

## **Bodenphysikalische Prozesse und Ursachen der subterranean Erosion in Löß und Schwemmlöß im östlichen Harzvorland**

Ulrike HARDENBICKER und Christian HECHT

6 Abbildungen und 4 Tabellen

### **ABSTRACT**

HARDENBICKER, U.; HECHT, C.: The influence of physical properties on subsurface erosion processes in loess sediments of the eastern Harz foreland. - *Hercynia N.F.* 33 (2000): 31–41.

In its dry state the structure of Loess has some strength and can withstand moderate loads. Loess is highly erodible and unstable when wet and upon saturation collapsing of internal structure occurs.

Subsurface erosion in the study is due to physical properties of loess and the underlying reworked loess. For pipe creation and enlargement, the loess is cohesive enough to maintain the walls of the pipes but is capable of dispersion into separated grains. So surface waters enter the loess and infiltrate by way of cracks and macropores so that the inflow can entrain and remove grains. The underlying reworked loess is less stable and affected by entrainment of fine particles. Water can seep and produce sufficient drag force to entrain material at the outlet.

*Keywords:* physico properties, subsurface erosion, loess

### **1 EINLEITUNG**

Löß besitzt aufgrund seiner bodenphysikalischen Eigenschaften eine besondere Disposition für subterranean Erosion. Die daraus resultierenden Formen wurden in vielen Lößgebieten der Erde beschrieben und untersucht (BARISS et BRONGER 1981, JONES 1981, PECIS et RICHTER 1996). Auch im Mitteldeutschen Lößgebiet wurden diese schon früh von verschiedenen Autoren beschrieben (BACHMANN et al. 1963, SCHEIDIG 1934). Detaillierte Untersuchungen zu natürlichen Prozessen und Ursachen der subterranean Erosion fehlen aber weitgehend.

Ziel dieses Beitrags ist es, die typischen Formen der subterranean Erosion und deren Entwicklung für ein Lößgebiet im östlichen Harzvorland genauer darzustellen. Anhand geomorphologischer Detailkartierungen sowie der Ermittlung bodenphysikalischer Parameter des Lößes und des unterlagernden Schwemmlösses soll gezeigt werden, daß in beiden Substraten verschiedene Prozesse die subterranean Erosion steuern.

### **2 TERMINOLOGIE UND PROZESSE DER SUBTERRANEN EROSION IM LÖß**

Bei der Benennung der verschiedenen Formen und Prozesse, die an der subterranean Erosion im Löß beteiligt sind, bestehen gegenwärtig Unterschiede oder Unklarheiten, auf die im folgenden hingewiesen werden soll.

#### *Subterranean Erosion:*

Bei der subterranean Erosion handelt es sich um eine Kombination von mechanischer und chemischer Suffosion, Abbau der Mikrostruktur und Zerfall von Aggregaten durch Durchfeuchtung und Auflastdruck. Dabei wird durch das Kollabieren eine Volumenverminderung hervorgerufen und die Porosität nimmt ab. Die Partikel liegen als Einzelkorn vor und können transportiert werden.

#### *Pseudokarst oder Lößkarst:*

Pseudokarstformen oder die Formen des Lößkarstes entstehen durch Wegführen von Feststoffen eines klastischen Substrats oder Gesteins in Suspension. Diese Lößkarstformen können sich beispielsweise sehr schnell infolge eines extremen Starkregens entwickeln. Sie unterscheiden sich damit genetisch grundsätzlich vom Karbonatkarst, wo langanhaltende Lösungsvorgänge stattfinden (PARKER et HIGGINS 1990).

#### *Subrosion:*

Subrosion bezeichnet die unterirdische Ablaugung von leichtlöslichen Gesteinen, insbesondere Salzen, durch Grundwässer. Der Begriff Lößsubrosion wurde von KARRENBERG et QUITZOW (1956) für die unterirdische Erosion von Löß eingeführt und gehört somit nicht zum Karstformenschatz.

#### *Suffosion:*

Bei der Suffosion wird zwischen mechanischer Suffosion und chemischer Suffosion unterschieden (REUTER et al. 1980). Unter mechanischer Suffosion versteht man den Abtransport von Feinmaterial aus einem Kornverband ohne Zerstörung der Struktur. Durch die chemische Suffosion wird das Bindemittel des Gesteins gelöst.

Bei den Prozessen der subterranean Erosion im Löß wirken vermutlich auch Lösungsvorgänge im Rahmen des Prozesses der chemischen Suffosion mit.

#### *Innere Erosion:*

Durch die innere Erosion werden alle Bestandteile eines Substrates weggeführt, was zur Zerstörung der Struktur und zur Bildung von Hohlräumen führt. So können die Einzelkörner beispielsweise nach der Lösung des Bindemittels durch die chemische Suffosion durch innere Erosion weggeführt werden.

### **3 DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET**

Das Untersuchungsgebiet liegt ca. 20 km westlich von Halle nördlich der Ortschaft Langenbogen in einer Höhe von 110-135 m ü. NN im Niveau der Salzke-Hauptterrasse. Es umfaßt ein Rinnensystem, bestehend aus Hohlwegen und Erosionsschluchten, die sich in dem muldenartig ausgeprägten Hang entwickelt haben. Die Erosionsschluchten haben z. T. einen „badland“-artigen Charakter und sind im wesentlichen durch subterranean Feststoffeintrag entstanden.

Das Rinnensystem hat sich in einer präpleistozän angelegten Muldenstruktur gebildet, die mit bis zu 15 m mächtigen pleistozänen Sedimenten gefüllt ist, in die im südwestlichen Bereich Paläoböden eingeschaltet sind (HARDENBICKER 1998).

Die obersten Schichten bildet weichselzeitlicher Löß, auf dem erodierte Schwarzerden ausgebildet sind. Der Löß wird von weichselzeitlichem Schwemmlöß unterlagert. Löß und Schwemmlöß weisen zusammen Mächtigkeiten von 6 bis 10 m auf, wobei der Löß maximale Mächtigkeiten von 3 m erreicht. Der Schwemmlöß lagert im oberen Bereich des Hanges direkt auf dem tonig verwitterten Buntsandstein. Im unteren westlichen Hangbereich lagern unter dem Schwemmlöß Paläoböden und Fließerden.

#### *Formenentwicklung durch subterranean Erosion:*

In der topographischen Kartenaufnahme von 1852 sind neben dem von Norden nach Süden verlaufenden Haupthohlweg fünf Wege abgebildet, die nahezu parallel zueinander liegen und jeweils vom Haupthohlweg in nordwestlicher Richtung ca. 150-200 m hangaufwärts in das muldenartige Tal ziehen. Die Seitenwege sind schmal und kaum eingetieft. Bei den neueren Kartenaufnahmen sind die Hohlwege jedoch z. T. deutlich mit sehr unregelmäßigen Verbreiterungen und Vertiefungen wiedergegeben. Auch wenn genauere Aussagen zu Formen und den dazugehörigen Prozessen der subterranean Erosion an-

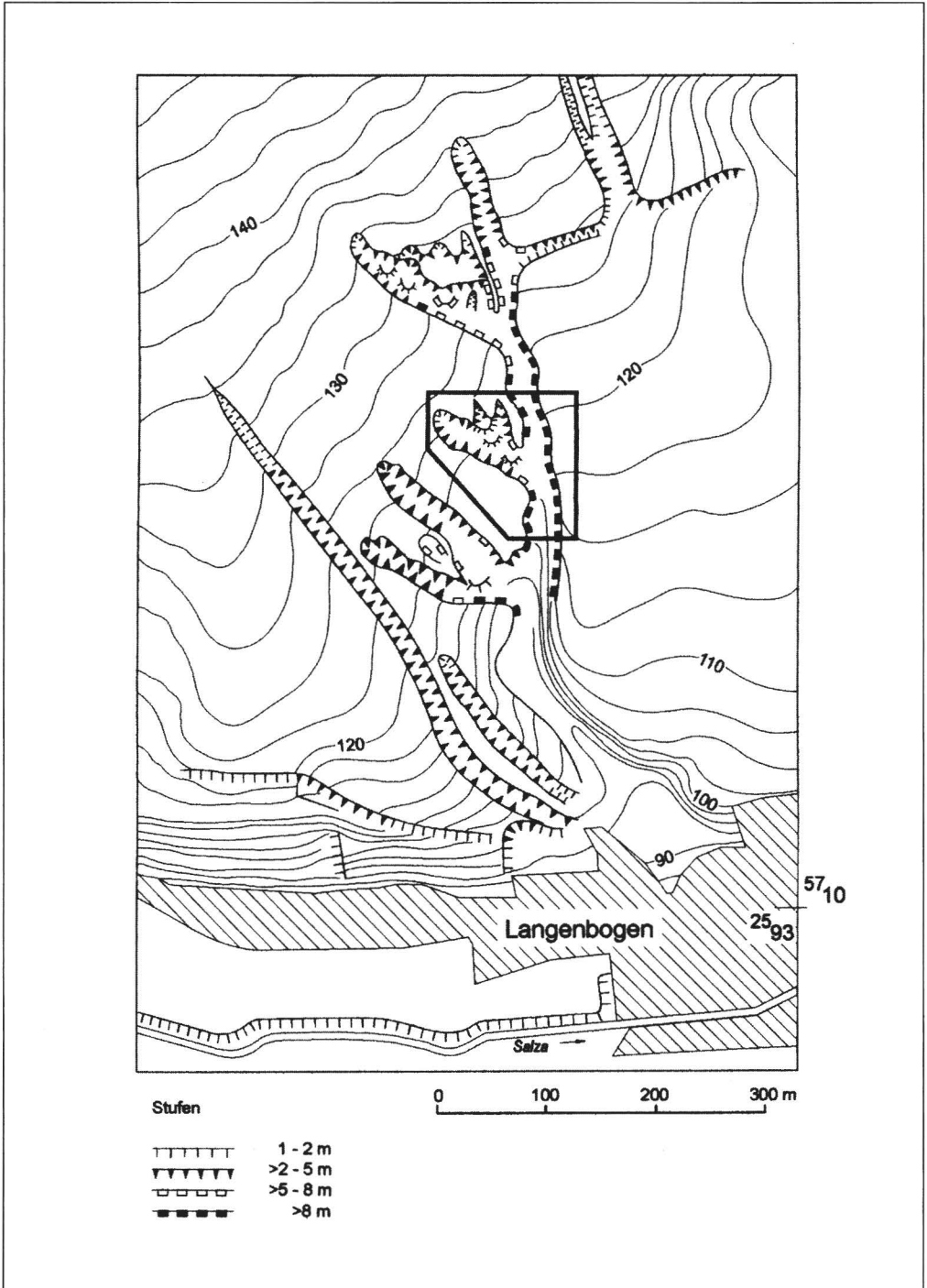


Abb. 1 Das Untersuchungsgebiet

hand der topographischen Kartenaufnahmen (1: 10 000) wegen des zu kleinen Maßstabs nicht möglich sind, belegen sie, daß vor allem die seitlichen Hohlwege in den letzten 150 Jahren einer großen morphologischen Veränderung unterlagen. Anhand von Luftbildern aus den Jahren 1961 bis 1994 konnte die Formengese im Untersuchungsgebiet detailliert verfolgt werden.

Die Initialphase der subterranean Erosion bildet in der Regel eine Serie von Einsturzlöchern von 1-2 m Durchmesser. Im Bereich dieser kleineren Einsturzlöcher entwickeln sich nachfolgend große Einsturzlöcher durch Absackungen über größeren Hohlräumen. Sie besitzen 2 - 5 m senkrechte Wände. Die senkrechten Wände im Löß bleiben trotz Abbrechen von Platten und Blöcken entlang von Trennfugen über mehrere Jahrzehnte erhalten. Andere Wände sind im obersten Teil durch eine senkrechte Ausprägung im Löß charakterisiert, die dann aber durch abgerutschte oder verstürzte Schwemmlößschollen im unteren Teil verflachen. Oberhalb des Einsturzes deuten Gullies, entstanden durch das Einstürzen von Tunneldecken und flachen Einbrüchen bis 2 m Tiefe, aktuelle subterranean linienhafte Erosion im Löß an. Die großen Einsturzformen, die mehrere Meter hohe senkrechte Wände aufweisen, besitzen zumeist keinen ebenen Talboden. Diese Hohlformen sind geprägt von Einsturzmassen mit schmalen tiefen Sinklöchern.

Die geomorphologische Detailkartierung eines Seitenhohlwegs gibt Abb. 2 wieder. Dieser besitzt im oberen Teil einen ebenen Talboden. Etwa 20 m vor der Einmündung in den Haupthohlweg leitet er mit einer Hangneigung von 12 - 15° und mit einer Stufe auf das Niveau des Haupthohlweges über. Vor allem die hangaufwärts liegenden Bereiche an der nach Süden exponierten Hohlwegflanke unterliegen Veränderungen durch subterranean Erosion. Die nördlichöstlich exponierte hangabwärts gelegene Flanke des Seitenhohlwegs ist relativ stabil. Sie weist zwar vier Tunneleinbrüche und Absackungen auf, Luftbilddauswertungen ergaben aber, daß diese Formen vor über 3 Jahrzehnten entstanden sind und sich seither kaum verändert haben.

#### 4 LABORUNTERSUCHUNGEN

Um Aussagen zu den subterranean Erosionsprozessen in Löß und Schwemmlöß zu erhalten, wurden verschiedene bodenphysikalische Parameter ermittelt.

Die Summenkurven der Korngrößenverteilung (Abb. 3) der beiden Lockergesteine unterscheiden sich nur in dem höheren Feinstkornanteil (Ton) des Lößes gegenüber dem Schwemmlöß.

Die Kf-Werte (Tab. 1) geben nicht nur die hydraulische Leitfähigkeit der Substrate an, sie sind wegen ihrer starken Strukturabhängigkeit auch ein Kennwert für den Strukturzustand von Böden und Substraten. Die Richtungsabhängigkeit verschiedener Strukturelemente (z. B. Trennfugen) hat Einfluß auf die Wasserdurchlässigkeit und kann eine Anisotropie bedingen. So liegen Wasserleitfähigkeitswerte bei horizontaler Beprobung im Löß mit 38 cm/d deutlich unter der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit mit 82 cm/d. Beim Schwemmlöß sind die Unterschiede zwischen horizontaler mit 48 cm/d und vertikaler mit 57 cm/d Wasserleitfähigkeit weniger ausgeprägt.

Die Aggregatstabilität oder Wasserstabilität (Tab. 1) wurde anhand einer Naßsiebungsmethode (HARTGE et HORN 1992) ermittelt. Sie gibt die Widerstandsfähigkeit eines Bodens oder Substrates gegen die Erosion durch Wasser an. Der durch Naßsiebung hervorgerufene Aggregatzerfall wird als Veränderung des gewogenen mittleren Durchschnitts der Aggregate ( GMD) in mm ausgedrückt. Je höher der GMD eines Substrates desto geringer ist die Aggregatstabilität, Substrate mit GMD größer 4,5 werden als instabil eingestuft.

##### *Scherfestigkeit und Zusammendrückbarkeit von Löß und Schwemmlöß:*

Zur Abschätzung des geomechanischen Verhaltens von Löß und Schwemmlöß wurden Kompressionsversuche zur Ermittlung des Setzungsverhaltens und der Steifemodule durchgeführt (Tab. 2 und 3). Es wurden ungestörte zylindrische Proben von 7 cm Durchmesser und 2 cm Probenhöhe benutzt. Die

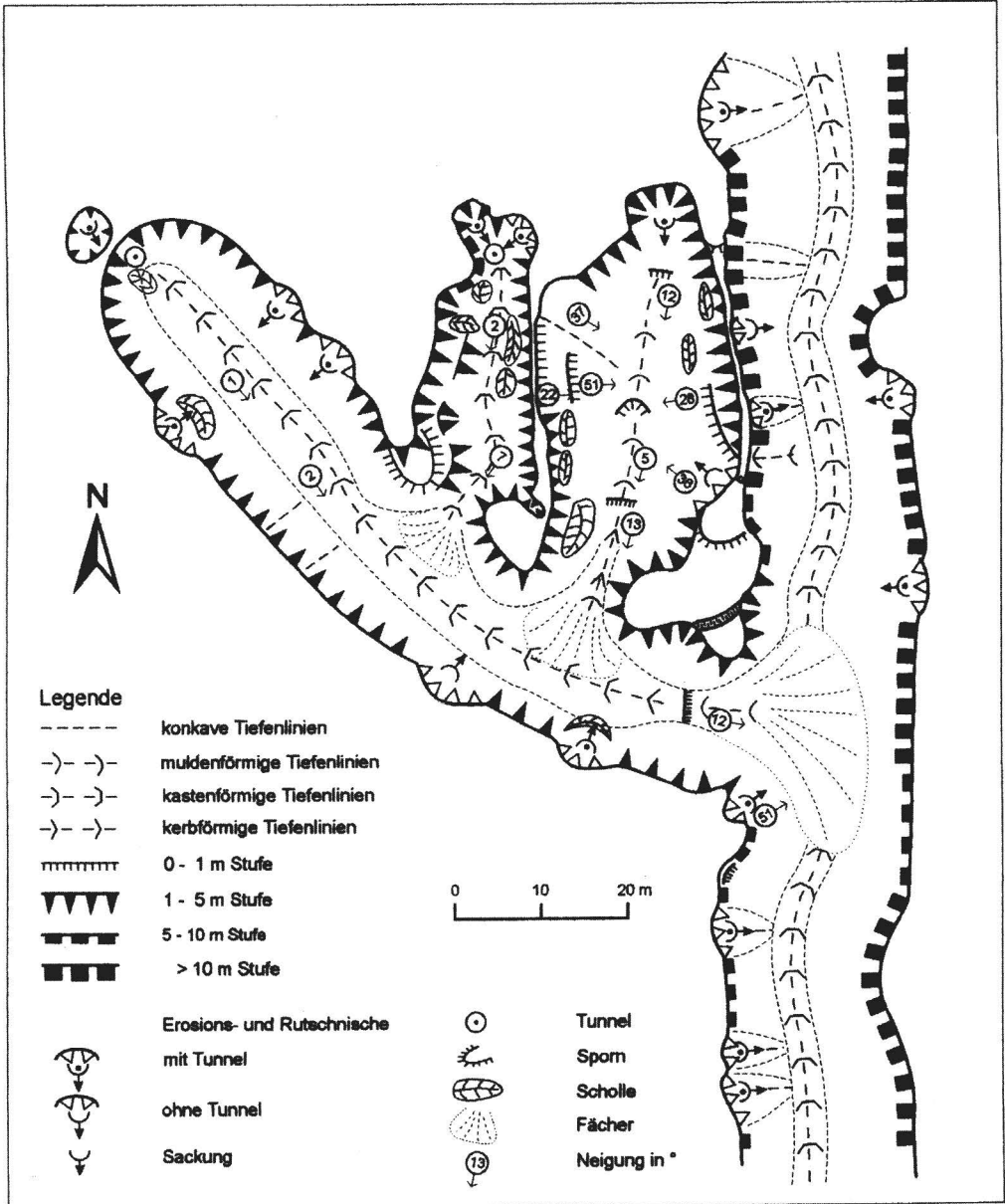


Abb. 2 Geomorphologische Detailkartierung (Lage des Kartiergebietes s. Abb. 1)

Versuche wurden am erdfeuchten Material unter dränierten Bedingungen durchgeführt. Die gewählten Normalspannungen für die Scherversuche waren 25, 50, 100 und 200 kN/m<sup>2</sup>.

Die Ergebnisse der Scherversuche dokumentieren für die beiden Lockergesteine ähnliche Scherparameter (Tab. 4). Bei den Reibungswinkeln sind die Unterschiede der Ergebnisse nicht signifikant. Aufgrund seines höheren Feinstkornanteils besitzt der Löß im Vergleich zum Schwemmlöß eine höhere

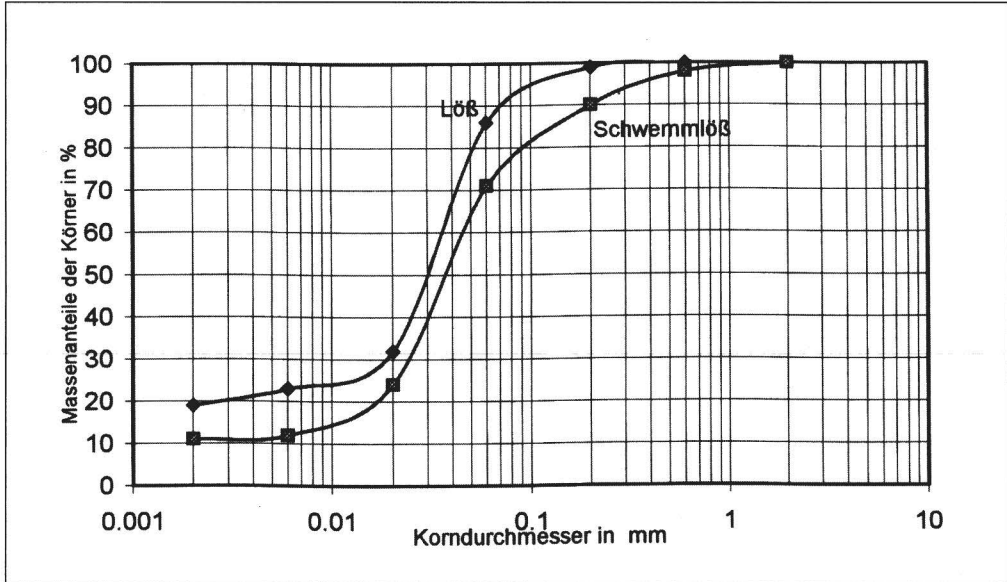


Abb. 3 Korngrößenverteilung von Löß und Schwemmlöß

Tab. 1 Gesättigte horizontale und vertikale Leitfähigkeiten und Aggregatstabilität von Löß und Schwemmlöß

	gesättigte Leitfähigkeit(cm/d)		Aggregatstabilität	Trockenrohdichte
	h	v	GMD	(gr/cm <sup>3</sup> )
<b>Löß</b>	38.2	82.7	4.36	1.55
<b>Schwemmlöß</b>	30.5	57.3	4.64	1.64

Tab. 2 Kompressionsversuch Steifemodul (MN/m<sup>2</sup>)

Laststufen	Löß	Schwemmlöß
25	0.64	1.16
50	0.84	2.33
75	1.41	3.45
100	2.08	4.00
150	2.51	4.43
200	4.42	6.29
300	7.30	6.93
400	34.58	9.23

Tab. 3 Gesamtsetzung (mm)

Laststufen	Löß	Schwemmlöß
25	0.64	1.16
50	0.84	2.33
75	1.41	3.45
100	2.08	4.00
150	2.51	4.43
200	4.42	6.29
300	7.30	6.93
400	34.58	9.23

Kohäsion. Löß weist die höheren Setzungsbeträge und damit verknüpft niedrigere Werte der Steifemodule auf. Dies entspricht einer niedrigeren natürlichen Lagerungsdichte des Lößes gegenüber dem sedimentär umgelagerten Schwemmlöß.

Tab. 4 Kastenscherversuch

	Löß	Lößlehm
Reibungswinkel $\varphi$	29.0	28.0
Kohäsion c	11.0	19.0

## 5 DISKUSSION

### 5.1 Bodenphysikalische Eigenschaften der Substrate

Löß gilt als Lockergestein mit besonderen mechanischen Eigenschaften, wie einer hohen Böschungstandfestigkeit einerseits sowie leichter Erodierbarkeit und Neigung zum Kollabieren andererseits (MIAO et WANG 1991, MITCHELL 1993). Diese gegensätzlichen bodenphysikalischen Eigenschaften werden erzeugt durch die Kornsortierung und das locker gelagerte Primärgefüge, das durch eine vorwiegend karbonatische Zementation eine gewisse Festigkeit bekommt. Die feste Konsistenz des trockenen Lösses wird zunächst auf sekundäre Karbonatverkittung zurückgeführt. Schluffpartikel sind oft durch Tonbrücken auf Abstand gehalten, dabei sind die Tonplättchen rechtwinkelig zu den Schluffkörnern angeordnet (PECSI et RICHTER 1996). Diese Festigkeit bewirkt neben der Böschungsstabilität auch die Bildung von Trennfugen im Löß.

Bei der Bildung von Schwemmlöß wurde diese Zementation zerstört und das Gefüge wurde dabei gleichzeitig dichter, was auch in den Setzungsbeträgen der Kompressionsversuche zum Ausdruck kommt (Tab. 2). Die ähnlichen Scherfestigkeiten der untersuchten Substrate zeigen, daß Löß und Schwemmlöß im Untersuchungsgebiet ein ähnliches Kornspektrum besitzen. Die Karbonatbindungen zwischen den Körnern im Löß sind durch die im Experiment aufgebrauchten Normalspannungen gebrochen. Folg-

lich wirken beim Schervorgang im Laborversuch in beiden Bodenarten nur noch die Reibungskräfte zwischen den losen Einzelkörnern und Kohäsionskräfte aus dem Feinstkornanteil. Diese mechanische Zerstörung des Lößgefüges erfolgt auch beim natürlichen Verstürzen von trockenen oder bergfeuchten Lößblöcken. Die entfestigten Versturzmassen sind leicht erodierbar und es stellen sich ähnliche natürliche Böschungswinkel wie im Schwemmlöß ein.

Der erhöhte Tonanteil im Löß bewirkt eine höhere Kohäsion und eine etwas geringere Suffosions- und Erosionsanfälligkeit. Der hohe Anteil an Grobschluff kennzeichnet beide Lockergesteine als erosionsgefährdet. Gleichzeitig sind beide Kornverteilungen ähnlich dem Kornspektrum von Ausfallkörnungen, die als suffosionsgefährdet gelten (HECHT 2000).

Die subterrane Erosion im Löß setzt besonders dort an, wo die Zementation entweder durch Lösung oder durch Kollaps aufgehoben wird. Diese Vorgänge finden lokal im Bereich von Trennfugen und biogenen Makroporen statt. Nur hier kann es zu einer kurzzeitigen Sättigung des Lößes durch freifließendes Sickerwasser kommen.



Abb. 4 Eingestürzte Tunneldecke im Löß



## 5.2 Prozesse der subterranean Erosion

Der Löß wird im Untersuchungsgebiet direkt von Schwemmlöß unterlagert, der ausreichend durchlässig ist, um einen Anstau des Sickerwassers und damit eine mögliche Sättigung des überlagernden Lößes zu verhindern. Die primäre Matrixdurchlässigkeit des Lößes wird durch die Trennfugen sowie biogene Makroporen erhöht. Dies ermöglicht einen schnellen Abfluß von Niederschlagswasser und wirkt damit einer flächenhaften Sättigung des Lößes entgegen. Makroporenfluß entsteht vor allem nach einer maximalen Wassersättigung des obersten Bodenhorizontes beispielsweise nach außergewöhnlichen Starkregenniederschlägen oder infolge langanhaltender Niederschläge in Verbindung mit einer Schneeschmelze bzw. dem Abtauen von Bodenfrost.

Die Erosionsformen in Löß bilden zunächst schmale vertikale Hohlformen, die durch Ausweitung von Trennfugen oder biogenen Makroporen durch fließendes Wasser entstehen. Bei fortschreitender Erosion und Tunnelbildung entstehen durch das Einbrechen der Tunneldecken mit Gullies oder Runsen, Hohlformen und Erdbrücken die typischen Formen des Lößkarstes (Abb. 4 und 5).



Abb. 5 Durch Sackungen freigelegte Hohlräume im Löß

An der Ausweitung bereits vorhandener vertikaler Trennfugen und biogener Makroporen sowie der Erweiterung der Tunnel und Hohlräume sind verschiedene Prozesse wie mechanische sowie chemische Suffosion, Abbau der Mikrostruktur und Zerfall von Aggregaten durch Durchfeuchtung sowie Gefügekollaps und Erosion beteiligt. Diese Prozesse wirken räumlich differenziert und zeitlich engbegrenzt.

Die Prozesse und die dadurch entstehenden Erosionsformen im Löß unterscheiden sich deutlich von denen im darunterliegenden Schwemmlöß. Hier wirken Vorgänge der mechanischen Suffosion und der inneren Erosion verursacht durch Interflow, die zur Bildung von Pipes führen können. Im Untersuchungsgebiet fallen Löß und Schwemmlöß zur Muldenmitte hin ein. Der Löß erreicht hier auch seine größten Mächtigkeiten und keilt zu den Muldenrändern hin aus, so daß der Schwemmlöß unter dem Ap-Horizont oberflächennah ansteht. In den oberen Hangbereichen kann das Niederschlagswasser in die ausstreichende Schwemmlößschicht sickern und als Interflow oder Zwischenabfluß in das Muldeninnere fließen. Der durch den Makroporenfluß aus dem Löß verstärkte Interflow im Schwemmlöß erreicht an der Austrittsstelle in den Erosionsrinnen genügend Schleppkraft, um Material zu verlagern. Der Prozeß wirkt nach dem Prinzip der rückschreitenden Quellerosion, bei der das ausströmende Sickerwasser an Hanganschnitten erosiv wirken kann (DUNNE 1990, BRYAN et JONES 1997). Flächenhafte Einbrüche vor allem an der hangwärtigen Seite der Hohlwege deuten verstärkte Sickerwassererosion im Schwemmlöß an. Die geringe Aggregatstabilität und die hohe Permeabilität des Schwemmlößes unterstützen dabei diesen Erosionsprozeß.

Infolge mechanischer Suffosion wird durch Ausschwemmung von Feinstteilen das Porenvolumen im Sediment erhöht und die Voraussetzung für die innere Erosion durch freiströmendes Wasser geschaffen. Zu einer lokalen Erhöhung des Porenwasserdrucks und folglich zur Ausbildung von Pipes kommt es vorzugsweise dort, wo im überlagernden Löß Tunnel ausgebildet sind, da hier verstärkt Sickerwasser in den darunterliegenden Schwemmlöß eingeleitet wird (Abb. 6).

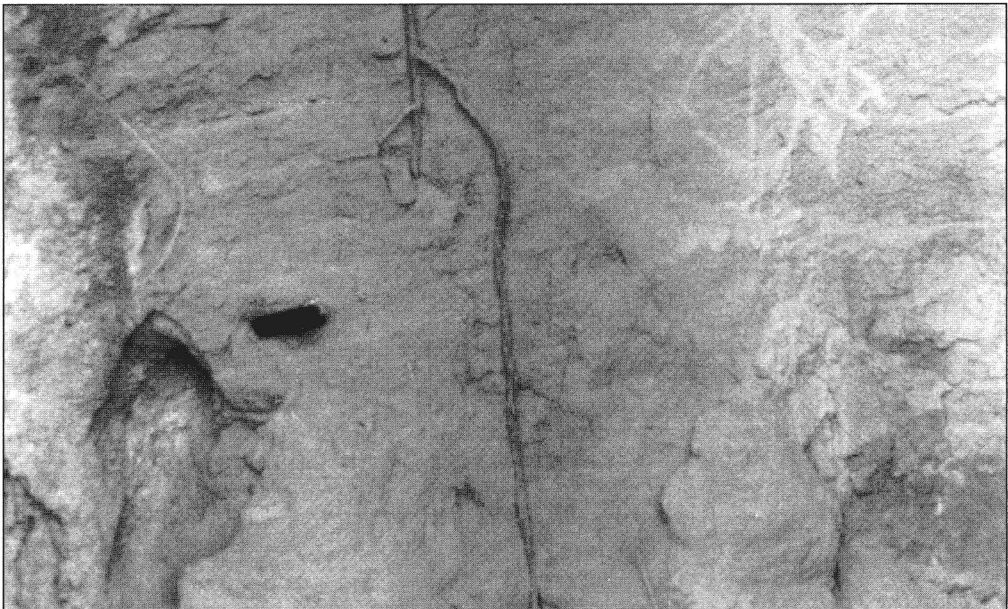


Abb. 6 Pipes im Schwemmlöß (7 und 15 cm Durchmesser)

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Hardenbicker, U.; Hecht, C.: Bodenphysikalische Prozesse und Ursachen der subterranean Erosion in Löß und Schwemmlöß im östlichen Harzvorland. - *Hercynia N.F.* **33** (2000): 31–41.

Löß und Lößderivate weisen eine besondere Disposition nicht nur für eine oberflächennahe Erosion, sondern auch für subterranean Erosion durch Wasser auf. Im Löß wirken vor allem an den Diskontinui-

tätsbereichen Prozesse der inneren Erosion. Im Gegensatz zur Tunnelerosion im Löß, die vorwiegend durch vertikal abfließendes Wasser in Makroporen und Trennfugen verursacht wird, ist im Schwemmlöß die subterrane Erosion Ergebnis eines lateralen Sickerwasserflusses. Aufgrund seiner bodenphysikalischen Eigenschaften kann der Schwemmlöß nicht die typischen Formen des Lößkarstes bilden. Er besitzt eine geringere Aggregatstabilität, geringere Festigkeit und Kohäsion als der Löß. Folglich können sich hier keine stabilen größeren Hohlräume oder steile Wände bilden.

Die speziellen Festigkeitseigenschaften des überlagernden Lösses in Kombination mit den geophysikalischen Eigenschaften des Schwemmlösses bilden die Voraussetzung für die subterranean Erosionsprozesse und die Ausbildung der Erosionsformen im Untersuchungsgebiet.

## 7 LITERATUR

- BARISS, N.; BRONGER, A. (1981): Natürliche und anthropogene Owragebildung in verschiedenen Klimazonen. Ein Beitrag zur Morphodynamik in Lößgebieten. - Z. Geomorph. N. F. **25**, 2: 180-202.
- BACHMANN, G.; HOYNINGEN-HUENE, E. V.; REUTER, F. (1963): Über einige Erosionserscheinungen im Löß südlich von Wettin bei Thaldorf (Krs. Hettstedt). - Geologie 12, 3: 340-348.
- BRYAN, R. B.; JONES, J. A. A. (1997): The significance of soil piping processes: inventory and prospect. - Geomorphologie **20**: 209-218.
- JONES, J. A. A. (1981): The nature of soil piping - a review of research. - British Geomorphological Research Group Monogr. 3, GeoBooks, Norwich.
- DUNNE, T. (1990): Hydrology, mechanics and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. - In: HIGGINS, C. G. et COATES, D. R. (Editors): Groundwater Geomorphology; the role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms. - Geol. Soc. Am. Spec. Pap. **252**: 1-28.
- HARDENBICKER, U. (1998): Subterrane Erosion im östlichen Harzvorland. - Z. Geomorph. N.F. Suppl. **112**: 93-103.
- HARTGE, K. H.; HORN, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. - Stuttgart.
- HECHT, C. A. (2000): Apollonia Packing and Fractal Shape of Grains Improving Geomechanical Properties in Engineering Geology. - Pure appl. geophys. **157**, 487-504.
- KAMMHOlz, H. (1964): Ingenieurgeologische Situationskarte Mansfelder Mulde 1:50.000, mit Erläuterungen, Zentrales Geologisches Institut Berlin, 77 S.
- KARRENBERG, H.; QUITZOW, H. W. (1956): Über Hohlraumbildung und Einstürze in Lößböden als Folge unterirdischer Materialwegführung. - Geol. Jahrbuch **71**: 631-642.
- MIAO, T. D.; WANG, Z. G. (1991): Deformation Mechanism of Collapsible Loess in Consideration of the Microstructure Instability. - In: SETSUO OKUDA, RAPP, A.; ZHANG LINYUAN (Editors), Loess: geomorphological processes and hazards. - Catena Suppl. **20**: 93-105.
- MITCHELL, J. K. (1993): Fundamentals of Soil Behaviour. - Wiley and Sons, Chichester.
- PARKER, G. G.; HIGGINS, C. G. (1990): Piping and pseudokarst in drylands. - In: HIGGINS, C. G.; COATES, D. R. (Editors): Groundwater Geomorphology; the role of Subsurface Water in Earth-Surface Processes and Landforms. - Geol. Soc. Am. Spec. Pap. **252**: 77-110.
- PECSI, M.; RICHTER, G. (1996): Löss. Herkunft-Gliederung-Landschaften. - Z. Geomorph. N. F. Suppl. **98**.
- REUTER, F.; KLENGEL, K. J.; PASEK, J. (1980): Ingenieurgeologie. - Thun, Frankfurt.
- SCHIEDIG, A. (1934): Der Löß und seine geotechnischen Eigenschaften. - Dresden, Leipzig.

*Manuskript angenommen: 6. Dezember 1999*

Anschrift der Autoren:

Dr. Ulrike Hardenbicker, Institut für Geographie, Domstr. 5, D-06108 Halle/S.  
 Dr. Christian Hecht, Institut für Geologie, Domstr. 5, D-06108 Halle/S.