



**Handlungsempfehlungen zur
ingenieurgeologischen Erkundung und
bautechnischen Beherrschung von
Subrosionserscheinungen bei
Straßenbauvorhaben
für den Dienstaufsichtsbereich des
Landesamtes für Bau und Verkehr
Thüringen
(IEBB Subrosion Thüringen 09/2009)**

09/2009

	Seite
1. Allgemeines	3
2. Grundlagen	5
2.1 Die Subrosionstypen und ihre spezifischen Hohlformen	5
2.2 Die Subrosion und ihre Einflussfaktoren	6
2.3 Subrosions – Risikopotenziale im geologischen Normalprofil und ihre regionale Verbreitung	6
3. Ingenieurgeologische Untersuchungen	9
3.1 Regelabfrage beim Geologischen Landesdienst der TLUG.....	9
3.2 Erkundungsstufen	10
3.2.1. Erkundungsstufe 1 (Archivrecherche).....	10
3.2.2. Erkundungsstufe 2 (Geotechnische Untersuchung)	10
4. Kennzeichnung der Gefährdungsklassen und Ableitung von Folgemaßnahmen.....	11
5. Bautechnische Sicherung.....	12
5.1 Straßen	12
5.1.1. Teilsicherung	12
5.1.2 Vollsicherung	13
5.2 Ingenieurbauwerke	14
5.2 .1 Teilsicherung	14
5.2.2 Vollsicherung	14
5.3 Sicherungsentwurf.....	14
6. Überprüfungen/ Kontrollen	15
6.1 Baubegleitende Untersuchungen	15
6.2 Geotechnische Überwachung nach Fertigstellung der Baumaßnahme	15
7. Glossar.....	16

Anhang

- A Subrogene Erdfall- und Senkungsgebiete im Freistaat Thüringen
- B Gefährdungsklassen und bautechnische Sicherungsmaßnahmen
- C Ingenieurgeologische Erkundung: Erkundungsstufen
- D Ingenieurgeologische Erkundung: Untersuchungsaufgaben
- E Ingenieurgeologische Erkundung: orientierende Bewertungsparameter
- F Behörden
- G Literatur

1. Allgemeines

Die Subrosion umfasst alle Vorgänge und Folgen der unterirdischen Gesteinsverwitterung und -abtragung. Eine häufig damit verbundene unterirdische Hohlraum-bildung kann die Stabilität des Baugrundes nachhaltig beeinträchtigen.

Natürliche unterirdische Hohlräume entstehen durch Substanzverlagerungen, die durch die sich im Untergrund bewegenden Wässer hervorgerufen werden. Der Stofftransport kann in gelöster Form (Korrosion) oder durch mechanisch-erosive Umlagerung (Suffosion bzw. innere Erosion) erfolgen.

Diese Handlungsempfehlungen betrachten vorrangig die negativen Einflüsse, die die verschiedenen Subrosionsauswirkungen auf den Straßenbau haben können.

Die Subrosion läuft in wasserlöslichen Gesteinen bei Vorhandensein fließender unterirdischer Wässer kontinuierlich ab. Ansatzpunkte für die Subrosionsvorgänge bieten bevorzugt tektonische (Risse, Klüfte, Störungen) oder petrographische (Schichtflächen, Gefüge- und Substanzwechsel) wasserwegsame Unstetigkeiten im Gebirge. Vorrangig jährliche und im Gefolge klimatischer Veränderungen auch lang-jährige Schwankungen von Niederschlagsmenge (Grundwasserneubildungsanteil) und Temperatur beeinflussen jedoch die Intensität der Subrosionsprozesse, so dass Zeiträume starken und stagnierenden Subrosionsfortschritts wechseln. Eine Vielzahl der heute vorhandenen Subrosionsformen, besonders in den gering löslichen Karbonatgesteinen, ist deshalb fossiler Entstehung. Sie erweitern sich unter den gegenwärtigen Klimaverhältnissen nur langsam.

Subrosionsformen prägen sich an der Erdoberfläche aus (Senken, Spalten, Erdfälle/Dolinen) oder sind in Form von Hohlräumen im subrodierten Gebirge verborgen (Höhlen, Drainagesysteme). Unmittelbare baugrundschwächende Einflüsse können durch den unvermuteten Einsturz fossiler Karsthöhlen (besonders in Karbonatgesteinen) oder durch Kollabieren rezent aktiv gebildeter Hohlräume (besonders Sulfat, seltener Chloridgesteine) entstehen. Eine mittelbare Form subrosiv bedingter Baugrundbeeinflussung stellen fossile, morphologisch häufig nicht mehr erkennbare Einbruchsstrukturen dar. Sie sind häufig mit natürlichen, bindigen, oft muddeartig-organogenen oder wasserreichen Lockergesteinen aufgefüllt, die in der Regel ungenügende Baugrundqualitäten aufweisen. Die Abb. 1 zeigt die für Thüringen typischen Subrosionshohlformen.

Auf dem Territorium des Freistaates Thüringen streichen subrosionsanfällige Gesteinsfolgen weitflächig zu Tage aus (vgl. Anh. A Thüringen – Gebiete mit Erdfall- und Senkungsgefährdung).

Auf Grund der teilweise analogen geologischen Situation bestehen vergleichbare Verhältnisse zu den angrenzenden Gebieten der Bundesländer Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen. Besonders betroffen sind große Flächen des Thüringer Beckens und seiner Randgebiete zu den Mittelgebirgen sowie Südthüringens. Im Thüringer Schiefergebirge treten Karsterscheinungen nur untergeordnet in karbonatischen Schichtfolgen auf. Der Thüringer Wald und der thüringische Anteil am Harz weisen keine verkarstungsfähigen Gesteine auf.

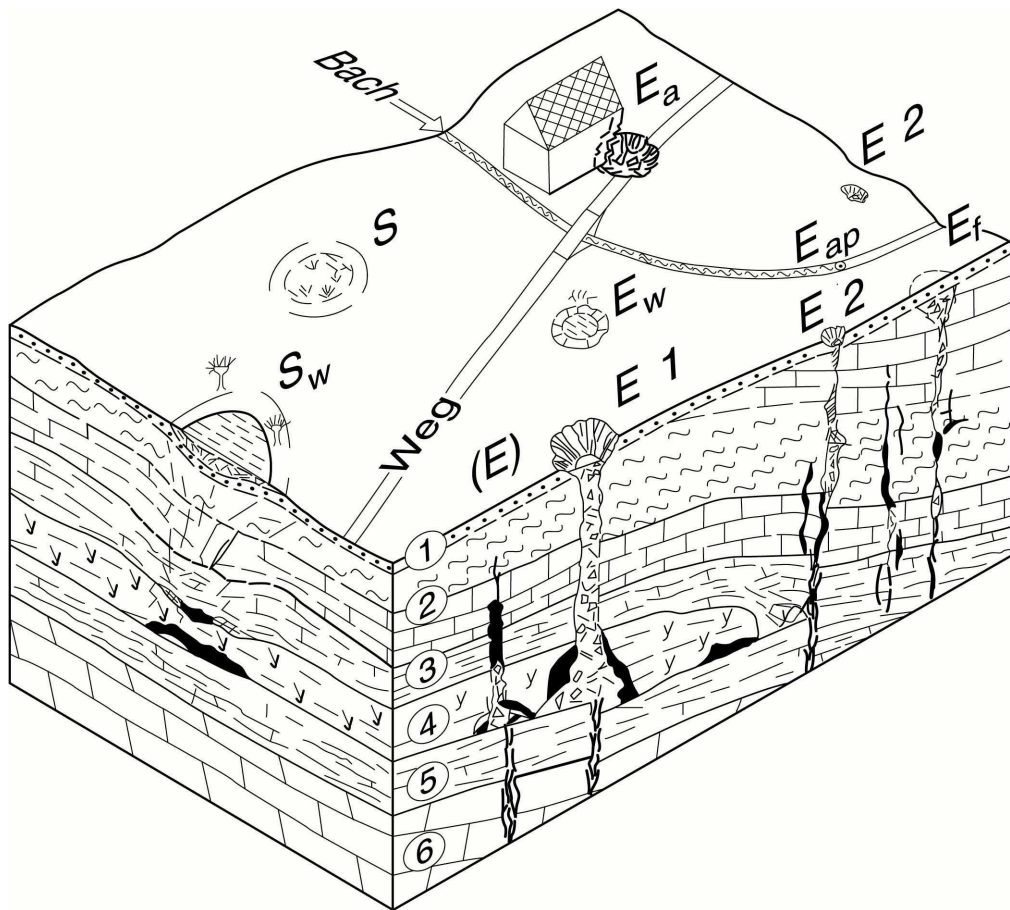


Abb.1. Blockbild mit schematischer Darstellung der häufigsten Subrosionshohlformen.
S- Senke, **S_w**- Senke, wassergefüllt, **E 1** - Erdfall, Ursache: schlotförmiges Hochbrechen eines Subrosionshohlraumes im Gips, **E 2** - Erdfall, Ursache: Versinken von Lockergesteinsmaterial in tektonisch entstandenen, z. T. subrosiv verbreiterten Spalten, **E_a** - aktiver Erdfall, der Gebäude und Verkehrsweg schädigt, **E_w** - Erdfall, wassergefüllt, **E_{ap}** - aktiver Erdfall im Bachbett (Bachschwinde, Ponor), **E_f** - Erdfall, fossil, Subrosion stagniert bzw. ist abgeschlossen, einstige Hohlform natürlich verfüllt und auf Geländeoberfläche nicht mehr sichtbar, **(E)** - Erdfall im Entstehen: Hochbrechen eines Schlottes über Subrosionshohlraum im Gips.
Geologischer Untergrund: ① - Lockergestein, ② - Karbonatgestein (z. B. flasrige oder kristalline Kalke des Muschelkalks), ③ - Wechselfolge Tonstein/ Kalkmergelstein, ④ - Gipsgestein, ⑤ - Tonstein/Kalkmergelstein, ⑥ - Dolomit, Schwarz- subrosiv entstandene Hohlräume.

Gegenwärtig sind nahezu 8.000 fossile und rezente Subrosionsformen, vornehmlich Erdfälle/Dolinen und Senken, durch den Subrosionskataster Thüringen der TLUG, im folgenden *SubKatThür* erfasst. Zum großen Teil handelt es sich um durch Sulfatsubrosion verursachte Hohlformen, nicht zuletzt, weil die gegenwärtigen klimatischen und hydrologischen Bedingungen gute Voraussetzungen für aktive Subrosion bilden. Bedeutsam sind aber auch die zahlreichen fossilen, vermutlich schon im Tertiär angelegten Karbonatkarstformen in den Schichtpaketen des Muschelkalkes.

Unter den gegebenen infrastrukturellen Zwängen können Gebiete, deren Untergrund durch Subrosionsauswirkungen negativ beeinträchtigt ist, bei der Planung der Verkehrsstrassen oft nicht umgangen werden.

Deshalb kann es erforderlich werden, hier präventive Maßnahmen zur Gefahrenabwehr sowie in Einzelfällen spezielle bauliche Sicherungen der Verkehrsanlagen durchzuführen.

Es ist das Ziel dieser Handlungsempfehlungen, die Wahl der Erkundungskonzeption und die Bewertung der Georisiken in Vorbereitung der Prüfung und Abwägung solcher Maßnahmen zu unterstützen. Grundlage für die Entscheidung über straßenbautechnische Sicherungsarbeiten bildet eine fundierte lokale Risikoanalyse. In die Entscheidungsfindung sind folgende Institutionen einzubeziehen:

- Straßenbulasträger
- Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
- Sachverständigen für Geotechnik u. a. Sondergutachter.

Die Adressen sind im Anhang F aufgeführt.

2. Grundlagen

2.1 Die Subrosionstypen und ihre spezifischen Hohlformen

Nach dem Gliederungsschema des *SubKatThür* sind die in Tab. 1 dargestellten Subrosionstypen zu unterscheiden. Sie sind hauptsächlich durch den Grad der Gesteinslöslichkeit bzw. einer tektonisch bedingten Gefügesituation definiert. In der Realität spielen sich bei den Subrosionsprozessen i.d.R. gleichzeitig Vorgänge ab, die fließend in zwei oder drei Typen einzuordnen wären.

Gebirge	Subrosionstyp	Löslichkeit	Lösungsgeschwindigkeit und Senkungsgeschehen	Subrosionsformen
<i>Chloride</i> - Steinsalz - Kalisalze	Chloridkarst	sehr hoch	schnell bis sehr schnell flächhaft, fronten- und senkenbildend	- Hohlräume in Tiefen >50 - 100 m - Dehnungsspalten, Schichtverkippen - Erdfälle mit Durchmessern bis >10m - Senken mehrere 100 m bis 10-er km
<i>Sulfate</i> - Gips - Anhydrit	Sulfatkarst	schwach bis gut	langsam bis schnell punktuell und linear hohlraumbildend	- Hohlräume ab Erdoberfläche bis >50 m Tiefe - Erdfälle/Dolinen mit Durchmessern von 1 - >10 m - komplexe Einbruchstrukturen - Senken mehrere 10-er bis 100-er m
<i>Karbonate</i> - Kalkstein - Dolomit	Karbonatkarst	niedrig	sehr langsam bis langsam hohlraumerweiternd	- Hohlräume ab Erdoberfläche bis >50 m Tiefe - Erdfälle/Dolinen mit Durchmessern von 1 - >10 m - komplexe Einbruchstrukturen
<i>Sowohl subrosionsanfällig als auch subrosionsresistent</i>	tektonisch verursachte Spaltenhöhlräume	-		- sich über 10-er bis 100-er m erstreckende Spaltenhöhlräume über denen an der Tagesoberfläche in der Lockergesteinsdecke Einsenkungen oder trichterförmige Einbrüche auftreten können

Tab. 1: Subrosionstypen und deren Wirkungsfolgen an der Tagesoberfläche

2.2 Die Subrosion und ihre Einflussfaktoren

Umfang und zeitlicher Verlauf der Subrosionsprozesse werden von einer Vielzahl komplexer Einflussfaktoren gesteuert. Nur wenn diese Faktoren erkannt und berücksichtigt werden, ist eine tragbare Risikoeinschätzung für vorgesehene Baumaßnahmen möglich.

Eine Risikoanalyse muss stets orts- und objektspezifisch sein, d. h. die jeweiligen Besonderheiten der Lokalität und des Bauwerkes berücksichtigen.

Insbesondere sind Aussagen zu folgenden Schwerpunkten erforderlich:

- | | |
|---|---|
| 1. Verzeichnis der Subrosionsformen | Erfassung der Hohlformen nach den Regularien des <i>SubKatThür</i> . Koordinatenmäßige Lageermittlung, morphologische Ausbildung und Dimension, Füllung, Raumlage zu benachbarten Subrosionsformen usw. |
| 2. Beschreibung des oder der möglichen Subrosionskörper | petrographische Ausbildung, Tiefenlage, Mächtigkeit, strukturelle Beschaffenheit, stratigraphische Zuordnung, tektonische Beanspruchung |
| 3. Deckgebirge über dem Subrosionskörper | Schichtenfolge, petrographische Ausbildung, strukturelle Beschaffenheit, Verbandsfestigkeit, stratigraphische Zuordnung, Mächtigkeit |
| 4. Hydrologie | Grundwasserdynamik, hydrochemische Charakteristik, Oberflächenwässer, klimatische Parameter |
| 5. Anthropogene Einflüsse | Überprägung/Störung der natürlichen Verhältnisse durch Bergbau, Abgrabung, Flächenbewirtschaftung, Wasserhaltung, Wassernutzung, Wassereinleitung, Überbauung. |

2.3 Subrosions - Risikopotenziale im geologischen Normalprofil und ihre regionale Verbreitung

In Thüringen treten subrosionsanfällige Gesteine in verschiedenen Niveaus des geologischen Normalprofils auf (Tab. 2).

Um den quantitativen Anteil subrosionsanfälliger Gesteine beispielsweise im südwestlichen Thüringer Becken zu zeigen, dient das Profil in Abb. 2.

Einen ungefähren Überblick des relativen Anteils und des Lösungsvermögens der subrosionsanfälligen Gesteine im Thüringer Tafeldeckgebirge vermittelt Tab. 3. Die in ihnen bei entsprechenden Voraussetzungen ablaufenden Subrosionsprozesse können die Morphologie und nicht selten die Eigenschaften des Baugrundes größerer Gebiete deutlich negativ beeinflussen.

Geologisches System/Teilsystem	Karbonatkarst	Sulfatkarst	Chloridkarst	Region/Landschaft ¹⁾	Gefährdungspotenzial
Holozän				Auen und Niederungen (Saale, Gera-Unstrut; Mülhausen-Langensalza, Werra)	überwiegend gering
Pleistozän					
Neogen					
Paläogen					
Oberkreide					
Unterkreide					
Malm		Schichtlücke			
Dogger					
Lias					
Oberer Keuper (Rät)					
Mittlerer Keuper				Thüringer Becken, Grabfeld	gering bis mittel
Unterer Keuper					
Oberer Muschelkalk				Muschelkalkplatten u. -bergländer: Ohmgebirge-Bleicheröder Berge, Hainich-Dün-Hainleite, Werra-Bergland-Hörselberge, Fahnersche Höhe, Ettersberg, Ilm-Saale-Ohrdruf, Meininger Kalkplatte, Schalkauer Thür. Wald-Vorland	überwiegend gering bis mittel, über Mittlerem Muschelkalk mittel bis hoch
Mittlerer Muschelkalk					
Unterer Muschelkalk					
Oberer Buntsandstein (Röt)				Ränder der Muschelkalkplatten (s. o.)	mittel bis hoch
Mittlerer Buntsandstein					
Unterer Buntsandstein					
Oberperm (Zechstein)	z5-7			Zechsteingürtel Südharz, Kyffhäuser - Roßleben, Bad Liebenstein, Orlasenke; Nordthüringer Buntsandsteinland Salzunger Buntsandsteinland	überwiegend hoch, in Buntsandsteinländern (Salzhang) gering bis mittel
	z4				
	z3				
	z2				
z1					
Untersperm (Rotliegend)		Schichtlücke			
Oberkarbon					
Unterkarbon		Schichtlücke			
Oberdevon				westl. u. östl. Thür. Schiefergebirge	gering bis mittel
Mitteldevon					
Unterdeven					
Silur				westl. u. östl. Thür. Schiefergebirge	gering
Ordovizium					
Oberkambrium		Schichtlücke			
Mittelkambrium				(östl. Thüringisches Schiefergebirge)	sehr gering
Unterkambrium					
Neoproterozoikum					

1) Landschaftsbezeichnungen nach SCHULTZE (1955), HIEKEL et al. (2004)

Tab. 2: Verteilung wasserlöslicher Gesteinsfolgen im geologischen Normalprofil Thüringens und ihr regionales Vorkommen.

Anteil an Gesamtmächtigkeit in %	Gesteinsgruppe	Löslichkeit in Wasser		Relatives Lösungsverhältnis
13	Salzgesteine	100 - 356 g/l		10 000
9	Sulfate	normales Grundwasser	- 2,3 g/l	100
		bei Chloridanwesenheit	bis 10 g/l	
15	Karbonate	CO ₂ - freies Wasser	ca. 14 mg/l	1
		Regenwasser	ca. 40 mg/l	
		CO ₂ gesättigtes Wasser	ca. 900 mg/l	
63	Sandsteine, Schluffe, Tone	unlöslich		0

Tab.3. Schema des relativen Anteils und des Lösungsvermögens der subrosionsanfälligen Gesteine im Thüringer Tafeldeckgebirges. Schätzwerte nach „Normalprofil“ Abb. 2, Löslichkeitsangaben nach HUNDT1950 aus PRINZ 1982.

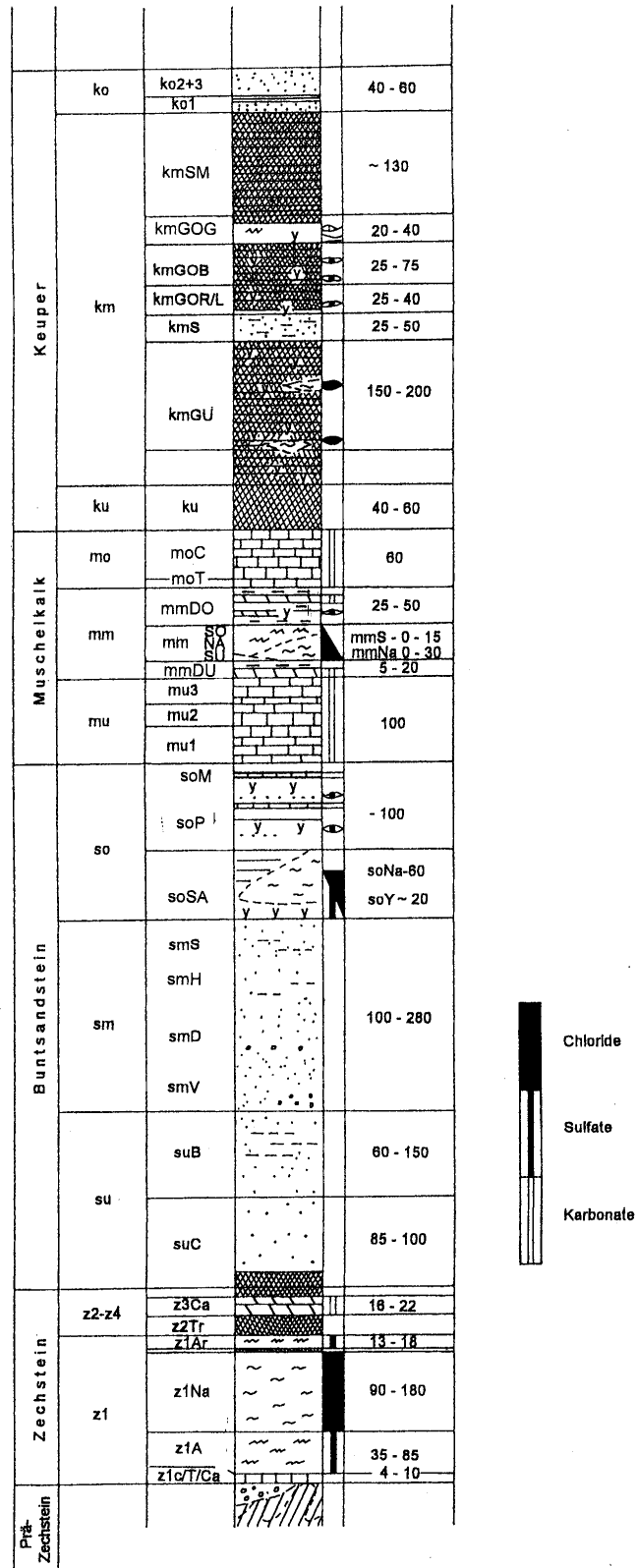


Abb. 2. Normalprofil des Tafeldeckgebirges im südwestlichen Thüringer Becken mit Markierung subrosionsanfälliger Schichtverbände (Mächtigkeitsangabe in m).

3. Ingenieurgeologische Untersuchungen

Die Maßnahmen zur Erkundung und Beurteilung des Baugrundes in Gebieten mit Subrosionsgefährdung sind einerseits von der Art der möglichen Bewegungen (Erd-einbrüche, Einsenkungen, deren Dimensionen und Eintretenswahrscheinlichkeit) und andererseits von der Größe und Konstruktion der geplanten Bauwerke, insbesondere ihrer Empfindlichkeit gegenüber Setzungen und Einbrüchen abhängig.

Im Ergebnis der ingenieurgeologischen Untersuchung muss das zu beurteilende Gefahrenpotenzial (Schadensausmaß x Eintrittswahrscheinlichkeit) soweit eingeschätzt werden können, das *begründet* entschieden werden kann, ob lediglich ein tolerierbares Restrisiko oder eine ordnungsrechtliche Gefahrenlage besteht. Ferner sollen auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse durch den Gutachter Möglichkeiten vorgeschlagen werden, das Gefahrenpotenzial auszuschalten bzw. zu minimieren.

Die empfohlenen Handlungen sowie Art, Umfang und Bewertungshinweise der ingenieurgeologischen Untersuchungen werden im Folgenden und im Anhang B bis E dargestellt.

3.1 Regelabfrage beim Geologischen Landesdienst der TLUG

- ◆ Bei **allen** Bauvorhaben erfolgt grundsätzlich eine Regelabfrage i. Z. d. Leistungsphase 2 (Vorplanung) für die Baugrunduntersuchung durch den Straßenbaulastträger bei der Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG), Abt. Geologischer Landesdienst, Grundwasser als Träger Öffentlicher Belange (TÖB), so dass das Ergebnis bei der Auftragserteilung zur Erarbeitung eines geotechnischen Berichtes nach DIN 4020 zur Verfügung steht.
- ◆ Finden sich in der TÖB-Stellungnahme der TLUG keine aus dem *SubKatThür* erkennbaren durch Subrosion bedingte Georisiken sind diesbezüglich keine weiteren Maßnahmen erforderlich.
- ◆ Ausnahme: Im Zuge der Baugrunduntersuchung bzw. während der Straßenbaumaßnahme werden Hinweise auf eine Subrosionsgefährdung festgestellt.

Empfohlene Handlungen:

- ◆ Bei Hinweisen auf Subrosionsgefährdung sollte eine Änderung der Linienführung in Erwägung gezogen werden.
- ◆ Wenn sich durch die TÖB-Stellungnahme der TLUG oder die Ergebnisse der Baugrunduntersuchung Hinweise auf ein subrosionsbedingtes Georisiko ergeben und wenn keine Möglichkeit zur Trassenverlegung besteht, müssen nähere Untersuchungen der Untergrundverhältnisse entsprechend Abschnitt 3.2 erfolgen.
- ◆ Mit den Untersuchungen muss ein Sachverständiger für Geotechnik mit ausgewiesenen Kenntnissen für den Sachbereich Subrosionsrisiken beauftragt werden.
- ◆ In das Vergabeverfahren für die notwendigen gutachterlichen Leistungen sowie evtl. notwendige Erkundungsarbeiten sind zwingend folgende Stellen einzubeziehen:

- Straßenbaulastträger
- Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Geologischer Landesdienst.

3.2 Erkundungsstufen

3.2.1 Erkundungsstufe 1 (Archivrecherche)

- ◆ Im Rahmen der Erkundungsstufe 1 erfolgt eine vertiefte, sachspezifische Kenntnisstandanalyse in Form einer Archivrecherche.

Empfohlene Handlungen:

- ◆ Es sind die Archivdaten der TLUG, in erster Linie der *SubKatThür*, vorhandene Gutachten, das Bohrarchiv und Spezialkarten, sowie Unterlagen der Straßenbauverwaltung des Freistaates Thüringen als auch Chroniken und Archive der Kommunen und Landkreise zu nutzen.
- ◆ Die Untersuchungsergebnisse der Erkundungsstufe 1 müssen in Berichtsform mit folgenden Kernaussagen vorgelegt werden:
 - lokalspezifische Darstellung der subrosionsrelevanten Sachverhalte nach Anhang D
 - lokalspezifische Bewertung der Subrosionserscheinungen nach Anhang E
 - wenn bereits möglich: Festlegung der Gefährdungsklasse nach Abschnitt 4
- ◆ bei Gefährdungsklasse 2 – 5:
 - Art, Größe und zeitlicher Verlauf der Senkungs- oder Bruchformen
 - Geometrie des möglichen Bruchkörpers (z. B. kreis- oder spaltenförmig mit Angabe von Durchmesser bzw. Breite der Spalte)
 - Vorschlag zur Art der bautechnischen Sicherungsmaßnahmen
 - bei ungenügendem Kenntnisstand: Darstellung und Kostenschätzung für notwendige, weiterführende geotechnische Untersuchungen im Rahmen der Erkundungsstufe 2.

3.2.2 Erkundungsstufe 2 (Geotechnische Untersuchung)

- ◆ Wenn aus den Archivdaten (Erkundungsstufe 1) keine hinreichend genaue Abschätzung des Subrosionsrisikos möglich ist, muss eine Spezialuntersuchung der Subrosionsproblematik, gesondert oder als Teil der geotechnischen Erkundung (Geotechnischer Bericht nach DIN 4020) erfolgen.

Empfohlene Handlungen:

- ◆ Festlegung von Art und Umfang der geotechnischen Untersuchungen auf Grundlage der Empfehlungen des Untersuchungsberichtes der Erkundungsstufe 1 unter Einbeziehung der Entscheidungsträger gem. Pkt. 3.1

- ◆ geeignete Untersuchungsverfahren (Auswahl):
 - Kartierung der Subrosionsmorphologie nach den Regularien des *SubKatThür*.
 - Auswertung vorhandener Karten (möglichst großmaßstäbiger topographischer und geologischer Karten, auch älteren Herausgabalters) sowie von Luftbildern. Bei der Luftbildauswertung kann eine Strukturanalyse der Lineare sinnvoll sein, da oft eine Korrelation zwischen tektonischen Schwächezonen (Störungen, Dichtkluftzonen) und den Subrosionsaktivitäten besteht.
 - geophysikalische Untersuchungen wie Refraktions- bzw. Reflexionsseismik, seismische Tomographie, geoelektrische Widerstandsmessungen, Untergrundradar, Mikro-Gravimetrie, bohrlochgeophysikalische Messungen
 - Kernbohrungen nach DIN 4021
 - Ramm- und Drucksondierungen nach DIN 4094
 - Kamerabefahrungen von Bohrlöchern bzw. angetroffenen Hohlräumen
 - Beobachtung von Grundwassermessstellen; geohydraulische und hydrochemische Untersuchungen.

- ◆ Die Untersuchungsergebnisse der Erkundungsstufe 2 müssen in Berichtsform mit folgenden Kernaussagen vorgelegt werden:
 - lokalspezifische Darstellung der subrosiv bedingten Sachverhalte nach Anhang D
 - lokalspezifische Bewertung der Subrosionserscheinungen nach Anhang E
 - Festlegung der Gefährdungsklasse nach Abschnitt 4

- ◆ bei Gefährdungsklasse 2 – 5:
 - Art, Größe und zeitlicher Verlauf der Senkungs- oder Bruchformen
 - Geometrie des möglichen Bruchkörpers (z. B. kreis- oder spaltenförmig mit Angabe von Durchmesser bzw. Breite der Spalte)
 - Vorschlag zu Art und Umfang der bautechnischen Sicherungsmaßnahmen.

4. Kennzeichnung der Gefährdungsklassen und Ableitung von Folgemaßnahmen

In Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse der ingenieurgeologischen Erkundung werden Gefährdungsklassen festgelegt. Die Gefährdungsklassen weisen die zu erwartenden Beanspruchungen des Bauwerkes durch Subrosionsauswirkungen sowie grundlegende bautechnische Sicherungsmaßnahmen aus. Zur Festlegung der Gefährdungsklasse muss eine **begründete** Beantwortung folgender Fragen möglich sein:

- 1. Welche Subrosionswirkungen können im Bereich des geplanten Bauwerkes auftreten?**
- 2. Welche Beanspruchungen des Bauwerkes sind in Folge der Subrosionsauswirkungen möglich?**

Die Ermittlung der Gefährdungsklasse erfolgt nach Anhang B durch den Baugrund- oder Sondergutachter als Empfehlung.

Die planerisch maßgebliche Gefährdungsklasse wird im Rahmen einer Abschlussberatung durch folgende Fachgremien festgelegt:

- Straßenbaulastträger
- Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
- Baugrund- bzw. Sondergutachter.

Die festgelegte Gefährdungsklasse muss in die Unterlagen der Entwurfsplanung eingearbeitet sein.

5. Bautechnische Sicherung

Bei Erkennen einer Gefahrenlage (Gefährdungsklassen 2 bis 5) müssen bautechnische Vorsorgemaßnahmen zur Gewährleistung der dauerhaften Gebrauchstauglichkeit der geplanten baulichen Anlage und der öffentlichen Sicherheit getroffen werden.

Die sicherste Variante ist die Umgehung subrosionsgefährdeter Abschnitte. Bei Notwendigkeit muss der gefährdete Bereich auf kürzestem Weg gequert werden.

5.1 Straßen

Grundsätzlich werden zwei Lösungsansätze betrachtet:

a. Prinzip der Teilsicherung

Im Ereignisfall (Erdfall, Senkung) wird ein plötzlicher Einbruch der Fahrbahn verhindert; definierte Verformungen im Fahrbahnbereich (Nutzungseinschränkungen) werden zugelassen. Die Sanierung erfolgt nach einer festzulegenden Warnzeit, während der die Konstruktion nicht versagen darf.

b. Prinzip der Vollsicherung

Der Ereignisfall führt zu keinerlei Nutzungseinschränkungen des Baukörpers. Eine Sanierung der Straße - infolge des Ereignisfalles - ist nicht notwendig.

5.1.1 Teilsicherung

Aus wirtschaftlichen Gründen wird das Prinzip der Teilsicherung für die Mehrzahl der Fälle maßgeblich sein. Es ergeben sich folgende Sicherungsvarianten:

- Bewehrung des Straßenbaukörpers (Dammes) mit Geokunststoffen
- flexible Fahrbahnkonstruktionen
- Dammerhöhungen im Senkungszentrum
- höhere Verdichtung der gefährdeten Dammabschnitte

- Abdichtung von Entwässerungsanlagen
- Aufspreizen der Fahrbahn
- Deckgebirgsverfestigungen
- Sprengen, Verfüllen, Verpressen oberflächennaher Hohlräume.

Für die Bewehrung des Straßenkörpers mit Geokunststoffen gelten (sinngemäß) die „Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Geokunststoffen zur Sicherung bruchgefährdeter Straßenbereiche in Altbergbau- und Subrosionsgebieten für den Dienstaufsichtsbereich des Landesamtes für Straßenbau Sachsen-Anhalt“ (GSbS Sachsen-Anhalt, 2001).

Die zulässige Verformung an der Straßenoberkante kann in Bezug auf den British Standard 8006 (BS 8006) wie folgt definiert werden (Abb. 3).

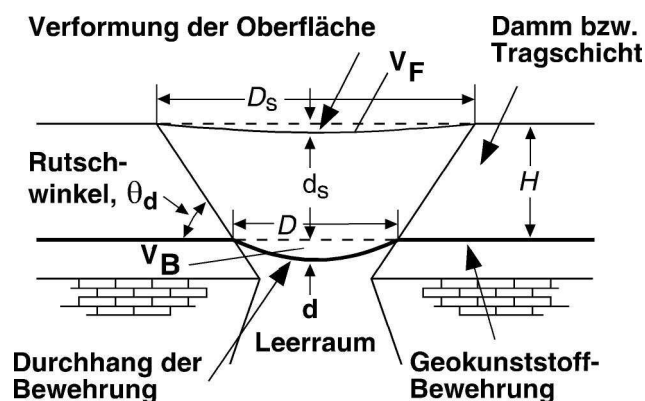


Abb. 3: Parameter zur Bemessung der Geokunststoffbewehrung, BS 8006

- Autobahnen und Bundes- bzw. Landstraßen: $d_s/D_s \leq 0,01$, wobei hier ein Meß- und Warnsystem unterhalb der Bewehrungslage einzubauen ist.
 - Kreisstraßen und andere Wege: $d_s/D_s \leq 0,02$ ohne Warnsystem.
- Die Sicherungszeit ist mit ≥ 14 Tagen anzunehmen, wobei eine Abstimmung im Einzelfall auf den jeweiligen Kontrollrhythmus der Straße vorzunehmen ist.

5.1.2 Vollsicherung

Eine „vollständige“ Sicherung ist nur in Ausnahmefällen (sehr hohe Bruchgefährdung/Gefahrenabwehr) notwendig. Es ergeben sich folgende Sicherungsvarianten:

- Bau einer Brücke über den gesamten bruchgefährdeten Bereich
- Einbau einer entsprechend bewehrten, durchgehenden Betonplatte unterhalb des Straßenkörpers. Die Bemessung erfolgt dabei nach DIN Fachberichten, während die Gütenachweise entsprechend ZTV-Ing. vorzusehen sind. Prüfungen nach DIN 1076 sind nicht erforderlich.

5.2 Ingenieurbauwerke

Für Ingenieurbauwerke gelten die Kategorien Teil- und Vollsicherung nur bedingt. Die gewählte Sicherungsvariante kann mehrere der u. a. Maßnahmen umfassen.

5.2.1 Teilsicherung

Als Beispiele für konstruktive Sicherungsmaßnahmen (Teilsicherung) für Ingenieurbauwerke kommen infrage:

- injektionsverfestigte Gründungsschichten
- Anordnung breiter Bewegungsfugen
- waagrecht und senkrecht nachstellbare Lager
- statisch unbestimmte Durchlaufkonstruktionen bei $\Delta s < 1/1.000$ der Stützweite L
- statisch bestimmte Konstruktionen mit Drei- oder Vierpunktlagerung bei $\Delta s > 1/1.000$ der Stützweite L (Kette von Einzelbrücken)
- zusätzlich nachstellbare Rollenlager
- allseitig bewegliche Punktkipplager.

5.2.2 Vollsicherung

- Tiefgründung (Pfähle) in nicht subrosionsanfälligem Gebirge
- Gründungsroste, Gründungsplatten zur Vergrößerung der Fundamentflächen
- stärkere Dimensionierung von Pfeilern und Widerlagern
- Überbauten aus Stahl, Stahlverbund oder Spannbeton

5.3 Sicherungsentwurf

- ◆ Der Sicherungsentwurf wird nach der Festlegung der Gefährdungsklasse gem. Abs. 4 /Anlage B durch ein geotechnisches Ingenieurbüro, den Sondergutachter oder Bauwerksplaner mit ausgewiesener Kompetenz für das jeweilige Spezialgebiet erarbeitet.
- ◆ Die Bemessungsgrundlagen zur bautechnischen Sicherung des Bauwerkes werden im Rahmen der ingenieurgeologischen Untersuchungen (Abschnitt 3) ermittelt.
- ◆ In die Erarbeitung des Sicherungsentwurfes sind zwingend folgende Stellen einzubeziehen:
 - Straßenbaulastträger
 - Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr
 - Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Geologischer Landesdienst
 - geotechnische Sachverständige bzw. Sondergutachter
 - durch den Bauwerksplaner.

6. Überprüfungen / Kontrollen

6.1 Baubegleitende Untersuchungen

Besonders in subrosionsgefährdeten Bereichen ist eine Überprüfung der tatsächlich vorhandenen geotechnischen Verhältnisse auf Übereinstimmung mit dem Baugrundmodell unverzichtbar.

Es ergibt sich eine Vielzahl möglicher baubegleitender Messungen. Art und Umfang der Messungen werden durch den geotechnischen Sachverständigen vorgeschlagen. Die Entscheidung erfolgt im Zuge der Erstellung des Sicherungsentwurfes, unter Einbeziehung der maßgeblichen Stellen gem. Punkt 5.

Als Mindestumfang erfolgt in jedem Fall die visuelle Beurteilung des aufgeschlossenen Baugrundes durch den geotechnischen Sachverständigen/Baugrundgutachter im Rahmen einer oder mehrerer Baugrubenabnahmen. Die Baugrubenabnahmen sind zu protokollieren.

Weitere subrosionsschadensrelevante, geotechnische Messungen sind z. B.:

- geodätische Messungen
- Messungen von Setzungen und Verschiebungen
- Extensometermessungen
- Inklinometermessungen
- Fissurometermessungen
- Porenwasserdruck- und Erddruckmessungen
- Erschütterungsmessungen
- hydrologische Messungen
- hydrostatische Messsysteme (Schlauchwaagenmessungen)
- Erdfallpegelbeobachtungen.

6.2 Geotechnische Überwachung nach Fertigstellung der Baumaßnahme

Auch nach Fertigstellung der Baumaßnahme sind u. U. Kontrollmessungen zur Überprüfung der geotechnischen Prognose und der Bauwerkssicherheit in Subrosionsgebieten notwendig.

Art und Umfang der Messungen werden durch den geotechnischen Sachverständigen vorgeschlagen. Die Entscheidung erfolgt im Zuge der Erstellung des Sicherungsentwurfes, unter Einbeziehung der maßgeblichen Stellen gem. Punkt 5. Die möglichen Messungen entsprechen weitgehend den unter Punkt 6.1 aufgeführten Untersuchungsverfahren.

Eine besondere Bedeutung kommt der Kontrolle von Bauwerkssetzungen durch regelmäßige Messungen zu.

Glossar

Ablaugung: die flächenhafte → Subrosion leicht löslicher Gesteine, insbesondere von Salzablagerungen, die zur Bildung mehr oder weniger ebener Ablaugungsflächen führt. Bei horizontaler Lage als Salzspiegel, bei geneigter Lage als Salzhang bezeichnet.

aktive Subrosion: Entstehung bzw. Reaktivierung von Subrosionshohlformen nach 1950.

Anhydrit: [griech. „wasserfrei“], ein gesteinsbildendes Mineral (CaSO_4) in Sulfatgesteinen. Anhydrit kommt in Salzlagern und gesteinsbildend vor allem in Ablagerungen der Zechsteinzeit vor. Durch Wasseraufnahme erfolgt der Übergang in → Gips.

Auslaugung, allgemeiner Begriff für die durch Wasser hervorgerufene physikalische Lösung leicht wasserlöslicher Sulfat- und Chloridgesteine. Nach WEBER (1930) unterscheidet man die von Störungszonen ausgehende irreguläre Auslaugung von der vom Schichtausstrich ausgehenden regulären Auslaugung.

Bachschwinde, das Wasser eines Fließgewässers (oder eines Teiches) versinkt komplett oder teilweise in durch Subrosion entstandenen Hohlräumen. → Versinkung, Ponor.

Doline, [slowenisch „Tal“], eine überwiegend geschlossene, trichter-, schüssel- oder wannenförmige Hohlform an der Tagesoberfläche subrosionsanfälliger Gesteine. *Einsturzdolinen* entstehen durch Einstürzen der Decke eines unterirdischen Subrosionshohlraumes. *Lösungs- oder Schwunddolinen* bilden sich von der Tagesoberfläche her durch die subrosive Wirkung von Oberflächenwässern ohne, dass unterirdische Hohlräume entstehen. Die in Thüringen über Gips- bzw. Karbonatgesteinsuntergrund auftretenden Dolinen führen zu geschlossenen Hohlformen mit annähernd runden Formen. Sie treten besonders im Zechsteinausstrich des Südhazes in großer Dichte auf und haben zumeist Durchmesser von < 10 m über wenige Zehnermeter bis 200 m und mehr. Eine nähere Beschreibung der Dolinencharakteristika im Subrosionskataster Thüringen des TLUG (im Folgenden abgekürzt mit *SubKatThür*) erfolgt in analoger Weise wie die der → Erdfälle.

Dolomit, ein gesteinsbildendes Mineral ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$).

Einsturzkessel, Einsturztrichter, siehe → Doline, Erdfall.

Erdfall, eine zumeist allseitig geschlossene Hohlform mit nachweisbaren Einbruchrändern, hervorgerufen durch Zubruchgehen der Gewölbedecke über einen durch Subrosion entstandenen Hohlraum. Im Allgemeinen zeigt ein Erdfall nach dem Einbrechen im senkrechten Schnitt eine Glockenform, d. h. dass sich die rundliche Öffnung an der Tagesoberfläche zur Tiefe hin erweitert. In der Regel wandeln sich diese Einbruchformen bald durch Nachbrechen der Ränder zu runden bis ovalen Trichtern um. Die sich einstellenden Böschungswinkel sind zunächst abhängig von

den jeweiligen Scherfestigkeitsparametern und dem Trennflächengefüge des eingebrochenen Gesteinspaketes. Durch flächenhafte Abtragung entstehen immer flachere Böschungen, die Hohlform wird schließlich völlig eingeebnet. Das an der Tagesoberfläche anstehende Gestein ist im Gegensatz zur Doline nicht subrodierbar. Nach Definition des *SubKatThür* muss die Mächtigkeit der nicht subrodierbaren geologischen Einheit mindestens 2 m betragen.

Zur näheren Beschreibung der Erdfälle werden im *SubKatThür* unterschieden:

- E** = Erdfall, allgemein
Alle Hohlformen die nicht näher zu untergliedern sind, jedoch deutlich als Erdfall zu erkennen sind.
- Ea** = Erdfall aktiv (jünger als 1950, d. h. nach dem 31.12.1949 neu aufgetreten bzw. reaktiviert worden).
- Er** = Erdfall, reaktiviert (erneutes Nachbrechen)
Erdfälle von denen bekannt ist, dass sie sich erweitert haben bzw. Verfüllungen nachgesackt sind, d. h. die Subrosion noch anhält.
- Ev** = Erdfall, anthropogen verfüllt. Erdfälle die durch Menschenhand mit Abfällen, Erde, Steinen usw. verfüllt worden sind.
- En** = Erdfall, natürlich verfüllt.
Erdfälle die durch natürliche Prozesse wie Anmoorbildung, Sedimentation usw. aufgefüllt wurden.
- Ef** = Erdfall, fossil.
Heute verdeckter und nur durch technische Aufschlüsse nachzuweisender Erdfall, der an der Oberfläche morphologisch nicht mehr in Erscheinung tritt und nur noch durch Anschnitt (z. B. Baumaßnahme) oder Bohrungen zu erkennen ist.
- Ew** = Erdfall, wassergefüllt.
Erdfall auf dessen Grund eine geschlossene Wasserdecke steht.
- Eq** = Erdfallquelle - Erdfall mit Wasseraustritt (Quelle)
- Ep** = Ponor (Schluckloch) - Erdfall in dem Wasser versinkt.
- Eu** = Erdfall unsicher (vermutet) Hohlformen, bei denen die Zuordnung als Erdfall wahrscheinlich, aber unsicher ist.
- H** = Hohlform, die mit einer Subrosionsform verwechselt werden kann, deren anthropogener Ursprung (noch) erkennbar ist.

Evaporite, Salzgesteine, Eindampfungsgesteine.

fossil, Erscheinungen und Bildungen der geologischen Vergangenheit (z. B. fossiler Karst) – Gegenteil → rezent

Gips, ein gesteinsbildendes Mineral ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sehr geringer Härte. Gips bildet in Thüringen besonders im Zechstein, aber auch im Röt, dem Mittleren Muschelkalk und dem Mittleren Keuper z. T. mächtige Lager. (Etwa 9 % der Gesamtmächtigkeit des Thüringer Tafeldeckgebirges bestehen aus Gips.) Mit seiner hohen Wasserlöslichkeit (normales Grundwasser bis 2,3 g/l und bei Chloridanwesenheit bis 10 g/l) ist Gips nach → Steinsalz das subrosionsanfälligste Gestein.

Halit, gesteinsbildendes Mineral → Steinsalz.

Hydratisierung, die Aufnahme von Kristallwasser, die zur Volumenvergrößerung des betreffenden Gesteins und nachfolgend gegebenenfalls zur Sprengung des Nachbargesteins führt. (z. B. Umwandlung von → Anhydrit in → Gips).

Kalkstein, vorwiegend aus Kalziumkarbonat (CaCO_3) bestehendes Sedimentgestein. In Thüringen hauptsächlich durch den Muschelkalk vertreten. (Etwa 15 % der Gesamtmächtigkeit des Thüringer Tafeldeckgebirges bestehen aus Karbonaten.) Obwohl Karbonate nur bei Anwesenheit von CO_2 -haltigen Wässern merklich löslich sind (CO_2 – freies Wasser ca. 14 mg/l; CO_2 – gesättigtes Wasser ca. 900 mg/l) spielt der Karbonatkarst bei tektonischer Vorbereitung (Spalten- und Zerrüttungszonen) eine bisher oft unterschätzte Größe.

Karren (auch Schratten), Karsterscheinungen, chemische Auslaugungs-, in geringem Umfang auch mechanische Spülformen von Oberflächen- und Schmelzwasser an der Oberfläche von Kalkgesteinen. Teilweise mehrere Meter tief.

Karst, [slowenisch: Kras „steiniger Boden“], zusammenfassende Bezeichnung für Erscheinungen und Oberflächenformen in Gebieten mit wasserlöslichen Gesteinen.

Karstquelle, im → Karst austretende, in ihrer Schüttung und chemischen Zusammensetzung des Wassers oft stärker schwankende Quelle.

Karstspalte (oben offen), durch Lösungsarbeit des Wassers entlang von Trennflächen entstandene offene Spalte in subrodierbarem Gestein (z. T. auch als Kluftkarren bezeichnet).

Karstschlotte (nicht bis zur Oberfläche durchgedrungen), unter Bedeckung entwickelte Karstspalten, die mit Luft, Wasser oder Residuat und Verbrauchsmaterial verfüllt sein kann. Im Anschnitt, z. B. einer Steinbruchwand erscheint sie wie ein Schlot → Schloten.

Karsthöhle, durch Subrosion entstandene Hohlräume innerhalb des löslichen Gesteins. siehe → Schloten/Karsthöhlen.

Karsttrichter, → Doline, Erdfall.

Karstwasser, in Hohlräumen verkarsteter Gesteine zirkulierendes (lösungsfähiges) Grundwasser.

Korrosion, die chemische Zerstörung (Auslaugung) des Gesteins durch Eindringen des Wasser, (siehe auch → Lösungsverwitterung).

Lösungsverwitterung, die Lösung wasserlöslicher Gesteine in Wasser.

Residualgebirge, [lat. residuum „Rückstand“], der bei der Auslaugung von Salzgesteinen durch das Grundwasser gebildet, nur noch partiell löslicher Rückstand aus Gips, Ton und anderen schwer löslichen Gesteinen. Infolge Vorherrschens von Gips über Salzstöcken als Gipshut bezeichnet.

rezent, Bezeichnung für Lebewesen, Bildungen und Erscheinungen der Gegenwart (z. B. rezenter Karst mit im Holozän gebildeten Hohlformen, jünger als 11500 Jahre). Gegenteil → fossil.

Schlotten/Karsthöhlen, durch die Lösungswirkung des fließenden Wassers in subrosionsanfälligen Gesteine infolge der Erweiterung von Klüften und Spalten entstandene, meist steilstehende und langgestreckte oft mit Lockergestein verfüllte Hohlräume.

Senken, schüssel- bis wannenförmige Hohlformen mit flachen Böschungen ohne an der Erdoberfläche wahrnehmbaren Brucherscheinungen. Ursache ist die flächenhafte Subrosion des Gesteinskörpers im Untergrund bei der keine Hohlräume entstehen, sondern die Volumenverluste durch unmittelbares Nachsinken des Hangenden ausgeglichen werden.

Senkungswanne/Senkungskessel, Senkungsstrukturen über unterirdischen Hohlräumen z. T. mit Randspalten (Zerrspalten) als Folge von Zugspannungen und Pressungszone als Folge von Druckspannungen im Zentrum. Siehe auch → Senken.

Steinsalz, ein gesteinsbildendes Mineral (NaCl). In Thüringen bildet es mächtige Lager im Zechstein, geringer mächtige Einschaltungen können lokal im Röt, dem Mittleren Muschelkalk und im Mittleren Keuper auftreten.

Subrosion, [lat. sub „unter“, rodere „benagen“], alle natürlichen Vorgänge, die durch das sich im geologischen Untergrund bewegende Wasser infolge physikalischer oder chemischer Auflösung (Korrosion) oder Ausspülen von Feinfraktionen (→ Suffosion) bzw. Umlagern und Fortführen verschiedener Fraktionen eines nichtbindigen Gesteins (innere Erosion) zu Substanz- und damit Volumenschwund bzw. zur Bildung unterirdischer Hohlräume führen.

Suffosion, durch fließendes Wasser werden Teilchen der feineren Fraktionen eines ungleichförmigen, nichtbindigen Erdstoffes umgelagert und transportiert. Das tragende Feststoffskelett wird hierbei nicht verändert.

Uvalas (Erdfall-/Dolinenkette), Perlschnurartige, lineare Verkettung oft zahlreicher einzelner Subrosionshohlformen zu einem Tal. Uvalas können sowohl aus Lösungs- als auch aus Einsturzdolinen bzw. Erdfällen hervorgehen.

Verkarstung, der kontinuierlich oder phasenhaft ablaufende natürliche Auflösungs- oder Zersatzprozess von leicht löslichen Gesteinen durch Wasser, begleitet von mechanischen Vorgängen wie Erosion oder Versturz.

Versinkung, das Eindringen von Wasser in den Untergrund durch Trennfugen und Hohlräume, Wasserverlust von Fließgewässern.