eluat ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-I	220
Tabelle 68: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen BB1-BB8	226
Tabelle 69: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-II	230
Tabelle 70: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Burgberg-II	231
Tabelle 71: Schwermetallgesamtgehalte (RFA) ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-II	233
Tabelle 72: Schadstoffgehalte im S4-Eluat der Haldenproben der Hangsequenz Burgberg-II	234
Tabelle 73: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen BG1-BG7	239
Tabelle 74: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-III	243
Tabelle 75: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Burgberg-III	244
Tabelle 76: Schwermetallgesamtgehalte (RFA) ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-III	246
Tabelle 77: Schadstoffgehalte im S4-Eluat ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Burgberg-III	248

Abkürzungsverzeichnis

bzgl.:	bezüglich
bzw.:	beziehungsweise
d.h.:	das heißt
DIN:	Deutsche Industrienorm
et al.:	et alii = und andere
etc.:	et cetera = und so weiter
GOF:	Geländeoberfläche
HGK:	Hintergrundkonzentration
i.d.R.:	in der Regel
KAK:	Kationenaustauschkapazität
KAK _{eff} :	effektive Kationenaustauschkapazität
kg:	Kilogramm
kW:	Kilowatt
l:	Liter
mg:	Milligramm
myg:	Mikrogramm
m.E.:	meines Erachtens
m.W.:	meines Wissens
o.ä.:	oder ähnliches
ppb:	parts per billion
ppm:	parts per million
SM:	Schwermetall(e)
TM:	Trockenmasse
u.a.:	unter anderem
ü. NN	über Normal Null
v.a.:	vor allem
vgl.:	vergleiche
z.B.:	zum Beispiel
z.T.:	zum Teil

1. Einleitung

Thema

Diese Arbeit befasst sich mit dem Aufbau und ausgewählten ökologischen Eigenschaften der quartären Hangsedimente im Bereich historisch-subrezenter Erzbergbaugebiete. Besonderes Augenmerk wird auf die Schwermetallgehalte und das von diesen ausgehende Gefährdungspotenzial gelegt. Die ausgewählten Untersuchungsgebiete liegen im Nordpfälzer Bergland und dem Buntsandsteinspessart.

Problemstellung

Viele Gebiete mit Erzvorkommen im Mittelgebirgsraum weisen eine lange Nutzungs- und auch Bergbaugeschichte auf. In vielen Mittelgebirgen (z.B. Erzgebirge, Harz und Schwarzwald) finden sich vor allem unter Wald zahlreiche Spuren eines örtlich bis in das frühe Mittelalter oder gar in die Römerzeit zurückreichenden Bergbaus. Dazu zählen Pingen, Halden, Abgrabungen, Stollenmundlöcher, Schächte etc (vgl. z.B. BERGFELDT 1995; BRUNOTTE et al. 1994: 87-95; FOELLMER 1999; HAAS & FLEISCHMANN 1991: 68-83; HILDEBRANDT 1997; JÄGER 1994:71-78; KAPPES 2000; LENZ 1986; LIESSMANN 1997; MANZ 1995; NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE 2000; RÜDE 1996; SCHALICH et al. 1986; STEUER & ZIMMERMANN 1993;WIEBER 1994).

Mittelalterlicher Bergbau fand in einem weitgehend entwaldeten Naturraum statt. Diese großflächigen Entwaldungen resultierten entweder aus der Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzfläche, die in den Bergbauregionen der Lagerstättenexploration oft zeitlich vorausgegangen war (vgl. z.B. BORN 1989: 38; HAMBLOCH 1983: 34; JÄGER 1987: 150; KÖSTER 2000: 116), oder dem Bergbau selbst: das Montanwesen war einer der größten Bedarfsträger für Holz aller Art, das u.a. zur Energiegewinnung, dem Grubenausbau sowie zum Aufbau von Siedlungen und Infrastruktur gebraucht wurde (vgl. GOLDENBERG 1993: 111).

Das „Aufschließen“ einer Lagerstätte und die darauf folgenden Gewinnungsarbeiten stören und zerstören die Vegetations- und Bodendecke und verursachen bzw. verstärken dadurch Erosions- und Sedimentationsprozesse. Die ursprünglichen Verhältnisse in Landschaftsaufbau werden stark überformt (vgl. z.B. GOLDENBERG 1993: 108; RIPLEY et al. 1996: 13; WIEBER et al. 1996: 530).

Die in früheren Zeiten angewandten Methoden der Erzgewinnung, -aufbereitung und -verhüttung waren vergleichsweise wenig effektiv (vgl. z.B. FOELLMER 1999: 113-116; WIEBER 1994: 30). Viele Bergehalden, Aufbereitungsrückstände und Schlackenalden weisen nach heutigen

Maßstäben deshalb hohe ökologisch relevante Schwermetallgehalte auf (vgl. z.B. WIEBER 1994 und 2000; WIEBER & KNOBLICH 1997: 102ff.; WILLMS 1996: 48).

Rodungsmaßnahmen führten dazu, dass belastete Sedimente durch verstärkte Bodenerosion aus den engeren Abbaubereichen ausgetragen wurden. So korrelieren hohe Schwermetallkonzentrationen in vielen datierten Auenlehmen sehr gut mit den Aktivitätsphasen bergbaulicher Nutzung im Einzugsgebiet dieser Flüsse (vgl. z.B. BECKER et al. 2000; DOBLER 1998 und 2000; FOELLMER 1999; GÄBLER 1997; GÄBLER & SCHNEIDER 2000; ULIQUE et al. 1998; ZUMBROICH et al. 1994). Zu diesem partikulären Austrag kam eine kontinuierliche Auslaugung verbliebener Halden und Rückstände, die ebenfalls zu einer Belastung von Sedimenten, Böden und Gewässern geführt haben kann (vgl. z.B. BECKER et al. 2000; GOLDENBERG 1996; JAHN & MATHEIS 1998; SCHMIDT 1998 und 2000; SCHMIDT & FRÜHAUF 1997; WIEBER 1994).

Die durch den Bergbau freigesetzten Mengen potenziell toxisch wirkender Metalle werden in den Auensedimenten entsprechender Flusseinzugsgebiete gespeichert (vgl. z.B. BECKER et al. 2000; DOBLER 1998 und 2000; FOELLMER 1999; GÄBLER 1997; GÄBLER & SCHNEIDER 2000; ULIQUE et al. 1998; WIEBER & KNOBLICH 1996; ZUMBROICH et al. 1994). Sedimentgebundene Schadstoffe sind aber dem Gewässer und den biologischen Systemen nicht dauerhaft entzogen und es kann situativ zur Freisetzung der Metalle kommen (vgl. z.B. FÖRSTNER 1993, VOIGT 1990: 185). Deshalb sind hohe Schwermetallgehalte in Auensedimenten eine potenzielle Gefahr für aquatische und terrestrische Ökosysteme.

Die Kenntnisse über die Zwischenspeicherung der Schwermetalle im Sedimentkörper des Hangbereichs beschränken sich auf geochemische Dispersionshöfe (z.B. SEIM & TISCHENDORF 1990: 535ff.) und bergbauliche Aufhaldungen (z.B. FIEDLER 1990: 216-219), wobei der Schwermetallverteilung in den differenzierten quartären Deckschichten insgesamt nur wenig Aufmerksamkeit zukam. Als Folge der Bodenerosion ist aber örtlich mit oberflächennah anstehenden schwermetallreichen Basislagen der Sekundärdispersion zu rechnen. Zudem könnten belastete Kolluvien als korrelierte Sedimente im Hangbereich angetroffen werden. Diese quartären Hangsedimente weisen ein bestimmendes Potenzial auf, bei fortschreitender Versauerung der Standorte Schwermetalle freisetzen zu können. Im weiten Untersuchungsfeld zur Schwermetallproblematik blieb dieser Aspekt bisher weitgehend unbeachtet.

Vorrangiges Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es deshalb zu prüfen, ob in den ehemals bergbaulich genutzten Gebieten ein bisher weitgehend unbeachtet gebliebenes Risikopotenzial identifiziert werden kann.

Fragestellungen

Für historische Erzbergbauggebiete im Spessart und dem Nordpfälzer Hügelland werden folgende Fragen bearbeitet:

- Welche Merkmale weist der Oberflächennahe Untergrund in diesen Bergbaugebieten hinsichtlich Verbreitung, Aufbau und Struktur auf?
- Welche Genese des Oberflächennahen Untergrunds ist ableitbar?
- Gibt es ein Schwermetallreservoir in den Boden-Sediment-Komplexen im Hangbereich dieser Bergbauggebiete?
- Welches Gefährdungspotential geht von diesem Schwermetallreservoir aus?

2. Einfluss des Erzbergbaus auf den Oberflächennahen Untergrund im Hangbereich des Mittelgebirgsraums

Die Einflüsse bergbaulicher Aktivitäten im Mittelgebirgsraum auf Auenstandorte im Abstrombereich wurden schon vielfach untersucht (z.B. BERGFELDT 1995; DOBLER 1998, 2000; FOELLMER 1999; GÄBLER 1997; GÄBLER & SCHNEIDER 2000; MANZ 1995; MILLER 1997). Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die entsprechenden Auensedimente Schwermetallspeicher mit charakteristischer Speicherkapazität sind.

Unbeantwortet bleiben bei den bisherigen Untersuchungen die Fragen, wann und wieviel des durch Bodenerosion verlagerten erzmineralhaltigen Materials überhaupt in die Aue gelangt, bzw. von einem prä-kolluvialen Relief am Hang fixiert wird (vgl. NILLER 1998: 62).

Für historische Erzbergbaugebiete bedeutet dies, dass die Kenntnis von Aufbau und Eigenschaften des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Zwischenspeicherung von Schwermetallen ist. Hierzu liegen aus Mitteleuropa m.W. allerdings bisher noch keine Befunde vor.

In Abschnitt 2.1 wird zunächst der Kenntnisstand über den Aufbau des Oberflächennahen Untergrunds im Mittelgebirgsrelief skizziert. Der anschließende Abschnitt 2.2 thematisiert die Umweltgeschichte des Oberflächennahen Untergrunds in Vererzungszonen bzw. historischen Erzbergbaugebieten. In Abschnitt 2.3 wird eine Zuordnung der in der Literatur beschriebenen Boden-/ Deckschichtenprofile aus Vererzungszonen und historischen Erzbergbaugebieten zu den in Abschnitt 2.2 abgeleiteten modellhaften Profilen vorgenommen.

2.1 Der Oberflächennahe Untergrund im zentraleuropäischen Mittelgebirgsrelief

Definition und Bedeutung des Oberflächennahen Untergrunds

Der Oberflächennahe Untergrund stellt die äußerste Erdrinde (Geodermis) dar, in der sich die Prozesse der Georeliefweiterentwicklung (Erosion, Verwitterung, Akkumulation), als auch der Bodenbildung und -zerstörung abspielen. Der Oberflächennahe Untergrund ist damit zugleich der Wirkungsbereich von Bodenwasser- und Stoffhaushalt, des Bodenklimas und des Edaphons (vgl. LESER 2003: 123-126; 1997: 359f.; ZEPP 2002: 94). Aus der genannten Definition ergibt sich die

zentrale Bedeutung des Oberflächennahen Untergrunds für Landschafts- bzw. Geoökologie, Geomorphologie und Bodengeographie.

Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds im Mittelgebirgsrelief

Im zentraleuropäischen Mittelgebirgsrelief wird der Oberflächennahe Untergrund im allgemeinen durch periglaziale Deckschichten und holozäne Solumsedimente repräsentiert. Periglaziale Deckschichten sind mehrschichtige, polygenetische Gemenge aus *in situ* anstehenden Festgesteinen, äolisch eingetragenen Sedimenten, tertiärem Zersatzmaterial sowie älteren Bodenbildungen und Solifluktsdecken. Kolluvien sind die korrelierten Sedimente der Bodenerosion.

VÖLKEL et al. (2002b: 51f.) benennen für Hochlagen zentraleuropäischer Mittelgebirge zudem glazigene Sedimente (*tills*), deren Verbreitung jedoch nicht erschöpfend untersucht ist. Auf diese Sedimente wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen, da sie in den Untersuchungsgebieten nicht zu erwarten sind.

Gliederung der quartären Hangsedimente

Die periglazialen Deckschichten werden nach einheitlichen Ansprachemerkmalen und Unterscheidungskriterien gegliedert (vgl. AG BODEN 1994: 363ff.). Eine Differenzierung der Schichtglieder erfolgt über Verbreitung, Mächtigkeit, Körnung und Lagerungsdichte. Unterschieden werden Oberlage, Hauptlage, Mittellage und Basislage.

Die Oberlage (LO, alle folgenden sedimentbezogenen Abkürzungen nach AG BODEN 1994) kann im Hangenden der Hauptlage auftreten, ihre Verbreitung soll gebunden sein an Hartgesteinsdurchragungen. Die Mächtigkeit der aus feinerdearmen Gesteinsschutt bestehenden LO beträgt < 10 dm (vgl. AG BODEN 1994: 365).

Die Hauptlage (LH) ist außerhalb von Erosions- und Akkumulationsstandorten nahezu überall flächenhaft und oberflächenparallel an der Oberfläche anzutreffen. Sie kommt im Hangenden von Basislage und Mittellage, seltener auch Anstehendem vor und weist neben aufgearbeitetem Material des Liegenden und der unmittelbar angrenzenden Oberhänge immer eine äolische Komponente auf. Häufig enthält die LH die allerödzeitliche Laacher-See-Tephra. Die Mächtigkeit der Hauptlage ist auffallend konstant und schwankt nach AG BODEN (1994: 365) zwischen 30 und 70 cm.

Die Mittellage (LM) kommt im Hangenden der Basislage vor und enthält immer einen äolischen Anteil, wodurch sich ein Substratunterschied zur Basislage ergibt. Die oft mehrgliedrige LM ist nur

an erosionsgeschützten Positionen erhalten. Nach AG BODEN (1994: 365) ist die LM meistens weniger als 50 cm mächtig.

Die Basislage (LB) ist weit verbreitet und ging aus den liegenden und/oder in Nachbarschaft hangaufwärts vorkommenden Gesteinen hervor. Die LB weist keine äolischen Fremdanteile auf und kann mehrgliedrig ausgebildet sein. Sie geht oft mit einer Zone des Hakenschlagens in den Zersatz bzw. das Anstehende über. Die Mächtigkeit der LB beträgt i.d.R. 2-10 dm (vgl. AG BODEN 1994: 365).

Als holozäne Hangsedimente sind in den deutschen Mittelgebirgen zudem Kolluvien aus umgelagertem Bodenmaterial wechselnder Mächtigkeit und Eigenschaften weit verbreitet. Sie können sich in Gefüge, Lagerungsdichte, Farbe, Humusgehalte und Körnung von primären autochthonen Bodenhorizonten unterscheiden, ihre Ansprache ist allerdings nicht immer problemlos (vgl. NILLER 1998: 42, SELBY 1993: 243). So weist z.B. SEMMEL mehrfach (u.a. 1994: 66; 2002: 170) darauf hin, dass Kolluvien stellenweise nicht oder nur schwer von der LH zu unterscheiden sind. Kolluvien belegen lokal begrenzte Erosionsvorgänge, stellen also terrestrische Geoarchive in höchstmöglicher raum-zeitlicher Auflösung dar.

Stratigraphische Zuordnung der periglazialen Deckschichten

Als einzige Deckschicht kann die LH in einigen Mittelgebirgen dann zeitlich eingeordnet werden, wenn sie die als Schicht oder Band erhaltene allerödzeitliche Laacher-See-Tephra überschichtet. In solchen Fällen entstand die LH nach dem mittleren Alleröd während der Jüngeren Tundrenzeit, als letztmalig der *Active Layer* über Permafrostboden durch Solifluktionvorgänge bei gleichzeitiger Aufarbeitung äolischer Sedimente bewegt wurde (z.B. BIBUS et al. 1991: 225; SEMMEL 1994: 66; THIEMEYER & VON KLITZING 1999: 119). In anderen deutschen Mittelgebirgen liegt die Laacher-See-Tephra allerdings nur in diffuser und feinverteilter Form aufgearbeitet in der LH vor. Da die LH dort aber ein durch pedogene und bioturbate Prozesse stark überprägtes Hangsediment darstellt, kann ihr nach Meinung von VÖLKEL et al. (2002b: 52) in solchen Fällen keinerlei (chrono)-stratigraphische Bedeutung zukommen. In jüngeren Untersuchungen kommen VÖLKEL & LEOPOLD (2001) für Untersuchungsgebiete des Bayerischen Walds zu der Auffassung, dass die LH eindeutig prä-allerödzeitliches Alter hat. Aufgrund dieser Befunde ist damit zu rechnen, dass die Diskussion um (die lange Zeit unumstrittene) Alterstellung der LH wieder aufleben wird.

Die skelettreiche LO überdeckt, wenn vorhanden, die LH und ist demnach jünger als diese. Per Definition (AG BODEN 1994: 363ff.) entstand sie im periglazialen Bildungsmilieu, bzw. wird vage an den Übergang zwischen Pleistozän und Holozän gestellt (vgl. BARDUA 1994: 9; THIEMEYER & VON KLITZING 1999: 119; VÖLKEL et al. 2002b: 51). In einigen jüngeren Untersuchungen wird die

Ansicht vertreten, dass es auch im gesamten Holozän zur Bildung der schuttartigen LO gekommen sein kann (vgl. EMMERICH 1994; RUSSOW & HEINRICH 2001: 47f.; VÖLKEL 1995: 33; VÖLKEL et al. 2002b: 51). Die Debatte um die umstrittene LO ist nicht abgeschlossen. In manchen Arbeiten wird sie komplett negiert (vgl. ZEPP 2002: 290f. ; ZEPP & MÜLLER 1999: 76f.) .

LM und LB kommen - außer in Gebieten holozäner Erosion - immer im Liegenden der LH vor und werden deshalb als prä-allerödzeitliche Bildungen aufgefasst. Nach ZEPP (2002: 279) entstand die LB unter kalthumiden Bedingungen im unteren und mittleren Pleniglazial, während die LM den kaltariden Bedingungen des oberen Pleniglazials zugeordnet wird. Örtlich lässt sich allerdings nachweisen, dass die gesamte Abfolge der Deckschichtenglieder im Spätglazial entstanden ist (vgl. EITEL 1999: 86; FRIED 1984: 56; SEMMEL 1994: 65).

Solche Befunde (z.B. FRÜHAUF 1991 und 1996; KLEBER 1991) werfen die prinzipielle Frage auf, ob es sich bei den einzelnen Deckschichten um chrono- bzw. lithostratigraphische Einheiten handelt, die sich zeitlich und morphologisch entsprechen, oder eher um lithofazielle bzw. prozessual gebundene Einheiten. FRÜHAUF (1996: 139) stellt hierzu fest, dass sich die einzelnen Deckschichtenglieder zumindest lokal oft "auseinander" entwickelten und/oder durch differenziertes und manchmal gleichzeitiges periglazialmorphologisches Geschehen entstanden sind. Deshalb geht mit der Gliederung in LH, LM und LB nur in Ausnahmefällen eine direkte altersmäßige Zuordnung der periglazialen Lockermaterialdecken bzw. ihrer einzelnen Schichtglieder einher (vgl. FRÜHAUF 1996: 136; MAHR 1998: 7f.; VÖLKEL 1995: 97).

Genese der periglazialen Deckschichten

Die Genese der Deckschichten geht auf eine Vielzahl von ineinandergreifenden Prozessen zurück. Als wichtigste Prozesse sind (Geli-)Solifluktion (vgl. SCHREINER 1997: 82-85; SEMMEL 1994: 9-13; WEISE 1983: 86-89) und Solimixtion als frostbedingte Durchmischung des Substrats (SEMMEL 1994: 11) zu nennen. Als weitere beteiligte Prozesse werden u.a. Abspülung, subkutane Ausspülung, Deflation und äolische Sedimentation diskutiert (vgl. SEMMEL 1994: 4-15). In den Lehrbüchern von SEMMEL (1994) und WEISE (1983) finden sich ausführliche Beschreibungen zur Prozessdynamik rezenter Periglazialgebiete, die der pleistozänen Prozessdynamik im zentraleuropäischen Mittelgebirgsbereich ähneln sollte.

Einige Faktoren wie z.B. Neigung, Exposition, Relief sowie die Höhe über NN modifizieren die Wirkung der oben genannten Prozesse und beeinflussen so die Deckschichtengenese. Tabelle 1 stellt die vom jeweiligen Faktor hervorgerufene Wirkung dar.

Bedeutung der quartären Hangsedimente für das Hangrelief

Das Relief im Hangbereich wird entscheidend von den quartären Hangsedimenten beeinflusst, da diese nach VÖLKELE et al. (2002: 106) auskleidend und begleichend wirken. Nach BORK et al. (1998: 318) gilt dies in besonderem Maß für die Kolluvien, die Dellen glätten und Kerben füllen können. Diese Aussage wird u.a. auch durch viele von THIEMEYER (1988) und SCHRAMM (1989) präsentierte Befunde gestützt. VÖLKELE et al. (2002b: 55) betonen die auffällig gleichmäßig gestreckten und selten zerrunsten Hänge der mittleren und höheren Lagen der Mittelgebirge und sehen die Ursache in mehrgliedrigen mächtigen Basislagenkomplexen, die Undulationen und Runsen im Festgestein nivellieren.

Tabelle 1: Faktoren der Deckschichtengese [nach BARBUA 1994: 11f., verändert]

Faktor	Wirkung
Neigung	steile Hangpartien bewirken einen größeren Abtrag und dadurch geringmächtigere Deckschichten
Exposition	Die Exposition beeinflusst Auftauen und Wiedergefrieren eines Hangsegments und dadurch Solifluktion und Kryoklastik auf diesem Hang. Auf Südhängen sollten die Deckschichten infolge der größeren Auftautiefe des <i>Active Layer</i> relativ am mächtigsten sein. Die Exposition war bei der Ablagerung von Löß in Bezug auf die vorherrschenden Windrichtungen von großer Bedeutung.
Relief	Oberhänge sind Abtragungsgebiete, Unterhänge Akkumulationsgebiete. Deshalb sollten Deckschichten des Oberhangs geringmächtiger sein als am Unterhang. LB sind am Unterhang mitunter mehrere Meter mächtig, während sie auf Rücken und auf Kuppen sehr geringmächtig sind oder sogar fehlen. Das Kleinrelief, das bei der Gese der LB vorhanden war, bedingt wechselnde Mächtigkeiten der LB.
Höhe über NN	In größerer Höhe herrscht stärkere Kälte und die Schneebedeckung hält länger an, die Auftautiefen sind geringer. Dadurch ist die Solifluktion zeitweise verringert. Höhere Niederschläge bedingen stärkere Abspülungen. Die Frostverwitterung ist intensiver.

Die Bedeutung der quartären Hangsedimente in Bezug auf Pedogenese, Bodenökologie und Hanghydrologie

Zu diesem Themenkomplex liegt eine Vielzahl jüngerer Untersuchungen vor (z.B. FRÜHAUF 1990, 1996, KLEBER 1991, 1992, 1997; MAHR 1998; SEMMEL 1983, 1989, 1991, 1994; STAHR 1979; VÖLKELE 1995; VÖLKELE et al. 2002a: 106-109; VÖLKELE et al. 2002b). Deshalb wird sich an dieser Stelle auf eine knappe Darstellung ausgewählter Erkenntnisse beschränkt.

Die Böden des Mittelgebirges sind regelhaft in den periglazialen Deckschichten und Kolluvien entwickelt. Deshalb steuern Verbreitung, Schichtaufbau und Materialeigenschaften dieser quartären Hangsedimente die Pedogenese und die bodenökologischen Eigenschaften (vgl. BIBUS et al. 1991; HOFMANN & FIEDLER 1986: 23; SEMMEL 1994: 89; SCHRÖDER & FIEDLER 1977: 51; STAHR 1979: 176; VÖLKELE 1995: 108-110; VÖLKELE et al. 2002a: 108; VÖLKELE et al. 2002b: 57).

Die LH ist infolge ihrer Merkmalscharakteristik (geringe Lagerungsdichte, Löss- bzw. Lösslehmgehalt, feinmaterialreich) und der ubiquitären Verbreitung von größter Bedeutung für die bodenbildenden Prozesse und die Standorteigenschaften. Die LH ist i.d.R. gut durchwurzelbar und determiniert infolge der Lössbeimengungen bei hoher Feldkapazität die physiologische Gründigkeit am Standort (vgl. BIBUS et al. 1991: 238; EITEL 1999: 87). Die oft ausgesprochen lockere Lagerung kann u.a. auf Bioturbation zurückgeführt werden (vgl. RUSSOW & HEINRICH 2001, VÖLKELE 1995: 32). Die äolischen Anteile der LH leisteten der Verbraunung und Verlehmung entscheidend Vorschub (vgl. VÖLKELE et al. 2002b: 57), deshalb ist in dieser Lage der Bv-Horizont der typischerweise anzutreffenden Braunerden entwickelt. Vielerorts wurde der Ah-Horizont von Podsolierungstendenzen infolge Entbasung und anthropogen verursachter saurer Deposition erfasst (vgl. z.B. BIBUS et al. 1991: 229). Nach KLEBER & SCHELLENBERGER (1998: 469) behindert die LH infolge des hohen Porenvolumens jeglichen Wasserfluss oft nur geringfügig und weist gute Infiltrations- und Draineigenschaften auf (vgl. auch BIBUS et al. 1991: 241; FRÜHAUF 1990: 110; VÖLKELE et al. 2002: 57), so dass es nach VÖLKELE et al. (2002a: 107) auch auf Kahlschlägen nach Starkregen kaum zu Verspülungserscheinungen kommt.

Die Anwesenheit der LM erhöht die Entwicklungstiefe der anzusprechenden Böden. Typische Bodenbildungen aus LH über LM sind Braunerden bzw. (Phäno-)Parabraunerden (vgl. EITEL 1999: 87; SEMMEL 1983: 47), wenn die LM aus Löss bzw. Lösslehm besteht. In solchen Fällen ist in der LH ein Al-Horizont entwickelt, während in der LM Btv- bis Bt-Horizonte anzutreffen sind. Die LM fungiert örtlich durch die dichte Lagerung und die geringen Skelettanteile bei lehmigen Bodenarten als Wasserstauer und zeigt dann stellenweise Hydromorphiemerkmale (vgl. EITEL 1999: 87; SEMMEL 1994: 90; VÖLKELE 1995: 30). Infiltriertes Sickerwasser wird aus der Vertikalen abgelenkt und fließt als Hangwasser in einem *Interflow*-Stockwerk oberflächenparallel ab (vgl. VÖLKELE et al. 2002a: 107).

Die LB kann sich bei Entfallen der LM örtlich durch Tonanreicherung auszeichnen. Die LB wurde nicht von der Verbraunungsdynamik erfasst, sondern bildet den Cv-Horizont der Böden. Die Skelettkomponenten sind meistens in Gefällsrichtung eingeregelt. Nach VÖLKELE (1995: 31) ist die LB immer frei von syngenetischen Lösslehmbeimengungen. Die LB ist häufig verdichtet und verfestigt, stellt dadurch eine physiologische Barriere dar und begrenzt die Gründigkeit eines Standorts (vgl. STAHR 1979: 176). In vielen kristallinen Mittelgebirgen tritt Sickerwasser in die LB über und führt dort zu *Interflow* (vgl. EITEL 1999: 87; KLEBER & SCHELLENBERGER 1998: 469, SEMMEL 1994: 90; VÖLKELE et al. 2002b: 56). Nach VÖLKELE et al. (2002a: 107) sind die Schluffkappen auf den Oberseiten des Grobskeletts und dessen charakteristisch blanke Unterseiten „beredete Zeugen“ dieser Leiterfunktion der LB.

Über die geökologische Bedeutung der Kolluvien im Mittelgebirgsbereich liegen nur wenig Untersuchungsergebnisse vor. Kolluvien bezeugen als Archive der Paläoumwelt unmittelbar menschliche Eingriffe in den Landschaftshaushalt (vgl. NILLER 1998: 41ff.). Sie werden als korrelierte Sedimente der Bodenerosion in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften stark von der ursprünglich hangaufwärts anstehenden erodierten periglazialen Lage geprägt. Gegenüber den autochthonen Böden am Hang unterscheiden sich Kolluvisole bei genetisch verknüpften Profilen durch die Verringerung von Porenraum und –größe, eine geringe Gefügestabilität, eine oftmals dichtere Lagerung und eine Tongehaltsverminderung (vgl. TIPPKÖTTER 1979: 140-147).

Hinsichtlich der pedogenetischen Bedeutung der Kolluvien wurde zuletzt von SEMMEL (2002: 171) festgestellt, dass selbst geringmächtige kolluviale Sedimente oft eine Differenzierung in Al- und Bt-Horizont infolge Tondurchschlämmung anzeigen und dementsprechend als Parabraunerden angesprochen werden müssen. Die Erklärung dieses Befunds bereitet angesichts des vorverwitterten verlagerten Substrats kaum Schwierigkeiten.

2.2 Holozäne Umweltgeschichte des Oberflächennahen Untergrunds in historischen Bergbaugebieten

Historische Bergbaugebiete weisen im Hinblick auf den Oberflächennahen Untergrund eine komplexe Umweltgeschichte auf. Es können vier Phasen ausgegliedert werden:

- Phase I: die postglaziale Situation vor der Einflussnahme des Menschen,
- Phase II: (mittelalterliche) Rodungsphase,
- Phase III: Bergbauphase,
- Phase IV: postmontane Phase.

Die hier vorgenommene idealtypische Gliederung entspricht der historischen Realität nur eingeschränkt, da sich die Phasen II und III oft ineinander verzahnen. Auch kann Phase II komplett entfallen.

2.2.1 Die postglaziale Ausgangssituation in Hangbereichen mit Vererzungen

Ungestörte Deckschichtenabfolgen im Mittelgebirgsbereich: der postglaziale Ausgangszustand

Der Idealfall der vertikalen Deckschichtenabfolge besteht im Mittelgebirgsrelief – bei Nichtberücksichtigung der umstrittenen LO – aus LH/LM/LB (über Saprolith und Anstehendem). Die LM fehlt meist, da sie nur lokal in abtragungsgeschützten oder ablagerungs-begünstigenden Hangpositionen auftritt (vgl. VÖLKELE et al. 2002a: 105). Es ist deshalb davon auszugehen, dass der

Normalfall der ungestörten Deckschichtenabfolge in den meisten deutschen Mittelgebirgen aus LH über LB bestand.

Vererzungen im Hangbereich des Mittelgebirgsreliefs: Mechanismen der Schwermetalldispersion

Vererzungen im Hangbereich führen zur Ausbildung von Dispersionshöfen im Oberflächennahen Untergrund (vgl. BAUMANN et al. 1979: 322ff.). Dispersionshöfe (bzw. geochemischen Aureolen oder Halos) sind nach SEIM & TISCHENDORF (1990: 536) Säume erhöhter Elementgehalte zwischen dem Rohstoffkörper und dem geochemischen Untergrund. Mit zunehmender Entfernung von den Mineralkörpern klingen die Gehalte allmählich ab (vgl. BAUMANN et al. 1979: 322ff.).

Es werden primäre und sekundäre Dispersionshöfe unterschieden. „Primary geochemical dispersion is usually associated with high temperatures and pressures [...] and involves crystallization from magma and hydrothermal liquids and the metasomatic migration of elements“, (KAURANNE et al. 1992: 93). Der primäre Dispersionshof wird also im Zuge des eigentlichen Bildungsprozesses der Lagerstätte ausgebildet (vgl. auch SEIM & TISCHENDORF 1990: 536). Begrifflichkeit und Genese der Sekundärdispersion können wie folgt zusammengefasst werden: “The process of movement away from the primary source is termed secondary dispersion and it can be effected by mechanical movement of fragments under gravity, movement as a gas, or diffusion of the elements in the form of ions as well as movement in solution,” (EVANS 1994: 138). Der sekundäre Dispersionshof (bzw. die sekundäre Aureole) ist also ein Produkt jüngerer geologischer Prozesse, denen die Lagerstätte und ihr primärer Dispersionshof unterworfen wurden (vgl. SEIM & TISCHENDORF 1990: 536; KAURANNE et al. 1992: 94ff).

In den mittleren Breiten setzt sich diese Sekundärdispersion aus den beiden Teilprozessen *Clastic Dispersion* und *Hydromorphic Dispersion* zusammen (vgl. KAURANNE et al. 1992: 94ff.).

Im (Spät-)Glazial kam es zur hangabwärts gerichteten Erzmineraldispersion durch die (Geli-) Solifluktion von aufbereiteten Hangmaterialien im Sinne einer *Clastic Dispersion* (vgl. KAURANNE et al. 1992: 96). Fragmente vererzten Gesteins werden hierbei in die Deckschichtengeneese miteinbezogen. Deckschichten mit hohen Anteilen an Lokalkomponenten des erzführenden Liegenden weisen deshalb erhöhte Schwermetallgehalte auf (LB und LH). Der Eintrag äolischer Komponenten wirkt sich verdünnend auf die Schwermetallführung aus (vgl. SABEL 1989b: 9).

Im Postglazial setzt dann verstärkt chemische Verwitterung ein. Davon sind auch die erzhaltigen Gesteinsfragmente betroffen, die im Zuge der *Clastic Dispersion* in die Deckschichten eingearbeitet wurden. Die Verwitterungsprodukte werden im Sinne einer *Hydromorphic Dispersion*

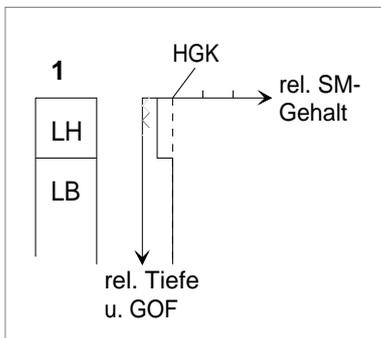
als gelöste und suspendierte Inhaltsstoffe mit dem Hangzugwasser in den Makroporen der Bodenmatrix hangabwärts verlagert (vgl. KAURANNE et al. 1992: 94ff.).

Decklagenausprägungen im Hangbereich von Vererzungszonen vor anthropogener Einflussnahme

Den nachfolgenden Ausführungen liegen folgende Vereinfachungen bzw. Annahmen zu Grunde:

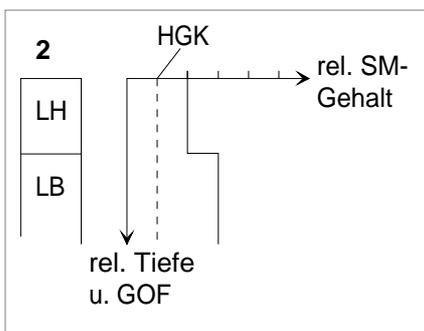
- Die Mittellage (LM) fehlt in den betrachteten Hangbereichen,
- die Oberlage (LO) findet keine Berücksichtigung und
- die Hauptlage (LH) enthält äolische Bestandteile.

Oberhalb und unterhalb des Dispersionshofs ist eine Abfolge von LH über LB ausgebildet. Die Schwermetallführung beider Lagen schwankt um die lokale Hintergrundkonzentration, wobei sich die äolischen Anteile (Lößlehm) der LH in einer „Verdünnung“ der Schwermetallgehalte gegenüber der LB bemerkbar machen (vgl. Abbildung 1).



Legende: HGK Hintergrundkonzentration
 rel. SM-Gehalt: relativer Schwermetallgehalt
 rel. Tiefe u. GOF: relative Tiefe unter Geländeoberfläche

Abbildung 1: Decklagenausprägung außerhalb des Schwermetalldispersionshofs [eigener Entwurf]



Legende: HGK Hintergrundkonzentration
 rel. SM-Gehalt: relativer Schwermetallgehalt
 rel. Tiefe u. GOF: relative Tiefe unter Geländeoberfläche

Abbildung 2: Schwermetallführung der Decklagen im Dispersionsbereich [eigener Entwurf]

Im Bereich des Dispersionshofs nimmt die Schwermetallführung der Decklagen deutlich gegenüber der HGK zu (vgl. Abbildung 2).

2.2.2 Die Rodungsphase: erste schwerwiegende anthropogene Überformung

Der bergbaulichen Nutzung der Mittelgebirgsräume ging vielerorts eine (mittelalterliche) Rodungsphase voraus (vgl. BORN 1989: 38; HAMBLOCH 1983: 34; JÄGER 1987: 150; KÖSTER 2000: 116). Rodungen und die nachfolgenden ackerbaulichen Nutzungen verursachen eine Mobilisation des morphodynamischen Systems der Mittelgebirge (vgl. HAHN 1992: 4), die natürliche geomorphologische Stabilitätsphase in den zuvor waldbedeckten Räumen wurde beendet (vgl. BORK et al. 1998: 18; ROHDENBURG 1989: 120f.). Die korrelierten Sedimente der ausgelösten Bodenerosion stellen v.a. Kolluvien am Hangfuß und Auensedimente in den Talböden dar (vgl. AHNERT 1996: 207; HENDL & LIEDTKE 1997: 287; GOLDENBERG 1993: 15; KÖSTER 2000: 116; PFLUG 2000: 133; STEUER 1993a: 14; WALTHER 1999: 84; WEISGERBER 1996: 129).

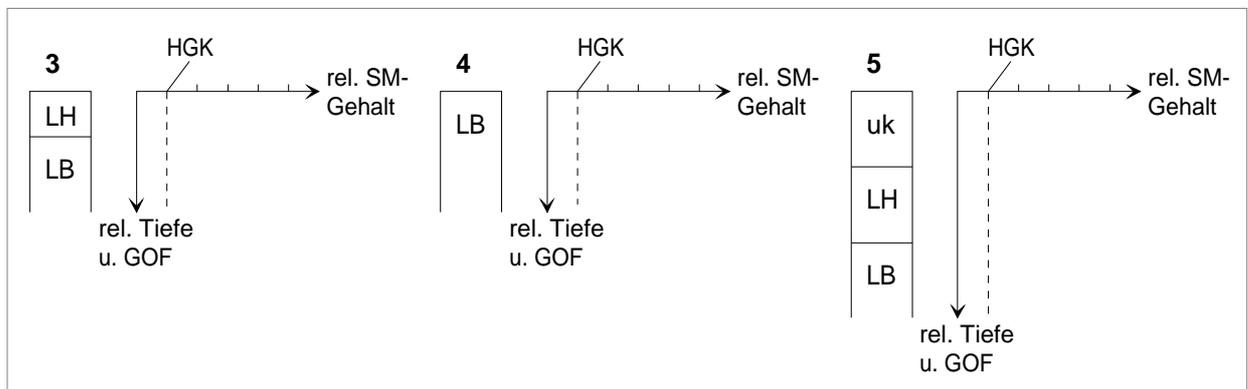
Bodenerosion als Eingriff in die Reliefentwicklung bedeutet im Mittelgebirgsbereich die Ausräumung der periglazialen Deckschichten. Von der Abtragung sind im wesentlichen LO und LH betroffen (vgl. SEMMEL 2002: 168). KLEBER & MAILÄNDER (1998: 199-202) sowie KLEBER et al. (1998: 1647-1650) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die LH in vielen Mittelgebirgen oft komplett ausgeräumt wurde, worauf auch Befunde bei BUBENZER hinweisen (z.B. 1999: 60). In Hangbereichen mit Vererzungen könnte dies bedeuten, dass schwermetallreiche LB oberflächennah anstehen. Entsprechende Ergebnisse wurden aber m.W. bislang nicht publiziert.

Demgegenüber sollten Profile stehen, bei denen Deckschichten kolluvial überdeckt wurden. Von Kolluvien begraben sind v.a. die LH, aber auch die LB, d.h. der Akkumulation kann auch eine Erosion vorangegangen sein. Die als Korrelate der Erosion entstandenen Kolluvien sind entgegen der Darstellung in den meisten Lehrbüchern (vgl. AHNERT 1996: 174; EITEL 1999: 16; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 32; STRAHLER & STRAHLER 1999: 382) keineswegs auf Unterhänge beschränkt. Vielmehr weisen Befunde in jüngeren Untersuchungen darauf hin, dass Kolluvien in allen Hangabschnitten anzutreffen sind (vgl. z.B. BORK et al. 1998: 20; BUBENZER 1999: 76; HAHN 1992: 112; HEINRICH 1989: 77; NILLER 1998: 279f.; THIEMEYER 1988: 89), denn die durch Bodenerosion abgetragenen Sedimente wurden oft nur sukzessive bis zur nächsten "lokalen Sedimentfalle" transportiert und gelangten dort zur Ablagerung (vgl. WALTHER 1999: 90). Solche Sedimentfallen können Ackerränder, Dellen, die nächsten bewaldeten Tiefenlinien, Mulden, etc. sein.

Der nachfolgende Abschnitt behandelt die möglichen Ausprägungen der Decklagen im Hangbereich mit Vererzungen am Ende der Rodungsphase. Die Transformationen werden in Abhängigkeit von der relativen Lage zum Dispersionshof behandelt.

Die Überformung der Decklagen am Ende der Rodungsphase oberhalb des Dispersionshofs

Die Verhältnisse zum Ende der Rodungsphase im Bereich oberhalb des Dispersionshofs entsprechen vielen Befunden zu erodierten und kolluvial überdeckten Decklagen „normaler“ Hangbereiche, d.h. Hangbereiche ohne Vererzungen. Die nachfolgende Abbildung 3 verdeutlicht denkbare Ausprägungen der quartären Deckschichten. Das schematische Profil 3 in Abbildung 3 zeigt eine erosiv verkürzte LH. In Decklagenprofil 4 dieser Abbildung wurde eine LH komplett ausgeräumt und die LB steht oberflächennah an. Das letzte Profil der Abbildung zeigt eine kolluviale Umlagerungsbildung uk im Hangenden einer LH. Die Schwermetallgehalte schwanken bei allen Profilen aufgrund der relativen Lage oberhalb zum Dispersionshof im Bereich der HGK.



Legende: HGK Hintergrundkonzentration
 rel. SM-Gehalt: relativer Schwermetallgehalt
 rel. Tiefe u. GOF: relative Tiefe unter Geländeoberfläche

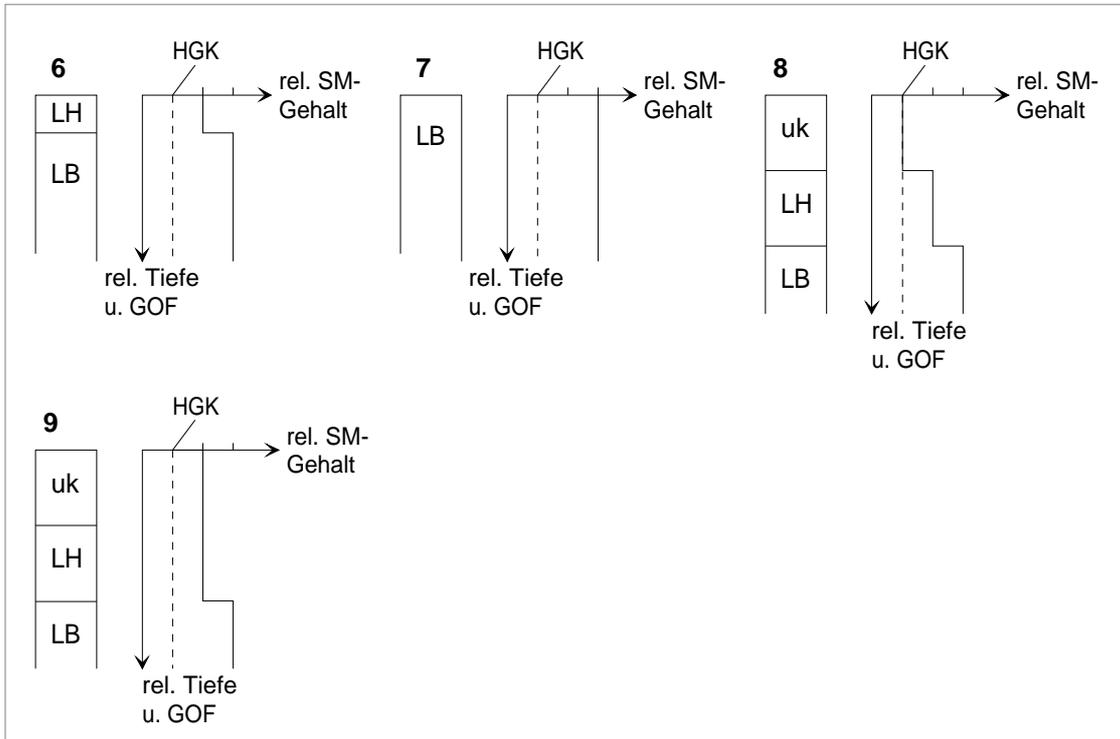
Abbildung 3: Die Ausprägung quartärer Deckschichten oberhalb des Dispersionshofs am Ende der Rodungsphase [eigener Entwurf]

Decklagenstrukturen im Dispersionsbereich am Ende der Rodungsphase

Der schematische Aufbau der Profile des Dispersionsbereichs entspricht den dargestellten Profilen der Abbildung 3. Bezüglich der Schwermetallgehalte ergeben sich durch den Erzausstrich jedoch Unterschiede (Abbildung 4).

Die Profile sind Weiterentwicklungen des Profils 2 in Abbildung 2. In Profil 6 und 7 der Abbildung 4 wurde die LH teilweise (Profil 6) oder vollständig (Profil 7) ausgeräumt. Dadurch steht eine erzmaterialhaltige LB oberflächennah an (Profil 6) oder bildet die Oberfläche selbst (Profil 7). Mit dem Schichtwechsel von der LH zur LB verbindet sich in Profil 6 (ebenso wie in den Profilen 8 und 9) ein sprunghafter Anstieg der Schwermetallgehalte. Infolge des Fehlens der LH in Profil 7 ist

kein sprunghafter Anstieg der Schwermetallkonzentration in der Lockersedimentdecke mit zunehmender Tiefe zu erwarten. Die Profile 8 und 9 zeigen kolluviale Ablagerungen über einer ungestörten Abfolge von LH über LB. Das kolluvial abgelagerte Solumsediment in Profil 8 wurde oberhalb des Dispersionshof generiert und weist entsprechend eine geringere Schwermetallkonzentration auf als die liegende LH aufweist. In Profil 9 hingegen entstammt das umgelagerte Sediment einer erodierten LH des Dispersionsbereichs. Entsprechend ist auch kein signifikanter Anstieg des Schwermetallgehalts an der Schichtgrenze zur LH ausgebildet.



Legende: HGK Hintergrundkonzentration
 rel. SM-Gehalt: relativer Schwermetallgehalt
 rel. Tiefe u. GOF: relative Tiefe unter Geländeoberfläche

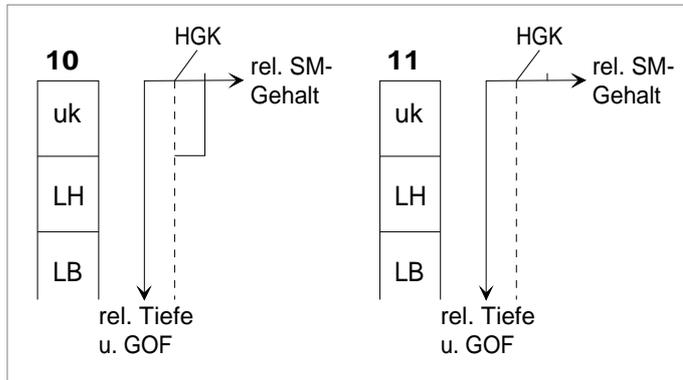
Abbildung 4: Decklagenstrukturen im Dispersionsbereich am Ende der Rodungsphase [eigener Entwurf]

Decklagenstrukturen unterhalb des Dispersionsbereichs am Ende der Rodungsphase

Die Standorte im Hangbereich unterhalb des Dispersionshofs zeichnen sich am Ende der Rodungsphase durch Sedimentakkumulation aus und werden als Weiterentwicklung von Profil 1 der Abbildung 1 beschrieben. Profil 10 in Abbildung 5 zeigt eine kolluviale Umlagerungsbildung uk über LH über LB. Der Schwermetallgehalt nimmt an der Schichtgrenze uk/LH sprunghaft ab.

Das hier zur Ablagerung gekommene Solumsediment entstammt einer erzmineralführenden Schicht des Dispersionsbereichs. Profil 11 der gleichen Abbildung zeigt den Fall eines Kolluviums,

dessen Schwermetallgehalte in der gesamten Profiltiefe um die lokale HGK schwanken. Das abgelagerte kolluviale Sediment wurde außerhalb des Dispersionsbereichs erodiert.



Legende: HGK Hintergrundkonzentration
rel. SM-Gehalt: relativer Schwermetallgehalt
rel. Tiefe u. GOF: relative Tiefe unter Geländeoberfläche

Abbildung 5: Umlagerungsbildungen und Decklagen unterhalb des Dispersionsbereichs zum Ende der Rodungsphase [eigener Entwurf]

2.2.3 Die Phase des Erzbergbaus

Erzbergbau verfolgt u.a. folgende Ziele (vgl. GOLDENBERG 1990b: 147 und 1993: 107):

- Förderung von metallhaltigem Erz ans Tageslicht (Erzgewinnung),
- Befreiung der Erze von Begleitgesteinen und –mineralen (Aufbereitung),
- Herauslösen der Metalle aus ihren chemischen Verbindungen (Verhüttung).

Die Realisierung der genannten Ziele erfordert vielschichtige Arbeitsabläufe. Jeder Arbeitsschritt hat direkte und indirekte Auswirkungen auf die Umwelt (vgl. BACHMANN 1993: 35; GOLDENBERG 1993: 107 und 1996: 233ff.; STEUER 1993a: 14). Eine Übersicht gibt Tabelle 2.

In der Tabelle nicht aufgeführt sind die Begleiterscheinungen bergbaulicher Raumerschließung wie z.B. Siedlungstätigkeit, Verkehrswegebau, etc. hinzu (vgl. SCHMIDT 2000: 13f.).

Tabelle 2: Bergbaubedingte Umweltauswirkungen [eigener Entwurf, auf Basis der Arbeiten von BACHMANN 1993: 35, GOLDENBERG 1993: 107 und 1996: 233ff. und STEUER 1993a: 14]

Arbeits-schritt	Direkte Auswirkung auf Gewässer, Relief und Boden	Charakteristischer Haldentyp (Stoffbestand)
Erzabbau	<ul style="list-style-type: none"> -Punktueller bis flächiger Vernichtung der Bodendecke -Anlage von Pingen, Schächte, Tagebaue, Verhaue, Stollenmundlöchern, Schmieden -Aufhaldung von Bergematerial (=Sedimentproduktion) -Wiederbelebung bzw. Einleitung von Erosionsprozessen im Hangbereich -Ablagerung von korrelierten Sedimenten in Senkenbereichen 	Bergehalden (Gangart und Erzminerale)
Erzaufbe- reitung	<ul style="list-style-type: none"> -Gewässerbelastung durch schwermetallkontaminierte Waschabgänge -Belastung von Hang-, Auen- und Gewässersedimenten -Teilweise Anlage von Stau- und Absetzteichanlagen -Aufbereitungshalden (=Sedimentproduktion) -Oxidation sulfidischer Phasen im Haldenkörper mit anschließenden Versauerungsschüben in Böden und Gewässern (Pyritoxidation, Acid Mine Drainage) 	Aufbereitungshalden (zerkleinertes Erz und Gangart)
Ver- hüttung	<ul style="list-style-type: none"> -Schadstoffemissionen -stellenweise Entwicklung von „Rauchblößen“ (durch Hüttenrauchemission entstandene vegetationsfreie Flächen) -Anlage von Meilerstellen -Anlage von Rennfeuerplätzen -Aufhaldung von Schlacken (=Sedimentproduktion) -Bebauungsmaßnahmen 	Schlackenhalde (nichtaufgeschmolzene reliktsche Komponenten, Schlackenreubildungen und Oxidationsprodukte)

2.2.3.1 Bergbaubedingte spezifische Transformationen des Oberflächennahen Untergrunds

In historischen Bergbaugebieten kam es zu charakteristischen Transformationen des Oberflächennahen Untergrunds. Im Tagebaubetrieb wurde die Lockersedimentdecke flächenhaft ausgeräumt. Örtlich entstanden Steilwände. Punktueller Zerstörungen des Boden-Sediment-Komplexes werden durch Pingen, Schurfe und Stollenmundlöcher hervorgerufen. Beim Aufschließen des Erzes fiel Gesteinsschutt an, der in Form von Berge-, Aufbereitungs- und Schlackenhalde häufig einfach verkippt wurde. Diese Haldenschüttungen maskieren örtlich den Oberflächennahen Untergrund und determinieren die standörtlichen Eigenschaften.

Alle Erzbergbauhalde sind potenzielle Schwermetallemitentten. Jüngere und ältere Ablagerungen können sich je nach Stand und Anwendung der Technik von Erzgewinnung, Aufbereitung und Verhüttung in der Schwermetallführung stark voneinander unterscheiden. Prinzipiell stellen alle Aufschüttungen mit zunehmendem Volumen und abnehmender Bewuchsintensität im Hinblick auf den Wasserpfad ein zunehmendes Risiko dar (vgl. WIEBER 1994: 223). Alte Halde weisen infolge ungenügender Klassierung und ineffizienter Erzausbringung in der Regel wesentlich höhere Schwermetallgehalte auf als Aufhaldungen jüngerer Datums (vgl. WIEBER 1998: 92). Stellenweise wurden alte Halde nach Einführung der Flotation erneut aufbereitet (vgl. WIEBER & KNOBLICH 1997: 102f., WILLMS 1996: 48).

Durch den Schwermetallaustrag können Standorte außerhalb des engeren Abbaubereichs belastet werden. Potenzielle Senken sind Böden und Gewässersedimente. Bei Anwesenheit sulfidischer

Phasen muss *a priori* ein Gefahrenpotenzial durch Schwermetallaustrag infolge der Sulfidoxidation angenommen werden (vgl. BEUGE & DEGNER 2000: 109; FIEDLER & RÖSLER 1993: 195). Die lithogenen Sulfide wurden unter Sauerstoffausschluss gebildet und enthalten toxische Schwermetalle. Bei Sauerstoffkontakt der Sulfide werden diese unter Freisetzung von Schwefelsäure und Schwermetallen oxidiert.

Der Schwermetallaustrag aus den Bergbauhalden erfolgt

- in suspendierter und gelöster Form mit dem Sickerwasser. Dies gilt insbesondere dann, wenn es sich um eine lockere Schüttung bei guter Durchfeuchtung mit sauerstoffreichem Niederschlagswasser handelt (vgl. FANKHÄNEL et al. 1998; FIEDLER & RÖSLER 1993: 195; GALONSKA & SCHREITER 1998; JAHN & MATHEIS 1998; WIEBER 1994: 223ff. und 2000: 98ff.);
- partikulär durch Winderosion (vgl. PALEN 1998: 187; SCHMIDT 2000: 67);
- lateral partikulär durch Erosions- und Rutschungsprozesse (vgl. KÖSTER 2000: 116; WIEBER 1998: 92); sowie
- örtlich durch die anthropogene Abfuhr von Haldenmaterial zum Zweck des Wege- und Dammbaus (vgl. SCHMIDT 2000: 17; WIEBER 1998: 92).

2.2.3.2 *Bergbaubedingte unspezifische Transformationen des Oberflächennahen Untergrunds*

Den spezifischen Überformungen des Oberflächennahen Untergrunds stehen unspezifische Transformationen wie das erosive Ausräumen und die Kolluviation der Deckschichten gegenüber (vgl. Kapitel 2.2.2). Diese Transformationen wurden ermöglicht durch die vom Bergbau selbst hervorgerufenen weitflächigen Entwaldungen. Das Montanwesen war größter Bedarfsträger für Holz (Grubenausbau, Verhüttung etc.) und sorgte dafür, dass schon frühzeitig die gesetzliche Vorrangigkeit des Montanwesens gegenüber allen anderen Waldnutzungen geregelt wurde (vgl. GOLDENBERG 1993: 111). Aufgrund der überaus starken Holzentnahmen im weiten räumlichen Umfeld der Bergbaureviere – durch den extensiven Bergbau des 13. Jahrhunderts etwa wurde der Holzbestand nahezu komplett vernichtet - wurden örtlich sogar Rodungsverbote ausgesprochen (vgl. STEUER 1993a: 14 und 1993b: 80).

2.2.3.3 *Decklagenausprägungen am Ende der Bergbauphase*

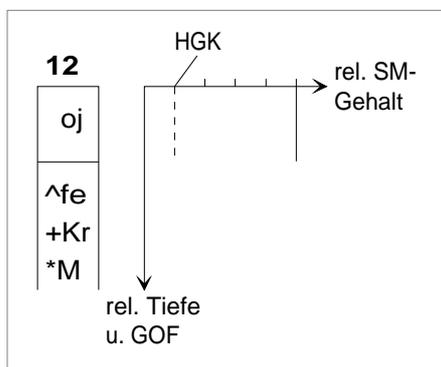
Die Decklagen wurden je nach relativer Lage zum Dispersionshof unterschiedlich transformiert.

Die Verhältnisse oberhalb des Dispersionshofs

Oberhalb des Dispersionshofs kommt es zu keiner spezifischen Überformung. Allerdings kann es zu bergbaulich induzierten Entwaldungen kommen. Diese Rodungsmaßnahmen können eine Erosions- und Akkumulationsdynamik auslösen, die kolluvial überdeckte und erosiv verkürzte Lagen hervorruft. Daraus resultieren gleichermaßen strukturierte Decklagen wie in Abbildung 3. Das bedeutet auch, dass sich oberhalb des Dispersionhofs nur in Ausnahmefällen entscheiden lässt, ob die Genese von Kolluvien oder erosiv gekürzten Profilen auf den Bergbau oder auf mittelalterliche Rodungen zurückzuführen ist.

Decklagenstrukturen im Dispersionsbereich am Ende der Bergbauphase

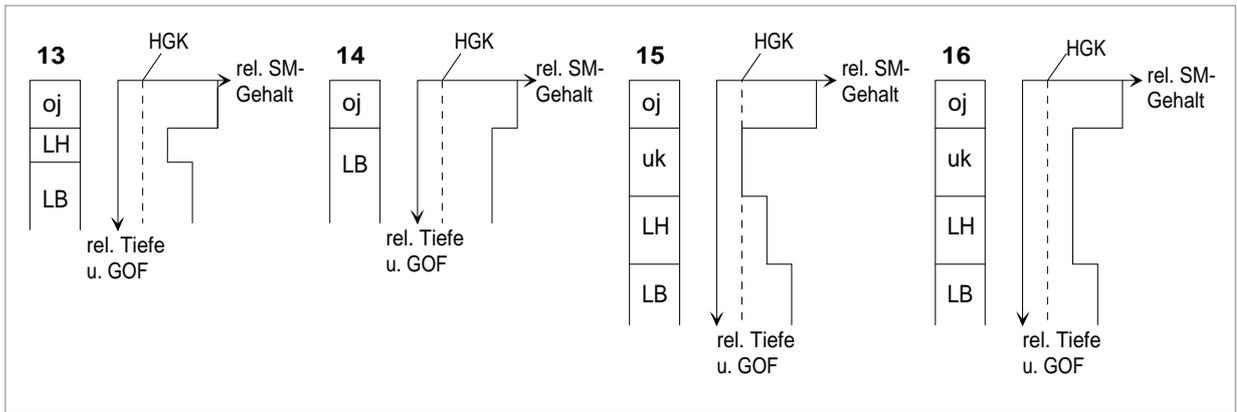
Im Bereich der oberflächlich ausstreichenden Dispersion kann es zur vollständigen Ausräumung der Decklagen bei gleichzeitiger Exposition des ehemals untergründigen Festgesteins kommen (ohne Abbildung). Denkbar ist auch ein unmittelbar auf dem Festgestein abgelagertes Haldensubstrat oj (Abbildung 6, Profil 12) mit hohen Schwermetallgehalten.



Legende:	HGK	Hintergrundkonzentration
	rel. SM-Gehalt:	relativer Schwermetallgehalt
	rel. Tiefe u. GOF:	relative Tiefe unter Geländeoberfläche

Abbildung 6: Haldensubstrate über Festgestein [eigener Entwurf]

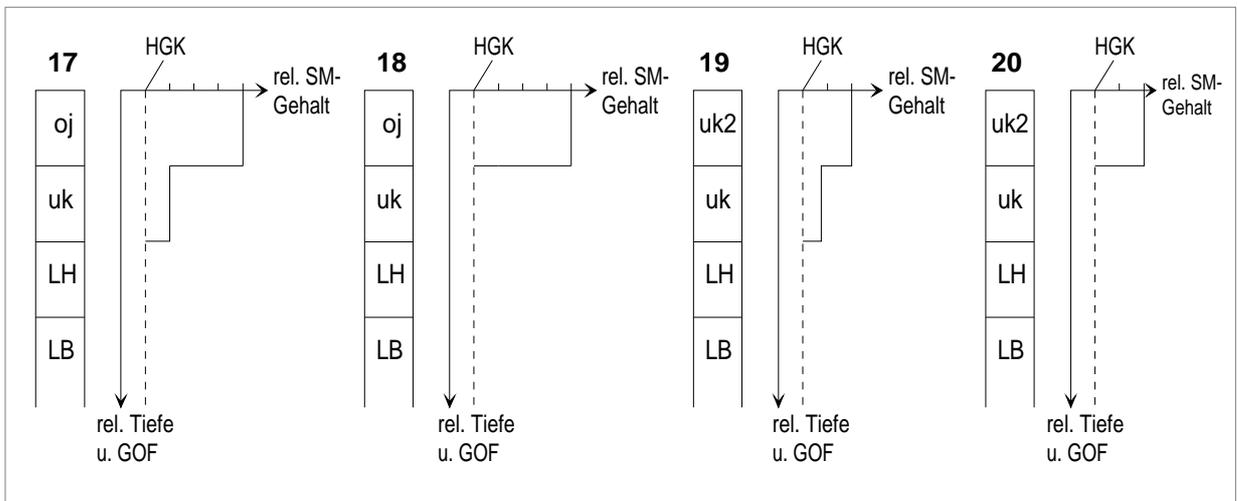
Weiterhin sind auch Profile vorstellbar, bei denen Haldensubstrate oj den Deckschichtenabfolgen des Dispersionsbereichs auflagern (vgl. Abbildung 7, Profile 13-16). Da diese Profile sich genetisch von den Profilen 6-9 der Abbildung 4 ableiten, erklärt sich der Tiefenverlauf der Schwermetallgehalte weitgehend selbst. In jedem Fall aber hat das Haldensubstrat höhere Schwermetallgehalte als die liegende Bildung und es kommt zu einem sprunghaften Abfallen der Gehalte an der Schichtgrenze.



Legende: HGK Hintergrundkonzentration
 rel. SM-Gehalt: relativer Schwermetallgehalt
 rel. Tiefe u. GOF: relative Tiefe unter Geländeoberfläche

Abbildung 7: Haldensubstrate überlagern quartäre Deckschichten [eigener Entwurf]

Decklagenstrukturen und Hangsedimente unterhalb des Dispersionshofs am Ende der Bergbauphase



Legende: HGK Hintergrundkonzentration
 rel. SM-Gehalt: relativer Schwermetallgehalt
 rel. Tiefe u. GOF: relative Tiefe unter Geländeoberfläche

Abbildung 8: Mögliche Profilabfolgen unterhalb des Dispersionshofs [eigener Entwurf]

Die gezeigten Profilabfolgen in Abbildung 8 erklären sich als Weiterentwicklung der Profile 10 und 11 aus Abbildung 5. In Profil 17 und 18 der Abbildung 8 wurden die Deckschichten durch stark schwermetallhaltige Haldensubstrate überdeckt. Die verbleibenden zwei Profile der Abbildung 8 (Profil 19, Profil 20) zeigen jeweils eine zweigliedrige kolluviale Umlagerungsbildung, deren oberflächennahes Teilglied erst als Folge bergbaulicher Tätigkeit

akkumuliert wurde. Da dieses uk2-Sediment dem Dispersionsbereich entstammt, sind höhere Schwermetallgehalte als im liegenden Sediment zu erwarten.

Der denkbare Fall, dass es zu einer Ablagerung eines Solumsediments kommt, das aufgrund seiner Herkunft außerhalb des Dispersionsbereichs eine nur um die HGK schwankende Schwermetallführung aufweist, wurde nicht dargestellt. In diesem Fall wäre die mehrphasige Entstehung der Umlagerungsbildung wohl nicht differenzierbar.

2.2.4 Postmontane Landnutzung

Die postmontane Landnutzung bestimmt allgemein die Morphogenese im Rahmen des vereinfachenden Prinzips von Aktivität unter ackerbaulicher Nutzung und Stabilität unter Wald (vgl. HAHN 1992: 4f.).

Lagen bzw. liegen die ehemaligen Erzbergbaureviere unter Wald, blieben Pingens und Halden erhalten und die Bodenbildungen unterlagen keiner weiteren Erosions-Akkumulationsdynamik. Entsprechend sind die Voraussetzungen günstig, um einige der schematisch dargestellten Profilabfolgen der Abschnitte 2.2.1 bis 2.2.3 wiederzufinden. Der Vergleich der real vorgefundenen Deckschichten und Bodenbildungen mit den schematischen Profilabfolgen kann in solchen Fällen zur Klärung der Substrat- und Bodengenese beitragen.

Fand in alten Bergbauarealen eine neuzeitliche ackerbauliche Landnutzung statt, wurden die meisten Relikte vernichtet und die Bodenbildungen schwerwiegend überformt (Erosion, Akkumulation, Düngung, anthropogener Materialauf- und Abtrag, Verdichtung etc.). Die meisten der schematisch dargestellten Profilabfolgen der Abschnitte 2.2.1 bis 2.2.3 erfuhren starke Überformungen. Eine Rekonstruktion der Substrat- und Bodengenese wird kaum möglich sein.

Wo der Erzbergbau im Tagebaubetrieb getätigt wurde, kam es zur vollständigen Abtragung der Lockermaterialdecken auf Flächen, die örtlich mehrere Hektar Größe erreichen. Solche Flächen werden in der Regel nicht mehr genutzt, sondern eingezäunt und aufgelassen. Eine dauerhafte Vegetation kann sich aufgrund ungünstiger Standortbedingungen nur schwer etablieren und ist auch dann eher lückenhaft ausgeprägt. Aufgelassene Tagebauflächen des Erzbergbaus verharren deshalb für Jahrzehnte bis Jahrhunderte im Aktivitätszustand, bis eine lückenlos ausgeprägte Vegetation für eine Restabilisierung sorgt – sofern andere Störfaktoren (z.B. Mineraliensucher) ausbleiben.

2.3 Bodenprofile aus Hangbereichen mit Vererzungszonen (Literaturübersicht)

An Arbeiten über Bodenbelastungen in Vererzungszonen und historischen Bergbaugebieten des zentraleuropäischen Mittelgebirgsbereichs mangelt es nicht.

Vorrangig erfolgte – vor dem Hintergrund einer anderen Fragestellung – allerdings eine Bearbeitung der Auensedimente (z.B. BECKER et al. 2000; DOBLER 2000; ECKERT 1998; FOELLMER 1999; KÖNIG 1986; KUNZ et al. 1998; ULIQUE et al. 1998; ZUMBROICH et al. 1994).

Viele geologische Untersuchungen dienten der Feststellung einer Belastungssituation oder der geochemischen Prospektion. Dabei blieb die Probenahmestrategie intransparent und die Standort- und Bodenansprache war unspezifisch oder gar nicht erst vorhanden. Deshalb konnten diese Untersuchungen keine Erkenntnisse für die vorliegende Arbeit liefern (z.B. ABU-ABED 1974; BERGFELDT 1995; DEIßMANN 1996; HILDEBRANDT 1997; HILMER 1972; HINZMANN 1991; HORION & FRIEDRICH 1986; KAPPES 2000; KLEINEVOSS 1971; KLUGE et al. 1998; KRÖMER 1981; KULMS 1970; LENZ 1986; MANZ 1995; METZGER et al. 1998; NEUHAUS 1994; RÜDE 1996; SCHALICH et al. 1986; SCHEPS et al. 1986; SCHILD 1987; STADLER 1986; WALLNER 1977; WICHTMANN 1986; WIEBER 1994; WIEBER 1998; WIEBER & KNOBLICH 1996; WIEBER et al. 1996).

In vielen Arbeiten werden Aufhaldungen bearbeitet (z.B. HILDEBRANDT 1997; JAHN & MATHEIS 1998; PARDEY 1999; PARDEY et al. 1999; PLEBOW & HEINRICHS 2000; SCHALICH et al. 1986; SCHMIDT 2000; SCHMIDT & FRÜHAUF 1997; WEISE et al. 1997; WIEBER 1994, 2000; WIEBER & KNOBLICH 1995, 1996; WIEBER & EULER 2000; ZELLER 1998) und deren Gefährdungspotenzial durch hohe Schwermetallgehalte festgestellt. Diese Halden und ihr zugehöriger Schwermetall-tiefengradient könnten mit dem theoretisch abgeleiteten Profil 12 aus Abschnitt 2.2 schematisch dargestellt werden.

Insgesamt liegen nur sehr wenige Arbeiten aus historischen Bergbaugebieten oder Vererzungszonen vor, in denen Boden- oder gar Deckschichtenprofile des Hangbereichs explizit angesprochen wurden.

SCHMIDT (2000) thematisiert Halden als Schwermetallemittenten in ihrem Einfluss auf die Schwermetallführung angrenzender Böden und kommt zum Schluss, dass „Der Anteil der [...] als rezente Emissionsquellen- speziell betrachteten Bergehalden des Mansfelder Kupferschiefer-

bergbaus an der Schwermetallbelastung von Böden [...] als sehr gering eingeschätzt werden muss,“ (SCHMIDT 2000: 108). Die in seiner Arbeit dargestellten bergbaulich geprägten Bodenprofile könnten mit den theoretischen Profilabfolgen 17-20 (Abbildung 8 des Abschnitts 2) verglichen werden.

SABEL (1989a) präsentiert einen Braunerde-Pseudogley aus Decksediment über Basisschutt aus der Nähe von Büdingen / Hessen, der geradezu mustergültig dem theoretischen Profil 6 der Abbildung 4 entspricht. Der gleiche Autor stellt in einer weiteren Arbeit aus dem selben Jahr (1989b: 10f.) eine Braunerde aus LH über LB aus der Rhön vor. Das präsentierte Profil stellt eine Abwandlung des schematischen Profils 6 der Abbildung 4 dar, denn in diesem speziellen Fall enthält die LH keine verdünnend wirkenden Lösslehmkomponenten. Deshalb ist kein Sprung im Schwermetalltiefenverlauf an der Schichtgrenze LH zu LB ausgeprägt und die Schwermetallgehalte der LH liegen in der gleichen Größenordnung wie in der LB.

WEISE et al. (1997: 87) beschreiben einen Braunerde-Pseudogley aus dem Erzgebirge östlich von Freiberg, dessen Substrat aus grusführendem Löss über Schuttsand aus Gneis besteht. Diese Substratschichtung könnte auf eine Deckschichtenabfolge von LH über LB hinweisen. Das Profil sollte, wenn man nur den Tiefenverlauf des Arsens betrachtet, dem Profil 6 aus Abbildung 4 entsprechen. Eine sichere Beurteilung kann nicht erfolgen, da das Profil in Immissionslage der Freiburger Hüttenindustrie aufgenommen wurde und der obere Bodenhorizont stark kontaminiert wurde.

WINKLER et al. (2000: 153-156) zeigen einen Pseudogley-Kolluvisol//Pseudogley aus dem Erzgebirge bei Freiberg und geben die Profilabfolge mit uk über LH / LM / LB und Gneisersatz an. Das Profil stellt infolge der Anwesenheit der LM eine Modifikation des theoretischen Profils 8 der Abbildung 4 dar – sofern die Schwermetalltiefenverläufe auf der leider viel zu kleinen Grafik von mir richtig interpretiert wurden.

3 Schwermetallgehalte im Boden: Gefährdungsabschätzung

3.1 Rechtliche Grundlagen, Definitionen

Die rechtliche Grundlage zur nachhaltigen Sicherung oder Wiederherstellung von Bodenfunktionen bildet bundesweit einheitlich das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBODSCHG 1999). In §1 des Gesetzes wird festgelegt, dass schädliche Bodenveränderungen zu sanieren sind und Vorsorge gegenüber nachteiligen Einwirkungen auf den Boden zu treffen ist.

Die dem BBODSCHG (1999) nachgeordnete Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBODSCHV 1999) konkretisiert die Anforderungen des BBODSCHG (1999) bezüglich der Erfassung und Bewertung schädlicher Bodenveränderungen, altlastverdächtiger Flächen und Altlasten im Hinblick auf die menschliche Gesundheit, das Grundwasser und andere Schutzgüter. Für viele Schadstoffe wurden Vorsorge-, Maßnahmen- und Prüfwerte festgelegt.

Ergänzend können landesrechtliche Regelungen erlassen werden. In Rheinland-Pfalz dienen die ALEX- Merk- und Informationsblätter dem einheitlichen Vollzug der Bodenschutz- und Altlastenbearbeitung. Von Bedeutung ist insbesondere ALEX 13 (2001), das über die Homepage des Ministeriums für Umwelt und Forsten zum Download bereitgestellt wird (<http://www.muf.rlp.de/index2.asp?bereich=107>; Aufruf: 12.12.2003).

In Hessen besitzt unter anderem das Hessische Handbuch Altlasten, Band 3, Teil 3 (HMULF & HLUG 2001), das Grundlage für ALEX 13 wurde, Gültigkeit im Vollzug.

Zentrale Definitionen nach § 2 des BBODSCHG (1999)

Das BBODSCHG (1999) gibt eine Reihe von Definitionen vor.

- Schädliche Bodenveränderung: Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen.
- Verdachtsflächen: Grundstücke, bei denen der Verdacht schädlicher Bodenveränderungen besteht.
- Altlasten: stillgelegte Abfallbeseitigungsanlagen sowie sonstige Grundstücke, auf denen Abfälle behandelt, gelagert oder abgelagert worden sind und Grundstücke stillgelegter Anlagen und sonstiger Grundstücke, auf denen mit umweltgefährdenden Stoffen umgegangen worden ist, ausgenommen Anlagen, deren Stilllegung eine Genehmigung nach

dem Atomgesetz bedarf (Altstandorte), durch die schädliche Bodenveränderungen oder sonstige Gefahren für den Einzelnen oder die Allgemeinheit hervorgerufen werden.

- Altlastverdächtige Flächen: Altablagerungen und Altstandorte, bei denen der Verdacht schädlicher Bodenveränderungen oder sonstiger Gefahren für den Einzelnen oder die Allgemeinheit besteht.

Wertkategorien des BBODSCHG (1999)

Nach §8 des BBODSCHG (1999) werden folgende Wertkategorien unterscheiden:

- Prüfwerte: Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung oder Altlast vorliegt.
- Maßnahmenwerte: Werte für Einwirkungen oder Belastungen, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung i.d.R. von einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind.
- Vorsorgewerte: Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung von geogenen oder großflächig siedlungsbedingten Schadstoffgehalten i.d.R. davon auszugehen ist, dass die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht.

Impliziert wird damit, dass Prüf- und Maßnahmenwerte aus Sicht einer Gefahrenabwehr zum Schutz eines definierten Schutzguts (Mensch, Nutzpflanze, Grundwasser) in Abhängigkeit von der Nutzung anzuwenden sind. Andererseits steht bei der Anwendung der Vorsorgewerte der Schutz des Bodens und seiner natürlichen Funktionen vor zukünftigen beeinträchtigenden Wirkungen im Fokus der Betrachtung.

3.2 Vorgehen bei der Gefährdungsabschätzung

Das Vorgehen bei der Gefährdungsabschätzung bei der Bearbeitung von Verdachtsflächen/altlastverdächtigen Flächen und schädlichen Bodenveränderungen / Altlasten erfolgt nach den Vorgaben des BBODSCHG (1999) und der BBODSCHV (1999). Eine Arbeitshilfe wurde hierzu von der LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2001) publiziert und kann über die Webadresse <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/> (Aufruf: 12.12.2003) heruntergeladen werden. Vorgeschriebene gleichartige Handlungsabläufe (Erfassung, Orientierende Untersuchung, Detailuntersuchung, Gefahrenabwehr, Überwachung) dienen der einheitlichen Bearbeitung der genannten Flächen.

Die hier vorgelegte Arbeit ist demnach im Sinne einer Erfassung oder Orientierenden Untersuchung zu werten, da kein offizieller behördlicher Auftrag zur Durchführung der

Untersuchungen vorlag. Die nachfolgenden Arbeitsschritte lehnen sich an das Vorgehen bei der Orientierenden Untersuchung an.

Arbeitsschritt 1: Beurteilung der Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung

Der Vergleich der Eluatgehalte aus einem Königswasseraufschluss mit den Vorsorgewerten der nachfolgenden Tabelle 3 entscheidet, ob die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht.

Tabelle 3: Vorsorgewerte für Metalle [mg/kg TM] [verändert nach BBODSCHV 1999, Anhang 2, Abschnitt 4]

	Cd	Pb	Cr	Cu	Hg	Ni	Zn
Bodenart Ton	1,5	100	100	60	1	70	200
Bodenart Lehm/Schluff	1	70	60	40	0,5	50	150
Bodenart Sand	0,4	40	30	20	0,1	15	60
Böden mit naturbedingt erhöhten Hintergrundgehalten	Unbedenklich, soweit eine Freisetzung der Schadstoffe oder zusätzliche Einträge keine nachteiligen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen erwarten lassen						

Anmerkungen zu dieser Tabelle:

1. Die Vorsorgewerte beziehen sich auf die Hauptbodenarten gemäß AG BODEN (1994).
2. stark schluffige Sande sind entsprechend der Bodenart Lehm/Schluff zu bewerten.
3. Der Säuregrad der Böden ist wie folgt zu berücksichtigen:
 - Bei Böden der Bodenart Ton mit pH < 6 gelten für Cd, Ni und Zn die Vorsorgewerte der Bodenart Lehm/Schluff.
 - Bei Böden der Bodenart Lehm/Schluff mit pH < 6 gelten für Cd, Ni und Zn die Vorsorgewerte der Bodenart Sand.
 - Bei Böden mit pH < 5 sind die Vorsorgewerte für Pb entsprechend den ersten beiden Anstrichen herabzusetzen.
4. Die Vorsorgewerte der Tabelle finden für Böden und Bodenhorizonte mit einem Humusgehalt von mehr als 8 % keine Anwendung. Für diese Böden können die zuständigen Behörden ggf. gebietsbezogenen Festsetzungen treffen.

Arbeitsschritt 2: Bestimmung der Wirkungspfade

Liegt eine schädliche Bodenveränderung vor, muss festgestellt werden, über welche Wirkungspfade diese auf die Schutzgüter Einfluss nehmen kann. Die BBODSCHV (1999) benennt in ihrem Anhang 1 die Wirkungspfade

- Boden-Mensch,
- Boden-Nutzpflanze und
- Boden-Grundwasser.

Bei den Untersuchungen muss eine Nutzungsdifferenzierung erfolgen. Für den Wirkungspfad Boden-Mensch sind die Nutzungen Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen sowie Industrie- und Gewerbegrundstücke ausgewiesen. Für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze müssen die Nutzungen Ackerbau/Nutzgarten und Grünland unterscheiden werden. Bei Untersuchungen zum Wirkungspfad Boden-Grundwasser findet keine Differenzierung der Bodennutzung statt.

Arbeitsschritt 3a: Beurteilung des Gefahrenpotenzials einer schädlichen Bodenveränderung für das Schutzgut menschliche Gesundheit

In Abhängigkeit von der unterschiedlichen Nutzung (Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen, sowie Industrie- und Gewerbegebiete) wird der oberflächennahe Boden untersucht, der inhalativ oder oral aufgenommen werden kann. In der nachfolgenden Tabelle 4 werden festgelegte Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch und damit das Schutzgut menschliche Gesundheit dargestellt.

Tabelle 4: Prüfwerte anorganischer Schadstoffe für den Wirkungspfad Boden-Mensch [aus BBODSCHV (1999) Anhang 2, Abschnitt1]

Prüfwerte [mg/kg TM]				
Stoff	Kinder-spielflächen	Wohngebiete	Park- und Frei-zeitanlagen	Industrie- und Ge-werbegrundstücke
As	25	50	125	140
Pb	200	400	1000	2000
Cd	10	20	50	60
Ni	70	140	350	900
Hg	10	20	50	80

Die Ermittlung des Gehaltes an anorganischen Schadstoffen zum Vergleich der Schadstoffaufnahme auf dem Wirkungspfad Boden-Mensch erfolgt aus dem Königswasserextrakt.

Arbeitsschritt 3b: Beurteilung des Gefahrenpotenzials einer schädlichen Bodenveränderung für das Schutzgut Nutzpflanze

Bei der Untersuchung zum Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze werden die Nutzungen Ackerbau/Nutzgarten und Grünland differenziert. Tabelle 5 benennt die Prüf- und Maßnahmenwerte für Ackerbau- und Nutzgartenflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität.

Tabelle 5: Prüf- und Maßnahmenwerte anorganischer Schadstoffe für Ackerbau- und Nutzgartenflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität [aus: BBODSCHV (1999) Anhang 2, Abschnitt 2]

Ackerbau, Nutzgärten			
Stoff	Methode ¹	Prüfwert [mg/kg]	Maßnahmenwert [mg/kg]
As	KW	200 ³	-
Cd	AN	-	0,04 / 0,1 ²
Pb	AN	0,1	-
Hg	KW	5	-
Tl	KW	0,1	-

Anmerkungen zu dieser Tabelle / Legende:

¹ Die Bestimmung der Schwermetallgehalte erfolgt aus Königswasser- (KW) bzw. Ammoniumnitratextrakt (AN).

² Auf Flächen mit Brotweizenanbau oder Anbau stark Cd-anreichernder Gemüsearten gilt als Maßnahmenwert 0,04 mg/kg Trockenmasse; ansonsten gilt als Maßnahmenwert 0,1 mg Trockenmasse.

³ Bei Böden mit zeitweise reduzierenden Verhältnissen gilt ein Prüfwert von 50 mg/kg Trockenmasse.

Tabelle 6 benennt die Maßnahmenwerte für Grünlandflächen im Hinblick auf die Pflanzenqualität. Die Gewinnung des Gehaltes an anorganischen Schadstoffen zum Vergleich der Schadstoffaufnahme auf diesem Wirkungspfad erfolgt aus dem Königswasserextrakt.

Tabelle 6: Maßnahmenwerte anorganischer Schadstoffe für Grünlandflächen [aus: BBODSCHV (1999) Anhang 2, Abschnitt 2]

Grünland	
Stoff	Maßnahmenwert [mg/kg]
As	50
Pb	1200
Cd	20
Cu	1300 ¹
Ni	1900
Hg	2
Tl	15

Anmerkungen zu dieser Tabelle / Legende:

¹: Bei Grünlandnutzung durch Schafe gilt als Maßnahmenwert 200 mg/kg TM

Tabelle 7 konkretisiert die Prüfwerte für den Schadstoffübergang Boden-Pflanze auf Ackerbauflächen im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen. Die Gewinnung der Schwermetallgehalte zum Vergleich der Schadstoffaufnahme auf diesem Wirkungspfad erfolgt aus dem Ammoniumnitratextrakt.

Tabelle 7: Prüfwerte zur Beurteilung von Ackerbauflächen im Hinblick auf Wachstumsbeeinträchtigungen bei Kulturpflanzen [aus: BBODSCHV (1999) Anhang 2, Abschnitt 2]

Ackerbau	
Stoff	Prüfwert [mg/kg]
As	0,4
Cu	1
Ni	1,5
Zn	2

Arbeitsschritt 3c: Beurteilung des Gefahrenpotenzials einer schädlichen Bodenveränderung für das Schutzgut Grundwasser

Für die Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser fordert die BBODSCHV (1999) die Durchführung einer Sickerwasserprognose. Die Sickerwasserprognose wird in §2 Nr.5 BBODSCHV (1999) wie folgt definiert: „Abschätzung der von einer Verdachtsfläche, altlastverdächtigen Fläche, schädlichen Bodenveränderung oder Altlast ausgehenden oder in überschaubarer Zukunft zu erwartenden Schadstoffeinträge über das Sickerwasser in das Grundwasser, unter Berücksichtigung von Konzentrationen und Frachten und bezogen auf den Übergangsbereich von der ungesättigten zur wassergesättigten Zone.“

ALEX 11 (Arbeitshilfe Sickerwasserprognose bei orientierenden Untersuchungen) wurde von der BUND-/LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ (LABO) herausgegeben. Damit existiert

eine Arbeitshilfe für die Praxis, welche die Vorgaben der BBODSCHV präzisiert, bzw. handhabbar macht. Die nachfolgenden Ausführungen lehnen sich an die Darstellung in diesem Merkblatt an.

Verfahren der Sickerwasserprognose

Es gibt folgende Möglichkeiten, die Sickerwasserprognose durchzuführen:

- Untersuchungen im Grundwasserabstrom,
- In-situ-Untersuchungen in der ungesättigten Bodenzone und
- Material- und Bodenuntersuchungen.

Die beiden letzteren Methoden lassen eine überschlägige Abschätzung des zukünftigen Stoffeintrags in das Grundwasser zu, während die Untersuchung im Grundwasserabstrom klärt, ob ein Schadstoffeintrag ins Grundwasser bereits stattgefunden hat. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zur Sickerwasserprognose Bodenuntersuchungen durchgeführt.

Die Sickerwasserprognose für Bodenuntersuchungen gliedert sich in folgende Verfahrensschritte:

- Bestimmung der Schadstoffgesamtgehalte in Bodenproben (Königswassereluat);
- Abschätzung des Freisetzungsverhaltens der Schadstoffe mittels Elutionsuntersuchungen;
- Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Zone (betrachtet werden hierbei die Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung, die Sickerwasserrate, die Durchlässigkeit und die Sättigungsverhältnisse des Bodens, ausgewählte Textureigenschaften des Bodens und die Milieubedingungen im Boden);
- Abschätzung, ob am Ort der Beurteilung ein Prüfwertüberschreitung derzeit oder zukünftig wahrscheinlich ist.

Bestimmung und Beurteilung der Schwermetallgehalte in Bodenproben

Für die Bestimmung des Schwermetallgehalts wird die Bodenprobe mit dem Königswasserextrakt aufgeschlossen und der Schadstoffgehalt im Extrakt bestimmt. Dieser Wert wird gegen die Beurteilungswerte der nachfolgenden Tabelle 8 abgeglichen. Anzumerken bleibt, dass nur Hessen und Rheinland-Pfalz die Benutzung dieser Tabelle 8 im Rahmen des Vollzugs der Gefährdungsabschätzung vorschreiben.

Überschreiten die Schadstoffgehalte die Beurteilungswerte um ein Vielfaches, sind die Schadstoffgehalte *sehr hoch*. Entsprechen die Schadstoffgehalte etwa den Beurteilungswerten, sind die Schadstoffgehalte *hoch*. Unterschreiten die Schadstoffgehalte deutlich die Beurteilungswerte, sind sie als *gering* einzustufen.

Tabelle 8: Beurteilungswerte für den Pfad Boden-Grundwasser [nach ALEX 13: 81]

Parameter	Beurteilungswerte
As	60
Pb	500
Cd	10
Cr	500
Cu	500
Ni	500
Hg	10
Zn	100

Abschätzung der Mobilität der Schwermetalle in Bodenproben

Die Beurteilung der Mobilität wird mittels Elutionsversuchen vorgenommen. Zur Verfügung steht u.a. das S4-Verfahren nach DIN 38414-4. Der eluierbare Schadstoffanteil wird dann gegen Tabelle 9 abgeglichen und zum Gesamtgehalt in Beziehung gesetzt.

Tabelle 9: Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser [aus: BBODSCHV (1999) Anhang 2 Abschnitt 3]

Schwermetall –(oide)	Prüfwert [myg/l]
Sb	10
As	10
Pb	25
Cd	5
Cr	50
Chromat	8
Co	50
Cu	50
Mo	50
Ni	50
Hg	1
Se	10
Zn	500
Sn	40

Einschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone

Die Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone wird bei der Orientierenden Untersuchung gemäß ALEX 13 über verschiedene Szenarien abgeschätzt. Bei der Bearbeitung eines Falls soll dasjenige Szenario ausgewählt werden, das dem konkreten Fall am ähnlichsten ist. Veränderlich sind hierbei folgende Parameter:

- Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung,
- Versiegelung,
- Durchlässigkeit des Bodens/Untergrunds,
- Biologische Abbaubarkeit der Schadstoffe.

Die ersten drei Parameter zielen auf die Verweildauer des Sickerwassers in der Grundwasserüberdeckung und damit die zeitliche Wirkung immobilisierender Abbau- und Sorptionsprozesse.

Der vierte Parameter hat im Falle der Schwermetalle keine Bedeutung. In der Tabelle 10 werden diejenigen Szenarien vorgestellt, die eine Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Zone ermöglichen sollen.

Tabelle 10: Abschätzung der Schutzfunktion der ungesättigten Zone [aus: ALEX 13: 29]

Szenario Nr.	Mächtigkeit der unbelasteten GW-Überdeckung ²	Versiegelung ³	Durchlässigkeit des Bodens / Untergrunds ⁴	Biologische Abbaubarkeit (organische Schadstoffe) ⁵	Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone
1	gering	unversiegelt	(-)	(-) ¹	gering
2	gering	Pflaster / Bewuchs	(-)	(-)	gering
3	gering	versiegelt	groß / mittel	(-)	gering
4	gering	versiegelt	klein	(-)	mittel
5	mittel	unversiegelt	groß	(-)	gering
6	mittel	unversiegelt	mittel	gering	gering
7	mittel	unversiegelt	mittel	gut	mittel
8	mittel	unversiegelt	klein	(-)	mittel
9	mittel	Pflaster / Bewuchs	groß	(-)	gering
10	mittel	Pflaster / Bewuchs	mittel / klein	gering	mittel
11	mittel	Pflaster / Bewuchs	mittel / klein	gut	hoch
12	mittel	versiegelt	groß	(-)	mittel
13	mittel	versiegelt	mittel / klein	(-)	hoch
14	groß	unversiegelt	groß	(-)	gering
15	groß	unversiegelt	mittel / klein	gering	mittel
16	groß	unversiegelt	mittel / klein	gut	hoch
17	groß	Pflaster / Bewuchs	groß	(-)	mittel
18	groß	Pflaster / Bewuchs	mittel / klein	(-)	hoch
19	groß	versiegelt	groß	(-)	mittel
20	groß	versiegelt	mittel / klein	(-)	hoch

Anmerkungen zu dieser Tabelle / Legende:

¹(-): nicht entscheidungsrelevant

²Mächtigkeit der unbelasteten Grundwasserüberdeckung:

Die Mächtigkeit des Lockergesteins (oder des klüftfreien Festgesteins) zwischen der Unterkante des Kontaminationsherds und der GW-Oberfläche wird berücksichtigt. Klüftige Festgesteine oder Lockergesteine mit sehr hoher Durchlässigkeit (Mittel-, Grobsand, Kies) gelten als nicht vorhanden. Anhaltswerte: *gering*: < 2 m / *mittel*: 2 bis 10 m / *groß*: > 10 m

³Versiegelung:

Als *versiegelt* gelten Flächen, die mit Beton, Teer oder Asphalt abgedeckt sind und bei denen der Fortbestand der Versiegelung dauerhaft gesichert ist und deren Versiegelung weitgehend unbeschädigt ist. Dann kann die Sickerwasserrate als *gering* angenommen werden. Bei gepflasterten *Flächen*, Flächen mit dichtem Bewuchs und Flächen mit schadhafter Versiegelung kann von einer *mittleren* Sickerwasserrate ausgegangen werden. Bei unversiegelten, wenig oder nicht bewachsenen Flächen ist die Sickerwasserrate i.d.R. *hoch*.

⁴Durchlässigkeit des Bodens/Untergrunds:

groß: überwiegend sandige, kiesige Sedimente oder klüftiges Festgestein, keine Tonschichten *mittel*: überwiegend schluffiges Sediment oder tonige Schichten mit geringer Ausdehnung

klein: im Untergrund schluffig-tonige Schichten ausreichender Mächtigkeit und Ausdehnung

⁵Biologische Abbaubarkeit bei organischen Schadstoffen:

Gut abbaubar sind i.d.R. die MKW-Anteile in Ottokraftstoffen, die leichterflüchtigen Anteile aus Dieselloststoffen und Heizöl sowie nichtchlorierte Phenole. *Gering* abbaubar sind u.a. hochsiedende Alkane, BTEX, PAK sowie alle chlorierten Verbindungen.

Die Abschätzung der Grundwassergefährdung auf der Basis von Bodenuntersuchungen

Tabelle 11 zeigt, wie bei orientierenden Untersuchungen die Grundwassergefährdung - auf Basis von Bodenuntersuchungen - abgeschätzt und ein Handlungsbedarf bestimmt werden kann. Im ersten Schritt wird die Mobilität der Schadstoffe eingestuft. Bei Schwermetallen sind die chemisch-physikalischen Stoffeigenschaften sowie Elutions- und Extraktionsverfahren für die Einstufung der Mobilität zu berücksichtigen. Der zweite Schritt besteht in der Einstufung der Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone nach Tabelle 10. Im dritten Schritt wird die Höhe der Schadstoffgehalte eingestuft. Dabei werden die in Bodenproben gemessenen Schadstoffgehalte mit den Beurteilungswerten aus Tabelle 8 verglichen. Die Grundwassergefährdung auf der Basis von Bodenuntersuchungen wird auf der Grundlage dieser drei Schritte abgeschätzt.

Tabelle 11: Abschätzung der Grundwassergefährdung aufgrund von Bodenuntersuchungen im Rahmen der Orientierenden Untersuchung [aus ALEX 13: 31]

Mobilität der Schadstoffe	Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone ¹	Schadstoffgehalte im Boden ²	Grundwassergefährdung ³
hoch	(-)	sehr hoch / hoch	wahrscheinlich
hoch	(-)	gering	zu erwarten
mittel	gering	sehr hoch / hoch	wahrscheinlich
mittel	gering	gering	zu erwarten
mittel	mittel	sehr hoch / hoch	wahrscheinlich
mittel	mittel	gering	zu erwarten
mittel	hoch	sehr hoch / hoch	zu erwarten
mittel	hoch	gering	nicht zu erwarten
gering	gering	sehr hoch	wahrscheinlich
gering	gering	hoch	zu erwarten
gering	gering	gering	nicht zu erwarten
gering	mittel oder hoch	sehr hoch	zu erwarten
gering	mittel oder hoch	hoch oder gering	nicht zu erwarten

Anmerkungen zu dieser Tabelle / Legende:

¹Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone

(-):Bei Schadstoffen mit hoher Mobilität ist die Schutzfunktion der ungesättigten Zone i.d.R. vernachlässigbar.

²Schadstoffgehalte im Boden

sehr hoch: Die Schadstoffgehalte überschreiten die in Tabelle 8 aufgeführten Beurteilungswerte um das Mehrfache

hoch: Die Schadstoffgehalte entsprechen etwa den Beurteilungswerten aus Tabelle 8

gering: Die Schadstoffgehalte unterschreiten deutlich die Beurteilungswerte aus Tabelle 8.

³Grundwassergefährdung

wahrscheinlich: Ein hinreichender Verdacht auf schädliche Bodenveränderungen liegt vor. Die

Voraussetzungen nach § 9 Abs. 2 BBodSchG für die Anordnung weiterer Untersuchungen sind erfüllt

zu erwarten: Der Anfangsverdacht hat sich zwar erhärtet, er ist jedoch u.U. noch nicht ausreichend für die

Anordnung weiterer Untersuchungen nach § 9 Abs. 2 BBodSchG. Weitere Untersuchungen sind empfehlenswert

nicht zu erwarten: Der Anfangsverdacht hat sich nicht bestätigt. Liegen keine konkreten Hinweise auf

Grundwasserverunreinigungen vor (z.B. erhöhte Messwerte im Grundwasserabstrom, Kenntnisse von Unfällen

oder Leckagen), ist der Verdacht einer Grundwassergefährdung ausgeräumt.

4 Arbeitsmethodik

Auswahl und Beschreibung der Untersuchungsstandorte

Die Standortauswahl für die vorliegende Untersuchung wurde nach vorangegangenen Vorerkundungen, bzw. Übersichtsbegehungen getroffen. Auswahlkriterien zur Festlegung der Untersuchungsgebiete waren neben dem im Hinblick auf die Fragestellung notwendigen Vorhandensein von Vererzungen, eine gute Erreichbarkeit mit dem Fahrzeug und zu Fuß, sowie vorhandene Vorarbeiten im Bereich der Geologie und Lagerstättenkunde.

4.1 Untersuchungen im Gelände

Um über das charakteristische pleistozän-holozäne Formungsgefüge zu aussagekräftigen Ergebnissen der jungquartären Relief- und Bodenentwicklung zu gelangen, wurden Hangsequenzen bearbeitet. Die Verbreitung und Verzahnung der Sedimente wurde unter Anwendung des Catena-Prinzips (vgl. BIRKELAND 1999; 235-241; GERRARD 1992: 29ff.) erfasst. Anthropogen veränderte Standorte (z.B. Halden) wurden gezielt beprobt. Die von GERRARD (1992: 48) geäußerten Zweifel an der Anwendbarkeit des Catena-Prinzips in den gemäßigten Breiten sind m.E. nicht stichhaltig, zumal der Autor darauf verweist, dass „there are situations in temperate regions where the catena concept has been successfully applied“ (GERRARD 1992: 48).

Profilansprachen und Probenahmen erfolgte i.d.R. mit Hilfe von Aufgrabungen. Ersatzweise kam der Bohrstock zum Einsatz, wenn Aufgrabungen nicht vorgenommen werden konnten. Die Ansprache der Boden- und Sedimentmerkmale ist in den Aufgrabungen allgemein sicherer und eindeutiger als in Bohrstocksondierungen. Häufig ergeben sich bei der Aufnahme des oberflächennahen Untergrunds mittels Bohrstockabteufungen Anspracheunsicherheiten, die nur durch eine große Anzahl von Einschlügen kompensiert werden können. Bestimmte boden- und sedimentbezogene Merkmale wie z.B. Steingehalt, Bodengefüge etc. lassen sich m.E. überhaupt nur in Profilgruben und Aufgrabungen sicher ansprechen.

Geomorphologische Geländeuntersuchungen stützen sich auf die von LESER (1977) beschriebenen Techniken der geomorphologischen Feldarbeit. Besonderes Gewicht erhalten Formen und Prozesse der rezenten Geomorphodynamik, um darüber Aussagen zum aktuellen Stoffhaushalt in den Testgebieten abzuleiten.

Die Aufnahme und Ansprache der Lockermaterialdecken und der Böden erfolgt in Anlehnung an die Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994). Folgende boden- und sedimentbezogene Merkmale wurden im Gelände erhoben:

- Lithologie der im Untergrund anstehenden Gesteine (geogenetische und petrographische Kennzeichnung nach AG BODEN 1994: 150-155),
- Bodenfarbe (Abgleich mit Hilfe der Munsell-Farbtafel, vgl. AG BODEN 1994: 105ff.),
- Bodenart (Fingerprobe, vgl. AG BODEN 1994: 139f.),
- Gefüge (Bestimmungsschlüssel Gefügeform, vgl. SCHLICHTING et al. 1995: 35),
- Horizontmerkmale und –mächtigkeiten (Bezeichnungen nach AG BODEN 1994: 81-104),
- Lagerungsdichte (Eindringwiderstand beim Eintreiben eines Messers, vgl. SCHLICHTING et al. 1995: 36),
- Schichtungsmerkmale und –mächtigkeiten (schichtbezogene Typisierung erfolgt nach Geogenese, Petrographie, Lagen, Stratigraphie etc.),
- Durchwurzelungsintensität (Einstufung nach Auszählen der mittleren Anzahl der Feinwurzeln pro dm², vgl. AG BODEN 1994: 130),
- Carbonatgehalt (Einschätzung von Intensität und Geschwindigkeit der CO₂-Entwicklung nach Betropfen der Feinbodenprobe mit 10%-iger Salzsäure, vgl. AG BODEN 1994: 109ff.),
- Grobskelettanteil bzw. Steingehalt (Schätzung an der Aufgrabungswand),
- Kornfraktionen des Grobskeletts (Einstufung und Ansprache nach AG BODEN 1994: 133),
- etwaige Funde in einer Schicht (Holzkohle, Ziegel, Erzbrocken, Schlacken etc.),
- pH-Wert mittels Hellige-Pehameter (teilweise).

Die Abkürzungen zu Sediment- und Bodenparametern in den textlichen und graphischen Darstellungen folgen AG Boden (1994).

Die aktuelle Bodennutzung wird ebenfalls nach den Vorgaben der AG BODEN (1994: 72ff.) erfasst.

4.2 Standardanalytik im Labor

Folgende Standard-Untersuchungsmethoden kommen (z.T. stichprobenartig) zur Anwendung:

➤ pH-Wert-Bestimmung

Die Messung des pH-Wertes erfolgte elektrometrisch in CaCl₂-Lösung (vgl. SCHLICHTING et al. 1995: 132). Die Einwaage beträgt jeweils 20 g Feinboden, die mit 50 ml der wässrigen Suspension versetzt werden. Nach 30 min erfolgt die Messung des pH-Wertes mittels einer Glaselektrode.

➤ Bestimmung des Gehalts an organischen Substanz

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde mittels Glühverlust bestimmt. Die bei SCHLICHTING et al 1995: 159) aufgeführte Methode kommt leicht modifiziert zum Einsatz. Die Modifikationen

bestehen darin, dass anstelle von 5 g lufttrockener Feinderde nur 2-3 g eingewogen wurden und der Glühverlust bei 550°C bestimmt wird.

➤ Carbonatgehalt

Der Carbonatgehalt wurde bei ausgewählten Proben gasvolumetrisch nach SCHEIBLER bestimmt. Die Einwaagemenge der lufttrockenen Bodenprobe (1-10 g) wird in Abhängigkeit der Reaktivität gegenüber verdünnter Salzsäure, die in Vorversuchen festgestellt wurde, bestimmt. Die Methode wird bei SCHLICHTING et al. (1995: 144ff.) ausführlich beschrieben.

➤ Korngrößenbestimmung

Die Korngrößenbestimmung erfolgte durch das kombinierte Sieb- und Sedimentationsverfahren nach KÖHN. Die bei SCHLICHTING et al. (1995: 114ff.) beschriebene Methode wird bezüglich der Probenvorbereitung abgewandelt. Die Bodenproben werden zwecks Zerstörung organischer Substanz zunächst einer „Wasserstoffperoxidbehandlung“ unterzogen, d.h. mit 50 ml 30%-iger H₂O₂-Lösung versetzt und über Nacht stehen gelassen. Der zweite Vorbehandlungsschritt dient der Dispergierung der Probe, verwendet werden hierbei 25 ml einer 0,4N Na₄P₂O₇-Lösung. Nach Auffüllen mit destilliertem Wasser auf 250 ml wird die Probe verschlossen 6 h maschinell geschüttelt. Sieb- und Pipettanalyse werden gemäß den Vorgaben bei SCHLICHTING et al. (1995: 114 ff.) durchgeführt.

Abgeleitete Eigenschaften

Auf Basis von ausgewählten Laborergebnissen und Geländebefunden lassen sich wichtige ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen ableiten:

- Nutzbare Feldkapazität (vgl. BASTIAN & SCHREIBER 1994: 81),
- Luftkapazität (vgl. LESER & KLINK 1988: 87),
- Wasserdurchlässigkeit (vgl. BASTIAN & SCHREIBER 1994: 81),
- Infiltrationskapazität (vgl. MARKS et al. 1992: 89),
- Verschlammungsneigung (vgl. AG BODEN 1994: 326),
- Erodierbarkeit (vgl. AG BODEN 1994: 329),
- Mechanische Filtereigenschaften (vgl. BASTIAN & SCHREIBER 1994: 213),
- Physikalisch-chemische Filtereigenschaften (vgl. MARKS et al. 1992: 68),
- Effektive Kationenaustauschkapazität (vgl. AG BODEN 1994: 324 und 336ff.),
- Gesamtfilterwirkung in Abhängigkeit von Kationenaustauschkapazität und Luftkapazität (vgl. AG BODEN 1994: 325),
- Empfindlichkeit gegenüber der Desorption von Schwermetallen (vgl. BASTIAN & SCHREIBER 1994: 224).

4.3 Spezialuntersuchungen

Im Hinblick auf die Einschätzung des Gefährdungspotenzials von Schwermetallgehalten auf Verdachtsflächen kommen folgende Elutionsverfahren (exemplarisch) zur Anwendung:

Elution mit destilliertem Wasser nach DIN 38 414, Teil 4 (S4)

Die luftgetrocknete und auf Korngrößen < 2mm gesiebte Bodenprobe wird im Feststoff-Flüssigkeits-Verhältnis 1:10 mit destilliertem Wasser 24 h geschüttelt. Der Filtration erfolgt die Vermessung der Eluate.

Anzumerken bleibt bei dieser vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Methode, dass das Elutionsmittel destilliertes Wasser im Vergleich zum normalen Sicker- und Regenwasser ein geringeres Mobilisierungsvermögen für Schadstoffe aufweist (vgl. ALEX 13: 65). Insbesondere ist die Beurteilung einer Grundwassergefährdung durch Schwermetalle unter *worst case*-Bedingungen (zunehmende Versauerung der Böden, Reduktion des Puffervermögens) m.E. nicht möglich.

Königswasserauszug nach DIN 38414, Teil 7 (S7)

400 mg der getrockneten und gemahlene Probe werden in die HPS-100-Behälter der Mikrowelle MLS 1200 mega eingewogen, anschließend mit 0,5ml H₂O₂, 12 ml HNO₃ und 6 ml HCl versetzt. Der Aufschluss erfolgt im Mikrowellensystem bei Temperaturkonstanz und erhöhtem Druck. Anschließend wird filtriert und die Schwermetallgehalte im Eluat bestimmt.

Feststoffuntersuchungen

Bei einigen Bodenproben wurden die Schwermetallgehalte nicht im Königswasserauszug, sondern mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) durchgeführt. Dabei kam ein wellenlängendispersives Spektrometer SRS 3000 der Firma Siemens zum Einsatz, das mit einer 3-kW-Rh-Endfensterröhre (125µm Be) ausgerüstet ist (vgl. PASCHKE et al. 1997: 159).

Messung der SM-Gehalte in den Eluaten

Die Messung der Schwermetallgehalte in den Eluaten erfolgte bei den quecksilber- und arsenfreien Bodenproben mittels Flammen-AAS der Firma Perkin Elmer ETA 5 FL.

Bei den Bodenproben mit Quecksilber und Arsen erfolgte die Bestimmung der Schwermetallgehalte sowohl mittels Atomemissionsspektrometrie unter Verwendung eines induktiv gekoppelten Plasmas (ICP-AES) mit Cross-Flow-Zerstäubung (Spectroflame P/M, Fa. Spectro A.I.) als auch durch Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) mit Flow-Injektionssystem und Hydridtechnik (PE-3100 der Firma Perkin-Elmer).

Analytische Details (z.B. Kalibrierungen, Bestimmungsgrenzen) zu den spektroskopischen Eluatanalysen können PASCHKE et al. (1997: 160) entnommen werden.

5 Untersuchungsgebiete: Nordpfälzer Bergland und Buntsandsteinspessart

5.1 Das Nordpfälzer Bergland

5.1.1 Naturräumliche Skizze des Nordpfälzer Berglands

Überblick: Geologische Entwicklung, Relief und Böden im Nordpfälzer Bergland

Das Nordpfälzer Bergland ist der östliche Bestandteil des Saar-Nahe-Beckens, dessen heutige Ausdehnung ca. 100 x 30 km beträgt. Es streicht von NE nach SW und wird im Norden von der Hunsrück-Südrand-Störung von den devonischen Schichten des Rheinischen Schiefergebirges abgegrenzt. Im Süden grenzt das Nordpfälzer Bergland an das Mesozoikum des Pfälzer Walds, im Osten wird das Becken durch die tertiären Schichten des Mainzer Beckens diskordant überlagert (vgl. KOZIOL 1997: 10).

In dieser halbgrabenartigen Senkungszone innerhalb des Variskischen Gebirges sammelte sich Erosionsschutt sowohl des nördlich gelegenen Rhenohercynikums (Rheinisches Schiefergebirge) als auch des südlich begrenzenden Saxothuringiums (Schwarzwald, Haardt). Angefüllt wurde die Senke mit ca. 4500 m mächtigen kontinentalen Sedimenten des Oberkarbon und einer etwa 3500 m mächtigen Abfolge kontinentaler Sedimente und Vulkanite des Rotliegenden (vgl. HANEKE 1997: 13; NEUHAUS 1994: 3).

Zu Beginn des Oberrotliegend führte intensiver Vulkanismus zur Effusion basisch-intermediärer und rhyolithischer Laven sowie zur Intrusion basisch-intermediärer und rhyolithischer Lagergänge und Lakkolithe. Das Eindringen dieser Eruptiva in den Schichtenverband bewirkte die Genese der Pfälzer Kuppeln, zu denen auch der Intrusionsstock des Donnersbergs zählt.

Abbildung 9 zeigt die lithostratigraphische Gliederung des Rotliegend im Nordpfälzer Bergland.

Entgegen der Akzentuierung durch den Donnersberg und andere Intrusionsstöcke (Königsberg, Hermannsberg, Potzberg), die alle auf einer SW/NO-gerichteten Achse des Nordpfälzer Sattels liegen, überwiegt im Nordpfälzer Bergland das flächenhafte Element in der Oberflächengestalt. Die im permokarbonen Untergrund angelegte, in sich differenzierte Ebenheit liegt auf einem Niveau von etwa 400 m ü. NN und weist v.a. Braunerden als typische Bodenbildungen auf, die in Textur und Eigenschaften stark variieren können (vgl. DÖRRER 1989: 24).

Nahe-Gruppe	Standenbühl-Formation	An der Basis ein Quarzitkonglomeratkomplex, darüber rote Pelite, vereinzelt Feinsandsteinkörper	
	Wadern-Formation	Rote Breccien und Konglomerate	
	Donnersberg-Formation	Unterer Abschnitt: rötlichgraue Konglomerate und grobkörnige, geröllführende Arkosen. Nach oben schließen sich rote, graugrüne und graue Pelite an, in die rhyolithische Tuffe I eingeschaltet sind. Mittlerer Abschnitt: basaltische Andesite und rhyolithische Tuffe II, darüber Rhyolithkonglomerat. Anschließend rötliche Feinsandsteine, Peliten und Rhyolithuff III. Oberer Abschnitt: basaltische Andesite, Rhyolithuff IV, darüber rote Pelite und Sandsteine.	
Glan Gruppe	Thallichtenberg-Formation	Rote, gelbbraune und graue Pelite und Feinsandsteine	
	Oberkirchen-Formation	Rötlichgraue, grobkörnige, grobgeröllführende Arkosen mit Konglomeratlagen; Einschaltungen rötlichgrauer Feinsandsteine	
	Disibodenberg-Formation.	Gelbbraune Sandsteine, untergeordnet graue Pelite	
	Meisenheim-Formation	Odernheim-Formation	Graue und graubraune Feinsandsteine und Pelite. Einschaltung von Schwarzpeliten
		Jeckenbach-Formation	Unterer/mittlerer Abschnitt: graubraune und graue Sandsteine und Pelite. oberer Abschnitt: Schwarzpelite
	Lauterecken-Formation	Grau-gelbbraune Sandsteine und Pelite	
	Quirnbach-Formation	Graue und graugrüne Feinsandsteine und Pelite	
	Wahnwegen-Formation	Rote Sandsteine und Konglomerate	
	Altenglan-Formation	Graue und graugrüne Feinsandsteine und Pelite, häufig eingeschaltet: graue Kalksteine und dunkelgraue bis schwarze Pelite.	
Remigiusberg-Formation	Rote, grobgeröllführende Arkosen und Konglomerate		

Abbildung 9: Lithostratigraphie des Rotliegenden im Nordpfälzer Bergland [zusammengestellt nach HANEKE 1998: 10-24]

Klima

Den Grundtyp des Klimas im Nordpfälzer Bergland beschreibt DÖRRER (1989: 34) als „gemäßigtes Mittelgebirgsklima“, das orographisch und expositionsbedingt abgewandelt vorliegen kann. Die Lufttemperaturen im langjährigen Mittel betragen im Nordpfälzer Bergland etwas mehr als 9°C. „Dagegen bleibt auf den Bergen oberhalb 500 m NN, auf der Westseite des Donnersbergs schon ab etwa 400 m NN die Lufttemperatur im Jahresmittel unter 8°C,“ (CAPPEL 1983: 109). Die mittlere Lufttemperatur beträgt im Januar in den Tälern 0 bis 1°C und auf den Höhen –1 bis –2°C, während im Juli im Mittel 18-19°C bzw. 17-18°C erreicht werden. Die Niederschläge liegen um etwa 630 mm pro Jahr, steigen am Donnersberg auf etwa 760 mm an, während sie in den warmen unteren Tallagen z.T. nur 550 mm betragen (vgl. CAPPEL 1983 und FISCHER 1989: 78).

Vegetationsausstattung

Die potenziell natürliche Vegetation besteht nach VOLL (1993: 268) aus Perlgras-Buchenwäldern (*Melico-Fagetum*) auf Rotliegenden Gesteinen, Buchen-Traubeneichenwäldern (*Fago-Quercetum typicum*) auf sauren Gesteinen, sowie Traubeneichen-Hainbuchenwäldern (*Quercu-Carpinetum*) auf den reicheren Intrusivgesteinen. Der reale Waldtyp im durch mosaikartig verteilte Siedlungs-, Flur- und Waldflächen geprägten Nordpfälzer Bergland besteht nach VOLL (1993: 268) aus überwiegend hochgewachsenen Eichen-Niederwäldern mit Buche und Hainbuche, in den

Hochwäldern wird die überwiegende Buche mit Eiche, Lärche, Fichte und Douglasie vergesellschaftet. „Die welligen Ebenheiten und Talweitungen im Rotliegenden und Karbon [...] sind heute vorwiegend Wiesen- und Ackerland,“ (DÖRRER 1989: 37). Hinzu kommen auf edaphisch günstigen Lagen auch Obst- und Weinbau.

5.1.2 Allgemeine Landnutzungsgeschichte des Nordpfälzer Berglands

Erste menschliche Spuren im Nordpfälzer Bergland werden als Rastplätze wandernder Jäger interpretiert und datieren aus der mittleren Steinzeit (Mesolithikum, ca. 8000-5000 v.Chr.). Eine spärliche bäuerliche Besiedlung des Nordpfälzer Berglands fand wahrscheinlich erst im Neolithikum (ca. 5000-2200 v.Chr.) statt. Dabei wurden Einzelhöfe entlang der Flusstäler von Glan und Lauter errichtet. Gelegentlich wurde das Bergland zwecks Schweinemast und Holzeinschlag aufgesucht. In der jüngeren Bronzezeit entwickelte sich eine dünne Aufsiedlung des Berglands, wobei kaum Aussagen über die Lebensweise der Bewohner getroffen werden können (vgl. CZIESLA 1993: 76-81).

Die vorrömische Eisenzeit (ca. 800 v.Chr. bis 0) wird im Nordpfälzer Bergland durch die Kelten geprägt, die auf dem Donnersberg ein Oppidum hinterließen (vgl. ENGELS 1993: 83-86). Zudem lässt sich örtlich keltische Eisengewinnung nachweisen (z.B. Göllheimer Wald, Donnersberg, Stumpfswald).

Römerzeitliches Alter (bis etwa 400 n.Chr.) wird den Eisenerzgruben und Schmelzbetrieben bei Eisenberg, Göllheim und Ramsen zugesprochen. Zudem entstand „eine ansehnliche Infrastruktur, in der allerdings Stadt- und größere Marktsiedlungen fehlten,“ (STAAB 1993: 88). Reste römerzeitlicher Villen (*villae rusticae*) wurden in den Gemarkungen von Göllheim und Rockenhausen am Donnersberg gefunden. Insgesamt kam es zu einer dünnen römerzeitlichen Besiedlung des Berglandes mit entsprechenden Nutzungsformen (Waldweide/Mast, Laubstreugewinnung etc.). Durch Einfälle der Germanen und Alemannen gegen Ende der römischen Kaiserzeit ging die Bevölkerungszahl im Untersuchungsgebiet stark zurück und die Nutzung des Berglandes wurde extensiviert (vgl. STAAB 1993: 88f.).

Klösterlich gelenkte Ausweitungen des Siedlungslandes und entsprechender Neubesiedlung des Berglands datieren ins Frühmittelalter (bis etwa 1000 n.Chr.). Im Spätmittelalter (bis etwa 1500 n.Chr.) wurden landesherrliche Stadtgründungen vollzogen, z.B. Kirchheimbolanden (1368) und Obermoschel (1349). Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass das Mittelalter im Nordpfälzer Bergland erste schwerwiegende anthropogene Eingriffe in den Naturhaushalt mit sich brachte.

Mit Beginn der frühen Neuzeit entstand im Nordpfälzer Bergland ein „Bergwerk neben dem anderen“, (SCHLUNDT 1993: 123). Damit gingen flächenhafte Entwaldungen infolge des großen Holzbedarfs einher. Um 1550 führte der Bevölkerungsanstieg und die starke Ausweitung der Siedlungsfläche im Untersuchungsgebiet zum niedrigsten Stand der Bewaldung (vgl. VOLL 1993: 262). Die nachfolgenden 150 bis 200 Jahre waren dann wiederum v.a. von Seuchen und Kriegen geprägt, in denen sich der Wald wieder ausbreiten konnte. „Die anschließende Periode der fürstlichen Jägerei [...], des aufkommenden und von den Landesherrn geförderten Gewerbes (Köhlerei, Bergbau, Eisenhütten), des Holzexports („Holländerstämme“ für den Schiffsbau) und der zunehmenden Forderungen nach Brenn- und Bauholz, Waldweide und Streunutzung bringt den Wäldern großen Schaden und verwandelt viele in Heiden und Ödungen,“ (VOLL 1993: 262). Eine Wiederbewaldung wurde erst in napoleonischer Zeit in Gang gebracht und durch die bayerische Forstverwaltung fortgesetzt.

Insgesamt lassen sich in historischer Zeit v.a. das Hoch- und Spätmittelalter, sowie der neuzeitliche Zeitraum von etwa 1500 bis 1800 - in dem es zur intensivsten Waldvernichtung kam - als potenzielle morphodynamische Aktivitätsphasen für das gesamte Nordpfälzer Bergland abgrenzen, in denen es bei entsprechender klimatischer Disposition (Starkregen, Schneeschmelze etc.) zu quasinatürlichen Prozessen wie Bodenerosion, Kolluvien- und Auensedimentbildungen kam. Diesen flächenhaften Überprägungen des Oberflächennahen Untergrunds stehen die vermutlich eher punktuellen Transformationen im Bereich einzelner Rodungsiseln aus vorgeschichtlicher bis frühmittelalterlicher Zeit gegenüber.

5.1.3 Erzvorkommen im Nordpfälzer Bergland

Von wirtschaftlicher Bedeutung für das Nordpfälzer Bergland waren im wesentlichen Kupfer- und Quecksilberlagerstätten.

In Imsbach am Südrand des Donnersbergs wurde nachweislich seit dem 15. Jahrhundert der Abbau von Kupfererzen betrieben. Auf Klüften des Rhyoliths waren die Hauptabbauerze Malachit und Chalcosin, mit zunehmender Teufe gewannen auch Fahlerze und Chalkopyrit Bedeutung. Das wichtigste Nebenprodukt war Silber.

Quecksilber wurde im Nordpfälzer Bergland seit dem 15. Jahrhundert abgebaut. Das Gebiet mit Quecksilbervorkommen lässt sich nach durch ein Dreieck mit den Eckpunkten Bad Kreuznach, Kirchheimbolanden und Kusel eingrenzen und umfasst eine Fläche von ca. 1200 km². Nach WIEBER et al. (1996: 529) wurden etwa 60 Quecksilbererzungen nachgewiesen. Da sich die Quecksilbervorkommen sehr unregelmäßig verteilen, entstanden nach WIEBER (2000: 128) viele

Klein- und Kleinstbergwerke mit Förderungen von deutlich unter 10 t/a. NEUHAUS (1994: 1) beziffert die Anzahl der Gruben, in denen das vorhandenen Quecksilber vom 15. bis in das 20. Jh. mit Unterbrechungen abgebaut wurde, auf etwa 180. Die wichtigsten historischen Grubenorte waren der Moschellandsberg bei Obermoschel, der Stahlberg bei Rockenhausen, der Koppelberg bei Kirchheimbolanden-Orbis, Mörsfeld und der Lemberg bei Bad Münster (vgl. HOFMEISTER 1993: 38).

Die Genese der Vererzungen vollzog sich im Anschluss an die magmatischen Intrusionen an der Wende vom Unter- zum Oberrotliegenden (vgl. WIEBER et al. 1996: 529). Die Quecksilbervererzungen kommen nach HOFMEISTER (1993:39) sowohl als Imprägnationen in Rotliegend-Sedimenten, als auch in Form von Gang- und Klufteineralisationen in hydrothermal veränderten Vulkaniten vor. Die echten Gänge sind nach WIEBER et al. (1996: 529) jedoch selten. Als Haupterz wurde Zinnober (HgS) abgebaut, daneben trat auch gediegenes Quecksilber und Kalomel (Hg₂Cl₂) auf. Detaillierte Angaben zu den Mineralisationen im Nordpfälzer Bergland sind den Arbeiten von DREYER & HANEKE (1978), HOFMEISTER (1983 und 1993) und HOFMEISTER & HANEKE (1996) zu entnehmen.

5.2 Buntsandsteinspessart

5.2.1 Naturräumliche Skizze des Buntsandsteinspessarts

Überblick: Relief, Boden und Gestein im Buntsandsteinspessart

Der Spessart ist der westlichste Bestandteil der fränkischen Schichtstufenlandschaft, deren geologische Einheiten flach nach SE einfallen und bis nach Oberfranken durch immer jüngere Gesteine gebildet werden (vgl. SABEL 1996: 69). Der Buntsandsteinspessart wird durch eine ausgeprägte Geländekante vom kristallinen Vorspessart im Westen getrennt. Durch die Verstellung der Buntsandsteinschichten ergibt sich nach PREUSCHOFF (1996: 78) das Bild einer leicht gewölbten, nach E bzw. SE einfallenden Platte. Die flachgeneigte Tafel bedingt weitgespannte Bergrücken, während ausgeprägte Bergformen fehlen. Der Wechsel zwischen tonigen und sandigen Partien des Buntsandsteins schlägt sich im Relief nieder. Morphologisch harte, wasserdurchlässige Sandsteine bilden steile Talflanken, während das Ausstreichen von Mergeln und Tonen sanfte Böschungen verursacht (vgl. SCHWARZ 1974: 12).

Die geologische Entwicklung des Spessarts wurde von SABEL (1996) umfassend dargestellt, so dass hier auf diese Arbeit verwiesen wird.

Das Untersuchungsgebiet bei Bieber liegt im nordwestlichen Buntsandsteinspessart. Dort sitzen die Gesteine des Unteren Buntsandsteins (Bröckelschiefer-Folge, Gelnhausen-Folge und Salmünster-Folge) dem geringmächtigen Zechstein auf. Die Lithostratigraphie des unteren Buntsandsteins wird in Abbildung 10 verdeutlicht.

Unterer Buntsandstein	Salmünster-Folge	Tonlagensandstein	Grenzschiefer	8-12 m	Dunkelbraunroter bis rosafarbener, überwiegend feinkörniger, bankiger stark bis gering toniger Sandstein. Im oberen Teil überwiegend Sandstein mit dünnen Tonsteinzwischenlagen; an der Grenze zum mittleren Buntsandstein vereinzelt größere Quarzkörner. Im unteren Teil als Wechselfolge aus Sandstein-Tonstein und Schluffsandsteinlagen ausgebildet.
			Sandstein-Tonstein-Schichten	30-40 m	
			Tonstein-Sandsteinschichten	20-25 m	
		Basis-Sandstein	10 m	rötlich-gelblichbrauner, feinkörniger, bankiger, kieseliger Sandstein	
	Gelnhausen-Folge	Dickbanksandstein	Tonstein-Sandsteinschichten	20-25 m	Rötlichbrauner, auch gelbbräunlicher, feinkörniger, vereinzelt bis mittelkörniger, dickbankiger bis bankiger schwach toniger Sandstein. Im höchsten Teil mit stärkeren Tonsteinzwischenlagen. Im tiefsten Teil mit geringmächtigen Tonsteinzwischenlagen, wenig verfestigten feinsandigen Lagen und Schluffsandsteinlagen.
			Dickbankige Sandsteinschichten	45-60 m	
			Sandstein-Tonstein-Schichten	15-20 m	
		Eck'scher Geröllsandstein	30-35 m	Gelblich-weißer, gelbbräunlicher bis hellbrauner, fein- bis mittelkörniger, bankiger bis dünnbankiger, tonarmer, rauher Sandstein mit vereinzelt Geröllen im basalen Teil.	
		Heigenbrückener Sandstein	25-30 m	Rotbrauner bis blassroter, feinkörniger, dickbankiger, toniger Sandstein.	
	Bröckelschiefer-Folge	Oberer Bröckelschiefer		25-32 m	Rotbrauner, massiger bis schichtiger Tonstein mit einzelnen hell- und grüngrauen Flecken. Im oberen Teil stärker gefleckt und mit dünnen Schluffsandsteinlagen. Im mittleren Teil Schluffstein vorherrschend mit feinkörnigen Sandsteinlagen, vereinzelt Gerölle. Im unteren Teil ganz überwiegend Tonstein.
		Schluffstein-Sandstein-Horizont		5-7 m	
		Unter Bröckelschiefer		20-25 m	
	Zechstein				

Abbildung 10: Lithostratigraphie des Unteren Buntsandsteins [zusammengestellt nach DIEDERICH 1969]

Die Bodenverteilung im Spessart in ihrer Abhängigkeit von Gestein, Solifluktsdecken und Reliefposition wurde von SABEL (1996) eingehend untersucht. Für den Vorspessart werden als typische Bodenbildungen v.a. Parabraunerden, Braunerden und Kolluvien genannt, während im Buntsandsteinspessart vorrangig Podsole und Braunerden anzutreffen sind.

Vegetationsausstattung

Als potenziell natürliche Vegetation der Hangbereiche des Spessarts sind Hainsimsen-Buchenwälder (*Luzulo-Fagetum*) anzusprechen. Allerdings wurde dieses *Luzulo-Fagetum* durch

die Forstwirtschaft in eine anthropogene Ersatzgesellschaft (Harzer Labkraut-Fichtenforstgesellschaft = *Galio hircynici-Culto-Piceetum*) transformiert (vgl. ELLENBERG 1996: 756-759; ZERBE 1995: 342). Das Vorkommen von u.a. *Luzula luzuloides*, *Carex pilulifera* und *Polytrichum formosum* weisen floristisch-soziologische Beziehungen zum naturnahen Hainsimsen-Buchenwald auf. *Galium hircynium*, *Dryopteris dilatata*, *Plagiothecum curvifolium*, *Lophocolea heterophylla* sind häufige Vertreter der Ersatzgesellschaft (vgl. ZERBE 1995: 344 und 1997: 259).

Die Wiesenbereiche können den Glatthaferwiesen (*Arrhenatherion*) zugerechnet werden, die sich infolge der ausbleibenden Düngung zu Pfeifengraswiesen (*Molinion*) umwandeln (vgl. HEROLD 1981: 9f.). Aufgrund der Vielzahl der Arten wird auf eine explizite Aufzählung verzichtet, an dieser Stelle muss auf HEROLD (1981: 9f.) und ELLENBERG (1996: 1015f.) verwiesen werden.

Klima

Der Grundtypus des Klimas im Buntsandsteinspessart wird als gemäßigtes Mittelgebirgsklima mit schwach ozeanischer Klimatönung beschrieben, das orographisch und expositionsbedingt differenziert wird. Kennzeichnend sind kühle Sommer und mäßig kalte Winter. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt in Bieber etwa 7-8°C. Im Einzugsgebiet der Bieber fallen jährlich zwischen 900 und 1000 mm Niederschlag (vgl. HEROLD 1981: 11; ZERBE 2001: 394f.).

5.2.2 Allgemeine Landnutzungsgeschichte des Buntsandsteinspessarts

Die nacheiszeitliche Waldentwicklung kann infolge des Fehlens größerer Vermoorungen nicht vollständig rekonstruiert werden. Einen Einblick in die Waldgeschichte des Spessarts seit der späteren Wärmezeit gewährt jedoch die Pollenanalyse des unweit von Bieber gelegenen flachen Wiesbüttmoores. Buchendominierte Wälder lösten ab der älteren Nachwärmezeit (ab 800 v. Chr.) die lindenreichen Eichenmischwälder der späteren Wärmezeit ab (vgl. ZERBE 1995: 342; ZERBE & BRANDE 1996: 51).

Die erste nennenswerte Besiedlungsphase des nördlichen Spessarts vollzog sich vom 12. bis zur Mitte des 13. Jahrhunderts und ging mit Rodungen einher. Waldglashütten wurden seit dem 12. Jahrhundert nachgewiesen und prägten in der weiteren Folge die Siedlungs- und Waldgeschichte in hohem Maße (vgl. ZERBE 1997: 256; ZERBE & BRANDE 1996: 51). Nach dem Dreißigjährigen Krieg verband sich mit den Glashütten ein wirtschaftlicher Aufschwung sowie eine Bevölkerungs- und Siedlungszunahme, die zu einem weitreichenden Wandel der bis dato naturnahen Waldlandschaft führte. Die vielfältige Nutzung der Waldstandorte (Rodungen, Brenn- und Bauholznutzung, Köhlerei, Waldweide, Streunutzung etc.) führte bis zum Ende des 18. Jahrhunderts zu einem „großflächigen Niedergang der Waldungen im Nordspessart“ (ZERBE 1997:

256). Im Zuge einer sich entwickelnden planmäßigen Forstwirtschaft erfolgte daraufhin die flächige Aufforstung mit Kiefer und v.a. Fichte. Das Ergebnis dieser Wald- und Nutzungsgeschichte stellen im nördlichen Spessart fichtenreiche Forste dar (vgl. ZERBE & BRANDE 1996: 58).

5.2.3 Erzvorkommen im Spessart

Der Erzbergbau im Spessart zielte zum einen auf die flözartigen Kupferlettenvorkommen des Zechstein, die am Fuße des Hochspessarts und in einer Störungszone bei Bieber ausstreichen. Zum anderen erlangten die SE-NW-streichenden hydrothermalen Kobaltgänge oder -rücken bei Bieber und Huckelheim wirtschaftliche Bedeutung. Auf den Eisenerzbergbau wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Die wirtschaftlich interessantesten Erzminerale im Kupferletten bzw. Kupferschiefer waren nach FREYMAN (1991: 5) Cu-As-Sulfide, Cu-Fe-Sulfide und -Arsenide. Ziel bergbaulicher Bemühungen waren hier Kupfer, Silber und Blei. Als Hauptmineral der Kobaltgänge wurde Speiskobalt als Ausgangsprodukt zur Herstellung eines blauen Farbstoffs abgebaut. Speiskobalt bezeichnet einen dem Kobaltendglied der Mischkristallreihe Skutterudit (CoAs_3) – Chloanthit (NiAs_3) nahestehenden Mischkristall (vgl. PREUSCHOFF 1991: 36). Gangarten sind Baryt und Siderit. Neben Kobalt wurde in den Gängen auch Nickel, Blei, Kupfer und Eisen gewonnen.

Auf den nachfolgenden Photos sind Mineralphasen vom Burgberg zu sehen, die selbst gefunden wurden. Die Bestimmung der Minerale übernahm Herr Dipl.-Min. M. Preuschoff. Die Aufnahmen wurden am Institut für Mineralogie der Universität Leipzig angefertigt.

Photo 1: Skutterudit (CoAs_3) und Siderit (FeCO_3)



Photo 2: Siderit (FeCO_3)



Photo 3: Erythrin ($\text{Co}_3[\text{AsO}_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)



6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 Imsbach

„Imsbach“ steht stellvertretend für 5 Hangsequenzen mit ihren zugehörigen Bodenprofilen, die nördlich der Ortschaft in den Falkensteiner Bergen am südlichen Donnersberg aufgenommen wurden (vgl. KREMB 1983: 30f.). Die Lage des Untersuchungsgebiets kann der Abbildung 11 entnommen werden. Die Falkensteiner Berge sind vom NE angrenzenden Hohen Donnersberg durch das Mordkammertal und das Wildensteiner Tal getrennt. Der Rhyolithstock ist hier von scharfen, z.T. felsigen Kerbtälern zerschnitten und in schmale Bergrücken aufgelöst.

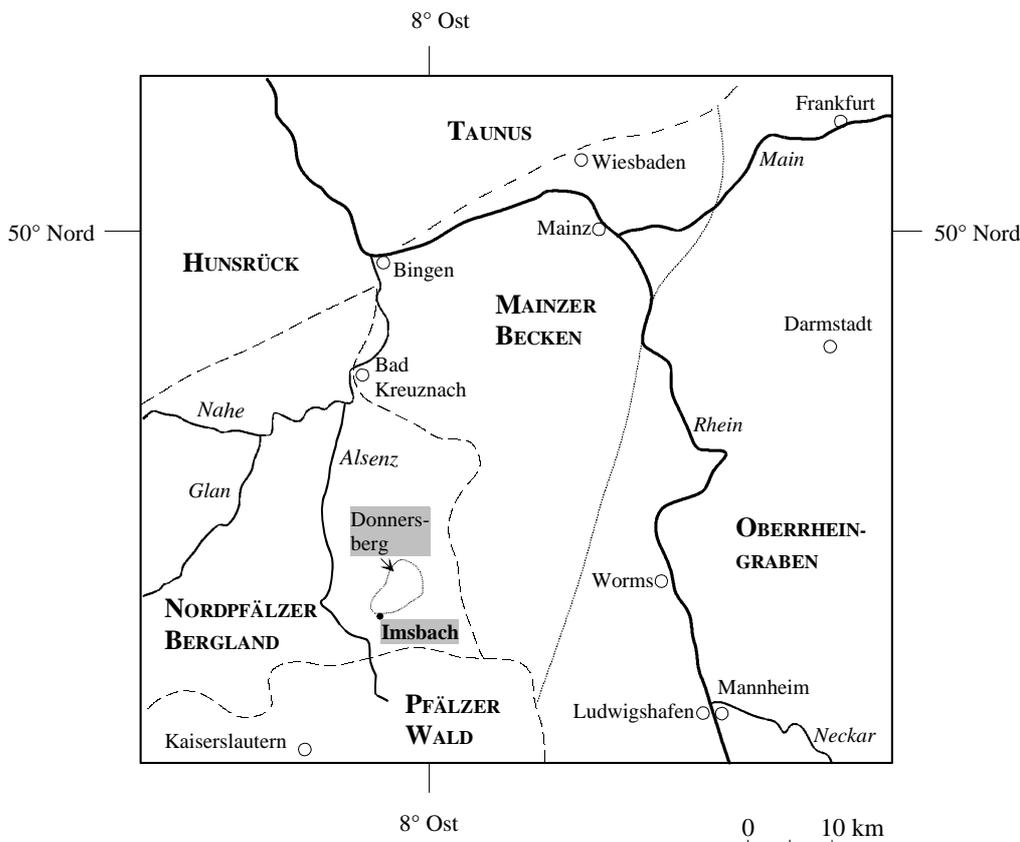


Abbildung 11: Lage des Untersuchungsgebiets Imsbach [nach DREYER & HANEKE 1978: 57, verändert

Das Ausgangsmaterial für die schuttartig ausgeprägten und flächendeckenden Lockermaterialdecken besteht aus Rhyolith. Nur punktuell tritt der Rhyolith in Gestalt von Festgesteinsdurchragungen an die Oberfläche. Der Rhyolith im Untersuchungsgebiet zeichnet sich nach DREYER & HANEKE (1978: 70) durch eine sehr feinkörnige Grundmasse mit einem geringen prozentualen Anteil von Einsprenglingen (z.B. Quarz, Sanidin, Biotit) aus. Das Gesamtmassiv wurden durch engständige, NE-SW streichende Störungen mit wechselndem Einfallen überprägt.

DREYER & HANEKE (1978: 70) führen auf diese Umstände die dünnplattig-scherbige Verwitterung des Rhyoliths im Untersuchungsgebiet zurück. ZEPP & MÜLLER (1999: 81) nennen Sande und lehmige Sande als verbreitete Bodenarten des Verwitterungsproduktes von Rhyolith.

Die hydrothermalen Mineralisationen treten zahlreich in 110-130°-Richtung auf Klüften und brekziösen Störungszonen auf, nur selten sind sie an karbonatische Gänge gebunden (vgl. DREYER & HANEKE 1978: 70; GOLSHAVANI-JAVADI 1980: 155). In Nachbarschaft zu den Vererzungen wurde das Gestein hydrothermal deutlich verändert, DREYER & HANEKE (1978: 63) nennen als Alterationserscheinungen u.a. Kaolinisierung und Silifizierung. Die primären Erze sind v.a. Kupferglanz, Arsenfahlerz, Pyrit, Zinkblende und Bleiglanz. Im oberflächennahen Oxidationsbereich wurde diese Primärmineralisation unter Bildung einer Vielzahl von sekundären Mineralen umgewandelt, vorwiegend Cuprit, Malachit und Azurit (vgl. Photo 1). Eine Liste des vorgefundenen Mineralbestands wurde bei DREYER & HANEKE (1978: 65ff.) veröffentlicht.



Photo 4: Malachit (grün) und Azurit (blau) als Überzüge auf Rhyolith [eigene Aufnahme]

LESER (1975, zit. nach KREMB 1983: 32) rechnet die Falkensteiner Berge dem Ökotopegefüge der Ranker, Braunerden und Rohböden auf alten Vulkanstöcken zu. DREYER & HANEKE (1978: 69) sprechen als typische Bodenbildungen schwach saure Braunerden und Parabraunerden an, die im Bereich von Festgesteinsdurchragungen von Rankern und Syrosemen begleitet werden. Als typische Humusform wird von DREYER & HANEKE (1978: 69) Mull angesprochen. GOLSHANI-JAVADI (1980: 157) benennt sehr saure Braunerden mit einer Solummächtigkeit von bis zu 60 cm als typische Bodenbildungen des Hangbereichs. Die eigenen Befunde können diese Ergebnisse nur

bedingt stützen. Parabraunerden beispielsweise wurden nicht angetroffen. Als Humusformen wurden ausnahmslos Rohhumusartiger Moder (L/Of/Oh/Ahe/...) und Rohhumus (L/Of/Oh/Ahe+Ae/...) vorgefunden, was im Einklang mit dem angetroffenen sehr sauren Reaktionszustand (Einstufung der Bodenreaktion nach AG BODEN 1994: 331) und dem Al-Pufferbereich der Böden steht (vgl. ZEPP & MÜLLER 1999: 113).

Der Donnersberg-Rhyolith ist zwar kaum porös, aber intensiv zerrüttet, bzw. zerklüftet und deshalb als stark durchlässig einzustufen (vgl. HANEKE et al. 1983: 62). Kleinere Tälchen fallen deshalb periodisch trocken (vgl. KREMB 1983: 30). ZEPP & MÜLLER (1999: 81) beschreiben den verbreiteten geochemischen Grundwassertyp als mäßig-sauer bis sauer mit geringen Lösungsinhalten.

Das Gebiet ist geschlossen bewaldet. Auf den sauren Substraten sollte das *Fago-Quercetum* anzutreffen sein (vgl. Abschnitt 5.1.1.). Seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde die Ausbreitung von Fichte, Kiefern und Tannen gefördert (vgl. EDER & VOLL 1983: 224). Die Hangbereiche werden mit Ausnahme der Tagebauareale und der Halden forstlich genutzt. Typische Baumarten sind Traubeneiche (*Quercus petraea*) und Kiefer (*Pinus Sylvestris*), von eher untergeordneter Bedeutung sind Fichte (*Picea abies*), Lärchen (*Larix decidua*), Buchen (*Fagus sylvatica*) und Douglasien (*Pseudotsuga menziesii*). Die Strauchschicht besteht aus Jungholz der genannten Baumarten, wobei Buche und Kiefer dominant erscheinen. Die lückenhafte Krautschicht besteht im wesentlichen aus Drahtschmiele (*Avenella flexuosa*), Heidekraut (*Calluna vulgaris*) sowie der Naturverjüngung der oben angeführten Baumarten. An wenigen Stellen kommen Maiglöckchen (*Convallaria majalis*), Busch-Windröschen (*Anemone nemorosa*) und Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*) vor. Der Tagebaubereich und die Halden sind, bei Nichtberücksichtigung von Flechten und Moosen, fast vegetationsfrei. Als höhere Pflanze lässt sich dort als typischer Metallophyt nur das Schmalblättrige Leimkraut (*Silene vulgaris*) nachweisen.

In den Abschnitten 6.1.1 bis 6.1.5 werden die zum Standort Imsbach zugehörigen Hangsequenzen charakterisiert.

Eine Übersicht über das Untersuchungsgebiet gibt die nachfolgende Abbildung 12, auf der auch die aufgenommenen Hangsequenzen eingezeichnet sind.

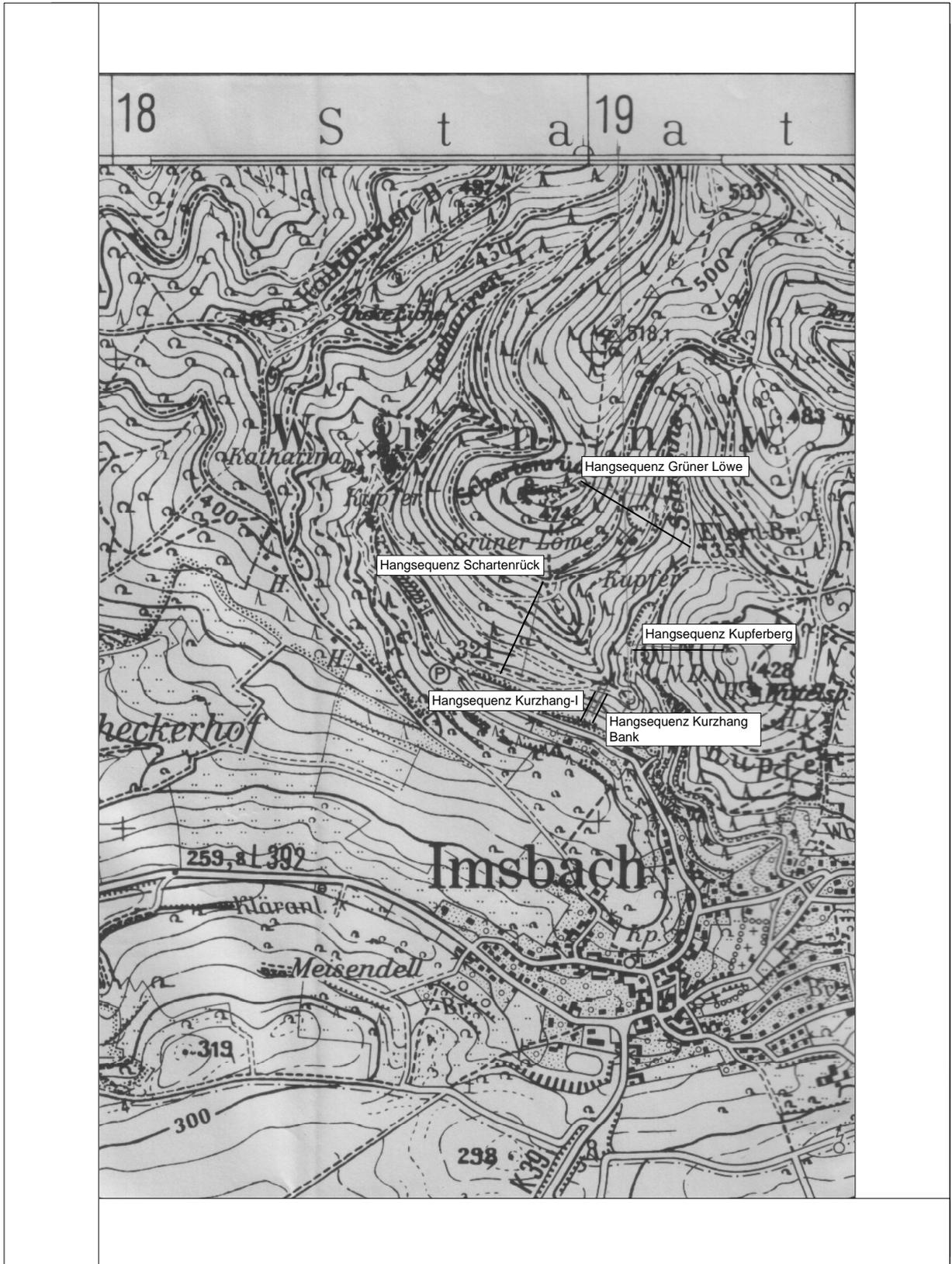


Abbildung 12: Übersicht über das Untersuchungsgebiet Imsbach mit den zugehörigen Hangsequenzen [eigener Entwurf auf Basis der TK 25 Blatt 6413]

6.1.1 Hangsequenz Grüner Löwe

6.1.1.1 Daten zur Hangsequenz

Die Hangsequenz Grüner Löwe verläuft von R3419000 / H5495805 nach R3419100 / H5495700. Die Horizontalabstreckung beträgt vom höchsten Punkt der Hangsequenz (474 m ü. NN) bis zum niedrigsten (355 m ü. NN) 270 m. Der steile Hang (25°, N6.1) ist ESE exponiert und gestreckt (G,G), wenn man von der Zurundung im Kulminationsbereich absieht. Die Hangsequenz wird in Abbildung 13 dargestellt, ihre relative Lage im Untersuchungsgebiet Imbsbach kann der Übersicht (Abbildung 12) entnommen werden.

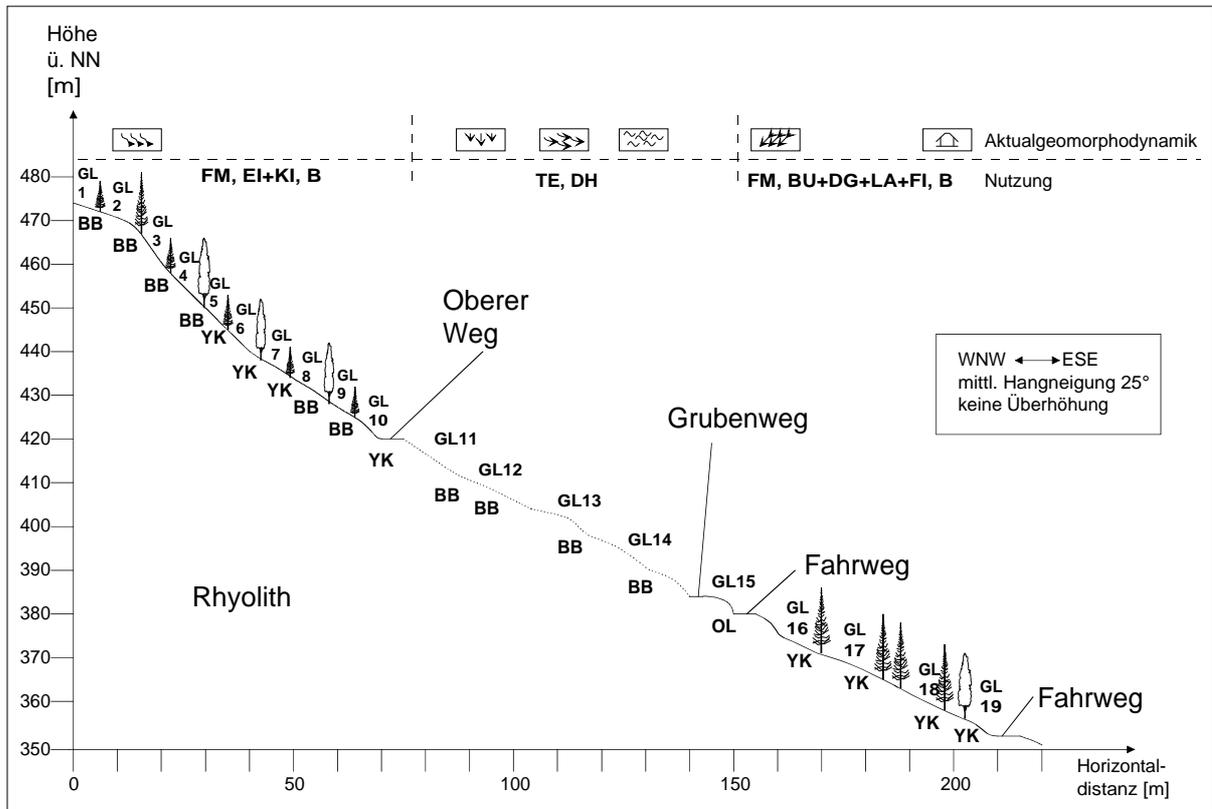


Abbildung 13: Hangsequenz Grüner Löwe [eigener Entwurf]

Legende / Anmerkungen	
	Bodenkriechen
	Steinschlag
	Deflation
	Rutschung
	Rinnenspülung
	Akkumulation
	GL1 bis GL15 : Bodenprofile
	BB: Braunerde
	YK: Kolluvisol
	OL: Lockersyrosem

Der Bergbau in der Grube Grüner Löwe entstand vermutlich nach 1700 und reichte bis in das 20. Jahrhundert hinein (vgl. RASCHE 1989: 43f.).

6.1.1.2 Gliederung des Hangbereichs

Dem gerundeten Scheitelbereich mit teilweiser Festgesteinsdurchtragung schliessen sich hangabwärts nach einer konvexen Hangunstetigkeit Ober-, Mittel- und Unterhang an. Der Unterhang leitet mit einem markanten Knick zum anthropogen stark überformten Talboden (Entwässerung, Verdichtung, Materialauftrag) über, der im Rahmen dieser Arbeit nicht bearbeitet wurde. Der Tagebau- bzw. Haldenbereich nimmt den Mittelhangbereich ein.

Der Hangbereich wird von drei Wegen geschnitten. Diese Wege werden von oben nach unten in der Folge als „Oberer Weg“, „Grubenweg“ und „Fahrweg“ bezeichnet. Der Fahrweg nimmt einen serpentinartigen Verlauf und quert am Talboden noch einmal den Bereich dieser Hangsequenz, sodass er die Hangsequenz zum Talboden hin abschließt. Der Obere Weg begrenzt den Tagebaubereich hangaufwärts (siehe Photo 5). Der Grubenweg verläuft quer zum Hanggefälle am unteren Begrenzungszaun des Grünen Löwen. Der Fahrweg befindet sich ca. 10 m unterhalb des Grubenwegs. Der Bereich zwischen den beiden letztgenannten Wegen wird von Haldenschüttungen eingenommen. Auch der Fahrweg wurde im Haldenmaterial angelegt bzw. mit Haldenmaterialien befestigt. Unterhalb des Fahrwegs schließt sich hangabwärts der Unterhangbereich an.



Photo 5: Blick vom Grubenweg auf den Tagebaubereich des Grünen Löwen [eigene Aufnahme]

Ober- und Unterhangbereich werden forstlich genutzt. Der Mischwald weist am Oberhang einen Altbestand aus Eiche und Kiefer auf (FM, EI+KI, B). Im Unterhangbereich konstituiert sich der Mischwald vornehmlich aus Buche, Douglasie, Lärche und Fichte im Altbestand (FM,

BU+DG+LA+FI, B). Der Mittelhang ist nicht bewaldet, sondern wird von den Flächen des Erztagebaus bzw. der Abraumhalden eingenommen (TE, DH). Das nachfolgende Photo 6 wurde auf dem Fahrweg aufgenommen und zeigt die Haldenflächen.

Die Hangbereiche unterscheiden sich auch bzgl. der aktuellen Morphodynamik. Der vielfach beobachtbare Säbelwuchs der Bäume oberhalb des Tagebaubereichs deutet auf Bodenkriechen in der Wachstumsphase der Bäume hin (vgl. AHNERT 1996: 136f.; LESER 1977: 149f.)



Photo 6: Blick vom Fahrweg nach N auf die Haldenfläche [eigene Aufnahme]

Im vorliegenden Fall resultiert das Bodenkriechen wahrscheinlich aus hohen Porenwasserdrücken im oberen Teil des geschichteten Substrats als Folge von Rodungsmaßnahmen und starken Niederschlägen (vgl. ZEPP 2002: 102). Im Tagebaubereich am oberen Mittelhang selbst entstanden Steilwände, von denen Steine und Blöcke abstürzen. Diese Steinschläge treten nach LESER (2003: 207) deshalb auf, weil der gegen die Schwerkraft gerichtete innere Zusammenhalt des Gesteins verloren geht und diese voll wirken kann. Am Fuß der Steilwand entstehen Sturzhalden. Diese Sturzhalden werden nach eigenen Beobachtungen durch Mineraliensucher abgesucht, unterliegen starkem Vertritt und sind deshalb nur kurze Zeit vorhanden. Am Oberen Weg und am Grubenweg lässt sich am jeweils hangaufwärtigen Wegeinschnitt die Hang- bzw. Wandentwicklung des ursprünglich scharf in den Hang geschnittenen Wegrands beobachten. Die Prozessdynamik entspricht auch hier der Sturzdenudation (vgl. ZEPP 2002: 103), entsprechend gelten die gleichen

Überlegungen und Gesetze wie beim Rückverlegen einer Felswand unter Bildung einer Schutthalde (vgl. DALCHOW 1989: 19). Im nahezu vegetationsfreien Haldenbereich des Grünen Löwen (unterer Mittelhang) sorgen äolische Prozesse für eine Ausblasung von losen, transportfähigen Korngrößen aus dem oberflächennahen Haldenbereich. Entsprechend kann - je nach Witterung - auf den Blättern der Bäume in der Umgebung ein weiß-grauer Schleier aus feinem Staub beobachtet werden. Die Materialbereitstellung für die äolische Prozessdynamik erfolgt durch Insolationsverwitterung in Verbindung mit Adsorptions-Desorptions-Zyklen im sonnen-exponierten, strahlungsbegünstigten und vegetationsfreien Haldenkörper (vgl. ZEPP 2002: 83f.). Der hangabwärtige Rand des Fahrwegs wird durch Erosionsrinnen zerschnitten (vgl. Photo 7). Die Länge der Rinnen beträgt etwa 2 bis 3 m, bezogen auf eine Tiefe von 10 cm und einer Breite von 15-20 cm.



Photo 7: Erosionsrinnen am hangabwärtigen Rand des Fahrwegs [eigene Aufnahme]

Am Unterhang wurden an mehreren Stellen Steinentnahmen („Steinbruch“, vgl. Photo 8) vorgenommen. Dort sind Wandabbrüche infolge der Übersteilung des Hangbereichs aktiv beobachtbar. Die Freilegung der Wurzelhäuse im Randbereich dieser Steinbrüche stockender Bäume weist auf rezenten Materialverlust hin.



Photo 8: „Steinbruch“ am Unterhang der Hangsequenz Grüner Löwe [eigene Aufnahme]

Als weiteres wichtiges Primärmerkmal des Bodenwasserhaushalts ist der Grundwasserflurabstand als sehr hoch zu beurteilen. Stau- und Hangnässeerscheinungen wurden keine festgestellt. Im gesamten Hangbereich wurde auch kein Oberflächenabfluss festgestellt, was sich durch die günstigen physikalischen Bodeneigenschaften (hoher Grobskelettanteil, hohe Sandanteile am Feinboden, gute Wasserdurchlässigkeit, keine Verschlammung und Aggregatzerstörung an der Oberfläche) der oberflächennah anstehenden Deckschichten und Hangbildungen erklären lässt. Hangwasser tritt als oberflächenparallel hangabwärts sickern des Bodenwasser (*Subsurface Flow, Interflow*) als Folge der stauenden Wirkung einer dicht gelagerten LB im Liegenden einer eher locker gelagerten LH auf. Am „Steinbruch“ im Unterhangbereich des Grünen Löwen wurde nach einem hinreichend langen und intensiven Niederschlagsereignis aus der durch Steinentnahmen entstandenen Aufschlussituation das Austreten des *Interflows* unmittelbar an der Schichtgrenze LH zu LB selbst beobachtet.

6.1.1.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich

Zur Charakterisierung von Lagen, Hangsedimenten und Bodenbildungen der Hangsequenz wurden insgesamt 19 Profile (GL1-GL19) aufgegraben. Die relative Lage der Aufgrabungen im Hangbereich ist Abbildung 13 zu entnehmen. Die graphische Darstellung der Bodenprofile und ihrer Substrate erfolgt in Abbildung 14.

Im Oberhangbereich wurden die Aufgrabungen GL1-10 vorgenommen. Angetroffen wurden hier Braunerden (BB) und Kolluvisole (YK). Zur Charakterisierung des Mittelhangbereichs wurde parallel zum Haldenbereich, ca. 10 m versetzt in NE-Richtung und damit außerhalb der eigentlichen Hangsequenz vier Aufgrabungen getätigt (GL11-14). Angesprochen wurden hier

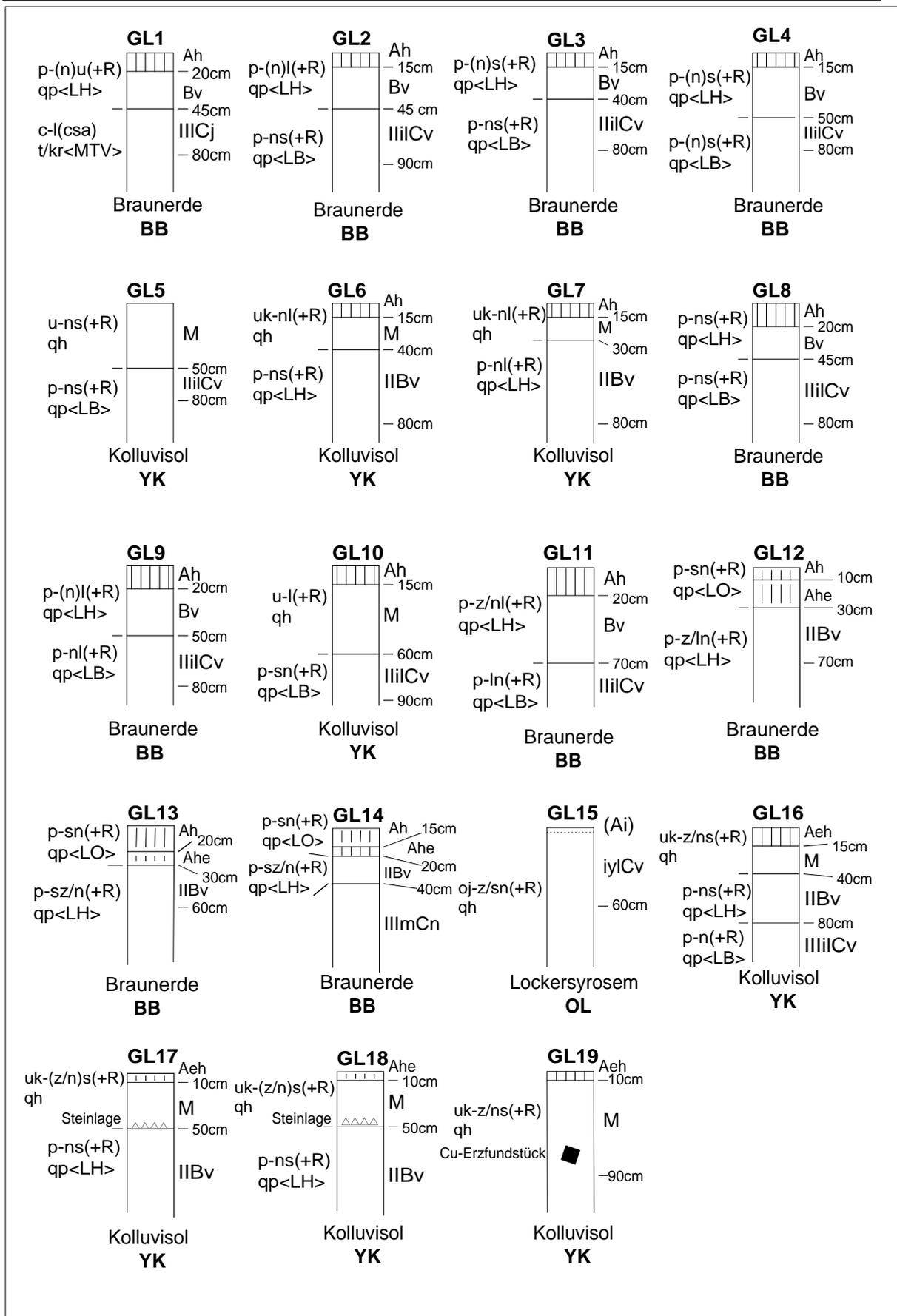


Abbildung 14: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Grüner Löwe [eigener Entwurf]

Braunerden (BB). Die den Mittelhangbereich der eigentlichen Hangsequenz flächig aufbauenden Haldensubstrate wurden exemplarisch in einer Grabung (GL15) aufgeschlossen. Hier wurde ein Lockersyrosem (LO) angetroffen. Am Unterhang wurden vier Aufgrabungen (GL16-19) durchgeführt, als Bodentypen wurden Kolluvisole (YK) festgestellt.

6.1.1.3.1 *Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds*

Die sedimentologisch-bodenkundlichen Geländebefunde der Profilaufnahmen entlang der Hangsequenz Grüner Löwe werden in den Tabellen 12 und 13 dargestellt. Angesprochen wurden

- Hauptlage - LH (Profile GL1-GL4, GL6-GL9, GL11-GL14, GL16-GL18),
- Basislage - LB (Profile GL2-GL5, GL8-GL11) ,
- Oberlage – LO (Profile GL12-GL14)
- Umlagerungsbildungen - u (Profile GL5-7, GL10, GL16-GL19),
- Saprolith – csa (Profil GL1) und
- Haldensubstrat – oj (Profil GL15).

Diese Hangbildungen werden im folgenden vorgestellt.

Hauptlage

Die LH ist im gesamten Hangbereich *dark brown* gefärbt (10YR3/3 bzw. 10YR3/4) und weist eine Mächtigkeit von 40 bis 70 cm auf. Das deutet auf verhältnismäßig geringe Erosionsschäden trotz steiler Hangneigung und temporärer bergbaulicher Nutzung hin. In GL14 beträgt die Mächtigkeit der LH nur 20 cm und wird von einer LO im Hangenden überdeckt. Dieser Befund wird bei der Besprechung der Oberlage diskutiert.

Die LH besitzt i.d.R. eine stark steinige (4) Ausprägung. Die Kornfraktionen des Grobbodens besitzen eckig-kantige Formen und sind als Grobgrus (gGr), kantige Steine (fX) und kantige Blöcke (mX) anzusprechen. Die kantigen Blöcke sind bevorzugt im Unterhangbereich in der LH dominierend. Im Feinboden treten schwach bis stark lehmige Sande auf. Die LH ist stark durchwurzelt (W4) und weist eine geringe Lagerungsdichte (Ld2) auf. Im Unterhangbereich wird die LH durch kolluviale Ablagerungen überdeckt. Dort besitzt sie dann als Folge des Auflagedrucks eine mittlere Lagerungsdichte (Ld3). Die Durchwurzlungsintensität der LH im Unterhangbereich nimmt als Folge der Überdeckung und der wachsenden Entfernung zur Geländeoberfläche stark ab (W1).

In der LH sind im Hangbereich des Grünen Löwen die Bodenhorizonte Ah und Bv entwickelt.

Tabelle 12: Sedimentologische Geländebefunde der Profilaufnahmen GL1-GL10 [eigener Entwurf]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Boden-farbe	Bodenart (Fingerprobe)	Ld ¹	DWI ²	physiolog. Gründig-keit	Stein-gehalt	GBF ³	Gefüge	Grund-wasser-stufe	Sonstiges
GL1	LH	Ah	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	4	Wp3	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		Bv	10YR3/2	stark lehmiger Sand	2	4		3	fX	ein		
	csa	IIIcJ	10YR6/2	toniger Lehm	4	-		1	fGr-mGr	koh		
GL2	LH	Ah	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	4	Wp3	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		Bv	10YR3/3	stark lehmiger Sand	2	3		4	fX	ein koh		
	LB	IIilCv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	1		4	fX-mX	ein		
GL3	LH	Ah	7,5YR2,5/1	schwach lehmiger Sand	2	4	Wp3	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		Bv	10YR3/3	stark lehmiger Sand	2	4		3	fX	ein		
	LB	IIilCv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	1		4	fX-mX	ein		
GL4	LH	Ah	10YR3/2	stark lehmiger Sand	2	4	Wp3	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		Bv	10YR3/3	stark lehmiger Sand	2	4		3	fX	koh		
	LB	IIilCv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	1		4	fX-mX	ein		
GL5	u	M	10YR4/3	stark lehmiger Sand	2	4	Wp4	4	fX-mX	ein	äußerst tief	
	LB	IIilCv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	1		5	fX-mX	ein		
GL6	uk	Ah	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	4	>=Wp3	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		M	7,5YR4/4	schwach lehmiger Sand	2	4		4	fX-mX	ein		
	LH	IIBv	10YR3/3	stark lehmiger Sand	2	4		4	fX	ein		
GL7	uk	Ah	10YR3/3	schwach lehmiger Sand	2	4	>=Wp4	4	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		M	7,5YR4/4	schwach lehmiger Sand	2	4		4	fX-mX	koh		
	LH	IIBv	10YR3/3	stark lehmiger Sand	2	4		4	fX-mX	koh		
GL8	LH	Ah	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	4	Wp3	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		Bv	10YR3/4	stark lehmiger Sand	2	4		4	fX	koh		
	LB	IIilCv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	-		4	fX-mX	ein		
GL9	LH	Ah	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	4	Wp3	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		Bv	10YR3/4	stark lehmiger Sand	2	3		4	fX-mX	koh		
	LB	IIilCv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	1		4	fX-mX	ein		
GL10	uk	Ah	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	4	Wp3	4	gGr-fX	ein	äußerst tief	
		M	7,5YR3/4	stark lehmiger Sand	2	4		4	fX-mX	koh		
	LB	IIilCv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	1		5	fX-mX	ein		

Legende:

¹Ld: Lagerungsdichte

²DWI: Durchwurzelungsintensität

³GBF: Grobbodenfraktion

Tabelle 13 Sedimentologische Geländebefunde der Profilaufnahmen GL11-GL19 [eigener Entwurf]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Boden-farbe	Bodenart (Fingerprobe)	Ld ¹	DWI ²	physiolog. Gründig-keit	Stein-gehalt	GBF ³	Gefüge	Grund-wasser-stufe	Sonstiges	
GL11	LH	Ah	7,5YR3/2	stark lehmiger Sand	1	4	Wp3	4	gGr	ein	äußerst hoch		
		Bv	10YR5/4	stark lehmiger Sand	2	3		4	gGr-fX	koh			
	LB	IIICv	10YR4/3	stark lehmiger Sand	4	1		5	fX	ein			
GL12	LO	Ah	schwarz	schwach lehmiger Sand	2	3	>= Wp3	5	gGr	krü	äußerst hoch		
		Ahe	7,5YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	2			fX-mX	ein			
	LH	IIBv	10YR5/6	stark lehmiger Sand	2	2			5	gGr-fX			koh
GL13	LO	Ah	schwarz	schwach lehmiger Sand	1	4	>=Wp3	6	gGr-fX	krü	äußerst hoch		
		Ahe	7,5YR3/1	schwach lehmiger Sand	2	3			fX-mX	ein			
	LH	IIBv	10YR5/4	stark lehmiger Sand	2	2			5	gGr-fX			koh
GL14	LO	Ah	schwarz	schwach lehmiger Sand	1	4	Wp3	6	gGr-fX	krü	äußerst hoch		
		Ahe	7,5YR3/2	schwach lehmiger Sand	2	2			fX-mX	ein			
	LH	IIBv	10YR3/4	stark lehmiger Sand	2	2			5	gGr-fX			koh
	+R	IIICm	-	entf.	-	-			-	-			-
GL15	oj	Ai	-	entf.	-	-	>=Wp3	-	-	-	äußerst hoch		
		iICv	10YR4/4	schwach lehmiger Sand	1	-							5 bis 6
GL16	uk	Aeh	7,5YR2,5/1	schwach lehmiger Sand	2	4	Wp4	4	gGr-fX	ein	äußerst hoch		
		M	7,5YR4/4	stark lehmiger Sand	2	4		3	gGr-fX	ein			
	LH	IIBv	10YR3/4	stark lehmiger Sand	3	2		4	fX-mX	koh			
	LB	IIICv	10YR4/2	schwach lehmiger Sand	4	-		6	mX	-			
GL17	uk	Aeh	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	1	4	Wp3	4	gGr-fX	ein	äußerst hoch	An der Basis: Steinlage (fX-mX)	
		M	7,5YR4/4	schwach lehmiger Sand	1	4		2	gGr-fX	ein			
	LH	IIBv	10YR3/3	stark lehmiger Sand	3	1		4	fX-mX	koh			
GL18	uk	Aeh	10YR3/2	schwach lehmiger Sand	1	4	Wp3	5	gGr	ein	äußerst hoch	An der Basis: Steinlage (fX-mX)	
		M	7,5YR3/4	stark lehmiger Sand	1	3		3	gGr-fX	ein			
	LH	IIBv	10YR3/4	stark lehmiger Sand	3	1		4	fX-mX	koh			
GL19	uk	Aeh	7,5YR3/2	schwach lehmiger Sand	1	4	>=Wp4	3	gGr-fX	ein	hoch	Kupfererzfundstück in ca. 60 cm Tiefe	
		M	7,5YR3/3	stark lehmiger Sand	1	3		4	gGr-fX	koh			

Legende:

¹Ld: Lagerungsdichte

²DWI: Durchwurzelungsintensität

³GBF: Grobbodenfraktion

Basislage

Die LB wurde in den Profilen GL2-GL5 und GL8-GL11 zumeist im Liegenden der LH vorgefunden. In GL5 und in GL10 wird die LB von einer Einspülmasse überdeckt, da verfüllte Windwurfmulden aufgegraben wurden. Die LB ist im Vergleich zur hangenden LH etwas heller und gräulicher gefärbt (10YR4/2 entspricht *dark greyish brown*). Die stark bis sehr stark steinige LB (4-5) ist sehr schwach durchwurzelt (W1). Der Grobboden der LB setzt sich aus kantigen Steinen (fX) und Blöcken (mX) zusammen. Die LB weist in allen Profilen eine hohe Lagerungsdichte (Ld4) auf, die gemeinsam mit dem hohen Steingehalt die physiologische Gründigkeit am Standort begrenzt.

Die LB ist durchweg dichter gelagert als die LH und die Hangbildungen (u, uk), so dass an der Schichtgrenze LH/LB bzw. im oberen Bereich der LB Interflow auftreten kann. Sedimentologische Indizien für diesen lateralen Zwischenabfluss (z.B. Lehmhauben) wurden jedoch nicht gefunden.

In der LB ist im Hangbereich des Grünen Löwen der ilCv- Horizont entwickelt.

Oberlage

Die LO wurde im Mittelhangbereich etwa 10 m NE versetzt zum Tagebaubereich und den Haldenschüttungen aufgenommen. Die LO (GL12-GL14) weist eine geringe Lagerungsdichte (Ld2) auf und muss aufgrund des hohen Grobskelettanteils (6) als Schutt bezeichnet werden. Der Grobboden besteht aus kantigen Steinen und Blöcken. Der wenige Feinboden wurde als schwach lehmiger Sand angesprochen. Das Vorhandensein der LO koinzidiert mit der Ausbildung von violettstichigen Auswaschungshorizonten, bzw. mäßig bis starken Podsolierungserscheinungen im Oberboden, ohne dass der Unterboden erkennbare Sesquioxid- oder Humusanreicherungen zeigt. Die Durchwurzelungsintensität der LO ist schwach (W2).

In GL14 überdeckt eine ca. 20 cm mächtige LO eine ebenfalls nur 20 cm mächtige LH. Die starke erosive Kappung der LH ist für den Hangbereich des Grünen Löwen ansonsten ohne Beispiel. Die Konservierung der LO im Hangenden der LH auf einem solchen erosionsanfälligen Standort weist darauf hin, dass die LO nach der holozänen Kappung der LH zur Ablagerung kam und fixiert wurde. Demnach wäre die LO hier als eindeutig jungholozäne Ablagerung zu deuten.

An der Basis der kolluvialen Ablagerungen der Profile GL17 und GL18 wurde eine etwa 7-9 cm mächtige und sehr kompakte Steinlage aufgegraben, die auch als begrabene LO interpretiert werden könnte. Da kein Feinmaterial in hinreichender Menge gewonnen werden konnte, wurde auf eine Ansprache als LO verzichtet.

In der schuttartigen LO sind am Grünen Löwen Ah- und Ahe-Horizonte ausgebildet.

Umlagerungsbildungen

Zu den Umlagerungsbildungen zählen Solumsedimente (uk) und Einspülmassen verfüllter Windwurfmulden („pits“). Für die letztgenannten fehlt in der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 1994: 154) eine adäquate geogenetische Kurzbezeichnung, deshalb wird das Substrat in diesen Fällen mit dem m.E. wenig spezifischen „u“ bezeichnet.

„Echte“ Kolluvien wurden in den Profilen GL6, GL7 und GL16-GL19 angetroffen. GL 6 und GL7 wurden am Oberhang und damit in eher untypischer Lage aufgenommen, während sie im Unterhangbereich als typisch anzusehen sind. Geringmächtige, stark steinige Kolluvien (uk) wurden im Hangenden der LH in den Profilen GL6 und GL7 angetroffen. Die Diskontinuität zur LH zeigte sich durch Farbe und Bodenart. Gegen die Annahme einer zweigeteilten LH an diesen Standort spricht auch die gesamte Mächtigkeit des pedogen überprägten Profils, die 80 cm übersteigt, während die „reguläre“ LH im Oberhangbereich zwischen 40 und 50 cm mächtig ist. Die uk in GL6 und GL7 entsprechen sich weitgehend. Sie sind stark steinig (4), das Grobskelett wird durch kantige Steine (fX) und kantige Blöcke (mX) gebildet. Der Feinboden ist ein schwach lehmiger Sand. Die Kolluvien sind stark durchwurzelt (W4) und besitzen eine niedrige Lagerungsdichte (Ld2). Ihre Farbe ist dunkelbraun (7,5YR4/4).

GL 5 und GL10 zeigen Profile des Oberhangs, in denen verfüllte Windwurfmulden über der liegenden LB aufgedigelt wurden. GL 10 wurde am Weganschnitt des Oberen Weges aufgenommen. Aufgrund des ca. 70 cm breiten, kastenförmigen Querschnitts der verfüllten Hohlform wurde zunächst ein alter Weg vermutet, was sich mittels Bohrstocksondierungen in der Umgebung jedoch nicht bestätigen liess. Die beiden Einspülmassen u der beiden Profile sind stark steinig (4), locker gelagert (Ld2) und weisen eine starke Durchwurzelungsintensität auf (W4). Im Grobboden sind vor allem die Fraktionen kantige Steine (fX) und kantige Blöcke vertreten (mX). Bezüglich der Farbe unterscheiden sie sich nicht sehr von der LH, aus der sie genetisch hervorgegangen sind.

Der sehr gering bis gering dicht gelagerte (Ld1-2) Feinboden der Kolluvien des Unterhangbereichs (Profile GL16-GL19) besteht aus stark lehmigem Sand. Der Skelettanteil beträgt etwa 2-50 Vol.-%, deshalb ist der Grobboden als mittel bis stark steinig (3-4) einzustufen. Das Skelett besteht aus Grus und kantigen Steinen (gGr und fX), während kantige Blöcke (mX) im Gegensatz zur liegenden LH an diesen Standorten nur selten vorkommen. Die Durchwurzelungsintensität kann als mittel bis stark (W3-4) bezeichnet werden. An der Basis der Kolluvien in GL17 und GL18 wurde eine Steinlage angetroffen, welche die Abgrenzung zur liegenden LH vereinfacht. In GL19 wurde

die LH bzw. die Steinlage bei der Abgrabung nicht erreicht. Dafür wurde ein quaderartiges Rhyolithbruchstück (Längsachse ca. 17 cm lang, Kurzachsen ca. 5 und 3 cm lang) mit nicht alteriertem Malachitüberzug in 70 cm Tiefe innerhalb einer grobskelettarmen Feinmatrix angetroffen. Das Akkumulieren des M-Horizonts steht deshalb sehr wahrscheinlich in direktem Zusammenhang mit dem im 18. Jh. begonnenen Bergbau und nicht mit früh- oder hochmittelalterlichen Entwaldungen, für die es hier keine beobachtbaren Indizien gibt.

In den Umlagerungsbildungen im Hangbereich des Grünen Löwen sind M- und Ah-Horizonte entwickelt.

Saprolith

Im Top der Hangsequenz wurde der Saprolith der mesozoisch-tertiären Verwitterungsdecke (MTV) nachgewiesen. Das Bodenausgangsgestein ist nach AG BODEN (1994: 154) mit „csa“ (Saprolith) zu bezeichnen, obwohl es sich nicht um eine quartäre, sondern eine tertiäre Verwitterungsbildung handelt. Der Saprolith hat die Farbe 10YR6/2 (*light brownish gray*). Als Bodenart des steinfreien bis sehr schwach steinigen csa wurde toniger Lehm angesprochen. Der Saprolith erscheint als kompakte Kohärenzmasse mit hoher Lagerungsdichte (Ld4), wird von Feinwurzeln nicht durchdrungen (W0) und begrenzt dadurch die physiologische Gründigkeit am Standort.

Im csa ist am Grünen Löwen ein ICj-Horizont anzusprechen.

Haldensubstrat

Der Steingehalt des Substrats oj in GL15 beträgt etwa 75%. Die Grobbodenfraktion besteht aus Grus (gGr), kantigen Steinen (fX) und Blöcken (mX). Der wenige Feinboden wird als schwach lehmiger Sand angesprochen. Das Substrat oj ist ausgesprochen locker gelagert (Ld1). Da die Halde nur an wenigen Stellen Bewuchs zeigt (*Silene vulgaris*), ist die Durchwurzelungsintensität mit W0 (keine Wurzeln) zu klassifizieren. Aussagen zur physiologischen Gründigkeit verbieten sich, da so gut wie keine Durchwurzelung stattfindet.

Im Haldensubstrat ist ein ICv-Horizont entwickelt.

6.1.1.3.2 Bodenbildungen des Hangbereich

Oberhang

Typische Bodenbildungen des Oberhangs (GL1-GL10) sind Braunerden aus LH über LB (Profile GL2-4, GL8, GL9) bzw. aus LH über Saprolith (GL1). Typische Profilabfolgen sind Ah/Bv/IIilCv. Die Horizontgrenzen von Bv zu IIilC sind scharf, die Grenze von Ah und Bv-Horizont deutlich. Atypische Bodenprofile des Oberhangbereichs sind die beiden Kolluvisole (GL6, GL7) mit der

Profilabfolge Ah/M/IIBv. Die Begrenzung des Ah- zum Bv-Horizont ist deutlich. Als ein Schichtungsnachweis kann dagegen die scharfe Grenze von M- und IIBv-Horizont interpretiert werden. Die Gesamtmächtigkeit aus Ah- und M-Horizont ist im Fall von GL7 geringer als die von der AG BODEN (1994: 204) geforderten 4 dm, per dortiger Definition wäre somit kein Kolluvisol anzusprechen. In diesem und ähnlichen Fällen wurde sich von der m.E. zu engen Vorgabe der AG BODEN gelöst. Als Kolluvisole wurden mangels Alternativen auch die beiden Profile GL5 und GL10 angesprochen, bei denen eine Einspülmasse in einer Windwurfmulde die LB überschichtet. Die LH wurde komplett durch die Einspülmasse substituiert. Bei dem Profil GL 5 erscheint die Einstufung als Kolluvisol zudem problematisch vor dem Hintergrund, dass kein Ah-Horizont ausgebildet ist. Die Horizontbezeichnung wurde hier mit M/IIilCv vorgenommen, die Horizontgrenze ist scharf. Das Fehlen eines Ah-Horizonts lässt sich mit einer sehr jungen Genese der Hohlform in Einklang bringen, auch wenn dann ungeklärt bleiben muss, wie sich die Windwurfmulde unter Wald so schnell verfüllen lassen konnte. In GL 10 mit seiner Horizontabfolge von Ah/M/IIilCv ist dagegen ein Ah-Horizont ausgebildet, vermutlich ist der Windwurf (deutlich?) älteren Datums als in GL5. Die Horizontgrenze zwischen M- und IIilCv-Horizont ist scharf, im Gegensatz zur diffusen Horizontgrenze von Ah- und M-Horizont.

Mittelhang

Der Mittelhangbereich der Hangsequenz Grüner Löwe wird von Haldenschüttungen eingenommen. In diesen Haldenmaterialien wurde als charakteristische Bodenbildung ein Lockersyrosem mit der Profilabfolge Ai/iylCv aufgenommen (GL15). Der Ai-Horizont tritt nicht flächendeckend auf, sondern ist auf die Standorte von *Silene vulgaris* begrenzt. Die restlichen Profile des Mittelhangs (GL11-GL14) wurden etwa 10 m seitlich versetzt vom Tagebau in Richtung NE aufgegraben, um auch für den Mittelhangbereich Aussagen über die ursprünglich anwesenden Bodenformen treffen zu können. Angetroffen in GL 11 eine Braunerde aus LH über LB (GL11) mit der typischen Horizontabfolge Ah/Bv/IIilCv. Die Übergänge zwischen den Horizonten sind deutlich (Ah-/Bv-Horizont) bzw. scharf (Bv-/IIilCv-Horizont). GL12 und GL13 zeigen podsolierte Braunerden aus LO über LH. Die LB oder das liegende Festgestein wurden nicht aufgeschlossen. Der mineralische Oberboden lässt sich in einen Ah- und einen Ahe-Horizont differenzieren. Der Übergangsbereich zwischen diesen beiden Horizonten ist diffus, während sich der Übergangsbereich zwischen Ahe- und IIBv-Horizont als scharf bezeichnen lässt. Entsprechend lauten die Profilabfolgen Ah/Ahe/IIBv. In GL14 wurde Festgestein im Liegenden der LH aufgegraben, so dass die aus GL12 und GL13 bereits bekannte Horizontabfolge durch den IIImCn-Horizont ergänzt wird.

Unterhang

Am Unterhang (Profile GL16-19) sind flächig schwach podsolige Kolluvisole ausgebildet. Die Horizontabfolge entspricht Aeh/M/IIBv/IIIilCv, wobei der IIIilCv-Horizont nur in GL16

angetroffen wurde. Die Mächtigkeit der uk-Substrate nimmt zum Talboden hin zu, dementsprechend wurde die Basis des M-Horizonts in Profil 19 nicht erreicht. Die Horizontübergänge zwischen M- und IIBv- bzw. Bv- und IIIilCv sind scharf, die übrigen deutlich. Die Kolluvisole beinhalten keine datierbaren Materialien, so dass ihr Alter unbestimmt bleiben muss. Die einzige Möglichkeit, eine grobe Alterseinschätzung der Kolluvisole vorzunehmen, ergibt sich durch das Kupfererzfundstück in GL 19. Entsprechend haben die Kolluvisole maximal ein Alter von etwa 200 Jahren.

6.1.1.3.3. Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen

Die Beurteilung der ökologischen Eigenschaften der Böden erfolgt über laboranalytisch gewonnene Werte und mittels indirekt abgeleiteter Parameter. Dazu werden zunächst zwei Tabellen präsentiert (Tabelle 14, Tabelle 15). Anschließend findet eine Beurteilung der Eigenschaften der Bodenbildungen statt.

Die Korngrößenverteilung der untersuchten Bodenproben ausgewählter Horizonte zeigt, dass insgesamt fünf Bodenartenuntergruppen auftreten:

- mittel-lehmiger Sand (S13),
- stark lehmiger Sand (S14),
- schluffig-lehmiger Sand (Slu),
- schwach lehmiger Sand (S12) und
- mittel schluffiger Sand (Su3).

Die Bodenartenuntergruppen S13, S12 und Slu wurden in Bodenproben des Oberhangs entnommen. Der schwach-lehmige Sand entstammt dem Haldensubstrat des Mittelhangs, während der mittel-schluffige Sand die Feinbodenart eines M-Horizonts einer kolluvialen Bildung des Unterhangs darstellt.

Es ist interessant, dass die Bodenart Su3 (Tongehalte: 5-8%; Schluffgehalte 25-40%) im Kolluvisol am Unterhang auftritt, während die Bodenproben des Oberhangs höhere Tongehalte (zwischen 12-17%) aufweisen. Die Aussage von BIRKELAND (1999: 246): „A marked feature [...] is that the clay content increases downslope“ besitzt hier keine Gültigkeit.

Im gesamten Hangbereich sind die Böden als Folge der gemessenen pH-Werte, die sich im Bereich von 3 bis 4 bewegen, als sehr stark sauer (s5) einzustufen.

Tabelle 14: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Grüner Löwe [eigener Entwurf / eigene Daten]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Bodenart (Korngrößen- bestimmung)	pH-Wert (CaCl ₂)	Kurzzeichen AG BODEN (1994: 331)	C _{org} [%] ¹	Kurzzeichen (AG BODEN 1994: 108)	Carbonatgehalt (Salzsäuretest / Best. n. Scheibler)
GL1	LH	Ah	n.b.	3,5	s5	17,7	h6	c0 / -
	csa	Bv	n.b.	3,5	s5	12,3	h5	c0 / -
		IIIcJ	n.b.	3,6	s5	3,3	h3	c0 / -
GL2	LH	Ah	n.b.	3,7	s5	13,2	h5	c0 / -
	LB	Bv	n.b.	3,4	s5	6,7	h4	c0 / -
		IIIcV	n.b.	3,6	s5	6,9	h4	c0 / -
GL3	LH	Ah	n.b.	4	s5	16,5	h6	c0 / -
	LB	Bv	n.b.	3,6	s5	5,3	h4	c0 / -
		IIIcV	n.b.	3,7	s5	5,5	h4	c0 / -
GL4	LH	Ah	S13	4	s5	15,2	h6	c0 / -
	LB	Bv	S13	3,6	s5	4,7	h4	c0 / -
		IIIcV	S13	3,8	s5	4,5	h4	c0 / -
GL5	u	M	n.b.	3,9	s5	4,6	h4	c0 / -
	LB	IIIcV	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	c0 / -
GL6	uk	Ah	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	c0 / -
	LH	M	S14	3,6	s5	5,9	h4	c0 / -
		IIBv	S13	3,6	s5	4,8	h4	c0 / -
GL7	uk	Ah	n.b.	3,6	s5	15,9	h6	c0 / -
	LH	M	S14	3,5	s6	11,2	h5	c0 / -
		IIBv	S14	3,7	s7	8,2	h5	c0 / -
GL8	LH	Ah	n.b.	3,5	s8	19,5	h6	c0 / -
	LB	Bv	n.b.	3,5	s9	9,5	h5	c0 / -
		IIIcV	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	c0 / -
GL9	LH	Ah	n.b.	2,9	s6	19,8	h6	c0 / -
	LB	Bv	S14	3,4	s5	10,2	h5	c0 / -
		IIIcV	S14	3,3	s5	7,8	h4	c0 / -
GL10	uk	Ah	n.b.	3,9	s5	9,8	h5	c0 / -
	LB	M	Slu	3,9	s5	3,2	h3	c0 / -
		IIIcV	n.b.	n.b.	s5	n.b.	n.b.	c0 / -
GL11	LH	Ah	Slu	2,9	s6	10,6	h5	c0 / -
	LB	Bv	Slu	3,6	s5	6,9	h4	c0 / -
		IIIcV	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GL12	LO	Ah	n.b.	2,6	s6	16	h6	c0 / -
	LH	Ahe	n.b.	3,1	s5	16,7	h6	c0 / -
		IIBv	n.b.	3,7	s5	6,7	h4	c0 / -
GL13	LO	Ah	n.b.	3,1	s5	15,4	h6	c0 / -
	LH	Ahe	n.b.	3,1	s5	10,4	h5	c0 / -
		IIBv	n.b.	3,9	s5	3,6	h3	c0 / -
GL14	LO	Ah	n.b.	3,1	s5	14,4	h5	c0 / -
	LH	Ahe	n.b.	3,1	s5	6,5	h4	c0 / -
		IIBv	n.b.	3,6	s5	3,4	h3	c0 / -
GL15	oj	Ai	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		ICv	S12	4,1	s4	3,5	h3	c0 / -
GL16	uk	Aeh	S13	2,9	s6	13	h6	c0 / -
	LB	M	S13	3,3	s5	5,2	h4	c0 / -
		IIIcV	S13	3,4	s5	3,6	h3	c0 / -
GL17	uk	Aeh	n.b.	3,5	s5	4,2	h4	c0 / -
	LH	M	S13	3,7	s5	2,9	h3	c0 / -
		IIBv	n.b.	3,7	s5	2,2	h3	c0 / -
GL18	uk	Aeh	n.b.	3,6	s5	6,6	h4	c0 / -
	LH	M	Su3	3,8	s5	2,8	h3	c0 / -
		IIBv	n.b.	3,9	s5	2,5	h3	c0 / -
GL19	uk	Aeh	n.b.	3,7	s5	8,6	h5	c0 / -
		M	S13	3,6	s5	3,4	h3	c0 / -

Legende / Anmerkungen:

¹Gehalte an organischer Substanz wahrscheinlich zu hoch, vgl. Kapitel 9 Fehlerbetrachtung

die eine Einstufung als mittel (h3) bis stark humos (h4) notwendig machen. Die hohen Werte sind u.a. erklärbar durch die stark verringerte biotische Aktivität im Al-Pufferbereich, die zu einer geringen Mineralisierungsrate führt. Die tiefreichende Verlagerung der organischen Substanz bis in die C-Horizonte resultiert aus der Entstehung von migrationsfähigen niedermolekularen Huminstoffen unter der Humusform Rohhumus. Aufgrund der Methodik zur Bestimmung der organischen Substanz (Glühverlust), ist zudem von einem methodischen Fehler auszugehen (vgl. SCHLICHTING et al. 1995: 159).

Die nutzbare Feldkapazität und die damit verfügbare Wassermenge des effektiven Wurzelraums schwankt in den Bodenhorizonten um mittlere Einstufungen. Die Luftkapazität der Bodenhorizonte wird als hoch bis sehr hoch klassifiziert, so dass eine gute Durchlüftung des standörtlichen Bodenprofile gewährleistet ist. Die mittlere bis hohe Wasserdurchlässigkeit des Bodenkörpers wirkt kaum ausgleichend auf den standörtlichen Wasserhaushalt: die Drainage wird gefördert, entsprechend das Sickerwasser schnell durch die Bodenmatrix bewegt und die Wasserversorgung der Pflanzen gegenüber Witterungseinflüssen kaum abgepuffert.

Aufgrund der Körnung der untersuchten Bodenhorizonte lässt sich für die Standorte eine hohe bis sehr hohe Infiltrationskapazität und eine schwache bis sehr schwache Verschlammungsneigung ableiten. Ausnahmen stellen in Bezug auf die Verschlammungsneigung der iylCv-Horizont in Profil G15 (mittlere bis hohe Verschlammungsneigung) sowie der M-Horizont in GL15 (sehr starke Verschlammungsneigung) dar. Die Erodierbarkeit der Böden wird mit mittel bis hoch (3-4) klassifiziert. Die Entstehung von Oberflächenabfluss ist angesichts der Infiltrationskapazität und der eher geringen Verschlammungsneigung der Böden eher unwahrscheinlich. Dennoch sind im Oberhangbereich wie Unterhangbereich Kolluvisole angesprochen worden. Die Deutung der Akkumulation im Unterhangbereich macht infolge der hangaufwärtigen subrezentem bergbaulichen Nutzung keine Schwierigkeiten, während die Entstehung der Kolluvisole am Oberhang nicht zwangsläufig dem Bergbau zugeschrieben werden muss. Denkbar sind z.B. Erosionsschäden durch singuläre extreme Niederschlagsereignisse mit großem Impakt, die zufällig in eine Phase des Waldumbaus fielen.

Die mechanischen Filtereigenschaften der Böden werden als gut, die physikalisch-chemischen Filtereigenschaften auf Basis der jeweiligen Bodenart als mittel abgeleitet. Die Gesamtfilterwirkung kann in Abhängigkeit von KAK und der Luftkapazität überwiegend als hoch klassifiziert werden. Zu bedenken gilt jedoch, dass die Böden sehr stark sauer und reich an niedermolekularer organischer Substanz sind. Deshalb muss die Einschätzung der physikalisch-chemischen Filterwirkung, bzw. der Gesamtfilterwirkung, m.E. stark relativiert werden. Die Empfindlichkeit der Böden gegenüber der Desorption von Schwermetallen beispielsweise ist

infolge der niedrigen pH-Werte als hoch einzuordnen. Dazu kommt der Effekt, dass freigesetzte Metallionen durch die niedermolekularen Huminstoffe komplex gebunden und als Chelate mit dem Sickerwasser abtransportiert werden können. Belege für das letztgenannte Prozessgeschehen finden sich z.B. in den Podsolierungstendenzen am Mittel- und Unterhang, auch wenn es im Unterboden (noch) nicht zu sichtbaren Sesquioxid- oder Humusanreicherungen bzw. der Ausbildung von Bs- oder Bh-Horizonten gekommen ist.

6.1.1.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich

Aus Kostengründen wurde bei der Schwermetallanalytik der Bodenproben eine Auswahl vorgenommen. Analysiert wurden die Kupfer-, Blei- und Zinkgehalte im Königswasserauszug (S7). Die Ergebnisse werden in Tabelle 16 präsentiert.

Die regionalen Hintergrundkonzentrationen (*Background*-Werte) liegen nach DREYER & HANEKE (1978: 70) für Kupfer zwischen 6 und 40 ppm, für Blei und Zink zwischen 15 und 100 ppm.

Tabelle 16: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben des Grünen Löwen [eigener Entwurf / eigene Daten]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Cu [ppm]	Pb [ppm]	Zn [ppm]
GL4	LH	Ah	42,7	124,8	64,4
		Bv	38,3	61,5	47,9
	LB	IIilCv	42,8	60,8	43,6
GL6	uk	M	74,7	64,4	36,6
	LH	IIBv	173	67,6	35,6
GL7	uk	M	61,7	51,7	41,6
	LH	IIBv	21,2	26,2	70,8
GL9	LH	Bv	80,8	37,4	36,2
	LB	IIilCv	22,5	24,4	69
GL10	u	“M”	80,3	71,1	58,7
GL11	LH	Ah	167,5	86	44,4
		Bv	30,4	22,4	33,85
GL15	oj	iyIC(v)	1603	938,9	81,5
GL16	uk	Aeh	427,3	140,3	46,8
		M	161,3	136,2	48,2
	LH	IIBv	133,7	93	25,4
GL17	uk	M	124,3	114,2	24,1
GL18	uk	M	48,1	39,7	36,9
GL19	uk	M	104,2	71,7	36,6

Profile des Oberhangs

Bei den Profilen des Oberhangs (GL 4,6,7,9,10) fällt zunächst auf, dass sich die Konzentrationen für Zink alle im Bereich des *Backgrounds* bewegen. Ähnlich verhält es sich mit den Bleigegehalten, wenn man vom Ah-Horizont der Aufgrabung GL 4 absieht, wo die Gehalte den *Background* übersteigen. Die Kupfergehalte der Bodenproben bewegen sich zumeist oberhalb des *Backgrounds*, wenn man von den Bv-Horizonten in GL 4, 7 absieht.

Auffallend ist der Tiefenverlauf der Bleikonzentration in GL 4. Im gleichen Substrat (LH) wurden im Ah-Horizont in etwa doppelt so hohe Gehalte festgestellt wie im Bv-Horizont, während sich die Gehalte zwischen Bv- und IIilCv-Horizont trotz Schichtung kaum voneinander unterscheiden. Die Ursache für den relativ hohen Bleigehalt ist der Eintrag über den Luftpfad, denn in die Luft emittierte bleihaltige Feinstaubpartikel und Aerosole können mit dem Wind bis in industrieferne Gebiete transportiert werden (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 337). Für diese Argumentation sprechen auch der indifferente Tiefenverlauf der Kupfergehalte.

Weiterhin fällt auf, dass an der Schichtgrenze vom M-Horizont der kolluvialen Umlagerungsbildung zum IIBv-Horizont der liegenden LH in GL 6 eine knappe Verdoppelung der Kupfergehalte festgestellt wurde. Hier zeigt sich m.E. der Einflussbereich einer Anomalie, denn der analysierte Kupfergehalt bedeutet gegenüber dem Background von 40 ppm einen Anreicherungsfaktor von etwa 4,3.

Die restlichen Kupfergehalte der Bodenprofile des Oberhangs sind ziemlich unauffällig, d.h. sie bewegen sich im Bereich zwischen etwa 20 und 80 ppm. Maximal ist hier ein Anreicherungsfaktor von 2 auszurechnen.

Profile des Mittelhangs

Beprobte wurde der ilC(v)-Horizont des Lockersyrosem GL 15. Erwartungsgemäß (Halde!) erreichen hier die Kupfer- und Bleigehalte ihre Rekordwerte (1603 ppm bzw. 938 ppm) während der Zinkgehalt mit ca. 81 ppm unauffällig bleibt. In dieser Bodenprobe ist das Kupfer gegenüber dem *Background* um das etwa 40-fache angereichert, für das Blei wurde ein Anreicherungsfaktor von 9,3 errechnet. Deutlich wird auch hier, dass die Eignung des Zinks als *pathfinder*-Element nicht gegeben ist.

Zu bedenken ist bei der Betrachtung dieser Werte, dass sie stellvertretend für den gesamten Mittelhangbereich stehen. Dieser ist demnach über einige hundert Quadratmeter flächenhaft mit belasteten Sedimenten bedeckt, wobei die Mächtigkeit der Aufhaldung stark schwankt und selbst eine grobe Abschätzung des Gesamtvolumens unmöglich macht.

Abseits des eigentlichen Tagebaus wurden die in der LH entwickelten Ah- und Bv-Horizonte des Profils GL 11 beprobt. Hier überrascht, dass die Kupfergehalte im Ah-Horizont mehr als 5 Mal so hoch sind wie im Bv-Horizont. Auch der Bleigehalt ist im Ah-Horizont etwa vierfach höher als im Bv-Horizont. Diese Messwerte lassen sich unter Berücksichtigung der rezenten Dynamik im Haldenbereich erklären: aus dem vollkommen unbedeckten Haldenbereich findet bei entsprechender Witterungslage eine Ausblasung transportfähiger Partikel statt. Diese Stäube

erreichen keine großen Transportweiten, sondern werden im direkt angrenzenden Wald abgesetzt. Nach Trockenheit lassen sich auf den Blättern entsprechend feine Stäube nachweisen. Von dort gelangen die schwermetallhaltigen Partikel mit dem Niederschlag in den Boden. Der luftbürtige Ferneintrag von Pb in den Oberboden kann allerdings nicht ganz ausgeschlossen werden. Da die Cu- und Pb-Gehalte jedoch einen ähnlichen Verlauf zeigen und es für den Ferneintrag des Cu m.E. keine Grundlage gibt, kann der Ferneintrag in seiner Bedeutung wohl eher vernachlässigt werden.

Profile des Unterhangs

Bei allen kolluvialen Profilen des Unterhangs (GL 16-19) wurde der M-Horizont beprobt. Zusätzlich wurden bei Profil GL 16 die Bodenhorizonte Aeh und IIBv bearbeitet.

Das Profil 16 wurde knapp unterhalb der Aufhaldung des Mittelhangs aufgegraben. Aufgrund der relativen Nähe zur Aufhaldung wurden hier die höchsten Kupfer- und Bleigehalte in den Bodenproben des Unterhangs gefunden. Die Anreicherungsfaktoren für Kupfer erreichen hier Werte von ca. 10 (Ah(e)-Horizont), 4 (M-Horizont) und etwa 3 im IIBv-Horizont. Bei den Bleigehalten ist eine andere Situation gegeben, denn sie unterscheiden sich bei leicht gegenüber dem Background erhöhten Gehalten in den oberflächennahen Horizonten kaum voneinander und fallen nur im IIBv-Horizont der LH um etwa 40 % ab.

Die ziemlich hohen Kupfergehalte resultieren vermutlich aus der Aufarbeitung von Haldenmaterialien bei der Genese des Kolluviums. Die erhöhten Gehalte im Aeh-Horizont lassen sich dann über die Funktion der Vegetation als Basenpumpe erklären: demnach werden Ionen durch Pflanzenwurzeln den tieferen Bodenschichten des Hauptwurzelsraums entzogen, um letztendlich über die Streu wieder in den Oberboden zu gelangen (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1998: 397). Denkbar ist aber auch eine postsedimentäre Kontamination von der Oberfläche her. Hangzugwasser nimmt beim Weg durch die Aufhaldung die Schwermetalle suspensiv oder gelöst auf, tritt am Fahrweg an die Oberfläche und wird von dort durch Rillen und Rinnen direkt hangabwärts abgeleitet, wo es unterhalb des Fahrwegs in den Boden infiltrieren kann. Dafür würde m.E. sprechen, dass der Aeh-Horizont mehr als 2,5-fach so hohe Kupfergehalte aufweist wie der M-Horizont. Bezüglich der Tiefenverläufe der Bleigehalte kann keine Deutung gegeben werden, sie unterscheiden sich nicht signifikant. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit wäre der Eintrag mit dem Niederschlagswasser nach Passage des vegetativen Stockwerks, da es beobachtbar zur Verdriftung von Stäuben und anschließendem Absetzen dieser Feinpartikel auf Blattoberflächen und Nadeln kommt.

Der IIBv-Horizont der LH in GL16 weist eine Kupferkonzentration von 133 ppm auf und übersteigt damit den Background um das mehr als Dreifache. Dieser Kupfergehalt lässt sich

entweder durch die Lage in einer auslaufenden sekundären Dispersion, oder durch postsedimentäre Kontamination von der Oberfläche her erklären. Gegen letztgenannte würde sprechen, dass Kupfer bei pH-Werten < 6 zum größten Teil organisch gebunden vorliegt, und sich – sofern niedermolekulare Komplexbildner fehlen - durch eine geringe Verlagerbarkeit auszeichnet. Der Humusgehalt ist bekannt und wird im Aeh-Horizont als sehr hoch eingestuft, aber über die Art der organischen Komplexbildner kann keine Aussage gemacht werden. Eine finale Einschätzung kann deshalb nicht stattfinden.

Aus der Schwermetallanalytik der M-Horizonte der catenal gekoppelten Unterhangprofile GL17-19 lässt sich kein Trend ableiten. Die Blei- und Zinkgehalte sind bei allen Bodenproben erneut unauffällig. Die Kupfergehalte übersteigen in den M-Horizonten von GL17 und 19 den Wert von 100 ppm und bezeugen damit m.E. ihre Genese in Abhängigkeit von der bergbaulichen Exploration im Mittelhangbereich. Nicht in Einklang zu bringen mit dieser Hypothese ist der Kupfergehalt im M-Horizont von GL 18, der sich im Bereich der Hintergrundkonzentration bewegt.

Hinzuweisen bleibt auf das Kupfererzfundstück in GL19. Obwohl dadurch eindeutig die Entstehung des Kolluviums im zeitlichen Zusammenhang mit dem Bergbau belegt wird, ist es postsedimentär nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Kupfergehalte in der Bodenprobe gekommen. Das Fundstück erschien kaum alteriert. Die Zeit, die seit der Ablagerung des Kolluviums verstrichen ist, hat nicht ausgereicht, um das Kupfererz intensiver zu verwittern und für eine entsprechende Erhöhung der Kupfergehalte im Sediment zu sorgen, obwohl das geochemische Milieu (stark sauer, aerob, Anwesenheit von Komplexbildnern) eine intensive chemische Verwitterung nahe legt. Demnach handelt es sich um ein sehr junges Kolluvium.

Gefährdungspotenziale der Schwermetallgehalte in den Bodenbildungen des Grünen Löwen

Die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht für die Bodenprobe des IC(v)-Horizonts von GL 15. Das zu bewertende Schutzgut ist das Grundwasser, als Wirkungspfad ist entsprechend der Pfad Boden-Grundwasser anzusprechen.

➤ Schadstoffgesamtgehalte

Nur in der genannten Bodenprobe wurden sehr hohe Schadstoffgehalte im Königswasserextrakt festgestellt, bei denen die Beurteilungswerte für Blei (500 mg/kg) und Kupfer (500 mg/kg) nach Tabelle 8 aus Abschnitt 3 um das Mehrfache überschritten werden.

➤ Freisetzungsverhalten

Zur Beurteilung der Mobilität wurde eine S4-Elution der genannten Bodenprobe durchgeführt. Der Kupfergehalt im Eluat beträgt 0,8 ppm. Die Gehalte an Blei und Zink sind unauffällig (0 bzw. 0,1

ppm) und werden deswegen nicht weiter behandelt. Bezogen auf einen Gesamtgehalt von 1403 ppm, stellen die 0,8 ppm einen eluierbaren Schadstoffanteil von etwa 0,05 % dar. Trotz hoher Kupfergehalte geht nur ein geringer Anteil in Lösung. Diese 0,8 ppm (= 0,8 mg/l bzw. 800 ppb) bedeuten gleichzeitig das Übersteigen des Prüfwerts von 50 myg/l (= 50 ppb) um mehr als das 10-fache.

➤ **Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone**

Das Lockergestein ist weniger als 2 m mächtig. Zudem steht zwischen der Unterkante des belasteten Bodenbereichs und der Grundwasseroberfläche klüftiges Festgestein an. Die Fläche ist unversiegelt und die Durchlässigkeit der Sedimente ist angesichts des klüftigen Festgesteins nicht entscheidungsrelevant. Die Schutzfunktion der ungesättigten Zone wird als gering eingeschätzt (vgl. Tabelle 10).

➤ **Abschätzung der Grundwassergefährdung**

Auf Basis der Tabelle 11 aus Abschnitt 3 wird folgende Gesamteinschätzung vorgenommen: Die geringe Mobilität der Schadstoffe führt bei geringer Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone bei sehr hohen Schadstoffgehalten im Boden wahrscheinlich zu einer Grundwassergefährdung.

6.1.1.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte

Oberhang

Die typische Deckschichtenabfolge von LH über LB wurde trotz ausgesprochener Erosionslage am Oberhang und steiler bis sehr steiler Hangneigung in insgesamt 6 Profilen (GL 2-4, 8-9) aufgeschlossen. Die LH wurde insgesamt nur schwach erodiert, die Solummächtigkeit beträgt bei den genannten Profilen mindestens 40 cm. Die Gründe sind vor allem in der Substrattextur zu sehen, die Verspülungserscheinungen unwahrscheinlich macht. Trotzdem wurden am Oberhang echte - wenn auch geringmächtige - Kolluvien (GL 6-7) angetroffen.

Die aufgenommenen Profile GL 2-4 und 8-9 entsprechen dem theoretisch abgeleiteten Profil 3 (vgl. Abbildung 3) aus Abschnitt 2. GL 7 kann mit dem Musterprofil 5 aus Abbildung 3 verglichen werden. Da GL 6 vermutlich im Kontaktbereich einer Anomalie aufgenommen wurde, wird diesem Profil das Musterprofil 6 aus Abbildung 4 zugeordnet.

Bezüglich der zeitlichen Einordnung dieser relativ schwachen Erosions-/Akkumulationsphase kann keine Aussage getroffen werden.

Sehr junges Alter (15-30 Jahre etwa) besitzen die Einspülmassen der verfüllten Windwurfmulden (GL 5 und 10), die mit „u“ bezeichnet wurden. Die Anwesenheit der Windwürfe in dieser Lage erstaunt angesichts der guten Draineigenschaften der Böden (Steillage, hohe Durchlässigkeit, keine Verdichtungen im Boden). Das Auftreten von Windwurf ist hier gekoppelt an eine starke Durchfeuchtung der ungesättigten Zone nach der einsetzenden Schneeschmelze. Diese Windwürfe lassen sich nicht in eine spezielle umweltgeschichtliche Phase des Holozäns einordnen, sondern stellen aus ökologischer Sicht einen ständig wiederkehrenden Störungsimpuls in Waldökosystemen dar. Die Windwurfsedimente ähneln der LH, von der sie sich genetisch herleiten. Deshalb ist eine sichere Ansprache und Identifikation der Windwurfsedimente nach dem Einebnen der korrespondierenden Mulden-und-Hügel-Mikrotopographie kaum möglich. Aus anderem Blickwinkel stellt sich die Frage, ob die LH mit ihrer Merkmalscharakteristik in ihrer Gesamtheit nicht wesentlich durch Floralturbation geprägt ist (vgl. VÖLKELE et al. 2002b: 52).

Mittelhang

Der Oberflächennahe Untergrund wurde am Mittelhang in der Bergbauphase, die nach RASCHE (1989: 44ff.) am Grünen Löwen vermutlich erst im 18. Jahrhundert einsetzte, komplett zerstört, bzw. durch Halden-Lockersyrose (GL15) ersetzt. Infolge einer fehlenden Vegetationsdecke bieten sich der rezente Morphodynamik in der postmontanen Gegenwart trotz Auflassung viele Angriffspunkte, die in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben wurden.

Unterhang

Ungestörte Deckschichtenabfolgen sind am Unterhang nicht anzutreffen. Infolge der typischen Senkenlage sind die Standorte durch Akkumulation geprägt. Das Erzfundstück im M-Horizont in Profil GL19 macht wahrscheinlich, dass es erst durch die bergbaulichen Aktivitäten zur verstärkten Kolluviation kam. Angesichts der kompletten Ausräumung der Deckschichten im Mittelhangbereich überrascht die geringe Mächtigkeit der M-Horizonte, deren Basis lediglich in Profil GL19 nicht erreicht wurde. Es steht zu vermuten, dass im Liegenden der M-Horizonte LH und LB anzutreffen sind, wenngleich die LB nur im Profil GL16 und die LH nur in den Profilen GL15-18 aufgegraben wurde. Die Profile GL16-19 lassen sich mit dem theoretisch abgeleiteten Profil 10 der Abbildung 5 aus Abschnitt 2 parallelisieren. Bei Profil GL16 ließe sich auch das Musterprofil 17 aus Abbildung 8 des Abschnitts 2 zu Vergleichszwecken heranziehen.

Gesamtbetrachtung des Hangbereichs

Der postglaziale Ausgangszustand, d.h. eine ungestörte, nicht erodierte Abfolge von LH über LB, wurde im gesamten Hangbereich nicht mehr angetroffen. Gekappte Profile am Oberhang zeugen von Bodenerosion, deren Korrelate wurden teilweise am Oberhang fixiert. Das Auslösen der Erosionsprozesse könnte im Zusammenhang mit dem im 18. Jahrhundert einsetzenden Bergbau zu

sehen sein, der am Mittelhang im Tagebau betrieben wurde. Dadurch wurde dort der oberflächennahe Untergrund am Mittelhang komplett zerstört und zumindest teilweise durch Aufhaldungen substituiert. Die kolluvialen Bildungen des Unterhangs stehen in direktem Zusammenhang mit der bergbaulichen Nutzungsphase. Der Hangbereich unterliegt gegenwärtig im Ober- und Unterhangbereich der forstlichen Nutzung. Dadurch wird eine morphodynamische Stabilität mit progressiver pedogenetischer Entwicklung dieser Standorte gewährleistet, wenn man von den Windwürfen absieht. Diese Windwürfe bewirken punktuelle Störungen des Sedimentaufbaus. Auf dem Mittelhang konnte sich bis in die Gegenwart keine schützende Vegetationsdecke etablieren, dieser Hangbereich bleibt deswegen morphodynamisch aktiv bei regressiver pedogenetischer Entwicklung der Standorte.

6.1.2 Hangsequenz Kupferberg

Vorbemerkung

Über die Hangsequenz Kupferberg wurde bereits in zwei Publikationen berichtet (RUSSOW 2002 und 2004). In der Publikation aus dem Jahre 2002 wurden Arbeitsergebnisse vorgestellt, die später auf Grundlage von laboranalytischen Untersuchungen noch modifiziert, bzw. verfeinert wurden. Die Publikation aus dem Jahr 2004 nimmt Ergebnisse, Abbildungen und Tabellen, die hier präsentiert werden, in Teilen vorweg. Der Text wurde jedoch stark verändert. Die nachfolgenden Ausführungen lehnen sich deshalb zwar an die Darstellungen in RUSSOW (2004) an, erweitern diese jedoch beträchtlich.

6.1.2.1 Daten zur Hangsequenz

Die Hangsequenz Kupferberg verläuft von R3419300 / H5495450 nach R3419085 / H5495450. Die Horizontalabstand bemisst sich auf etwa 210 m. Der höchste Punkt der Hangsequenz liegt bei 420 m ü. NN, der niedrigste Punkt bei 340 m ü. NN. Die mittlere Hangneigung des steilen (N6.1) und W-exponierten Hangs beträgt etwa 25°. Der felsige Kulminationsbereich des Kupferbergs wurde ausgespart, die erste Abgrabung wurde im unteren Oberhangbereich vorgenommen. Die Hangsequenz wird in Abbildung 15 (nächste Seite) dargestellt, ihre Lage im Untersuchungsgebiet Imbach kann der Abbildung 12 entnommen werden.

Der Bergbau am Kupferberg (Grube Friedrich) erfolgte nach RASCHE (1989: 49) insbesondere in den Jahren 1888-1893, nach 1907 scheint der Kupferabbau komplett zum Erliegen gekommen zu sein. Hinweise auf einen früheren Bergbau gibt es wohl nicht.

6.1.2.2 Gliederung des Hangbereichs

Der felsige Kulminationsbereich des Kupferbergs wurde nicht beprobt. Am Oberhang sind Festgesteinsdurchragungen und eine Anzahl von kleinen Fußpfaden (ca. 50 cm breit) quer zur Gefällsrichtung zu finden. Durch Verwitterung an der felsigen Oberfläche kommt es auch rezent zur Produktion von Gesteinsschutt, der vom Entstehungsort kegelförmig hangabwärts zieht. Örtlich entsteht eine geringmächtige Schuttdecke. Füchse (und möglicherweise Dachse) graben bevorzugt im Oberhangbereich ihre Bauten. Dabei werden beachtliche Mengen an Unterbodenmaterial auf die Oberfläche geschafft, die durch spül-aquatische Prozesse abtransportiert werden.

Der Mittelhang ist vertikal gestreckt und in der Horizontalen mittel konkav gewölbt (G, V2). Er weist in seinem unteren Abschnitt das Stollenmundloch 2 auf. Hangaufwärts zu diesem Stollenmundloch schließt sich ein großer Einsturztrichter an. Die ellipsenartige Hohlform ist ca. 10 m lang und 5 m breit. Der Bewuchs der Wände des Einsturztrichters mit Eiche (*Quercus petraea*),

Buche (*Fagus sylvatica*), Kiefer (*Pinus Sylvestris*), Drahtschmiele (*Deschampsia flexuosa*), sowie vor allem Heidekraut (*Calluna vulgaris*) und Heidelbeere (*Vaccinum myrtillus*) deutet auf relative morphodynamische Stabilität hin.

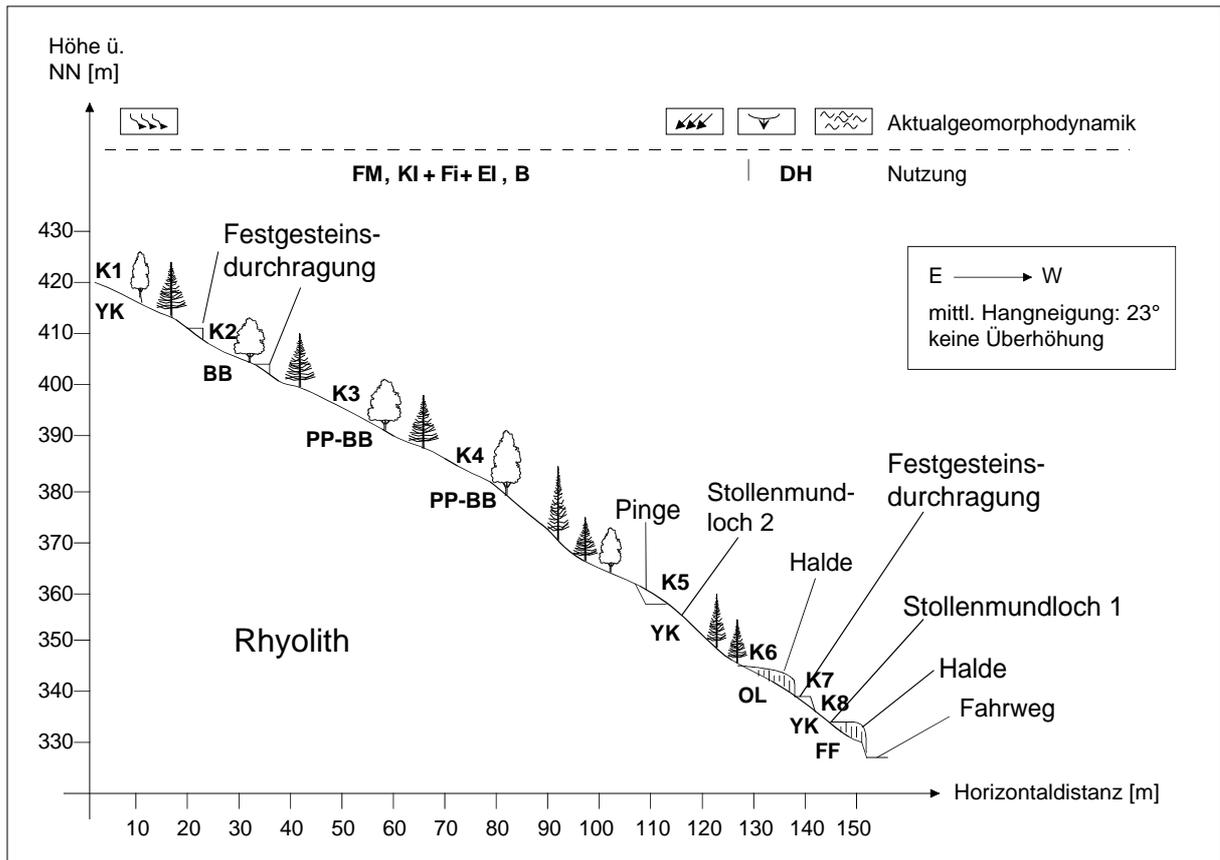


Abbildung 15: Hangsequenz Kupferberg [nach RUSSOW 2004: 148, verändert]



Ober- und Mittelhang werden forstlich genutzt. Der Mischwald weist einen Altbestand aus Kiefer, Fichte und Eiche auf (FM, KI+FI+EI, B). Im Unterhangbereich dieser Hangsequenz sind die Relikte des aufgelassenen Bergbaus zu finden (DH). Das markanteste Relikt ist das mittlerweile vergitterte Stollenmundloch 1. Hangabwärts zieht vom Stollenmundloch 1 eine Halde bis zum Wegrand. Die Halde ist locker mit *Silene vulgaris* bewachsen und unterliegt starkem Vertritt durch Mineraliensucher, denen es wohl auch zu verdanken ist, dass Malachitstückchen auf dem Weg zu finden sind.

In einer gedachten Verbindungslinie zwischen den beiden Stollenmundlöchern existiert eine schmale, lange Mulde, die auf eine Senkung über dem Stollen hindeutet. Etwas südlich dieser Mulde ist außerdem eine Pinge anzutreffen. Beide Hohlformen unterliegen rezente Materialeintrag. Nach eigenem Beobachten führt Vertritt oberhalb des Stollenmundlochs 1 zu starkem hangabwärtigen Materialversatz, große Bruchstücke werden teilweise bis zum Weg hinunter transportiert. Das übrige Mikrorelief des Unterhangs besteht aus zahlreichen Windwurfmulden und -hügeln. Teilweise wurden die Stämme am Wurzelteller abgeschnitten und wieder in die Mulde zurückgeklappt. Der Unterhang geht mit einem scharfen Knick in den anthropogen stark überformten Talboden über, der nicht bearbeitet wurde.

Die hydrologischen Verhältnisse in Hangbereich des Kupferbergs entsprechen den Verhältnissen am Grünen Löwen. Der Bodenfeuchteregimetyp entspricht dem Perkolationstyp (vgl. ZEPP & MÜLLER 1999: 141), der Grundwasserflurabstand wird als sehr hoch beurteilt. Stau- und Hangnässeerscheinungen fehlen. Das Hangwasser tritt als *Interflow* in der basalen LH bzw. an der Grenze zur LB als Folge der stauenden Wirkung der dichter gelagerten LB auf. Auch hier gilt die Aussage, dass sich die Hanghydrologie nicht zur Gliederung des Hangbereichs eignet.

Photo 9 zeigt den Blick vom Fahrweg auf die Halde und das Stollenmundloch 1 der Hangsequenz Kupferberg.



Photo 9: Blick vom Fahrweg auf den Unterhang der Hangsequenz Kupferberg [eigene Aufnahme]

6.1.2.3 Der Oberflächennahe Untergrund im Hangbereich

Insgesamt wurden zur Charakterisierung von Lagen, Hangsedimenten und Bodenbildungen 8 Profile entlang der Hangsequenz aufgedigelt (siehe Abbildung 16). Die Lage der Aufgrabungen im Hangbereich kann der Abbildung 15 entnommen werden.

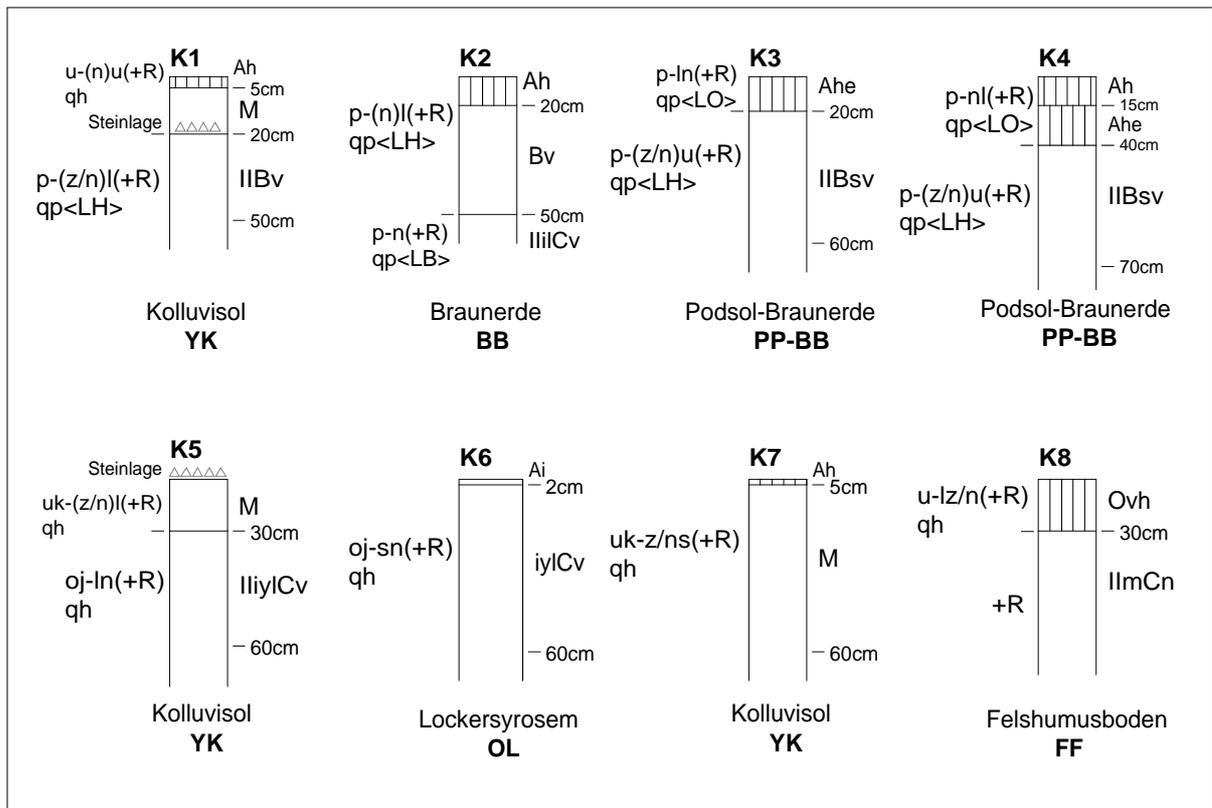


Abbildung 16: Bodenprofile und Substrate der Hangsequenz Kupferberg [nach RUSLOW 2004: 151, verändert]

6.1.2.3.1 Sedimentologische Gliederung und Ausprägung des Oberflächennahen Untergrunds

In Tabelle 17 (nächste Seite) werden die im Gelände aufgenommenen sedimentologischen Befunde der Profilaufnahmen entlang der Hangsequenz dargestellt. Angetroffen wurden:

1. Hauptlage - LH (Profile K1-K4),
2. Basislage - LB (Profil K2) ,
3. Oberlage – LO (Profile K3, K4)
4. Umlagerungsbildungen - u (Profile K1, K5, K7, K8),
5. Haldensubstrat – oj (K5,K6)

Diese Hangbildungen werden in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert.

Tabelle 17: Sedimentologisch-bodenkundliche Geländebefunde der Profilaufnahmen K1-K8 [nach RUSSOW 2004: 150, verändert]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Boden-farbe	Bodenart (Fingerprobe)	Ld ¹	DWI ²	physiolog. Gründig-keit	Stein-gehalt	GBF ³	Gefüge	Grund-wasser-stufe	Sonstiges
K1	uk	Ah	-	schluffiger Lehm	-	-	>= Wp3	-	-	ein	äußerst tief	Zu geringmächtig, keine Beprobung An der Basis: Steinlage (fX-mX)
		M	10YR2/2	schluffiger Lehm	1	4		3	fX-mX	ein		
	LH	IIBv	10YR3/2	toniger Lehm	1	1		2	gGr-fX	ein		
K2	LH	Ah	10YR2/2	stark lehmiger Sand	1	3	Wp3	3	fX	ein	äußerst tief	An der Basis: Steinlage (fX-mX)
		Bv	10YR3/6	stark lehmiger Sand	2	4		2	fX-mX	ein		
	LB	IIilCv	10YR3/4	entf.	4	1		6	fX-mX	ein		
K3	LO	Ahe	7,5YR4/10YR4/	toniger Lehm lehmiger	1	4	>= Wp3	5	fX	ein	äußerst tief	
	LH	IIBsv			1	4		3	gGr-fX	kit		
K4	LO	Ah	10YR2/7,5YR4/	toniger Lehm toniger Lehm	1	4	>= Wp3	5	fX-mX	ein	äußerst tief	
		Ahe			2	4		4	gGr-fX-mX	ein		
	LH	IIBsv	10YR3/	lehmiger	2	4		2	gGr-fX	kit		
K5	uk	M	10YR3/3	stark lehmiger Sand	1	4	Wp2	3	gGr-fX	ein	äußerst tief	Schuttstreu auf der Oberfläche (fX-mX)
	oj	IIiylCv	10YR3/4	stark lehmiger Sand	2	1		5	fX-mX	ein		
K6	oj	Ai	-	entf.	-	-	>=Wp3	-	-	ein	äußerst tief	Zu geringmächtig, keine Beprobung
		iyIcV	2,5YR3/1	schwach lehmiger Sand	1	0		5	gGr-fX-mX	ein		
K7	uk	Ah	-	entf.	-	-	>=Wp3	-	-	ein	äußerst tief	Zu geringmächtig, keine Beprobung
		M	10YR5/3	stark lehmiger Sand	1	4		4	gGr-fX	ein		
K8	u	Ovh	schwarz	stark lehmiger Sand	1	4	entf.	5	gGr-fX	koh	äußerst tief	zu wenig Feinmaterial

Legende:

¹Ld: Lagerungsdichte

²DWI: Durchwurzelungsintensität

³GBF: Grobbodenfraktion

Hauptlage

Die LH bildet das Substrat in den Profilen K1 bis K4. Die LH ist schwach bis mittel steinig (2-3), der Grobboden besteht aus Grus (gGr) und kantigen Steinen (fX), in K2 wurden zusätzlich kantige Blöcke angetroffen. Die Bodenart des Feinbodens der LH variiert zwischen tonigem Lehm (Profil K1), stark lehmigem Sand (Profil K2) und lehmigem Schluff (Profil K3 und K4). Bezüglich der Lagerungsdichte (Ld1-2) und der Durchwurzelungsintensität (W4) weist die LH in den vier Profilen ähnliche Eigenschaften auf.

In der LH sind am Kupferberg Bv- und Bsv-Horizonte entwickelt.

Basislage

Die LB wurde nur in K2 aufgedeckt. Sie ist dort im Liegenden der LH als nahezu feinerdefreier Schutt aus kantigen Steinen (fX) und Blöcken (mX) ausgeprägt. Die Lagerungsdichte wurde als

hoch eingeschätzt (Ld4). Die Anwesenheit der LB begrenzt die physiologische Gründigkeit am Standort von K2, d.h. die LB wird nicht durchwurzelt (W0).

In der LB ist ein ilCv-Horizont entwickelt.

Oberlage

Die LO wurde im Mittelhangbereich in den Profilen K3 und K4 aufgenommen. Sie ist sehr stark steinig (5). Der Grobboden besteht in K3 aus kantigen Steinen (fX), während er in K4 aus Grus (gGR), kantigen Steinen (fX) und Blöcken (mX) besteht. Hierbei dominieren die kantigen Steine. Der Feinboden wird als toniger Lehm eingestuft. Die Durchwurzelungsintensität wird als mittel (W4) eingestuft, bei einer sehr geringen bis geringen Lagerungsdichte (Ld1-2).

Analog zu den Verhältnissen am Grünen Löwen geht auch hier die Anwesenheit der LO mit der mäßig-starken Podsolierungserscheinungen im Oberboden einher.

An der Basis der Umlagerungsbildung des Profils K1 wurde eine etwa 5 cm mächtige Steinlage aufgedeckt, die als überdeckte LO interpretiert werden könnte. Es konnte jedoch kein Feinmaterial gewonnen werden.

In der LO am Kupferberg sind Ah- und Ahe-Horizonte ausgebildet.

Umlagerungsbildungen u

Umlagerungsbildungen u wurden in den Profilen K1, K5, K7 und K8 angesprochen. K5 und K7 stellen echte Kolluvien uk dar, während in K1 das Sediment eines Windwurfhügels aufgedeckt wurde. Im Gelände wurde auch die Umlagerungsbildung u in K8 zunächst fälschlicherweise als Kolluvium angesprochen. Die Ansprache wurde als Folge der sehr hohen Gehalte an organischer Substanz in der u revidiert.

Die u in K1 hat einen mittleren Steingehalt (3), der sich aus kantigen Steinen (fX) und Blöcken (mX) zusammensetzt. An der Basis ist eine Steinlage aus kantigen Steinen und Blöcken (fX-mX) anzutreffen. Die Bodenart des Feinbodens wurde als schluffiger Lehm angesprochen. Die Umlagerungsbildung besitzt eine sehr geringe Lagerungsdichte (Ld1) und wird stark durchwurzelt (W4).

In Profil K5 hat ein junges Kolluvium uk eine Haldenschüttung überwandert. Das 30 cm mächtige uk hat einen mittleren Steingehalt (3), wobei der Grobboden aus Grus (gGr) und kantigen Steinen (fX) aufgebaut wird. Der Feinboden besteht aus stark lehmigem Sand. Die uk wird stark durchwurzelt (W4) und hat eine sehr geringe Lagerungsdichte (Ld1).

Das Kolluvium in K7 ähnelt dem Kolluvium aus K5, wobei es ungleich mächtiger ist. Die Eigenschaften werden dahingehend modifiziert, dass der Steingehalt um eine Stufe erhöht werden muss und im Grobboden auch kantige Blöcke vorhanden sind (mX).

Die letzte Umlagerungsbildung u wurde in K8 aufgenommen. Das Sediment ist stark steinig (5) und besitzt eine sehr geringe Lagerungsdichte (Ld1). Für den Steingehalt sind Grus (gGr) und kantige Steine (fX) verantwortlich. Im Gelände wurde mittels Fingerprobe die Bodenart stark lehmiger Sand angesprochen, was durch den hohen Humusgehalt möglicherweise eine Fehleinschätzung war. In dieser Umlagerungsbildung sind kleine, kaum angewitterte Malachitbröckchen mit dem Auge sichtbar, so dass geogenetisch wohl von einer sehr jungen Umlagerungsbildung auszugehen ist.

In den Umlagerungsbildungen sind Ah-, M- und Ovh-Horizonte entwickelt.

Haldensubstrate

Die Profile K5 und K6 zeigen Haldensubstrate oj, das im Fall von K5 durch ein junges Kolluvium überdeckt wurde. Das Haldenmaterial ist sehr stark steinig (5) und besteht in der Grobbodenfraktion aus kantigen Steinen (fX) und Blöcken (mX). Der Feinboden wird als stark lehmiger Sand angesprochen. Das Substrat oj weist eine geringe bis sehr geringe Lagerungsdichte auf (Ld1-2). Die Durchwurzelungsintensität ist im Falle des Substrats von K6 mit W0 (keine Wurzeln) zu klassifizieren, während sie im oj von K5 immerhin als sehr schwach (W1) eingestuft werden kann. Aussagen zur physiologischen Gründigkeit sind schwierig, da so gut wie keine Durchwurzelung stattfindet.

Im oj ist ein ilCv-Horizont entwickelt.

6.1.2.3.2 Bodenbildungen des Hangbereichs

Profil K1 zeigt einen Kolluvisol des unteren Oberhangbereichs. Gegen die Ansprache als Kolluvisol sprechen eigentlich sowohl die geringe Mächtigkeit (20 cm), als auch die Genese, denn es wurde ein Windwurfhügel aufgegraben. Mangels Alternativen wurde die Bezeichnung des Bodentyps beibehalten. Die Grenze zwischen M- und IIBv-Horizont ist scharf und somit ein Schichtungsmerkmal, ebenso wie der Wechsel der Bodenart.

Eine typische Braunerde aus LH über LB wurde im Profil K2 am oberen Mittelhang angesprochen. Die Solummächtigkeit von ca. 50 cm weist auf geringe Erosionsschäden hin. Der IIIilCv-Horizont der LB ließ keine Beprobung zu, da er aus Schutt ohne Feinboden besteht.

Die Profile K3 und K4 werden als mittel bis stark podsolige Braunerden des Mittelhangs angesprochen. Der Eluvialhorizont (Ahe) ist in der LO entwickelt. Der Verbraunungshorizont weist in beiden Profilen Merkmale einer Sesquioxid-Anreicherung (orangestichige Färbung) auf und wird deswegen als Bsv-Horizont bezeichnet. In K4 ist der humose Oberbodenhorizont zweigliedrig aufgebaut, wobei nur das liegende Teilglied Podsolierungserscheinungen (Ahe) aufweist. In den Bsv-Horizonten ist teilweise ein Kittgefüge anzutreffen, das wahrscheinlich durch die verlagerten Eisenverbindungen entstand.

Kolluvisole liegen in den Profilen K5 und K7 vor. Im Profil K5 am unteren Mittelhang bedeckt der mittel steinige M-Horizont den ausschließlich aus Steinen bestehenden IiiyICv-Horizont aus geschütteten Rhyolithbruchstücken (Substrat oj), auf denen stellenweise Malachitüberzüge makroskopisch feststellbar sind. Die Lagerungsdichte des Haldensubstrats wurde als gering eingestuft (Ld2). Das Profil wird zur Geländeoberfläche hin von einer etwa 5 cm mächtigen Steinlage aus scherbigem Rhyolithschutt (mX) abgeschlossen. Ein Ah-Horizont lässt sich nicht differenzieren, das Kolluvium besitzt demnach recht junges Alter. In K5 weisen M- und IiiICv-Horizont die gleiche Feinbodenart und eine ähnliche Bodenfarbe auf, unterscheiden sich aber im Grobskelett, Skelettanteil und der Durchwurzelungsintensität. Die Horizontgrenzen wurden als scharf notiert, insofern ist eine Schichtung wahrscheinlicher als eine pedogenetische Differenzierung. In K7 konnte der M-Horizont nicht durchteuft werden. Der Ah-Horizont war zwar vorhanden, entzog sich aber infolge der geringen Mächtigkeit der Beprobung. Der diesbezügliche Vergleich der Profile K7 und K5 legt den Schluss nahe, dass der Kolluvisol in K7 älter als der Kolluvisol in K5 ist.

Im Haldensubstrat oj des Profils K6 ist ein sehr stark steiniger (fX-mX-gX) Lockersyrosem mit der Horizontabfolge Ai/iylCv-Horizont entwickelt, auf dem vereinzelt *Silene vulgaris* wächst (Soziabilität 2, Artmächtigkeit 1, Deckungsgrad < 5%). Nur dort ist dann auch ein Ai-Horizont ausgebildet. Die Basis des ausgesprochen lockeren Haldenkörpers wurde durch die Aufgrabung nicht erreicht.

Das Profil K8 beschreibt einen Felshumusboden (Boden mit O/mC-Profil) über rhyolithischem Festgestein, der im Feld fälschlicherweise als Kolluvisol angesprochen wurde. Die Fehlinterpretation beruhte auf einer Unterschätzung der organischen Substanz. Bereits hingewiesen wurde auf die kleinen, nicht alterierten Malachitbröckchen im Ovh-Horizont des Profils, welche die Annahme einer jungen Umlagerungsbildung plausibel machen. Insofern wäre die Bezeichnung Kolluvisol für den Bodentyp aus genetischer Sicht richtiger.

6.1.2.3.3 Ökologische Eigenschaften der Bodenbildungen

Die Einschätzung der ökologischen Eigenschaften der Böden wird über laboranalytisch gewonnene Werte und abgeleitete Parameter vollzogen. Die Inhalte der beiden nachfolgenden Tabellen 18 und 19 sind die maßgebliche Grundlage für die Interpretation.

Tabelle 18: Laboranalytisch bestimmte Kenngrößen ausgewählter Bodenproben der Hangsequenz Kupferberg [nach RUSOW 2004: 153, verändert]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Bodenart (Korngrößenbestimmung)	pH-Wert (CaCl ₂)	Kurzzeichen AG BODEN (1994: 331)	C _{org} [%] ¹	Kurzzeichen AG BODEN (1994: 108)	Carbonatgehalt (Salzsäuretest / Best. n. Scheibler)
K1	uk	Ah	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
	LH	M	Lu	3,9	s5	16,7	h6	c0 / -
K2	LH	IIBv	Lt2	3,9	s5	15,1	h6	c0 / -
		Ah	n.b.	3,1	s5	n.b.	n.b.	n.b.
K3	LH	Bv	n.b.	3,5	s5	15,7	h6	c0 / -
		IIIcV	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
K4	LO	Ahe	n.b.	3,7	s5	n.b.	n.b.	c0 / -
		IIBsv	n.b.	3,7	s5	10,6	h5	c0 / -
K5	LH	Ah	n.b.	3,6	s5	n.b.	n.b.	c0 / -
		Ahe	Lt2	3,8	s5	25,8	h6	c0 / -
K6	oj	IIBsv	Lu	4	s5	12,5	h5	c0 / -
		M	S14	3,6	s5	15,6	h6	c0 / -
K7	uk	IIIcV	S14	4,1	s6	7,7	h4	c0 / -
		Ai	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
K8	u	iCv	S13	4,1	s4	11,4	h5	c0 / -
		Ah	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		M	S13	4,1	s4	4,4	h4	c0 / -
		Ovh	n.b.	3	s6	58,8	h7	c0 / -

Legende / Anmerkungen:

¹Gehalte an organischer Substanz wahrscheinlich zu hoch, vgl. Kapitel 9 Fehlerbetrachtung

Tabelle 19: Abgeleitete ökologische Eigenschaften ausgewählter Bodenbildungen der Hangsequenz Kupferberg [nach RUSOW 2004: 154, verändert]

Profilbezeichnung	Substrat	Horizont	Erodierbarkeit						physikalisch-chemische Filtereigenschaften			Einstufung KAKeff		Desorption von Schwermetallen
			mechanische	physikalisch-chemische	Einstufung	Gesamtfilterwirkung in	KAKeff	KAKeff	KAKeff	KAKeff				
K1	uk	M	4-5	2-3	3	3	2	4	3-4	4	5	4	4	4
	LH	IIBv	3-4	3-4	2	2	1	3	3-4	4	5	4-5	4	4
K4	LO	Ahe	3-4	3-4	2	2	1	3	3-4	4	5	4-5	4	4
	LH	IIBsv	4-5	2-3	3	3	2	4	3-4	4	5	4	4	4
K5	uk	M	3-4	2	3-4	4	1	3	4	4	4	4	4	4
	oj	IIIcV	3-4	2	3-4	4	1	3	4	4	4	4	4	4
K6	oj	iCv	2-3	1-2	4	4	1-2	3	4	3	4	5	4	4
K7	uk	M	2-3	1-2	4	4	1-2	3	4	2	4	5	4	4

Die Korngrößenverteilung der untersuchten Bodenproben ausgewählter Horizonte zeigt, dass insgesamt vier Bodenartenuntergruppen auftreten:

- mittel-lehmiger Sand (S13),
- stark lehmiger Sand (S14),
- schwach toniger Lehm (Lt2),
- schluffiger Lehm (Lu).

Die Bodenartenuntergruppen Lu und Lt2 wurden in den Bodenproben der Profile K1 und K4 und damit am Ober- und Mittelhang angetroffen. Die sandigen Bodenarten S13 und S14 sind auf die Standorte am Unterhang beschränkt. Die Bodenproben des Oberhangs weisen höhere Tongehalte auf im Vergleich zu den Bodenproben des Unterhangs, die ihrerseits höhere Sandanteile aufweisen. Dieser Befund erklärt sich durch die bergbaulichen Störungen des Unterhangs, die zur selektiven Verarmung an Schluff- und Tonkorngrößen durch Ausspülungsprozesse führten.

Die Böden des gesamten Hangbereichs sind als aufgrund der gemessenen pH-Werte als sehr stark sauer (s5) einzustufen. Die Gründe für diesen Reaktionszustand wurden schon bei der Diskussion der Eigenschaften der Böden der Hangsequenz Grüner Löwe in Abschnitt 6.1.1 genannt (bodeninterne natürliche Versauerungsprozessen, basenarmes Ausgangsgestein, anthropogener Eintrag von Säurebildnern, Pyritoxidation der sulfidischen Mineralassoziationen). Die Bodenproben können aufgrund der starken Versauerung dem Aluminium-Pufferbereich zugeordnet werden. Dieser pH-Wert-Bereich bedingt zahlreiche ungünstige ökologische Eigenschaften (geringe biotische Aktivität, geringe Mineralisationsrate, geringe Vorräte austauschbarer basischer Kationen, Wurzelschäden infolge Al-Toxizität, hohe Verfügbarkeit von Schwermetallen).

Sämtliche Bodenproben sind kalkfrei.

Sämtliche untersuchten Bodenproben müssen als stark humos bis äußerst humos beurteilt werden. Von oben nach unten nimmt die Menge der organischer Substanz im Profil ab. Für die Erklärung der in solcher Höhe nicht erwarteten Gehalte an organischer Substanz wird auf das Kapitel 6.1.1.3.3. verwiesen, denn dort werden die ähnlich auffälligen Befunde diskutiert.

Die nutzbare Feldkapazität wird bei den Bodenproben der Profile K1, K4 und K5 als mittel bis hoch, bei den Bodenproben der Profile K6 und K7 als gering bis mittel eingestuft. Die Luftkapazität der Bodenhorizonte wird bei den Bodenproben der Profile K1 und K4 als gering bis mittel, bzw. mittel bis hoch geschätzt. In den Profilen K5, K6 und K7 wird die Luftkapazität als hoch bis sehr hoch klassifiziert. Bei den Bodenproben der Profile K1 und K4 wird die

Wasserdurchlässigkeit als gering bis mittel bewertet, während die Bodenproben von K5 als mittel-hoch und die Bodenproben von K6 und K7 als hoch wasserdurchlässig beurteilt werden.

Es ergibt sich eine markante Zweiteilung des Hangbereichs. Der nicht durch den Bergbau überformte Bereich, für den stellvertretend die Profile K1 und K4 stehen sollen, speichert im Vergleich mit dem bergbaulich überprägten Unterhangbereich (K5, K6, K7) eine größere verfügbare Wassermenge im Wurzelraum, weist eine etwas schlechtere Luftversorgung der Pflanzen und des Edaphons auf und verzögert den Wasserfluss in der Bodenmatrix stärker.

Für die Standorte K1 und K4 wurde eine geringe bis mittlere Infiltrationskapazität bei sehr schwacher bis schwacher Verschlammungsneigung abgeleitet. Für die Profile K5, K6, K7 wurde eine hohe Infiltrationskapazität bei geringer bis sehr geringer Verschlammungsneigung bestimmt. Die Beurteilung der Erodierbarkeit erbrachte den Befund, dass die allermeisten Bodenproben mittel erodierbar sind. Nur im M-Horizont von K1 wurde eine hohe Erodierbarkeit abgeleitet.

Insgesamt weisen die Einstufungen von Infiltrationskapazität, Wasserdurchlässigkeit und Erodierbarkeit darauf hin, dass an Ober- und Mittelhang Oberflächenabfluss entstehen kann, während das Hangwasser am Unterhang subkutan abfließt. Daraus lässt sich ableiten, dass Stofftransport am Unterhang vorrangig in Lösung erfolgen sollte, an Ober- und Unterhang hingegen partikulär. Diese Deutung integriert allerdings nicht die Materialmobilisierung durch anthropogenen Vertritt, die am Unterhang nach eigenen Beobachtungen eine große Rolle spielt.

Die mechanischen Filtereigenschaften der Böden werden als mittel bis gut (K1, K4) oder gut (K5, K6, K7) beurteilt. Die physikalisch-chemischen Filtereigenschaften der Bodenproben der Profile K1, K4 und K5 sind gut, werden bei den Standorten K6 und K7 allerdings nur noch mit mittel (K6) bzw. schwach (K7) beurteilt. Die Einstufung der effektiven Kationenaustauschkapazität zeigt, dass alle untersuchten Bodenproben eine hohe bis sehr hohe KAK_{eff} aufweisen. Diese Einstufung beruht hier wesentlich auf den sehr hohen Gehalten an organischer Substanz, was problematisch ist, denn die Gehalte an organischer Substanz wurden vermutlich durchgängig zu hoch bestimmt (vgl. Kapitel 9). Die Gesamtfilterwirkung in Abhängigkeit von KAK und der Luftkapazität wird als hoch bis sehr hoch klassifiziert. Dennoch müssen die Böden aufgrund der stark sauren Bodenreaktion als hochempfindlich gegenüber der Desorption von Schwermetallen eingestuft werden.

Die positiv zu beurteilenden Filtereigenschaften der Bodenbildungen im Hangbereich - die Gesamtfilterwirkung wird bei allen Proben als hoch bis sehr hoch eingeschätzt - lassen auf den ersten Blick die Vermutung einer Immobilisierung von Schadstoffen im Hangbereich zu. Überlagert werden die grundsätzlich positiven Filtereigenschaften durch die sehr niedrigen pH-

Werte der Bodenproben. Die stark bis sehr stark saure Bodenreaktion der Standort macht die Böden hochempfindlich in Bezug auf eine Mobilisierung adsorbierter Schwermetalle. Darin zeigt sich der überragende Einfluss des pH-Werts als Mastervariable des geochemischen Milieus, der alle anderen Eigenschaften übersteuern kann.

6.1.2.3.4 Das Schwermetallreservoir im Hangbereich

Analysiert wurden zunächst die Kupfer-, Blei- und Zinkgehalte im Königswasserauszug (S7). Die Ergebnisse werden in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Schwermetallgehalte der S7-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Kupferberg [nach RUSSOW 2004: 155, verändert]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Cu [ppm]	Pb [ppm]	Zn [ppm]
K1	u	M	24,4	65,8	152,5
	LH	IIBv	23,7	53,5	111,2
K4	LO	Ahe	40,1	158,8	147,4
	LH	IIBsv	32,7	193,1	234,8
K5	uk	M	1482	2652	143,7
	oj	IilCv	2271	3980	158
K6	oj	ilCv	4750	6981	132,7
K7	uk	M	1021	2731	135,3
K8	u	Ovh	3282	2157	135,4

Die relativ höchsten Kupfer- und Bleigehalte werden im Haldensubstrat des Profils K6 angetroffen. Die Backgroundwerte für Kupfer (6-40 ppm) und Blei (15-100 ppm) werden aber auch in den Bodenproben der Profile K5, K7 und K8 um ein Vielfaches überschritten. Die Bodenproben der Profile K1 und K4 weisen keine besonders auffälligen Cu- oder Pb-Gehalte auf.

Die Zinkgehalte verhalten sich indifferent. Der Backgroundwert (15-100 ppm) wird in allen Bodenproben überstiegen. Der höchste Zn- Gehalt wird mit 234,8 ppm im Bsv-Horizont des Profils K4 angetroffen. Dieser Wert bedeutet gegenüber dem Background lediglich eine Anreicherung um etwa das 2,5-Fache, was im Vergleich zu den Anreicherungs-faktoren von Cu und Pb in den Bodenproben der Profile K5 und K6 kaum nennenswert ist. Bereits am Beispiel der Hangsequenz Grüner Löwe wurden Zweifel bezüglich der Eignung des Zinks als *pathfinder*-Element deutlich, die sich hier bestätigen. Aufgrund des weitgehend indifferenten und unkritischen Verhaltens der Zinkgehalte erscheint eine tiefer- und weitergehende Analyse nicht weiter notwendig.

Die Cu- und Pb-Gehalte der Profile K1 und K4 deuten auf eine relative Lage oberhalb des Dispersionsbereichs hin, während die Profile K5, K6, K7 und K8 im bergbaulich überprägten Bereich entnommen wurden. In Profil K5 können die Cu- und Pb-Gehalte zum Nachweis der Schichtung herangezogen werden.

Gefährdungspotenziale der Schwermetallgehalte in den Böden der Hangsequenz Kupferberg

Auf Grundlage der Tabelle 20 lässt sich ein Verdacht auf eine schädliche Bodenveränderung beim M-Horizont in K5, dem IIilCv-Horizont in K5, dem ilCv-Horizont in K6, dem M-Horizont in K7 und dem Ovh-Horizont in K8 ableiten. Das zu betrachtende relevante Schutzgut ist das Grundwasser, als Wirkungspfad ist der Pfad Boden-Grundwasser anzusprechen.

➤ Schadstoffgesamtgehalte

Bei den aufgelisteten Proben wurden im Königswasserextrakt Cu- und Pb-Gehalte festgestellt, welche die Beurteilungswerte dieser Schwermetalle nach Tabelle 8 aus Abschnitt 3 um eine Mehrfaches überschreiten.

➤ Freisetzungverhalten

Bei den genannten Bodenproben wurde eine S4-Elution durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Schwermetallgehalte der S4-Eluate ausgesuchter Bodenproben der Hangsequenz Kupferberg [nach RUSSOW 2004: 155, verändert]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Cu [ppm]	Pb [ppm]	Zn [ppm]
K5	uk	M	7,1	0,7	0,4
	oj	IIilC(v)	3,3	0,4	0,2
K6	oj	ilC(v)	35,9	1,7	2,2
K7	uk	M	2,8	0,3	0,2
K8	uk	Ovh	40,3	4,9	4,9

In der nachfolgenden Tabelle 22 wird der durch den S4-Versuch eluierbare Anteil (aus Tabelle 21) zum Gesamtgehalt nach Tabelle 20 ins Verhältnis gesetzt.

Tabelle 22: Verhältnis eluierbarer Anteil zum Gesamtgehalt relevanter Bodenproben des Kupferbergs [eigene Berechnungen]

Profil-bez.	Substrat	Horizont	Cu: Verhältnis eluierbarer Anteil zu Gesamtgehalt [%]	Pb: Verhältnis eluierbarer Anteil zu Gesamtgehalt [%]
K5	uk	M	4,8	0,3
	oj	IIilC(v)	1,5	0,1
K6	oj	ilC(v)	7,6	0,2
K7	uk	M	2,7	0,1
K8	uk	Ovh	12,2	2,3

Der Blick auf diese Tabelle zeigt, dass weder Kupfer noch Blei unter den Bedingungen des S4-Versuchs stark mobilisierbar sind. Als Ausnahme für diese Aussage kann die Bodenprobe des Profils K8 angesehen werden, denn hier werden mehr als 10% des Kupfergesamtgehalts eluiert.

Deutlich wird auch die unter den gegebenen Bedingungen wesentlich geringere Mobilisierbarkeit des Bleis gegenüber dem Kupfer.

Obwohl Pb und Cu nur schwach mobilisierbar sind, werden die Prüfwerte der BBodSchV (vgl. Abschnitt 3, Tabelle 9) um ein Vielfaches überschritten. Im iCv-Horizont des Lockersyrosems in K6 und im Ovh-Horizont des Felshumusbodens in K8 wurden sogar Prüfwertüberschreitungen für Zn festgestellt – obwohl das Zink keine auffälligen Gesamtgehalte in diesen Bodenproben aufwies.

➤ Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone

Eine Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzone wird als gering beurteilt. Als Gründe hierfür sind die geringe Mächtigkeit der durchlässigen Lockersedimentdecke (< 2 m) und das oberflächennah anstehende klüftige Festgestein zu nennen.

➤ Abschätzung der Grundwassergefährdung

Eine Gesamtabeschätzung der Grundwassergefährdung wird auf der Grundlage der Tabelle 11 aus Abschnitt 3 vorgenommen.

Aufgrund der hohen Schwermetallgehalte bei geringer Schutzfunktion der ungesättigten Bodenzonen ist trotz der geringen Mobilisierbarkeit der Schwermetalle eine Grundwassergefährdung wahrscheinlich.

6.1.2.3.5 Aspekte der Genese des Oberflächennahen Untergrunds im Hangbereich unter Berücksichtigung der Schwermetallgehalte

An Ober- und Mittelhang (Profile K1 bis K4) wurden unter Bezugnahme auf die Genese keine „echten“ Kolluvien angetroffen. Eine von mir als typisch betrachtete Abfolge von LH über LB wurde nur im Falle des Profils K2 aufgenommen. Es bestehen aber kaum Zweifel daran, dass die LB im Liegenden der LH in den Profilen K1, K3 und K4 ebenfalls hätte angetroffen werden können. Die idealtypische Deckschichtenabfolge könnte im Fall der Hangsequenz Kupferberg noch um das Schichtglied LO im Hangenden der LH erweitert werden, denn die LO wurde in den Profilen K3 und K4 angetroffen und auch die Steinlage an der Schichtgrenze von der Umlagerungsbildung zur LH im Profil K1 könnte als begrabene LO interpretiert werden.

Die LB wurde nur in einem einzigen Profil aufgedeckt (K1). Die Mächtigkeit der LH in diesem Profil (ca. 50 cm) und der Befund, dass in den Profilen K1, K3 und K4 die untere Begrenzung der LH nicht aufgedeckt werden konnte, weisen darauf hin, dass die LH kaum erodiert wurde. Das Fehlen der Erosionsschäden deutet auf weitgehende morphodynamische Stabilität des Ober- und

Mittelhangbereichs im Holozän trotz Einflussnahme des Menschen (in Form von Waldumbau, Holzentnahmen, etc.) hin.

Das Profil K1 kann mit dem theoretisch abgeleiteten Profil 5 aus Abbildung 3 parallelisiert werden, während das Profil K2 dem Profil 3 der genannten Abbildung entspricht. K3 und K4 weisen eine LO auf, die bei der Ableitung der theoretischen Profile des Abschnitts 2 nicht berücksichtigt wurde. K3 und K4 können deshalb als Modifikation des theoretischen Profils 3 der Abbildung 3 bezeichnet werden, wobei als Modifikation die LO im Hangenden der LH auftritt.

Die aufgenommenen Profile des Unterhangs besitzen infolge der bergbaulichen Überprägung in diesem Hangbereich keinerlei Bezüge zur ursprünglichen Deckschichtenausbildung.

Die hohen Schwermetallgehalte der Bodenproben der Profile K5 bis K8 weisen auf die enge Beziehung zum Dispersionsbereich hin. Da keine Aussagen über die ursprünglich vorhandenen Deckschichten und deren Eigenschaften getroffen werden kann, ist nicht feststellbar, ob die Proben im oder unterhalb des originären Dispersionsbereichs entnommen wurden.

Das Profil K6 kann parallelisiert werden mit einer Reihe von Profilen (12-18, Abbildungen 6, 7 und 8) aus Abschnitt 2. Eine exakte Eingrenzung kann nicht vorgenommen werden, da keine Kenntnisse über das Liegende unterhalb der Haldenschüttung vorliegen.

Ähnlich verhält es sich mit dem Profil K7. Das Profil könnte den theoretisch abgeleiteten Profilen 19 oder 20 (Abbildung 8) aus Kapitel 2 entsprechen. Im Realprofil K7 konnte allerdings kein sicheres Schichtungsmerkmal festgestellt werden. Zudem können keine Aussagen über die lithologischen Verhältnisse unterhalb der kolluvialen Umlagerungsbildungen getroffen werden, da so tief nicht aufgegraben werden konnte.

Für die Profile K5 und K8 lässt sich kein vergleichbares Profil aus Abschnitt 2 benennen. Das liegt daran, dass beim Verfassen von Kapitel 2 aus Platzgründen nicht alle kombinatorisch denkbaren Profile aufgezeigt werden konnten, sondern bewusst eine Beschränkung auf die m.E. wahrscheinlichsten Profilabfolgen erfolgte. Beide Profile spiegeln eine postmontane Überprägung wieder. In K5 wurde ein Haldenkörper durch ein kolluviale Umlagerungsbildung überwandert, die Umlagerungsbildung in K8 könnte eine Folge starken Vertritts in diesem Bereich sein. K5 ist deshalb als postmontane Weiterentwicklung der Profile 12-18 aus den Abbildungen 6, 7 und 8 zu verstehen. Die genetische Erklärung von K8 ist komplizierter. Anzunehmen ist eine bergbauliche oder postmontane Ausräumung der Hangbildungen unter Freilegung des festen Untergrunds. Die

zeitlich nachgeordnete Umlagerungsbildung kam nach dem oben Gesagten erst rezent oder kürzlich zur Ablagerung.

Gesamtbetrachtung des Hangbereichs

Eine gänzlich ungestörte, nicht erodierte Abfolge von (LO/LH/LB), die dem postglazialen Ausgangszustand entspricht, wurde im gesamten Hangbereich nicht angetroffen. Geringfügig verkürzte Profile an Ober- und Mittelhang zeugen von schwacher Bodenerosion.

Der ursprüngliche Oberflächennahe Untergrund am Unterhang wurde komplett überformt. Stellenweise lässt sich eine komplette Ausräumung nachweisen (Profil K8), teilweise substituieren oder bedecken Haldenschüttungen die Deckschichten (K6, K5).

Die Umlagerungsbildungen des Unterhangs stehen entweder in direktem Zusammenhang mit der bergbaulichen Nutzungsphase (Profil K7), oder kamen erst postmontan zur Ablagerung (K5, K8).

Ein postmontan entstandenes Hangsediment am Oberhang ließ sich genetisch von einem Windwurfereignis ableiten (K1).

Der gesamte Hangbereich wird gegenwärtig forstlich genutzt. Die damit einhergehende morphodynamische Stabilität bedingt prinzipiell eine progressive pedogenetische Entwicklung der Standorte. Diese Entwicklung wird durch Windwurfereignisse punktuell gestört. Am Unterhang könnte der anthropogene Vertritt bei Verstetigung eine morphodynamische Aktivierung des Hangbereichs bei regressiver pedogenetischer Entwicklung der Standorte bewirken.