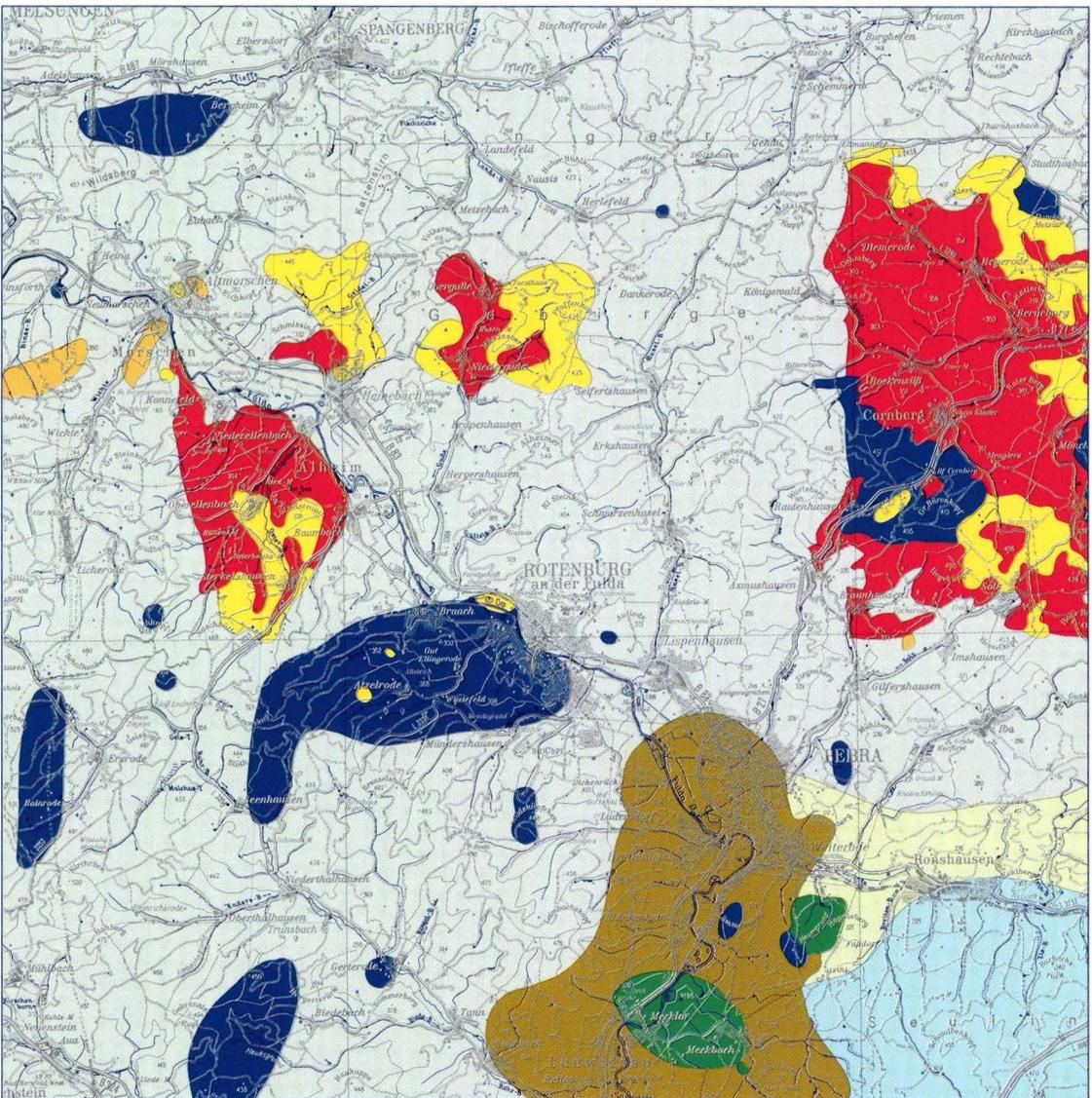


Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karstgefährdeten Gebieten Hessens

– Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumaßnahmen –

GABRIELE ADERHOLD



Geologische Abhandlungen Hessen, Band 115: 100 Seiten, 46 Abb., 18 Tab., 2 Anl., 1 Beilage;
Wiesbaden 2005
ISBN 3-89531-817-5
ISSN 0341-4043

Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karst- gefährdeten Gebieten Hessens

– Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumaßnahmen –

GABRIELE ADERHOLD



Hessisches Landesamt
für Umwelt und Geologie

Schriftleitung
Dr. Roland E. Becker
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186, D-65203 Wiesbaden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Die vorliegende Arbeit ist eine gekürzte Fassung der von der Autorin beim Fachbereich 11, D17 der Technischen Universität Darmstadt eingereichten Dissertation.

Titelbild: Ausschnitt aus der ingenieurgeologischen Karstgefährdungskarte von Hessen.

Hinweis für Autoren

Manuskripte sind entsprechend den „Bonner Anweisungen“ abzufassen: Richtlinie für die Verfasser geowissenschaftlicher Veröffentlichungen. Ausgearbeitet von S. Horatschek und T. Schubert, 51 S.; Hannover 1998.

Zu beziehen durch E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
(Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart.

© Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2005
ISBN 3-89531-817-5
ISSN 0341-4043

Printed in Germany

Für den Inhalt der Arbeit ist die Autorin allein verantwortlich.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without permission of the publisher.

Redaktion: Prof. Dr. Adalbert Schraft,
Monika Retzlaff, Dagmar Tangermann
GIS-Bearbeitung: Michaela Hoffmann

Herausgeber,

© und Vertrieb: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186, D-65203 Wiesbaden
Telefon: 06 11/70 10 34; e-mail: vertrieb@hlug.de
Telefax: 06 11/97 40 813

Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karstgefährdeten Gebieten Hessens

– Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumaßnahmen –

Kurzfassung

Auf Grundlage von Daten über Erdfälle und Senkungsmulden und deren ingenieurgeologischer Analyse und Bewertung wurde unter Berücksichtigung der Bruchgefährdung und primären Erdfalldurchmessern, dem Alter und der Aktivität, der Unterscheidung in bruchlose und bruchhafte Deformationen, dem Karstgestein, den Lagerungsverhältnissen, dem Deckgebirgsaufbau sowie in der Begründung charakteristischer bautechnischer Merkmale ein Kartenwerk erstellt, aus dem die konkrete Karstgefährdung und der Grad der Gebirgsdeformation durch Karstprozesse abgeleitet werden kann. Das Kartenwerk setzt sich zusammen aus der Dokumentations-, der Karstgefährdungs- und der Erdfallhäufigkeitskarte. Die beigefügte Karstgefährdungskarte weist in 11 Kategorien bautechnische Parameter sowie die Karst- und Bruchgefährdung des Gebirges und damit Flächen gleicher Bebaubarkeit aus. Sie stellt somit eine flächenmäßige Abgrenzung der im Bundesland Hessen

dokumentierten bruchlosen und bruchhaften Karstformen unter Berücksichtigung ihrer geomechanischen Entwicklung und ihrer bautechnischen Auswirkungen dar. Dabei wurde der gebirgsmechanisch begründete Hochbruchprozess entlang vertikaler Trennflächen, der vom Spannungsverformungsverhalten des Gebirges und dessen Gebirgsfestigkeiten abhängt, in die Kartenableitung integriert.

Der Grad der Deformation im Gebirge bzw. die Karstaktivität ist der Erdfallhäufigkeitskarte zu entnehmen.

Die geotechnischen Schlussfolgerungen für die Bebaubarkeit der Karstgefährdungsgebiete werden vorgestellt. Hierzu zählen Auswirkungen der Karstprozesse auf Bauwerke und Bauvorhaben sowie Empfehlungen zur Untersuchung, Gründung, statisch-konstruktiven Maßnahmen und Kontrollmöglichkeiten in Karstgefährdungsgebieten.

Abstract

On the basis of collected facts about sinkholes and crop falls and their engineering-geological analysis and rate, there was created a map, which describes at the one hand the concrete karst fragility and, at the other hand the grade of rock deformation by karst processes.

The map is created under considering the fragility area and the primary diameter, the age,

the activity, the discrimination in non-fractured and fractured deformation, the carststone, the bedding conditions, the overlying rock as well as the map gives reasons for characteristical features of constructions.

The new developed map of karst fragility included in this paper classifies 11 units, which describe constructive paramete as well as the

* Dr.-Ing. G. Aderhold (e-mail: g.aderhold@hlug.de), Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Rheingaustraße 186, D-65203 Wiesbaden.

carst fragility and the rock deformation and so you can see areas of equal constructional conditions.

The map of carst risks is a two-dimensional classification and solution of all the documented non-fractured and fractured carstforms in the state of Hessen under considering of their geo-mechanical development and their effects on construction.

The map integrates the rockmechanical fracturing process along vertical parting surfaces, the stress conditions of rock and his strata cohe-

sion. At all, the grade of rock deformation and carst activity is documented in the carst map.

The geotechnical conclusions of the possibility of construction will be showed in the different carst areas. These involve also recommenda-tions for measures of soil investigation, founda-tion, static-construction and control. They are very important conditions for the choice of suitable measures of foundation and reconstruction in the underground and directly constructional measures at the building.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Verkarstungsaspekte	6
2.1 Karstterminologie	6
2.2 Relevante Karstfaktoren und Klassifikationsmerkmale	7
2.3 Einflussgrößen zur Prognostizierung von Erdfällen	8
2.4 Hydrologische Einflüsse auf Karstvorgänge	10
2.5 Hauptkarstphasen von Erdfällen und Senkungsmulden	11
3. Ingenieurgeologische Analyse der Karstprozesse	11
3.1 Erdfallmodellierung im von Festgebirge bedeckten Karst	11
3.1.1 Geomechanische Vorgänge und Bruchprozessmodellierung	13
3.1.2 Festigkeitseigenschaften und Spannungs-Verformungsverhalten	17
3.1.3 Mathematisch-physikalisches Modell zur Hohlräumbruchmassenbilanz	22
3.1.4 Interpretation der Naturbefunde	26
3.2 Erdfallmodellierung im seichten Karst	28
3.2.1 Geomechanische Vorgänge und Bruchprozessmodellierung	28
3.2.1.1 Festigkeitseigenschaften und Spannungs-Verformungsverhalten	31
3.2.1.2 Interpretation der Naturbefunde	34
3.3 Zusammenhang zwischen Erdfallalter, Stratigraphie und Tiefenlage der Karstgesteine ...	38
3.4 Ingenieurgeologische Analyse von Senkungsmulden im Chloridkarst	39
3.4.1 Geomechanische Vorgänge und Senkungsprozessmodellierung	40
3.4.2 Interpretation der Naturbefunde	42
4. Ingenieurgeologisches Kartenwerk der Karstgefährdung	45
4.1 Allgemeines Ziel und Methodik ingenieurgeologischer Karten	45
4.2 Zusammensetzung des ingenieurgeologischen Kartenwerkes	45
4.3 Dokumentation der Erdfälle und Senkungsmulden	46
4.4 Ingenieurgeologische Karstgefährdungskarte	50
4.5 Häufigkeitsverteilung der Erdfälle und Senkungsmulden	59
4.6 Genauigkeitsbetrachtungen	63

5. Bebaubarkeit von Karstgefährdungsgebieten	64
5.1 Auswirkungen der Karstprozesse auf Bauwerke und Baumaßnahmen	64
5.2 Auswahl typischer Bauschäden in Karstgefährdungsgebieten	67
5.3 Empfehlungen für geotechnische Maßnahmen in Karstgefährdungsgebieten	74
5.3.1 Geotechnische Maßnahmen in akuten Erdfallgebieten (Kategorien 3, 5, 6 und 7) ...	75
5.3.2 Geotechnische Maßnahmen innerhalb von Erdfall- und Senkungsmuldenfüllungen (Kategorien 4, 8, 9 und 11)	79
5.3.3 Geotechnische Maßnahmen in akuten Senkungsgebieten (Kategorie 9)	79
6. Zusammenfassung	84
7. Schriftenverzeichnis	87
8. Abbildungsverzeichnis	89
9. Tabellenverzeichnis	91
10. Verzeichnis der Gleichungen	92
11. Verwendete Formelzeichen, Einheiten und Größen	93
12. Anlagen und ingenieurgeologisches Kartenwerk	94

1. Einleitung

Das Auftreten von Erdfällen und Senkungsmulden und die hieraus resultierenden Bauschäden sind in Hessen seit dem 18. Jahrhundert bekannt, jedoch existieren bislang weder Richtlinien für die Bebauung in erdfall- und senkungsmuldengefährdeten Gebieten, noch gibt es eine Klassifikation zur Abschätzung des Risikos von Erdfällen und Senkungsmulden bei der baulichen Nutzung. Die bekannten Bauschäden in Hessen belegen jedoch, dass mit der baulichen Nutzung von Karstgebieten ein erhöhtes Risiko vorhanden ist.

Von der Ingenieurgeologie sind daher nicht nur Angaben über die bodenphysikalischen Eigenschaften des Baugrundes, sondern zusätzlich Unterlagen über den oberflächennahen und subterranean Verkarstungsgrad sowie über die gegenwärtige Aktivität der Lösungsprozesse und deren mögliche Auswirkungen im Baugrundbereich erforderlich. Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit sind daher die ingenieurgeologische Analyse von Hochbruchprozessen über Karsthohlräumen und

die Aufstellung von Gesetzmäßigkeiten der Erdfallbildungen.

Für die Baupraxis ist neben morphologischen und genetischen Faktoren zusätzlich das Verformungsverhalten des über dem löslichen Gestein liegenden Deckgebirges zu analysieren. Daher müssen in der Ingenieurgeologie Möglichkeiten gefunden werden, den Prozess der Verkarstung und die Erscheinungsform mit dem Verformungsverhalten so zu beschreiben, dass sie den Charakter eines Kennwertes tragen und flächenhafte Darstellungen der Karstgefährdung möglich sind. Für die Anwendung von Untersuchungs- und Sicherungsmaßnahmen in erdfallgefährdeten Gebieten ist die flächenhafte und differenzierte Abgrenzung der gefährdeten Gebiete Voraussetzung.

Grundlage war daher die umfassende Sammlung von Daten über Erdfälle und Senkungsmulden in Hessen sowie deren ingenieurgeologische Deutung. Wichtigste Quellen dafür sind die Geologischen und Tektonischen Karten

von Hessen im Maßstab 1 : 25 000, zahlreiche Gutachten, die von Mitarbeitern des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, HLUG (bis 31.12.1999: Hessisches Landesamt für Bodenforschung), verfasst wurden, eigene Geländebefunde, Luftbildauswertungen sowie Auskünfte von Forstämtern.

Unter Berücksichtigung der ingenieurgeologischen Bewertung und Analyse der Erdfälle und Senkungsmulden sowie deren Modellierung wurde eine neuartige Gefährdungskarte für Nord- und Nordosthessen (Maßstab 1 : 200 000) mit 11 Kategorien entwickelt, die Flächen gleicher Bebaubarkeit ausgrenzt. Hierbei wird vor allem der prognostizierende Gedanke für Karstereignisse in den Vordergrund treten. Dazu zählen neben der Erdfallhäufigkeit, der Erdfallgeometrie und dem Erdfallalter vor allem auch die Orientierung der Erdfälle und Senkungsmulden sowie die gebirgsmechanischen Spannungsänderungen im Gebirge sowie dessen Festigkeitseigenschaften.

Die Karten sollen dem Planer bereits im Vorfeld einer Baumaßnahme Hinweise auf die Erdfall- und Senkungsgefährdung geben, da bei einer Bebauung nicht immer auf senkungs- oder erdfallfreie Gebiete ausgewichen werden kann. Gerade in Fällen von Gebietserweiterungen ist

man an den vorgegebenen Standort gebunden. Daher soll die Karte Schlussfolgerungen über den zu erwartenden Untersuchungs- und Gründungsaufwand zulassen, so dass die durch Karstprozesse auftretenden zusätzlichen Spannungen vom Bauwerk schadenfrei aufgenommen werden können. Hierzu dienen die in Hessen dokumentierten Bauschäden und Baumaßnahmen in karstgefährdeten Gebieten. Dokumentations- und Karstgefährdungskarte sollen dem Anspruch gerecht werden, für künftige Baumaßnahmen eine wichtige Grundlage für Standortentscheidungen darzustellen. Die in den Gefährdungskategorien begründeten charakteristischen geotechnischen Merkmale werden aufgezeigt und es werden Empfehlungen für bautechnische Maßnahmen gegeben.

Da Erdfälle und Senkungsmulden von besonderer bautechnischer Bedeutung sind, wird der Schwerpunkt der Arbeit auf sulfatische und chloridische Verkarstung gelegt. Die devonischen und karbonischen Massenkalken zeigen vor allem subterrane Karstformen, jedoch sind rezente Erdfallbildungen hier nicht relevant. Es wird aber betont, dass z.B. für den Talsperrenbau diese verkarsteten Karbonate aufgrund hoher Untergrunddurchlässigkeiten von Bedeutung sind (ADERHOLD 1992).

2. Verkarstungsaspekte

2.1 Karstterminologie

Als Karst wird die Gesamtheit aller noch andauernden und abgeschlossenen Lösungerscheinungen sowie die sich daraus ergebenden Formen verstanden. Unter dem Begriff Subrosion versteht man eine im Untergrund in Abhängigkeit von den Vorflutverhältnissen ablaufende Kombination von Prozessen der Korrosion (chemische Lösung) und der unterirdischen Erosion sowie der Wegführung der gelösten Substanz.

Aus ingenieurgeologischer Sicht stellt sich die wesentliche Frage, welche Auswirkungen bei ei-

ner unterirdischen Hohlraumbildung an der Geländeoberfläche zu erwarten sind und welche Folgen diese auf unterschiedlichste Baumaßnahmen haben. Regional weit verbreitet finden sich in Mitteleuropa lösliche Gesteine in fast allen Formationen des Untergrundes, verstärkt vor allem im Zechstein und in der Trias. Hierdurch werden durch natürliche oder auch künstliche Prozesse Substanzverluste im Untergrund eingeleitet, die zu bruchlosen Senkungen oder Einbrüchen als Bruchform an der Erdoberfläche führen. Entsprechend den klimatischen Verhält-

nissen in Mitteleuropa erfolgt eine Beschränkung auf Karsterscheinungen in Kalk-, Gips- und Salzgesteinen, die auch bei Überdeckung durch nichtlösliche, jedoch wasserwegsame Gesteine in Lösung gebracht und weggeführt werden können.

Für die Hohlformen an der Erdoberfläche ist Doline der umfassende Begriff. CRAMER (1941) versteht darunter eine in sich geschlossene, oberflächlich abflusslose Bodensenke, die entweder durch Lösung von oben her oder durch Einbruch von Hohlräumen entstanden ist. Die Einsturzdoline entspricht dem Erdfall i.e.S. Als Erdfall wird damit der natürlich entstandene Einbruch an der Erdoberfläche als Folge von Hohlraumbildungen im Untergrund bezeichnet.

Der Zusammenbruch bzw. die Deformation der Hohlräume und das Abführen der gelösten Substanz im Untergrund führt im Deckgebirge zu Durchbiegungen, die sich an der Erdoberfläche als gleichmäßig oder ungleichmäßig verlaufende, flächenhafte bruchlose Senkungen abbilden und als Senkungsmulden bezeichnet werden. Großräumig treten die Senkungsmulden bevorzugt über Steinsalzen, kleinräumig aber auch als Senken infolge innerer Suffosion von bindigem Material über verkarstem Gebirge auf.

2.2 Relevante Karstfaktoren und Klassifikationsmerkmale

Für die praktischen Aufgabenstellungen des Bauwesens ist es erforderlich, die Faktoren, die das Verhalten der löslichen Gesteine und des Deckgebirges beeinflussen, zu betrachten. Bei der Verkarstung von löslichen Gesteinen greifen verschiedene physiko-chemische Prozesse in Abhängigkeit vom Gestein ineinander.

Für den Ablauf von Karstprozessen sind die in Abb. 1 dargestellten Voraussetzungen notwendig.

Die Löslichkeit verhält sich von den chloridischen über die sulfatischen hin zu den karbona-

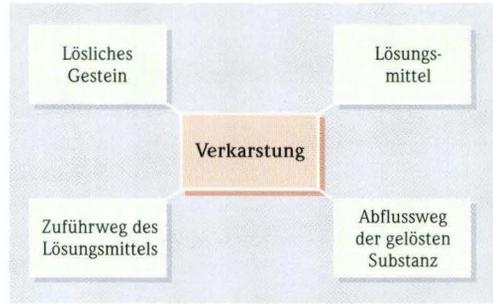


Abb. 1. Voraussetzungen für den Karstprozess (MOLEK 1973).

Tab. 1. Ingenieurgeologische Einteilung des Karstes nach der Tiefenlage des verkarstbaren Gesteins und dem Deckgebirge (REUTER & TOLMACEV 1990).

Typ	Beschreibung
nackter Karst	Die verkarstbaren Gesteine liegen direkt an der Erdoberfläche.
seichter Karst	wie oben; sie sind jedoch von geringmächtigem Lockergestein überdeckt.
bedeckter Karst	Die verkarstbaren Gesteine werden von wasserdurchlässigen, aber wasserunlöslichen Gesteinen überdeckt.
	Die verkarstbaren Gesteine werden von wasserundurchlässigen und wasserunlöslichen Gesteinen überdeckt.

tischen Gesteinen wie 10 000 : 100 : 1. Es werden hierbei der klimaabhängige Lösungsprozess in karbonatischen und sulfatischen Gesteinen (bevorzugt kavernöse Lösung) und der Lösungsprozess in Salzgesteinen (bevorzugt flächenhaft) berücksichtigt. Eine weitere Klassifikation erfolgt nach der Tiefenlage des verkarstbaren Gesteins (Tab. 1).

Entscheidend für die geotechnische Beurteilung des Karbonatkarstes sind seine geringe Lösungsgeschwindigkeit und die hohe Standfestigkeit der Hohlräume.

Ansatzpunkt für die Lösung im Bereich des nackten Karstes bilden petrographische und strukturelle Trennflächen im Gebirge. Der Tiefe nach setzt sich die Verkarstung kavernenbildend fort, so dass sich ein zusammenhängendes unterirdisches Hohlraumssystem entwickeln kann. Die Erweiterung der unterirdischen Hohlräume kann neben der Lösung auch durch die erosive Tätigkeit des fließenden Wassers erfolgen.

Bei der Verkarstung von Kalziumsulfatgesteinen spielen Anhydrit (wasserfrei, CaSO_4) und Gips (hydratisiert, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) aufgrund ihrer hohen Wasserlöslichkeit und ihres regionalen Vorkommens eine wichtige Rolle bei der geotechnischen Bewertung.

Die Löslichkeit der in der Natur vorkommenden Chloride liegt weit höher als die der Sulfate und Karbonate. Die Chloride werden daher immer als erstes gelöst. Im humiden Klimabereich existieren an der Erdoberfläche keine chloridischen Gesteine. Auch unter geringer Überdeckung sind sie weitgehend weggelöst. Unter mehreren 100 m mächtigem Deckgebirge haben sie vom Ausstrich her oder durch tektonische Bruchbildung Verbindung mit dem Grundwasser erhalten und unterliegen seit geologischen Zeiträumen einer Verkarstung und Subrosion. Die Lösung von Salzgesteinen erfolgt in der Regel an der Oberfläche der Gesteine. Die Wässer und Salzlösungen zirkulieren in den Nebengesteinen bzw. Grenzugen zwischen Nebengestein und Salinar und greifen das Salinar seitlich, von oben, unten oder im Sinne der irregulären Auslaugung über tektonische Störungszonen an. Da die Randbereiche der Salzverbreitung bevorzugte Angriffspunkte für die Lösungsvorgänge sind, treten die größten Senkungen nach REUTER et al. (1979) häufig an diesen Stellen in Verbindung mit dem Trennflächengefüge auf.

Die Löslichkeit von Gesteinen, die zu unterirdischen Hohlräumen und Bildung von Erdfällen und Senkungsmulden führt, findet in Kalksteinen, kalkhaltigen Gesteinen, Anhydriten, Gipsen und Chloriden statt. Die in Hessen vorliegenden löslichen Gesteine, die Erdfälle und

Mulden an der Erdoberfläche bewirken, sowie deren stratigraphische Einordnung und räumliche Verbreitung sind in Tab. 2 fett unterlegt.

Leichtlösliche Salze liegen im Zechstein und Rotliegend vor.

Verkarstbare Gips- bzw. Anhydritgesteine sind aus dem Zechstein, dem Oberen Buntsandstein (Röt) und dem Mittleren Muschelkalk bekannt.

Verkarstbare Kalkgesteine treten in fast allen Formationen auf, Erdfälle vor allem in den Karbonaten der Muschelkalkschichten sowie in den tertiären Karbonaten (hier v.a. Untermiozän).

Die folgenden Auswertungen beschränken sich auf verkarstbare Gesteine des Zechsteins, der Trias und des Tertiärs.

2.3 Einflussgrößen zur Prognostizierung von Erdfällen

Für Brucherscheinungen im Gelände und für statisch-konstruktive Aussagen ist der Anfangs- oder Primärdurchmesser eines Erdfalls von entscheidender Bedeutung. Daneben interessieren nach REUTER (1983) die Anzahl der Ereignisse pro Flächen- und Zeiteinheit sowie die Tiefe der Bruchformen. Diese Parameter lassen Aussagen über den Gefährdungsgrad bei Baumaßnahmen zu.

Dabei drückt sich der primäre Durchmesser d als Funktion des Volumens des primären Hohlraumes und der mechanischen Eigenschaften des hangenden Gesteins aus. Der gebildete Erdfall durchläuft folgende idealisierte (a, b, c) morphologische Entwicklung (Abb. 2).

Der primäre Durchmesser ist deshalb entsprechend der zweiten Entwicklungsstufe b anzunehmen. Die Erdfallalterung sowie das Nachbrechen der aufgelockerten Randbereiche führt zum Enddurchmesser D_e eines Erdfalls und ist eine Funktion der Wirkung des Oberflächenwassers, der Denudation, der Erosion, der Frostwirkung, der Windrichtungen und der Schwerkraft.

Der größte Durchmesser eines Erdfalls, der konstruktiv unschädlich ist und keine wirtschaftlichen Aufwendungen erfordert, wird als „kriti-

scher Erdfalldurchmesser“ bezeichnet. Dieser muss in Abhängigkeit von Gründungsart und Konstruktion gesehen werden; daher sollten keine konkreten Werte angegeben werden.

Nach REUTER & TOLMACEV (1990) ergibt sich ein System der Reihung von Erdfallgrößen nach der Anzahl der Erdfälle bezogen auf Fläche und Zeit (Erdfallhäufigkeit). Der Grad der Deforma-

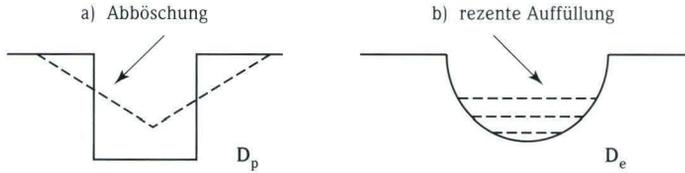


Abb. 2. Übergang des Erdfalldurchmessers D_p nach D_e (idealisiert).

Tab. 2. Verkarstbare Formationsglieder sowie deren regionale Verbreitung in Hessen.

Geologisches System	Unterteilung	Gesteinsart	Erdfallvorkommen
Quartär	Holozän Pleistozän	Löss	hessenweit
Tertiär	Pliozän Miozän Oligozän Eozän + Paläozän	Kalkmergelstein	Mainzer Becken Untermaingebiet
Kreide	Ober- und Unterkreide	Kalkstein	Erdfälle in Hessen nicht bekannt
Jura	Malm, Dogger, Lias	Kalkstein, Dolomitgestein, Gips, Steinsalz	Erdfälle in Hessen nicht bekannt
Trias	Keuper	Gips, Steinsalz, Kalkstein	Erdfälle in Hessen nicht bekannt
	Muschelkalk	Kalkstein, Dolomit, Gips,	Werra- und Wesergebiet
	Buntsandstein	Gips, Steinsalz	Werra- und Weserbergland, Nord- u. Osthessen
Perm	Zechstein	Gips, Steinsalz, Kalkstein, Dolomit	Fulda-Werra-Gebiet Werra- u. Weserbergland, Nord- u. Osthessen
	Rotliegend	Steinsalz	
Karbon	Kulm	Kalkstein	Rheinisches Schiefergebirge
Devon	Ober-Devon Mittel-Devon Unter-Devon	Kalkstein	Rheinisches Schiefergebirge

tion des verkarsteten Gebirges durch Erdfälle ergibt sich zu

$$H = \text{Anzahl der Erdfälle}/(\text{km}^2 \cdot \text{Jahr}) \quad (\text{Gleichung 1})$$

Für die strukturabhängige Korrelation von Erdfallgruppen wurden Orientierungsanalysen nach FIKSEL & STOYAN (1983) durchgeführt. Die mathematische Orientierungsanalyse geht unter bestimmten geologischen Voraussetzungen davon aus, dass Erdfälle in ihrer Lage und zeitlichen Folge zufallsbedingt auftreten. Bei der Orientierungsanalyse wird die Orientierung von Erdfällen durch die Orientierungsdichte beschrieben. Dabei ist die Orientierungsdichte $x \, d\alpha$ die mittlere Anzahl der Punkte in einem Sektor mit dem Öffnungswinkel $\alpha + d\alpha$ und dem Zentrum im Punkt x , wobei immer diejenigen Punkte betrachtet werden, die einen Abstand zwischen r_1 und r_2 von x haben. x durchläuft nacheinander alle Punkte des Punktmusters und wird gemittelt. Maxima von der Orientierungsdichte zeigen bevorzugte Richtungen an, in denen sich aus der Sicht eines Punktes des Musters besonders viele andere Punkte anordnen.

2.4 Hydrologische Einflüsse auf Karstvorgänge

Entscheidend für die Wasserwegsamkeit sind die Kluftweite, die Kluftlänge und die Kluftdichte sowie die räumliche Anordnung der Trennflächen, die Vernetzung der Kluftsysteme untereinander und das Vorhandensein von Bestegen auf den Klüften. An den Bergflanken sind infolge von Hangzerreißung zusätzlich offene Klüfte zu erwarten (ADERHOLD 1992), ebenso in Randbereichen von Senkungsmulden aufgrund der stattgefundenen Zerrbeanspruchung der Gesteinschichten.

Die Verkarstung findet im Allgemeinen im ungesättigten bzw. Grundwasserschwankungsbereich statt. Auch durch Verkarstung von unten können bedeutende Hohlräume im Untergrund

entstehen (z.B. durch Entgasung von Magmen oder durch aufsteigende kohlenensäurehaltige Wässer). Im Laufe der geologischen Vergangenheit oder durch anthropogene Einflüsse können sich hydrogeologische Bedingungen verändern.

Beispiele für natürliche Verlagerungen von Verkarstungszonen:

- Durch Verkarstungsprozesse und damit verbundenem Absinken der Erdoberfläche steigt der Grundwasserstand im Gebirge relativ an.
- Absenkung der Grundwasseroberfläche durch tektonische Vorgänge, z.B. auf dem rheinhesischen Plateau im Pleistozän (GOLWER & PRINZ 1969). Hierdurch wurde der ehemals gesättigte Gebirgs-Grundwasserbereich der aktiven Verkarstung ausgesetzt. Auf Bl. 4925 Sontra zeigt sich des Weiteren eine Konzentration von Erdfällen in Trockentälern. Auch hier ist durch Absinken der Grundwasseroberfläche die aktive Verkarstungszone „relativ“ nach oben verschoben worden (MOTZKA-NÖRING 1987).

Ein weiterer hydrogeologischer Faktor für den Prozess der Verkarstung ist der natürliche Gehalt an Kohlenäure. So geht nach GOLWER & PRINZ (1969) die intensive Korrosion der tertiären untermiozänen Kalkgesteine auf dem Sachsenhäuser Berg im Untermaingebiet auf einen hohen Gehalt an Kohlenäure zurück.

Für die Verlagerung von aktiven Verkarstungszonen durch Änderung der hydrogeologischen Situation können zusätzlich anthropogene Faktoren verantwortlich sein.

Künstliche Änderungen des hydrogeologischen Regimes, z.B. durch Wassergewinnungs- oder Wasserhaltungsmaßnahmen oder durch Zuführen von Abwässern in den Untergrund führen meist zu einer verstärkten Aufnahme löslicher Bestandteile. So traten in Cornberg (Bl. 4925 Sontra) verstärkt Erdfallbildungen auf nacktem oder seichtem Sulfatkarst auf, die durch eine defekte Entwässerungsleitung hervorgerufen wurden (PRINZ 1969, 1976). Durch Wasserhaltungen im Kalibergbau (Bl. 5124 Bad Hersfeld sowie Bl. 5523 Neuhof) kam es ebenfalls zu

rezenten Erdfallbildungen (LIPPERT 1965, PAULY 1966). Im Rahmen einer Grundwasserabsenkung im Gebiet der Braunkohlengrube Buchenau, Bl. 5224 Eiterfeld, wurde auch hier die aktive Verkarstungszone verlagert, und es traten kurzfristig rezente Erdfälle auf (FINKENWIRTH 1962). Eine Vielzahl der in historischer Vergangenheit erfolgten Einbrüche muss daher in Zusammenhang mit größeren Grundwasserschwankungen gesehen werden, die durch starke aktive Bergbautätigkeit hervorgerufen wurden.

Ferner können bautechnische Maßnahmen die Verkarstung durch eine Verstärkung der Wasserzufuhr ins Gebirge beeinflussen. Auch die Wegnahme von Vegetationsdecken kann nach REUTER & TOLMACEV (1990) zu verstärktem Kontakt von Niederschlägen mit dem löslichen Gestein führen. In Hessen konnte dies im Bereich von Weißenbach (Bl. 4725 Bad Sooden-Allendorf), wo durch Rodung ein verstärkter Oberflächenabfluss stattfand, nachgewiesen werden.

2.5 Hauptkarstphasen von Erdfällen und Senkungsmulden

Das Optimum für die Bildung von Erdfällen ist aufgrund der geringeren Löslichkeit von Gips gegenüber dem Chlorid an wärmere und niederschlagsreiche Perioden gebunden. Für die Verkarstung im Gipsgebirge ist unter heutigen kli-

matischen Gegebenheiten von einer insgesamt geringen Intensität auszugehen.

Es lassen sich nach NIEDERMAYER (in: IAEG 1973) vier Hauptphasen für die bevorzugte Erdfalltätigkeit unterscheiden, die mit Hilfe pollenanalytischer und sedimentologischer Untersuchungen belegt wurden:

- Kreide/Tertiär (abgeschlossen vor dem Pliozän): Die Bewegungen dürften hier mit großer Wahrscheinlichkeit abgeschlossen sein, da sich in jüngster Vergangenheit bei diesen datierten Formen keine erkennbaren Senkungen mehr abgespielt haben. Datierete Erdfallfüllungen besitzen häufig pliozänes Alter.
- Entstehung vor dem Ende der Weichsel-Kaltzeit abgeschlossen.
- Holozäne, meist morphologisch an der Erdoberfläche erkennbare Erdfälle. Die Entstehung der Erdfallfüllungen wurde auf vor 6 000 bis 4 000 Jahren datiert. Die Erdfallbildung fand damit verstärkt vor dieser Zeit statt (HORN 1982).
- Rezente Erdfälle: Neben den fossilen Erdfällen und Senkungsmulden treten daneben rezente Ereignisse auf.

Die Entstehung der durch Salzlösung bedingten Senkungsmulden liegt im Spätglazial, d.h. vor 15 bis 10 000 Jahren, was u.a. durch ¹⁴C-Datierungen und pollenanalytische Untersuchungen belegt ist (NIEDERMAYER 1973).

3. Ingenieurgeologische Analyse der Karstprozesse

3.1 Erdfallmodellierung im von Festgebirge bedeckten Karst

Das Verkarstungsmodell setzt eine Überlagerung der verkarstbaren Gesteine durch Festgebirge voraus. Erdfälle sowie ± senkrecht durchgebrogene Einbruchschlote mit steilwandiger Begrenzung sind hessenweit an die Verkarstung von Anhydriten und Gipsen bzw. Zechsteinsalzen gebunden. Erdfälle durch Verkarstung tiefliegender Karbonatgesteine sind nicht bekannt.

Folgende Voraussetzungen müssen vorliegen:

- Verkarstbare Gesteine im Untergrund sind vorhanden, die bei Lösung standfeste Hohlräume im Untergrund bilden.
- Neben der Orientierung an das Kluftgefüge liegen bis zum verkarstbaren Gestein hinreichende, meist senkrecht zur Oberfläche verlaufende tektonische Störungen vor. Die durchgeschlagene Triasüberdeckung ist durch zahlreiche Verwerfungen rheinischer und herzynischer Richtung in viele, z.T. nur 100 m

breite Einzelschollen zerlegt. Hieraus resultiert die gute Wasserwegsamkeit bis in große Tiefe. Teils wird die Wasserzirkulation entlang von Hängen durch Hangzerreißung und damit Öffnung von Klüften verstärkt.

- Das den Hohlraum überlagernde Deckgebirge bildet ein Gewölbe aus. Biege-, Druck- und

Zugfestigkeiten des Gebirges werden überschritten, und der Bruchzustand tritt ein.

In Hessen konnte das Erdfallmodell des von Festgebirge bedeckten Karstes in den in Tab. 3, 4 und 5 aufgeführten Gebirgseinheiten festgestellt werden.

Tab. 3. Karstmodell für Gipse des Mittleren Muschelkalkes (n = 80).

Deckgebirge	Mächtigkeit des verkarstbaren Gesteins	Mächtigkeit des Deckgebirges	festgestellte Primärdurchmesser
Ceraiten- und Trochitenkalke	1–3 m	1 bis maximal 10 m, meist unter 10 m	1,5–10 m

Tab. 4. Karstmodell für Gipse des Rötts (n = 240).

Deckgebirge	Mächtigkeit des verkarstbaren Gesteins	Mächtigkeit des Deckgebirges	festgestellte Primärdurchmesser
Oberer Röt (Ton-, Schluffsteine)	maximal 15 m, oft nur 3–4 m	5–30 m	1–14 m

Tab. 5. Karstmodell für Gipse/Anhydrite des Zechsteins (n = 414).

Gebirgseinheit	Mächtigkeit des verkarstbaren Gesteins	Mächtigkeit des überlagernden Gebirges	festgestellte Anfangsdurchmesser
Werra-Anhydrit unter Sandsteinen oder Wechselfolgen des Buntsandsteins	35–170 m; in Bohrungen sind Mächtigkeiten von 70–75 m bekannt	bankig, geklüftet, Schichteinfallen bis 5°, Deckgebirge: bis 300 m, meist bis 50 m, Auflockerungszone: 25–30 m	8–>80 m
Zechstein unter Ton-Schluffsteinen (Obere Letten bis Bröckelschiefer); Leine-Anhydrit unter Tonsteinen der Aller-Serie	etwa 35 m	flache Lagerung, dünnplattig, Schichten glimmerbelegt, Deckgebirge: 7 m, Auflockerungszone: 20–25 m	1–8 m
Leine-Karbonat des Z3 über Basal-Anhydrit A2 Basal-Anhydrit unter Zechsteinkalk unter Lösslehm	< 10 m	bankig, geklüftet, Deckgebirge: 15 m, Auflockerungszone: 5 m	2–8 m

3.1.1 Geomechanische Vorgänge und Bruchprozessmodellierung

Vor Ausbildung eines Hohlraumes im Untergrund liegt ein primärer Spannungszustand vor. Er ist das Ergebnis der Materialeigenschaften und der erdgeschichtlichen Entwicklung eines Gebirgsbereiches. In der Praxis wird er als das Verhältnis der vertikalen und horizontalen Spannungsanteile im Gebirge und deren Richtungsverteilung verstanden. Der vertikale Spannungsanteil σ_1 ergibt sich aus der Überlagerung

$$\sigma_1 = \gamma' \cdot M_D \quad [\text{kN/m}^2] \quad (\text{Gleichung 2})$$

Der horizontale Spannungsanteil (σ_2, σ_3) ist eine Folge der seitlichen Einspannung des Überlagerungsgewichtes und beträgt für den vereinfacht angenommenen Fall eines elastisch-isotropen Spannungs-Dehnungsverhaltens:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 \cdot K_0 \quad [\text{kN/m}^2] \quad (\text{Gleichung 3})$$

Dabei ist K_0 definiert als der Ruhedruckbeiwert mit

$$K_0 = 1 - \sin \varphi' \quad (\text{Gleichung 4})$$

Bei Ausbildung eines unterirdischen Hohlraumes durch Lösung und erosive Wirkung des Wassers geht der primäre in den sekundären Spannungszustand über (MÜLLER-SALZBURG 1978), wobei Spannungsumlagerungen und Massenverlagerungen eintreten. Zu den Spannungsumlagerungen gehören zunächst die aus der Überlagerung resultierenden Spannungen, die sowohl in Längsrichtung als auch tangential um den Hohlraum herum abgetragen werden und damit zu lokalen Spannungskonzentrationen führen (Abb. 3).

Die heute in der Praxis üblichen klassischen Vorstellungen für Spannungsverteilungen im Gebirge basieren meist auf Gewölbebelastungen und sind im Allgemeinen aus dem Hohlraumbau abgeleitet. Für die Spannungsbetrachtung über und um Hohlräume können als Analogieschluss die Untersuchungen im Tunnelvortrieb herangezogen werden.

Die beginnende Auflösung des Gesteins resultiert in der Entstehung von immer größer werdenden Hohlräumen. Bei Überschreiten der Festigkeit im Deckgebirge kommt es zur Instabilität des Hohlraumgewölbes mit einem resultierenden Verbruch der Decke und dem Bestreben, ein stabiles Gewölbe auszubilden. Dem Durch-

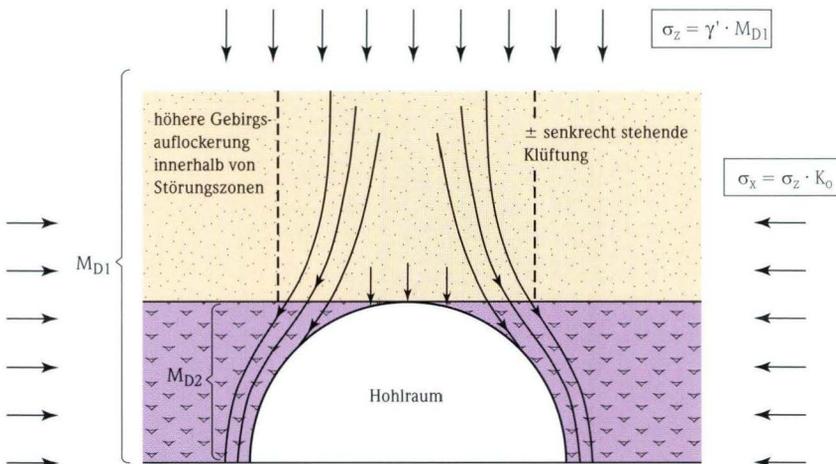


Abb. 3. Spannungsverteilung in der Umgebung eines kreisförmigen Hohlraumes.

bruch bis zur Oberfläche geht ein diskontinuierlicher und unstetiger Verbruchvorgang am Gewölbe des Hohlraumes voraus.

Druck- und Zugfestigkeiten des Gebirges können überschritten werden, und der Bruchzustand tritt ein. Der Hohlraum wird damit von einer verspannten „schützenden Hülle“ umgeben, die erfahrungsgemäß höhere Spannungen ertragen kann. In diesem ringförmigen Tragkörper entsteht ein Druckgefälle, das den überlagernden Gebirgsdruck zum großen Teil vom Hohlraum fernhält. Das Gewölbe über einem Hohlraum ist damit definiert als der sich selbst einregelnde, ringförmig verlaufende geometrische Ort erhöhter Materialspannungen, in welchem sich die Spannungsumlagerungen in dreiachsigen Spannungszuständen materialentsprechend stabilisiert haben. Diese Spannungsumlagerungen lösen Verformungen im Gebirge aus, die in erster Linie von der Spannungsverteilung und dem Verformungsmodul des Gebirges abhängig sind.

Die Spannungsumlagerung bzw. die seitliche Spannungsausbreitung ist in hohem Maße vom Trennflächengefüge und dem Einspannungs- bzw. Auflockerungszustand des Gebirges abhängig. Auf steil stehenden offenen Trennflächen, wie dies bei der Begrenzung von Schloten der Fall ist, findet keine oder nur geringe Übertragung von Normalspannungen statt. Damit ist zum einen die Spannungsausbreitung stark eingeschränkt, zum anderen fällt die Scherfestigkeit bei ungenügender Normalspannung sehr stark ab, und dementsprechend ist auch die Restscherfestigkeit minimal. Lokale Gebirgsauflockerung und das steile Trennflächengefüge bewirken daher Spannungskonzentrationen am und um den Hohlraumrand, die zusammen mit dem auflockerungsbedingten niedrigen Verformungsmodul entsprechende Deformationen zur Folge haben und bei Überschreiten der Gebirgsfestigkeit Bruchvorgänge auslösen können, die sich an der Geländeoberfläche als Erdfälle zeigen.

Der Vorgang der Bruchdeformation und die erzeugte oberirdische Form sind von der Tiefenlage und Größe der Hohlräume, den geomecha-

nischen Verhältnissen einschließlich der strukturellen Eigenschaften sowie der karsthydrologischen Situation des Deckgebirges abhängig. Den Gewölbehochbruch ohne Begrenzung seitlicher vertikaler Trennflächen zeigt Abb. 4. Der Gewölbehochbruch in dieser Form wurde in Hessen jedoch noch nicht nachgewiesen.

Im Gegensatz zum genannten Gewölbebruchmodell wird für die Bruchmodellierung in Hessen der progressive Bruch postuliert. Er wurde aufgrund von Geländebefunden, Karten- und Gutachterausswertungen sowie durchgeführten Orientierungsanalysen nachgewiesen. Der Bruch beim progressiven Hochbruch findet entlang vorgegebener Trennflächen statt. Das Gebirge bricht kamin- oder schlotförmig an präexistente Trennflächen ohne Ausbildung eines Senkungsfeldes mit Bruchwinkelbegrenzung nach oben (Abb. 5). Bei ständigem Nachbrechen der Firste und der in den Hohlraum ausragenden Schichten unter Ausnutzung der Vertikalklüftung kommt es zur Ausbildung einer Gewölbewirkung in der horizontalen Querschnittsebene, bei der die Ringspannungen des horizontalen Gebirgsdruckes den schlotförmigen Hohlraum standfest erhalten.

Folgende Voraussetzungen liegen vor:

- Sehr gute Wasserzirkulation bis in die Tiefe der verkarstbaren Gesteine entlang vertikaler Trennflächen.
- Das von der saxonischen Bruchtektonik beanspruchte triassische Gebirge hat eine allgemeine Auflockerung erfahren. Hierdurch erhöht sich die Teilbeweglichkeit von Kluffkörpern. Die Gebirgs- und Verbandsfestigkeiten des Gebirges sind dadurch stark herabgesetzt. Verformungsmodule sind auflockerungsbedingt niedrig. Es ergibt sich eine größere Destabilität des Hohlraumgewölbes.
- Auf steilstehenden offenen Trennflächen werden nur geringe bis keine Normalspannungen übertragen. Die Scher- und Restscherfestigkeiten fallen sehr stark ab. Die seitliche Spannungsverlagerung ist stark eingeschränkt. Spannungskonzentrationen ergeben sich vor

allem oberhalb des Hohlraumes. Die Festigkeiten des Gebirges werden dadurch oberhalb des Hohlraumes schneller überschritten.

Die Kombination der genannten Faktoren erklärt das Zusammentreffen der Erdfälle des bedeckten Karstes in Hessen mit Störungen, Verwerfungen und dem vorherrschenden Trennflächengefüge, die bereits während der saxoni-schen Gebirgsbildung angelegt wurden. Eine zusätzliche Gebirgsschwächung wurde durch die

salztektonischen Bruchprozesse im Gebirge hervorgerufen.

Die Verkarstung im Festgestein mit anschließendem Hochbruch ist als diskontinuierlicher Prozess zu verstehen. Die eigentliche Verkarstung und der Hochbruch bis zum Durchbruch an die Erdoberfläche sind zeitlich stark versetzt. Vor allem kann der Hochbruch an härteren Gesteinspartien zum zeitlichen Stillstand kommen. Wird die Gewölbewirkung eines derartigen Ge-

Eintretender Erdfall, wenn $V_{\text{final}} = V_{\text{primär}} \cdot V_{\text{aufgelockert}}$

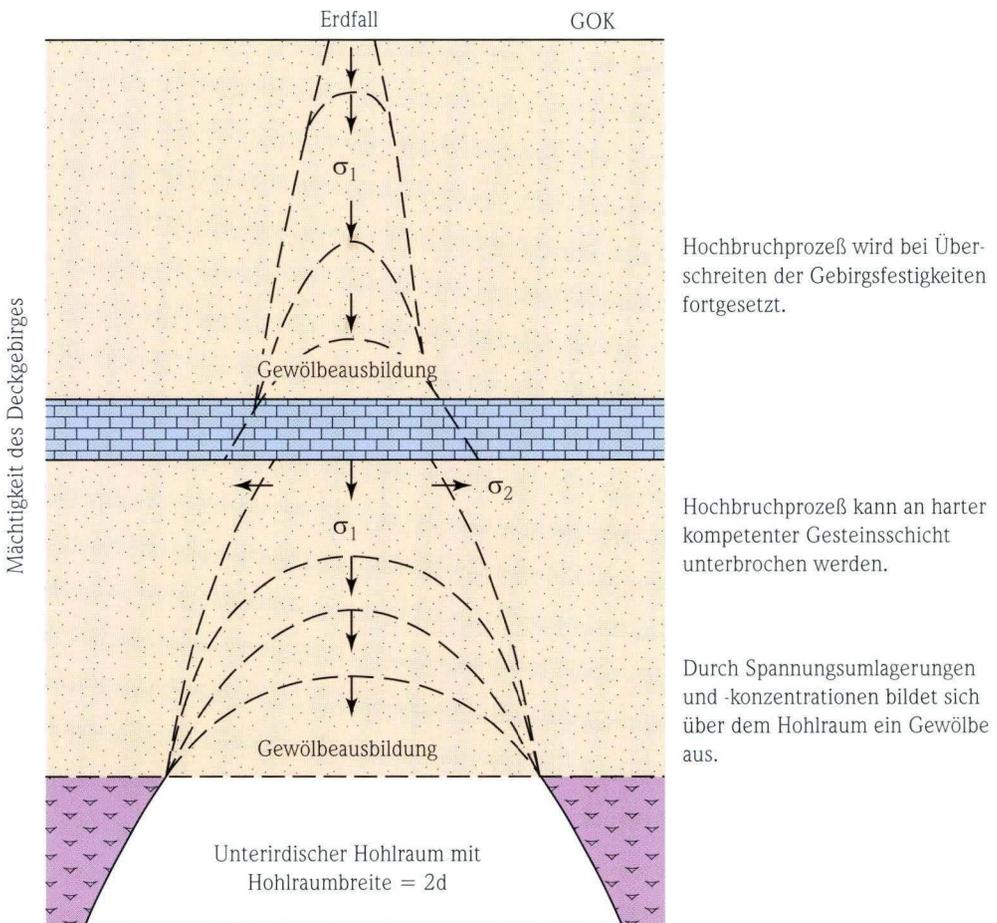


Abb. 4. Diskontinuierlicher Gewölbehochbruch in einem Festgebirge.

steins überschritten, so kommt es zum Verbruch der „tragenden Decke“, und der Hochbruch setzt sich nach oben fort. Insgesamt kann sich das Gebirge in vertikaler Richtung frei ent-

spannen, nicht aber in horizontaler Richtung. Der eigentliche Durchbruch erfolgt daher in der Regel plötzlich nach Verbruch der letzten tragenden Gesteinsbank.

Erdfall, bei $V_{\text{final}} = V_{\text{primär}} - V_{\text{aufgelockert}}$

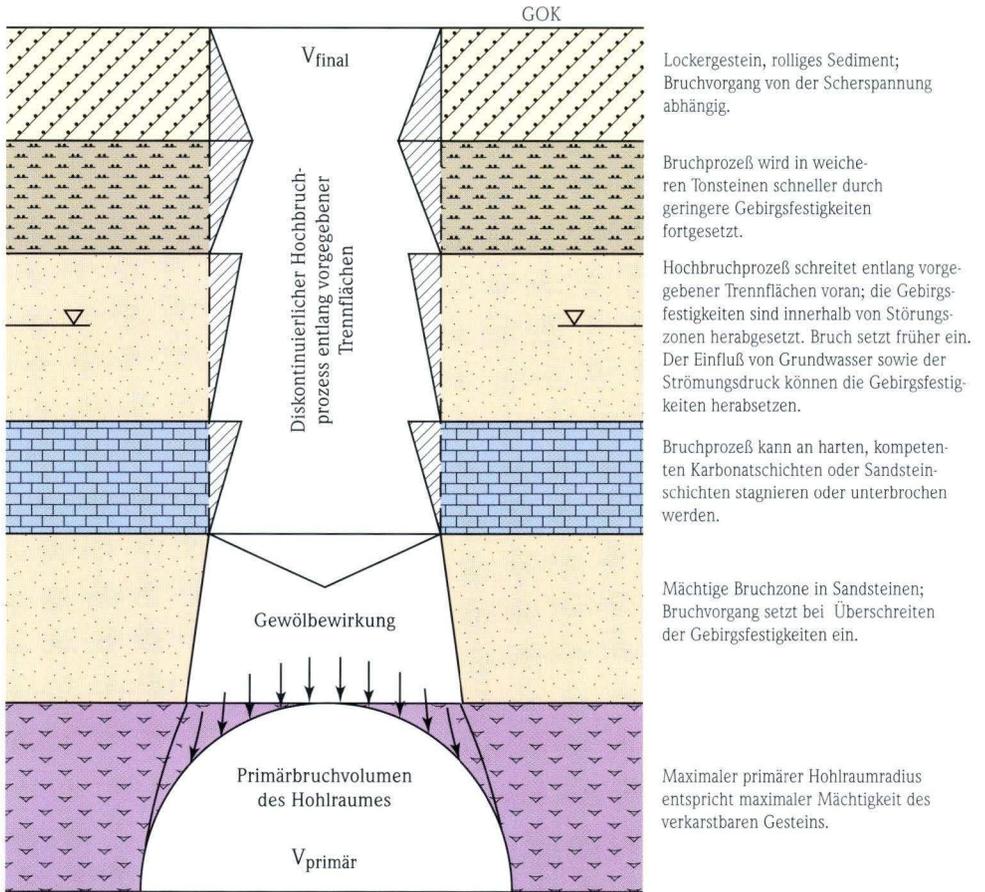


Abb. 5. Progressiver Hochbruchprozess im Festgebirge (mesozoische Schichtenfolge) entlang vorgegebener vertikaler Trennflächen.

Die Diskontinuität liegt begründet in den verschiedenen Festigkeiten der einzelnen Schichten und dem variablen Spannungsverformungsverhalten von spröden und plastischen mesozoischen Gesteinsfolgen, wie dies in den folgenden Kapiteln vorgestellt wird.

3.1.2 Festigkeitseigenschaften und Spannungs-Verformungsverhalten

Ein Gebirge reagiert unterschiedlich auf den Hohlraum, je nachdem ob eine geringe oder hohe Festigkeit vorliegt oder ob sich das Material spröde oder zäh verhält.

Zähes Material ist zu größeren Massenumlagerungen, größeren Fließwegen und dadurch oft zu bruchloser Reaktion befähigt. Sprödes Material speichert zunächst Energien und zeigt sich eine Zeit lang unter nur geringen Formänderungen standfest, bricht aber dann plötzlich durch.

Zur Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften mussten Laborversuche durchgeführt werden, deren Ergebnisse mit Erfahrungswerten auf die Gebirgsfestigkeiten umgerechnet wurden.

Das Spannungs-Verformungs-Verhalten wird für spröde Sandsteine des Buntsandsteins und für plastische Tonsteine mit deutlich geringeren Gebirgsscherfestigkeiten, geringerer Kohäsion und geringerer Druckfestigkeit dargestellt. Die Zugspannungen und Wichten sind bei beiden Gesteinen vergleichbar (Tab. 6).

Zur Bestimmung des Mohr'schen Bruchkriteriums als Grenzbedingung für Einsetzen von Fließen oder Brüchen

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin\phi' + 2c' \cdot \cos\phi' \text{ (Gleichung 5)}$$

ist die Kenntnis von Gesteins- und Gebirgsparametern erforderlich. In Hessen können folgende Gesteine mit sprödem und visko-plastischem Verhalten unterschieden werden:

Gesteine mit sprödem Verhalten:

- Sandsteine (Calförde- und Solling-Folge),
- Kalksteine (Wellen-, Ceratiten-, Trochitenkalk, Zechsteinkarbonat des Z3, Corbicularschichten).

Gesteine mit visko-plastischem Verhalten:

- Ton-Schluffsteine (Allerserie, Obere Letten, Bröckelschiefer, Tonsteine des Oberen Röts).

Für die Festigkeitsuntersuchungen wurden beispielhaft für sprödes Materialverhalten Sandsteine der Calförde-Folge und für visko-plastisches Materialverhalten Tonsteine des Oberen Röts verwendet. Die Auswahl der Gesteine richtete sich nach dem häufigsten Auftreten typischer Gesteinsserien in Hessen im Hinblick auf die Karstproblematik.

Für die Ermittlung der beim Bruchprozess herrschenden Bruchbedingungen und den allgemeinen Gebirgskennwerten wurde für die einzelnen Gesteinsarten je eine Gesteinsserie ausgewählt. Im Labor des HLUg wurden an den ungestörten Gesteinsproben einaxiale Druckversuche, Triaxialversuche sowie Spaltzugversuche vorgenommen. Die Anzahl der Probenprüfungen für die einzelnen Gesteinsserien wurde über den Variationskoeffizienten ($V \leq 30\%$) gesteuert. Im Allgemeinen liegen die Variationskoeffizienten sehr niedrig, so dass die arithmetischen Mittelwerte als verlässlich angenommen werden können.

Die im Labor gewonnenen Festigkeitsparameter der Gesteinsserien wurden auf die Gebirgsfestigkeiten nach Erfahrungswerten umgerechnet. Die umgerechneten Werte gibt die Tab. 6 wieder.

Innerhalb der ersten Versuchsreihe lagen die Variationskoeffizienten für Sandsteine der Calförde-Folge für die Zugfestigkeit bei 48,6% und für die Kohäsion bei 34,6%, so dass hier noch zwei weitere Versuche durchgeführt werden mussten. Für beide Parameter wurde je der niedrigste Parameter als Ausreißer eliminiert. Nach erneuter statistischer Auswertung sind die Variationskoeffizienten abgesunken, so dass die Ergebnisse als repräsentativ angenommen werden können. Für die Corbicularschichten wurde auf eine statistische Absicherung verzichtet, da hier nur zwei Versuchsproben für die Laboruntersuchung zur Verfügung gestanden haben. Beide Proben zeigten jedoch sehr einheitliche Labor-

Tab. 6. Ermittelte Gebirgskennwerte zur Charakterisierung des Bruchverhaltens über Hohlräumen.

Gebirgseinheit	Einaxiale Druckfestigkeit σ_D [MN/m ²]	Spaltzugfestig- keit σ_Z [MN/m ²]	Triaxiale Scherfestigkeit		Wichte γ [kN/m ³]
			Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]	
miozäner Kalk- mergel /Corbicula- schichten, n = 2	10,0; 24,0	0,2; 0,3	36,0; 42,0	10,0	26,6
Kalkstein (Ceratitenkalk), n = 6	20–36	0,8–1,6 Kalkmergel: 0,1–0,3	35–45	90–110	26–28
arithmetischer Mittelwert \bar{x}	28,5	1,1	39,8	100	27,0
Standard- abweichung s	5,1	0,3	3,3	8	0,8
Variations- koeffizient V [%]	17,9	24,8	8,3	8	3,0
Tonstein (Oberer Röt), n = 6	6–9	0,6–0,9	20–32	78–120	27–29
arithmetischer Mittelwert \bar{x}	7,5	0,75	26,5	97,2	28,0
Standard- abweichung s	1,1	0,1	4,0	13,9	0,8
Variations- koeffizient V [%]	14,8	14,8	15,1	14,4	2,9
Sandstein (Calförde-Folge), n = 10	15–20	1,0–2,7	23–37	370–510	27–28
arithmetischer Mittelwert \bar{x}	18	1,8	30	450	27,3
Standard- abweichung s	2,6	0,5	2,6	49,8	0,6
Variations- koeffizient V [%]	14,4	29,4	6,9	11,1	2,2
Anhydrit (Zechstein), n = 4	3–5	0,2–0,6	25–27	2–5	15–20
arithmetischer Mittelwert \bar{x}	4,5	0,75	26,4	25,8	97,0
Standard- abweichung s	1,1	0,1	0,41	4,26	15,4
Variations- koeffizient V [%]	14,6	14,6	1,4	16,5	15,9

Variationskoeffizient $V = (\text{Standardabweichung}/\text{arithmetischer Mittelwert}) \cdot 100$ [%]

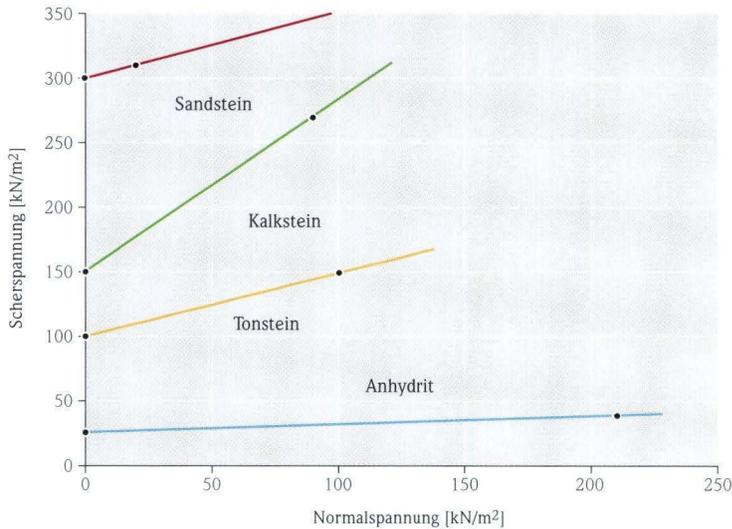


Abb. 6. Schergeraden der untersuchten Gesteinsserien.

ergebnisse hinsichtlich der untersuchten Gesteinsparameter. Da für das Gebirgsbruchverhalten die Gebirgskennwerte von Bedeutung sind, wurden diese nach PRINZ (1997) aus den Gesteinsfestigkeitswerten umgerechnet. In Tab. 6 sind bereits die aus der Gesteinsfestigkeit umgerechneten Gebirgsdruck- und Zugfestigkeiten dargestellt. Dabei liegen Gebirgsfestigkeiten für Tonsteine bei etwa dem 0,4-fachen der Gesteinsfestigkeit und für Sand- und Kalksteine bei dem 0,1-fachen. Die teilweise sehr porösen miozänen Kalkmergel der Corbículaschichten weisen gegenüber den Ceratitenkalken deutlich geringere Druck- und Zugfestigkeiten auf.

Zum Vergleich der Festigkeitseigenschaften der untersuchten Gesteinsserien dienen Abb. 6 und Abb. 7. In Abb. 6 sind die Schergeraden der verschiedenen Gesteinsserien aufgetragen. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass die Scherfestigkeitsparameter Reibungswinkel φ' und Kohäsion c' vom Anhydrit über Tonsteine bis zu den Kalksteinen und den Sandsteinen deutlich ansteigen, wodurch sich insgesamt ein schnellerer Brucheintritt bei den Anhydriten

und Tonsteinen gegenüber den Sand- und Kalksteinen ableiten lässt. Hieraus lässt sich ebenfalls ableiten, dass Hochbruchprozesse im Bereich von Kalksteinen oder Sandsteinen zeitlich schneller unterbrochen sind oder stagnieren, während dagegen bei den Tonsteinen und Anhydriten das Mohr'sche Bruchkriterium durch die geringeren Scherfestigkeitsparameter deutlich schneller erfüllt ist. Die im Labor ermittelten Gesteinsfestigkeitsparameter stimmen gut mit Literaturwerten, z.B. PRINZ (1997) überein.

Die Schergeraden sind Grenzgeraden, die den Beginn des Bruchvorganges charakterisieren. Dies bedeutet, dass das Einsetzen des Bruchvorganges im Gebirge von den Scherfestigkeiten abhängt.

Aus der Abb. 7 lässt sich durch das Verhältnis Druckfestigkeit : Zugfestigkeit die Sprödigkeit eines Gesteins ableiten. Bei sprödem Verhalten folgt auf nur geringe elastische Verformung der Bruchvorgang. Bei zähem (duktilen) Bruchverhalten treten vor dem Bruch meist große plastische Verformungen auf. Allgemein gelten in der Literatur Gesteine mit einem Verhältnis $\sigma_D/\sigma_Z > 10 : 1$ als spröde und $< 10 : 1$ als zäh.

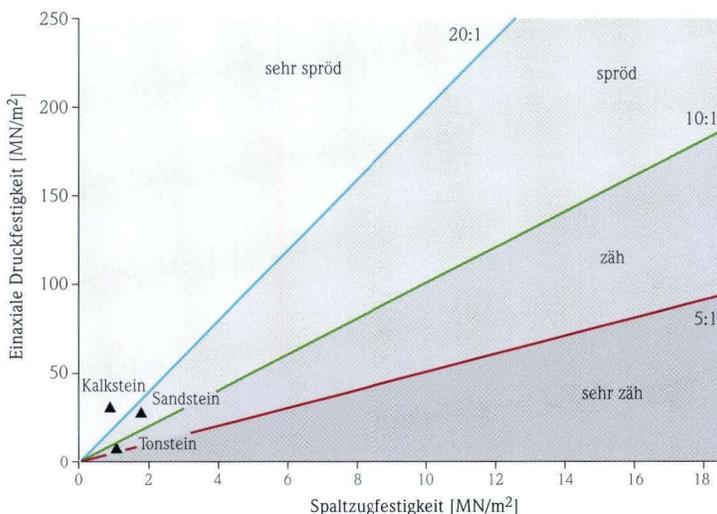


Abb. 7. Sprödes bzw. zähes Verhalten der untersuchten Gesteinsarten in Abhängigkeit vom Verhältnis σ_D/σ_Z .

Nach dieser Einteilung sind die untersuchten Anhydrite und Tonsteine des Oberen Rötts durch zähes Verhalten zu charakterisieren. Die Sandsteine der Calförde-Folge sowie die Ceratitenkalke weisen sprödes bis sehr sprödes Verhalten auf. Während die Ceratitenkalke gegenüber den Sandsteinen höhere Druckfestigkeiten aufweisen, liegen die Zugfestigkeiten hier etwas niedriger.

Die den Gesteinen innewohnenden Festigkeiten werden einer Beanspruchung mit erhöhten σ_1 - und σ_3 -Spannungen unterworfen.

Abb. 8 zeigt das Mohr'sche Bruchkriterium für Sandsteine der Calförde-Folge mit sprödem Verhalten. Als Scherfestigkeitsparameter wurden die arithmetischen Mittelwerte für Gebirge angesetzt.

Die σ_1 -Spannungsanteile ergeben sich aus der vertikalen Überlagerungshöhe und resultieren als Druckspannungen, die auf den Hohlraum wirken. Durch die Hohlraumbildung werden sich erhöhte Druckspannungen einstellen. Wie am Beginn des Kapitels beschrieben, lassen sich in zahlreichen Stollen erhöhte Firstdrücke beobachten, die mit einer ausschließlichen Überlage-

rung nicht zu erklären sind. In dieser Arbeit werden die vertikalen Spannungsanteile vereinfacht aus der Überlagerung des Deckgebirges berechnet. In der Natur ist jedoch von höheren σ_1 -Spannungen auszugehen. Der horizontale Spannungsanteil $\sigma_{2,3}$ wird aufgrund des unterirdischen Hohlraumes als Zugspannung angesetzt. Nach MÜLLER-SALZBURG (1978) wird dies mit dem Ausquetschen des gezogenen Felskörpers zum Hohlraumschwerpunkt begründet, was bedeutet, dass sich die Differenz einer erhöhten Zusatzspannung um die Hohlraumkontur gegen den Hohlraumschwerpunkt als Zugspannung abzeichnet. Die Grundlage für das Mohr'sche Bruchkriterium bilden die Scherfestigkeitsparameter innere Reibung und Kohäsion, aus denen sich die für den Sandstein gültige Schergerade ergibt. Die zu den jeweiligen σ_1 -Spannungsanteilen zugehörigen Zugspannungsanteile wurden graphisch ermittelt. Aus den Mohr'schen Spannungskreisen kann die zur jeweiligen vertikalen Spannung gehörige Zugspannung abgelesen werden. Es wird deutlich, dass bei zunehmender Überlagerungshöhe des Gebirges über dem Hohlraum und damit ebenfalls steigendem vertikalem

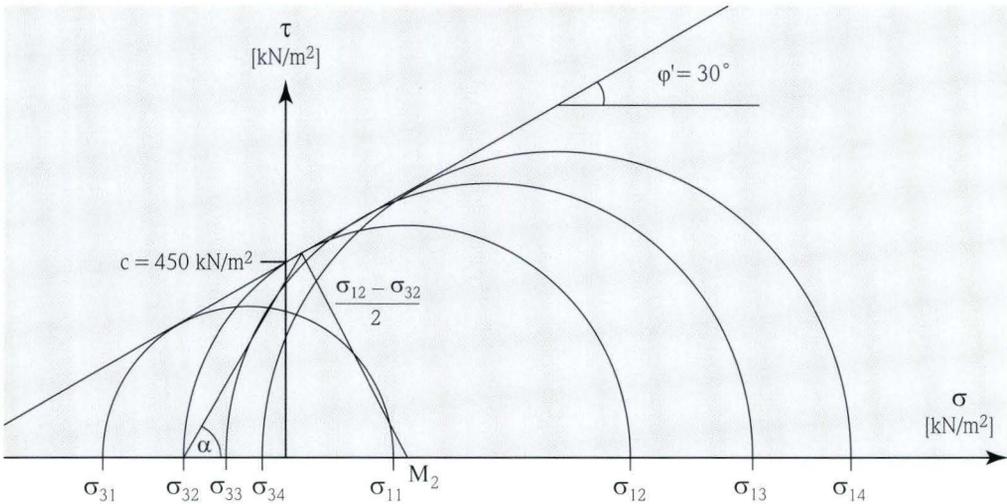


Abb. 8. Mohr'sches Bruchkriterium für spröde Sandsteine der Calförde-Folge für Überlagerungshöhen von 10, 30, 40 und 50 m. Die für die Berechnung angesetzten Scherparameter wurden in Triaxialversuchen im Labor ermittelt ($c' = 450 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 30^\circ$, $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$).

Spannungsanteil σ_1 die für den Eintritt des Bruches erforderliche Zugspannung absinkt.

Da die ermittelten Schergeraden Grenzgeraden darstellen, legen sie den Zeitpunkt des Einsetzens des Bruchvorganges fest. Der Vorgang des Bruchvorganges ist damit abhängig von den Scherfestigkeiten.

Das Mohr'sche Spannungsdiagramm zeigt ebenfalls die deutliche Abhängigkeit von der Größe der Gebirgsscherfestigkeiten. Verringert sich die Kohäsion (z.B. entlang von Trennflächen) oder die Scherfestigkeit (z.B. Wirken der Restscherfestigkeit entlang von Störungszonen), so tritt der Bruchzustand bereits bei niedrigeren wirksamen Spannungen ein. Dies wirkt sich beispielhaft bei einer geringeren Gebirgsüberlagerung aus. Bei starker Gebirgsauflockerung verringern sich zudem die Druck- und Zugfestigkeiten.

Bereits geringe wirksame Zugspannungen reichen zur Initialisierung des Bruchzustandes des hangenden Gebirges mit Ausbildung eines Gewölbes über Hohlräumen aus. Bei steigender Überlagerungshöhe nehmen zudem die Vertikalspannungen zu.

Abb. 9 zeigt das Mohr'sche Spannungsdiagramm für Tonsteine mit geringeren Gebirgsfestigkeiten, wodurch sich im Gebirge ein deutlich schnellerer Bruch mit insgesamt geringeren notwendigen Druck- und Zugspannungen ableiten lässt. Das Bruchkriterium wird für die Tonsteine des Oberen Rötis dargestellt, da sie ein typisches visko-plastisches bzw. zähes Verhalten hinsichtlich von Druck- und Zugfestigkeit aufweisen. Als Scherfestigkeitsparameter wurden wiederum die arithmetischen Mittelwerte aus den Laborergebnissen (umgerechnet auf Gebirge) verwendet.

Durch geringere wirksame Kohäsion und Reibungsfestigkeit wird der Bruchzustand bereits bei geringeren wirksamen vertikalen Spannungen und damit Überlagerungshöhen und Zugspannungen im Untergrund initiiert. Ferner wurden im Labor die niedrigeren Druck- und Zugfestigkeiten der Tonsteine gegenüber den Sandsteinen der Calförde-Folge belegt.

Mittels Betrachtung der Festigkeitseigenschaften sowie der Mohr'schen Bruchkriterien ist nachgewiesen worden, dass Tonsteine über Hohlräumen aufgrund ihrer geringeren Gebirgs-

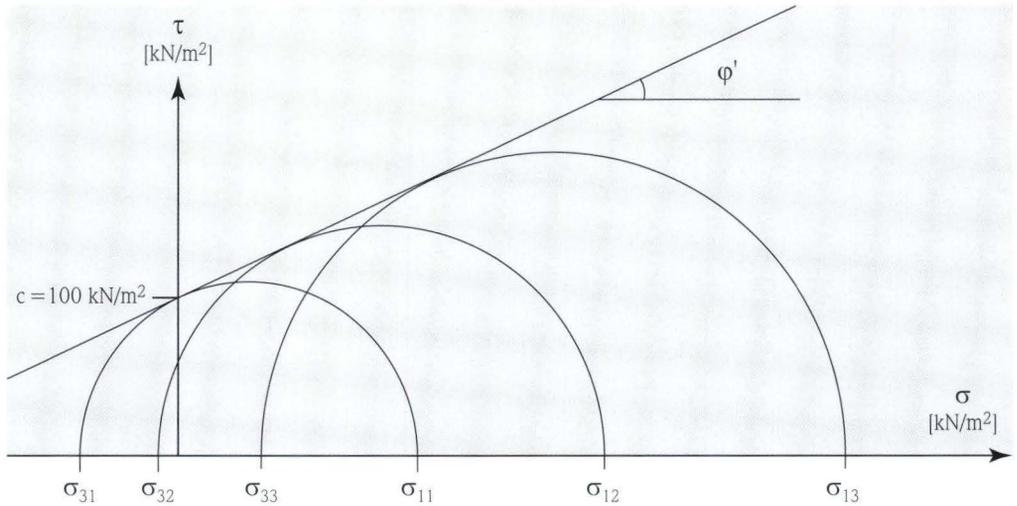


Abb. 9. Mohr'sches Bruchkriterium für plastische Tonsteine des Oberen Röt für Überlagerungshöhen von 5, 10 und 15 m. Die für die Darstellung angesetzten Scherparameter wurden in Triaxialversuchen im Labor ermittelt ($c' = 100 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 27^\circ$, $\gamma' = 28 \text{ kN/m}^3$).

festigkeiten sowie den für die Bruchinitiierung erforderlichen kleineren Spannungsanteilen schneller nachbrechen als die Sandsteinserien der mesozoischen Schichtenfolge.

Insgesamt sind über Hohlräumen bereits geringe wirksame Zugspannungen für das Einsetzen des Bruchzustandes im Gebirge ausreichend. Dies erklärt, dass schon bei geringen Überlagerungshöhen des Festgebirges über dem Hohlraum Erdfälle eintreten. Bei geringeren Überdeckungsmächtigkeiten setzt die Gebirgsauflockerung (auch Hangzerreißung) zusätzlich die Gebirgsfestigkeitsparameter herab. In Oberflächennähe wirkt zufließendes Wasser in Trennflächen zusätzlich scherfestigkeitsabmindernd und gleichzeitig erosiv.

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass Tonsteine über Hohlräumen schneller brechen, dafür aber durch wesentlich geringere Deckgebirgsmächtigkeiten über Röt-Tonen geringere Erdfalldurchmesser zu erwarten sind. Ferner sind im Modell Werra-Anhydrit unter Sandsteinen die Mächtigkeiten des löslichen Anhydrits mit teils $> 70 \text{ m}$ sehr viel höher als

in den übrigen Tonstein-Modellen. Hiermit erklären sich die deutlich größeren Erdfallgeometrien (in Durchmesser und Tiefe) der Erdfälle in den Sandsteinserien, die durch Verkarstung der Werra-Anhydrite entstanden sind. Als weiteres allgemeines Ergebnis wurde bewiesen, dass bei gleichen Überlagerungshöhen die erforderlichen Zugspannungen in plastischen Tonsteinen gegenüber spröden Sandsteinen deutlich niedriger sind.

3.1.3 Mathematisch-physikalisches Modell zur Hohlraumbruchmassenbilanz

Im Folgenden soll dargestellt werden, bei welchen Hohlraumradien und bei welchen Deckgebirgsmächtigkeiten das Gebirge bricht und das Erdfallstadium an der Geländeoberfläche eintritt. Der Zustand des Bruchvorganges charakterisiert die Grenzwertüberschreitung der Zug- und Druckspannung um den Hohlraum herum, die aus den Mohr'schen Spannungskreisen abgelesen werden können. Die Bruchmassenbilanzierung baut auf dem zylinderförmigen, an

senkrechte Trennflächen gebundenen Hochbruchprozess auf.

Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Der sich ausbildende Hohlraum (Primärhohlraum durch Zusammenbruch von Gesteinspeilern) wird eine Halbkugel aufgrund optimaler Spannungsaufnahme formen. Das Kugelvolumen beträgt

$$V = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3 \quad [\text{m}^3] \quad (\text{Gleichung 6})$$

- Der Hochbruch im Festgestein findet vorwiegend entlang vorgegebener, meist steilwandiger Trennflächen statt. Dies ist das Ergebnis von durchgeführten Orientierungsanalysen, Gutachtenanalysen sowie Geländebefunden mit senkrechten oder steilwandigen Bruchwänden (Modell: Progressiver Hochbruch).
- Das nachgebrochene Material, welches zum größten Teil im hochgebrochenen Schlot verbleibt, erfährt eine Auflockerung von 5–10%. Dieses aufgelockerte Mehrvolumen wird im unterirdischen Hohlraum aufgenommen. Die Auflockerung wird aus Erfahrungswerten nach FLOSS (1974) angesetzt.
- Bricht der Erdfall bis zur Oberfläche mit einem definierten Finalvolumen durch, so muss dieses Volumen mit Einrechnung der o.g. Auflockerung vom unterirdischen Primärhohlraum aufgenommen werden. Das heißt, dass eine Massenminderung im eigentlichen Schlot um dieses Finalvolumen stattgefunden haben muss und in den Hohlraum nachgesackt ist.
- Hieraus resultiert, dass der Primärhohlraum eine zusammengesetzte Größe aus dem Finalhohlraum (eigentlich erkennbarer Erdfall an der Erdoberfläche) und dem Auflockervolumen des Schlotes darstellt.
- Die maximalen Hohlraumgrößen und -höhen ergeben sich aus den Primärmächtigkeiten der löslichen Gesteine. Die maximalen Mächtigkeiten der Gipse und Anhydrite betragen im Mittleren Muschelkalk etwa 3 m, im Röt bis 15 m (meist 3 bis 4 m) und im Zechstein zwischen 10 und maximal 75 m in Ausnahmefällen.

- 90% aller Erdfälle besitzen primäre Erdfalldurchmesser bis 50 m. Die aufgeschlossenen Erdfälle weisen bei Durchbruch bis an die Geländeoberkante Tiefen zwischen 2 und 28 m auf. Die Gebirgsüberlagerung liegt zwischen wenigen Metern und 300 m.

Sind die Schloten nicht bis an die Erdoberfläche hochgebrochen, so berechnet sich der Primärhohlraum aus dem Auflockervolumen des gebrochenen Schlotes.

Das Primärvolumen $V_{\text{primär}}$ des unterirdischen Hohlraumes ergibt sich aus

$$V_{\text{primär}} = V_{\text{final}} + V_{\text{aufgelockert}} \quad [\text{m}^3] \quad (\text{Gleichung 7})$$

Es bestehen grundsätzlich bei Vorhandensein unterirdischer Hohlräume zwei Möglichkeiten zum Bruchverhalten von Schloten entlang vorgegebener Trennflächen:

- Ein Schlot bricht nicht durch, wenn

$$V_{\text{aufgelockert}} \geq V_{\text{primär}}$$

- Ein Schlot bricht durch, wenn

$$V_{\text{aufgelockert}} < V_{\text{primär}}$$

Die Differenz zwischen $V_{\text{aufgelockert}}$ und $V_{\text{primär}}$ ergibt das potenzielle Finalvolumen V_{final} des an der Oberfläche erscheinenden Erdfalles:

$$V_{\text{final}} = V_{\text{primär}} - V_{\text{aufgelockert}}$$

Im praktischen Fall wird der Primärhohlraum im Untergrund nicht bekannt sein. Dagegen lässt sich aus geologischen Profilen die Tiefe des verkarstbaren Gesteins abschätzen. Die Geometrie des Erdfalles und damit das Finalvolumen lassen sich im Aufschluss ermitteln.

Tab. 7 und Tab. 8 zeigen, bei welcher Deckgebirgsmächtigkeit ein Bruch über dem Hohlraum in Abhängigkeit vom Erdfalldurchmesser an der Geländeoberkante sowie von der Hohlraumhöhe eintritt. Die einzelnen Parameter ergaben sich zum einen aus Naturbefunden, zum anderen wurde die maximale Tiefe der Gebirgsbrüche nach MEIER (1978) berechnet. MEIER hat

Tab. 7. Berechnete und aus Naturbefunden belegte Grenzdeckgebirgsmächtigkeiten in Abhängigkeit von primärem Erdfalldurchmesser und Hohlraumhöhen zwischen 1 und 4 m.

primärer Erdfalldurchmesser	maximale Hochbruchhöhe (Hohlraumhöhe = 1 m)	maximale Hochbruchhöhe (Hohlraumhöhe = 2 m)	maximale Hochbruchhöhe (Hohlraumhöhe = 3 m)	maximale Hochbruchhöhe (Hohlraumhöhe = 4 m)
1 m	23 m	46,6 m	70 m	93 m
2 m	12 m	24 m	36 m	47,8 m
3 m	9 m	18 m	27 m	35,9 m
4 m	8 m	15,3 m	23 m	30,6 m
5 m	6,8 m	13,6 m	20,4 m	27,1 m
6 m	6,2 m	12,5 m	18,7 m	24,9 m
7 m	5,8 m	11,6 m	17,4 m	23 m
8 m	5,5 m	11 m	16,5 m	22 m
9 m	5,3 m	10,5 m	15,8 m	21 m
10 m	5,1 m	10,1 m	15,2 m	20,2 m
11 m	nicht bekannt	9,8 m	14,7 m	19,6 m
12 m	nicht bekannt	9,5 m	14,3 m	19 m
13 m	nicht bekannt	9,3 m	14,0 m	18,6 m
14 m	nicht bekannt	9,1 m	13,7 m	18,2 m

Tab. 8. Erforderliche Hohlraumhöhen bei definiertem primärem Erdfalldurchmesser und Deckgebirgsmächtigkeiten zwischen 50 und 300 m.

primärer Erdfalldurchmesser	Erforderliche Hohlraumhöhe			
	bei Gebirgsmächtigkeit = 50 m	bei Gebirgsmächtigkeit = 100 m	bei Gebirgsmächtigkeit = 200 m	bei Gebirgsmächtigkeit = 300 m
10 m	9,0 m	13,0 m	18,5 m	23,0 m
20 m	13,0 m	18,3 m	26,0 m	32,0 m
30 m	16,0 m	22,4 m	32,0 m	39,0 m
40 m	18,6 m	26,0 m	37,0 m	45,0 m
50 m	20,8 m	29,0 m	41,0 m	51,0 m
100 m	29,5 m	40,0 m	58,0 m	72,0 m

Berechnungsvarianten für verschiedene Bruchformen in Bergbaugebieten untersucht. Als Charakteristik für die gewählte Berechnungsformel werden senkrechte Bruchflächen über einem seitlich begrenzten halbkugelförmigen Hohlraum angesetzt. Damit ergibt sich ein zylinderförmiger Hochbruch. Die Grenzdeckgebirgsmächtigkeit für die Möglichkeit eines Hochbruches bis

zur Geländeoberfläche ergibt sich aus:

$$M_{\max} = h/(s'-1) \cdot (1 + h/(l \cdot \tan \varphi')) \quad [\text{m}]$$

(Gleichung 8)

Als Hochbruchform sei auf Abb. 5 (Hochbruchprozess entlang zylinderförmiger Trennflächen) verwiesen, die sich mit der theoretischen Bruch-

form von MEIER (1978) deckt. Hierbei wurde der Hochbruchprozess mit modellhaften Vereinfachungen angenommen. Es wird von einem homogenen Deckgebirge über dem Hohlraum, einem zylinderförmigen Hochbruch und einem kugelförmigen Hohlraum ausgegangen.

In der Natur muss selbstverständlich damit gerechnet werden, dass die Lage und Form von Karsthohlräumen sowie der Aufbau des Deckgebirges inhomogen ist. Die sinnvollen Vereinfachungen sind Voraussetzung für die Berechnung, wobei der zylinderförmige Hochbruch angelehnt ist an das Auftreten der Erdfälle entlang tieferreichender steiler Störungszonen. Die Annahme einer kreisförmigen Hohlraumkontur wird angelehnt an das Bestreben der Natur, stabile gewölbte Strukturen mit einer Verspannung des Gebirges auszubilden.

Die in Abb. 10 angeführten primären Erdfalldurchmesser und Hohlraumhöhen charakterisieren vor allem die Karstphänomene im Sulfatkarst des Rötts und Muschelkalkes. Größere Erdfalldurchmesser oder Hohlraumhöhen sind in diesen Karstmodellen in hessischen Karstverbreitungsgebieten nicht bekannt.

Die aufgeführten primären Erdfalldurchmesser decken ferner den prozentual höchsten Anteil der hessischen Erdfalldurchmesser ab.

Mit steigender Hohlraumhöhe nimmt die Grenzdeckgebirgsmächtigkeit erwartungsgemäß für einen Hochbruch stark ab. Bei gleicher Hohlraumhöhe und größeren primären Erdfalldurchmessern nimmt die maximale Tiefe des Hochbruches an die Geländeoberkante ab (Abb. 11).

Abb. 10. Maximale Hochbruchhöhe eines Hohlraumes an die Erdoberfläche bei aus Naturbefunden bekannten primären Erdfalldurchmessern und Hohlraumhöhen.

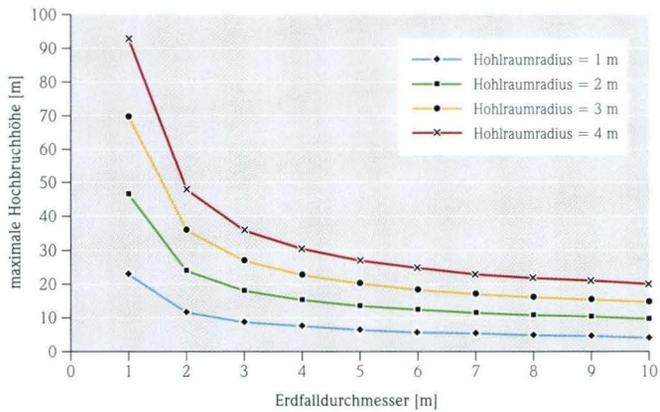
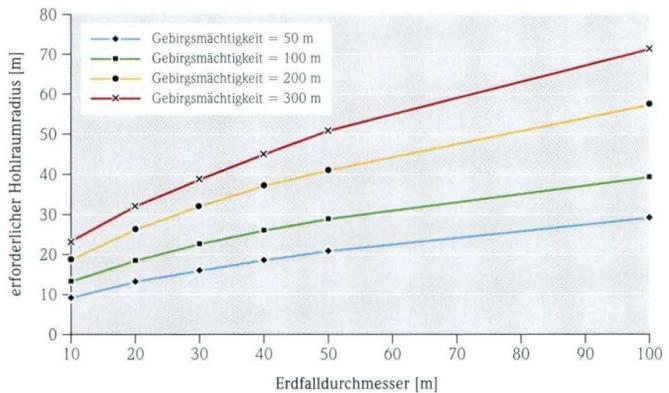


Abb. 11. Erforderlicher Hohlraumradius bei definierter Gebirgsmächtigkeit und primären Erdfalldurchmessern für den potenziellen Hochbruch an die Erdoberfläche.



Tab. 8 zeigt die erforderlichen Hohlraumhöhen bei 50 m, 100 m, 200 m und 300 m Überdeckung. Hierbei werden im von Festgestein bedeckten Karst 94 % aller in Hessen bekannten Karstphänomene von einem 50 m mächtigen Deckgebirge abgedeckt. Größere Deckgebirgsmächtigkeiten sind selten; höhere als 300 m sind bei den als Wolkenbrüche benannten Großerdfällen bei Trendelburg mit besonderen hydrochemischen Voraussetzungen bekannt. Die erforderlichen Hohlraumhöhen sind nach MEIER (1978) berechnet. Naturbefunde liegen aufgrund der großen Tiefen nicht vor.

Es zeigt sich deutlich, dass die in Hessen beobachteten größten Erdfalldurchmesser von 100 m sowie die höchsten Deckgebirgsmächtigkeiten von 300 m eine Hohlraumhöhe von etwa 72 m voraussetzen. Diese Größe entspricht den in Hessen im Untergrund bekannten verkarstbaren Gesteinsmächtigkeiten. Größere Mächtigkeiten als 75 m liegen im Werra-Anhydrit nicht vor. Damit stimmen die in Hessen angetroffenen primären Erdfalldurchmesser in Abhängigkeit von der Deckgebirgsmächtigkeit und natürlich bestimmten maximalen Hohlraumhöhen mit einem Rechenansatz nach MEIER (1978) überein.

Aus den Zusammenhängen ist ersichtlich, dass bei kleineren Hohlräumen und mit steigender Deckgebirgsmächtigkeit die Wahrscheinlichkeit des Durchbruches bis an die Erdoberfläche stark abnimmt. Bei Verkarstungen im hessischen Muschelkalk und Röt mit maximalen Hohlraumhöhen von 3 m und Mächtigkeiten des Deckgebirges von maximal 30 m liegen die Erdfalldurchmesser bei etwa 10 bis 14 m. Das Primärvolumen des Hohlraumes reicht in keiner Weise aus, das aufgelockerte Material des Deckgebirges aufzunehmen und schließlich noch einen Finalhohlraum an der Erdoberfläche auszubilden, damit ein größerer Schlot nach oben durchbrechen könnte.

Anfangsdurchmesser von Erdfällen > 14 m sind damit auf Verkarstungserscheinungen in den Zechstein-Anhydriten beschränkt. Hier ist zusätzlich mit deutlich größeren Abmessungen

der Erdfallgeometrie (in Radius und Tiefe) zu rechnen.

3.1.4 Interpretation der Naturbefunde

Typisch für den den Salzhang begleitenden Zechstein-Anhydritwall (Übergang zwischen Chlorid- und Sulfatfazies) sind die meist fossilen Einbruchschlote durch Verkarstung der Zechstein-Anhydrite. Diese sind teilweise bis 300 m, meist jedoch nur bis 50 m durch das Gebirge hochgebrochen.

Auf vielen Kartenblättern beträgt die Deckgebirgsmächtigkeit über dem verkarsteten Anhydrit maximal 50 m (GK 25, Bl. 4521 Liebenau, Bl. 4619 Mengerlinghausen, Bl. 4718 Goddelsheim, Bl. 4719 Korbach, Bl. 4720 Waldeck, Bl. 4725 Bad Sooden-Allendorf, Bl. 4820 Bad Wildungen, Bl. 4824 Hessisch-Lichtenau, Bl. 4825 Waldkappel, Bl. 4826 Eschwege, Bl. 4923 Altmorschen, Bl. 4925 Sontra, Bl. 4924 Seifertshausen, Bl. 5018 Wetter, Bl. 5025 Hönebach, Bl. 5123 Niederaula). Auf Bl. 4619 Mengerlinghausen sind Erdfälle im östlichen Kartengebiet bis Deckgebirgsmächtigkeiten von 50 m existent. Mit ansteigendem Deckgebirge nach Westen hin sind Erdfälle im Buntsandstein nicht nachgewiesen. Die Schlote sind entlang eines Bachbettes angeordnet, das einer tektonischen Störung folgt. Zirkulierende Wässer konnten in die Tiefe dringen. Durch die erosive Wirkung des fließenden Wassers ist der Buntsandstein in seiner Mächtigkeit oft stark, teilweise bis an seine Basis abgetragen worden. Daher sind Einbruchschlote häufig entlang von Bächen oder Trockentälern angeordnet.

Deckgebirgsmächtigkeiten bis 300 m liegen auf den GK 1 : 25 000, Bl. 5023 Ludwigseck (bis 300 m mit Erdfalldurchmessern von 20 bis 50 m), Bl. 5024 Rotenburg an der Fulda (150 bis 210 m), Bl. 5423 Großenlüder (200 m), Bl. 5425 Kleinsassen (140 m mit Durchmessern von 10 bis 50 m), Bl. 5523 Neuhoef (100 m mit Durchmessern von 20 m), Bl. 5524 Weyers (200 m mit Durchmessern von 30 bis 50 m) vor.

Eine Ausnahme bilden die auf Bl. 4422 Trendelburg bekannten Wolkenbrüche, die von HERRMANN (1972) sehr ausführlich beschrieben wurden und eine Verkarstung in 900 m Tiefe belegen. Er nennt als Entstehungsursache aufsteigende Sauerlingswässer, die sehr große Hohlräume geschaffen haben.

Insgesamt beträgt bei 94 % aller Erdfälle die maximale Deckgebirgsmächtigkeit < 50 m.

Viel stärker als im Oberflächenkarst zeigt sich im von Festgestein bedeckten Karst eine besonders deutliche Ausrichtung und Orientierung von Erdfällen entlang größerer Störungs- und Klüftzonen sowie entlang Trockentälern. Dabei sind die Erdfälle häufig entlang herzynisch streichender Bruchlinien und untergeordnet an rheinische Streichrichtungen gebunden (z.B. Bl. 5425 Kleinsassen).

Verkarstungserscheinungen durch Lösung von Röt- oder Muschelkalkgipsen im Untergrund sind auf den Karten 1 : 25 000, Bl. 4520 Warburg, Bl. 4521 Liebenau, Bl. 4619 Mengerhausen, Bl. 4621 Wolfhagen, Bl. 4721 Naumburg, Bl. 4723 Oberkaufungen, Bl. 4725 Bad Sooden-Allendorf, Bl. 4821 Fritzlar, Bl. 4824 Hessisch-Lichtenau, Bl. 4825 Waldkappel, Bl. 4826 Eschwege, Bl. 4923 Altmorschen, Bl. 4924 Seifertshausen, Bl. 4925 Sontra, Bl. 4927 Kreuzburg, Bl. 5123 Niederaula, Bl. 5224 Eiter-

feld, Bl. 5324 Hünfeld, Bl. 5424 Fulda, Bl. 5425 Kleinsassen, Bl. 5524 Weyers, Bl. 5622 Steinau und Bl. 5623 Schlüchtern bekannt und zeichnen den Verlauf des ehemaligen Verbreitungsgebietes nach. Wie bei den durch Zechsteinverkarstung entstandenen Schloten und Erdfällen sind sie eng an Störungen, Talverläufe und Klüftgefüge gebunden. Rezente Ereignisse im Muschelkalkkarst sind selten, was auf eine bereits starke Auslaugung der gipsführenden Schichten deutet.

Rezente Ereignisse treten besonders häufig auf, wenn verschiedene Verkarstungsfaktoren zusammen wirken, z.B. Absenkung des Grundwassers oder eine verstärkte Oberflächenwasserzufuhr durch Rodung von Wäldern (Bl. 4725 Bad Sooden-Allendorf, Weißenbach). Es wurden Senkungen von 10 cm/Jahr gemessen (BEYSCHLAG 1922). Erdfälle sind häufig entlang von Hängen in Erdfallgruppen angeordnet (z.B. Bl. 4621 Wolfhagen). Die Erdfallhäufigkeiten betragen im Röt bis zu 8 Erdfällen/km² (z.B. Bl. 4821 Fritzlar). Karstfördernd können auch Zuflüsse von kalkaggressiven Wässern aus hangenden basaltischen Gesteinen (z.B. Bl. 5622 Steinau und 5623 Schlüchtern) sein. Abb. 12 stellt das Ergebnis einer Orientierungsanalyse von auf Bl. 4925 Sontra vorkommenden Erdfällen in der Calförde-Folge dar.

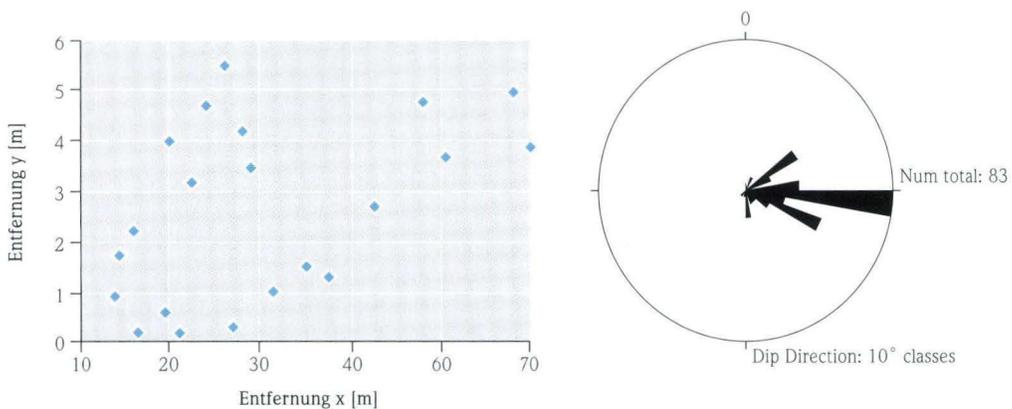


Abb. 12. Orientierungsanalyse für Erdfälle (n=21) in der Calförde-Folge auf Bl. 4925 Sontra. Die verkarsteten Zechsteinanhydrite liegen in einer Tiefe von 30 bis 50 m.

Die im Kluftrösendiagramm dominierenden vier Richtungen des Erdfallauftretens charakterisieren Störungsrichtungen sowie das vorherrschende Klufnetzgefüge. Damit ist der bestimmende Faktor bei diesem Erdfallmodell

- das Vorhandensein von größeren und weit in die Tiefe hinreichenden Störungen mit entsprechender Wasserwegsamkeit. Hieraus resultieren – im Gegensatz zum Oberflächenkarst – das häufig nur punktuelle Auftreten und die geringeren Häufigkeiten von Erdfällen.

Die Orientierung entlang von größeren tektonischen Störungszonen erklärt sich aus der bevorzugten Wasserzirkulation entlang Trennflächen bis in große Tiefe und aus der Verbandschwächung, der Erhöhung der Teilbeweglichkeit von Klufkörpern und aus der Herabsetzung der Gebirgsfestigkeiten entlang von Trennflächen. Längs der senkrechten Störungszonen fallen die durch die Hohlraumbildung erzeugten Zusatzspannungen ab und werden nicht in das seitliche Gebirge übertragen, so dass vorwiegend oberhalb des Hohlraumes mit sehr starken Spannungskonzentrationen zu rechnen ist.

Die durchgeführte Orientierungsanalyse dient im vorliegenden Verkarstungsmodell für eine Prognostizierung von Erdfällen entlang von größeren tektonischen Störungslinien und geht in die spätere Karstgefährdungskarte ein.

Während die durch Verkarstung der Röt- und Muschelkalkgipse hervorgerufenen Erdfälle Durchmesser bis 14 m aufweisen, betragen die Erdfalldurchmesser im Zechsteinkarst bis über 80 m. Abb. 13 zeigt die relativen Häufigkeiten der Erdfalldurchmesser im bedeckten Zechsteinkarst.

Durch Tiefenverkarstung der Zechsteinsulfate hervorgerufene Erdfälle besitzen maximale rezente Erdfallhäufigkeiten von 40 Erdfällen/km². Im Röt- und Muschelkalkkarst liegen die vergleichbaren Häufigkeiten bei maximal 30 Erdfällen/km². Diese lokalen Anhäufungen sind als Ausnahme anzusehen, da meist 1 bis 10 Erdfälle/km² beobachtet werden können.

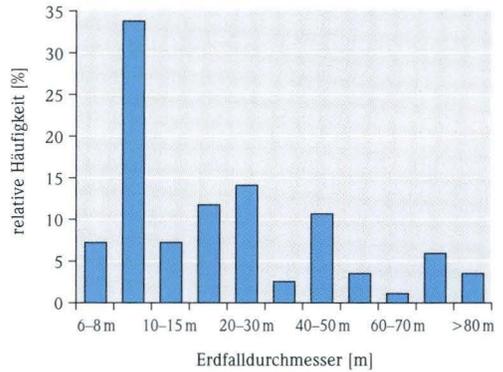


Abb. 13. Relative Häufigkeitsverteilung der primären Erdfalldurchmesser im von Festgesteinen bedeckten Zechsteinkarst (n = 737).

3.2 Erdfallmodellierung im seichten Karst

3.2.1 Geomechanische Vorgänge und Bruchprozessmodellierung

Beim Lockergebirge muss zwischen bindigen und nichtbindigen (rolligen) Gesteinen unterschieden werden. Durch das Nachbrechen entsteht im Gegensatz zum Festgestein kein stabiler Hohlraum, sondern das Lockermaterial rutscht in Abhängigkeit von den Scherparametern ab. Der Nachbruch hat im rolligen Material demzufolge die Form eines Trichters. Bei den bindigen Lockergesteinen ist die Form des Nachbrechens im Wesentlichen von der Kohäsion abhängig. Da bindige Sedimente Zugspannungen aufnehmen können, ist die Ausbildung eines stabilen Gewölbes möglich, und somit kann der Bruchvorgang zeitlich verzögert auftreten. Die Form entspricht nach FENK (1981) einer Zylinderform mit Übergängen zur Kegelform in Abhängigkeit von der Kohäsion (Abb. 14).

Nach FENK (1981) ist die relative Bruchwahrscheinlichkeit

$$P_B = \exp [0,08 (h_H - 15 \text{ m}) + 0,2 M_K + 0,17 (\max M_D)] \quad [\%] \quad \text{(Gleichung 9)}$$

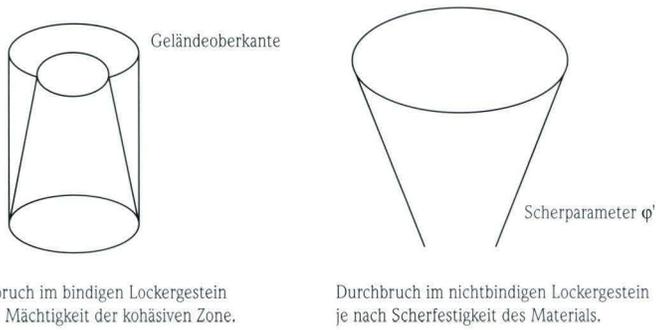


Abb. 14. Darstellung der für den Bruchprozess typischen Formen des Nachbruchs bis zur Geländeoberfläche im Lockergestein.

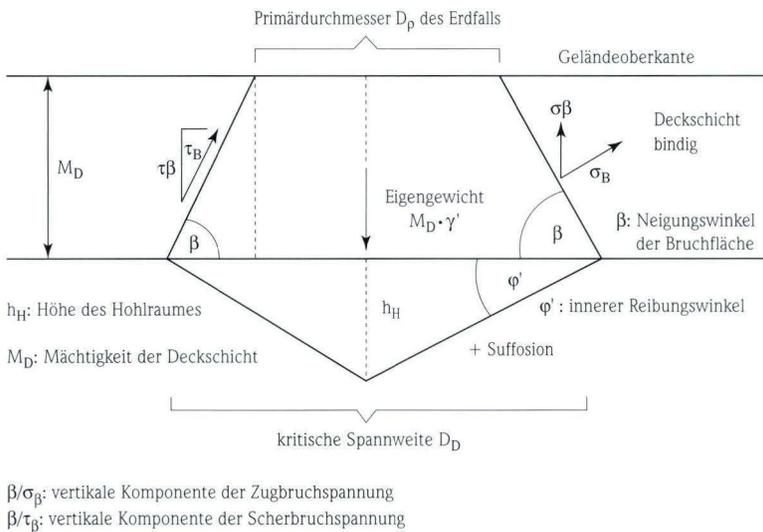


Abb. 15. Kreiskegelstumpfförmiger Durchbruch im bindigen Gestein bei Erfüllung des Mohr'schen Bruchkriteriums.

Es wird angenommen, dass die kritische Spannweite für die Einleitung des Bruchprozesses erreicht ist, wenn die durch das Eigengewicht des ausbrechenden Gewölbekerns bewirkten Zug- und Scherspannungen das Mohr'sche Bruchkriterium erfüllen.

Die kritische Spannweite D_D ergibt sich nach Abb. 15 aus

$$D_D = D_p + 2 M_D \cdot \cot \beta \quad [\text{m}] \quad (\text{Gleichung 10})$$

Der Bruchvorgang kann durch Änderung der Konsistenz der bindigen Sedimente beschleunigt werden. Ferner kann es durch Wasserströmung in den Sedimenten zu hydromechanischen Deformationen (innere Suffosions- und Erosionsvorgänge) kommen, wenn die Bodenarten dementsprechend empfindlich sind und ein kritisches hydraulisches Gefälle erreicht ist. Dabei wird sich in der Natur aufgrund des Bestrebens zur Ausbildung eines Gewölbes im Allgemeinen der kegelförmige Durchbruch zeigen.

Nach FENK (1981) erfolgt ein senkrechter Hochbruch bei einer sehr geringmächtigen Überdeckung des Hohlraumes durch bindiges Material oder generell bei überkonsolidierten Tonen. Grundvoraussetzung für das Erdfallmodell ist die Lage der verkarstbaren Gesteine direkt unter wasserdurchlässigen Lockergesteinsschichten. Die Mächtigkeit der Deckschichten liegt zwischen einem und vier Meter. Der Primärdurchmesser des Erdfalls ist nach Abb. 15 abhängig von der Spannweite des Hohlraumes, von der Mächtigkeit der Deckschicht und vom Neigungswinkel der Bruchfläche. Ist der Bruchwinkel β aus Geländebefunden nicht bekannt, so ergibt sich dieser nach dem 'Rankin'schen Bruchzustand' (in: PRINZ 1997) aus

$$\beta = 45 \pm \varphi'/2 \quad [^\circ] \quad \text{(Gleichung 11)}$$

Für die in Hessen am häufigsten beobachteten Primärdurchmesser $D_p = 1-4$ m sind die kritischen Spannweiten in Abhängigkeit von der Deckgebirgsmächtigkeit nach Gleichung 10 berechnet worden (s.a. Abb. 16).

Für senkrechte Bruchflächen sind die kritischen Spannweiten um etwa 1 m kleiner.

In den hessischen Verkarstungsgebieten bestehen die Deckschichten häufig aus Löss/Lösslehm oder Verwitterungslehm, d.h. aus mehr oder minder stark bindigen Sedimenten mit mäßiger Wasserdurchlässigkeit.

Folgende Prozesse spielen in diesem Erdfallmodell eine Rolle:

- Die verkarstbaren Gesteine liegen über der Vorflut. Die gelösten Stoffe können weggeführt werden. Oberflächenwasser kann in den verkarstbaren Untergrund eindringen.
- Die Lösung beginnt an Klüften; diese werden erweitert oder wachsen zu größeren Hohlräumen zusammen. Gleichzeitig geht die Verkarstung von oben her vonstatten, die mit einer geringen Auslaugung der hangenden Gesteinsdecke korrespondiert. Hierdurch erfahren die bindigen Sedimente eine leichte Senkung durch Ablaugung der verkarsteten Gesteinsoberkante.
- Es folgt das Stadium der inneren Suffosion und der inneren Erosion. Das Erdfallstadium ist im nichtbindigen Lockergestein erreicht, wenn ausreichend Material aus der Deckschicht in größere Hohlräume und Spalten abtransportiert wird (Bewegungsbeschleunigung durch Niederschläge). Durch die Fähigkeit der bindigen Sedimente, Zugspannungen aufnehmen zu können, erfolgt das Erdfallstadium erst nach Überschreiten ihrer Zugfestigkeit bzw. durch Konsistenzänderungen oder Fortsetzen des Suffosions- und Erosionsvorganges. Im Allgemeinen tritt damit der Erdfall im bindigen Sediment gegenüber rolligen Gesteinen zeitlich verzögert auf.

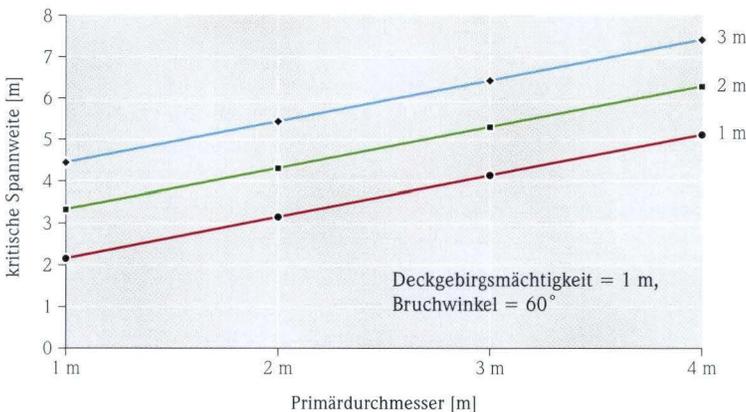


Abb. 16. Berechnete kritische Spannweiten in Abhängigkeit von der Deckgebirgsmächtigkeit zwischen 1 bis 3 m und den in Hessen am häufigsten vorkommenden Primärdurchmesser der Erdfälle.

Liegen im Untergrund entsprechende Hohlräume vor und werden diese von Lockergebirge mit Mächtigkeiten von 1 bis 4 m überdeckt, so treten Erdfälle im seichten Karst Hessens gemäß Gleichung 9 mit einer berechneten Bruchwahrscheinlichkeit von $P_B = 85$ bis 100 % ein.

Die in Hessen auskartierten rezenten Erdfälle im Karbonatkarst des Muschelkalkes sind ausschließlich auf Oberflächenkarst bzw. nackten oder aber z.T. seichten Karst mit Lockergesteinsdeckschichten von etwa 2 m Mächtigkeit zurückzuführen. Abb. 17 zeigt einen Erdfall in Willershausen (Bl. 4927 Creuzburg) mit etwa 2 m mächtiger Lockergesteinsüberdeckung. Der Erdfall erfolgte am 16.9.1998 nach mehrwöchigen Regenfällen. Abb. 18 zeigt das Ergebnis einer Rammsondierung innerhalb dieses Erdfalles.



Abb. 17. Erdfall (Durchmesser: 2,3 m) in Willershausen, Bl. 4927 Creuzburg, auf landwirtschaftlich genutzter Fläche durch Verkarstung der Ceratitenschichten. Die Tiefe des Erdfalls betrug 1,50 m (ADERHOLD 1998).

3.2.1.1 Festigkeitseigenschaften und Spannungs-Verformungsverhalten

Der Bruchprozess bzw. die kritische Spannweite ist in einer geringmächtigen Überdeckungszone aus Lockergestein erreicht, wenn die durch das Eigengewicht bewirkten Zug- und Scherspannungen das Mohr'sche Bruchkriterium für das entsprechende Gestein erfüllen:

Für die Bruchmodellierung wurden für den Löss- und Verwitterungslehm Bodenkennwerte zur Festigkeitscharakterisierung angesetzt, die aus 12 im Labor des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie durchgeführten einaxialen Druckversuchen und 12 Triaxialversuchen (CU-Versuch) ermittelt wurden.

Der Variationskoeffizient V stellt ein relatives Streuungsmaß zum Vergleich von Standardabweichungen aus Grundgesamtheiten dar

(HIPPMANN 1997). In Tab. 9 liegen die Variationsquotienten sehr niedrig, so dass die ermittelten Gesteinsparameter in ihrer Gesamtheit als repräsentativ angesehen werden können. Die ermittelten Ergebnisse entsprechen den für dieses Sediment typischen Werten. Die gewonnenen Festigkeitsparameter weisen zwar nach, dass bindiger Lösslehm keine große Gesteinsfestigkeit aufweist. Die Ergebnisse zur Zugfestigkeit zeigen aber, dass bindige Sedimente im Gegensatz zu den rolligen durchaus in der Lage sind, geringe Zugspannungen aufzunehmen. Hierdurch lässt sich ein zeitlich verzögerter Bruch über einem Hohlraum deuten. Die große Bandbreite bei der Kohäsion ist durch variable Wassergehalte und dem Anteil an Tonfraktion erklärbar. Für die Beschreibung des Mohr'schen Bruchkriteriums werden folgende Parameter ausgewählt:

- Druckfestigkeit σ_D : 27 kN/m²
- Zugfestigkeit σ_Z : 4,0 kN/m²
- Kohäsion c_1', c_2', c_3' = 8, 12, 18 kN/m²
- Reibungswinkel $\varphi' = 27^\circ$
- Wichte $\gamma' = 21$ kN/m³

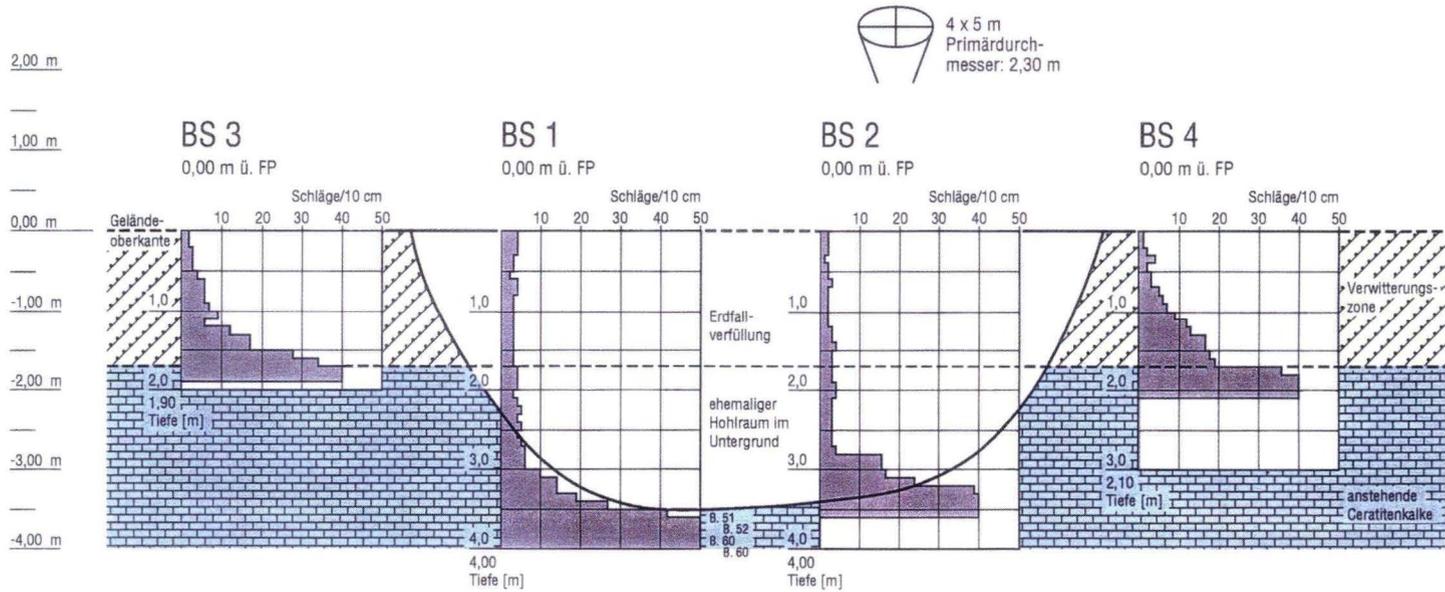


Abb. 18. Unterirdischer Hohlraum in Ceratitenschichten des mo2 unter 1,50 m mächtigem Verwitterungslehm. Die geringen Schlagzahlen charakterisieren den nachgebrochenen Lehm, die hohen Schlagzahlen den Übergang zum Ceratitenkalk.

Tab. 9. Ermittelte Gesteinsfestigkeiten (φ' und c') für bindigen Lösslehm ($n = 12$).

	Einaxiale Druckfestigkeit σ_D [kN/m ²]	Zugfestigkeit σ_z [kN/m ²]	Wichte γ [kN/m ³]	Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
Bandbreite	27–29	3–5	19–22	26–28	8–18
arithmetischer Mittelwert \bar{x}	27,7	4,2	20,5	27	14,5
Standard- abweichung s	0,8	0,6	0,81	0,8	3,8
Variations- koeffizient $V = (s/\bar{x}) \cdot 100$ [%]	2,9	14,3	4,0	3,0	26,2

In Abb. 19 wird für das Erdfallmodell des seichten Karstes das Mohr'sche Bruchkriterium für bindige Lockergesteine mit einer Mächtigkeit von etwa 1,20 m bei variablen Kohäsionen vorgestellt.

Aufgrund des unterirdischen Hohlrums wirken an der Hohlraumfiste Zug- und durch die wirkende Normalkraft Scherspannungen. Aus Abb. 19 ist zu entnehmen, dass die Bruchspannungen von den Materialkomponenten Reibungs-

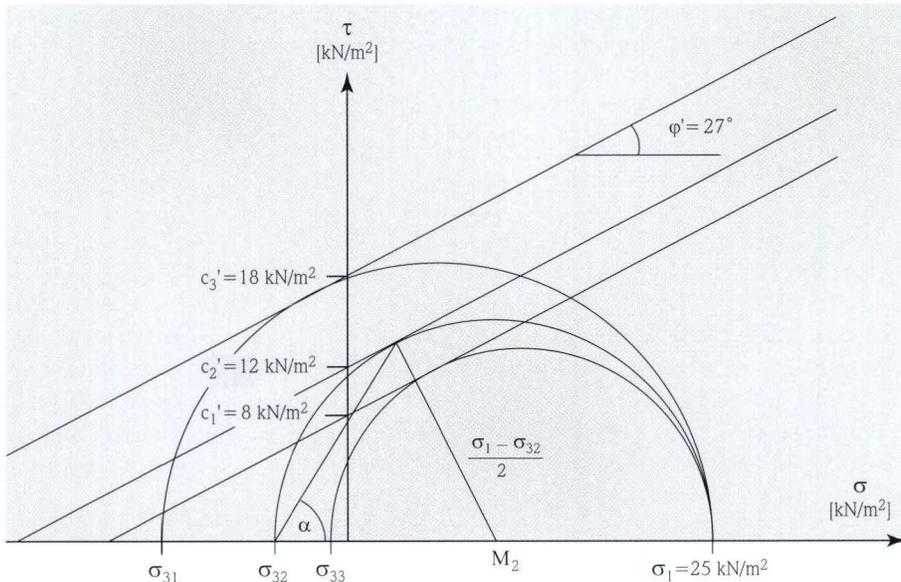


Abb. 19. Mohr'sches Bruchkriterium für von bindigem Material (Lösslehm) bedeckten Karst in Abhängigkeit von der Kohäsion. Die Deckgebirgsmächtigkeit wird im vorgestellten Fall bei 1,20 m angesetzt. Hieraus resultiert die in der Tiefe vorliegende Vertikalspannung σ_1 .

winkel und Kohäsion sowie von der Größe der Hauptzug- und Hauptdruckspannungen abhängig sind. Bei bekanntem Reibungswinkel, der Wichte und der wirkenden Spannungen ist der eintretende Bruch vor allem von der Kohäsion c' abhängig, die bei Wasserzufuhr deutlich oder gar bis gegen Null absinken kann.

In Abb. 19 wird die Überdeckungsmächtigkeit und damit die vertikale σ_1 -Spannung als konstant angenommen. Hiermit verschieben sich die Schergeraden, und es sind für die Erfüllung des Mohr'schen Bruchkriteriums bei Ansteigen der Kohäsion höhere Zugspannungen ($\sigma_{2,3}$) erforderlich. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass durch Absinken der Kohäsion im bindigen Lösslehm der Bruchzustand schneller eintritt, da die Mohr'sche Bruchbedingung bereits bei geringeren Zugspannungen erreicht wird. Diese Aussage ist für bindige Lockergesteine allgemeingültig.

Dies erklärt, dass Erdfälle in bindigen Sedimenten bevorzugt nach Niederschlagsereignissen auftreten.

In rolligen Decksedimenten, die keine Zugspannungen aufnehmen können und keine Kohäsion aufweisen, wird sich kein Bruchprozess im eigentlichen Sinne vollziehen. Bei Bildung eines unterirdischen Hohlraumes rutscht das rollige Material ohne zeitliche Verzögerung und gemäß seinem inneren Reibungswinkel in den Hohlraum.

Insgesamt ist bewiesen, dass bereits bei geringen Zugspannungen über dem Hohlraum der Bruch in den bindigen Sedimenten bei ebenfalls geringen wirksamen Normalkräften einsetzt. Als weiterer Faktor für einen schnellen Bruchprozess sind die geringen Gesteinsfestigkeiten, vor allem die Zugfestigkeit von etwa 4 kN/m^2 anzusehen. Hieraus lässt sich ableiten, dass bei Vorhandensein von unterirdischen Hohlräumen mit Lockergesteinsüberdeckung von einem Erdfalleintreten auszugehen ist.

3.2.1.2 Interpretation der Naturbefunde

Für die Prognostizierung von Erdfällen für das vorliegende Erdfallmodell sowie deren Orientierung wurden mehrere Orientierungsanalysen vorgenommen.

Abb. 20 und Abb. 21 zeigen die Ergebnisse der Orientierungsanalysen beispielhaft für das Bl. 4521 Liebenau im Muschelkalk- (NW Kartenblatt, MEIBURG 1983) und im Röt ausstrich (SE). Das Kluftrösendiagramm für den Muschelkalk (Abb. 20) zeigt verschiedene Maxima. Das Hauptmaximum (ca. 120° bis 140°) fällt mit der Streichrichtung der gipsführenden Schichten des Mittleren Muschelkalkes zusammen. Ein weiteres Maximum resultiert aus dem Kluftegefüge des Mittleren Muschelkalkes (65° bis 96°), ein Maximum entspricht der Kluftrichtung des Oberen Muschelkalkes (110°), was aus der Betrachtung der Einzelwerte resultiert. Im Kluftrösendiagramm überlagern sich diese Streichrichtungen. Alle Erdfälle, die im Oberen Muschelkalk auftreten, liegen an einem Hang, so dass hier wahrscheinlich eine Gebirgsauflockerung mit erweiterten Klüften durch Hangzerreißung stattgefunden hat.

Mehrere fossile Erdfälle konnten auf Bl. 4621 Wolfhagen (RÖSING 1966) als Erdfallgruppen im Röt entlang von Hängen nachgewiesen werden. Durch die starke Wasserzirkulation scheint die Verkarstung der Röt sulfate bereits abgeschlossen zu sein, so dass hier nicht mit rezenten Ereignissen zu rechnen ist.

Das Kluftrösendiagramm (Abb. 21) zeigt drei Maxima, wobei das Hauptmaximum mit der Streichrichtung des Röts zusammenfällt (135°). Zwei weitere Maxima repräsentieren die Hauptkluftrichtungen des Röts mit 57° bis 65° und 33° bis 46° .

Die Ergebnisse belegen, dass die Verkarstung innerhalb des Erdfallmodells „seichter Karst“ stark an das vorherrschende

- Kluftegefüge und tektonische Muster sowie
- an die Streichrichtung der verkarstbaren Gesteine an der Erdoberfläche gebunden ist.

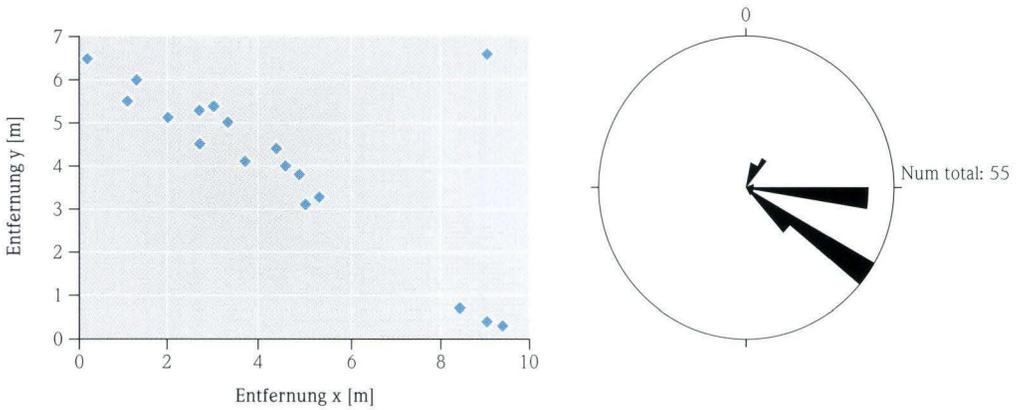


Abb. 20. Orientierungsanalyse für Erdfälle im Muschelkalk.

a) Verteilung der Erdfälle, die für die Orientierungsanalyse verwendet wurden ($n = 18$).

b) Orientierungsdichte $O(a, 0, 500)$ für die Erdfälle im Ausstrich des Muschelkalks, Bl. 4521 Liebenau.

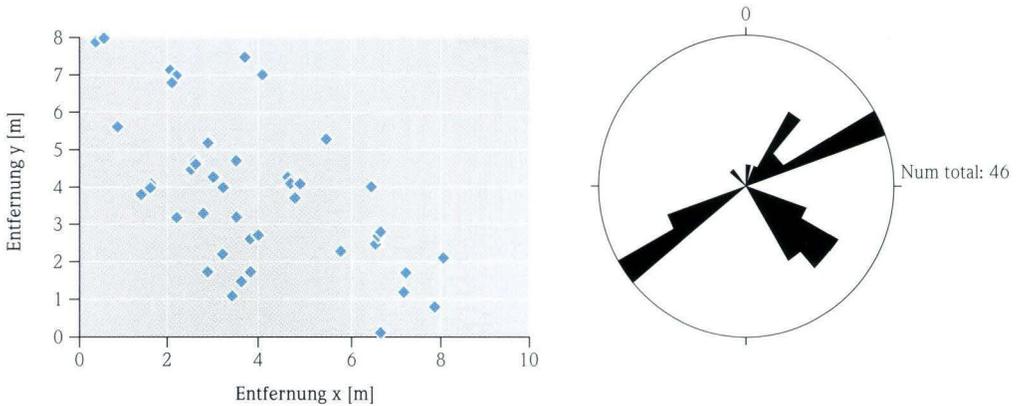


Abb. 21. Orientierungsanalyse für Erdfälle im Rötusurstrich.

a) Verteilung der Erdfälle, die für die Orientierungsanalyse verwendet wurden ($n = 43$).

b) Orientierungsdichte $O(a, 0, 500)$ für die Erdfälle im Rötusurstrich, Bl. 4521 Liebenau.

Die Oberflächennähe der verkarstbaren Gesteine impliziert Einflüsse exogener und anthropogener Faktoren (z.B. durch Hochwässer auf Bl. 5919 Seligenstadt, durch Schneeschmelzen auf Bl. 4923 Altmorschen, durch Ändern der Grundwasserverhältnisse auf Bl. 4821 Fritzlar oder durch ein defektes Oberflächenleitungsnetz auf Bl. 4925 Sontra). Hierdurch treten in Verbindung mit seichtem Karst häufig Sen-

kungen durch Suffosion und innerer Erosion auf.

Etwa 77 % aller Erdfälle beruhen auf diesem Verkarstungsmodell (42 % hiervon haben ein rezentes Alter). Sie finden daher breiten Raum in der ingenieurgeologischen Karstgefährdungskarte in den Kategorien 4 und 5. Die starke Abhängigkeit vom Ausstrich zeigte sich auch im Frankfurter Raum, insbesondere in Lämmerspiel,

wo Erdfälle im Bereich untermiozäner Kalkmergel auftreten.

Die Erdfälle im Oberflächenkarst sind ebenfalls häufig entlang von Trockentälern oder Bächen mit Ausstrich der verkarstbaren Gesteine orientiert, z.B. auf Bl. 4821 Fritzlar (KULICK 1999).

Die prozentuale Erdfallverteilung – bezogen auf alle Ereignisse – ergab, dass etwa 1 % auf die Karbonate des Muschelkalks und des Tertiärs, 8 % auf die gipsführenden Schichten des Mittleren Muschelkalks, 4 % auf die Röt-schichten und 64,5 % auf die gipsführenden Zechsteinschichten zurückzuführen sind.

Die maximalen Erdfallhäufigkeiten variieren in Abhängigkeit von der stratigraphischen Einordnung.

Erdfälle in karbonatischen Gesteinen treten meist nur punktuell auf.

Im Zechstein sind bis über 350 Erdfälle (Gesamtheit von fossilen und rezenten) pro km² zu verzeichnen. Die rezenten maximalen Erdfallhäufigkeiten liegen bei 40 Erdfällen/km² · Jahr.

In den Röt-schichten beträgt die maximale Erdfallhäufigkeit bis zu 40 Erdfälle/km². Rezentere Erdfälle zeigen Häufigkeiten von fünf Erdfällen/km² (Zeitraumangabe wegen fehlender Dokumentation nicht möglich).

Die Erdfallhäufigkeit in den Schichten des Mittleren Muschelkalks betragen bis zu 35 Erdfälle/km²; die rezentere Erdfallhäufigkeit liegt teils bei 4 Erdfällen/km² · Jahr.

Die relative Häufigkeit der primären Erdfalldurchmesser der rezenten Erdfälle im von Lockergesteinen bedeckten Oberflächenkarst zeigt Abb. 22.

Die maximalen Primärdurchmesser bei rezenten Erdfällen liegen bei 10 m. Fast alle Erdfälle besitzen Durchmesser zwischen > 0 bis 4 m. Größere Erdfälle sind

- aufgrund der geringen Mächtigkeit der eingeschalteten Gipshorizonte von meist 3 bis 4 m und
- aufgrund des Bruchverhaltens des überlagernden Materials

als seltene Ereignisse zu betrachten. Häufig sind die unteren Erdfalldurchmesser größer als die

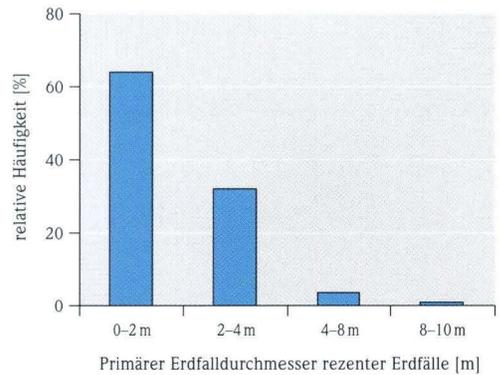


Abb. 22. Relative Häufigkeit [%] der klassierten Primärdurchmesser für rezente Erdfälle (n = 1.041).

oberen, so dass es durch Alterungsprozesse zu Nachbrüchen der Erdfallwände kommen kann. Daher sind die Erdfalldurchmesser der fossilen Erdfälle zugunsten der größeren Durchmesser verschoben, jedoch besitzen auch hier 73 % der Erdfälle Durchmesser bis 4 m. Nur 6 % weisen Durchmesser > 8 m auf, die in vielen Fällen Enddurchmesser repräsentieren. Unterschiede in Abhängigkeit von der Stratigraphie sind nicht relevant.

Die rezenten Erdfalltiefen (bis Oberkante Bruchmasse) zeigen eine Abhängigkeit von der Mächtigkeit der ausgelaugten Gesteine im Untergrund. Erdfälle durch Auslaugung der Röt-Gipse zeigen Erdfalltiefen von 1 bis 3 m, durch Verkarstung der gipsführenden Muschelkalkschichten 1 bis 2 m. Die Erdfalltiefen der durch Auslaugung der Zechstein-Gipse und Anhydrite hervorgerufenen Erdfälle betragen dagegen bis zu 4 m. Die Erdfalltiefen in verkarsteten Karbonatgesteinen liegen bei meist 1 m, können aber 2,50 m erreichen.

Nach LISZKOWSKI (in: IAEG 1973) hängt die Erdfalltiefe im bindigen Lockergestein von der Kohäsion und der Scherspannung ab:

$$\text{Minimale Erdfalltiefe } z_{\min} = 2c'/\gamma' \quad [\text{m}]$$

(Gleichung 12)

$$\text{Maximale Erdfalltiefe } z_{\max} = 4c'/\gamma' \cdot \tan(45^\circ + \varphi'/2) \quad [\text{m}]$$

(Gleichung 13)

Gemäß den im Labor ermittelten Bodenkennwerten für das am häufigsten beobachtete bindige Deckmaterial, den Löss- und Verwitterungslehm (Tab. 9) ergeben sich gemäß den Gleichungen 12 und 13 minimale Erdfalltiefen von ca. 1 m und maximale Tiefen von etwa 3,5 bis 4 m. Damit sind die für die Erdfalltiefen angesetzten o.g. Formeln auf die hessischen Karstverhältnisse übertragbar.

Die Erdfälle im Tertiär treten im Untermaingebiet und Taunus im Verbreitungsgebiet von oberflächlich austreichenden tertiären Karbonatgesteinen (Miozän) grusig-mergeliger Ausbildung auf. Die maximale Überlagerung aus meist nichtbindigen, teils aber auch bindigen Lockergesteinen, in denen Erdfälle auftreten, beträgt 10 m.

In den nördlichen und südlichen Stadtteilen von Frankfurt am Main streichen o.g. Gesteine

aus. In den anderen Stadtteilen steigt die Lockergesteinsüberdeckung auf über 30 m an. In einer Baugrube am Sachsenhäuser Berg wurden 30 kreisrunde Hohlräume nachgewiesen. Sie weisen 2,50 m Höhe und bis 3 m Durchmesser auf. Erdfälle sind hier bisher nicht bekannt.

Im Rodautal werden die untermiozänen Ablagerungen von nur 1 bis 2 m mächtigen Auelehmen und pleistozänen Sanden überlagert. Seit 1959 sind im Rodautal bei Lämmerspiel 23 Erdfälle bekannt geworden (GOLWER & PRINZ 1969). Davon liegen 20 Erdfälle in der Talau und drei Erdfälle am westlichen Rand der Talau in verkarsteten Kalksteinen und Kalkmergeln. Im östlichen Talauengebiet wechselt die lithologische Ausbildung in Mergeltone über und weist daher keine Karstphänomene mehr auf (Abb. 23).

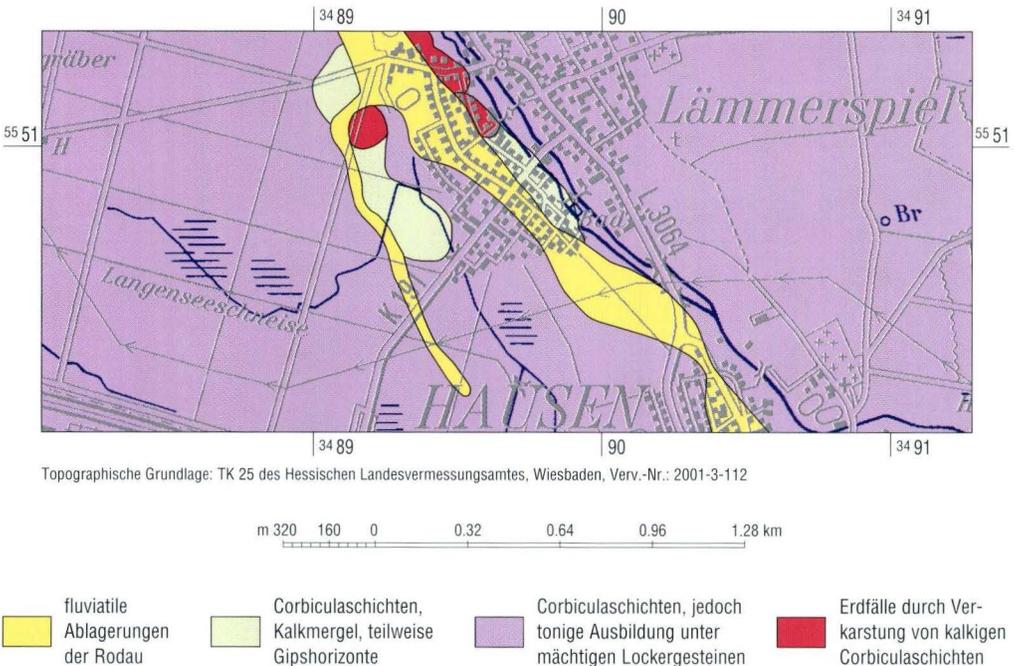


Abb. 23. Auftreten von Erdfällen in Abhängigkeit von der untermiozänen Faziesausbildung im Rodautal bei Lämmerspiel, Bl. 5919 Seligenstadt.

3.3 Zusammenhang zwischen Erdfallalter, Stratigraphie und Tiefenlage der Karstgesteine

Die statistische Einstufung der Erdfallereignisse in Abhängigkeit vom Alter, der Stratigraphie sowie der Tiefenlage der verkarstbaren Gesteine dient der ingenieurgeologischen Bewertung der Bruchgefährdung. Die statistischen Auswertungen erstrecken sich aufgrund der hohen Datendichte auf die sulfatischen Gesteine. Da Erdfalldaten im Karbonatkarst für Hessen nur vereinzelt vorliegen, wäre eine statistische Auswertung nur unzureichend abgesichert. Von allen dokumentierten Erdfällen sind 48 % fossilen und 52 % rezenten Alters. Die stratigraphische Verteilung zeigt Abb. 24.

Es zeigt sich eine leichte Häufung rezenter Erdfälle in den Röt- und Muschelkalkschichten. Die Verteilung ist insgesamt dennoch sehr ausgeglichen.

Bezogen auf alle Erdfallereignisse ergibt sich in Abb. 25 bereits die deutliche Vormacht im nackt-seichten Zechsteinkarst. Auch im Tiefenkarst liegt die häufigste Verkarstungsursache in der Lösung der Zechsteinsulfate.

Insgesamt liegen etwa 77 % der Erdfälle im nackt-seichten Karst und etwa 23 % im von Festgestein bedeckten Tiefenkarst.

Werden die stratigraphischen Einheiten unabhängig voneinander betrachtet, so ergeben sich deutliche Unterschiede im Einbruchsalter sowie in der Tiefenlage des verkarstbaren Gesteins:

Verkarstung im Muschelkalk:

- rezent: 74,3 % \Rightarrow 70 % im nackt-seichten Karst, 4 % im Tiefenkarst
- fossil: 25,7 % \Rightarrow 19 % im nackt-seichten Karst, 7 % im Tiefenkarst

Verbreitung im Röt:

- rezent: 71,0 % \Rightarrow 48 % im nackt-seichten Karst, 23 % im Tiefenkarst
- fossil: 29,0 % \Rightarrow 20 % im nackt-seichten Karst, 9 % im Tiefenkarst

Verbreitung im Zechstein:

- rezent: 48,0 % \Rightarrow 38 % im nackt-seichten Karst, 10 % im Tiefenkarst
- fossil: 52,0 % \Rightarrow 38,5 % im nackt-seichten Karst, 13,5 % im Tiefenkarst

Insgesamt wird deutlich, dass Erdfallereignisse durch Verkarstung in allen lithostratigraphischen Einheiten vor allem im nackt-seichten Karst dominieren. Die umgekehrte Schlussfolgerung lässt sich folgendermaßen definieren:

- Bei Ausstreichen von löslichen Sulfatgesteinen an die Erdoberfläche mit oder ohne Lockergesteinsüberdeckung (nackt-seichter Karst) ist die Wahrscheinlichkeit mit 85 bis 100 % sehr groß, dass rezente Erdfallereig-

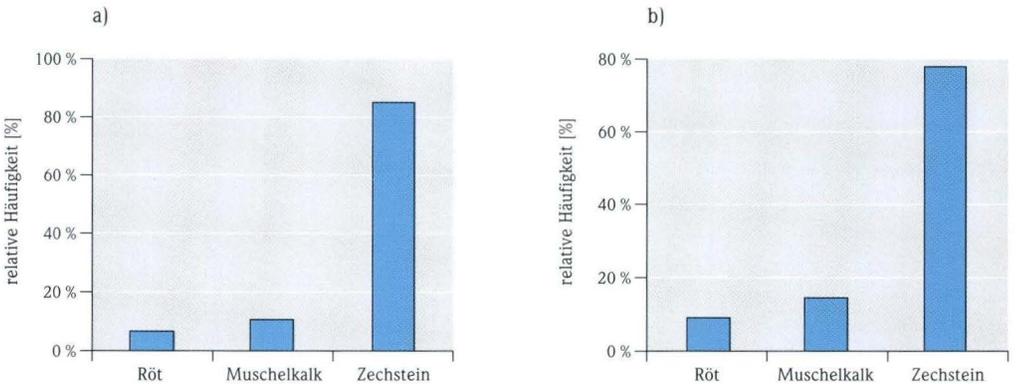


Abb. 24. Stratigraphische Verteilung der Erdfälle bezogen auf a) fossile und rezente Erdfälle (n = 1.694) sowie b) rezente Erdfälle (n = 1.045).

nisse auftreten. Dies gilt für alle lithostratigraphischen Einheiten. Die zu erwartenden primären Erdfalldurchmesser, die bautechnisch bedeutsam sind, liegen zwischen 1 bis 4 m, die Erdfalltiefen zwischen 1 bis 3 m. Durch das Bestreben, ein Gewölbe auszubilden, ist zu erwarten, dass die oberen Durchmesser teilweise wesentlich kleiner sind als der untere Durchmesser. Durch Alterungsprozesse ist hierbei mit Nachbrüchen zu rechnen.

3.4 Ingenieurgeologische Analyse von Senkungsmulden im Chloridkarst

Die Bildung der Hohlräume im Steinsalz und deren Auswirkungen auf die Erdoberfläche unter-

scheiden sich prinzipiell von den Vorgängen im Sulfatkarst. Vorzugsweise werden flache weitgespannte Hohlräume gebildet, die zur Durchbiegung des hangenden Deckgebirges und zu Instabilitäten führen. Obwohl der Gesamtprozess als bruchlose Deformation charakterisiert werden kann, sind doch innerhalb der an der Erdoberfläche erzeugten Senkungsmulden Übergänge zu Bruchdeformationen zu erkennen.

Der Bewegungsverlauf der Senkungsmulden lässt sich grundsätzlich nach der Trogtheorie von LEHMANN (1919) beschreiben. Die Senkung wird dadurch gekennzeichnet, dass sich jedes Bodenteilchen auf dem kürzesten Weg in Richtung zum unterirdischen Hohlraum bewegt. Dies bedeutet, dass am Rande des Troges Zugspannun-

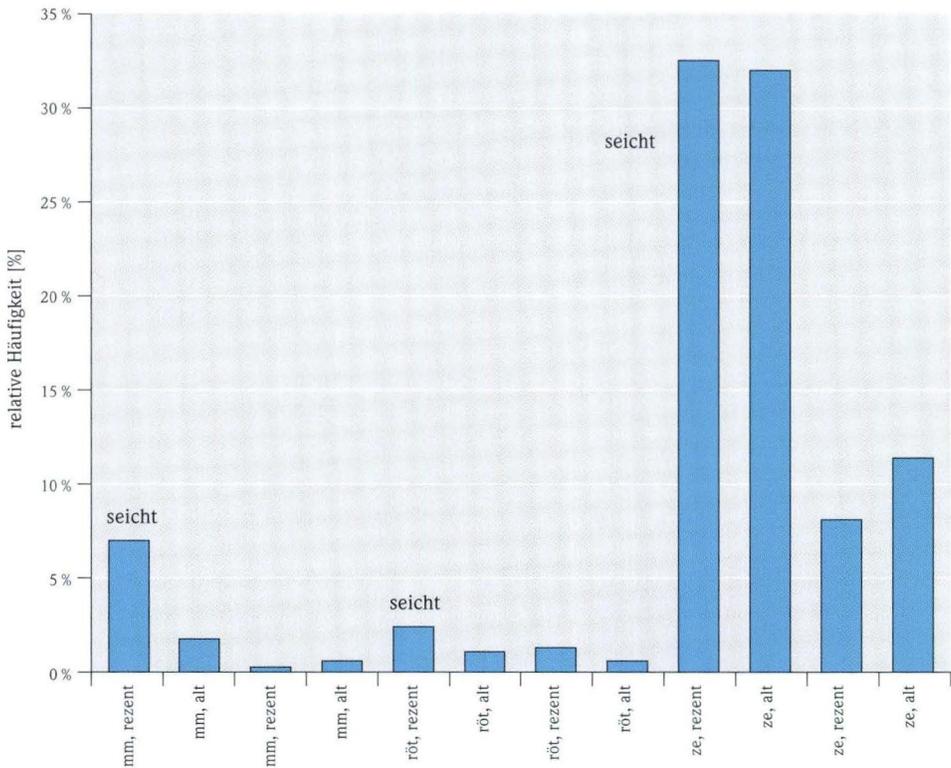


Abb. 25. Prozentuale Verteilung der Erdfallereignisse in Abhängigkeit von der Stratigraphie sowie der Tiefenlage des verkarstbaren Gesteins (n = 3.284).

gen auftreten, die sich als Zerrungszonen mit Rissen, Spalten, Gräben und Erdfällen äußern. Die Überschreitung des Bruchwinkels führt zu diesen Zerrungsspalten, die den Beginn einer Bruchdeformation beschreiben. Die Trogtheorie, die aus dem unterirdischen tiefliegenden flözartigen Tiefbau entwickelt wurde, wurde erstmals 1971 von REUTER et al. auf den Bewegungsverlauf von Senkungsmulden übertragen. Diese Übertragung ermöglichte die Interpretation von Bauschäden in Karstgebieten.

Aufweitungsstrukturen bedingen neben der geomechanischen Schwächung der Gebirgsfestigkeit eine höhere Wasserwegsamkeit, so dass in ihrem Bereich eine verstärkte Lösung des Salzes auftreten kann. Durch geoelektrische Vertikalsondierungen und hammerseismische Ergebnisse ließen sich die starken Zerrüttungen im Untergrund von Senkungsmulden nachweisen (z.B. Bl. 5024 Rotenburg an der Fulda, Senkungsmulde Breitendelle, MOTZKA & LAEMMLEN 1974).

3.4.1 Geomechanische Vorgänge und Senkungsprozessmodellierung

Nach PRINZ (1997) treten im äußeren Zerrungsrandbereich der Wehrda-Senke (Bl. 5224 Eiterfeld) Zerrungsrisse und Erdfälle (LEHMANN 1919) auf. Die oben genannten Senkungsmulden liegen in der Zone des inneren Salzhangbereiches mit aktiver Subrosion. Die Senkungsmulde von Rothenkirchen (Bl. 5224 Eiterfeld, MOTZKA & LAEMMLEN 1967) zeigt den Übergang von der eigentlichen Mulde im Zentrum über die Pressungszone mit leichten Aufwölbungen im Gelände und der Zerrungszone (Abb. 26). Diese beginnt mit größeren Rissen im Gelände, die dann in einer grabenartigen Einbruchstruktur enden. Anschließend folgen rezente Erdfälle (Wildkaute), wobei die jüngsten Einbrüche 1999 erfolgten. Bereits auf der GK 25, Bl. 5224 Eiterfeld (MOTZKA & LAEMMLEN 1967) waren am Süden der Wildkaute mehrere Erdfälle eingetragen. Diese damaligen Erdfälle hat man jedoch nicht als Zerrungsstrukturen im Bereich der äußeren

Senkungsmulde gesehen. Die Mulde von Wehrda ist torfgefüllt, was als weiteres Indiz für aktive Verkarstung zu deuten ist. Die Mächtigkeit des Deckgebirges liegt zwischen 200 bis 250 m. Für die Bebauung ist vor allem die Zerrungszone mit zu erwartenden Längungen im Gründungsbereich als kritisch zu bewerten. Insgesamt sind die Zerrungszonen bei beiden Senkungsmulden ausgeprägter als die Pressungszone. Das einseitige Auftreten von Zerrungsstrukturen wird durch die steilere Hanglage im Gelände erklärt. Es wird betont, dass die äußere Begrenzung der kartierten Senkungsmulde von 1966 bis 1999 bis an die rezenten Nachbrüche der Wildkaute erweitert werden muss, da gerade die jüngsten Erdfälle und Risse als Zerrstrukturen am Rande der Mulde anzusehen sind. Teilweise treten entlang von Senkungsmulden im Zerrungsbereich Risse und Spalten mit Versatzbeträgen von 3 bis 5 m auf (Bl. 5223 Queck, LAEMMLEN 1963). Auch das Seeloch bei Kathus (Bl. 5124 Bad Hersfeld, LAEMMLEN 1967 sowie FINKENWIRTH & HOLTZ 1974) stellt eine Zerrungsstruktur am Rande der großen Senkungsmulde von Sorga-Kathus dar.

Die wannen- und kesselförmigen Senkungsmulden sind charakteristisch für den Bereich zwischen dem inneren und äußeren Salzhang. Dabei treten die rezenten, meist runden Senkungskessel vor allem im Bereich von Störungskreuzungen auf und zeigen rasante Absenkgeschwindigkeiten. Die Absenkbeiträge der einzelnen Mulden liegen zwischen einigen Millimetern und Dezimetern im Jahr am aktiven Salzhang. Die raschen Absenkungen lassen den Schluss zu, dass die unterirdische Salzsubrosion noch aktiv ist.

Fossile Senkungsmulden dagegen belegen den bereits erfolgten Abschluss der Salzsubrosion.

Die Beträge einer Absenkung können über Jahre hinweg gleichmäßig verlaufen, z.B. bei Schlotzau (Bl. 5323 Schlitz) mit 8 cm/Jahr über 10 Jahre (PICKEL 1984). Durch z.B. vorübergehende Grundwasserabsenkungen kann es aber auch zu sehr variablen Absenkbeiträgen, z.B. auf

Tab. 10. Absenkungsbeträge von Senkungsmulden. Messwerte von PICKEL (1984).

	1962/ 1963	1963/ 1964	1964/ 1966	1966/ 1968	1968/ 1970	1970/ 1972	1972/ 1974	1974/ 1976	1976/ 1978	1978/ 1981
Altmorschen (Bl. 4923)	15 cm	5 cm	10 cm	8 cm	8 cm	7 cm	5 cm	2 cm	2 cm	2 cm
Schlotzau (Bl. 5323)	–	7 cm	15 cm	16 cm	16 cm	18 cm	18 cm	14 cm	18 cm	14 cm

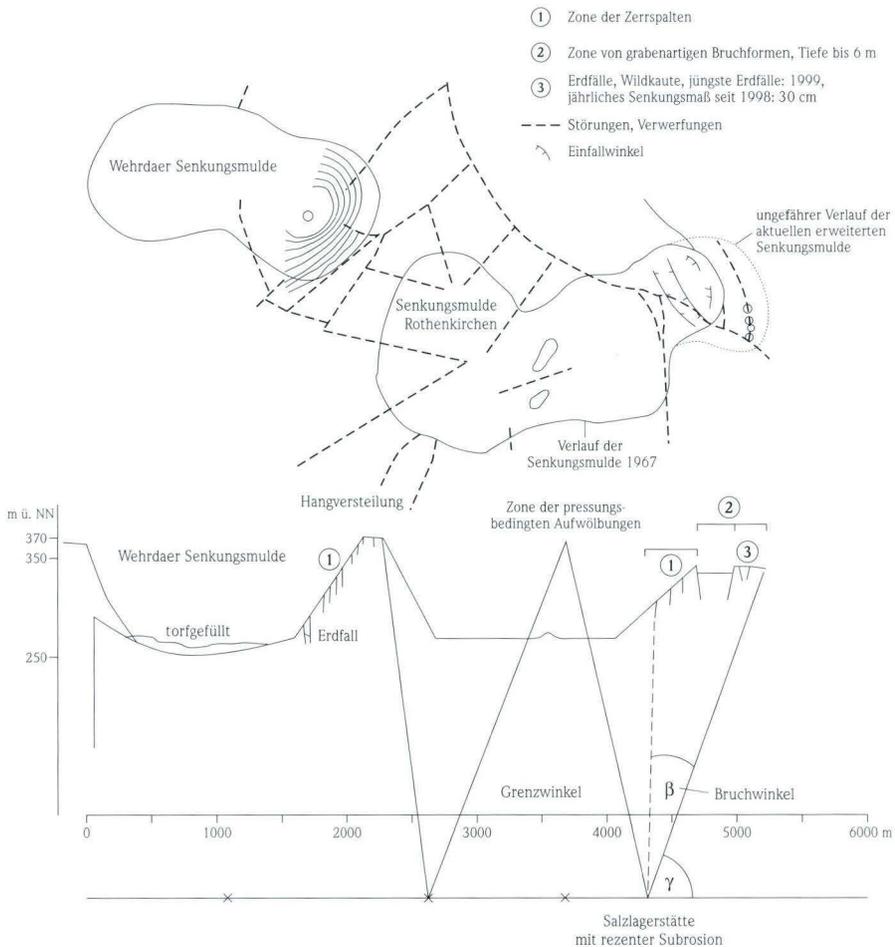


Abb. 26. Die Senkungsmulden von Wehrda und Rothenkirchen im Bereich des aktiven Salzhanges mit rezenten Rissen, bruchartigen Grabenstrukturen und Erdfällen im Zerrungsbereich sowie Aufwölbungen im Pressungsbereich der Mulde (Geländeaufnahme: Frühjahr 1999, Bl. 5224 Eiterfeld).

Bl. 4923 Altmorschen kommen, wie dies Tab. 10 zeigt. Die runde moorgefüllte Senkungsmulde von Schlotzau zeigt stärkere, aber dafür gleichmäßige Senkungen seit der Nullmessung. Dagegen konnten auf Bl. 4923 Altmorschen zwar geringere Senkungen, dafür aber eine stärkere Senkung zwischen 1962 und 1963 nachgewiesen werden.

Die Absenktiefen der Senkungsmulden betragen insgesamt bis zu 100 m (z.B. auf Bl. 5224 Eiterfeld die Senke von Großmoor bei Wehrda, MOTZKA & LAEMMLEN 1967). Damit können die oft setzungsempfindlichen Verfüllmassen entsprechende Mächtigkeiten erreichen.

3.4.2 Interpretation der Naturbefunde

Der Verlauf der Salzhänge ist von der Paläogeographie des Zechsteinmeeres abhängig. Die Randbecken des Zechsteinmeeres mit 100 bis 300 m mächtigen Steinsalzablagerungen werden von Schwellen mit Sulfatfazies begrenzt, die weitgehend den Salzhangbereich markieren. In diesem Übergangsbereich von der eigentlichen Beckenfazies zu der Randfazies verzahnen sich die Chlorid- und Sulfatfazies. Das Deckgebirge über dem verkarsteten Salzgebirge beträgt bis zu maximal 600 m (Bl. 5225 Geisa, LAEMMLEN 1975). Begünstigt wurde die Subrosion von Zechsteinsalzen durch das während der saxoni-schen Gebirgsbildung angelegte Bruchnetz, auf dem zirkulierende Grundwässer bis in große Tiefe wirken konnten. Senkungsmulden und deren begleitende Bruchformen sind auf Gebiete der ehemaligen und rezenten Zechsteinsalzverbreitung beschränkt. Hierbei markiert der äußere Salzhangbereich die Grenze der ehemaligen Zechsteinsalzverbreitung. Der innere Salzhang beschreibt den Übergang zur intakten Salzlagerstätte. Der innere Salzhangbereich besitzt bis zu 4 km Breite. Der Verlauf der Salzhänge wurde durch mehrere geophysikalische Messungen sowie nach Untersuchungen und Kartierungen von RICHTER-BERNBURG (1957) sowie KULICK et al. (1984) nachgewiesen. Die Salzmächtigkeiten wurden in

zahlreichen Lagerstättenbohrungen ermittelt. Für die Spahl-Eiterfelder-Mulde (Bl. 5324 Hünfeld) ist beispielsweise mit Tiefbohrungen nachgewiesen worden, dass das Zechsteinsalz restlos abgelaugt ist und Residualbildungen und Einsturzbrekzien an seiner Stelle vorhanden sind (MOTZKA 1968). Insgesamt ist die intakte Salzlagerstätte durch ungestörte Lagerungsverhältnisse charakterisiert. Der Salzhang selbst wird häufig von Verwerfungen begleitet.

Die Senkungsmulden durch Chloridkarst in Hessen sind an den inneren und äußeren Salzhangbereich sowie an Störungen gebunden, wie dies in Abb. 27 beispielhaft für das Bl. 5123 Bad Hersfeld verdeutlicht wird. Eingetragen sind rezente und fossile Senkungsmulden, die den Salzhang begleiten. Eine Konzentration von Senkungsmulden findet sich vor allem auch an Störungskreuzungen.

Hiermit ergibt sich folgende regionale Einteilung der Bereiche, in denen Senkungsmulden sowie deren Bruchformen auftreten (Abb. 28):

- Das Gebiet des intakten Salinars ist gekennzeichnet durch rezente Erdfälle und relativ ungestörte Lagerungsverhältnisse.
- Das Gebiet des inneren Salzhangs weist häufig Senkungsmulden mit rezenten Bewegungen sowie rezenten Zerrungsformen (Gräben, Risse, Spalten, Erdfälle) auf. Sekundäre Bewegungen, wie Abrisse und Rutschungen sowie Baumverstellungen treten auf. Die Mulden sind oft moorgefüllt. Das Salz liegt hier in reduzierter Mächtigkeit vor, kann teilweise aber auch völlig abgelaugt sein. Charakteristisch sind vor allem auch ungleichmäßige Senkungen der Mulden.
- Das Gebiet zwischen innerem und äußerem Salzhang markiert das gehäufte Auftreten fossiler Senkungsmulden, die mit unterschiedlichem Material gefüllt sind. Die Salzlagerstätte ist wahrscheinlich bis auf Reste vollständig subrodiert, rezente Bewegungen finden daher nicht oder selten statt.

Die Eigenschaft als Sedimentsammler macht die Senkungsmulden zu Indikatoren des zeit-

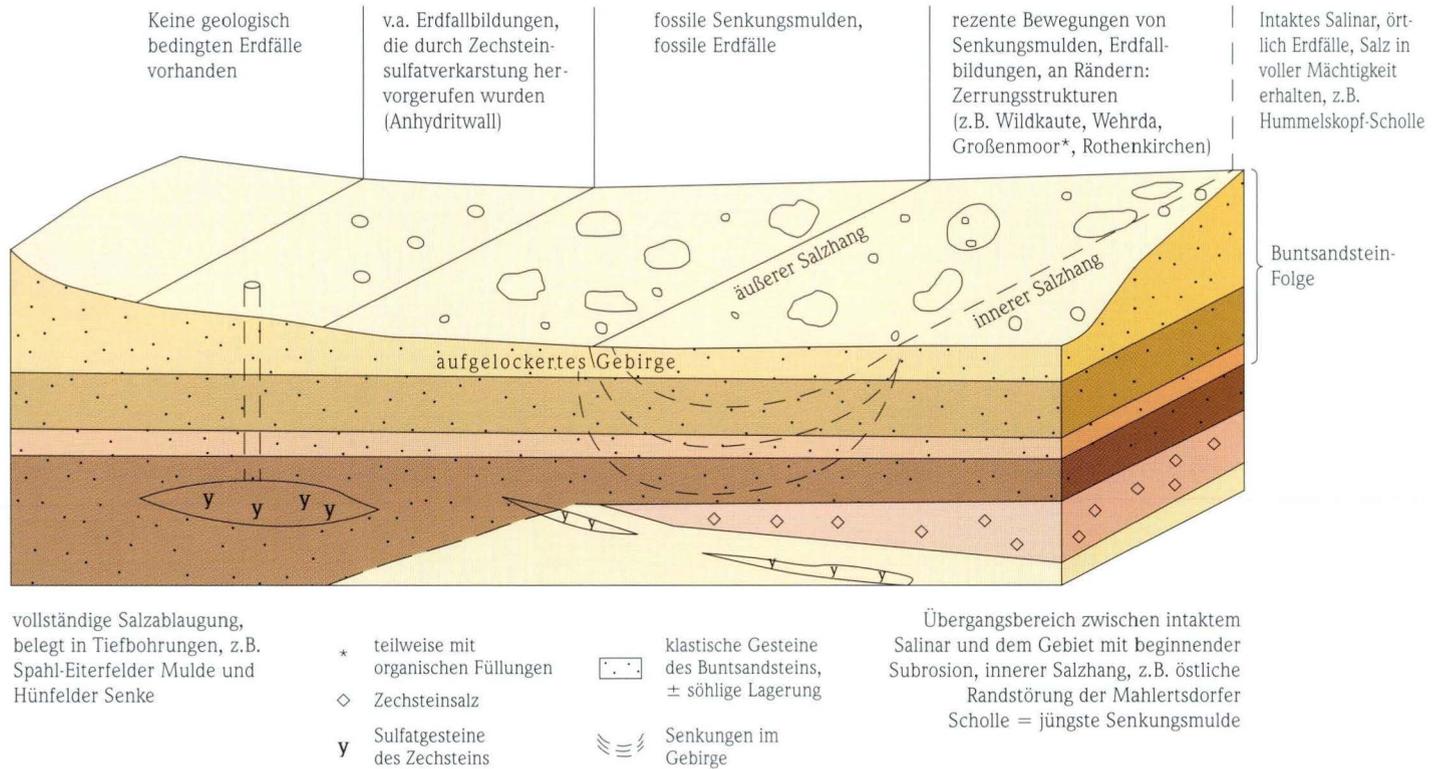


Abb. 28. Übergang der Senkungsmulden von intaktem Salinar auf Gebiete mit aktiver Subrosion. Die jüngsten Senkungsmulden sind von der Oberflächen-erosion kaum berührt. In der Hünfelder Senke treten Erdfälle auf.

4. Ingenieurgeologisches Kartenwerk der Karstgefährdung

4.1 Allgemeines Ziel und Methodik ingenieurgeologischer Karten

Ingenieurgeologische Karten bilden die Grundlage für die Einschätzung natürlicher Erdfall- und Senkungsrisiken. Daneben können Schadensfälle im Hinblick auf die Karstsituation eingeschätzt und bewertet werden. Derartige Karten stellen somit eine wichtige Grundlage für notwendig einzuleitende Sanierungsmaßnahmen dar.

Seit etwa 70 Jahren werden in Deutschland ingenieurgeologische Karten angefertigt. Zuerst als Baugrunderkarten bezeichnet dienten sie der Planung von Autobahnen und nach 1945 dem Wiederaufbau der Städte sowie in zunehmendem Maße neuen Bauplanungen (CRAMER et al. 1973). Grundsätzlich stellen ingenieurgeologische Karten einen speziellen Typ der geologischen Karte dar.

Die in dieser Arbeit entwickelte Karstgefährdungskarte wurde in einem Maßstab von 1 : 200 000 erstellt. Sie hat einen dokumentierenden Charakter, der durch die Erdfall- und Senkungsmuldenprognose sowie einer phänomenologischen Charakteristik ergänzt wird. Die Karte soll dem Anwender eine erste Einschätzung der vorliegenden Karstsituation liefern, mit deren Hilfe er Hinweise zu Untersuchungs-, Gründungs- und konstruktiven Maßnahmen erlangt. Die Anwendung kann in der Bauplanung und der Bewertung von Schadensfällen liegen. Für eine konkrete Baumaßnahme ist dennoch eine objektbezogene Baugrunduntersuchung vor Ort durchzuführen.

Ein generelles Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen Karstgefährdungskarte ist deren Verallgemeinerungswürdigkeit und Reproduzierbarkeit. Dabei ist die Entwicklung der Karte an die karstgeologischen und regionalen Bedingungen in Hessen geknüpft; dennoch soll der Anspruch der Übertragbarkeit auf andere geologische Gebiete gewährleistet sein.

4.2 Zusammensetzung des ingenieurgeologischen Kartenwerkes

Das ingenieurgeologische Kartenwerk ist das Ergebnis der Auswertung aller in Nord- und Nordosthessen dokumentierten Erdfälle und Senkungsmulden. Grundlage für die Entwicklung der Karten ist die Erdfall- und Senkungsmuldenmodellierung. Für die Modellierung war es notwendig, sämtliche Kartenblätter mit Karsterscheinungen in Hessen zu untersuchen. Die Kartendarstellungen beziehen sich auf die an der Erdoberfläche erkennbaren Karstauswirkungen und Deformationen. Die ältesten Daten stammen aus dem Jahr 1874, die jüngsten aus dem Jahr 1999.

Das Kartenwerk besteht aus drei Kartentypen:

- Die Dokumentationskarte der Erdfälle und Senkungsmulden im Maßstab 1 : 50 000.
(Die Karte ist nicht Bestandteil dieser Veröffentlichung; sie ist einsehbar im Archiv des HLUg oder bei der Autorin.)
- Die ingenieurgeologische Karstgefährdungskarte im Maßstab 1 : 200 000.
(Die Karte ist Bestandteil dieser Veröffentlichung.)
- Die Häufigkeitskarte der Erdfälle und Senkungsmulden im Maßstab 1 : 100 000.
(Die Karte ist nicht Bestandteil dieser Veröffentlichung; sie ist einsehbar im Archiv des HLUg oder bei der Autorin.)

Bei der ingenieurgeologischen Beurteilung und Darstellung der Verkarstungsprozesse wird zwischen den beiden Deformationsarten (bruchhaft oder bruchlos) unterschieden, die differenzierten Einfluss auf Baumaßnahmen nehmen.

Für die Prognostizierung von Erdfällen und Senkungsmulden benötigt man Angaben zur Erdfallhäufigkeit, zum primären Erdfalldurchmesser, zum Alter, zur Erdfalltiefe und zur Orientierung und Verbreitung der Verkarstungserscheinungen. Daneben sind die gebirgsmechanischen Spannungsänderungen im Untergrund für die spätere bautechnische Beurteilung sowie die Einschätzung eines möglichen Hochbruches bis an die Erdoberfläche von Bedeutung.

4.3 Dokumentation der Erdfälle und Senkungsmulden

In die Dokumentationskarten gehen alle vorliegenden Informationen aus den geologischen Karten von Hessen im Maßstab 1 : 25 000, anderen Kartierungen, Gutachten, Vermerken, Diplomarbeiten und von der Autorin aufgenommenen Verkarstungserscheinungen ein. Ein kritischer Faktor stellt hierbei das teilweise hohe Alter der geologischen Karten von Hessen dar. Häufig werden Erdfälle nur zufällig entdeckt, vor allem in Waldgebieten. Hinzu kommt, dass Erdfälle nach ihrer Entstehung schnell wieder verfüllt werden und selten eine Meldung an die Behörden erfolgt. Wenige Daten liegen für zeitliche Angaben vor, so dass bei der Angabe von Erdfallhäufigkeiten der Zeitfaktor oftmals unberücksichtigt bleibt. Leider liegen auch wenige Daten für die Entwicklung von Erdfällen nach ihrer Entstehung vor, z.B. Verfüllungsmaßnahmen, Abböschungen, Auftreten von Rutschungen. Die durch Salzsubrosion verursachten Senkungsmulden und deren randliche Zerrungsstrukturen sind in erster Linie den geologischen Karten und deren tektonischen Beiblättern von Hessen entnommen. Für die Abtrennung der aktiven von den fossilen Senkungsmulden wurden alle Objekte vor Ort auf rezente Bewegungsindizes überprüft.

Für 20 Kartenblätter im Maßstab 1 : 25 000 wurde eine luftbildgeologische Auswertung vorgenommen. Für den Erhalt einer besseren Genauigkeit in Waldgebieten konnten Daten der Forstämter herangezogen werden.

Tab. 11 gibt einen Gesamtüberblick über die in Hessen verbreiteten Erdfälle und Senkungsmulden. Die Tabelle dokumentiert die Quelle der Verkarstungserscheinungen aus Gutachten oder Karten.

Der Maßstab der geologischen/tektonischen Karten variiert bei der Aufnahme von 1 : 5 000 bis 1 : 25 000.

Es ergibt sich ein Auftreten von Erdfällen und Senkungsmulden auf 47 geologischen Karten-

blättern von Hessen im Maßstab 1 : 25 000. Bezogen auf die Gesamtvorlage aller hessischen geologischen Karten sind dies 30 %. Es wurden insgesamt 3 284 Erdfälle und 737 Senkungsmulden aufgenommen.

Es ergeben sich drei regional zusammenhängende Karstgebiete:

- Die Bereiche Frankfurt am Main und Hochheim am Main mit Verkarstung der tertiären Karbonate und ausschließlich rezenten Erdfallbildungen.
- Der Bereich Nordhessen mit Verkarstungen vorwiegend im Sulfatkarst von Zechstein, Röt und Muschelkalk und untergeordnetem Karbonatkarst sowie rezenten und fossilen Erdfällen.
- Der Bereich Nordosthessen mit Sulfat- (Zechstein, Röt, Muschelkalk) und Chloridkarst (Zechstein), untergeordnet Karbonatkarst (Muschelkalk). Als Karstformen treten sowohl rezente und fossile Erdfälle als auch Senkungsmulden auf.

Auch wenn sicher nicht alle Erdfälle und Senkungsmulden bekannt sind, so reicht die Erhebung der geowissenschaftlichen Grunddaten als wissenschaftliche Grundlage für die Risikoanalyse von erdfallgefährdeten Gebieten und Baurisiken aus. Einen Überblick über die hessischen Kartenblätter mit Verkarstungserscheinungen im Maßstab 1 : 25 000 gibt Abb. 29.

Für die Darstellung auf zwei Kartenblättern wurde zur besseren Übersicht der Maßstab 1 : 50 000 gewählt. Die Aufnahme, Digitalisierung und Verarbeitung der Daten erfolgte im Maßstab 1 : 25 000. Sämtliche 47 Karten mit Karsterscheinungen liegen in diesem Maßstab digital vor und können für die Landes-, Regional- und Bauplanung verwendet werden.

Erst nach dem Vorliegen einer Dokumentationskarte (Abb. 30) als erster Arbeitsschritt folgte die anschließende Ableitung der ingenieur-geologischen Karstgefährdungskarte.

Grundlage für die Klassifizierung der Karsterscheinungen war eine Attributierung jedes Karstobjektes.

Tab. 11 Überblick der Karsterscheinungen (Erdfälle und Senkungsmulden) in Hessen.

Geologische Karte 1 : 25 000	Erdfälle	Senkungsmulden	Gutachten	Kartierungen
4422/Trendelburg	•		•	•
4520/Warburg	•		•	•
4521/Liebenau	•		•	•
4619/Mengeringhausen	•		•	•
4620/Arolsen	•			•
4621/Wolfhagen	•			•
4718/Goddelsheim	•		•	•
4719/Korbach	•			•
4720/Waldeck	•		•	•
4721/Naumburg	•		•	•
4723/Oberkaufungen	•			•
4724/Großalmerode	•		•	
4725/Bad Sooden-Allendorf	•		•	
4820/Bad Wildungen	•		•	•
4821/Fritzlar	•			•
4823/Melsungen	•			•
4824/Hessisch-Lichtenau	•		•	
4825/Waldkappel	•		•	•
4826/Eschwege	•		•	
4923/Altmorschen	•		•	•
4924/Seifertshausen	•		•	
4925/Sontra	•		•	•
4926/Herleshäuser	•		•	
4927/Creuzburg	•			•
5018/Wetter	•		•	•
5023/Ludwigseck	•			•
5024/Rotenburg an der Fulda	•	•	•	•
5025/Hönebach	•		•	
5123/Niederaula	•	•	•	
5124/Bad Hersfeld	•	•	•	•
5223/Queck		•	•	•
5224/Eiterfeld	•	•	•	•
5225/Geisa		•		•
5323/Schlitz	•	•		•
5324/Hünfeld		•	•	•
5325/Spahl	•		•	
5423/Großenlüder	•	•	•	
5424/Fulda	•		•	•
5425/Kleinsassen	•		•	•
5523/Neuhof	•	•	•	•
5524/Weyers	•	•	•	
5622/Steinau a.d. Straße	•			•
5623/Schlüchtern	•			•
5817/Frankfurt a.M. West	•		•	
5916/Hochheim am Main	•		•	
5918/Neu-Isenburg	•		•	
5919/Seligenstadt	•		•	

Die Erdfälle und Senkungsmulden wurden nach der Stratigraphie, dem Alter (rezent/fossil) und der Differenzierung zwischen nackt-seichtem und tiefem Karst für die Digitalisierung mit Ziffern attribuiert. Suffosionsenkungen und innere Lösserosion sowie das Ausstreichen von Gipshorizonten wurden einzeln gekennzeichnet. Die verschiedenen Verkarstungsphänomene an der Geländeoberfläche wurden auf den Doku-

mentationskarten dargestellt. Das Auftreten der Senkungsmulden steht in enger Beziehung zum inneren und äußeren Salzhang. Hierbei sind im Bereich der intakten Salzlagerstätte bereits rezente Erdfälle aufgetreten. Der innere Salzhangbereich ist vor allem durch das Auftreten von rezenten Senkungsmulden, Erdfällen und Zerrstrukturen charakterisiert. Der äußere Salzhangbereich wird vor allem von fossilen Senkungsmulden,

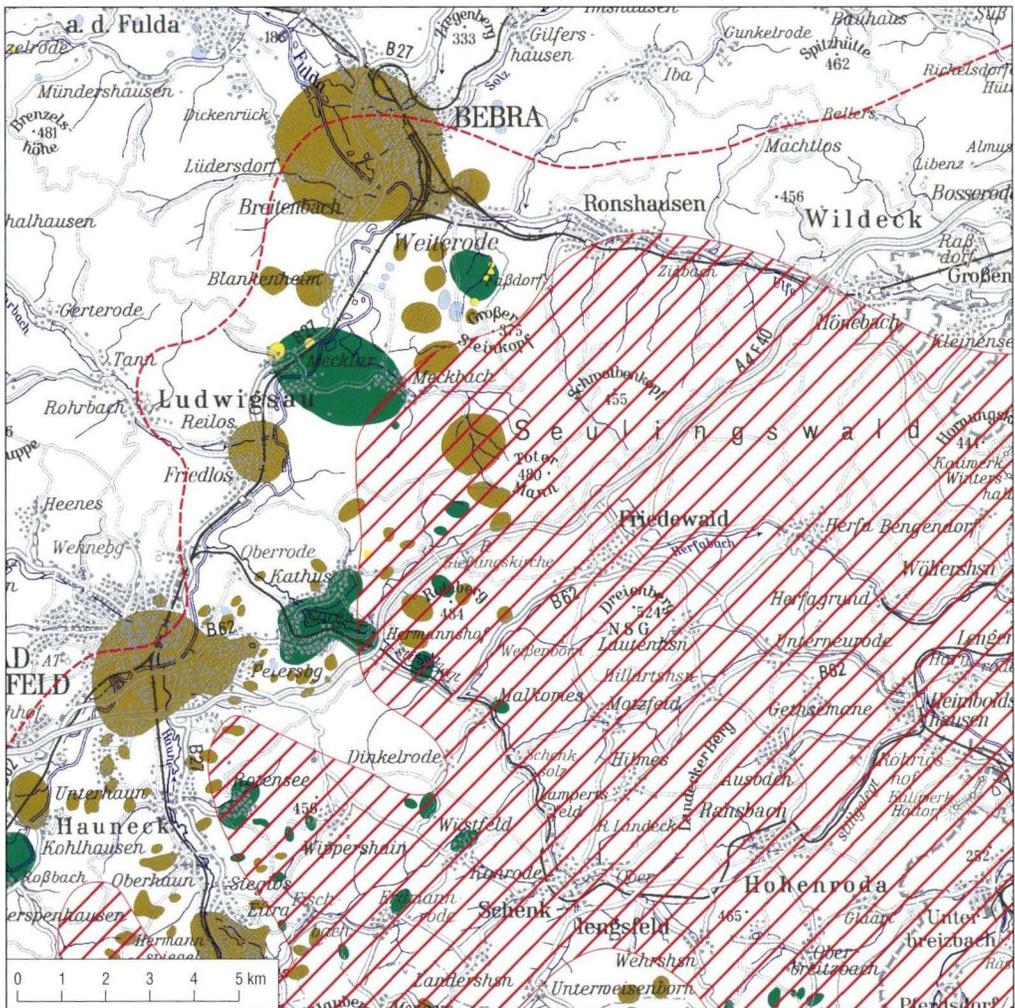


Abb. 30. Ausschnitt aus der Dokumentationskarte, Maßstab 1 : 50 000 (Bl. L 5124 Bad Hersfeld). (Legende siehe Abb. 27, S. 43)

mulden begleitet. Die Farbgebung der einzelnen dargestellten Verkarstungsobjekte ist an die Farbgebung der Karstgefährdungskategorien angeglichen.

4.4 Ingenieurgeologische Karstgefährdungskarte

Die ingenieurgeologische Karstgefährdungskarte wurde auf Grundlage der für Hessen abgeleiteten Erdfallmodelle unter Berücksichtigung von bautechnischen Gesichtspunkten entwickelt. Sie stellt eine flächenmäßige Abgrenzung der im Bundesland Hessen dokumentierten bruchlosen und bruchhaften Karstformen unter Berücksichtigung ihrer geomechanischen Entwicklung und ihrer bautechnischen Auswirkungen dar. Das Grundmuster für die Ableitung dieser Karte stellt der Prognosegedanke auf der Basis der rezenten Bruchereignisse (Erdfälle) und der bruchlosen (Senkungsmulden) Tätigkeiten und Intensitäten dar. Die Karte hat das Ziel, für baupraktische Belange Schlussfolgerungen ableiten zu können. Hierzu ist die Kenntnis wichtig, ob und welche Karstauswirkungen an der Geländeoberfläche erwartet werden können. Dieser Prognosegedanke erfordert Angaben zu den zu erwartenden Erdfalldimensionen sowie der Häufigkeit der Karsterscheinungen. Eine weitere Basis für die Entwicklung dieser Karte ist die Verschneidung der ermittelten Verkarstungserscheinungen mit den geologischen Untergrundverhältnissen. Der gewählte Maßstab von 1 : 200 000 erlaubt bereits für die Raum- und Landesplanung sowie für Bauplanungen erste wichtige Hinweise. Eine Analyse von Bauschadensfällen wird mit Hilfe der kleinmaßstäbigen Karte gewährleistet. Die Wahl einer kleinmaßstäbigen Karte täuscht zudem keine zu große Genauigkeit vor und lehnt sich ferner an die Empfehlungen der Arbeitsgruppe AG Ingenieurgeologische Kartierung an.

Die Klassifizierung ist eng an die geologischen Strukturen gebunden. Die Einteilung in Kategorien mit unterschiedlichem Gefährdungspoten-

zial für eine Bebauung hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab (Abb. 31):

- Vorkommen von verkarstbaren Gesteinen so wie deren Tiefenlage, Verkarstungsgrad und Auswirkung auf die Geländeoberfläche.
- Dokumentierte Verkarstungsauswirkungen (Erdfälle und Senkungsmulden) sowie Bauschäden.
- Begründung von geotechnischen Problemen.
- Abgrenzung von Karsttypen (Karbonat-, Sulfat- und Chloridkarst).
- Alter und Aktivität der Verkarstungserscheinungen.
- Lagerungsverhältnisse (Tiefenlage der verkarstbaren Gesteine mit unterschiedlicher Geometrie der Erdfälle) und Strukturabhängigkeit von Erdfällen und Senkungsmulden.
- Faktoren zur bautechnischen Beurteilung, wie Orientierung, Erdfalldurchmesser, -tiefe und -häufigkeit bzw. Senkungsmuldenflächenanteil/km².

Aus der Untersuchung der genannten Kriterien erfolgt eine flächenmäßige Kategorisierung der Geländeoberfläche im Hinblick auf die konkrete Karstgefährdung (Tab. 12) und zu erwartende geotechnische Probleme bei Bauplanungen. Die flächenmäßige Abgrenzung von Karstgefährdungsgebieten kann ferner für die Bewertung karstbedingter Bauschäden genutzt werden und bildet damit die Grundlage für die Auswahl effektiver Sanierungsmaßnahmen.

Kategorie 1 beschreibt diejenigen regionalen Gebiete, in denen verkarstbare Gesteine im Untergrund nicht zu erwarten sind. Für die Kategorie 1 wurden alle oberflächlich ausstreichenden Gesteine dargestellt, die älter als Zechstein sind und damit verkarstungsfähige Gesteine im Untergrund, die zu Erdfällen an der Oberfläche führen, nicht zu erwarten sind. Als Nachteil erwies sich die Übernahme der Geologie aus der Geologischen Übersichtskarte von Hessen 1 : 300 000. Da im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie bisher nur diese Übersichtskarte in digitaler Form vorliegt, war diese Vorgehensweise technisch vorgegeben. Es

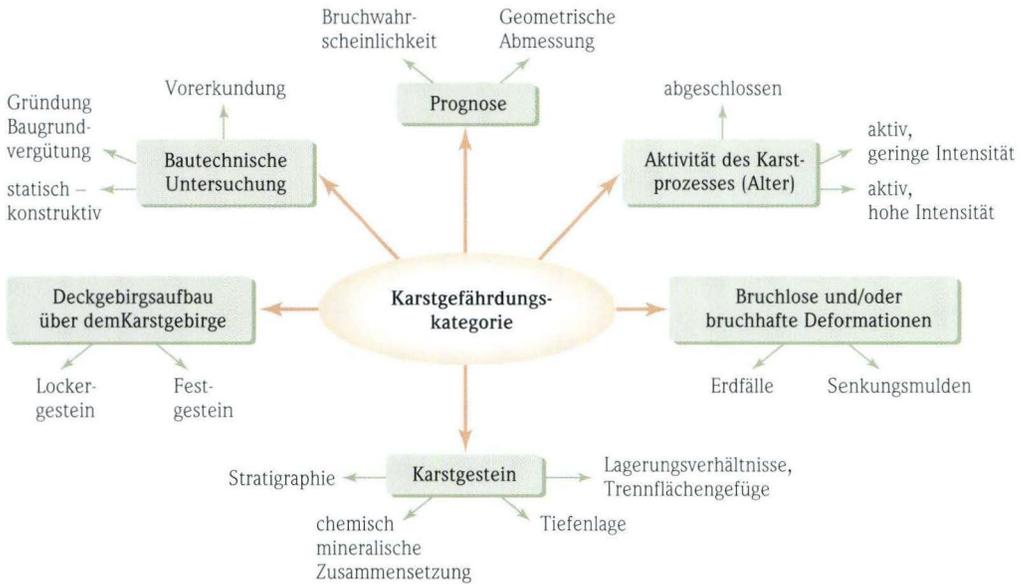


Abb. 31. Einflussparameter für das ingenieurgeologische Kartenwerk der Karsterscheinungen in Hessen.

sollte bei Vorliegen von digitalen geologischen Karten im Maßstab 1 : 100 000 eine geologische Überarbeitung vor allem der Kategorie 1 vorgenommen werden. Für die übrigen Kategorien gilt, dass sie im Maßstab 1 : 25 000 aufgenommen wurden und daher eine sehr große Genauigkeit auf der Karte 1 : 200 000 vorhanden ist.

Kategorie 2 beschreibt Gebiete, in denen verkarstbare Gesteine im Untergrund vorhanden sein können. Die karstgeologischen Voraussetzungen für Erdfallbildungen, wie z.B. eine ausreichende Wasserzirkulation und ein nicht zu mächtiges Deckgebirge, sind bisher nicht erfüllt, so dass Karstauswirkungen nicht bekannt sind. Das Gebirge besitzt hohe Verbandsfestigkeiten, die für ein tragfestes Gewölbe sorgen. Erdfälle treten entlang von tektonischen Trennfugen auf, bevorzugt an Kreuzungspunkten und entlang von Bächen oder Trockentälern. Häufig reicht die Mächtigkeit der verkarstbaren Gesteine nicht aus, damit ein Hochbruch bis zur Erdoberfläche erfolgen kann. Dies gilt für alle stratigraphischen Einheiten, insbesondere aber

für die Sulfathorizonte des Röts und des Mittleren Muschelkalkes. Innerhalb des Gebietes sollte bei einer Baumaßnahme die Deckgebirgsmächtigkeit geklärt werden. Punktuelle Erdfälle können nicht ausgeschlossen werden. Schwächezonen in Form von verbrochenen unterirdischen Hohlräumen oder offenen Hohlräumen sind nicht auszuschließen, ebenso wie einzelne Erdfälle, wenn ein Hochbruch aktiviert wird oder dieser sich bis an die Geländeoberfläche fortsetzt. Während größerer Erkundungskampagnen besteht die Möglichkeit, dass fossile Einbruchschlote aufgeschlossen werden.

Kategorien 3 bis 11:

Die folgenden Kategorien werden nach den Karsttypen untergliedert (Karbonat-, Sulfat-, Chloridkarst). Diese Einteilung wird vorgenommen, da bedingt durch die Geologie und Löslichkeit und aufgrund geomechanischer Eigenschaften des Deckgebirges verschiedene Erscheinungsformen, Dimensionen und Häufigkeiten von bruchlosen und bruchhaften Deformationen auftreten, bei denen mit unterschiedlichen geotechnischen

Tab. 12. Klassierte Karst-Gefährdungskategorien.

Karstgefährdungskategorien	Charakterisierung der Gefährdungskategorien hinsichtlich der Prognostizierung von Bruch- (Erdfälle) und bruchlosen (Senkungsmulden) Karstformen
Kategorie 1	Verkarstbare Gesteine sind im Untergrund nicht zu erwarten.
Kategorie 2	Karsterscheinungen des Karbonat-, Sulfat- und Chloridkarstes sind aufgrund der geologischen Randbedingungen an der Geländeoberfläche nicht zu erwarten. Einzelne Versagensfälle sind jedoch nicht auszuschließen.
Karbonatkarst (Muschelkalk)	
Kategorie 3	Rezente Erdfälle treten punktuell auf. Erdfalldurchmesser: 1–4 m, Erdfalltiefe: 1–3 m. Geringe Bruchgefährdung des Gebirges.
Sulfatkarst (Zechstein, Röt, Mittlerer Muschelkalk)	
Kategorie 4	Rezente Erdfälle unwahrscheinlich, da die Verkarstung im Untergrund fortgeschritten oder abgeschlossen ist. Auftreten fossiler Erdfälle mit sehr variablen Abmessungen. Setzungsempfindliche Erdfallfüllungen. Sehr geringe Bruchgefährdung des Gebirges.
Kategorie 5	Rezente Erdfälle häufig im nackt-seichten Karst im Bereich oberflächlich austreichender Sulfatschichten. Erdfalldurchmesser: 1–4 m, Erdfalltiefe: 1–4 m. Hohe Bruchgefährdung des Gebirges.
Kategorie 6	Rezente Erdfälle häufig im von Festgestein bedeckten Zechsteinsulfatkarst. Hohe primäre Sulfatmächtigkeiten. Erdfalldurchmesser: 1–>80 m. Hohe Bruchgefährdung des Gebirges.
Kategorie 7	Rezente Erdfälle häufig im von Festgestein bedeckten Röt- und Muschelkalksulfatkarst. Geringere primäre Sulfatmächtigkeiten. Erdfalldurchmesser: 1–14 m. Hohe Bruchgefährdung des Gebirges.
Chloridkarst (Zechstein)	
Kategorie 8	Rezente Senkungsmulden sind unwahrscheinlich, da die Verkarstung im Untergrund im Bereich des äußeren Salzhangs nahezu abgeschlossen ist. Häufiges Auftreten von fossilen, groß dimensionierten Mulden, die oftmals mit setzungsempfindlichen Sedimenten verfüllt sind. Starke Auflockerung des Gebirges. Geringe Senkungsgefährdung des Gebirges.
Kategorie 9	Rezente Senkungsmulden treten häufig auf, da eine aktive Verkarstung des Salinars im Bereich des inneren Salzhangs stattfindet. Auftreten von Senkungen sowie Zerspalten und Erdfällen am äußeren Muldenbereich. Sehr hohe Senkungs- und Bruchgefährdung des Gebirges.
Kategorie 10	Intaktes Salinar, das noch nicht in den Karstprozess einbezogen wurde. Auftreten rezenter Erdfälle durch irreguläre Verkarstung.
Kategorie 11	Genaue Dokumentationen fehlen. Im Bereich des äußeren Salzhangs ist die gleiche Karstgefährdung wie in der Kategorie 8 anzunehmen.

Problemen zu rechnen ist. Die durch Sulfat- und Karbonatkarst entstandenen Erdfälle sind bautechnisch anders zu bewerten als die durch Salzsubrosion hervorgerufenen Senkungsmulden. Der Sulfat- und Karbonatkarst unterscheiden sich voneinander vor allem in der Größe der Erdfalldurchmesser und ihrer Tiefen sowie der Erdfallhäufigkeiten.

Kategorie 3 beschreibt rezente Erdfälle im nackt-seichten Karbonatkarst. Im Karbonatkarst treten aufgrund der geringen Löslichkeit der Karbonatgesteine Erdfälle meist nur als punktuelle Ereignisse auf. Größere zusammenhängende Erdfallfelder durch Karbonatverkarstung sind in Hessen nicht bekannt. Die Erdfallhäufigkeiten liegen zwischen 1 bis maximal 10/km² in Ausnahmefällen. Bautechnisch ist hier generell von einem bedeutend geringeren Bruchrisiko auszugehen als im Sulfat- und Chloridkarst mit deutlich höherer Löslichkeit der Gesteine. Die primären Erdfalldurchmesser liegen zwischen 1 bis 4 m, die Erdfalltiefen zwischen meist 1 bis 3 m. Hierbei sind die geometrischen Abmessungen vergleichbar mit den Geometrien der im seichten Sulfatkarst liegenden Erdfälle. Die Abtrennung von Karbonat- und Sulfatkarst muss aber aus Gründen der sehr unterschiedlichen Löslichkeit und der damit verbundenen Erdfallhäufigkeit, die ein wichtiges bautechnisches Kriterium darstellt, erfolgen.

Kategorien 4 bis 7:

Die nachstehenden Kategorien 4 bis 7 (Abb. 32) beschreiben Karstauswirkungen im Sulfatkarst. Der Sulfatkarst wird in vier Gefährdungskategorien in Abhängigkeit von der Tiefenlage des verkarstbaren Gesteins und vom Alter der Erdfälle unterteilt. Eine stratigraphische Unterteilung erfolgt nur, wenn für die Geotechnik relevante Aspekte, wie Geometrien und Erdfallhäufigkeiten, unterschiedlich ausgebildet sind.

Kategorie 4 geht davon aus, dass rezente Verkarstungsauswirkungen selten oder unwahrscheinlich sind, da die Sulfatlösung im Untergrund bereits sehr stark fortgeschritten oder abgeschlossen ist, Bruchprozesse aber noch an-

dauern können. Es treten viele fossile Erdfälle mit häufig nichtkonsolidierten oder aufgelockerten und damit setzungsempfindlichen geogenen Füllungen oder anthropogenen Verfüllungen auf. Die Gefährdungskategorie ist unabhängig vom stratigraphischen Alter des Deckgebirges, da die geotechnische Problematik hiervon unberührt ist. Lediglich die Tiefe von Erdfallfüllungen ist unterschiedlich und muss während der Baugrunderkundung untersucht werden. Die Durchmesser sind ebenfalls sehr variabel. Die Erdfalldurchmesser können an der Geländeoberfläche bis 100 m ansteigen. Die Erdfallhäufigkeiten liegen mit bis zu 40 Erdfällen/km² sehr hoch.

Kategorie 5 beschreibt das in Hessen am häufigsten vertretene Verkarstungsmodell im rezenten nackt-seichten Sulfatkarst. Die verkarstbaren Gesteine sind mit meist bindigem Lockersediment bedeckt. Es treten vor allem kleinere Erdfälle im Bereich oberflächlich austreichender Sulfatschichten auf. Daneben kommt es zu Suffosionssenkungen an der Erdoberfläche und Senkungen durch innere Erosion über Hohlräumen und erweiterten Klüften. Die Erdfälle treten vor allem entlang von Trennflächen und Hangzerreißungszonen auf. Bei Überlagerung der Hohlräume oder erweiterten Karstspalten durch erosions- und suffosionsempfindliches Material ist bei Sickerströmung und kritischem hydraulischen Gefälle nach DIN 19700 mit entsprechenden hydromechanischen Boden- deformationen zu rechnen. Die Erdfalldurchmesser liegen unabhängig von der Stratigraphie des verkarsteten Horizontes meist unter 4 m, die Tiefen meist unter 3 m. Die verkarsteten Horizonte in Oberflächennähe sind im Allgemeinen nicht mächtiger als 3 m, woraus sich die geometrischen Abmessungen ergeben. Es ist davon auszugehen, dass die oberen Erdfalldurchmesser häufig kleiner sind als die unteren Durchmesser, wodurch Erdfallwände im Laufe von Alterungsprozessen nachbrechen können. Die Erdfallhäufigkeiten können bei über 40 Erdfällen/km² liegen. Im Gegensatz zu Kategorie 4 liegt eine hohe Bruchgefährdung aufgrund eines

aktiven Karstes vor. Die Gefährdung einer Karstintensivierung durch exogene Faktoren, insbesondere der anthropogenen Veränderung hydrologischer Verhältnisse, ist sehr hoch. Durch Grundwasserschwankungen, durch den Einfluss von Oberflächenwasser oder aggressiven Wässern kann die Bruchgefährdung stark ansteigen. Die karstgefährdeten Gebiete der Kategorie 5 liegen daher häufig im Bereich von Siedlungen. Insgesamt ist gegenüber der Kategorie 4 sowie den nächstfolgenden Kategorien 6 und 7 mit klei-

nen Erdfallabmessungen zu rechnen. Es muss berücksichtigt werden, dass diese Erdfälle nach ihrem Entstehen häufig mit setzungsempfindlichem Material, teilweise mit grundwassergefährdenden Inhaltsstoffen verfüllt wurden.

Kategorie 6 beschreibt rezente Karstauswirkungen im vom Festgestein bedeckten Zechsteinsulfatkarst mit deutlich geringeren Erdfallhäufigkeiten bis max. 40 Erdfällen/km². Die Erdfalldurchmesser und Tiefen sind mit 1 bis >80 m deutlich höher und variabler als in der voran-

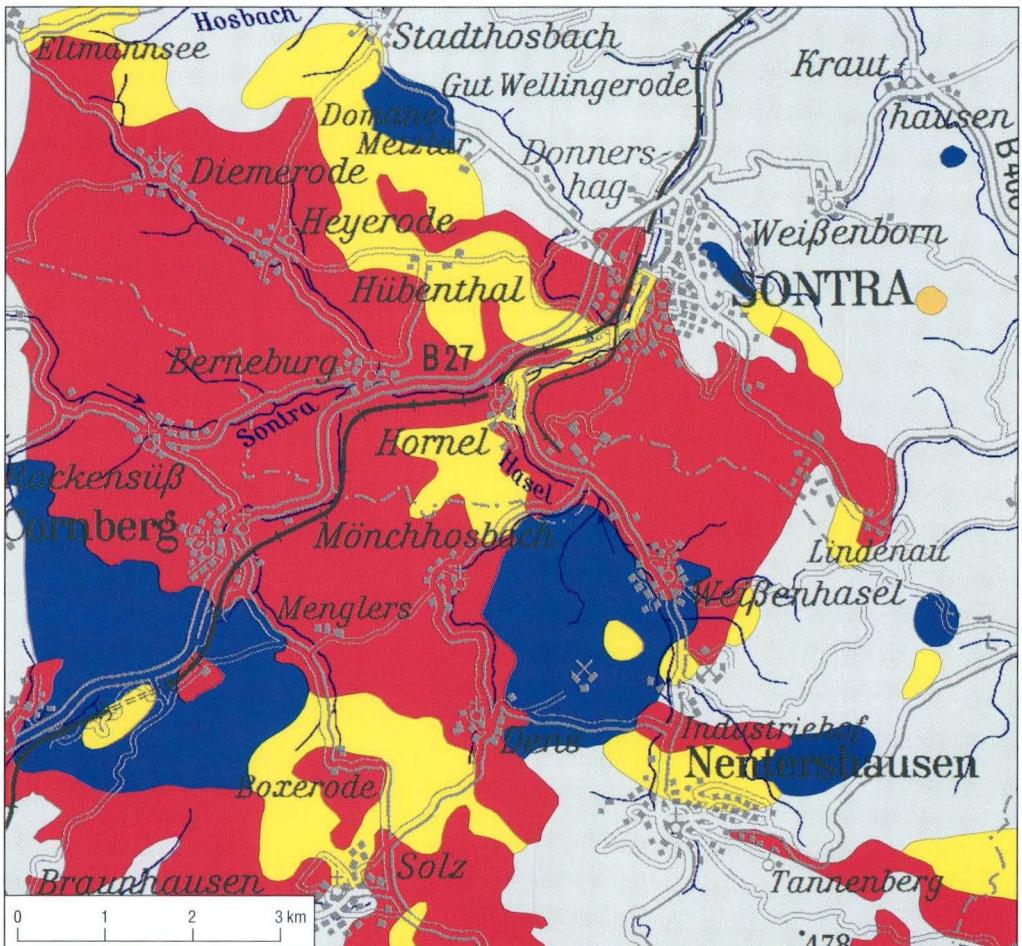


Abb. 32. Ausschnitt aus der Karstgefährdungskarte (Bl. 4925 Sontra). Er zeigt die Gefährdungskategorien 2 und 4 bis 7.

Kategorie 1: Verkarstbare Gesteine sind im Untergrund nicht zu erwarten.



Kategorie 2: Verkarstbare Gesteine können im Untergrund vorhanden sein. Karsterscheinungen an der Geländeoberfläche sind aufgrund der geologischen Situation nicht zu erwarten, da das Deckgebirge eine zu große Mächtigkeit aufweist oder eine Wasserwegsamkeit nicht gegeben ist. Punktuelle Erdfälle sind nicht auszuschließen.



Karbonatkarst (Muschelkalk)

Kategorie 3: Rezente Karbonatverkarstung. Es treten punktuelle und vereinzelte Erdfälle auf. Erdfalldurchmesser: 1 bis 4 m; Erdfalltiefe: meist 1 bis 3 m. Die Bruchgefährdung des Gebirges ist gering.



Sulfatkarst (Zechstein, Röt, Mittlerer Muschelkalk)

Kategorie 4: Rezente Erdfälle sind selten bzw. unwahrscheinlich, da die Sulfatlösung im Untergrund bereits sehr stark fortgeschritten oder abgeschlossen ist. Auftreten von fossilen Erdfällen mit sehr variablen Abmessungen und häufige Füllung mit setzungsempfindlichen oder aufgelockerten Sedimenten. Die Bruchgefährdung des Gebirges ist sehr gering.



Kategorie 5: Rezente Erdfälle treten im nackt seichten Sulfatkarst häufig im Bereich oberflächlich ausstreichender Sulfatschichten auf. Erdfalldurchmesser: meist 1 bis 4 m; Erdfalltiefe: meist 1 bis 4 m. Obere Durchmesser sind häufig kleiner als die unteren Durchmesser. Alterungsprozesse können zu Nachbrucherscheinungen der Erdfallwände führen. Die Verkarstung ist im allgemeinen an das Trennflächengefüge gebunden. Daneben treten Suffosionssenkungen und innere Erosion über Hohlräumen auf. Die Bruchgefährdung ist sehr hoch.



Kategorie 6: Rezente Erdfälle treten häufig im von Festgestein bedeckten Zechsteinsulfatkarst auf. Die Deckgebirgsmächtigkeit liegt zwischen 3 bis 50 m. In Ausnahmefällen kann das Deckgebirge auf mehrere 100 m ansteigen. Die primären Sulfatmächtigkeiten im Untergrund sind groß. Auftreten von großdimensionalen Erdfällen und Schloten. Erdfalldurchmesser: sehr variabel, 1 bis > 80 m. Die Verkarstung ist im allgemeinen an größere Störungen und an das Trennflächengefüge aufgrund von erhöhter Wasserwegsamkeit und Verbandsschwächung des Gebirges gebunden. Die Bruchgefährdung ist hoch.



Kategorie 7: Rezente Erdfälle treten häufig im von Festgestein bedeckten Röt und Mittleren Muschelkalksulfatkarst auf. Die Deckgebirgsmächtigkeit liegt meist zwischen 10 und 30 m. Die primären Sulfatmächtigkeiten im Untergrund sind im Allgemeinen gering. Auftreten von mittelgroßen Erdfällen. Erdfalldurchmesser: meist 1 bis 14 m. Die Verkarstung ist im Allgemeinen an größere Störungen und an das Trennflächengefüge gebunden. Die Bruchgefährdung des Gebirges ist hoch.



Chloridkarst (Zechstein)

Kategorie 8: Rezente Senkungsmulden sind sehr unwahrscheinlich, da die Verkarstung des Salinars im Bereich des äußeren Salzhanges abgeschlossen ist. Sehr häufiges Auftreten von großdimensionierten, flachen und fossilen Senkungsmulden. Die Senkungsmulden sind häufig mit setzungsempfindlichen Schichten verfüllt, die bei Belastungen zur Kompaktion neigen. Das Gebirge ist insgesamt stark aufgelockert. Die Senkungsgefährdung des Gebirges ist sehr gering.



Kategorie 9: Rezente Verkarstungsvorgänge finden statt, da Reste der Salzlagerstätte im Untergrund vorhanden sind. Es findet eine aktive Verkarstung am inneren Salzhangbereich statt. Es treten ungleichmäßige Senkungen sowie Zerrspalten und Erdfälle am Rand der großdimensionierten Senkungsmulden auf. Rutschungen treten im Bereich übersteilter Senkungsmulden auf. Im allgemeinen findet die Verkarstung entlang größerer tektonischer Störungszonen statt. Größere Senkungsbeträge sind bis 90 mm/Jahr nachgewiesen. In der Regel liegen sie deutlich niedriger. Das Deckgebirge ist insgesamt stark aufgelockert. In Mulden ist mit organischen oder anderen setzungsempfindlichen Sedimenten zu rechnen. Durch die rezente Absenkung (Senkung, Krümmung, Pressungs-, Zerrungsprozesse), den Bruchbildungen (Zerrspalten, Erdfälle) und den sekundären Baugrundschwächen (Setzungen, Rutschungen, Vernässungen) ergibt sich eine sehr hohe Bruch- und Senkungsgefährdung des Gebirges.



Kategorie 10: Bereich des intakten Salinars, der noch nicht in den Verkarstungsprozess einbezogen ist. Auswirkungen auf die Erdoberfläche sind nicht zu erwarten. Vereinzelt treten rezente Erdfälle (Erdfalldurchmesser: bis 30 m) durch irreguläre Verkarstung nach WEBER auf.



Kategorie 11: Bereiche mit sehr geringem Untersuchungsgrad. Genaue Dokumentationen fehlen. Im Bereich des äußeren Salzhanges ist jedoch die gleiche Karstgefährdung wie in der Kategorie 8 anzunehmen.



gegangenem Kategorie, da sie sehr stark von der Deckgebirgsmächtigkeit und der Mächtigkeit der Sulfatlager abhängen. Die primären Sulfatmächtigkeiten können bis ≈ 70 m betragen. Die Erdfälle/Schloten sind neben dem Trennflächennetz vor allem an große Störungszonen und Bachtäler gebunden. Im Allgemeinen liegt die Deckgebirgsmächtigkeit unter 50 m (bei Hohlräumhöhen bis 20 m und Erdfalldurchmessern bis 10 m). Das Deckgebirge kann in Ausnahmefällen auf mehrere 100 m Mächtigkeit ansteigen. Die Bruchgefährdung ist insgesamt hoch. Geotechnisch ist hier vor allem die tiefe Erdfallfüllung mit einer starken Auflockerung und Setzungsempfindlichkeit von Bedeutung. Die meisten Schloten und Erdfälle treten in den überwiegend flach gelagerten Buntsandsteinschichten auf.

Kategorie 7: Die stratigraphische Unterteilung der bedeckten rezenten Erdfälle in Abhängigkeit von der Stratigraphie wird innerhalb dieser Kategorie deutlich, in der die Verkarstung auf Sulfatschichten des Röt und des Mittleren Muschelkalkes zurückgeht. Diese Abtrennung von der Zechsteinverkarstung wurde vorgenommen, da hier von wesentlich geringeren Erdfallhäufigkeiten sowie kleineren Dimensionen aufgrund geringerer Primärmächtigkeiten der Sulfate auszugehen ist. Die Erdfalldurchmesser liegen zwischen 1 bis 14 m. Die Deckgebirgsmächtigkeit ist im Allgemeinen mit 10 bis 30 m geringer als bei der Zechsteinverkarstung. Oft sind Hohlräume bereits verfüllt, was zu Gründungsproblemen durch starke Auflockerung führen kann. Auch im bedeckten Röt- und Muschelkalk-Karst ist die Verkarstung vorwiegend an größere Störungen gebunden. Die Erdfallhäufigkeiten in Kategorie 7 sind gegenüber Kategorie 6 geringer, können in Ausnahmefällen aber auch auf 40 Erdfälle/km² ansteigen. Die Bruchgefährdung ist hoch.

Kategorien 8 bis 11:

Die folgenden vier Kategorien 8 bis 11 beschreiben Karstformen im Bereich des Chloridkarstes (Abb. 33). Hierbei erfolgt die Einteilung zum einen aus den dokumentierten Erdfällen

und Senkungsmulden, zum anderen aus der Kenntnis von intaktem Salinar sowie dem inneren und äußeren Salzhangbereich.

Kategorie 8 sagt aus, dass rezente Bewegungsvorgänge unwahrscheinlich bis selten sind, da die Chloridverkarstung im Untergrund im Bereich des äußeren Salzhanges nahezu abgeschlossen ist. Das Salinar ist meist vollständig subrodiert. Die seismisch ermittelten subrosiven Reduktionszonen sind charakterisiert durch erhebliche Lagerungsstörungen. Es treten zahlreiche fossile, flache Senkungsmulden und Erdfälle auf. Die großdimensionierten Mulden sind häufig mit setzungsempfindlichen Schichten verfüllt, die zur Kompaktion neigen. Das Gebirge ist insgesamt stark aufgelockert. Die vorgefundene Situation ist geotechnisch als statisch anzunehmen. Etwa 80 % aller Senkungsmulden sind in Hessen als bewegungsfrei einzustufen. Die größeren Mulden zeigen Längen von bis zu 2 km.

Kategorie 9 beschreibt die aktive Verkarstung im Bereich des inneren Salzhanges mit vorhandenen Resten des Salinars im Untergrund. Es treten rezente großflächige Senkungsmulden mit teilweise ungleichmäßigen Senkungen sowie Zerrspalten und Erdfällen an deren Zerrungsrand auf. Versatzbeträge im Zerrungsbereich sind für mehrere Meter nachgewiesen. Im Pressungsbereich treten Aufwölbungen auf. Rutschungen finden im Bereich von jungen übersteilten Muldenhängen statt. Die rezenten Bewegungen sind häufig von jungen organischen Torfbildungen begleitet, die bei Belastungen durch starke Zusammendrückbarkeit charakterisiert sind. Karstvorgänge finden in erster Linie entlang größerer tektonischer Störungszonen statt. Größere Absenkbeträge liegen vor allem an Störungskreuzungspunkten. Absenkgeschwindigkeiten sind hier bis 90 mm/Jahr bekannt. Sie liegen in der Regel jedoch deutlich niedriger. Sehr hohe Senkungsbeträge werden häufig durch anthropogene Ursachen hervorgerufen. Das Deckgebirge ist insgesamt stark aufgelockert. Hohe Gefährdungen ergeben sich

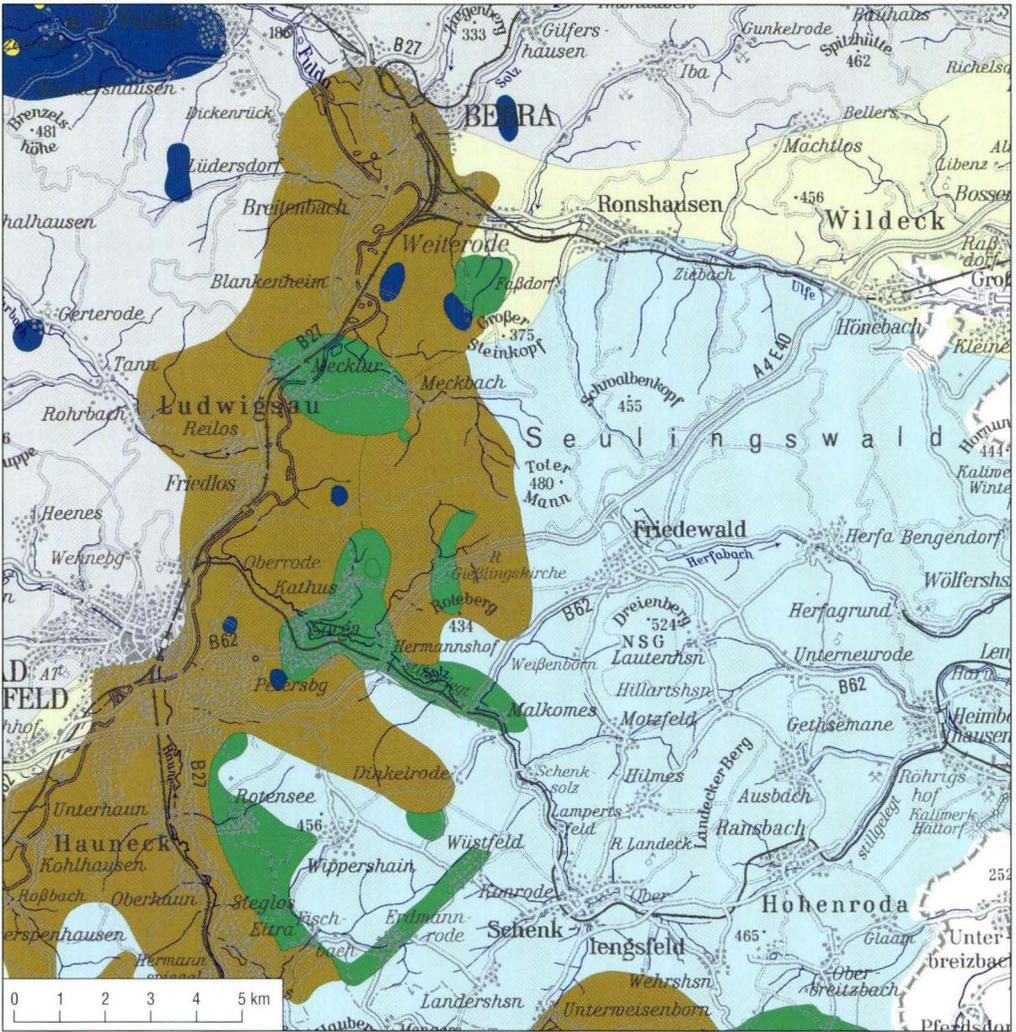


Abb. 33. Ausschnitt aus der Karstgefährdungskarte im Bereich des inneren und äußeren Salzhanges. Deutlich treten die Kategorien 9 und 10 mit typischen fossilen und aktiven Senkungsmulden hervor (Bl. L 5124 Bad Hersfeld). (Legende siehe Seite 55)

durch Senkungen, Krümmungen, Pressungs- und Zerrungserscheinungen. Daneben ist mit einer Baugrundschwächung durch mögliche Setzungen, Rutschungen oder Vernässungen zu rechnen. Die Bewegung ist als dynamischer Vorgang mit möglicher zunehmender Verschlechterung der Gründungssituation zu verstehen. Es existiert

insgesamt eine sehr hohe Bruchgefährdung am Übergang vom konvexen zum konkaven Teil der Senkungsmulde. Die Kategorie 9 ist geotechnisch als sehr kritisch zu bewerten. Die Längserstreckung der Mulden beträgt bis zu 2 km. Durch Änderungen der hydrogeologischen Situation kann eine rezente Absenkung beschleunigt

werden. Die jährlichen Senkungsbeträge liegen im Allgemeinen im Zentimeterbereich. Dagegen betragen die Versatzbeträge von Rissen und grabenartigen Strukturen im Zerrungsbereich von Senkungsmulden durchaus mehrere Meter.

Kategorie 10 beschreibt das intakte Salinar, das noch nicht oder wenig in den Verkarstungsprozess einbezogen ist. Vereinzelt können rezente Erdfälle mit Erdfalldurchmessern bis 30 m durch irreguläre Verkarstung nach WEBER (1967) auftreten. Das Gebirge ist insgesamt unversehrt und nur von wenigen Störungen durchsetzt. Die Grenzen des intakten Salinars sowie der Salzhangs sind mit Hilfe der Auswertung seismischer Messungen sowie Kartierungen von KULICK et al. (1984) ausgewiesen. Daneben liegen zahlreiche Lagerstättenbohrungen für diesen Bereich vor (Schichtenverzeichnisse im Archiv des HLUG).

Kategorie 11 weist Bereiche mit einem sehr geringen Untersuchungsgrad aus. Genaue Dokumentationen fehlen in diesen Gebieten. Im Bereich des äußeren Salzhangs ist jedoch die gleiche Karstgefährdung wie in Kategorie 8 anzunehmen. Die flachen Senkungsmulden können aufgrund ihres Alters und einer Zusedimentation an der Geländeoberfläche nicht mehr erkennbar sein.

Auf der Karstgefährdungskarte erscheinen nach obiger Homogenbereichseinteilung die entsprechenden 11 Kategorien als farbig dargestellte Flächen. Aus der Kartendarstellung mit Legendentext soll der Anwender prognostizierende Charakteristika ablesen und geotechnische Probleme sowie Untersuchungs-, Gründungs- und bautechnische Sicherungsmaßnahmen ableiten können.

Die Salzhangbereiche mit fossilen und rezenten Senkungsmulden und Bruchformen werden im Allgemeinen von Gebieten fossiler Erdfälle durch Zechsteinsulfatverkarstung begleitet (Karstgefährdungskarte).

Das nördlich gelegene Gebiet ist vor allem durch rezente Verkarstungserscheinungen mit teilweise hohen Erdfallhäufigkeiten charakterisiert. Die hohe Verkarstungsaktivität findet sich

sowohl im nackt-seichten als auch im bedeckten Karst. Das westlich angrenzende Gebiet (Karstgefährdungskarte) ist durch rezente Verkarstung gekennzeichnet, jedoch sind die Erdfallhäufigkeiten insgesamt geringer. In diesen Gebieten ist die Gefahr weiterer Erdfälle als besonders hoch einzustufen. Deutlich wird der Übergang von nackt-seichtem Karst in von Festgestein bedeckten Karst, wenn die Sulfatoberflächen in das Gelände hinein abtauchen. Es wird auch deutlich, dass rezente und fossile Erdfallfelder benachbart sind. Liegen kleinere rezente Erdfallgebiete durch bedeckten Sulfatkarst in größeren Gebieten fossiler Erdfälle, so ist davon auszugehen, dass die Verkarstung im tieferen Untergrund abgeschlossen ist.

Die rezenten Senkungsmulden (Karstgefährdungskarte) durch Salzkarst belegen die fortschreitende und aktive Verkarstung der Salzlagerstätte. Dabei schreitet in der nördlichen Salzlagerstätte die Verkarstung von Westen nach Osten voran. In der südlichen Salzlagerstätte sind die rezenten Senkungsmulden auf den SE Bereich beschränkt. Hieraus folgt, dass die gesamte Lagerstätte nicht mehr als intakt angesehen werden kann. Die Verkarstung wird sich auch hier fortsetzen. Fast über den gesamten äußeren Salzhang sind fossile Senkungsmulden verbreitet. Die Bereiche fossiler Verkarstungserscheinungen sind als statisches System anzusehen, deren äußere Begrenzungen sich nicht wesentlich ändern werden.

Die zahlreichen fossilen Karstformen belegen, dass in der geologischen Vergangenheit Zeiten erhöhter Verkarstungsaktivität geherrscht haben. Diese optimalen klimatischen Voraussetzungen sind heutzutage nur vermindert gegeben. Dagegen spiegelt sich in der heutigen Karstgeschichte der anthropogene Einfluss wider. Karstgefährdungskarten gelten insgesamt als dynamische ingenieurgeologische Karten, die in Zusammenhang mit den geologischen und hydrogeologischen Karten und Erkenntnissen gesehen werden müssen. Die erstellten Karten ersetzen insgesamt keine objektbezogene Baugrundunter-

suchung. Die gelieferten Aspekte hinsichtlich Untersuchung, Gründung und Kontrollmaßnahmen sind als Empfehlungen anzusehen, die auf jedes einzelne Bauvorhaben abgestimmt werden müssen.

Infolge der Verkarstungsprozesse im Untergrund sind Gefährdungen eines Bauwerkes grundsätzlich immer möglich. Sowohl die bruchlose als auch die bruchhafte Deformation können die Standsicherheit von Bauwerken erheblich herabsetzen, wobei bei den bruchlosen Senkungen der Übergang zu bruchhaften Deformationen häufig erfolgen kann. Die Einteilung der Erdfall- und Senkungsmuldengebiete in einzelne Karst-Gefährdungskategorien berücksichtigte daher vor allem geotechnische Gesichtspunkte, die in Tab. 13 beschrieben werden.

4.5 Häufigkeitsverteilung der Erdfälle und Senkungsmulden

Die Häufigkeitskarte der Erdfälle und Senkungsmulden (Teil 1 bis 3) im Maßstab 1 : 100 000 gibt für Erdfallflächen die Anzahl der Erdfälle pro km^2 an und für Gebiete mit Senkungsmulden den Flächenanteil in Prozent pro km^2 (Abb. 34). Die Karte stellt ein Maß für die Verkarstungsaktivität bzw. den Grad der Deformation des Gebirges dar. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die rezente Verkarstungsaktivität gegenüber den geologischen Hauptverkarstungsphasen geringer ist.

Die Häufigkeitskarte wurde aus der Karstgefährdungskarte abgeleitet. Die einzelnen Flächen oder Homogenbereiche der Gefährdungskarte wurden auf einer gesonderten Karte mit Ziffern numeriert. Insgesamt wurden 344 Flächen ausgehalten, ihre Größe bestimmt sowie die Anzahl der Erdfälle oder Senkungsmulden und der Flächenanteil der Karstformen angegeben. Dabei wurde eine Rückkontrolle der Gefährdungskategorien vorgenommen, wobei die Kategorien 1 und 2 keine Karstformen enthalten durften. Die Auswertung wurde sowohl für die rezenten als auch für die fossilen Formen vorgenommen.

Von den 344 Flächen existieren auf 228 Flächen insgesamt 3 284 Erdfälle und auf 58 Flächen 737 Senkungsmulden mit deren Pressungs- und Bruchformen.

Aus den vorliegenden Häufigkeiten und Flächenanteilen wurden Klassen gebildet, die in den o.g. Karten mit unterschiedlichen Farben dargestellt sind. Dabei werden die Erdfallhäufigkeiten in fünf Klassen unterteilt und zwar in steigenden 10er-Schritten: die kleinsten Erdfallhäufigkeiten liegen bei 1 bis 10 und die höchsten bei > 40 Erdfällen/ km^2 .

Deutliche Unterschiede in den Erdfallhäufigkeiten ergaben sich zwischen seichtem und vom Festgebirge bedeckten Karst. Im seichten Karst dominieren hohe Erdfallhäufigkeiten, die durch orangefarbene und rote Töne beschrieben werden. Dagegen sinkt mit Abtauchen der Oberkante der verkarstbaren Gesteine in den Untergrund auch die Erdfallhäufigkeit.

Auch der Flächenanteil der Senkungsmulden/ km^2 in Prozent wurde in fünf Klassen untergliedert, jedoch in 20er-Abstufungen. Die geringste Klasse beinhaltet einen Flächenanteil von 10 bis 30 %. Die höchste Klasse beschreibt Flächen mit einem Senkungsmuldenflächenanteil von > 90 % bis 100 %. Erdfall- und senkungsmuldenfreie Gebiete (entsprechen den Gefährdungskategorien 1 und 2) bilden eine gesonderte Klasse und werden in einem hellen Braun dargestellt.

Insgesamt zeigt sich, dass etwa 70 % aller Erdfallfelder eine Erdfallhäufigkeit von 1 bis 10 Erdfällen/ km^2 besitzen. Die Aufsplitterung für die einzelnen Gefährdungskategorien 3 bis 7 zeigt Abb. 35. Für Kategorie 3 im rezenten nackt-seichten Karbonatkarst (z.B. GK 25, Bl. 5622 Steinau a.d. Straße und 5623 Schlüchtern, EHRENBERG & HICKETHIER 1982) liegen die maximalen Erdfallhäufigkeiten zwischen 1 bis 10. Bei den fossilen Erdfällen durch Sulfatverkarstung (Gefährdungskategorie 4) liegen die maximalen Erdfallhäufigkeiten von 30 bis 40 bei ca. 10 %. Etwa 30 % der Erdfallfelder besitzen noch Häufigkeiten zwischen 20 bis 30. Insgesamt liegen die Erd-

Tab. 13. Geotechnische Probleme der Karst-Gefährdungskategorien.

Gefährdungskategorien	Geotechnische Probleme der Gefährdungskategorien und Charakteristika hinsichtlich der Verkarstung
Kategorie 1	Keine vorhanden.
Kategorie 2	Klärung der Deckgebirgsmächtigkeit und möglicher Wasserwege. Klärung, ob aufgrund der geologischen und geomechanischen Voraussetzungen ein Bruch an der Erdoberfläche eintreten kann oder ob aufgelockerte Schlotte im Untergrund vorhanden sind.
Kategorie 3	Punktuell seltenes Auftreten von Erdfällen, die verfüllt oder abgerammt werden können; Suffosionssenkungen und innere Erosion über Karbonathohlräumen sind häufiger. Erdfalltiefen: 1–3 m, Durchmesser: 1–4 m. Unterirdische Hohlraumgrößen: 2,50 • 3 m.
Kategorie 4	Fossile Erdfälle sind an der Erdoberfläche oft nicht mehr erkennbar. Die Füllungen sind oft setzungs-, wasser- und frostempfindlich, oft auch aufgelockert und besitzen daher geringere Tragfähigkeiten als das umliegende Gestein. Vor allem Setzungsunterschiede durch inhomogenen Baugrund sind kritisch einzu-stufen. In groß dimensionalen Erdfällen können sich bei starken Setzungen die Grundwasserverhältnisse durch relativen Anstieg der Grundwasseroberfläche mit eventuellen Baugrundvernässungen verändern. Durch Grundwasserabsenkung können Setzungen eintreten. Die Mantelreibung kann bei Pfählen stark verringert werden. Die Tiefe der Erdfälle bzw. der eigentliche Karsthorizont ist oft nicht hinreichend genau bekannt, daher ist das Gründungsniveau schwer abzuschätzen (v.a. für Pfähle). Der Bruchprozess kann unterirdisch noch aktiv oder aber unterbrochen sein (diskontinuierlicher Bruchprozess). Die Einschätzung, ob der Hochbruch bis an die Erdoberfläche erfolgen kann, ist schwierig. Die Erdfälle sind oft nur zufällig aufgeschlossen. Die Auflockerung im unterirdischen Schlot beträgt 5–10 %. Etwa 5 % von ehemals fossilen Formen zeigen rezente Nachbrucherscheinungen. Maximale Erdfalltiefen liegen im vom Festgestein bedeckten Karst bei 28 m. Im nackt-seichten Karst liegen die Durchmesser bei 73 % unter 4 m. Die unterirdischen Hohlräume betragen wenige Meter bis etwa 70 m. Bei 90 % der Erdfälle liegt die Deckgebirgsmächtigkeit unter 50 m.
Kategorie 5	Aktive Verkarstung mit Bruchgefährdung. Einsetzende Bruchvorgänge unterhalb von Bauwerken mit Entstehung von Frei- und Kraglagen. Suffosionssenkungen, innere Erosion über Hohlräumen. Erosions- und Suffosionsempfindlichkeit überlagernder Lockergesteinsschichten nach DIN 19700 ist möglich. Berücksichtigung von Sickerwasserströmung und hydraulischem Gefälle. Potenzielle Hohlräume im Untergrund sind möglich. Verkarstung setzt v.a. nach Niederschlägen, der Schneeschmelze oder Hochwässern ein; sie kann aktiviert oder verstärkt werden durch Eindringen von Wässern aus defekten Leitungssystemen oder Absinken der Grundwasseroberfläche. Erdfallhäufigkeiten sind oft sehr groß, dafür treten relativ kleine Erdfalldurchmesser auf, die gründungstechnisch sowie statisch-konstruktiv zu überbrücken sind. Erdfalltiefen: 1–3 m; Erdfalldurchmesser: 1–4 m. Es ist davon auszugehen, dass die oberen Erdfalldurchmesser häufig kleiner als die unteren sind und es durch Alterung zu Nachbrucherscheinungen der Erdfallwände kommen kann. 42 % aller Erdfallformen gehören der Kategorie 5 an. Bei nichtbindiger Überdeckung des Hohlraums erfolgt der Bruchprozess schnell. Bei bindigen Deckschichten, die Zugspannungen aufnehmen, tritt der Bruchprozess meist zeitlich verzögert ein. Er ist v.a. abhängig von der Kohäsion c' , die bei Wasserzufuhr gegen 0 abfallen kann. Die maximale Lockergesteinsüberdeckung beträgt 10 m, meist liegt sie bei 1–2 m. Liegen Hohlräume im Untergrund vor, so liegt die Bruchwahrscheinlichkeit bei Deckgebirgsmächtigkeiten von 1–4 m bei 85–100 %. Meist erfolgt der Ausbruch über die gesamte Breite des Hohlraumes. Die kritische Spannweite ist erreicht, wenn die durch das Eigengewicht bewirkten Druck- und Zugspannungen das Mohr'sche Bruchkriterium erfüllen. Die Erdfallhäufigkeiten liegen meist zwischen 4–10 Erdfällen/km ² , können aber auf 40 Erdfälle/km ² ansteigen. Spannungumlagerungen in den Fundamenten treten auf. Damit ergibt sich eine ungleichmäßige Verteilung der Bauwerklasten in den Untergrund. Im Bauwerk entstehen Druck- und Zugspannungen, die nach Überschreiten der Festigkeit bzw. des Krümmungsradius zu Rissbildungen führen können. Durch Frei- und Kraglagen der Gründungselemente erfolgt die Lastübertragung in den Untergrund nicht mehr oder nur noch teilweise.

Gefährdungskategorien	Geotechnische Probleme der Gefährdungskategorien und Charakteristika hinsichtlich der Verkarstung
Kategorien 6 und 7	<p>Aktive Verkarstung mit Bruchgefährdung; Erdfallhäufigkeiten sind geringer gegenüber Kategorie 5. Aufgrund der wesentlich größeren Durchmesser ist mit größeren Frei- und Kraglagen bis hin zur vollständigen Bauwerkszerstörung zu rechnen.</p> <p>Da der Karsthorizont wesentlich tiefer liegt, ist der Bruchprozess schwieriger einzuschätzen. Der Verkarstungsprozess kann unterirdisch unterbrochen sein (diskontinuierlicher Bruchprozess). Die Schlote, die mit nachgebrochenem Material gefüllt sind, besitzen teilweise hohe Mächtigkeiten. Das Material ist meist aufgelockert und besitzt geringere Tragfähigkeiten als das umliegende Gestein. Große Erdfälle sind mit statisch-konstruktiven Bauwerksmaßnahmen i.A. nicht zu überbrücken. Etwa 94 % der Erdfälle haben Durchmesser bis 50 m. Suffosionssenkungen über Hohlräumen treten auf. Gründungstechnisch ist mit einem starken Mehraufwand zu rechnen. Tonsteine brechen gegenüber den spröden Sandsteinen wegen geringerer Festigkeiten schneller, besitzen im Allgemeinen aus geologischen Gründen jedoch kleinere Erdfalldurchmesser. Die Deckgebirgsmächtigkeiten variieren zwischen wenigen Metern bis meist 50 m. Nur selten liegt die Mächtigkeit des Deckgebirges über 50 m. Das Gründungsniveau ist schwer abschätzbar.</p>
Kategorie 8	<p>Die Mulden sind häufig mit Schichten gefüllt, die wasser-, frost- und setzungsempfindlich sind. Die Tragfähigkeit der Füllungen ist herabgesetzt. Das Gebirge zeigt eine starke Auflockerung mit deutlich erhöhten Wasserdurchlässigkeiten. Versturzbrekzien sind bis 150 m Tiefe nachgewiesen. Das Gebirge hat meist gebräuchlichen Charakter und besitzt im Allgemeinen geringere Tragfähigkeiten und Standfestigkeiten. Die Längen betragen bis zu 2 km, die Breiten bis 300 m. Etwa 80 % aller Formen besitzen fossiles Alter.</p>
Kategorie 9	<p>Aktive Verkarstung mit starken Senkungen der Senkungsmulden. Vor allem an Störungskreuzungen liegen die Absenkbeträge am aktiven Salzhang im Dezimeterbereich pro Jahr. Durch Grundwasserabsenkungen werden sehr variable Senkungsbeträge hervorgerufen. Auftreten von Rissen, Spalten und Erdfällen im äußeren Zerrungsbereich. Ferner ist im Bereich der Senkungsmulde mit Krümmungen, Längenänderungen und Schiefelagen zu rechnen, die sich auf die Gründung und das Bauwerk negativ auswirken können. Änderungen von Spannungszuständen im Gründungsbereich. Es treten vertikale und horizontale Verschiebungen an der Geländeoberfläche auf. Auftreten von Spannungskonzentrationen. Nach Überschreiten von Bruchspannungen können Schäden am Bauwerk auftreten. Durch unterschiedliche Senkungen entstehen Schiefelagen. Eine unterschiedliche Schiefelage innerhalb der Gründungsfläche erzeugt Biegemomente in der Bauwerkskonstruktion (Krümmung). Die Längenänderung kann eine Längung oder eine Kürzung der Gründungsfläche bewirken.</p> <p>An übersteilten Hängen können Rutschungen auftreten. Die Muldenfüllungen sind wasser-, frost- und setzungsempfindlich und nicht konsolidiert. Die Tragfähigkeit ist herabgesetzt. Durch eine Senkung finden Veränderungen der ursprünglichen Gelände- und Grundwassersituation statt, die zu Baugrundveränderungen führen können. Das Gebirge ist insgesamt aufgelockert. Hierdurch kann die Gebirgsdurchlässigkeit erhöht und die Standfestigkeit des Gebirges verringert werden. 20 % der dokumentierten Senkungsmulden zeigen rezente Bewegungen.</p>
Kategorie 10	<p>Durch die fortschreitende Verkarstung im Untergrund können sich künftig Senkungsmulden und Erdfälle bilden, die bisher noch nicht vorliegen. Geotechnisch geht ein dynamischer Prozess vorstatten.</p>
Kategorie 11	<p>Werden Senkungsmulden vorgefunden, dann siehe Kategorie 8.</p>

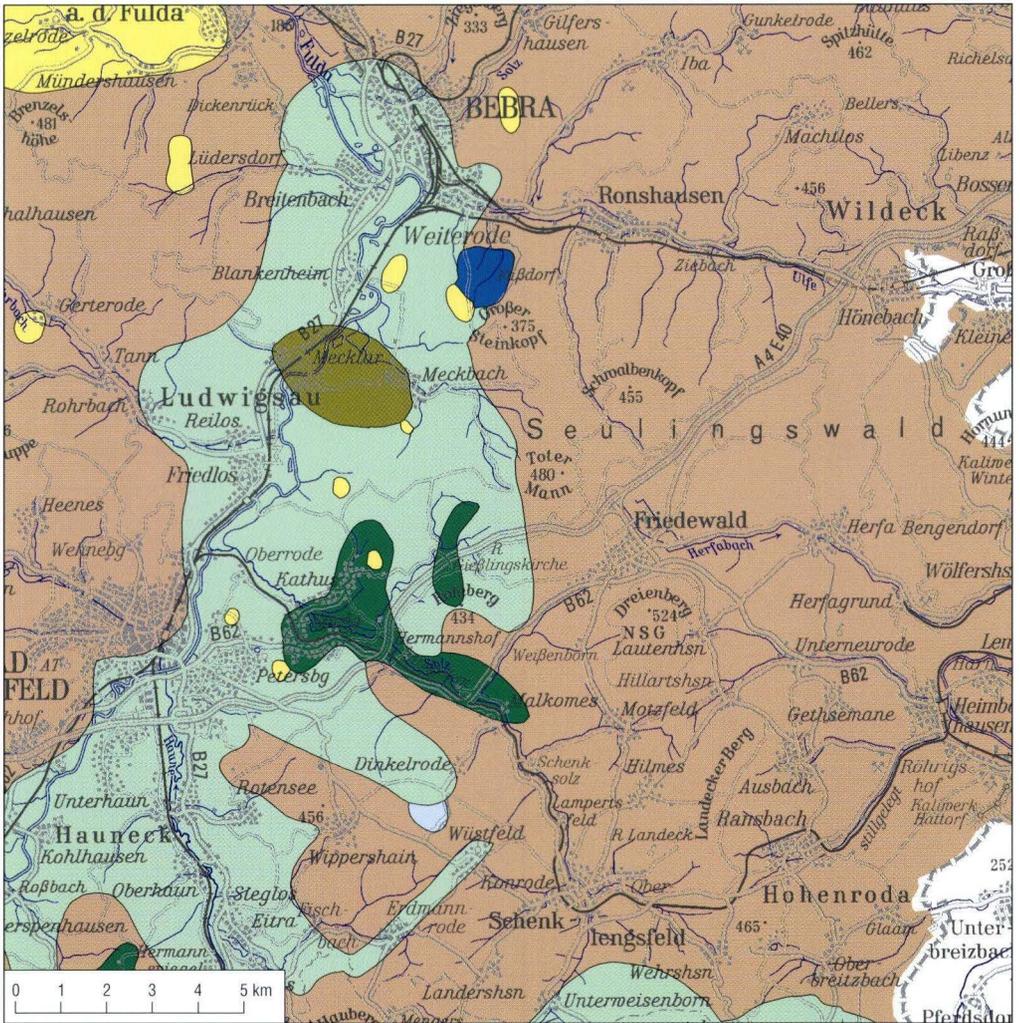


Abb. 34. Ausschnitt aus der Erdfallhäufigkeitskarte (Bl. L 5124 Bad Hersfeld).

fallhäufigkeiten der fossilen Erdfälle relativ hoch, und es ist davon auszugehen, dass einige Erdfälle durch Zusedimentation nicht mehr an der Erdoberfläche erkennbar sind und deshalb durchaus mit etwas höheren Erdfalldichten zu rechnen ist.

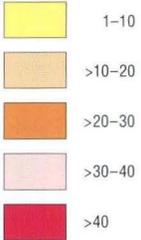
Die rezenten Erdfälle im nackt-seichten Sulfatkarst weisen bis über 40 Erdfälle/km² auf (GK 25, Bl. 4925 Sontra und 5224 Eiterfeld), jedoch nur in zwei Gebieten. Die Kategorien 6 und 7 weisen maximale Häufigkeiten von 30 bis 40 auf,

wobei die Erdfälle durch tiefen Zechsteinsulfatkarst gegenüber den Röt- und Muschelkalkerdfällen insgesamt höhere Häufigkeiten aufweisen. Im Ganzen fallen die Erdfallhäufigkeiten von der Kategorie 5 über Kategorie 6 zu Kategorie 7 ab.

Regional liegen im NW Hessens im Allgemeinen geringe Erdfallhäufigkeiten vor, während im NE Erdfallgebiete mit deutlich hohen Häufigkeitsklassen verbreitet sind und damit eine insgesamt höhere Verkarstungsaktivität, vor allem

erdfall- und senkungsmuldenfreie Gebiete

Sulfatkarst: Angabe der Erdfallhäufigkeiten [Erdfälle/km²]



Salzkarst: Angabe des prozentualen Flächenanteils der Mulden/km² [%]



◀ Legende zu Abb. 34.

im nackt-seichten Oberflächenkarst des Zechsteins, anzeigen. Dies hängt primär mit der geologisch stärkeren Verbreitung der verkarstbaren Gesteine sowie einer höheren Gebirgsbelastung zusammen.

Die Senkungsmulden machen in den ausgewiesenen Gefährdungsgebieten des Chloridkarstes teilweise einen großen Flächenanteil aus. Im nördlichen Salzhangbereich zeigen sich gegenüber dem südlichen höhere Flächenanteile. Nach der Karstgefährdungskarte liegen hier auch deutlich mehr rezente Bewegungsgebiete, was bei Baumaßnahmen berücksichtigt werden muss.

4.6 Genauigkeitsbetrachtungen

Bei dem gewählten Maßstab 1 : 200 000 der Karstgefährdungskarte ist darstellungstechnisch minimal 2 km² Fläche abzuleiten. Bei der Entwicklung der Generallegende ist diese Flächenauflösung Grundlage für die abzuleitenden ingenieurgeologischen und bautechnischen Eigenschaften gewesen.

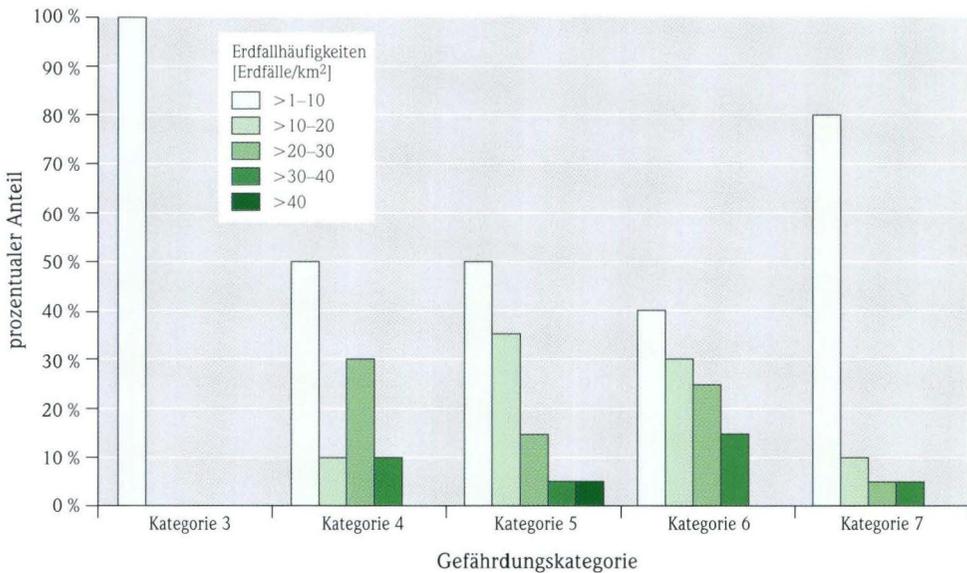


Abb. 35. Prozentualer Anteil von ermittelten Erdfallhäufigkeiten der einzelnen Gefährdungskategorien.

Da die Dokumentationsgrundlage aller nachgewiesenen Erdfälle und Senkungsmulden auf einem Maßstab von 1 : 25 000 beruht, besitzen die Karten eine hohe Genauigkeit. Die Karten können jedoch nicht die Vollständigkeit der Karstphänomene garantieren. Sie sind das Ergebnis aller zum jetzigen Zeitpunkt vorhandenen Karten, Gutachten, Erläuterungen, Literaturauswertungen und eigener Geländebefunde. Bereits die linienhaften Erkundungen und Aufschlussarbeiten zeigten, dass gerade verfüllte und tiefere Schlotte nur zufällig entdeckt wurden. Auch Schlotte, die noch nicht bis an die Erdoberfläche hochgebrochen sind, können nur selten und zufällig erfasst werden. Hinzu kommt,

dass Erdfälle bereits kurz nach ihrer Entstehung wieder verfüllt werden und so nicht mehr an der Geländeoberfläche erkennbar sind. Ferner wird postuliert, dass nicht alle Ereignisse dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie mitgeteilt wurden und damit bekannt sein können. Geologische Kartierungen besitzen teilweise ein hohes Alter, so dass sie möglicherweise nicht mehr den aktuellen Geländebefund repräsentieren. Die Kartierungen wurden von verschiedenen Personen durchgeführt, so dass vor allem im Bereich der Senkungsmulden subjektive Einschätzungen in die Bewertung mit eingingen.

5. Bebaubarkeit von Karstgefährdungsgebieten

5.1 Auswirkungen der Karstprozesse auf Bauwerke und Baumaßnahmen

Die Auswirkungen der Karstprozesse und die hieraus resultierenden Deformationen werden für das ingenieurgeologische Kartenwerk beschrieben, da die in Hessen bekannten Bauschäden sowie bautechnische Grundlagen in die Abgrenzung der ingenieurgeologischen Gefährdungskategorien eingegangen sind.

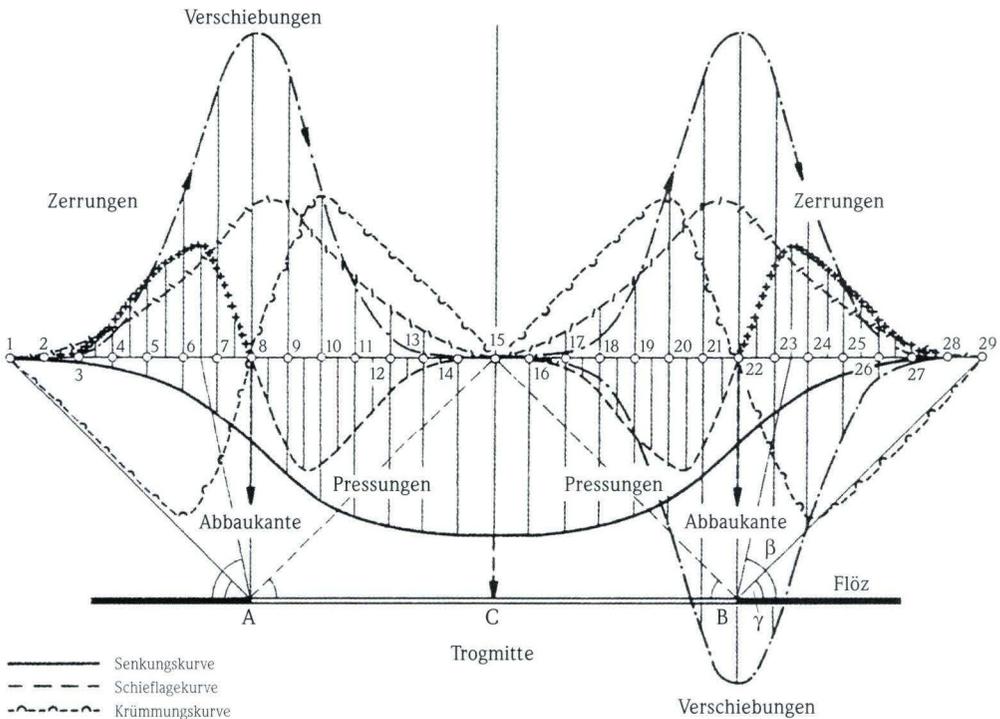
Die Wechselwirkung zwischen Baugrund und Bauwerk in Karstgebieten ist von verschiedenen Autoren beschrieben worden. KAMMERER weist bereits 1962 auf die Polstereffekte eines elastischen Baugrundes als Vorbeugemittel gegen Senkungsfolgen hin. Je unnachgiebiger der Baugrund, desto eher entstehen Spannungskonzentrationen und größere Frei- und Kraglagen. Geländevertorfungen durch Absinken der Geländeoberfläche werden bei homogenem Aufbau und ohne größere geologische Störungen ausreichend genau durch die Form der Senkungsmulde wiedergegeben (LEHMANN 1919). Das Hangende schert nicht lotrecht über dem Hohlraum ab, sondern presst sich seitlich in den Hohlraum hinein. Durch diese Bodenbewe-

gungen zum Hohlraumschwerpunkt treten neben vertikalen auch horizontale Verschiebungen an der Geländeoberfläche auf, die eine Längung bzw. Kürzung der Flächen oder Zerrungen bzw. Pressungen für das Bauwerk verursachen können. Die mit der muldenförmigen Verformung der Geländeoberfläche zusammenhängenden Verformungselemente gehen aus Abb. 36 hervor.

Die Verformungselemente eines Bewegungsvorganges wirken sich auf die Bauwerke bzw. die Bauwerkskonstruktion unterschiedlich aus. Sie verlangen daher auch unterschiedliche Sicherungs- oder Sanierungsmaßnahmen.

Eine gleichmäßige Senkung (Abb. 37) erzeugt keine zusätzlichen Spannungen in der Bauwerkskonstruktion und bleibt daher auch bei dem Entwurf und der Bemessung des Bauwerkes unberücksichtigt. Sie kann jedoch Einfluss auf die Vorflutverhältnisse nehmen und einen relativen Anstieg der Grundwasseroberfläche mit sich bringen (Baugrundvernässung). Außerdem können Versorgungs- und Entsorgungsleitungen betroffen sein.

Dieser Vorgang ist übertragbar auf gleichmäßige Suffosions- und Erosionssenkungen über unterirdischen Hohlräumen.



- Senkungskurve
 - - - Schiefelagekurve
 - · - · - Krümmungskurve
 - - - - -> Verschiebungskurve
 + + + - - Längenänderungskurve
- Senkung:** Höhenunterschiede vertikal abgesenkter Punkte [cm].
Verschiebung: Längenunterschiede horizontal verschobener Punkte.
Schiefelage: Senkungsunterschiede zwischen benachbarten Punkten, bezogen auf deren horizontalen Abstand [mm/m].
Krümmung: Unterschiede der Schieflagen benachbarter Strecken.
Vertikale Längenänderung: Unterschiedliche Absenkung übereinander liegender Punkte. Es können Streckungen und Stauchungen unterschieden werden.
Bruchwinkel β : Winkel zwischen einer Horizontalen im Niveau der Oberkante des unterirdischen Hohlraumes an der Grenze zum intakten Gebirge und dem Maximum der Zerrungen an der Erdoberfläche.
Grenzwinkel γ : Winkel zwischen einer Horizontalen im Niveau der Oberkante des unterirdischen Hohlraumes an der Grenze zum intakten Gebirge und dem senkungsfreien Rand der Senkungsmulde an der Erdoberfläche.

Abb. 36. Der Verlauf und die Elemente der Senkungsmulde (SMOLTZYK 1992).

Eine unterschiedliche Senkung bringt für das Bauwerk eine Schiefelage (Abb. 38), deren Maximum am Übergang zwischen dem konvexen zum konkaven Teil der Senkungsmulde auftritt. Mit der damit verbundenen Kippung

entstehen neben den sonst vertikalen Kräften zusätzliche Horizontalkomponenten, die vor allem bei schlanken Bauwerken oder Bauwerken in einer Dichtungswanne zu berücksichtigen sind.

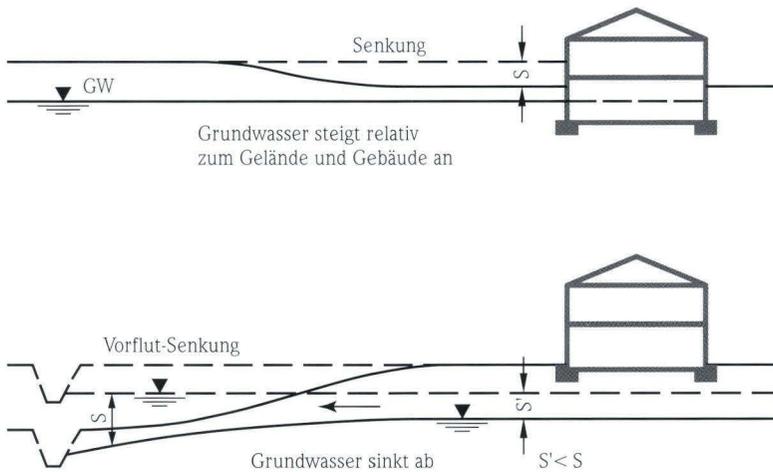


Abb. 37. Einfluss einer gleichmäßigen Geländesenkung (SMOLTZYK 1992).

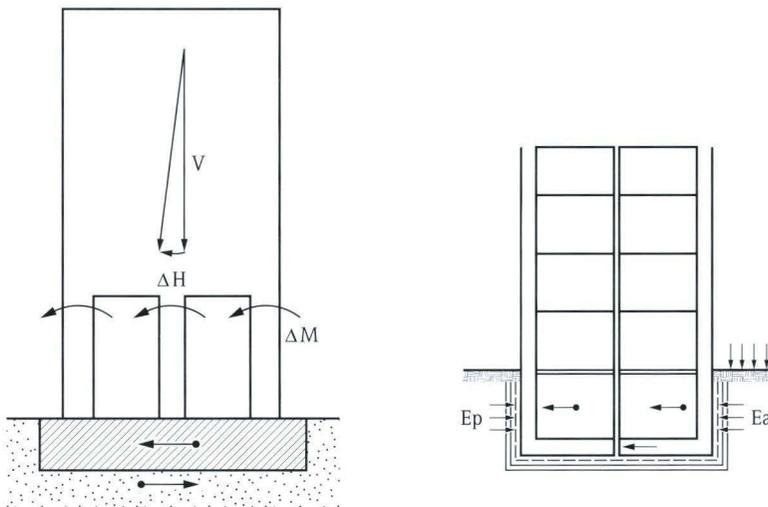


Abb. 38. Wirkung einer Schiefelage bei schlanken Gebäuden und Bauwerken in Dichtungswannen (SMOLTZYK 1992).

Die Krümmung stellt eine unterschiedliche Schiefelage innerhalb der Gründungsfläche dar und erzeugt Biegemomente in der Bauwerkskonstruktion (Abb. 39). Die Größe dieser Beanspruchung ist abhängig von der Biege- und Verbindungssteifigkeit der konstruktiv zusammen-

hängenden Bauteile. Während ein ideal schlaffes Bauwerk ohne zusätzliche Beanspruchung der Krümmung folgt, entstehen für ein starres Gebäude Freilagen mit unterschiedlichen Auflagerbedingungen. Die meisten Bauwerke besitzen eine Steifigkeit zwischen starr und schlaff,

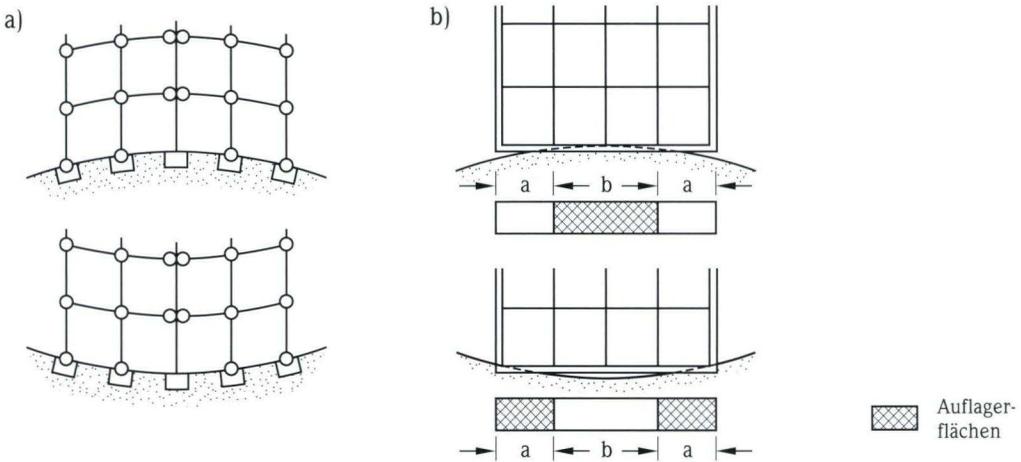


Abb. 39. Wirkung einer Krümmung auf a) schlaffe und b) starre Bauwerke (SMOLTZYK 1992).

so dass die Bauwerke der Krümmung bis zu einem bestimmten Maß folgen können, ohne Schaden zu nehmen. Die Form und das Ausmaß der Freilagen bzw. Kraglagen sind nicht nur abhängig von der Ausbreitung des Hohlräum, sondern auch von der Zusammendrückbarkeit des Untergrundes. Bei hartem Untergrund können Spannungskonzentrationen entstehen.

Eine Längenänderung kann sowohl eine Längung als auch eine Kürzung der Gründungsflächen bewirken. Je nach ihrer Wirkung auf das Bauwerk werden diese Vorgänge als Zerrungen oder Pressungen bezeichnet. Die konvexe Form der Senkung (Sattel) bringt die Längung und die konkave Form (Mulde) die Kürzung. Durch die Relativverschiebungen zwischen Gründungsflächen und Bauwerk entstehen Reibungskräfte in den Sohl- und Seitenflächen und Erdwiderstände vor den Stirnseiten der in den Boden einbindenden Kellerwände.

Bei dem plötzlichen Hochbruch eines Erdalles bis an die Tagesoberfläche stellen sich für die Bauwerke und die Gründungselemente Frei- und Kraglagen ein (Abb. 40). In beiden Fällen

werden sich eine Spannungsumlagerung und damit eine ungleichmäßige Verteilung der Bauwerkslasten in den Untergrund ergeben bzw. können Bauwerkslasten teilweise nicht mehr übertragen werden. Im Bauwerk selbst entstehen Druck- und Zugspannungen, die nur bis zu einem gewissen Grad konstruktiv aufgenommen werden können und bei Überschreiten der Bauwerksfestigkeit zu Rissbildungen führen.

5.2 Auswahl typischer Bauschäden in Karstgefährdungsgebieten

Anlage 1 zeigt eine Auswahl der in Hessen bekannt gewordenen Bauschäden mit den vorgenommenen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen und die während größerer Erkundungskampagnen für Bauvorhaben aufgeschlossenen Karsterscheinungen, bei denen konstruktive Sicherungen von Bauwerken oder Untergrundverbesserungen vorgenommen wurden. Schadensfälle wurden ingenieurgeologisch analysiert und bewertet.

Die Gefährdungskategorien stehen im Einzelnen für bautechnische Probleme bei

- aktiven Erdfällen mit unterschiedlichen Primärdurchmessern; eine vergleichbare Problematik besteht bei Bruchformen der aktiven Senkungsmulde (Kategorien 3, 5, 6, 7, 10),
- Prozessen der hydromechanischen Deformation,
- fossilen Erdfällen mit nachgiebigen, instabilen Erdfallfüllungen; eine vergleichbare Proble-

matik besteht bei fossilen Senkungsmulden (Kategorien 4, 8, 11),

- aktiven Senkungsmulden mit ihren Pressungs- und Zerrungszonen (Kategorie 9).

Verschiedene Beispiele sollen die charakteristischen bautechnischen Probleme aufzeigen.

Bei Vorhandensein von Lockersedimenten über den verkarsteten Gesteinen kann es bei Durchströmung mit kritischem hydraulischem Gefälle zu hydromechanischen Deformationen

Geotechnische Auswirkungen von Erdfällen

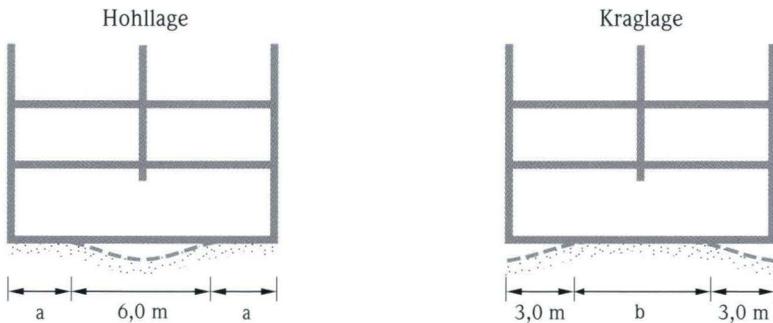


Abb. 40. Erdfall unter dem Haus Hinz (Bl. 4923 Altmorschen). Neben dem Wegbrechen ganzer Bauwerksteile erfahren die Gründung und das Bauwerk Verformungen durch starke Hohl- (Frei-) und Kraglagen (Foto: PICKEL 1963).

kommen. Hierdurch erfährt die Geländeoberfläche eine Senkung, was bei einem spröden Fahrbahnaufbau zu Rissbildungen durch Festigkeitsüberschreitungen führt. Eine schlaff ausgebildete Fahrbahn folgt der Bewegung bis zu einem gewissen Grad. In Abb. 41 wird der Unter-

schied zwischen Widerstandsprinzip und Ausweichprinzip von Baumaterialien verdeutlicht. Geht das Suffosionsstadium weiter voran, so kommt es zum Erdfall, angedeutet im unteren Bildausschnitt.

Geotechnische Auswirkungen von Suffosionssenkungen

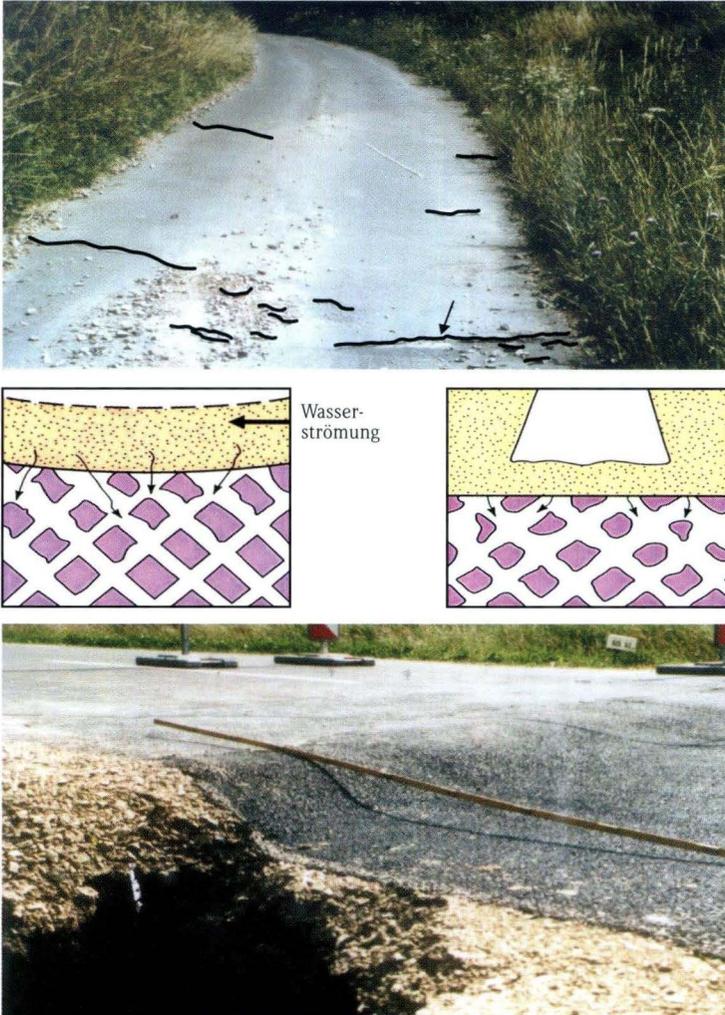


Abb. 41. Straßenschäden durch hydromechanische und bruchhafte Deformationen (Bl. 4725 Bad Sooden-Allendorf, Hundelshausen sowie Abterode).

In fossilen Erdfällen ergeben sich Gründungsprobleme in Folge der erosions- und setzungsempfindlichen Erdfallfüllungen.

Im Zuge des Ausbaus und der Verlegung der B 254 zwischen Fulda und Großenlüder wurde im Jahr 1970 das Bauwerk I bei Maberzell als Einfeldbauwerk im Bereich eines Erdfalles erstellt. Die Ort betonrammpfähle sind 14 m unter Gelände in steifem, tonig-feinsandigem Schluff

abgesetzt. Unter den Pfahlspitzen liegen noch bis zu 15 m mächtige setzungsempfindliche Schichten. Im März 1972 wurde mit der Schüttung der Anschlussdämme begonnen. Bereits im April 1972 wurden die Arbeiten bei 6 m Schütthöhe eingestellt, da sich große Setzungen an der Brücke zeigten, wobei sich die Widerlager entgegen der Erddruckrichtung schräg stellten. Der zeitliche Verlauf ist der Abb. 42 zu entnehmen.

Gründungsprobleme in Erdfallfüllungen

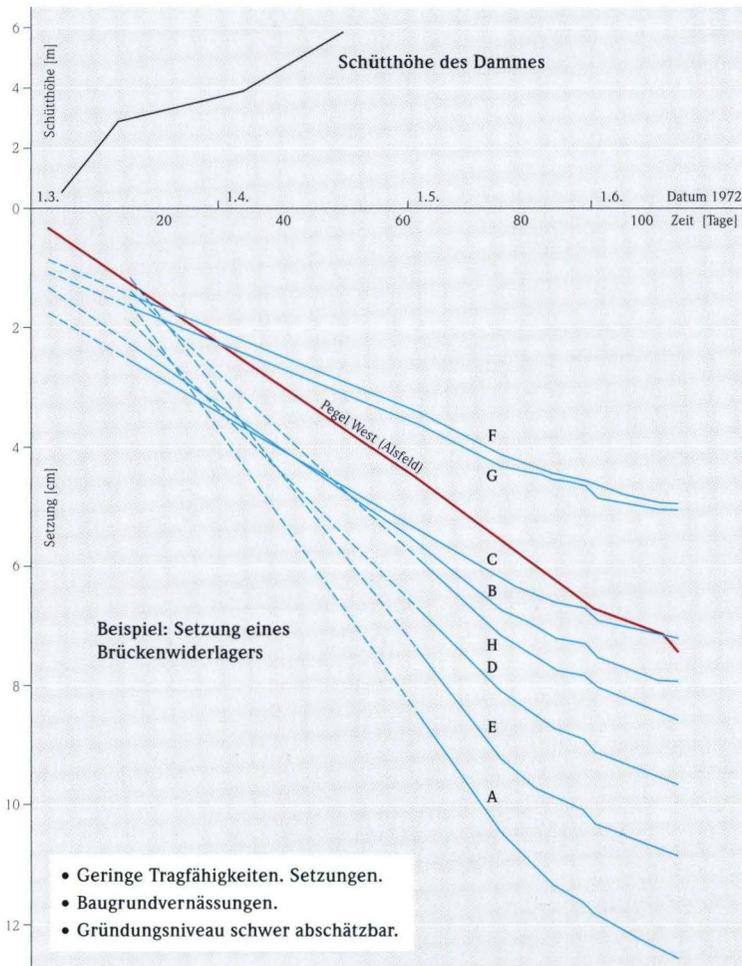


Abb. 42. Zeitlicher Verlauf der Setzungen an 8 Messpunkten an einem Brückenwiderlager bei Maberzell (Bl. 5423 Großenlüder) im Bereich einer fossilen Erdfallfüllung.

Als Gegenmaßnahme zu den Setzungen wurden Hohlwiderlager hergestellt sowie ein Damm-schüttmaterial mit geringerem Raumgewicht verwendet (MÜLLER 1972).

Im Bereich folgender Senkungsmulde konnten die Gesetzmäßigkeiten ihres Bewegungsverlaufes nachgewiesen werden. Das Bauwerk in Abb. 43 liegt im Pressungsbereich einer Senkungsmulde von Rothenkirchen. Durch seine Lage kommt es in ihm zu Spannungsumlagerungen, die im unteren Bereich zu Zug-, im oberen

Bereich zu Druckspannungen führen und das damit typische sattelförmige Schadensrissbild zeigen.

Am Rande einer Senkungsmulde auf Bl. 5224 Eiterfeld (Wildkaute) sind durch Zerrungsstrukturen Straßenschäden aufgetreten (MOTZKA & LAEMMLEN 1967). Es liegt ein rezentes Senkungsgebiet mit rezenten Zerrstrukturen vor. Risse und rezente Erdfälle wurden mit Bauschutt verfüllt. Die Bewegungen halten bis heute an.

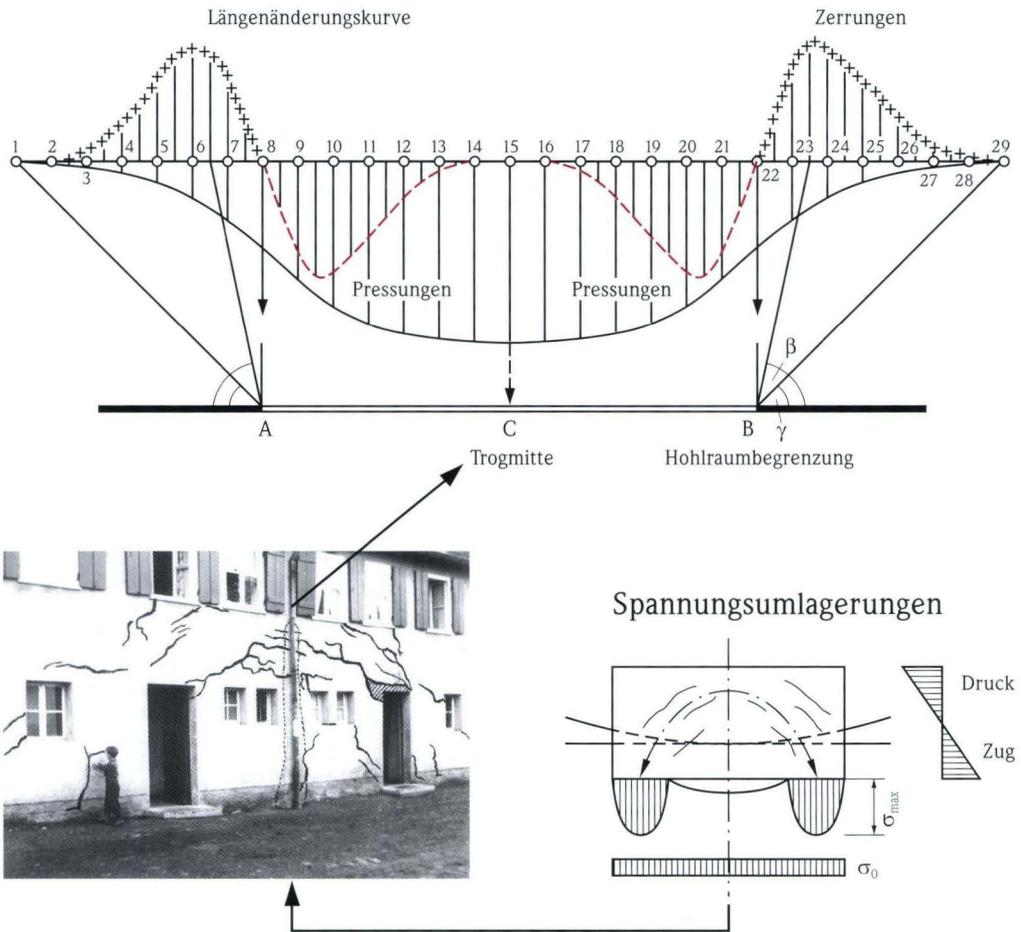


Abb. 43. Bauwerksschäden durch Spannungsumlagerungen im Bereich einer Pressungszone der Senkungsmulde von Rothenkirchen.

Im Auftrag des Kreisausschusses des Werra-Meißner-Kreises wurde 1996 eine Erdfallkartierung (Abb. 44) im Umfeld der Deponie „Am Breitenberg“ bei Meißner-Weidenhausen durchgeführt, um den Untergrund für eine mögliche Deponieerweiterung bewerten zu können (PFLUG 1996). Das Ergebnis war eine Häufung von 374 Erdfällen auf eine Fläche von 10 km² (Erdfallhäufigkeit 37 Erdfälle/km²).

Bei der geplanten Deponieerweiterung ist mit einem erhöhten Mehraufwand an erdbau-technischen Maßnahmen zu rechnen. Für die Erweiterung einer Deponie muss bei der vorliegenden Anzahl an Erdfällen gewährleistet sein, dass der verbesserte Untergrund der Basisabdichtung eine ausreichende Tragfähigkeit und eine geringe Wasserdurchlässigkeit aufweist.

Auswirkungen von Chloridkarst auf geplante Baumaßnahmen zeigten sich vor allem beim Bau von Talsperren. Geplante Sperrenstellen für die Talsperre Marbach/Haune und das Hochwasserrückhaltebecken Mackenzell (HOLTZ 1972, 1973, 1976, 1977 sowie HOLTZ & WENDLER 1975) liegen in fossilen Senkungsmulden. Geophysikalische und luftbildgeologische Messungen sowie Bohrungen zeigten eine extrem starke Auflockerung im Bereich der Dammaufstandsflächen und des Stauraumes. Wasserabpressversuche ergaben Durchlässigkeitswerte um 10⁻⁵ m/s. Hieraus leiten sich hohe Untergrunddurchlässigkeiten und eine Verminderung der Tragfähigkeit des Untergrundes ab. Die Gebirgsauflockerung war dermaßen stark, dass die Sperrenstelle für die Marbach-Talsperre talaufwärts verschoben wurde. Es erfolgte eine Abdichtung mittels Injektionsschleier und Schlitzwand.

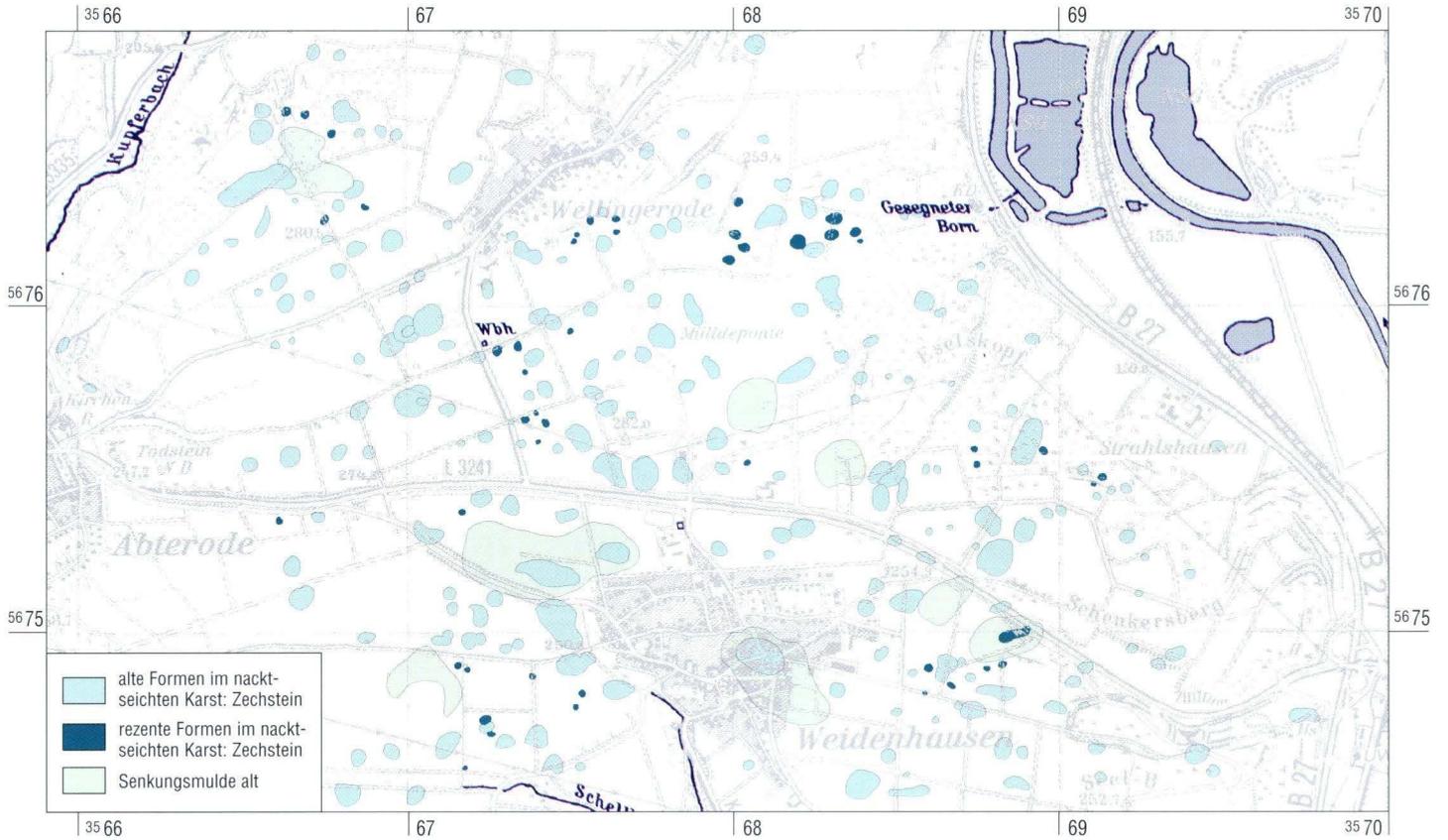
Vor allem im Rahmen größerer Streckenerkundungen für den Bau der Autobahnen (z.B. Kassel-Frankfurt, Rhönautobahn, Kassel-Ruhrgebiet, Kassel-Eisenach), Bundesbahnstrecken oder anderen linienförmigen Erkundungen (Bau von Hochspannungsleitungen) wurden fossile Erdfälle mit Durchmesser bis über 100 m aufgeschlossen. Die geplanten Trassen wurden

meist geoelektrisch kartiert und systematisch abgebohrt, teils wurde eine luftbildgeologische Auswertung vorangestellt. Die Abtrennung fossiler Schlotte wird aufgrund der meist geringeren elektrischen Widerstände der Füllungen < 50 Ωm vorgenommen, wobei das umgebende Gestein im Allgemeinen höhere Widerstände aufweist. Angaben zur Tiefe der Schlotte sind mit der geophysikalischen Messmethode jedoch nicht möglich. Hierzu sind Bohrungen erforderlich. Aufgeschlossene Schlotte im Bereich der vorgesehenen Dämme wurden meist bis 1,5 m Tiefe ausgekoffert und durch frostsicheres und tragfähiges Material ersetzt. Für eine Erhöhung der Tragfähigkeit bieten sich Zementinjektionen an.

Ein Beispiel für anthropogenen Einfluss zeigen die bebauten Gebiete von Cornberg. Im seichten und bedeckten Karst ist es hier zu erheblichen Bauwerksschäden durch rezente Erdfälle gekommen (GUNTERT 1954; PRINZ 1969, 1976). Durch eine gezielte Oberflächenentwässerung und eine Sanierung der bestehenden defekten Kanalisation konnte die aktive Verkarstung abgemindert werden. Die ersten Schäden traten vor allem in Form von Rissen und klaffenden Fugen in Wohngebäuden auf, die in einer Risskartierung aufgenommen wurden (Abb. 45).

Auf Bl. 4718 Goddelsheim wurden hydraulische Kontakte zwischen rezenten Erdfällen im Bereich einer Wassergewinnungsanlage (HÖLTING 1981) durch Uranin-Markierungsversuche belegt. Daher durften die Erdfälle nur mit unbedenklichem Material verfüllt werden.

Die häufigsten Schadensbilder in Hessen ergeben sich durch Suffosionssenkungen sowie Brucherscheinungen in meist oberflächennah anstehenden Sulfaten des Zechsteins, Mittleren Muschelkalkes und Röts. Meist treten im ersten Suffosionsstadium an Gebäuden Risse und Schiefstellungen auf. Begünstigt wurde die Verkarstung häufig durch den Kontakt mit Oberflächenwasser (starke Niederschläge, Schneeschmelze, Hochwässer) und aus defekten Lei-



Topographische Grundlage: TK 25 des Hessischen Landesvermessungsamtes, Wiesbaden, Verv.-Nr.: 2001-3-112



Abb. 44. Erdfallauftreten im Bereich einer geplanten Deponie bei Weidenhausen.

tungen zudringendes Wasser. Deutlich zeigen sich anthropogene Einflüsse und ein gehäuftes Erdfallauftreten im Bereich von Siedlungen.

Dank eingehender linienhafter geologischer Erkundungen im Bereich von großen Trassen der Bundesbahn, der Autobahnen oder von 400-kV-Hochspannungsleitungen sind in Hessen bisher jedoch noch keine katastrophalen Schadensereignisse eingetreten. Dies ist dadurch zu erklären, dass im Bereich von entdeckten Erdfällen und steilwandigen Schloten dementsprechende Sicherungsmaßnahmen und Bodenverbesserungen durchgeführt wurden.

5.3 Empfehlungen für geotechnische Maßnahmen in Karstgefährdungsgebieten

Die Empfehlungen für geotechnische Maßnahmen richten sich nach den abgegrenzten Gefährdungskategorien der in dieser Arbeit entwickelten Karstgefährdungskarte. Teilweise dienen Empfehlungen für mehrere Gefährdungskategorien, jedoch sind die Faktoren Erdfall-

durchmesser-, Tiefe und Erdfallhäufigkeit an die jeweiligen Maßnahmen anzupassen. Bei statischen Berechnungen für Wohngebäude muss der jeweilige repräsentative primäre Erdfalldurchmesser einer Gefährdungskategorie in die Berechnung einfließen. Generell weisen Bauwerke einen verschiedenen hohen Grad an Empfindlichkeit gegenüber Deformationen auf.

Es ist festzustellen, inwieweit ein Bauwerk durch den Verkarstungsprozess gefährdet wird. Die bruchhaften Deformationen (vor allem Gefährdungskategorien 5, 6, 7 und 9) können die Zerstörung von ganzen Bauwerken nach sich ziehen, ohne dass vorherige Anzeichen für die Deformation zu beobachten gewesen sind. In diesem Fall ist es besonders schwierig, geeignete Sicherungs- oder Sanierungsmaßnahmen zu treffen und damit das Bauwerk vor der Zerstörung zu bewahren.

In den beschriebenen Kategorien der Karstgefährdungskarte (Tab. 14) ist von einem unterschiedlichen Mehraufwand für

- Untersuchungsmaßnahmen,
- Gründungsmaßnahmen,

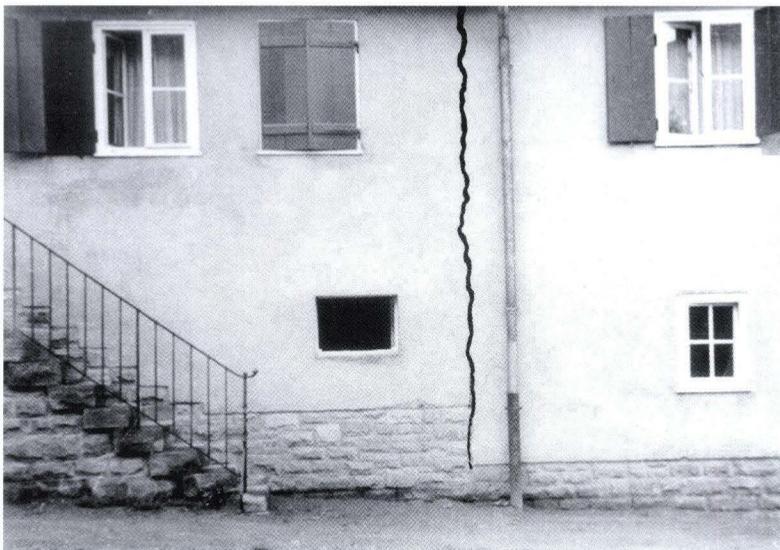


Abb. 45. Erste Bauwerksschäden in Form von Rissen an einem Haus in Cornberg (Bl. 4925 Sontra; Foto: GUNZERT 1954, HLUG, unveröff.).

- konstruktiv-statische Maßnahmen am Bauwerk und
- Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen auszugehen.

Bereits bei der Aufstellung von Raumordnungsplänen ist sowohl auf die geologischen Verhältnisse als auch auf die durch die Hohlräume bedingten Verformungen Rücksicht zu nehmen.

Kategorien 1 und 2

Für die **Kategorie 1** sind hinsichtlich der Karstgefährdung keine Sondermaßnahmen zu treffen, da sehr wahrscheinlich keine verkarstbaren Gesteine im Untergrund vorliegen.

Für die **Kategorie 2** ist unter normalen Umständen mit keinem Mehraufwand zu rechnen. Trotzdem sollte die Deckgebirgsmächtigkeit über möglichen verkarstbaren Gesteinen ermittelt werden, um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Erdfalls im Baufeld zu prognostizieren. Daneben sollten mögliche Wasserwege erfasst werden, die einen Karstprozess indizieren können. Es besteht die Möglichkeit, dass Schlote oder verdeckte Erdfälle während Baumaßnahmen angetroffen werden. Hierfür sind die beschriebenen Maßnahmen für die Kategorie 4 (fossile Erdfälle mit teilweise setzungsempfindlichen Schichten, vgl. Kap. 5.3.2) gültig.

5.3.1 Geotechnische Maßnahmen in akuten Erdfallgebieten (Kategorien 3, 5, 6 und 7)

Die folgenden Empfehlungen gelten für die Kategorien 3, 5, 6 und 7 (untergeordnet auch 10) der Karstgefährdungskarte mit akuter Erdfallgefährdung.

In umfangreichen Untersuchungsprogrammen (Tab. 15) ist zu klären, wie hoch die akute Bruch- und Karstgefährdung einzuschätzen ist. Ist die Existenz von Hohlräumen nachgewiesen, sollten diese mit Pfählen durchrammt oder verfüllt werden. In Abhängigkeit von der jeweiligen Gefährdungskategorie sind für weitere Annahmen und Berechnungen der repräsentative Primärdurchmesser sowie die Erdfallhäufigkeit zu ermitteln. In Gründungsflächen treten über rezenten Erdfällen insbesondere Frei- und Kraglagen auf (Abb. 46). In erdfallgefährdeten Gebieten sollten Bauwerke daher grundsätzlich gesichert werden. Entweder werden die Bauwerke für nach der Erfahrung abgeschätzten Krag- und Freilagen bemessen oder der Untergrund wird so vergütet, dass der Durchbruch nicht möglich oder für das Bauwerk unschädlich ist. Liegen Hohlräume nahe der Geländeoberfläche, so bie-

Tab. 14. Mehraufwand für Untersuchungs-, Gründungs-, statisch-konstruktive sowie Überwachungsmaßnahmen.

Gefährdungskategorie	Untersuchungsmaßnahmen	Gründungsmaßnahmen	statisch-konstruktive Maßnahmen	Kontrollmaßnahmen
Kategorie 1	normal (-)	normal (-)	normal (-)	normal (-)
Kategorie 2	normal-hoch (-+)	normal (-)	normal (-)	normal (-)
Kategorie 3	normal (-)	normal (-)	normal (-)	normal (-)
Kategorie 4	hoch (+)	sehr hoch (++)	meist normal (-)	normal-hoch (+)
Kategorie 5	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)	hoch-sehr hoch (++)	sehr hoch (++)
Kategorie 6	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)
Kategorie 7	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)
Kategorie 8	hoch (+)	hoch (+)	hoch (+)	hoch (+)
Kategorie 9	sehr hoch (++)	sehr hoch (++)	meist normal (-)	normal-hoch (+)
Kategorie 10	normal (-)	normal (-)	normal (-)	normal (-)
Kategorie 11	hoch (+)	hoch (+)	hoch (+)	hoch (+)

Tab. 15. Geotechnische Maßnahmen in akuten Erdfallgebieten.

	Untersuchungsaufwand	Gründungsaufwand	statisch-konstruktiver Aufwand	Überwachungsaufwand
Industrie- und Städtebau	<p>Kartierung, Kartenauswertung, Bohrungen, Geophysik, Rammsondierungen. Hohlräume im Untergrund erkunden. Suffosions- und Erosionsempfindlichkeit von überlagerndem Lockergesteinsmaterial überprüfen. Sickerwasser- und Grundwassersituation und kritisches hydraulisches Gefälle klären. Prognostizierung von Erdfällen vornehmen (Erdfallhäufigkeit und Erdfallgeometrie).</p>	<p>Spezielle Fundamentausbildung (z.B. Tatzten-, gespreizte Fundamente, Ringfundamente bei turmartigen Bauwerken, als Kragbalken ausgebildete Streifenfundamente).</p> <p>Tiefgründungen mit Pfählen in das Liegende des verkarsteten Horizontes. Sprengen, Verfüllen, Verpressen von Erdfällen und unterirdischen Hohlräumen.</p> <p>Fangnetze im Boden. Ableitung von Oberflächen- und Sickerwasser.</p>	<p>Mehraufwand für konstruktive Maßnahmen, z.B. durch Aufhängen von Stützen oder durch nachstellbare Stützen.</p> <p>Berechnung einer statisch sicheren Konstruktion in Abhängigkeit vom kritischen Erdfalldurchmesser.</p> <p>Bewehrte Streifenfundamente mit Stahlbetonbalken und Verbindung zur Kellerdecke.</p>	<p>Setzungs-, Erdfallpegel sowie Gipsmarken bei Hausrissen. Nivellementsmessungen.</p> <p>Flächenhafte Bauwerks- und Geländekontrolle.</p> <p>Ortungsseismik.</p> <p>Erfassung von Rohrleitungsbrüchen. Dichtigkeitsprüfungen der Kanalisation.</p> <p>Absperrungen bei Erdfällen.</p>
Verkehrsbau	siehe oben	<p>Umgehung von Erdfallgebieten. Aufspreizung der Fahrbahnen.</p> <p>Querung des Erdfallgebietes auf kürzestem Wege.</p> <p>Deckgebirgsverfestigungen. Bewehrte Erde. Sprengen, Verfüllen, Verpressen von Erdfällen und Hohlräumen.</p> <p>Verbesserung der Straßenbettung.</p>	Ausführung von Stahlbetonfahrbahnen.	Warneinrichtungen und Nivellementsmessungen.

Fortsetzung Tab. 15.

<p>Wasserbau</p>	<p>Sehr hoher Untersuchungsaufwand. Zusätzlich zu den oben genannten Maßnahmen muss insbesondere die Untergrunddurchlässigkeit und die Tragfähigkeit des Untergrundes überprüft werden durch Wasserabpressversuche, Probeinjektionen, Tracerversuche und Stollenerkundungen.</p>	<p>Verschiebung der Sperrenstelle. Möglichst Meidung von akuten Erdfallgebieten.</p> <p>Dichtungsmaßnahmen im Staubecken und am Sperrbauwerk: Einbringen bindiger Deckschichten; Überbrücken mit Halbschalen, Injektionen. Tragfähigkeitserhöhung durch Stabilisierungsmaßnahmen.</p>	<p>Konstruktive Sicherungen. Gründung auf Rosten.</p>	<p>Nivellements am Damm und am Bauwerk. Regelmäßige Bauwerkskontrollen. Extensometer.</p> <p>Hydrogeologisches Beobachtungssystem. Hydrochemische Untersuchungen zur Beurteilung der Verkarstungsaktivität.</p>
<p>Leitungsbau</p>	<p>siehe oben</p>	<p>Querung des Erdfallgebietes auf kürzestem Weg.</p> <p>Verlegung in Schleifen. Einbringen von Polsterschichten.</p> <p>Überbrückung von Hohlräumen (Stahlbetonbalken, Schutzrohre, Aufhängen der Leitung).</p>		<p>Kontrollnivellements sowie Fernsehsondierungen und Druckprüfungen.</p>
<p>Tunnelbau</p>	<p>siehe oben</p>	<p>Untergrundsanieierung und Grundwasserriegel.</p>	<p>Aufständierung des Tunnels. Verstärkung des Ausbaus (Längsbewehrung, geschlossener Stützring, Überfirstung).</p>	<p>Regelmäßige Bauwerksüberwachung.</p> <p>Nivellements.</p>

ten sich Pfeiler- oder Pfahlgründungen auf ungestörtem Gebirge an. Hierbei muss überprüft werden, ob im Untergrund mit einer Längenänderung zu rechnen ist, die einen negativen Einfluss auf eine Pfahlgründung ausüben kann. Die wirtschaftliche Grenze für Pfahlgründungen liegt in Abhängigkeit vom Bauwerk bei 10 bis 20 m Tiefe. Teile des Bauwerkes können auskragend ausgebildet sein.

Sicherungsmaßnahmen werden auch erforderlich, wenn erosions- und suffosionsempfindliche Erdstoffe über Hohlräumen anstehen. Dieser schwer erfassbare Einfluss auf die Lagerungsbedingungen des Gebäudes verlangt in der Regel eine Tiefgründung bis auf den standfesten Untergrund. Der Untergrund kann jedoch auch abgedichtet werden, vor allem auch dann, wenn ein Bauwerk aufgrund seiner Konstruktion nicht austegert werden kann. Durch das Einpressen von Zementsuspension in die Hohlräume werden verschiebungsfreie Kontakte instabiler Gebirgsbereiche hergestellt.

In akuten Erdfallgebieten sind nach dem Abschluss von Baumaßnahmen unbedingt Kontrol-

len an den Bauwerken – z.B. durch Nivellements – durchzuführen. Die Standortwahl sollte, falls Alternativflächen vorhanden sind, überprüft werden. Erdfallgebiete müssen grundsätzlich auf dem kürzesten Weg überquert werden. Insgesamt ist für eine intakte Kanalisation Sorge zu tragen.

Bei Bauwerksschäden über Erdfällen richtet sich die Sanierung nach dem Ausmaß des Schadens. Häufig ist es ausreichend, den Untergrund mit Zement zu verpressen und Risse am Bauwerk mit Gipsmarken weiterhin zu überwachen. Bei zu großen Schäden ist der Abriss und Neubau oft wirtschaftlicher.

Das Bauen auf Karbonatkarst (**Kategorie 3**) in Hessen ist im Allgemeinen problemlos, da Erdfälle lediglich punktuell auftreten. Die in Hessen dokumentierten geringen Erdfallabmessungen können konstruktiv vom Bauwerk überbrückt werden.

Für die **Gefährdungskategorie 10** gelten die empfohlenen Maßnahmen, wenn die Wahrscheinlichkeit eines rezenten Erdfallereignisses innerhalb des intakten Salinars gegeben ist. Es ist mit niedrigen Erdfallhäufigkeiten, jedoch mit großen Erdfalldurchmessern zu rechnen. Eine

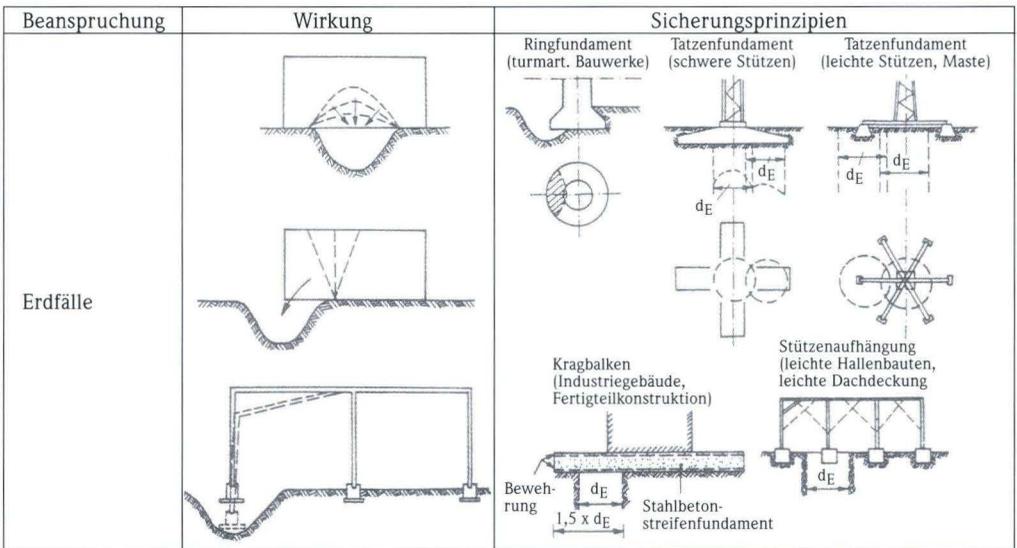


Abb. 46. Beeinflussung von Bauwerken und Sicherungsprinzipien bei Erdfällen (nach KAMMERER 1962).

Prognostizierung von Erdfallereignissen und die Ermittlung des kritischen primären Durchmessers sollte deshalb vorgenommen werden.

In Tab. 15 sind die geotechnischen Empfehlungen für Untersuchungs-, Gründungs-, statisch-konstruktive und Kontrollmaßnahmen aufgelistet. Es wird deutlich, dass neben einem hohen Untersuchungs- und Gründungsaufwand auch ein hoher Mehraufwand für statisch-konstruktive Maßnahmen erforderlich ist.

5.3.2 Geotechnische Maßnahmen innerhalb von Erdfall- und Senkungsmuldenfüllungen (Kategorien 4, 8, 9 und 11)

Die vorgestellten Maßnahmen sind in den Kategorien 4 (fossile Erdfälle) sowie 8 und 9 der rezenten und fossilen, meist gefüllten Senkungsmulden anzuwenden. Die Maßnahmen beziehen sich auf die setzungs-, wasser- und frostempfindlichen Füllungen. Im Gegensatz zu rezenten Bruchereignissen werden bei setzungsempfindlichen Füllungen besondere Anforderungen an die Gründung gestellt.

Die Erdfallhäufigkeiten sind sehr hoch, und das Auffinden fossiler Erdfälle erfolgt in erster Linie nur durch Untergrunderkundungen. Deshalb muss der Schwerpunkt der geotechnischen Maßnahmen bei der Erkundung solcher Formen liegen. Neben Geländebegehungen, Kartierungen, Bohrungen und Luftbildauswertungen bieten sich hier vor allem geophysikalische Methoden an, die das Füllmaterial aufgrund anderer Zusammensetzung oder starker Auflockerung vom umgebenden Gestein abgrenzen können.

Gleichmäßige Setzungen der Füllungen werden vom Bauwerk im Allgemeinen schadenfrei mitvollzogen. Jedoch kann es durch das Absinken zu einem relativen Anstieg der Grundwasseroberfläche und damit zu einer Baugrundver-nässung und einer Änderung baugrundphysikalischer Eigenschaften kommen. Bei Neubau-maßnahmen müssen daher die aktuellen Grundwasserhältnisse erfasst werden. Im Vorfeld könnte eine entsprechende Geländeerhöhung

durch Aufschüttung durchgeführt werden.

Bewährt hat sich auch die Herstellung eines Verbundes zwischen Bauwerk und nicht verkarstetem Untergrund durch Injektionspfähle. Dies ist wirtschaftlich jedoch nur bei nicht zu großer Tiefe des tragfähigen, nicht verkarsteten Gebirges vertretbar. Von grundlegender Bedeutung bei Pfahl- und Pfeilergründungen ist die Kenntnis der Tiefe des Schlotens. Um setzungsempfindliche Schichten setzungsarm zu überbrücken, können Stützen auf unterirdische Abfangbalken gestellt werden, die seitlich in ungestörtem Gebirge verspannt sind. Eine weitere Möglichkeit bieten Hohlraumwiderlager im Brückenbau. Als spezielle Fundamentausbildungen haben sich Tatzenfundamente, gespreizte Einzelfundamente und Ringfundamente bewährt, mit denen die Lasten auf größere Flächen verteilt werden.

Im Bereich von Verkehrswegen sollten ebenfalls o.g. Maßnahmen erfolgen, um eine bessere Bettung der Straße zu erzielen und Schäden im Übergangsbereich Füllung/ungestörtes Gebirge zu vermeiden.

Werden im Baugelände der Kategorie 11 fossile Senkungsmulden angetroffen, so gelten die geotechnischen Empfehlungen der Gefährdungskategorie 8.

Tab. 16 gibt zusammenfassend einen Überblick über die empfohlenen geotechnischen Maßnahmen in Erdfall- und Muldenfüllungen.

5.3.3 Geotechnische Maßnahmen in akuten Senkungsgebieten (Kategorie 9)

Bei Baumaßnahmen in akuten Senkungsgebieten (großräumig in Kategorie 9) ist von einem sehr hohen geotechnischen Mehraufwand auszugehen. Kleinräumig sind die empfohlenen Maßnahmen auch auf Senkungen durch innere Erosion und Suffosion übertragbar.

Im ersten Schritt ist zu prüfen, in welchem lokalen Bereich der Senkungsmulde ein Bauwerk geplant ist und mit welchen daraus zu folgernden Verformungselementen zu rechnen ist. Die

Tab. 16. Geotechnische Maßnahmen innerhalb von Erdfall- und Muldenfüllungen.

	Untersuchungsmaßnahmen	Gründungsmaßnahmen	konstruktiv-statische Maßnahmen am Bauwerk	Überwachungsmaßnahmen
Industrie- und Städtebau	Kartenauswertung, Rammsondierungen, Bohrungen, Kartierung, Luftbildauswertung, evtl. Geoelektrik, Erdfallstatistik, Grundwassersituation klären, auch unter Berücksichtigung einer möglichen Geländesenkung.	Sprengen, Abrammen, Auskoffern, Vergütung durch Kalkzugabe oder Zementinjektion, Flachgründungen, Fugen zwischen benachbarten Bauwerken, nachrichtbare Auflager, Dreipunktlagerung bei starker Schiefelage, Schaffung eines homogenen Baugrundes, unterirdische Hohlräume injizieren, Ableitung von Oberflächenwasser, evtl. leichte Geländeanhebung, Klärung von möglichem Auftrieb, Einbau von Pressenkammern, Verdichten von aufgelockertem Material. Verbundwirkung zwischen Bauwerk und festem Untergrund durch Injektionspfähle schaffen. Setzungsarme Überbrückung; Stützen auf vorgespannte Abfangbalken stellen.	Bei gleichmäßiger Senkung: Es sind keine zusätzlichen Spannungen im Baugrund zu erwarten. Bei ungleichmäßiger Senkung: Schiefelagen sind möglich.	Meist abgeschlossene Verkarstung, daher wird der Prozess im Festgestein als statisch angesehen. Überlagernde Lockersedimente oder aufgelockertes Verstruz-, Verfüllmaterial ist als dynamisches System anzusehen. Gipsmarken am Haus. Setzungspegel oder -marken.
Verkehrsbau	Karten, Bohrungen, Trassenbegehung, ingenieurgeologische Kartierung, Abbohren von Schloten und Erdfällen.	Dammerhöhung, höhere Verdichtung der Dammabschnitte, schnelle Querung von Erdfallfeldern, Auskoffern mind. bis 1,50 m und Ersatz durch frostsicheres und tragfähiges Material sowie Entwässerung, Injektionen,	Ausbildung einer schlaffen Fahrbahn.	Nivellements, Setzungspegel, Messmarken.

Fortsetzung Tab. 16.

		<p>Verdichtung der Füllungen zur besseren Bettung und Erhöhung der Tragfähigkeit.</p> <p>Brücken: Widerlager und Stützen auf vorgespannte Abfangbalken stellen, die im ungestörten Gebirge gegründet sind. Stärkere Dimensionierung von Pfeilern, Widerlagern und Hohlwiderlagern. Pfähle auf Spitzendruck belasten, weniger Mantelreibung ansetzen. Dammschüttmaterial mit geringeren Raumgewichten verwenden. Einsatz von Gründungsrosten und -platten. Gründungsschichten injektionsverfestigen.</p>		
Wasser-, Deponiebau	<p>Wie oben. Zusätzlich: Wasserabpressversuche, Testinjektionen, geophysikalische Messungen, evtl. Tracerversuche, Schürfe, Probestollen. Tragfähigkeit des Untergrundes und hydraulische Verbindungswege prüfen.</p>	<p>Einbringen bindiger Deckschichten, Folien, Bewehrungsmatten. Untergrundvergütung, Gefahr der inneren Erosion und allgemeine Gebirgsauflockerung berücksichtigen, Zementinjektionen. Grundsätzliche Überprüfung des Standortes vornehmen.</p>	<p>Gründungsflächen erhöhen und konstruktiv sichern.</p>	<p>Wie oben. Zusätzlich: Grundwassermesssysteme, Porenwasserdruckgeber.</p>
Tunnelbau	<p>Wie oben. Spannungs-Verformungsverhalten des Gebirges sowie Standfestigkeit überprüfen.</p>	<p>Baumaterialien mit hoher Verformbarkeit sowie Stahlbetonteile mit Fugen für Flexibilität der Verformbarkeit einsetzen. Injektionen. Allgemeiner Mehraufwand für Ausbau.</p>	<p>Wie oben.</p>	<p>Wie oben. Zusätzlich: Präzisionsnivelements.</p>

empfohlenen Untersuchungs-, Gründungs- und konstruktiv-statischen Maßnahmen sind von diesen Verformungselementen abhängig. Es sollten insgesamt zeitliche Untersuchungen zur Senkungsintensität durchgeführt werden.

Die messtechnische Überwachung in akuten Senkungsgebieten ist als vordringliche Aufgabe zu verstehen. Die zu überwachenden Messbolzen sollten über die Senkungsmulden in Form von Profillinien angeordnet werden. Hierbei sind die Bezugsmessbolzen auf bewegungsfreie Räume zu gründen. Der Nullrand der Senkungsmulde ist unbedingt über die Messungen zu erfassen. Neben der Nullmessung sollten regelmäßige Messungen wiederholt werden. Es sind Angaben zum absoluten Senkungsbetrag, zur Senkungsbeschleunigung sowie zur Senkungsgeschwindigkeit erforderlich. Durch diese Parameter können Rückschlüsse auf geogene oder anthropogene Senkungsursachen gezogen werden. Anthropogene Ursachen sind zu beseitigen. Beim Wasser-, Deponie- und Hohlraumbau sind zusätzlich Wasserabpressversuche und evtl. Probeinjektionen in gebirgsaufgelockerten Zonen vorzunehmen. Tracer-Versuche sollten zur Ermittlung von hydraulischen Kontakten vorgenommen werden. Ferner sind Verformungsmessungen möglichst in Probestollen vorzunehmen. Die Tragfähigkeit des Baugrundes muss aufgrund der starken Auflockerung des Untergrundes im Gelände untersucht werden, z.B. durch schwere Rammsondierungen.

Ungleichmäßige Senkungen führen zu Schief-lagen, durch die v.a. hohe und schlanke Gebäude kippen können. Diese können durch das Anbringen von Spannseilen gesichert werden. Bei empfindlichen Bauwerken sieht man als Vorsorge-maßnahme Nischen- und Pressenaufleger vor, um Schief-lagen ausgleichen zu können. Voll-sicherungen können bei schlaffen Bauwerken erreicht werden, wenn die Stützen nachstellbar sind. Bei Überschreiten der für die Nutzung des Bauwerks noch zulässigen Schief-lage sind Auflager nach-

zurichten. Als mögliche Methode bietet sich die Dreipunkt-lagerung an. Bei steifen Fundamenten können unter dem Fundamentrost Pressenkammern eingebaut werden.

Die mit den Längungen verbundenen Relativ-verschiebungen rufen Reibungskräfte hervor, die, wenn Gleitschichten fehlen, relativ unabhängig von der Größe der Verschiebungen, jedoch abhängig von der Auflast und der Scherfestigkeit des Bodens sind. Bei kleinen Sohlnormalspannungen erbringt bindiger Boden wegen des Kohäsionanteils größere Reibungskräfte als Sand. Hier sollte bindiger Boden in geringer Mächtigkeit durch Sand ersetzt werden. Reibungskräfte können durch Fugen vermindert werden. Bei Stahlskelettstützen kann durch Pendelstützen die Übertragung von Reaktionskräften vermindert oder aufgehoben werden. Bei Streifen- und Flächengründungen muss geprüft werden, ob unter Berücksichtigung der Scherfestigkeit des Untergrundes die möglichen Reibungskräfte vom Bauwerk aufgenommen werden können oder ob eine zusätzliche Bewehrung eventuell mit Gleit-schichten erforderlich ist.

Bei einer Kürzung der Gründungsfläche entstehen neben Reibungs- und Druckkräften in den Sohl- und Seitenflächen auch Erdwiderstands-kräfte in den Stirnflächen. Der volle Erdwiderstand ist wegen der dafür erforderlichen Relativ-verschiebung praktisch nicht zu erwarten. Pres-sungskräfte können durch Polsterschichten vermindert werden.

Statisch bestimmte Bauwerkskonstruktionen bzw. Bauwerke mit geringer Steifigkeit sollten grundsätzlich angestrebt werden, wenn die Nutzung der Gebäude es zulässt. Für den Industrie-, Städte- und Verkehrsbau werden in Abhängigkeit von den Verformungselementen folgende, in Tab. 17 und Tab. 18 genannte Maßnahmen für rezente Senkungsgebiete empfohlen, die aus Erfahrungswerten sowie Literaturangaben (z.B. REUTER & TOLMACEV 1990; SMOLTCZYK 1990) zusammengestellt wurden.

Tab. 17. Geotechnische Maßnahmen im Industrie- und Städtebau in akuten Senkungsgebieten.

Verformungsart	Gründungs- und konstruktiv-statische Empfehlungen
Krümmung	Vollsicherung eines biegesteifen Bauwerks: im <i>Widerstandsprinzip</i> : Vierpunktlagerung, hohe Biegesteifigkeit. im <i>Ausweichprinzip</i> : Dreipunktlagerung, jedoch nur bei ausreichender Biegesteifigkeit. Teilsicherung eines biegeschwachen Bauwerks (nur <i>Ausweichprinzip</i>): Nachgiebigkeit der Bauteile erhöhen.
gleichmäßige Senkung	Bei zu erwartender Senkung: Erhöhung des Geländes, Berücksichtigung möglicher Baugrundvernässung.
ungleichmäßige Senkung	Flachgründungen. Fugen zwischen benachbarten Baukörpern. Nachrichtbare Auflager. Dreipunktlager bei starker Schiefelage.
Längenänderung	Vollsicherung eines biegesteifen Bauwerks: im <i>Widerstandsprinzip</i> : Horizontale Aussteifung durch Streifenfundamente oder schlaife Fundamentplatte zur Abstandshaltung. im <i>Ausweichprinzip</i> : Bewegungsspielraum durch Dehnungs- oder Gleitfugen erhöhen. Nachgiebigkeit der Bauteile erhöhen. Pendelstützen, Rollenlager. Teilsicherung eines biegeschwachen Bauwerks: im <i>Widerstandsprinzip</i> : Horizontale Aussteifung der Fundamenteile und Geschossdecken. im <i>Ausweichprinzip</i> : Gleitfuge zwischen Sohle und Fundament. Bau von Entlastungsschlitten bei Pressungen.
Risse, Spalten, Abtreppungen, grabenartige Brüche	Spezielle Fundamentausbildung (Tätzen-, gespreizte Einzelfundamente bei schlanken Bauwerken). Stützen beiderseits der Risse anordnen. Weitgespannte eingeschossige Bauweise. Dachtragwerke elastisch ausbilden und Teile zugfest verbinden. Großbauwerke sichern.

Tab. 18. Geotechnische Maßnahmen im Verkehrsbau in akuten Senkungsgebieten.

Verformungsart	Gründungs- und konstruktiv-statische Empfehlungen
Krümmung	Flexibler Fahrbahnaufbau. Verdübelungen von Betonfahrbahnen.
Senkung und Schiefelage	Dammerhöhung im Senkungszentrum. Höhere Verdichtung der Dammschnitte.
Längenänderung	Flexible Fahrbahnkonstruktion.
Risse, Spalten, Abtreppungen, grabenartige Brüche	Abdichten von Entwässerungsgräben mit Halbschalen. Einbringen von Rasensoden. Einbau flexibler Entwässerungsanlagen. Umgehung der Gebiete. Bewehrte Erde. Stahlbetonfahrbahnen. Schlaffbewehrte oder vorgespannte Konstruktionen.
Brücken allgemein	Gründungsroste oder Gründungsplatten. Injektionsverfestigte Gründungsschichten. Stärkere Dimensionierung von Pfeilern und Widerlagern. Anordnung breiter Bewegungsfugen. Waagrecht und senkrecht nachstellbare Lager. Überbauten aus Stahl oder Spannbeton.
Tunnel allgemein	Verwendung von Baumaterialien mit hoher Verformbarkeit bei Wechselbelastung (Spundbohlen; durch Fugen verformbar gestaltete Stahlbetonbauteile). Anordnung von Polsterschichten bei offener Bauweise.
Versorgungsleitungen allgemein	Meiden bekannter Schiefelagegebiete. Verlegung in Schleifen. Einbau von Dehnern. Reduzierung des Gleitwiderstandes. Oberirdische Verlegung. Flexibles Rohrmaterial.

6. Zusammenfassung

Aus den dokumentierten Karsterscheinungen, der hessischen Bauschadenanalyse sowie der Entwicklung von Karstmodellen und unter Berücksichtigung von bautechnischen Gesichtspunkten wurde ein ingenieurgeologisches Kartenwerk abgeleitet. Dieses setzt sich aus der Dokumentationskarte (1 : 50 000), der ingenieurgeologisch-bautechnischen Karstgefährdungskarte (1 : 200 000) sowie der Häufigkeitskarte der Erdfälle und Senkungsmulden (1 : 100 000) zusammen.

Mit Hilfe der Erdfall- und Senkungsmuldenmodellierung wurde unter Berücksichtigung der bautechnischen und prognostizierenden Faktoren die ingenieurgeologische Karstgefährdungskarte mit 11 Kategorien entwickelt. Die Karstgefährdungskarte stellt eine flächenmäßige Darstellung der im Bundesland Hessen dokumentierten bruchlosen und bruchhaften Karstformen unter Berücksichtigung ihrer geomechanischen Entwicklung und ihrer bautechnischen Auswirkungen dar. Sie lässt Schlussfolgerungen über die Bebaubarkeit in karstgefährdeten Gebieten zu.

In Hessen ist die Entstehung von Senkungsmulden im Chloridkarst auf lösliche Salze in der Zechsteinformation zurückzuführen. Dies ist in Nord- und Osthessen in der Region des Fulda-Werra-Gebietes der Fall. Verkarstbare Gips- bzw. Anhydritgesteine (Sulfatkarst) sind in Nord- und Osthessen im Zechstein, dem Oberen Buntsandstein (Röt) und dem Mittleren Muschelkalk bekannt. Erdfälle im Karbonatkarst treten vor allem in den Karbonaten der Muschelkalkschichten sowie in den miozänen Karbonaten des Untermaingebietes auf. Das Auftreten von Karsterscheinungen spiegelt die paläogeographische Situation im Zechstein, in der Trias und im Tertiär wider.

Hauptverkarstungsphasen mit erhöhter Verkarstungsaktivität durch warmes Klima und erhöhte Niederschläge sind vor allem mit pollenanalytischen Untersuchungen belegt. Sie liegen

in der Kreide, im Tertiär, dem Ende der Weichsel-Eiszeit sowie im Atlantikum und Subboreal des Postglazials vor 4 000 bis 6 000 Jahren. Das bautechnische Interesse liegt jedoch hauptsächlich bei den rezenten Brucherscheinungen. Dabei sind der Anfangsdurchmesser eines Erdfalles sowie die Zerrungs- und Pressungsbereiche einer Senkungsmulde von entscheidender Bedeutung.

Bei Ausbildung eines unterirdischen Hohlraumes kommt es zu Spannungsumlagerungen, die in Längsrichtung und tangential um den Hohlraum abgetragen werden, sowie zu Massenverlagerungen. Durch die Begrenzung der Hohlräume mit vertikalen Trennflächen findet eine seitliche Spannungsausbreitung in das Gebirge nicht oder nur eingeschränkt statt. Durch zusätzliche Gebirgsauflockerung konzentrieren sich Spannungen daher oberhalb des Hohlraumes. Die Spannungsumlagerungen lösen Verformungen im Gebirge aus, die bei Überschreiten der Gebirgsfestigkeiten Bruchvorgänge auslösen. Dabei ist der Hochbruchprozess im Festgebirge als diskontinuierlicher Verlauf zu verstehen, der kurz- oder langfristig zum Stillstand kommen kann und von den Festigkeitseigenschaften des Gebirges abhängig ist. Es wurde durch Untersuchungen des Spannungs-Verformungsverhaltens sowohl im Locker- als auch im Festgebirge nachgewiesen, dass bereits geringe Zugspannungen zur Initialisierung des Bruchzustandes mit Ausbildung eines Gewölbes über Hohlräumen ausreichen.

Die Erdfälle sind im nackten und seichten Karst an das Trennflächengefüge und tektonische Muster sowie an das Ausstreichen der verkarstbaren Gesteine an der Erdoberfläche gebunden. Die Oberflächennähe impliziert den starken Einfluss exogener und anthropogener Faktoren. Es treten hydrodynamische Deformationen in Form innerer Erosions- und Suffosionsvorgängen in wasserdurchströmten Schichten auf. Etwa 77 % aller Erdfälle kommen im nackten und seichten Karst vor. Hiervon stellen 42 % rezente Ereignisse

dar. Hierbei sind die häufigsten Erdfallereignisse auf Verkarstung der Zechsteinsulfate zurückzuführen. Erdfälle im Karbonatkarst sind seltene lokale Phänomene. Die rezenten Erdfallhäufigkeiten fallen von den Zechstein- über die Röt- bis zu den Muschelkalksulfaten deutlich ab. Die maximalen Primärdurchmesser lagen bei 10 m, jedoch beträgt fast die Gesamtheit der Durchmesser aufgrund der geringen Mächtigkeit der eingeschalteten Gipshorizonte sowie aufgrund des Bruchverhaltens der überlagernden Sedimente $> 0,5$ bis 4 m. Da die unteren Durchmesser aufgrund einer sich einstellenden Gewölbeausbildung häufig größer als die oberen sind, kommt es durch Alterungsprozesse zu Nachbrucherscheinungen der Erdfallwände. Stratigraphische Unterschiede im Erdfalldurchmesser waren nicht feststellbar. Die Erdfalltiefen liegen zwischen 1 bis 4 m, im Karbonatkarst meist bei 1 m. Die durch Geländebefunde ermittelten Erdfalltiefen wurden empirisch nachgewiesen.

Im von Festgestein bedeckten Karst besitzen 90 % aller Erdfälle Primärdurchmesser bis 50 m. Bei etwa 94 % aller Erdfälle beträgt die maximale Deckgebirgsüberlagerung 50 m. Insgesamt nehmen mit steigendem Deckgebirge die Erdfalldurchmesser zu. Lediglich 5 % aller Erdfälle innerhalb des Modells besitzen rezentes Alter. Die Erdfälle sind im Gegensatz zum seichten Karst sehr stark an größere, meist herzynisch streichende Störungszonen orientiert, da hier die Wasserbewegung in größere Tiefen eine wesentliche Karstvoraussetzung darstellt. Daneben finden an tektonischen Störungszonen eine Verbandsschwächung und eine Erhöhung der Teilbeweglichkeit von Kluftkörpern sowie eine Herabsetzung der Gebirgsfestigkeiten statt. Damit hängt die Ausbildung eines Erdfalles an der Geländeoberfläche von der Größe des primären Hohlraumvolumens, von der Deckgebirgsmächtigkeit, den Gebirgsfestigkeiten und dem Spannungs-Verformungsverhalten sowie tiefreichenden Trennflächen ab. Insgesamt ist nach dem Mohr'schen Bruchkriterium davon auszugehen,

dass Tonsteine über Hohlräumen gegenüber Sandsteinen und Karbonaten schneller einbrechen. Das maximale primäre Hohlraumvolumen ist abhängig von der Mächtigkeit der verkarstbaren Sulfate im Untergrund. Da die maximalen Primärmächtigkeiten eingelagerter Zechsteinsulfate durch Bohrungen mit etwa 70 m nachgewiesen sind, traten hier die größten Erdfalldurchmesser an der Geländeoberfläche mit Durchmessern > 80 m auf. Dagegen liegen die Erdfalldurchmesser durch Verkarstung der Röt- und Muschelkalkgipse aufgrund geringerer Mächtigkeiten der Sulfate bei maximal 14 m. Die im Gelände erkundeten Erdfalldurchmesser konnten empirisch bestätigt werden.

Es wurde nachgewiesen, dass aufgrund des Verhältnisses von Druck- und Zugfestigkeit Anhydrite und Tonsteine durch Zähigkeit mit duktilem Bruchverhalten und Sand- sowie Kalksteine durch sprödes bis sehr sprödes Verhalten mit wenigen elastischen Verformungen bis zum Brucheintritt charakterisiert sind.

Erdfälle treten im von Festgestein bedeckten Karst gegenüber dem seichten Karst mit deutlich geringeren Erdfallhäufigkeiten auf; dagegen sind die Erdfalldurchmesser wesentlich höher. Auch hier treten die meisten Erdfälle durch Verkarstung der Zechsteinsulfate auf. Bezogen auf alle Erdfallereignisse liegt eine deutliche Vormacht im nackt-seichten Zechsteinkarst.

Die Senkungsmulden in Folge der Verkarstung von Chloriden sind für den Bereich zwischen dem inneren und dem äußeren Salzhang charakteristisch. Dabei finden rezente Bewegungen am inneren Salzhang statt, an dem die Subrosion noch nicht zum Abschluss gekommen ist. Hier konnten neben oft ungleichmäßig verlaufenden Senkungen in den muldenäußeren Zerrungszonen Risse, grabenartige Strukturen, Baumverstellungen und Erdfälle nachgewiesen werden. In den senkeninneren Pressungszonen wurden Geländeaufwölbungen beobachtet. Die Absenkbeträge liegen bei mehreren Dezimetern pro Jahr. Geoelektrische Vertikalsondierungen belegen die starke Zerrüttung des Untergrun-

des, wodurch eine Verbandsschwächung und damit eine Herabsetzung der Gebirgsfestigkeit erfolgt. Daneben liegen hohe Untergrunddurchlässigkeiten vor, was in Hessen zu geotechnischen Problemen im Talsperrenbau geführt hat.

Fossile, bewegungsfreie Senkungsmulden sind charakteristisch für den äußeren Salzhang und beweisen die ehemalige Verbreitung von Steinsalzen der Zechsteinzeit. Für die Geländeoberfläche ist die starke Schollenzerlegung, Zerklüftung und Zerrüttung typisch. Das intakte Salinar zeichnet sich durch das Vorkommen vereinzelter Erdfälle und durch ruhige Lagerungsverhältnisse aus. Die Längserstreckung der Senkungsmulden kann 2 km betragen. Etwa 80 % aller Mulden zeigen an der Erdoberfläche keine rezenten Bewegungsstrukturen.

Die häufigsten Schadensbilder in Hessen ergaben sich durch Suffosionssenkungen sowie Brucherscheinungen in meist oberflächennah anstehenden Sulfaten. Begünstigt wurde die Verkarstung durch starke Niederschläge, Schneeschmelze, Hochwasser oder Wasser aus defekten Leitungssystemen. Meist traten an Gebäuden Risse und Schiefstellungen auf. Durch Erdfälle unter bestehenden Gebäuden kam es teilweise zum Einsturz ganzer Gebäudeteile.

In fossilen Erdfällen und Senkungsmulden sind die Setzungs-, Wasser- und Frostempfindlichkeit der Füllungen und eine hohe Gebirgsauflockerung problematisch. In rezenten Erdfällen und Senkungsmulden besteht akute Bruchgefahr. Neben Krümmungen, Schiefklagen, Senkungen und Längenänderungen treten Freitraglagen der Fundamente auf. Für alle Gefährdungskategorien wurden Empfehlungen für Untersuchungs-, Gründungs- und Kontrollmaßnahmen sowie untergeordnet für konstruktive Maßnahmen gegeben. Mit dem vorliegenden Kartenwerk liegen dem Bauplaner Grundlagen für erste Baugrund- und Risikoeinschätzungen vor. Die Karten sollen jedoch keine objektspezifischen Untersuchungen ersetzen. Ein wichtiges Hilfsmittel stellen die Karten für die Abschätzung des zu erwartenden Vorerkundungsaufwandes sowie für Träger öffentlicher Belange dar. Sie dienen ferner der Analyse karstbedingter Bauschäden. Die Entwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten Kategorisierung bzw. flächenhaften Ausgrenzung von Flächen gleicher Bebaubarkeit ist auf andere regionale Gebiete und Maßstäbe übertragbar und damit verallgemeinerungsfähig, wobei eine Anpassung an die regionalen geologischen Verhältnisse vorgenommen werden muss.

7. Schriftenverzeichnis

- ADERHOLD, G. (1992): Ingenieurgeologische Untersuchungen in den Kontrollstollen der Hennetalsperre im Hinblick auf das Durchlässigkeitsverhalten paläozoischer Schichtfolgen entlang Trennflächen. – Unveröff. Dipl.-Arb. TU Berlin: 136 S.; Berlin.
- ADERHOLD, G. (1998): Vermerk über einen Erdfall östlich Willershausen, Bl. 4927 Creuzburg. – Unveröff. Bericht, HLUG; Wiesbaden.
- BEYSCHLAG, D. (1922): Häuserbeschädigungen durch Gipsauslaugungen unter dem Dorfe Weissenbach am Meißner, Bl. 4725 Bad Sooden-Allendorf. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- CRAMER, H. (1941): Die Systematik der Karstdolinen unter Berücksichtigung der Erdfälle. – N. Jb. Min. Geol., Abt. B, **85**: 293–382, 4 Abb., 1 Beil.; Stuttgart.
- CRAMER, K., DILLMANN, W., EMMERT, U., HERRMANN, F., KALTENHERBERG, J., NIEDERMAYER, J., PRINZ, H., REIFF, W., RESCH, M., REUM, E., RUDOLF, W., TEMMLER, H., TRIEB, W. & WESTRUP, J. (1973): Verbreitung von Erdfällen in der Bundesrepublik Deutschland. 36 S., 1 Übersichtskarte im Maßstab 1 : 1 000 000. Hrsg.: Bundesanstalt f. Bodenforsch. u. d. Geol. Landesämter der Bundesrepublik Deutschland; Hannover.
- EHRENBERG, K.-H. & HICKETHIER, H. (1982): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5622 Steinau a.d.Straße, 2. neu bearb. Aufl.: 199 S., 19 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- FENK, J. (1981): Eine Theorie zur Entstehung von Tagesbrüchen über Hohlräumen im Lockergebirge.– Freiburger Forschungshefte, **A639**: 138 S., 27 Abb., 9 Tab.; Freiberg.
- FIKSEL, T. & STOYAN, D. (1983): Mathematisch-statistische Bestimmung von Gefährdungsgebieten bei Erdfallprozessen. – Z. f. angew. Geologie, **9**: 455–459; Berlin (Akademie-Verlag).
- FINKENWIRTH, A. (1962): Über Bergschäden im Gebiet der ehemaligen Braunkohlengrube Buchenau, Bl. 5224 Eiterfeld. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- FINKENWIRTH, A. & HOLTZ, S. (1974): Entstehung und Alter des Erdfalls „Seeloch“ bei Bad Hersfeld. – Notizbl. hess. L.-Amt f. Bodenforsch., **102**: 207–214, 1 Abb.; Wiesbaden.
- FLOSS, A. (1974): Lösen, Einbauen und Verdichten von Fels. – Baumaschinen u. Bautechnik, **21**: 275–281, 5 Abb., 7 Tab.; Wiesbaden (Bauverlag).
- GOLWER, A. & PRINZ, H. (1969): Korrosionserscheinungen in tertiären Karbonatgesteinen im Untermain-
gebiet. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **97**: 243–257, 5 Abb.; Wiesbaden.
- GUNZERT (1954): Der Baugrund im Siedlungsgelände Cornberg und seine künftig zu erwartenden Auswirkungen, Bl. 4925 Sontra. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- HERRMANN, R. (1972): Über Erdfälle äußerst tiefen Ursprungs. – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **100**: 177–193, 5 Abb.; Wiesbaden.
- HIPPMANN, H.-D. (1997): Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. – 2. Aufl.: 65–71; Stuttgart (Schäffer-Pöschel).
- HÖLTING, B. (1981): Zur Auffüllung eines Erdfalles auf dem Anwesen TH Canisius, Bl. 4718 Goddelsheim. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- HOLTZ, S. (1972): Zum geplanten Hochwasserrückhaltebecken Marbach/Haune, Bl. 5324 Hünfeld. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- HOLTZ, S. (1973): Zum geplanten Hochwasserrückhaltebecken Marbach. Die geologischen Verhältnisse an der Sperrstelle und im Stauraum nach dem Ergebnis geophysikalischer Untersuchungen, Bl. 5324 Hünfeld. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- HOLTZ, S. (1976): Zum geplanten Hochwasserrückhaltebecken Mackenzell/Nüst, Landkreis Fulda, Bl. 5324 Hünfeld. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- HOLTZ, S. (1977): Geophysikalische und geologische Untersuchungen für das Hochwasserrückhaltebecken Mackenzell/Nüst. – Gießener geol. Schriften, **12**: 123–140; Gießen.
- HOLTZ, S. & WENDLER, R. (1975): Zum geplanten Hochwasserrückhaltebecken Marbach/Haune, Bl. 5324 Hünfeld. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- HORN, M. (1982): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 4520 Warburg: 238 S., 28 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- IAEG, Int. Ass. of Engineering Geology (1973): Symposium Erdfälle und Bodensenkungen, ingenieurgeologische Probleme löslicher Gesteine. – Hrsg. Dt. Ges. f. Erd- und Grundbau: 256 S.; Hannover.
- KAMMERER, F. (1962): Ingenieurgeologische Methoden in Erdfall- und Senkungsgebieten. – Freiburger Forsch.-H., **C127**: 49–109, 50 Abb.; Leipzig.
- KULICK, J. (1999): Geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 4821 Fritzlär. – Digitale Ausgabe; Wiesbaden.
- KULICK, J., LEIFELD, D., MEISEL, S., PÖSCHL, W., STELLMACHER, R., THEUERJAH, A. & WOLF, M. (1984): Petrofazielle und chemische Erkundung des Kupfer-

- schiefers der Hessischen Senke und des Harz-Westrandes. – Geol. Jb., **D68**: 3–223, 37 Abb., 15 Tab., 34 Taf.; Hannover.
- KUPFAHL, H.-G. (1975): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 4823 Melsungen: 195 S., 27 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- LAEMMLEN, M. (1963): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5223 Queck: 327 S., 21 Abb., 18 Taf.; Wiesbaden.
- LAEMMLEN, M. (1967): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5124 Bad Hersfeld: 280 S., 16 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- LAEMMLEN, M. (1975): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5225 Geisa: 272 S., 39 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- LEHMANN, K. (1919): Bewegungsvorgänge bei der Bildung von Pingen und Trögen. – Berg- und Hüttenmännische Z., **55**: 933–942; Essen (Gückauf).
- LIPPERT, W. (1965): Bericht über einen Einbruch in der Kaligrube Neuhof, Bl. 5523 Neuhof. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- MEIBURG, P. (1983): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 4521 Liebenau: 175 S., 27 Abb., 2 Beibl.; Wiesbaden.
- MEIER, G. (1978): Zum Problem von Tagesbruchanalysen in Bergbaugebieten aus der Sicht praktischer Bergsicherungsarbeiten. – Neue Bergbautechnik, **8**: 639–643; Freiberg.
- MOLEK, H. (1973): Ingenieurgeologie des Karstes. – 100 S.; Bergakademie Freiberg.
- MOTZKA, R. (1968): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5324 Hünfeld: 156 S., 10 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- MOTZKA-NÖRING, R. (1987): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 4925 Sontra, 2. neu bearb. Aufl.: 296 S., 91 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- MOTZKA, R. & LAEMMLEN, M. (1967): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5224 Eiterfeld: 213 S., 20 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- MOTZKA, R. & LAEMMLEN, M. (1974): Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5024 Rotenburg a.d. Fulda, 2. Aufl.: 186 S., 19 Abb., 1 Beibl.; Wiesbaden.
- MÜLLER, K.-H. (1972): Untersuchung des Setzungsverhaltens des Bauwerkes I bei Maberzell, Bl. 5423 Großenlüder. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- MÜLLER-SALZBURG, L. (1978): Der Felsbau. Bd. 3: Tunnelbau. – 945 S.; Stuttgart (Enke).
- PAULY, R. (1966): Bauschäden über der ehemaligen Stollenanlage „In den Alpen“, Bl. 5124 Bad Hersfeld. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- PICKEL, W. (1984): Setzungsbeträge von Senkungsmulden bei Schlotzau, Bl. 5323 Schlitz. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- PFLUG, B. (1996): Geologische Kartierung im Umfeld der Deponie „Am Breitenberg“ bei Weidenhausen im Auftrag des Kreisausschusses des Werra-Meißner-Kreises. – Unveröff., 17 S., 1 Kt.; Eschwege (Kreisverwaltung).
- PRINZ, H. (1969): Über die Bebauungsmöglichkeit des Geländes Flur 2 in Cornberg, Kreis Rotenburg/Fulda, Bl. 4925 Sontra. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- PRINZ, H. (1976): Über die Bebaubarkeit des in der Flur „Das Denserland“ vorgesehenen Baugebietes in Cornberg, Kreis Hersfeld-Rotenburg, Bl. 4925 Sontra. – Unveröff. Gutachten HLUG; Wiesbaden.
- PRINZ, H. (1997): Abriss der Ingenieurgeologie. – 3. Aufl.: 419 S., 252 Abb., 50 Tab.; Stuttgart (Enke).
- REUTER, F. (1983): Einige neue ingenieurgeologische Untersuchungsergebnisse in Karstgebieten, besonders im Sulfatkarst. – Z. f. angew. Geol., **20** (9): 441–447; Berlin (Akademie-Verlag).
- REUTER, F., MOLEK, H. & MEIER, M. (1971): Beziehungen zwischen Gebirgsfestigkeit und Karsterscheinungen im Salzkart der DDR. – Neue Bergbautechnik, **1**: 14–20; Leipzig.
- REUTER, F., DÖRING, T. & PENZEL, M. (1979): Zur Zusammenarbeit von Geotechnik und Geophysik bei der Untersuchung von Karstproblemen. – Neue Bergbautechnik, **9**: 503–507, 5 Abb.; Leipzig (Dt. Verlag f. Grundstoffindustrie).
- REUTER, F. & TOLMACEV, V. (1990): Bauen und Bergbau in Senkungs- und Erdfallgebieten. Eine Ingenieurgeologie des Karstes. – 176 S., 87 Abb., 33 Tab.; Berlin (Akademie-Verlag).
- RICHTER-BERNBURG, G. (1957): Zur Paläogeographie des Zechsteins. – AHI del Coregno di Milano 1957, **Vol. I**: 88–99, 7 Abb., 1 Taf.; Milano.
- RÖSING, F. (1966): Erl. geol. Kt. 1 : 25 000, Bl. 4621 Wolfhagen: 246 S., 13 Abb.; Wiesbaden.
- SMOLT CZYK, U. (1990): Grundbautaschenbuch, Teil 1: 45–52; Berlin (Ernst & Sohn).
- SMOLT CZYK, U. (1992): Grundbautaschenbuch, Teil 3, 4. Aufl.: 846 S.; Berlin (Ernst & Sohn).
- WEBER, H. (1967): Die Oberflächenformen des festen Landes. – 2. Aufl.: 367 S., 40 Taf.; Leipzig (Teubner).

8. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.	Voraussetzungen für den Karstprozess (MOLEK 1973).	7
Abb. 2.	Übergang des Erdfalldurchmessers D_p nach D_e (idealisiert).	9
Abb. 3.	Spannungsverteilung in der Umgebung eines kreisförmigen Hohlraumes.	13
Abb. 4.	Diskontinuierlicher Gewölbehochbruch in einem Festgebirge.	15
Abb. 5.	Progressiver Hochbruchprozess im Festgebirge (mesozoische Schichtenfolge) entlang vorgegebener vertikaler Trennflächen.	16
Abb. 6.	Schergeraden der untersuchten Gesteinsserien.	19
Abb. 7.	Sprödes bzw. zähes Verhalten der untersuchten Gesteinsserien in Abhängigkeit vom Verhältnis σ_p/σ_z	20
Abb. 8.	Mohr'sches Bruchkriterium für spröde Sandsteine der Calförde-Folge für Über- lagerungshöhen von 10, 30, 40 und 50 m. Die für die Berechnung angesetzten Scherparameter wurden in Triaxialversuchen im Labor ermittelt ($c' = 450 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 30^\circ$, $\gamma' = 27 \text{ kN/m}^3$).	21
Abb. 9.	Mohr'sches Bruchkriterium für plastische Tonsteine des Oberen Röts für Überlagerungshöhen von 5, 10 und 15 m. Die für die Darstellung angesetzten Scherparameter wurden in Triaxialversuchen im Labor ermittelt ($c' = 100 \text{ kN/m}^2$, $\varphi' = 27^\circ$, $\gamma' = 28 \text{ kN/m}^3$).	22
Abb. 10.	Maximale Hochbruchhöhe eines Hohlraumes an die Erdoberfläche bei aus Naturbefunden bekannten primären Erdfalldurchmessern und Hohlraumhöhen.	25
Abb. 11.	Erforderlicher Hohlraumradius bei definierter Gebirgsmächtigkeit und primären Erdfalldurchmessern für den potenziellen Hochbruch an die Erdoberfläche.	25
Abb. 12.	Orientierungsanalyse für Erdfälle ($n = 21$) in der Calförde-Folge auf Bl. 4925 Sontra. Die verkarsteten Zechsteinanhydrite liegen in einer Tiefe von 30 bis 50 m.	27
Abb. 13.	Relative Häufigkeitsverteilung der primären Erdfalldurchmesser im von Festgesteinen bedeckten Zechsteinkarst ($n = 737$).	28
Abb. 14.	Darstellung der für den Bruchprozess typischen Formen des Nachbruchs bis zur Geländeoberfläche im Lockergestein.	29
Abb. 15.	Kreiskegelstumpfförmiger Durchbruch im bindigen Gestein bei Erfüllung des Mohr'schen Bruchkriteriums.	29
Abb. 16.	Berechnete kritische Spannweiten in Abhängigkeit von der Deckgebirgs- mächtigkeit zwischen 1 bis 3 m und den in Hessen am häufigsten vorkommenden Primärdurchmesser der Erdfälle.	30
Abb. 17.	Erdfall (Durchmesser: 2,3 m) in Willershausen, Bl. 4927 Creuzburg, auf landwirtschaftlich genutzter Fläche durch Verkarstung der Ceratitenschichten. Die Tiefe des Erdfalls betrug 1,50 m (ADERHOLD 1998).	31
Abb. 18.	Unterirdischer Hohlraum in Ceratitenschichten des mo2 unter 1,50 m mächtigem Verwitterungslehm. Die geringen Schlagzahlen charakterisieren den nach- gebrochenen Lehm, die hohen Schlagzahlen den Übergang zum Ceratitenkalk.	32
Abb. 19.	Mohr'sches Bruchkriterium für von bindigem Material (Lösslehm) bedeckten Karst in Abhängigkeit von der Kohäsion. Die Deckgebirgsmächtigkeit wird im vorgestellten Fall bei 1,20 m angesetzt Hieraus resultiert die in der Tiefe vorliegende Vertikalspannung σ_1	33

Abb. 20. Orientierungsanalyse für Erdfälle im Muschelkalk. a) Verteilung der Erdfälle, die für die Orientierungsanalyse verwendet wurden (n = 18). b) Orientierungsdichte O (a, 0, 500) für die Erdfälle im Ausstrich des Muschelkalks, Bl. 4521 Liebenau.	35
Abb. 21. Orientierungsanalyse für Erdfälle im Röttausstrich. a) Verteilung der Erdfälle, die für die Orientierungsanalyse verwendet wurden (n = 43). b) Orientierungsdichte O (a, 0, 500) für die Erdfälle im Röttausstrich, Bl. 4521 Liebenau.	35
Abb. 22. Relative Häufigkeit [%] der klassierten Primärdurchmesser für rezente Erdfälle (n = 1.041).	36
Abb. 23. Auftreten von Erdfällen in Abhängigkeit von der untermiozänen Faziesausbildung im Rodautal bei Lämmerspiel, Bl. 5919 Seligenstadt.	37
Abb. 24. Stratigraphische Verteilung der Erdfälle bezogen auf a) fossile und rezente Erdfälle (n = 1.694) sowie b) rezente Erdfälle (n = 1.045).	38
Abb. 25. Prozentuale Verteilung der Erdfallereignisse in Abhängigkeit von der Stratigraphie sowie der Tiefenlage des verkarstbaren Gesteins (n = 3.284).	39
Abb. 26. Die Senkungsmulden von Wehrda und Rothenkirchen im Bereich des aktiven Salzhanges mit rezenten Rissen, bruchartigen Grabenstrukturen und Erdfällen im Zerrungsbereich sowie Aufwölbungen im Pressungsbereich der Mulde (Geländeaufnahme: Frühjahr 1999, Bl. 5224 Eiterfeld).	41
Abb. 27. Orientierung von Senkungsmulden entlang des Salzhanges sowie entlang von Störungen (beispielhaft für das Bl. 5124 Bad Hersfeld).	43
Abb. 28. Übergang der Senkungsmulden von intaktem Salinar auf Gebiete mit aktiver Subrosion. Die jüngsten Senkungsmulden sind von der Oberflächenerosion kaum berührt. In der Hünfelder Senke treten Erdfälle auf.	44
Abb. 29. Ausgewertete Bereiche mit flächenhafter Darstellung von Karsterscheinungen.	48
Abb. 30. Ausschnitt aus der Dokumentationskarte, Maßstab 1 : 50 000 (Bl. L 5124 Bad Hersfeld).	49
Abb. 31. Einflussparameter für das ingenieurgeologische Kartenwerk der Karsterscheinungen in Hessen.	51
Abb. 32. Ausschnitt aus der Karstgefährdungskarte (Bl. 4925 Sontra). Er zeigt die Gefährdungskategorien 2 und 4 bis 7.	54
Abb. 33. Ausschnitt aus der Karstgefährdungskarte im Bereich des inneren und äußeren Salzhanges. Deutlich treten die Kategorien 9 und 10 mit typischen fossilen und aktiven Senkungsmulden hervor (Bl. L 5124 Bad Hersfeld).	57
Abb. 34. Ausschnitt aus der Erdfallhäufigkeitskarte (Bl. L 5124 Bad Hersfeld).	62
Abb. 35. Prozentualer Anteil von ermittelten Erdfallhäufigkeiten der einzelnen Gefährdungskategorien.	63
Abb. 36. Der Verlauf und die Elemente der Senkungsmulde (SMOLTZYK 1992).	65
Abb. 37. Einfluss einer gleichmäßigen Geländesenkung (SMOLTZYK 1992).	66
Abb. 38. Wirkung einer Schiefelage bei schlanken Gebäuden und Bauwerken in Dichtungswannen (SMOLTZYK 1992).	66
Abb. 39. Wirkung einer Krümmung auf a) schlaife und b) starre Bauwerke (SMOLTZYK 1992).	67

Abb. 40.	Erdfall unter dem Haus Hinz (Bl. 4923 Altmorschen). Neben dem Wegbrechen ganzer Bauwerksteile erfahren die Gründung und das Bauwerk Verformungen durch starke Hohl- (Frei-) und Kraglagen (Foto: PICKEL 1963).	68
Abb. 41.	Straßenschäden durch hydromechanische und bruchhafte Deformationen (Bl. 4725 Bad Sooden-Allendorf, Hundelshausen sowie Abterode).	69
Abb. 42.	Zeitlicher Verlauf der Setzungen an 8 Messpunkten an einem Brückenwiderlager bei Maberzell (Bl. 5423 Großenlüder) im Bereich einer fossilen Erdfallfüllung.	70
Abb. 43.	Bauwerksschäden durch Spannungsumlagerungen im Bereich einer Pressungszone der Senkungsmulde von Rothenkirchen.	71
Abb. 44.	Erdfallauftreten im Bereich einer geplanten Deponie bei Weidenhausen.	73
Abb. 45.	Erste Bauwerksschäden in Form von Rissen an einem Haus in Cornberg (Bl. 4925 Sontra; Foto: GUNZERT 1954, HLUK, unveröff.).	74
Abb. 46.	Beeinflussung von Bauwerken und Sicherungsprinzipien bei Erdfällen (nach KAMMERER 1962).	78

9. Tabellenverzeichnis

Tab. 1.	Ingenieurgeologische Einteilung des Karstes nach der Tiefenlage des verkarstbaren Gesteins und dem Deckgebirge (REUTER & TOLMACEV 1990).	7
Tab. 2.	Verkarstbare Formationsglieder sowie deren regionale Verbreitung in Hessen.	9
Tab. 3.	Karstmodell für Gipse des Mittleren Muschelkalkes (n = 80).	12
Tab. 4.	Karstmodell für Gipse des Röts (n = 240).	12
Tab. 5.	Karstmodell für Gipse/Anhydrite des Zechsteins (n = 414).	12
Tab. 6.	Ermittelte Gebirgskennwerte zur Charakterisierung des Bruchverhaltens über Hohlräumen.	18
Tab. 7.	Berechnete und aus Naturbefunden belegte Grenzdeckgebirgsmächtigkeiten in Abhängigkeit von primärem Erdfalldurchmesser und Hohlraumhöhen zwischen 1 und 4 m.	24
Tab. 8.	Erforderliche Hohlraumhöhen bei definiertem primärem Erdfalldurchmesser und Gebirgsdeckmächtigkeiten zwischen 50 und 300 m.	24
Tab. 9.	Ermittelte Gesteinsfestigkeiten (φ' und c') für bindigen Lösslehm (n = 12).	33
Tab. 10.	Absenkungsbeträge von Senkungsmulden. Messwerte von PICKEL (1984).	41
Tab. 11.	Überblick der Karsterscheinungen (Erdfälle und Senkungsmulden) in Hessen.	47
Tab. 12.	Klassierte Karst-Gefährdungskategorien.	52
Tab. 13.	Geotechnische Probleme der Karst-Gefährdungskategorien.	60
Tab. 14.	Mehraufwand für Untersuchungs-, Gründungs-, statisch-konstruktive sowie Überwachungsmaßnahmen.	75
Tab. 15.	Geotechnische Maßnahmen in akuten Erdfallgebieten.	76
Tab. 16.	Geotechnische Maßnahmen innerhalb von Erdfall- und Muldenfüllungen.	80
Tab. 17.	Geotechnische Maßnahmen im Industrie- und Städtebau in akuten Senkungsgebieten.	83
Tab. 18.	Geotechnische Maßnahmen im Verkehrsbau in akuten Senkungsgebieten.	83

10. Verzeichnis der Gleichungen

Gleichung 1	$H = \text{Anzahl der Erdfälle} / (\text{km}^2 \cdot \text{Jahr})$	
Gleichung 2	$\sigma_1 = \gamma' \cdot M_D$	[kN/m ²]
Gleichung 3	$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 \cdot K_0$	[kN/m ²]
Gleichung 4	$K_0 = 1 - \sin \varphi'$; $K_0 = P_H/P_V$	
Gleichung 5	Mohr'sches Bruchkriterium: $\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi' + 2c' \cdot \cos \varphi'$	
Gleichung 6	Kugelvolumen $V = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3$	[m ³]
Gleichung 7	$V_{\text{primär}} = V_{\text{final}} + V_{\text{aufgelockert}}$	[m ³]
Gleichung 8	$M_{\text{max}} = h/(s'-1) \cdot (1 + h/l \cdot \tan \varphi')$	[m]
Gleichung 9	$P_B = \exp [0,08 (h_H - 15 \text{ m}) + 0,2 M_k + 0,17 (\max M_D)]$	[%]
Gleichung 10	$D_D = D_p + 2 M_D \cdot \cot \beta$	[m]
Gleichung 11	$\beta = 45 \pm \varphi'/2$	[°]
Gleichung 12	Minimale Erdfalltiefe $z_{\text{min}} = 2c'/\gamma'$	[m]
Gleichung 13	Maximale Erdfalltiefe $z_{\text{max}} = 4c'/\gamma' \cdot \tan (45^\circ + \varphi'/2)$	[m]

11. Verwendete Formelzeichen, Einheiten und Größen

Formelzeichen	Bezeichnung	[Einheit]
A	betrachtetes Gebiet	[m ²]
c'	Kohäsion	[kN/m ²]
D	Hohlraumdurchmesser	[m]
d	Ausbruchbreite des Hohlraumes	[m]
D _D	kritische Spannweite über einem Hohlraum	[m]
D _p	Primärdurchmesser eines Erdfalles	[m]
D _e	Enddurchmesser eines Erdfalles	[m]
H	Erdfallhäufigkeit	[Anzahl der Erdfälle/km ² ·Jahr]
H _{Firste}	Teufe der Firste des Hohlraumes	[m]
H _{max}	Höhe einer Lastglocke	[m]
h _H	Höhe des Hohlraumes	[m]
K ₀	Ruhedruckbeiwert	
M _D	Mächtigkeit des überlagernden Deckgebirges	[m]
M _K	Mächtigkeit der Überdeckung der Firste des Hohlraumes	[m]
M _{max}	maximale Höhe für einen Hochbruch zur Geländeoberfläche	[m]
n	Anzahl	
P _B	relative Bruchwahrscheinlichkeit	[%]
p _h	Horizontaldruck	[kN/m ²]
p _v	Vertikaldruck	[kN/m ²]
r	Radius	[m]
r ₁	unterer Durchmesser eines Kegelstumpfes	[m]
r ₂	oberer Durchmesser eines Kegelstumpfes	[m]
s	Standardabweichung	
s'	Auflockerungsfaktor	
V	Variationskoeffizient	[100 %]
V	Volumen allgemein	[m ³]
V _{primär}	primäres Gebirgsvolumen	[m ³]
V _{aufgelockert}	aufgelockertes Gebirgsvolumen	[m ³]
V _{final}	Volumen des Finalhohlraumes (Erdfall)	[m ³]
x	arithmetischer Mittelwert	
α	Öffnungswinkel eines Sektors für die Orientierungsanalyse	[°]
β	Bruchwinkel	[°]
β ₁	Böschungswinkel	[°]
γ'	Wichte	[kN/m ³]
γ	Grenzwinkel	[°]
φ'	innerer Reibungswinkel	[°]
σ _D	Druckfestigkeit	[kN/m ²]
σ _z	Zugfestigkeit	[kN/m ²]
σ ₁	Vertikaler Spannungsanteil	[kN/m ²]
σ _{2,3}	Horizontaler Spannungsanteil	[kN/m ²]
σ _t	Randspannung	[kN/m ²]
τ _B	Scherbruchspannung	[kN/m ²]

12. Anlagen und ingenieurgeologisches Kartenwerk

Anlage 1: Auswahl typischer Bauschäden in Hessen sowie Auswirkungen von Karsterscheinungen auf Bauvorhaben.

Anlage 2: Zusammenstellung der Hoch- und Rechtswerte für Erdfälle auf Kartenblättern, für die keine flächenhafte Kartendarstellung erfolgte.

Der Abhandlung beigefügte Karte:

- Ingenieurgeologische Karstgefährdungskarte, Maßstab 1 : 200 000.

Im Archiv des HLUg einsehbare Karten:

- Ingenieurgeologische Karstgefährdungskarte, Maßstab 1 : 100 000.
- Dokumentationskarte der Erdfälle und Senkungsmulden in drei Teilen, Maßstab 1 : 50 000.
- Häufigkeitskarte der Erdfälle und Senkungsmulden, Maßstab 1 : 100 000.

Anlage 1. Auswahl typischer Bauschäden in Hessen sowie Auswirkungen von Karsterscheinungen auf Bauvorhaben.

Kartenblatt	Baumaßnahme	Bauschäden oder Schäden im Untergrund	Ursache	Maßnahmen
4520	BAB Kassel Ruhrgebiet	Schlote (21) mit Einsturzmateriale gefüllt Spülverlust in Bohrungen heute: Starke Anlösungserscheinungen in Klüften	Zechstein-Anhydrit, tiefliiegend	Geophysik; Bohrungen, Überbrücken der Hohlräume für Pfeiler, Trichterfüllung bis 1,50 m auskoffern, Ersatz durch frostsicheres Material, Ersatzmaterial wird entwässert; Verbesserung der Bettung der Straße; Schäden werden im Übergangsbereich vermieden
4619	linienförmige 400 kV-Leitung	rezente Erdfälle, Ø 1–7 m	Oberflächiger Zechsteinsulfat	Plattenfundamente, Abrammen von aufgelockertem Boden, Einbau von Kunststoffrohren in Mastfundamente zur Überprüfung von Hohlräumen und Auflockerungen
4718	da hydraulische Kontakte zu einer nahegelegenen Wassergewinnung vorhanden sind, dürfen keine grundwassergefährdenden Stoffe zur Verfüllung verwendet werden	Bohrgestänge fällt durch, Höhlenlehme; Erdfälle aktiv	Werra-Anhydrit, tiefliiegend	Verfüllung von sauberem Material
4725	geplante Deponieerweiterung „Am Beitenberg“	rezente und fossile Erdfälle 337 E/km ²	Werra-Anhydrit, seicht	Luftbildgeologie, Kartierung, Verzicht auf Erweiterung
4725		Gemeinde Weißenbach, Gebäude völlig desolat, bis 40 cm gesunken, wurden abgerissen, Gebiete baupolizeilich gesperrt, 130 rezente Erdfälle Ø 1–8 m, meist 1 m, evangelische Kirche wurde sogar gesperrt, in 10 Jahren: 1,50 m abgesunken	mittlerer Muschelkalk, seicht	Bauverbot für bestimmte Zonen, teilweise Umsiedlungsempfehlung; Oberflächenentwässerung, Erneuerung aller Leitungen, Seismik, Rohrleitungen auf Betonbalken verlegt, Kunststoffleitungen, Grabensohlen wurden abgerammt, dichte Hohlräume wurden verfüllt

Kartenblatt	Baumaßnahme	Bauschäden oder Schäden im Untergrund	Ursache	Maßnahmen
4725		auf eine Länge von 160 m 7 Eindellungen auf einer Straße	Seichter Karst Werra-Anhydrit, Suffosionssenkungen im Hohlraum bis 7 m Tiefe	Seismik, Geophon, Injektionen der Hohlräume; Deckschichten wurden verdichtet; Beobachtungsrohre, Rammsondierungen Als Folge davon ergab sich eine Änderung der Grundwasserströmung
4725		rezenter Erdfall Ø 2 m; zwei Kühe eingebrochen	Werra-Anhydrit in 50 m Tiefe	Verfüllung, Rettung der Kühe
4725	Abterode	Fahrbahnsenkungen 20 cm/5 Monate = Erdfall 1990, siehe Abb. 41	Dolomit-Zechstein oberflächlich, bis 17 m Tiefe verkarstet	Bohrungen, bis 17 m injiziert; im weiteren Sen- kungsbereich der Straße wurden die bindigen Massen ausgekoffert Bodenaustausch; Stahlrohr installiert zur Senkungskontrolle
4725	Planung Bauernhöfe	rezente Erdfälle	Zechsteinanhydrit in 20–30 m Tiefe	Verlegung der Standorte
4823	DB-Strecke	fossile Schlotte erkundet	Zechsteinanhydrit, tief	Geoelektrik
4825	geplanter Bahnhof Eschwege	mind. 20 rezente Erdfälle entstanden (1965) Absenkung: 10 Jahre 2 m Ø 6–12 m, sulfathaltige Quellwässer	Zechsteingips, nackt-seicht	Zementinjektion
4826	allgemeine Gebiets- empfehlung	viele rezente/fossile Erdfälle Niederhorn	Zechsteingips, seicht	Abwasser kanalisieren, Gruben mit Halbschalen versehen, Kanäle auf Betonbalken, die Freilagen von 3 m überbrücken können Sanierung undichter Wasserleitungen
4826	Brückenbauwerk an B 249	akute Erdfallgefahr unter dem Bauwerk	Zechsteingips in 20–25 m Tiefe	Injektionspfähle im Abstand von 3 m, Länge: 30 m Verbauwirkung mit tragfähigem Boden, Bewehrung

Kartenblatt	Baumaßnahme	Bauschäden oder Schäden im Untergrund	Ursache	Maßnahmen
4923	Altmorschen	Haus Hinz: starke Beschädigung Ø: 4 m 1963 /1998 erneute Erdfälle am Friedhof Risse an Straßen, Gärten, Höfen, Kirchen, Schule, siehe Abb. 40	Zechstein, seicht	Geoelektrik, Bohrungen, Rammsondierungen, Kartierung Überprüfung des Bebauungsplanes, Sanierung der Rohrleitungen
4923	Altmorschen	Feldweg: Eindellungen, Rutschung in Schlottenfüllung über Gipsbruch	Zechsteingips, seicht	Sperrung des Weges und Verlegung Seismik
4923	DB-Neubaustrecke	Schlote	Zechstein-Anhydrit, seicht	Geoelektrik
4924	Bebaubarkeit in Brach	Suffosionssenkungen Straße, Erdfall	Anhydrit in 20 m Tiefe	Standard-Penetration-Test, die obersten 7 m niedrige Schlagzahlen, Auflockerungszone
4924	geplante Mülldeponie	Auftreten von rezenten Erdfällen, hydraulischer Kontakt zu 2 km entfernten Trinkwasserbrunnen	Anhydrit in 30 m Tiefe	Verzicht des Baus
4925	Bebauungsmöglichkeit Cornberg	Auftreten von Erdfällen, Kreisbauamt fordert Gutachten für Bebauungspläne	Zechsteingips, seicht bei 20–30 m Tiefe keine Erdfälle	massive Kellerdecke, zusammenhängend bewehrte Streifenfundamente, Stahlbetonbalken Statisches Gutachten
4925	1983	Erdfall Straße Ø 2 m Sontra	Werra-Anhydrit, seicht	plombieren, Verdichten der Erdfallsohle mit Fallbirne; Einbringen von Beobachtungsrohren, jährliche Messung
4926	A 44 Kassel-Eisenach	Strecken mit totalem Spülverlust, höhere k-Werte der mm-Schichten (10^{-5} m/s), tiefreichende bis unter die Gradienten bindige Erdfallfüllungen	Schlote; Zechsteinanhydrite	Geophysik, Kartierung, WD-Tests, Plombierung von Schloten, Bewehrung des Oberbaus der BAB, im Bereich von Tunneln: verstärkte konstruktive Anforderungen an Ausbau. Warneinrichtungen, Auskofferung, Bodenaustausch

Kartenblatt	Baumaßnahme	Bauschäden oder Schäden im Untergrund	Ursache	Maßnahmen
5023	DB-Neubaustrecke allgemeine Erkundung	Schlote Ø 20–50 m	Zechstein-Anhydrit, tief	Geoelektrik, siehe Bl. 4926
5025	Ortschaft Süß	Erdfall unterhalb eines Hauses; Mauerwerk zeigte klaffende Risse von 8 cm	Werra-Anhydrit in 15 m Tiefe	Injektionen, Abriß
5123	BAB Kassel – Frankfurt	5 Schlote fossil	Zechstein-Anhydrit, tief	siehe Bl. 5023
5224	1999: Aufnahme	Wildkaute: rezente Erdfälle-Zerrungsstruktur	Zechsteinsalz	Verfüllen mit Bauschutt
5224		plötzliches Einbrechen einer Senkungsmulde; Einsturzbeben mit Stärke 3–4	Salz	
5324	Talsperre Marbach/Haune	Senkungsmulde Marbach, starke Auflockerung, hohe Wasserwegsamkeiten, Standfestigkeit nicht gegeben	Salz	Geophysik; Verschiebung der Sperrenstelle um 50 m talabwärts, außerhalb der starken Auflockerung; Dammaufstandsfläche standsicher, tragfest
5324	Hochwasserrückhalte- becken Mackenzell	mehrere Senkungsmulden		Luftbildgeologie Geophysik, Verzicht des Baus
5423 5425 5523 5524	Rhönautobahn	Schlote fossil Ø 10–50 m Fliedetalbrücke und Welkesbrücke	Zechstein-Anhydrit, tief	geoelektrisch kartiert, Trichterfüllungen bis 1,50 m ausgekoffert, Bettung der Straße erhöht, um die Schlotfüllungen setzungsarm zu über- brücken Stützen wurden auf unterirdisch vorgespannte Abfangbalken gestellt, die im ungestörten Buntsandstein gegründet sind

Kartenblatt	Baumaßnahme	Bauschäden oder Schäden im Untergrund	Ursache	Maßnahmen
5423	Verlegung und Ausbau der B 254 Brücke auf Pfahlgründung	Setzungen an Brücke (Widerlager gegen Erddruckrichtung gestellt) unter den Pfahlspitzen lagen ≈ 15 m mächtige setzungsempfindliche Schichten, siehe Abb. 42	Zechsteinsulfat, tief	Gegenmaßnahmen zu Setzungen: Hohlwiderlager, Dammschüttmaterial mit geringerem Raumgewicht
5818	Baugruben/Frankfurt	Hohlraum angetroffen/teilw. 30 Hohlräume am Sachsenhäuser Berg	untermiozäne Kalkmergel, seicht	Zementinjektionen
5916	Hofheim	Spontane Quelle, Risse an Häusern, Garagen, Straßen, bruchlose Senkungsmulde	untermiozäne Hydrobien-Schichten, innere Erosion und Suffosion, Nachbrechen von Stützpfählern	Bohrungen, Nivellements, Abriß von Häusern, keine Einzelfundamente, zusammenhängende Streifenfundamente, als Stahlbetonbalken ausgeführt; besondere Erkundungsmaßnahmen beim Einsatz von punktförmigen Lasten
6016	Rodautal	rezente Erdfälle durch Hochwasser, evtl. Anstieg von GW-schädigenden Stoffen	miozäne Kalkmergel, seicht	Verfüllen der Erdfälle mit Bauschutt

Anlage 2. Zusammenstellung der Hoch- und Rechtswerte für Erdfälle auf Kartenblättern, für die keine flächenhafte Kartendarstellung erfolgte.

Kartenblatt	Hochwert	Rechtswert	Erdfalldurchmesser
4422	3430980	5715780	nicht bekannt
4422	3430590	5715820	"
4422	3532290	5716470	"
4422	3530590	5715840	"
4422	3530980	5715790	"
4422	3533820	5717430	"
4927	3584150	5656070	"
5018	3485120	5650300	"
5018	3485150	5650377	"
5018	3485190	5650340	"
5018	3485120	5650310	"
5018	3485190	5650290	"
5018	3485130	5650240	"
5018	3485220	5650240	"
5018	3485280	5650220	"
5018	3486230	5649830	"
5018	3485400	5646720	"
5018	3482210	5650660	"
5623	3539350	5582313	1 m
5623	3540975	5575475	1 m
5623	3541000	5575263	1 m
5623	3541250	5575025	1 m
5623	3541275	5575075	1 m
5623	3541888	5575113	1 m
5623	3541325	5574838	1 m
5623	3541513	5574813	2 m
5623	3541388	5574713	2 m
5623	3541575	5574700	2 m
5623	3541200	5574625	2 m
5623	3541025	5574550	2 m
5623	3541188	5574500	2 m
5623	3541275	5574500	2 m
5623	3541875	5573925	1,50 m
5622	3529825	5578300	1 m
5622	3529998	5578313	1,20 m
5622	3529800	5578163	1 m
5622	3529850	5578113	1 m
5622	3529895	5578088	1 m
5622	3529900	5578250	2 m
5622	3528500	5576735	3 m
5622	3528425	5576650	3 m
5622	3528475	5576525	2 m
5622	3528558	5576538	2 m
5622	3528613	5576583	2 m
5622	3528630	5576618	2 m
5622	3532438	5578175	5 m
5622	3532430	5578105	2 m
5916	3456880	5540970	"
5916	3456880	5540970	"
6016	3455860	5536700	"

Kurzfassung des Inhalts

Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karstgefährdeten Gebieten Hessens

– Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumaßnahmen –

Auf Grundlage von Daten über Erdfälle und Senkungsmulden und deren ingenieurgeologischer Analyse und Bewertung wurde unter Berücksichtigung der Bruchgefährdung und primären Erdfalldurchmessern, dem Alter und der Aktivität, der Unterscheidung in bruchlose und bruchhafte Deformationen, dem Karstgestein, den Lagerungsverhältnissen, dem Deckgebirgsaufbau sowie in der Begründung charakteristischer bautechnischer Merkmale ein Kartenwerk erstellt, aus dem die konkrete Karstgefährdung und der Grad der Gebirgsdeformation durch Karstprozesse abgeleitet werden kann. Das Kartenwerk setzt sich zusammen aus der Dokumentations-, der Karstgefährdungs- und der Erdfallhäufigkeitskarte. Die beigelegte Karstgefährdungskarte weist in 11 Kategorien bautechnische Parameter sowie die Karst- und Bruchgefährdung des Gebirges und damit Flächen gleicher Bebaubarkeit aus. Sie stellt somit eine flächenmäßige Abgren-

zung der im Bundesland Hessen dokumentierten bruchlosen und bruchhaften Karstformen unter Berücksichtigung ihrer geomechanischen Entwicklung und ihrer bautechnischen Auswirkungen dar. Dabei wurde der gebirgsmechanisch begründete Hochbruchprozess entlang vertikaler Trennflächen, der vom Spannungsverformungsverhalten des Gebirges und dessen Gebirgsfestigkeiten abhängt, in die Kartenableitung integriert.

Der Grad der Deformation im Gebirge bzw. die Karstaktivität ist der Erdfallhäufigkeitskarte zu entnehmen.

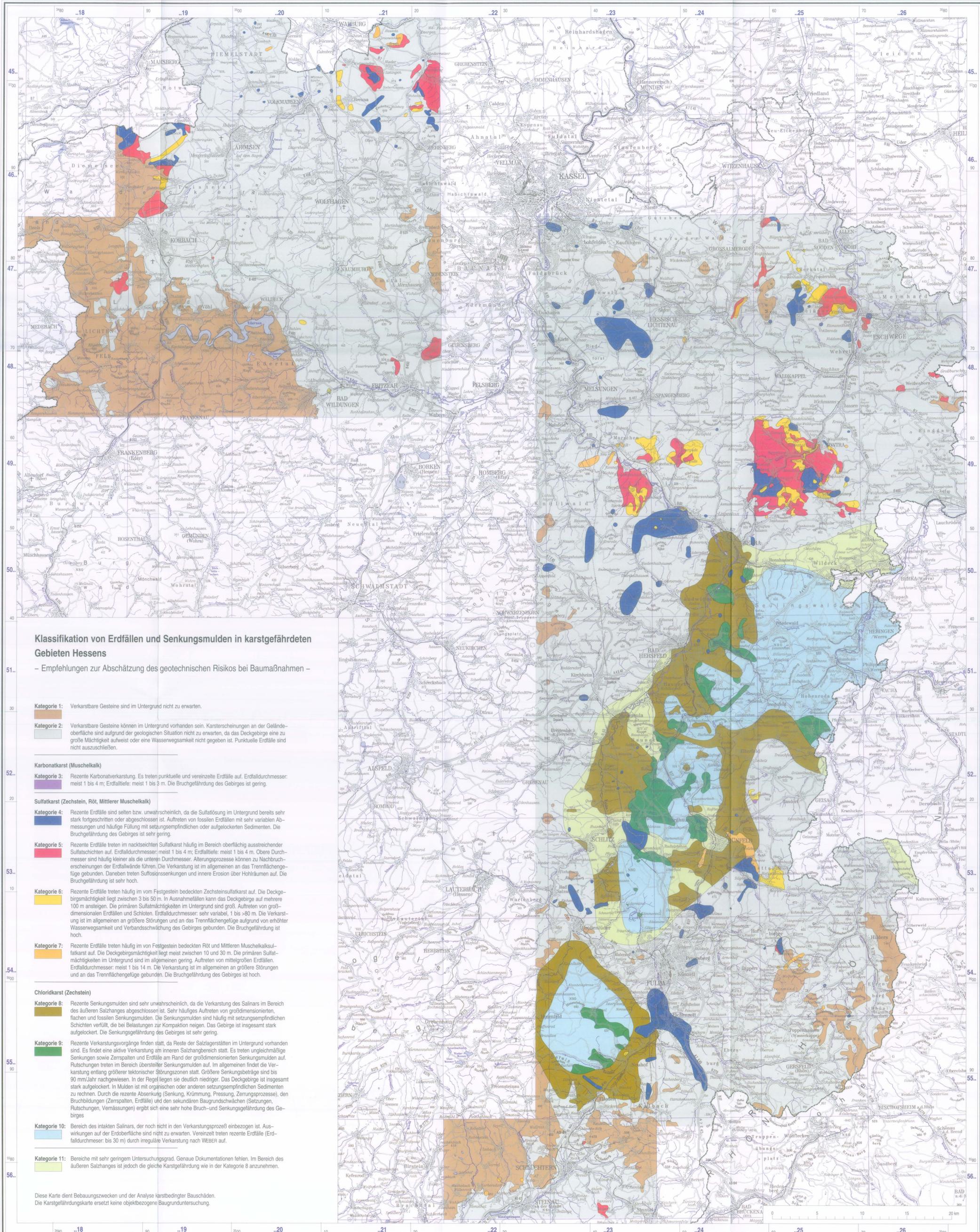
Die geotechnischen Schlussfolgerungen für die Bebaubarkeit der Karstgefährdungsgebiete werden vorgestellt. Hierzu zählen Auswirkungen der Karstprozesse auf Bauwerke und Bauvorhaben sowie Empfehlungen zur Untersuchung, Gründung, statisch-konstruktiven Maßnahmen und Kontrollmöglichkeiten in Karstgefährdungsgebieten.



Herausgeber, © und Vertrieb:
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden

www.hlug.de



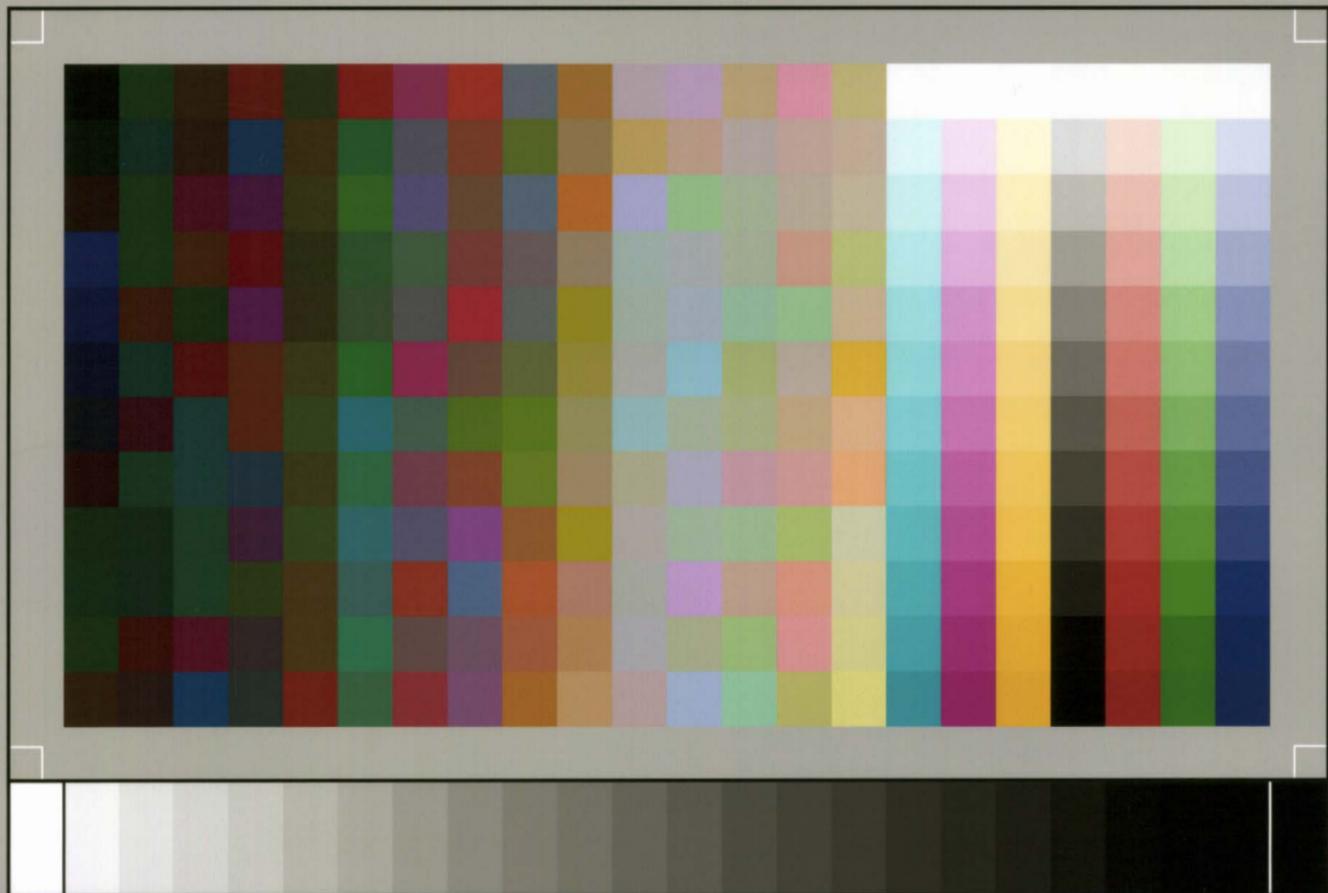


Klassifikation von Erdfällen und Senkungsmulden in karstgefährdeten Gebieten Hessens

– Empfehlungen zur Abschätzung des geotechnischen Risikos bei Baumaßnahmen –

- Kategorie 1:** Verkarstbare Gesteine sind im Untergrund nicht zu erwarten.
- Kategorie 2:** Verkarstbare Gesteine können im Untergrund vorhanden sein. Karsterscheinungen an der Geländeoberfläche sind aufgrund der geologischen Situation nicht zu erwarten, da das Deckgebirge eine zu große Mächtigkeit aufweist oder eine Wasserwegsamkeit nicht gegeben ist. Punktuelle Erdfälle sind nicht auszuschließen.
- Karbonatkarst (Muschelkalk)**
- Kategorie 3:** Rezente Karbonatverkarstung. Es treten punktuelle und vereinzelt Erdfälle auf. Erdfalldurchmesser: meist 1 bis 4 m; Erdfalltiefe: meist 1 bis 3 m. Die Bruchgefährdung des Gebirges ist gering.
- Sulfatkarst (Zechstein, Röt, Mittlerer Muschelkalk)**
- Kategorie 4:** Rezente Erdfälle sind selten bzw. unwahrscheinlich, da die Sulfatfüllung im Untergrund bereits sehr stark fortgeschritten oder abgeschlossen ist. Auftreten von fossilen Erdfällen mit sehr variablen Abmessungen und häufige Füllung mit setzungsempfindlichen oder aufgelockerten Sedimenten. Die Bruchgefährdung des Gebirges ist sehr gering.
- Kategorie 5:** Rezente Erdfälle treten im nacktsichtigen Sulfatkarst häufig im Bereich oberflächlich ausreichender Sulfatschichten auf. Erdfalldurchmesser: meist 1 bis 4 m; Erdfalltiefe: meist 1 bis 4 m. Obere Durchmesser sind häufig kleiner als die unteren Durchmesser. Alterungsprozesse können zu Nachbrücheerscheinungen der Erdfallwände führen. Die Verkarstung ist im allgemeinen an das Trennfächengefüge gebunden. Daneben treten Sulfatkarstsenkungen und innere Erosion über Hohlräumen auf. Die Bruchgefährdung ist sehr hoch.
- Kategorie 6:** Rezente Erdfälle treten häufig im vom Festgestein bedeckten Zechsteinsulfatkarst auf. Die Deckgebirgsmächtigkeit liegt zwischen 3 bis 50 m. In Ausnahmefällen kann das Deckgebirge auf mehrere 100 m ansteigen. Die primären Sulfatmächtigkeiten im Untergrund sind groß. Auftreten von großdimensionalen Erdfällen und Schloten. Erdfalldurchmesser: sehr variabel, 1 bis >80 m. Die Verkarstung ist im allgemeinen an größere Störungen und an das Trennfächengefüge aufgrund von erhöhter Wasserwegsamkeit und Verbandschwächung des Gebirges gebunden. Die Bruchgefährdung ist hoch.
- Kategorie 7:** Rezente Erdfälle treten häufig im von Festgestein bedeckten Röt und Mittleren Muschelkalksulfatkarst auf. Die Deckgebirgsmächtigkeit liegt meist zwischen 10 und 30 m. Die primären Sulfatmächtigkeiten im Untergrund sind im allgemeinen gering. Auftreten von mittelgroßen Erdfällen. Erdfalldurchmesser: meist 1 bis 14 m. Die Verkarstung ist im allgemeinen an größere Störungen und an das Trennfächengefüge gebunden. Die Bruchgefährdung des Gebirges ist hoch.
- Chloridkarst (Zechstein)**
- Kategorie 8:** Rezente Senkungsmulden sind sehr unwahrscheinlich, da die Verkarstung des Salinars im Bereich des äußeren Salzhangs abgeschlossen ist. Sehr häufiges Auftreten von großdimensionierten, flachen und fossilen Senkungsmulden. Die Senkungsmulden sind häufig mit setzungsempfindlichen Schichten verfüllt, die bei Belastungen zur Kompaktion neigen. Das Gebirge ist insgesamt stark aufgelockert. Die Senkunggefährdung des Gebirges ist sehr gering.
- Kategorie 9:** Rezente Verkarstungsvorgänge finden statt, da Reste der Salzlagerstätten im Untergrund vorhanden sind. Es findet eine aktive Verkarstung am inneren Salzhangbereich statt. Es treten ungleichmäßige Senkungen sowie Zerspalten und Erdfälle am Rand der großdimensionierten Senkungsmulden auf. Rutschungen treten im Bereich übersteilter Senkungsmulden auf. Im allgemeinen finden die Senkungen entlang größerer tektonischer Störungszonen statt. Größere Senkungsbeträge sind bis 90 mm/Jahr nachgewiesen. In der Regel liegen sie deutlich niedriger. Das Deckgebirge ist insgesamt stark aufgelockert. In Mulden ist mit organischen oder anderen setzungsempfindlichen Sedimenten zu rechnen. Durch die rezente Absenkung (Senkung, Krümmung, Pressung, Zerrungsprozesse), den Bruchbildungen (Zerspalten, Erdfälle) und den sekundären Baugrundschwächen (Setzungen, Rutschungen, Versenkungen) ergibt sich eine sehr hohe Bruch- und Senkunggefährdung des Gebirges.
- Kategorie 10:** Bereich des intakten Salinars, der noch nicht in den Verkarstungsprozess einbezogen ist. Auswirkungen auf der Erdoberfläche sind nicht zu erwarten. Vereinzelt treten rezente Erdfälle (Erdfalldurchmesser: bis 30 m) durch irreguläre Verkarstung nach WEBER auf.
- Kategorie 11:** Bereiche mit sehr geringem Untersuchungsgrad. Genaue Dokumentationen fehlen. Im Bereich des äußeren Salzhangs ist jedoch die gleiche Karstgefährdung wie in der Kategorie 8 anzunehmen.

Diese Karte dient Bebauungszwecken und der Analyse karstbedingter Bauschäden. Die Karstgefährdungskarte ersetzt keine objektbezogene Baugrunduntersuchung.



SP050509001

ScanPrint® *autopilot* Scan Target v2.0