

Mittwoch 16. Oktober 2013

10:00-11:00

## **Bauen im Subrosionsgebiet Entwurf und Ausführung von Schutzkonstruktionen im Spannungsfeld zwischen Gebrauchstauglichkeit und den Risiken für Bauherr und Planer**

Ulf Köhler, Falk Müller  
*vgs Ingenieure, Erfurt*

### **1. Einführung**

Das Bauen im Subrosionsgebieten bedeutet für alle Baubeteiligten eine komplexe und in vielfacher Hinsicht über den normalen Aufwand der Planung und Genehmigung eines Bauwerkes hinausgehende Mitwirkung der Bauherren einerseits aber auch der verantwortlichen Planer, Geotechniker, Geologen und Prüfingenieure. Daraus ergibt sich auch eine besondere Stellung des Bauunternehmers.

Das Problem dabei besteht darin, dass die entscheidende Grundlage für die Planung der Gründung eines Bauwerkes, nämlich der geologische Körper, in den das Bauwerk gesetzt werden soll, einer zeitlichen Veränderung unterliegt, während wir beim Bauen in Nichtsubrosionsgebieten in der Regel davon ausgehen können, dass – regelgerechte Baugrunduntersuchung vorausgesetzt – die Baugrundverhältnisse für die Standzeit des Bauwerkes quasi als konstant angenommen werden können.



**Bild 1:** Großer Erdfall in Thüringen

Demgegenüber kann die zeitliche Veränderlichkeit von Raumstruktur der Zusammensetzung bzw. Festigkeit schon unmittelbar nach Fertigstellung eines Bauwerkes beginnen. Die konkreten Elemente, die einer zeitlichen Veränderung unterliegen, wie z. B. chemische Lösungsprozesse, Ausdehnung von einzelnen Hohlformen oder die Vereinigung benachbarter Hohlformen, das Durchschlagen von Erdfällen oder Senkungsprozesse an der Oberfläche müssen durch Geologen und Ingenieurgeologen zuvor als Grundlage der Planung beurteilt werden.

Dieser Teil des Planungsprozesses ist von entscheidender Bedeutung, weil hier diejenigen Grundlagen geschaffen werden müssen, die zu Entwurf und Bemessung von Schutzkonstruktionen oder auch den Verzicht auf Schutzkonstruktionen führen. Die verfügbaren Datengrundlagen wie z. B. Geotechnische Messtischblätter, Subrosionskartierungen, statistische Erhebungen über die Auftretenswahrscheinlichkeit und Dimension von Erdfällen usw. sind von höchst variabler Qualität, Bild 2. Je nach Größe eines Bauwerkes müssen sie ggf. im Rahmen des Planungsprozesses durch

gesonderte Kartierungsvorgänge überhaupt erst geschaffen werden. Der Planungsprozess von Grundlagenermittlung bis zur Ausführungsplanung und Bauüberwachung solcher Bauwerke hat vielfältige Besonderheiten.

Das Planen und Bauen im mürben Fels ist schwieriger als im Lockergestein, da der geologische Körper sich nicht so leicht in die gewohnten quasihomogenen Modelle einpassen lässt. Im Subrosionsgebirge entzieht sich die Modellierung des Bauraums, in dem Bauwerkslasten abgetragen werden müssen, allen gängigen technischen Ansätzen der Planung. Sowohl Bauherr als auch Unternehmer verlangen aber eine auf den anerkannten Regeln der Technik aufgebaute Planung und Bemessung. Im Falle eines akuten Erdfallgebietes gerät man schnell an die Grenzen des planerischen Risikos. Bei der Bemessung von Erdrutschschutzkonstruktionen oder Bauwerken, die durch Erdfallereignisse beansprucht werden können, ist die „gewohnte“ vorschriftengestützte Risikominimierung nicht gleichermaßen möglich, da eine Reihe von fallunterschiedlichen Parametern von entscheidendem Einfluss auf das Bemessungsergebnis sein können. Anstelle des Entwurfs eines regelgerechten Bauwerkes, definiert man Bedingungen für Teilsicherungen und/ oder Vollsicherungen. Erst danach kann man bemessen. Dabei wird immer wieder die Frage aufgeworfen, wie man alle Bautätigkeit im Subrosionsgebiet nach dem Maß der allgemein anerkannten Regel der Technik ausrichten kann, und wenn ja, dann wie?

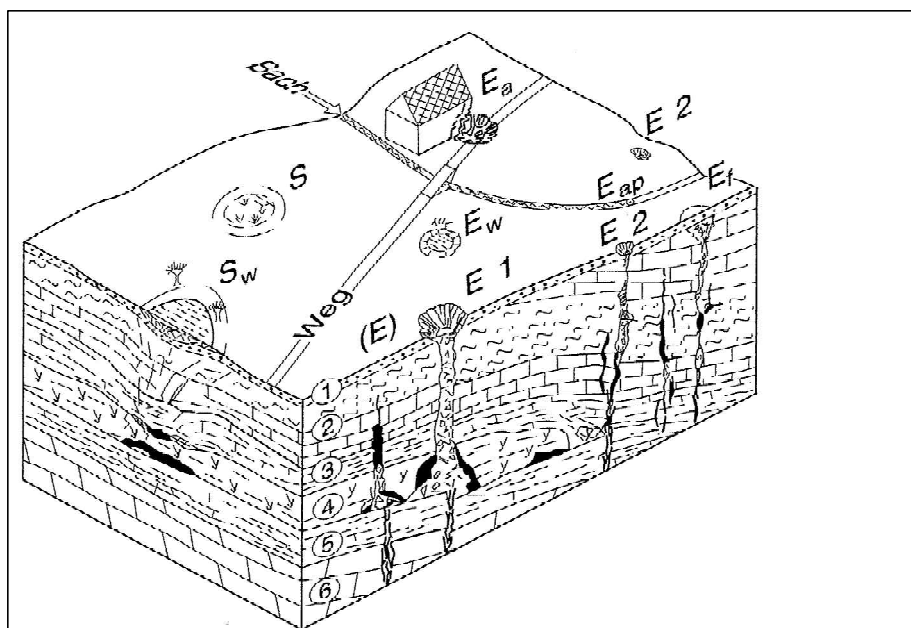


Bild 2: Zitat aus /2/

Abb.1. Blockbild mit schematischer Darstellung der häufigsten Subrosionshohlformen.  
**S-** Senke, **S<sub>w</sub>**- 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<sub>a</sub>** - aktiver Erdfall, der Gebäude und Verkehrsweg schädigt, **E<sub>w</sub>** - Erdfall, wassergefüllt, **E<sub>ap</sub>** - aktiver Erdfall im Bachbett (Bachschwinde, Ponor), **E<sub>r</sub>** - Erdfall, fossil, Subrosion stagniert bzw. ist abgeschlossen, einstige Hohlform natürlich verfüllt und auf Geländeoberfläche nicht mehr sichtbar, **(E)** - Erdfall im Entstehen: Hochbrechen eines Schloßes über Subrosionshohlraum im Gips.  
**Geologischer Untergrund:** ☉ - Lockergestein, ☉ - Karbonatgestein (z. B. fiasrige oder kristalline Kalke des Muschelkalks), ☉ - Wechselfolge Tonstein/ Kalkmergelstein, ☉ - Gipsgestein, ☉ - Tonstein/Kalkmergelstein, ☉ - Dolomit, ☉ - Schwarz- subrosiv entstandene Hohlräume.

Unter dem Begriff „anerkannte Regeln der Technik“ werden technische Regeln beziehungsweise Klauseln verstanden, welche für den Entwurf sowie die Ausführung von Bauwerken relevant sind. Diese Regeln müssen, um als anerkannt zu gelten, folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Sie müssen wissenschaftlich theoretisch als richtig angesehen werden
- Sie müssen in der Praxis technischen Experten bekannt sein
- Sie müssen sich aufgrund praktischer Erfahrung bewährt haben

Für die anerkannten Regeln der Technik gibt es kein Regelwerk, in dem sie alle zusammengefasst dargestellt werden. Vielmehr treten sie in verschiedenen Gebieten auf und haben in den einzelnen Rechtsbereichen unterschiedliche Bedeutungen. Beschrieben sind die anerkannten Regeln der Technik unter anderem in

- DIN-Normen
- Nationalen und/ oder internationalen/europäischen Codes und Richtlinien
- Unfallverhütungsvorschriften; u .v. m

**Allgemein anerkannte Regeln der Technik** sind Regeln, welche sowohl die Voraussetzungen für „Stand der Wissenschaft und Technik“ als auch „Stand der Technik“ erfüllen und sich zudem über einen ausreichend langen Zeitraum bewährt haben. Dabei ist zu beachten, dass als die wichtigste Eigenschaft der anerkannten Regeln der Technik ihre **lange Bewährung** ist, wobei es keinen festgelegten Zeitraum gibt, der für die Erfüllung dieser Langzeitbewährung notwendig ist.

Der heutige Stand beim Bauen im Subrosionsgebiet gestattet es, in diesem selektiven Gebiet der Bautätigkeit sowohl für die Grundlagen liefernden Geowissenschaften als auch für die im Bauwerksentwurf maßgebenden bautechnischen Disziplinen ein Regelwerk (also allgemein anerkanntes) aufzustellen, das es ermöglicht, in einem gefügten Rahmen Bauwerke zu planen, zu errichten und zu unterhalten.

## 2. Das Geotechnische Risiko

Für bautechnische Belange wird die Festlegung der räumlichen Verteilung der akuten Erdfallgebiete durch die geologischen Landesämter vorgenommen. Grundlage sind statistische Erhebungen und Datensammlungen über bekannte, kartierte Erdfälle, die dann, wie im Falle von Thüringen, in ein Subrosionskataster übertragen werden. Im Ergebnis spezieller geologischer Kartierungen können Regionen ausgehalten werden, für die unterschiedliche Gebietsmerkmale gelten, die konkret eine bautechnische Konsequenz zumindest in qualitativer Hinsicht darstellen oder beschreiben:

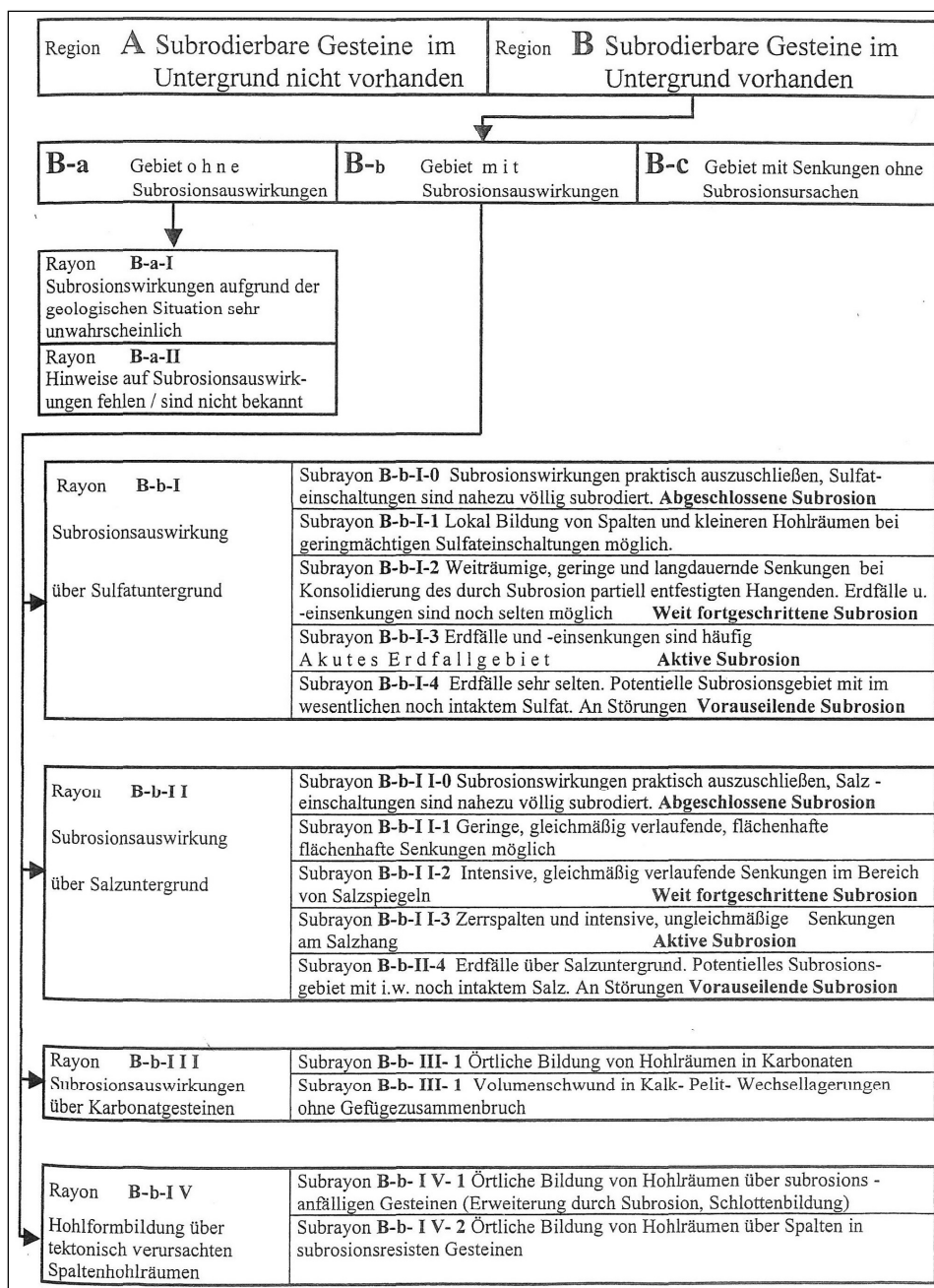
In Abhängigkeit von der Intensität, des Subrosionsprozesses, der Häufigkeit von Erdfällen, die an die Oberfläche durchschlagen, ihrer räumlichen Ausdehnung, statistischer Erhebungen usw. werden Merkmale unterteilt bzw. kartiert, die praktisch unterschiedlich riskante Gebiete abgrenzen.

Ein Beispiel der Erhebungen für die Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter Erdfalldurchmesser ist aus /1/ entnommen, Bild 3, und zeigt, wie man in bestimmten Gebieten zu den für die Planung entscheidenden Informationen über das geometrische Ausmaß von Erdeinbrüchen an der Tagesoberfläche zu „belastbaren“ Aussagen kommen kann.

<b>Tabelle 4-2:</b> Anfangsdurchmesser von subrosionsbedingten Erdfällen im südlichen Niedersachsen nach Büchner (1996)		<b>Tabelle 4-3:</b> Anfangsdurchmesser von subrosionsbedingten Erdfällen in Sachsen-Anhalt nach Büchner (1996)	
Anfangsdurchmesser [m]	Häufigkeit [%]	Anfangsdurchmesser [m]	Häufigkeit [%]
< 2,0	50	< 1,0	25
2,1 – 4,0	30	1,1 -3,0	55
4,1 – 6,0	12	3,1 – 5,0	10
6,1 – 8,0	6	5,1 -10,0	8
8,1 – 10,0	1,5	>10	2
> 10	0,5		

**Bild 3:** Zitat aus dem Merkblatt *Straßenbau in Erdfallgebieten / 1/*

Von der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie TLUG wurde ein Schema für ingenieurgeologische Homogenbereiche des Subrosionskatasters entwickelt, das eine Unterteilung nach den Lösungsformen der Gesteine vorschlägt; Bild 4; (Dr. Biewald, TLUG). Außerdem sind hierin auch Hohlformen über tektonisch verursachte Spaltenhöhlräume enthalten.



**Bild 4:** Schema ingenieurgeologische Homogenbereiche des Subrosionskatasters der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie TLUG; (Dr. Biewald, TLUG)

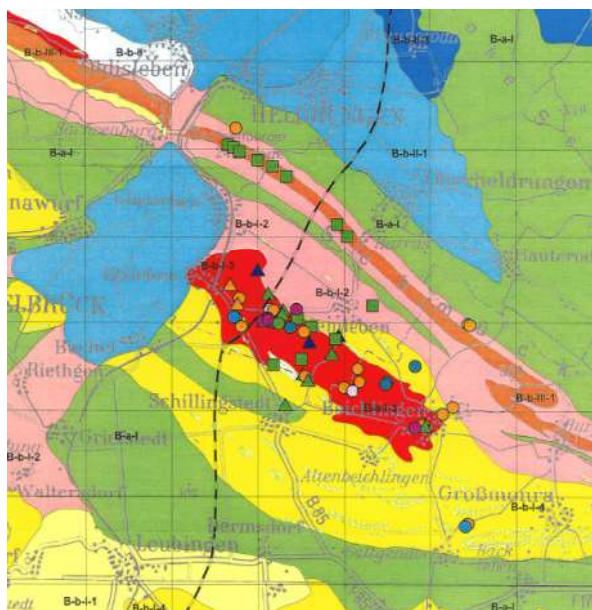
Das Merkmal *akutes Erdfallgebiet* (Rayon B-b-I-3) beschreibt dabei Gebiete, in denen Erdfälle häufig vorkommen sowie aktuell und voraussichtlich innerhalb der Nutzungsdauer des Bauwerkes auftreten können. Die Abgrenzung der akuten Erdfallgebiete ist subjektiver Natur und kann nur so gut sein wie die Datengrundlage.

Bild 5 zeigt den Auszug aus einer Subrosionsgefährdungskarte mit Subrosionsobjekten, woraus sehr anschaulich die Abgrenzung des Rayon B-b-I-3 zu erkennen ist, vgl. Bild 4 + 5.

Es wird dabei angenommen, dass z.B. im *akuten Erdfallgebiet* gebaut werden kann, wenn Schutzkonstruktionen vorgesehen werden. In den Gebieten mit weniger hohem Status kann dennoch nicht generell ohne Schutzkonstruktion gebaut werden. Hier muss, wenn es sich um ein

Subrosionsgebiet handelt, geotechnisch bewertet werden, welche Auswirkungen auf ein Bauwerk zu berücksichtigen sind.

Für Bauherren wie für den planenden Fachmann ist dabei von großer Bedeutung, dass auch aus hoheitlicher Sicht (z.B. Geologische Landesämter) eine Verknüpfung mit den geologischen Phänomenen und einer Risikoeinschätzung vorgenommen wird. Dafür eignet sich die Einteilung in Risikoklassen /1/ oder Gefährdungsklassen /2/, die das geologische Umfeld mit den bautechnischen Konsequenzen verbindet.



**Bild 5:** Auszug aus einer Subrosionsgefährdungskarte in Thüringen mit Subrosionsobjekten

Risikoklasse	Geotechnisches Schadensbild	Einschätzung der Dauerstandsicherheit	Empfohlene Maßnahmen
I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erdfall</li> <li>- größere Deformation an der Tagesoberfläche, z.B. Spaltenbildung, Senkung</li> <li>- aktiver untertägiger Verbruchprozess</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr geringe und geringe Dauerstandfestigkeit des Gebirges</li> <li>- akute Erdfallgefährdung</li> <li>- akute Gefährdung der öffentlichen Sicherheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sofortsicherung umgehend erforderlich</li> <li>- dringender Handlungsbedarf für dauerhafte Sicherungsmaßnahmen oder Sanierungsarbeiten</li> <li>- Nutzungseinschränkung oder Sperrung der Tagesoberfläche notwendig</li> </ul>
II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Erdfall</li> <li>- Deformation an der Tagesoberfläche, z. B. Spaltenbildung, Senkung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geringe Dauerstandfestigkeit des Gebirges</li> <li>- hohe Erdfallgefährdung (zulässige Grenzdeckgebirgsmächtigkeit wird deutlich überschritten)</li> <li>- hohe Gefährdung der öffentlichen Sicherheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sofortsicherung umgehend erforderlich</li> <li>- Handlungsbedarf für dauerhafte Sicherungsmaßnahmen oder Sanierungsarbeiten</li> <li>- Nutzungseinschränkung oder Sperrung der Tagesoberfläche notwendig</li> </ul>
III	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stabilisierte, ältere Verbruch- und Deformationszonen an der Tagesoberfläche</li> <li>- keine oder nur geringfügige Gebirgsauflockerung an der Hohlraumkontur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mittel- und langfristig ist eine Schwächung der Dauerstandfestigkeit gegeben</li> <li>- Erdfall oder/und Deformationen sind nicht unmittelbar zu erwarten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- periodische Kontrollen werden empfohlen (monatlich bis jährlich)</li> <li>- mittel und langfristig sind Untersuchungs- und Sanierungsarbeiten vorzusehen</li> </ul>
IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- keine Verbrüche und Deformationen an der Tagesoberfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dauerstandsicherheit des Hohlraumes ist gegeben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- periodische Kontrollen in größeren Intervallen werden in Einzelfällen empfohlen</li> </ul>

**Bild 6:** Zitat aus /1/ Risikoklassen

Beispielgebend wird in /1/ eine Einteilung in 4 Risikoklassen vorgeschlagen, Bild 6. Dabei geht es einerseits um die Bewertung von Risiken, die zu beachten sind, wenn Erdfälle an bestehenden Bauwerken eintreten, aber auch um eine allgemeine Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit für Bauwerke.

Eine deutlich stärker auf den phänomenologischen Aspekt und das Bauwerk ausgerichtete Risikoeinstufung ist in der Richtlinie von Thüringen, IEBC, aus 2006 enthalten, die in Bild 7 zitiert wird, /2/. Hier wird die Einstufung in Gefahrenklassen in Abhängigkeit von der geologischen Standortdisposition,

von der diskreten Anzahl von dokumentierten Erdfällen und von der Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeit neuer Erdfälle vorgenommen.

Eine Anpassung solcher Einteilungen ist gebietsbezogen aus regionalgeologischen Erkenntnissen möglich. Sie sollte als hoheitlicher Akt von den Gebietskörperschaften in dieser oder einer modifizierten Form geschaffen werden, denn sie regelt das Handeln oder den Zwang zum Handeln. Ob man sich dabei auf 4 oder 5 Risikostufen verständigt, ist dabei weniger von Belang, entscheidend ist der Umstand, dass daraus vor allem im regulären Planungsprozess zu erkennen ist, wann gehandelt werden muss.

Gefährdungsklasse	AZ: Anzahl der dokumentierten Subrosionshöhlenformen EW: Eintrittswahrscheinlichkeit neuer Erdfälle	Mögliche Subrosionsauswirkungen	Mögliche Beanspruchung des Bauwerkes durch Subrosionsauswirkungen	Bautechnische Sicherungsmaßnahmen
0 Im Untergrund kein subrodierbares Gebirge. Die Entstehung von Subrosionshöhlenformen ist auszuschließen.	AZ: keine EW: keine	keine	keine	keine
1 Sulfat- bzw. Salzeinschlüssen im Untergrund überlagert von mächtigen, ungestörten Festgesteinen (Zechstein, Rot, Mittl. Keuper) bzw. karbonatische Festgesteine in ungestörter Lagerung. (Muschelkalk) [Voraussetzungen zur Subrosion fehlen.]	AZ: bisher sind keine Erdfälle bekannt EW: Es besteht praktisch keine Erdfallgefahr mit Minimaler Risiko	keine	keine	keine

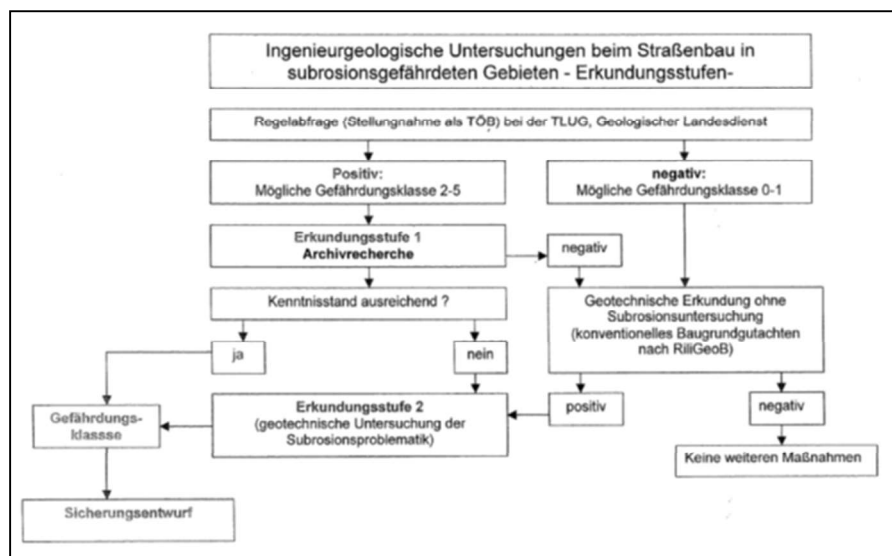
2 Sulfat- bzw. Salzeinschlüssen im Untergrund überlagert von mächtigen, wenig gestörten Festgesteinen (Zechstein, Rot, Mittl. Keuper) bzw. karbonatische Festgesteine in wenig gestörter Lagerung. (Muschelkalk)	AZ: bislang nur einzelne Erdfälle (Solitärereignisse) EW: kaum wahrscheinlich, geringe Einbruchgefahr	Erdfälle bzw. Einsenkungen geringer Dimension, setzungsempfindliche Lockergesteinsfüllungen fossiler Hohlformen.	zu berücksichtigen	Gegebenenfalls Teilsicherung
3 Sulfat- bzw. Salzeinschlüssen im Untergrund überlagert von weniger mächtigen, z. T. gestörten Festgesteinen (Zechstein, Rot, Mittl. Keuper) bzw. karbonatische Festgesteine in wenig gestörter Lagerung. (Muschelkalk)	AZ: mehrere Erdfälle mit geringem Durchmesser unregelmäßig verstreut. (risikolose Ereignisfolge) EW: wenig wahrscheinlich, mittlere Einbruchgefahr	Erdfälle, Einsenkungen, grabenartige Zerspalten, setzungsempfindliche Lockergesteinsfüllungen fossiler Hohlformen. (vorwiegend $\sigma$ bzw. $B < 3$ m)	relevant	Teilsicherung

4 Sulfat- bzw. Salzeinschlüssen im Untergrund überlagert von weniger mächtigen, z. T. gestörten Festgesteinen (Zechstein, Rot, Mittl. Keuper) bzw. karbonatische Festgesteine in wenig gestörter Lagerung. (Muschelkalk)	AZ: mehrere Erdfälle in unregelmäßigen Abständen bzw. in Gruppen oder linear angeordnet. (mittlere Ereignisfolge) EW: wahrscheinlich, mittlere Einbruchgefahr	Erdfälle, Einsenkungen, grabenartige Zerspalten, setzungsempfindliche Lockergesteinsfüllungen fossiler Hohlformen ( $\sigma$ bzw. $B > 3$ m und $< 5$ m)	erheblich	Teilsicherung, gegebenenfalls Vollversicherung
5 Sulfat- bzw. Salzeinschlüssen im Untergrund überlagert von weniger mächtigen, gestörten Festgesteinen (Zechstein, Rot, Mittl. Keuper) bzw. karbonatische Festgesteine in gestörter Lagerung. (Muschelkalk)	AZ: zahlreiche z. T. junge Erdfälle in Gruppen bzw. linear angeordnet. Dauerhafte erkennbare Hohlformen EW: Eintritt mit höherer Wahrscheinlichkeit zu erwarten, stark Einbruchgefahr	Erdfälle, Einsenkungen, grabenartige Zerspalten, setzungsempfindliche Lockergesteinsfüllungen fossiler Hohlformen, partiell tektonisch verfestigter Untergrund ( $\sigma$ bzw. $B \geq T, S \geq 0$ m)	hinweis- und beratend gefährdend	Vollversicherung, gegebenenfalls Empfehlung zum Nutzungsverbot

**Bild 7:** Zitat aus /2/: Gefährdungsklassen gemäß IEBB, Thüringen

Die Bewertung/Festlegung der Risikoklasse/ Gefährdungsklasse muss auf intensiver geologischer Beurteilung der Gebiete vorgenommen werden. Die geologischen Grundlagen, auch die statistischen

Erhebungen sind dabei von entscheidender Bedeutung für die richtungsweisenden Empfehlungen bei der Einstufung von konkreten Bauflächen.



**Bild 8:** Zitat aus /2/: Entscheidungsmatrix auf der Ebene der geotechnischen Grundlagen bis zum Sicherungsbauwerk

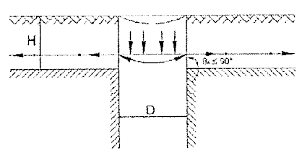
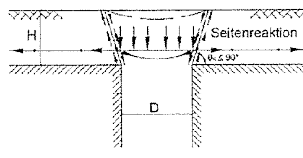
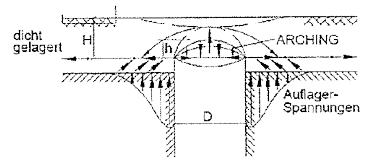
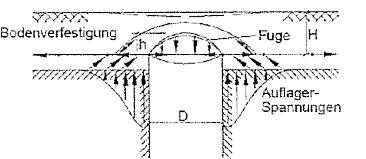
Die Thüringer Richtlinie /2/ liefert in der Praxis durch konsequente Bearbeitung sehr brauchbare Ergebnisse, die der Bewertung konkreter Daten ein größeres Gewicht gegenüber subjektivem Entscheiden einräumt. Sie regelt dadurch einen sinnvollen und fachlich fundierten Entscheidungsprozess bis zum Sicherungsbauwerk entsprechend Bild 8.

Eine entscheidende Tatsache macht das Bauen im Subrosionsgebiet anders als im normalen Baugrund. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der „unerwünschten Ereignisse“, das mögliche Schadensausmaß und die Definition des Grenzzrisikos können sich **zeitlich verändern**; /1/. Die zeitliche Veränderung kann zu einer Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit durch fortschreitende Subrosion führen und zwar sowohl durch die natürlichen geologischen Prozesse als auch durch Änderung der Nutzung der Tagesoberfläche (z.B. die Änderung der Ableitung von Oberflächenwasser).

Diese zeitliche Dimension hat in der Regel zur Folge, dass man für eine fertig geplante Schutzkonstruktion die Frage stellen muss, wie sich diese verhalten wird, wenn sich die Annahmen der Planung ändern. Dies ist ein ungewöhnlicher Vorgang in einem Planungsprozess ! Um in der konkreten Bauwerksplanung die Abwägung von Risiken sachlich zu ordnen, wurde für starre Schutzkonstruktionen (Betonplatten) eine Bemessungsprozedur entwickelt, die es so bei „normalen“ Bauwerken nicht gibt; siehe dazu weiter unten im Abschnitt 5.

Für Schutzkonstruktionen mit Geokunststoffen gibt es ähnliche Modelle, die in der EBGeo /10/ vorgestellt werden; Bild 9.



Einbruch-Modell	
ohne Seitenreaktion	mit Seitenreaktion
nichtbindiger Boden vollständiger Bruch volle Auflast auf Membran $H/D < 1$	nichtbindiger Boden vollständiger Bruch teilweise Lastabtrag über Seitenreaktion reduzierte Auflast auf Membran $1 < H/D < 3$
	
Bild 1a)	Bild 1b)
Gewölbmodell	
zeitabhängig begrenzte Auflast	dauerhaft begrenzte Auflast
nichtbindiger Boden mit hoher Lagerungsdichte zeitlich verzögerter Hochbruch zeitabhängig begrenzte Auflast auf Membran $H/D > 3$	verfestigter Boden dauerhaft begrenzter Hochbruch dauerhaft begrenzte Auflast auf Membran $H/D$ beliebig
	
Bild 2a)	Bild 2b)

**Bild 9:** Zitat aus /4/: Berechnungsmodelle mit unterschiedlichen Bettungsbedingungen am Rand des Erdfalls

Wirkungen bzw. Erschwernissen... führen kann, **obwohl** derjenige, der den Baugrund zur Verfügung stellt, seiner Verpflichtung zur Untersuchung und Beschreibung der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse nach den Regeln der Technik zuvor vollständig nachgekommen ist und obwohl der Bauausführende seiner eigenen Prüfungs- und Hinweispflicht Genüge getan hat“ und kann hier nicht unmittelbar angewandt oder muss modifiziert werden an die Belange der „unklaren/variablen“ Grundlagen.

Die Definition des Baugrundrisikos in der DIN 4020 (2003) lässt sich leichter in einem intakten/homogenen oder quasihomogenen geologischen Körper anwenden. Im Subrosionsgebirge kommt der Umstand hinzu, dass faktisch bekannt ist, dass zwischen den direkten Aufschlüssen planmäßig Inhomogenitäten in Form rezenter oder fossiler Erdfallstrukturen auftreten können, siehe Bild 2. Es gibt keine anerkannte Regel für die Baugrunduntersuchung im Subrosionsgebirge. Der Geotechniker wird in Zusammenwirken mit dem Bauherren ein ingenieurgeologisch- wirtschaftlich abgestimmtes Untersuchungsprogramm aufstellen müssen. Wie groß dabei das „unvermeidliche Restrisiko“ verbleibt, ist dabei fallweise im akuten Erdfallgebiet trotz intensiver Erkundung immer noch ungewiss. Bild 10 und 11 zeigen Erdfälle bei einem Bauvorhaben an der BAB A38 in Deutschland, die während des Bauens im unmittelbaren Bereich einer Stützkonstruktion sichtbar wurden bzw. durchgebrochen

Das Bauen im Subrosionsgebiet ist kurz zusammengefasst voller Risiken, die nicht immer qualitativ und quantitativ definiert werden und die auch noch einer zeitlichen Veränderung unterliegen können. Dennoch besteht die Notwendigkeit Bauwerke auch dort zu planen und zu errichten. Es wichtig, sich dabei über das geotechnische Risiko oder Baugrundrisiko im Klaren zu sein.

Die Risikodefinition der DIN 4020 (2003) lautet: „Das Baugrundrisiko ist ein in der Natur der Sache liegendes, unvermeidbares Restrisiko, das bei Inanspruchnahme des Baugrunds zu unvorhersehbaren

sind. Einzelne Erdfallstrukturen hatten Abstände zueinander von wenigen Metern bzw. überlagerten sich. In der Planung sind aber sich überlagernde Erdfälle als isolierter Bemessungsansatz nicht betrachtet worden. So können sich real im Bauprozess die Grundlagen ändern!



**Bild 10:** verfüllter Erdfall am Stützbauwerk BAB A38

Dennoch sollte das bewährte Leitbild der Definition des Baugrundrisikos in der o.g. Fassung aus der DIN 4020 auch auf das Bauen im Subrosionsgebirge angewandt werden. Entscheidend ist die Betrachtung der „OBWOHL-Bedingung“: *derjenige, der den Baugrund zur Verfügung stellt, seiner Verpflichtung zur Untersuchung und Beschreibung der Baugrund- und Grundwasserverhältnisse nach den Regeln der Technik zuvor vollständig nachgekommen ist... .*



**Bild 11:** „Frischer“ Erdfall auf Böschung am Stützbauwerk BAB A38A

Für Bauwerke sind unter Verwendung aller verfügbaren Ingenieurkenntnisse und vorliegender praktischer Erfahrungen Konstruktionen zu entwerfen, die zum Schutz vor ggf. katastrophalen Auswirkungen von Geländeeinbrüchen unter den Bedingungen des regulären Betriebs weitestgehend intakt und nutzbar bleiben.

Das Problem besteht hierbei in zweifacher Hinsicht:

- Einerseits gibt es keine anerkannten Regeln der Technik für die geotechnische Untersuchung des Untergrundes und die daraus resultierende Ableitung bzw. Definition eines verbindlichen Durchmessers eines Erdeinbruches.
- Andererseits gibt es auch für den Entwurf und die Bemessung von Erdfallschutzkonstruktionen keine oder nur wenige verbindliche Vorschriften oder normative Bemessungsregeln.

#### Geotechnische Untersuchungen:

Für die akuten Erdfallgebiete werden im günstigsten Falle Durchmesser und Häufigkeit von Erdeinbrüchen angegeben, aber ihr Zutreffen ist starken Streuungen unterworfen.

Dennoch, heute steht ein umfangreiches Spektrum von direkten und indirekten Erkundungstechniken (Bohrungen, Sondierungen, Geophysik) zur Verfügung, die es gestatten, ein konkretes Objekt komplex zu untersuchen. Die wirtschaftliche Dimension derartiger Untersuchungen wird oft größer sein als im „normalen“ Baugrund.

Die nach DIN 4020 geltenden Erkundungsregeln berücksichtigen denjenigen Tiefenbereich von Untersuchungen, in dem sich die Bauwerkspannungen im Untergrund ausbreiten, so dass die Setzungen (Gebrauchstauglichkeit) des Bauwerkes richtig abgeschätzt werden. Diese Regel muss im Subrosionsgebiet neu gefasst werden.

Die modifizierte Regel kann lauten, dass der qualifizierte Geotechniker, der mit einem konkreten Objekt betraut ist, fallbezogen und nach geologischer Recherche ein Untersuchungsprogramm festlegt, das hinsichtlich Art und Umfang der Untersuchungen (Art, Anzahl, Abstand und Tiefe der direkten und indirekten Aufschlüsse) geeignet ist, um den subrosionsbeeinflussten geologischen Körper zu untersuchen. Im Detail kann dieses Programm deutlich von Erkundungsregeln der DIN 4020 abweichen. Ein solcher Ansatz wird definitionsgemäß an der gezielten und systematischen Minimierung des Baugrundrisikos mitwirken.

Zusätzlich wird der Bereich der *Geotechnischen Grundlagen* flankiert durch verschiedene Richtlinien, Merkblätter und Handlungsempfehlungen, die es dem Geotechniker ermöglichen, die Ergebnisse der Untersuchungen in Richtung konkreter Aussagen für das zu planende Bauwerk auszuwerten („Handlungsempfehlungen zur ingenieurgeologischen Erkundung und bautechnischen Beherrschung von Subrosionserscheinungen bei Straßenbauvorhaben für den Dienstaufsichtsbereich des Landesamtes für Bau und Verkehr Thüringen“ /2/, „Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Geokunststoffen zur Sicherung bruchgefährdeter Straßenbereiche in Altbergbau- und Subrosionsgebieten für den Dienstaufsichtsbereich des Landesamtes für Straßenbau Sachsen-Anhalt“ /3/, „Merkblatt über Straßenbau in Erdfallgebieten“ /1/ ).

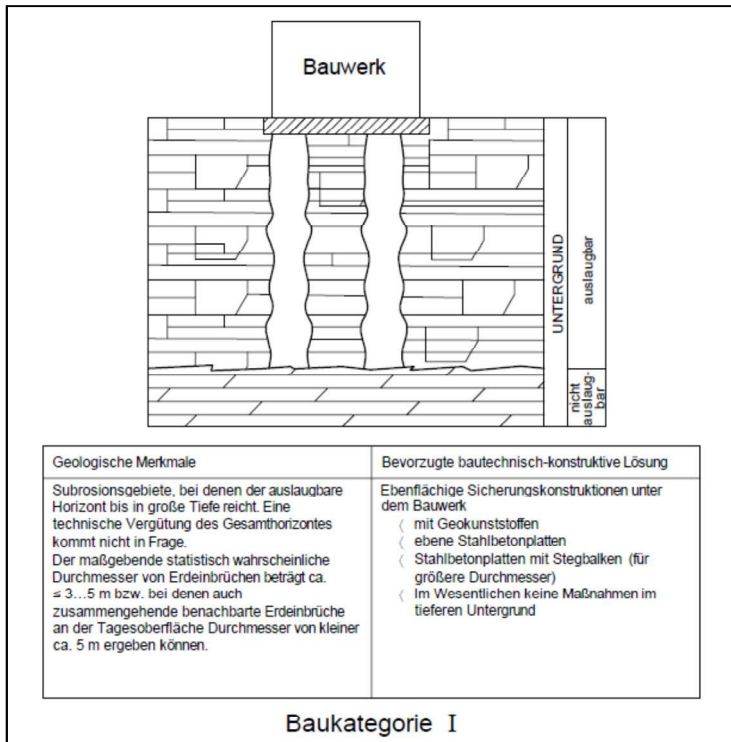
Wichtig sind natürlich auch die aus vorausgegangenen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse methodischer Art.

#### Entwurf und Bemessung:

Wichtige Anhaltspunkte liefern die in den EBGEO (2010) im Abschnitt 11 „Überbrückung von Erdeinbrüchen“ /4/ dargelegten allgemeinen Entwurfsgrundsätze. Für die Schutzkonstruktionen mit Geokunststoffen hat sich mit diesem Regelwerk eine inzwischen auch schon fortgeschriebene *Vorschrift* etabliert, die sich im allgemeinen Gebrauch befindet und in den Kreisen der betroffenen Fachleute akzeptiert ist.

Für Schutzkonstruktionen aus Stahlbeton müssen die Bemessungsregeln und –algorithmen (z.B. „Systemphasen“ siehe Pkt. 5) für solche Bauwerke fallbezogen unter Zugrundelegung der verbindlichen Vorschriften wie DIN EN 1991-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC: 2010; DIN EN 1992: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Deutsche Fassung EN 1992; DIN EN 1997-1: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik- Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC: 2009 aufgestellt werden.

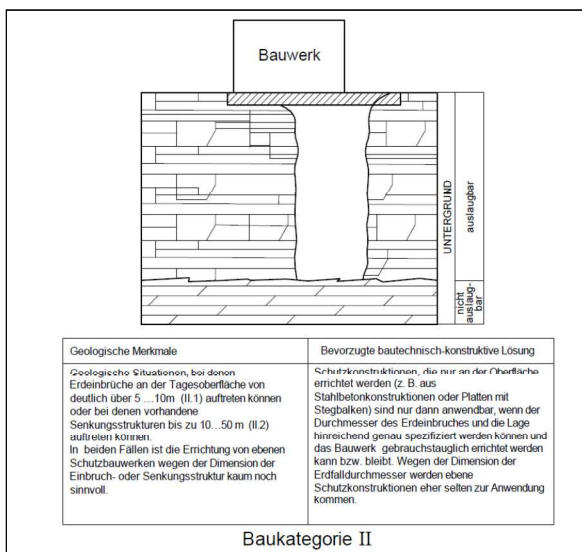
### 3. Bauwerkskategorien im Subrosionsgebiet



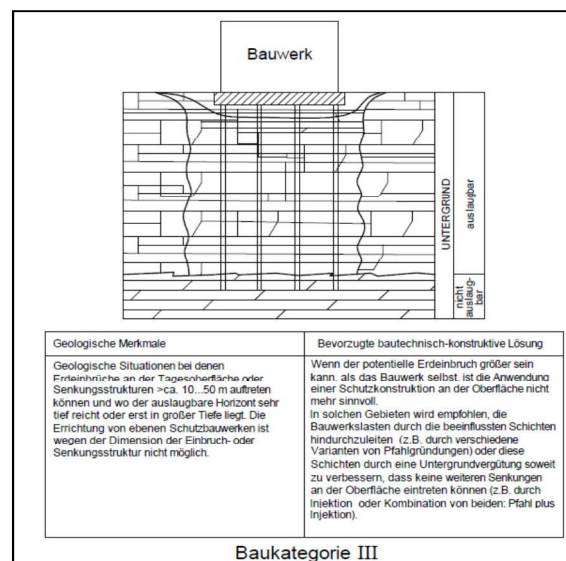
**Bild 12: Baukategorie I**

Im akuten Erdfallgebiet werden bei den Gefährdungsklassen 2 bis 5 nach IEBB, Bild 7, bauliche Maßnahmen für die Verstärkung /Sicherung der Gründungen gefordert.

Dabei kann man nach dem Befund einer großen Anzahl von ausgeführten Maßnahmen eine Einteilung der technischen Möglichkeiten in 5 Baukategorien vornehmen. Diese sind in den Bildern 12/13/14/15/16 zusammen mit den potenziellen baulichen Maßnahmen dargestellt. Dabei werden die Baukategorien III und V weitestgehend die Bedingungen der Vollsicherung erfüllen, während die anderen Baukategorien eher als Teilsicherung anzusehen sind.



**Bild 13: Baukategorie II**



**Bild 14: Baukategorie III**

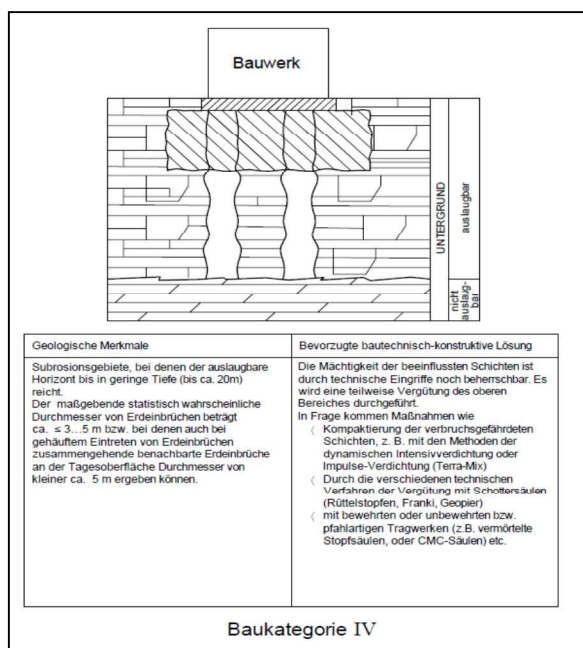


Bild 15: Baukategorie IV

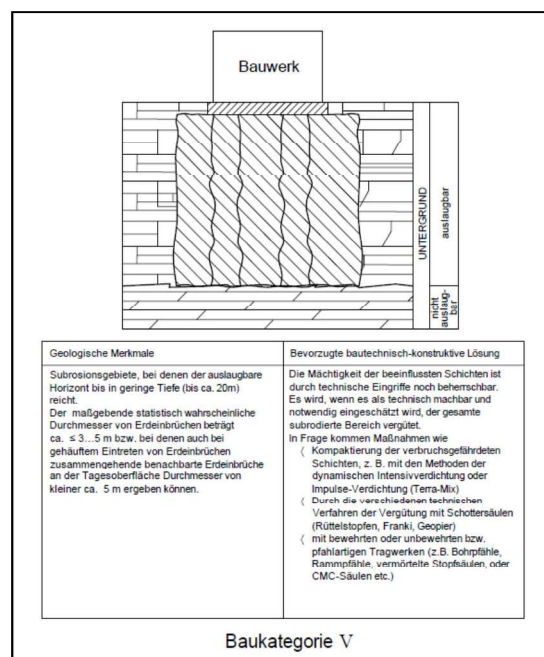


Bild 16: Baukategorie V

#### 4. Das Planerische Risiko bei Entwurf und Bemessung

Generell soll der Grundsatz verfolgt werden, dass gebrauchstaugliche und dauerhafte Bauwerke geplant werden. Dieser Grundsatz ist unter dem Aspekt der zeitlichen Veränderlichkeit oder der Nichtmöglichkeit der Erfassung der Struktur des geologischen Raumes im Subrosionsgebiet nicht immer eindeutig beherrschbar. Darüber muss Klarheit bestehen.

Im Abschnitt 11.2.1 EBGEO (2010) werden die Begriffe **Vollsicherung** und **Teilsicherung** verwendet. Eine verkürzte Definition der Begriffe soll hier dargelegt werden:

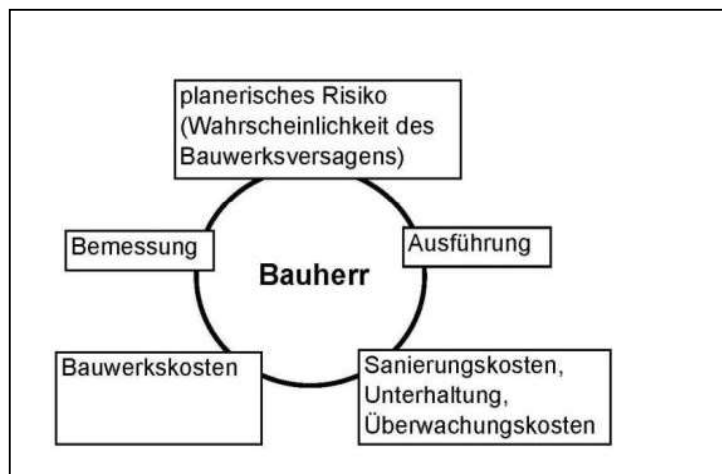
**Vollsicherung:** Das Bauwerk unterliegt in diesem Zustand keinerlei Nutzungseinschränkungen, wenn der für dieses Gebiet definierte Bemessungserdfall eintritt. Das Tragwerk muss den Erdfall überbrücken, ohne dass Verformungen/ Deformationen auftreten, welche den planmäßigen Status der Gebrauchstauglichkeit herabsetzen würden. Der Erdfall bleibt in diesem Zustand i. d. R. unerkannt. Eine zeitabhängige Formänderung des Erdfalls wird ignoriert. Eine Sanierung ist deshalb nicht geplant.

**Teilsicherung:** Das Bauwerk ist -bei bewusst in Kauf genommenen Nutzungseinschränkungen- in vollem Umfang stand- und tragsicher. Das Tragwerk überbrückt den Bemessungserdfall oder auch Erdfälle größeren Ausmaßes als im Vollsicherungszustand. Verformungen werden bis zu einem definierten Grenzwert bewusst zugelassen, damit sie ggf. rein visuell und/ oder mittels messtechnischer Beobachtungsmethoden lokalisiert werden können. Die Konstruktion verformt sich, geht aber nicht zu Bruch. Die weitere Nutzung ist mit Einschränkungen

(Verkehrssicherungsmaßnahmen) möglich. Im Einbruchsbereich sind Sanierungsmaßnahmen einzuleiten.

Im Sinne des geotechnischen Risikos gibt es faktisch keine Vollsicherung in den Baukategorien I, II und IV. Die Kategorien III und V sind dagegen praktisch Vollsicherungen. Sprachlich gilt diese Definition der Voll-/ Teilsicherung als Bemessungszustand. Das ergibt sich daraus, dass sich der Bemessungserdfall (z.B. Durchmesser = 3 m) nach seinem realen Auftreten allmählich aufweiten kann oder sich mit einem weiteren Erdfall vereinigt.

Die Vollsicherung ist demnach nur ein vorübergehender Zustand. Die zeitliche Dauer des Übergangs



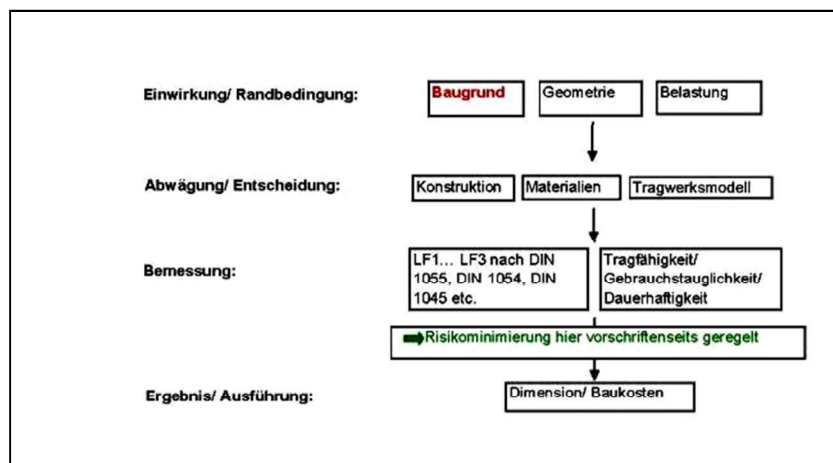
von einer Voll- in die Teilsicherung (z.B. das Anwachsen des Durchmessers von 3 m bis 5 m) wiederum ist von einer Reihe von Faktoren abhängig und kann Jahre/ Jahrzehnte betragen. Das gilt gleichsam für den Übergang vom Teilsicherungszustand in den Versagenszustand des Bauwerkes; hier geht man jedoch i. d. R. von einem Zeitfenster von wenigen Wochen/ Monaten aus.

**Bild 17:** Der Bauherr im Spannungsfeld der Erdfallproblematik

Es gilt also auch grundsätzlich abzuwägen, ob ein Bauwerk für *beide* Zustände oder allein für den Voll-/oder Teilsicherungszustand konzipiert werden kann/ muss. Das Spannungsfeld, in dem sich der Bauherr bei Behandlung der Erdfallproblematik bewegt, ist in Bild 17 dargestellt. Die Bemessung eines Erdfallschutzbauwerks erfordert hinsichtlich der Behandlung des planerischen Risikos eine vollkommen andere Vorgehensweise als die Bemessung eines Standard- Bauwerks.

**Standard- Bauwerk -gemäß Rayon Bal/Ball in Bild 18 oder im nicht subrodierten Gebirge**

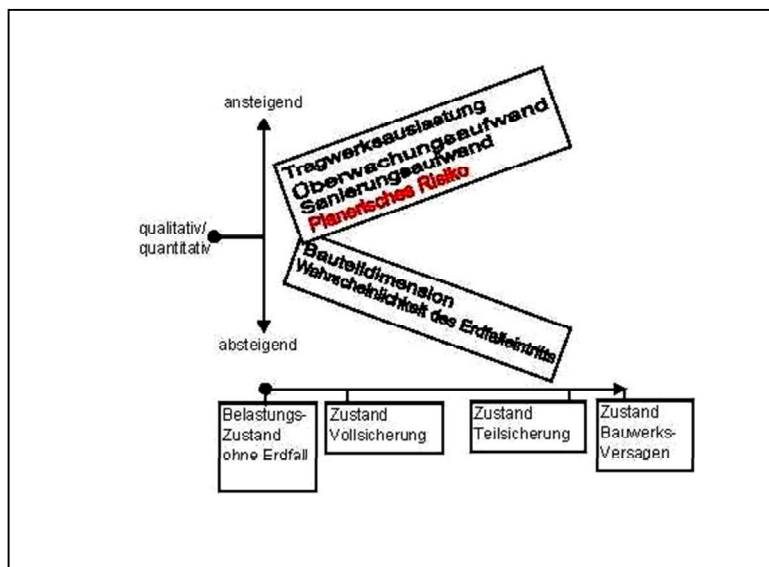
Das Risiko für das Bauwerk bzw. die Wahrscheinlichkeit des Bauwerksversagens (und damit das



planerische Risiko) wird bei strikter Anwendung der EUROCODES minimiert. Die einzige Einflussgröße im Bemessungsprozess auf die Unterschiedlichkeit der Bemessungsergebnisse ist dabei die Auswahl/ Untersuchung des maßgebenden Lastfalls.

**Bild 18:** Prozesse bei der Bemessung eines -14 -  
Standard- Bauwerks

Durch das Einfließen von sich mit zunehmendem Lastfall vermindern den Teilsicherheitsbeiwerten wird die Wahrscheinlichkeit/ Häufigkeit des Lastfalleintritts jedoch so gewichtet, dass jede herkömmliche/mögliche Situation bemessungsseitig abgedeckt wird. Situationsbedingt kann somit jeder der Lastfälle 1 bis 3 maßgebend sein, das planerische Risiko wird durch vorschriftengestützte Untersuchung aller Lastfälle und Regulierung mittels der Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände quasi automatisch ausgeschaltet. Was den Baugrund als Bauraum betrifft, gilt hier die oben zitierte Risikodefinition der DIN 4020 (2003) uneingeschränkt.



**Bild 19:** Einflussparameter bei der Erdfallbemessung

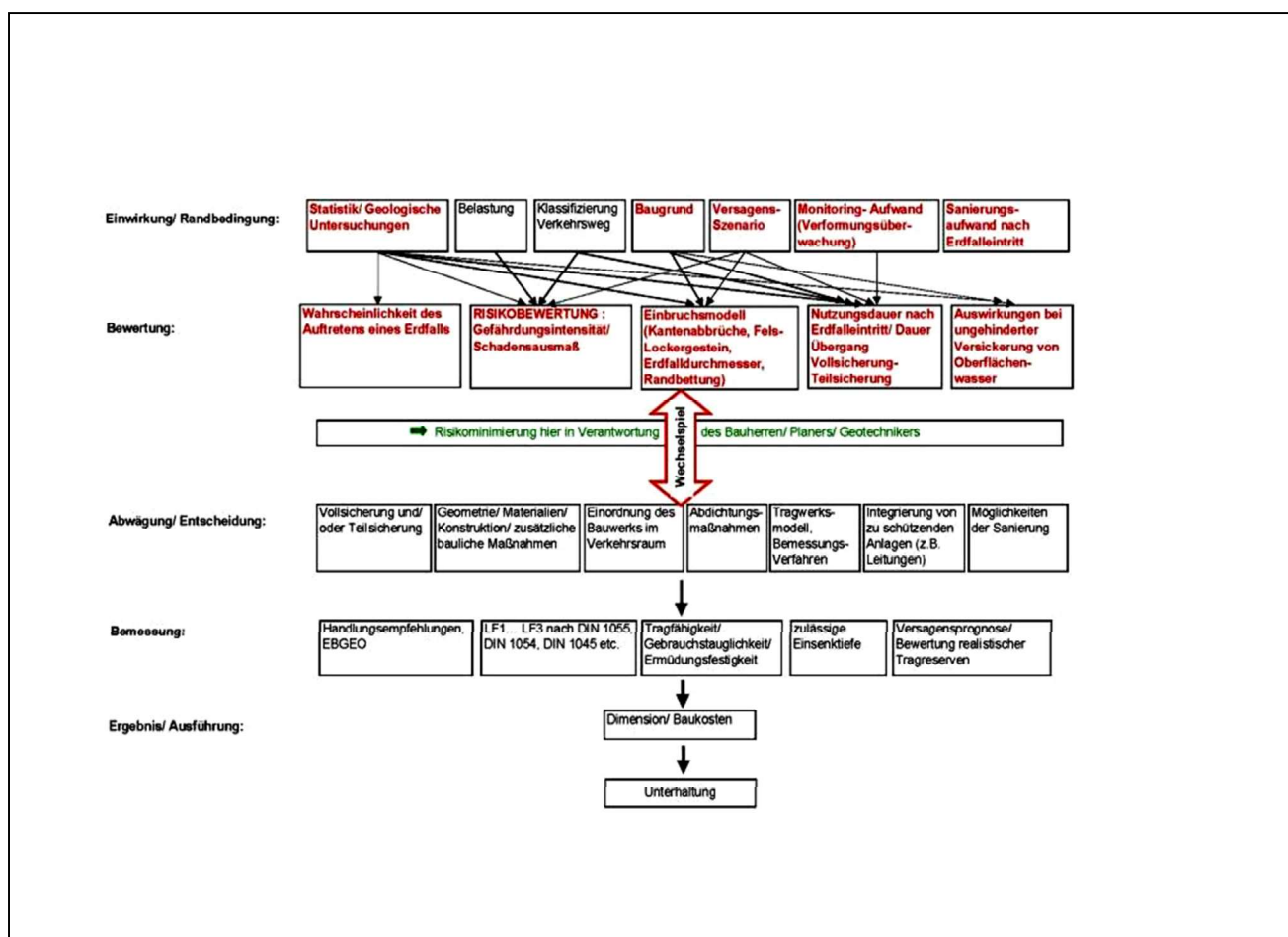
**Situation im Subrosionsgebirge:**

**Erdfallschutzbauwerk:**

Bei der Bemessung von Erdfallschutzbauwerken oder Bauwerken, die durch Erdfallereignisse beansprucht werden können, erfolgt keine weitgehend vorschriftengestützte Risikominimierung, da eine Reihe von fallunterschiedlichen Parametern von entscheidendem Einfluss auf das

Bemessungsergebnis sind, siehe Bild 19.

Bei den Erdrück-Schutzkonstruktionen ist die Lastfallauswahl keine entscheidende Einflussgröße. Vielmehr ist die Bemessung im Kontext verschiedener Einflussparameter durchzuführen, deren Art und Größe zwangsläufig Ergebnissen/Vorgaben eines Bewertungs-, Abwägungs- und Entscheidungsprozesses sind (siehe Bild 20). Die Risikominimierung liegt hier größtenteils in Verantwortung des Bauherren und Planers.



**Bild 20:** Prozesse bei der Bemessung eines Erdfallschutzbauwerkes

Ein fester Bestandteil der Planungsprozesse ist die Betrachtung des „Untergangs des Bauwerkes“, ein Vorgang, der beim normalen Bauwerk eher unbekannt ist. Aber hier führt die Diskussion über die Funktion und den Gebrauch der Schutzkonstruktion immer zwangsläufig auch zur Erörterung der Inanspruchnahme des Bauwerkes jenseits der Bemessungsgrenzen, d.h. bei größeren als den angenommenen geometrischen Randbedingungen. Diese Erörterung betrifft auch die Fragen nach den Möglichkeiten der Sanierung und wie hoch die Kosten des Unterhaltungsaufwandes sein werden. Bei all diesen Fragen ist eine Vorgehensweise nach der Entscheidungsmatrix in Bild 20 sinnvoll und wird auch so praktiziert.

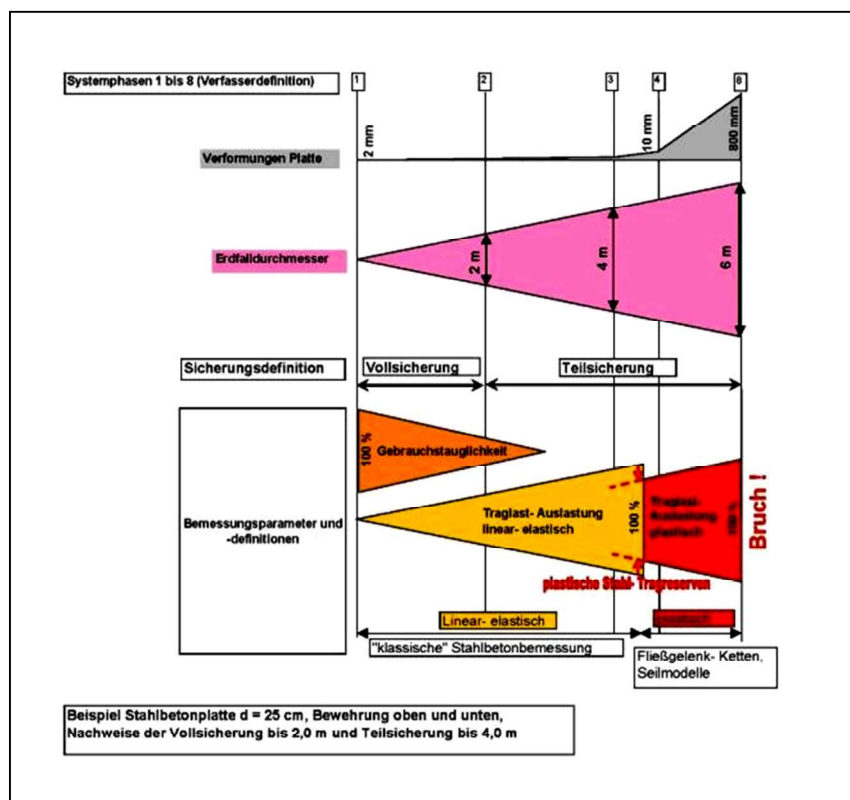
Eine Modifikation dieses Planungsablaufschemas ist in Bild 21 dargestellt. Hier wurde für ein Bauvorhaben mit Schutzkonstruktion aus ebener Stahlbetonplatte in der Baukategorie I eine Entscheidungsmatrix entwickelt, die von einem maßgebenden Erdfalldurchmesser von 2 m ausgeht, der rechnerisch bis auf eine Aufweitung auf 4 m Durchmesser untersucht werden sollte. Hier wurden in einem ausgedehnten Bemessungsprozess insgesamt 8 Systemphasen der Schutzkonstruktion untersucht und bewertet. Wichtig ist dabei, dass man auch für Stahlbetonkonstruktionen die Tragreserven jenseits des linear-elastischen Verhaltens des deformierten Systems untersucht.



Solche Untersuchungen sind Bestandteil der Abwägung von Risiken derartiger Konstruktionen. Sie sind meist auch mit einem erhöhten Planungsaufwand verbunden. Die Details der einzelnen Systemphasen werden im Abschnitt 5 behandelt.

Diese Bemessungs-/ Planungsprozeduren können anhaltweise auf viele Bauwerke übertragen werden, jedoch wird es – das zeigt die Erfahrung mit solchen Bauwerken- auch immer wieder zur

Entwicklung neuer Ablaufschemata kommen, wenn dies die Analyse der Einflussmerkmale erfordert. Um darzulegen, wie umfangreich und detailliert Planungsabläufe bei Erdfallschutzkonstruktionen sein können, soll anschließend die Untersuchung einer ebenen Stahlbetonplatte dargelegt werden. Bild 21: Systemphasen, Parameter und Definitionen bei Bemessung einer Stahlbetonplatte



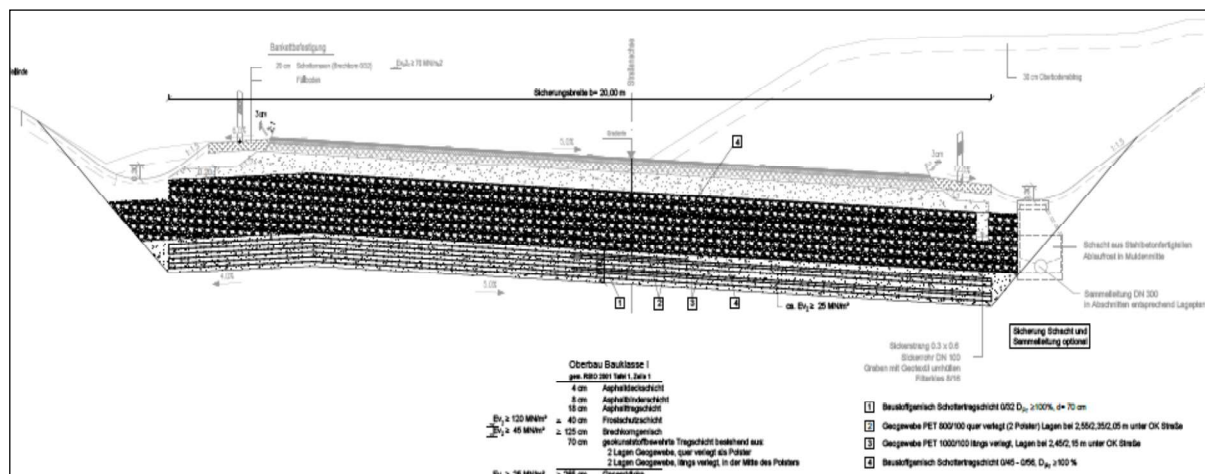
**Bild 21:** Bemessung in Systemphasen

## 5. Schutzkonstruktion mit ebener Stahlbetonplatte und Bemessungsprozeduren

Beispielhaft wird hier ein konkretes Bauvorhaben als Grundlage herangezogen. Im Untergrund des Planungsabschnittes einer Ortsumfahrung in Thüringen stehen **Ton-/Schluff- und Sandsteine, lokal auch Dolomite** der geologischen Formationen Zechstein und Unterer Buntsandstein an. Die Zechsteinschichten enthalten bzw. enthielten in Tiefen ab ca. 17 m ... > 50 m unter Gelände Salzgesteine, welche in der Vergangenheit in unterschiedlichem Grade der Auslaugung unterlagen und ggf. weiterhin unterliegen könnten. Eine potenzielle Gefährdung hinsichtlich der Bildung von Erdfällen o. ä. bestand in der Trasse in zwei Teilabschnitten. Nach der Baugrunduntersuchung wurde in Zusammenarbeit mit der zuständigen Landesanstalt für Geologie zwischen den Projektbeteiligten abgestimmt, dass in diesen zwei Abschnitten **Teilsicherungsmaßnahmen** in Form einer bewehrten Betonplatte vorzusehen sind. Dabei wurde nach Abwägung aller Informationen für die Planung ein Erdfalldurchmesser von 4 m festgelegt. In den sonstigen Abschnitten wurde einvernehmlich auf konstruktive Sicherungsmaßnahmen verzichtet.

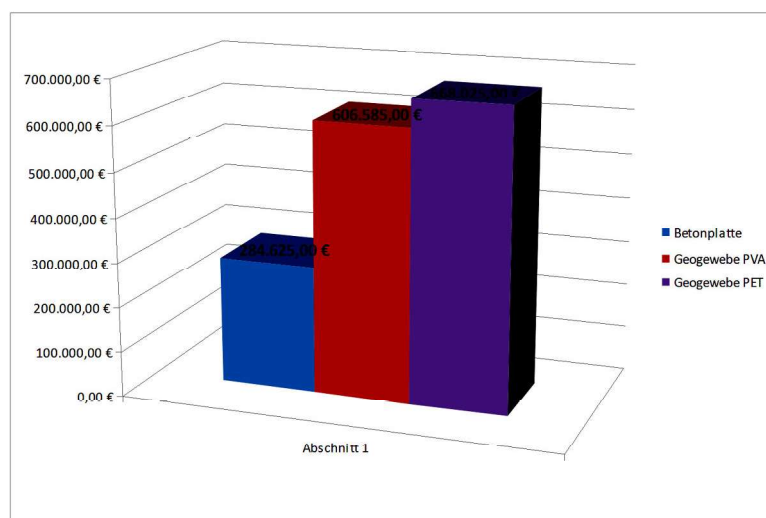
Grundsätzlich war nach der Entscheidung, dass Schutzkonstruktionen errichtet werden sollen, eine Einteilung in die Baukategorie I die Folge. Maßnahmen der Untergrundvergütung schieden aufgrund der Tiefenverhältnisse aus. Insofern gab es nur noch die Abwägung zwischen den ebenen Bauwerkstypen der Betonplatte und der Lösung mit Geokunststoffen nach EBGEO.

Der Bauherr hat gemäß dem Schema in Bild 20 zunächst ein Abwägungsprozess begonnen, der zu einer bevorzugten Lösung führen sollte. Im Rahmen einer Vorplanung wurden die beiden Varianten der Schutzkonstruktionen untersucht. Entscheidend ist dabei die Lage der Gradiente für die Wirtschaftlichkeit der technischen Lösung.



**Bild 22:** Querschnitt mit Schutzkonstruktion aus Geogittern

Bei den Lösungen mit Geogittern ist die Wirksamkeit der Bewehrung davon abhängig, wie hoch das Paket mit den Bewehrungslagen überschüttet wird. In dem untersuchten Querschnitt musste daher die Aushubsohle tiefer geführt werden, damit die Mineraltragschichten über der Bewehrung eingebaut werden konnten, Bild 22. Außerdem wurde der wirtschaftliche Effekt der Art der Bewehrung (PVA-Gitter oder PET Gewebe) untersucht, Bild 23.

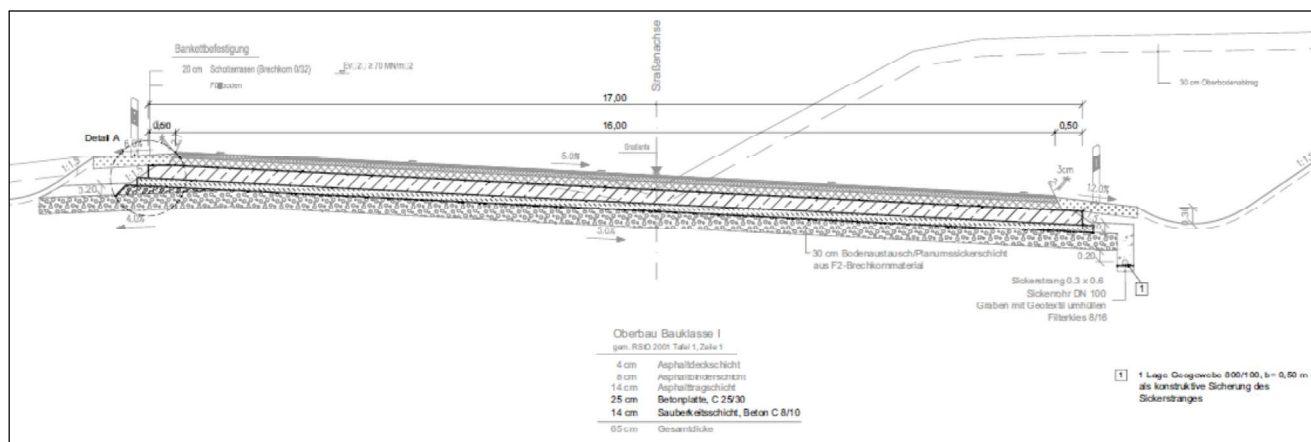


**Bild 23:** Kostenvergleich Betonplatte mit Geokunststoff.- Lösungen

rasch in Richtung Betonplatte, wie beispielhaft das Diagramm im Bild 23 zeigt.

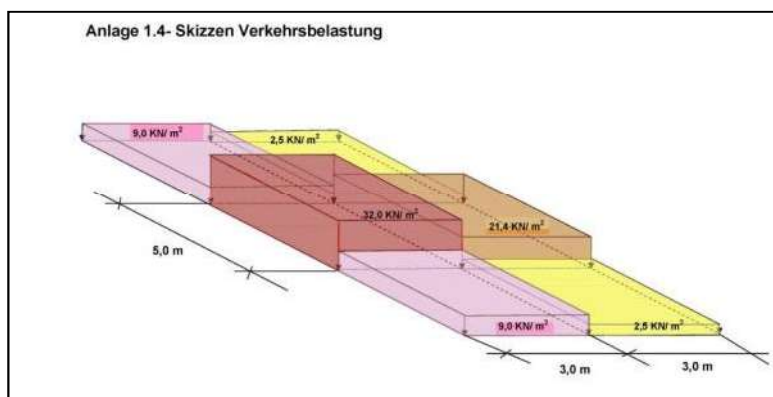
Dabei zeigte sich eine Tendenz, die sich bei vielen Projekten abgezeichnet hatte. Die Geogitter-Konstruktionen sind immer dann sehr effektiv, wenn sie ohne Zusatzmaßnahmen in einen Damm integriert werden können. Diese Bedingung ist i.d.R. bei Bauvorhaben in Einschnittslage (wie im untersuchten Fall) nicht erfüllt. Wenn die Geogitter „eingegraben“ werden müssen, weist der wirtschaftliche Effekt

Am Ende der Vorplanung wurde sichtbar, dass sich die weitere Planung mit der Stahlbetonplatte befassen wird, so wie sie im Bild 24 dargestellt ist.

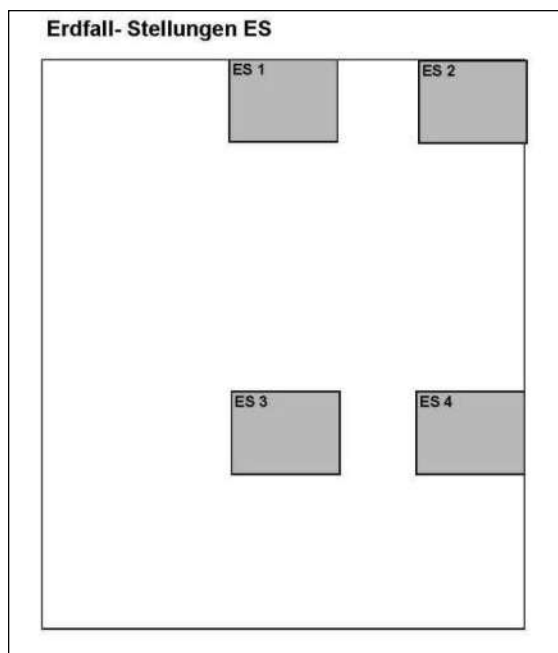
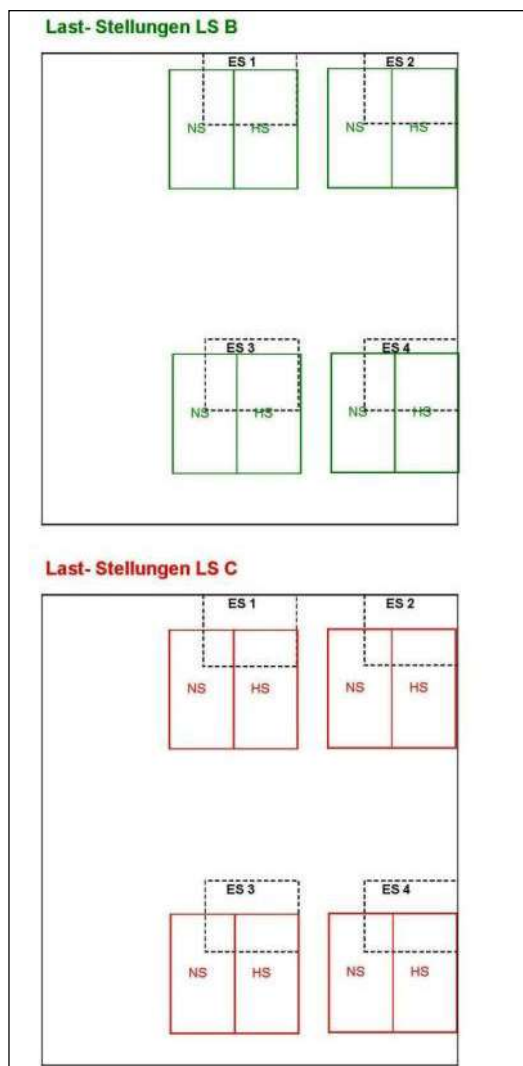


**Bild 24:** Querschnitt mit ebener Betonplatte

Das Baugrundgutachten hatte darauf hingewiesen, dass Senkungsvorgänge/ Erdrinbrüche bis zu einem Durchmesser von ca. 10 m auftreten können, obwohl der Bemessungserdfall nach intensiver Abwägung auf 4 m festgelegt wurde. Der Bauherr hat von vornherein bestimmt, dass nur bis zum Durchmesser 2 m eine Schutzkonstruktion als Vollsicherung wirken soll und bis zum Bemessungserdfall von 4 m eine Teilsicherung erwartet wird, die noch den Bemessungsbedingungen linear-elastischen Verhaltens gehorcht. Für potentiell weitergehende Ereignisse (noch größere Durchmesser) sollte in der Planung dargestellt werden, wie sich das Bauwerk verhalten wird.



**Bild 26:** Verkehrsbelastung auf der Platte



**Bild 25:** Beispiel für Erdfall-Stellungen gleichzeitig wirkender Erdfälle

**Bild 27:** Verschiedene Kombinationen von ES und LS

Der Bauherr muss seine Erwartungen an das Bauwerk klar definieren, denn ein allzeit gebrauchstaugliches Werk kann billigerweise nicht zwingend erwartet werden (Baukategorie I !!). Außerdem entsteht in diesem Prozess ein klar definiertes vertragliches Soll, sowohl für den Planer als auch später für den Bauunternehmer.

Ausgehend von den Vorgaben aus der Geotechnischen Grundlagenermittlung werden unterschiedliche Erdfallstellungen ES entworfen, die in der Bemessung der Schutzplatte modelliert werden; beispielhaft in Bild 25. Die Erdfallstellungen ES werden mit Laststellungen LS kombiniert, siehe Bild 25/26/27. Dadurch wird statisch und geometrisch untersucht, wie sich die Platte bei unterschiedlichen Kombinationen von Verkehrslast, Bild 26, und bei variabler Lage der Erdenbrüche unter der Platte verhält, Bild 27.

Auch aus diesem Ansatz kann eine Bemessungsregel abgeleitet werden, wonach die Kombination von Erdfall-Stellungen und Last-Stellungen untersucht werden muss. Ausgehend von diesen geometrischen Grundlagen müssen bei der Bemessung der Tragfähigkeit und der Verformung definierte Systemphasen unterschieden werden. Einen ähnlichen Vorgang gibt es bei den Geokunststoff-Konstruktionen. Es heißt dort: „Hochwandern“, /4/. Allerdings sieht die EBGEO /4/ eine Untersuchung in Systemphasen, wie diese hier, nicht vor. Alle Systemphasen sind in Bild 28

zusammengestellt. Dieselbe Prozedur muss analog für die Plattenränder und (falls erforderlich) die Plattenstöße (Bild 30!) durchgeführt werden.

### *Systemphase 1*

Systemphase 1 ist die Phase, wo noch kein Erdfall eingetreten ist. Das Tragsystem muss allen Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit gerecht werden. Die Bemessung der Bewehrung erfolgt in der Bemessungssituation BS-P (früher Lastfall 1).

Die Bemessung in Plattenmitte und am Plattenrand erfolgt linear- elastisch auf Grundlage der Gleichgewichtsbedingungen Betondruckkraft/ Stahlzugkraft.

### *Systemphase 2*

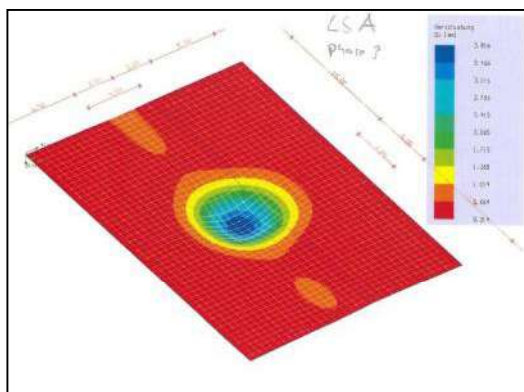
Systemphase 2 ist die Phase, wo ein Erdfall eingetreten ist, welcher kleiner als der Bemessungserdfall (hier 4,0 m) ist. Eine Verformungsberechnung und Bemessung erfolgt hier nicht, weil die Bewehrung in den nachfolgenden Systemphasen berechnet wird. Die Verformungen werden als Mittelwert zwischen Phase 1 und 3 abgeschätzt.

### *Systemphase 3*

Systemphase 3 ist die Phase, wo der Bemessungserdfall (hier 4,0 m) eingetreten ist. Der Zustand der Teilsicherung muss genau jetzt nachgewiesen werden. Die Tragfähigkeit des Systems muss gewährleistet sein; die weitere Befahrung darf nicht zum Versagen der Platte führen. Der Querschnitt ist zunächst noch ungeschwächt anzusetzen. Es beginnt aber ein Prozess, welcher unter

Systemphase 4 beschrieben wird. Mit Beginn dieses Prozesses sind die Verformungen in Feldmitte und Plattenrand noch nicht eindeutig wahrnehmbar.

Die Bemessung und Verformungsermittlung erfolgt linear- elastisch auf Grundlage der Gleichgewichtsbedingungen Betondruckkraft/ Stahlzugkraft, Bild 29.



**Bild 29:** Plattenverformung in Phase 3 im Feld

### *Systemphase 4*

Systemphase 4 ist die Phase, bei welcher eine fortschreitende Querschnittsverminderung durch Überbeanspruchung des Betons in den Zugzonen eingesetzt hat. Der Querschnitt wird in der Berechnung und Bemessung somit im Bereich über dem Erdfall reduziert. Dieser Prozess setzt sich in der nächsten Phase fort. Die Tragfähigkeit des Systems muss gewährleistet sein; die weitere Befahrung darf nicht zum Versagen der Platte führen. Die Verformungen sind bereits wahrnehmbar. Die Bemessung und Ermittlung der Verformungen erfolgt auf Grundlage der Gleichgewichtsbedingungen Betondruckkraft/ Stahlzugkraft im reduzierten Querschnitt. Allerdings wird

bereits jetzt der Bewehrungsstahl im Fließbereich ausgenutzt ( $f_{td} = 540 \text{ N/mm}^2$  bei Grenzdehnung 17 ‰), so dass bei den Verformungsberechnungen ein verminderten E-Modul für den Bewehrungsstahl angesetzt wird.

### **Systemphase 5**

Systemphase 5 ist die Phase, bei welcher die Querschnittsverminderung fortgeschritten ist.

Der Querschnitt ist nun nicht mehr nur über dem Erdfall, sondern auch im Bereich der verminderten Bettung reduziert. Die weitere Befahrung hat dafür gesorgt, dass der Rand des Erdfalls (dieser selbst bleibt bei 4,0 m) durch Ausbrüche geschwächt ist, was durch eine Bettungsverminderung simuliert wird.

Diese Prozesse setzen sich in der nächsten Phase fort. Die Tragfähigkeit des Systems muss gewährleistet sein; die weitere Befahrung darf nicht zum Versagen der Platte führen. Die Verformungen sind nun **deutlich wahrnehmbar**. Die Bemessung in Plattenmitte erfolgt auf Grundlage der Gleichgewichtsbedingungen Betondruckkraft/ Stahlzugkraft im reduzierten Querschnitt. Es wird der Bewehrungsstahl im Fließbereich ausgenutzt ( $f_{td} = 540 \text{ N/mm}^2$  bei Grenzdehnung 17 ‰), so dass bei den Verformungsberechnungen ein verminderten E-Modul für den Bewehrungsstahl angesetzt wird.

### *Systemphase 6*

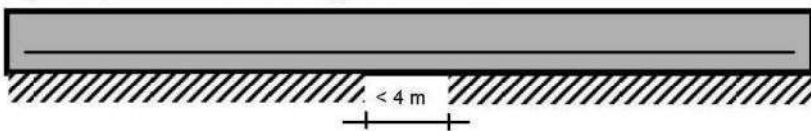
Systemphase 6 ist die Phase, bei welcher die Querschnittsverminderung noch weiter fortgeschritten ist. Der Querschnitt wird noch stärker in einem größer ausgedehnten Bereich (hier z.B. 10 m \* 10 m) reduziert, auch der E-Modul des Bewehrungsstahls. Auch hat sich die Bettung in diesem ausgedehnten Bereich vermindert. Der Erdfall hat immer noch den Durchmesser 4 m. Die Systemphase 6 erbringt Verformungen in Plattenmitte, die den vorgegebenen Grenzbereichen entsprechen. Der Verformungsnachweis für die Teilsicherung ist somit erbracht. Der Plattenrand dürfte in Phase 6 deutlich eingebrochen sein; die Straße ist nun im Randbereich -offensichtlich und mehr als deutlich wahrnehmbar - nicht mehr befahrbar.

Eine Bemessung für die Randbereiche ist daher in der Regel nicht mehr erforderlich.

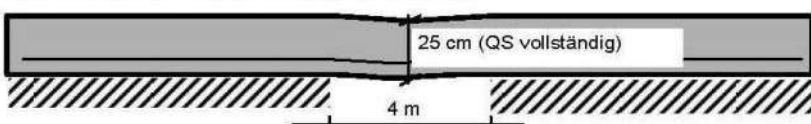
**Systemphase 1:** Verformungen bis 1,5 mm



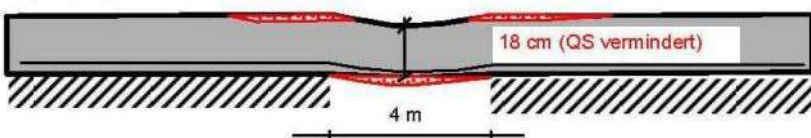
**Systemphase 2:** Verformungen 2 ... 5 mm



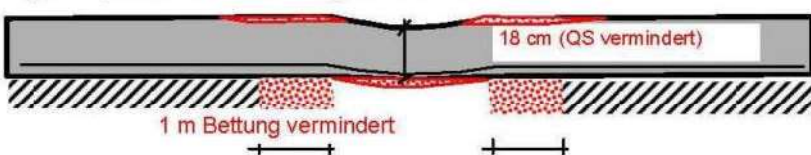
**Systemphase 3:** Verformungen 4...5 mm



**Systemphase 4:** Verformungen 8 ...9 mm



**Systemphase 5:** Verformungen 21 ...28 mm



**Systemphase 6:** Verformungen 43 ... 45 mm

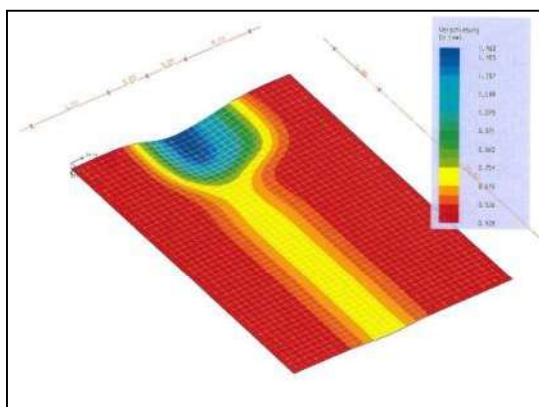


**Systemphase 7:** Verformungen 380 mm



**Bild 28:** Systemphasen

### Systemphasen 7 und 8 (Abschätzung des Verhaltens bis zum Bruchzustand)



Die Systemphasen 7 und 8 sind rein theoretische Verformungsprognosen, deren Eintreten nur in Plattenmitte betrachtet wird (der Plattenrand ist hier bereits deutlich verformt und das Anschlussgelände eingebrochen). In Phase 7 trägt der Stahlquerschnitt wie in Phase 6 allein, weil sich der Beton nicht mehr am Tragverhalten beteiligen kann. Allerdings ist hier die Zugfestigkeitsgrenze des Stahls mit 17 %<sub>0</sub> erreicht (Ende der Verfestigung, Beginn der Einschnürung).

**Bild 30:** Verformungen am Plattenrand

Diese Dehnung ergibt (z. B. bei Berechnung nach Seiltheorie) sehr große Durchbiegungen (hier z. B. 40 cm). Hier müsste aber immer noch gefahren werden, um die Verformungen zu vergrößern; es ist also offensichtlich, dass die Phase 7 aufgrund der sehr großen Einmuldung praktisch nicht mehr relevant ist.

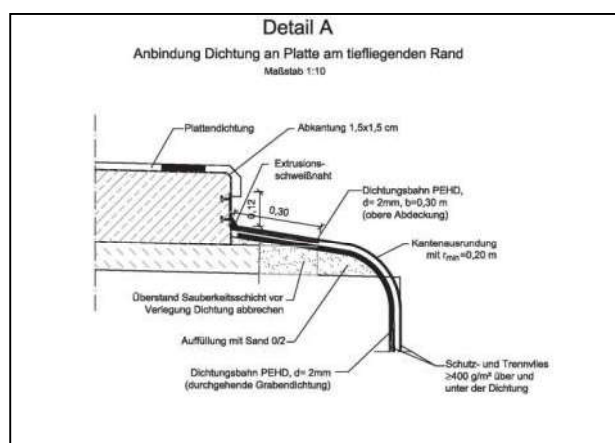
#### Phase 8:

Hier ist die Bruchdehnung mit 50 %<sub>0</sub> erreicht; die Verformung vergrößert sich weiter bei Berechnung analog Phase 7 (hier z. B. ca. 80 cm !!). Der Erdfalldurchmesser hat sich mittlerweile vergrößert (hier z.B. auf 5 m), denn die Ränder des Erdfalls dürften spätestens jetzt eingebrochen sein und den Durchmesser aufgeweitet haben.

Theoretisch könnte die Platte selbst bis zu dieser großen Verformung befahren werden, ehe der Bruchzustand eintritt, was verkehrstechnisch verhindert werden muss. Es zeigt aber, dass trotz der fortgeschrittenen Zerstörung des Bauwerkes (im Gebrauch !) eine gewollte Redundanz gegeben ist. Aus diesem Grunde kann diese Bemessungsprozedur auch als Muster für eine geregelte Berechnung von Erdfallschutzplatten angesehen werden.

### 6. Besondere Hinweise für die Querschnittsgestaltung bei ebenen Schutzplatten

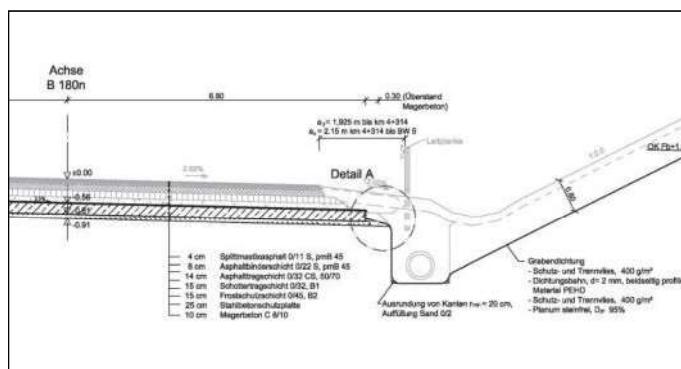
Vor allem bei Verkehrsbauwerken werden große Wassermengen über die Plattenränder abgeführt. Das kann in vielen Fällen zu schädlichen Wirkungen im Untergrund führen. Hinzu kommt, dass bei Einschnittssituationen auch noch Wasser von den angrenzenden Böschungen in den Bereich des Straßenrandes in relevanter Größenordnung einfließen kann.



**Bild 31:** Anschluss einer Dichtungsbahn an den Plattenrand



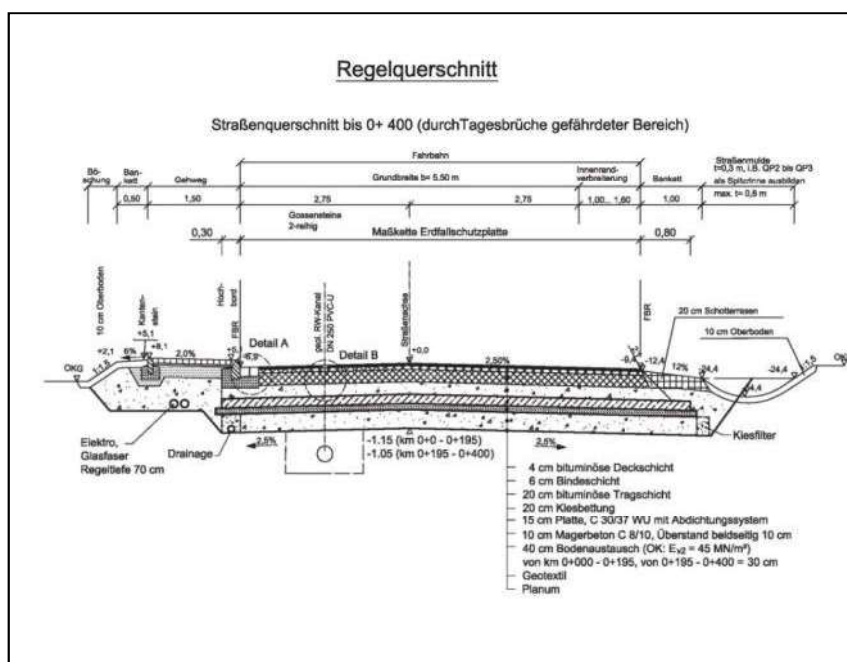
Praktisch bewährt hat sich in diesen Fällen eine Ausbildung des Plattenrandes mit fest angeschlossener Dichtungsbahn gemäß Bild 31 und eine Abdichtung des Randgrabens in der Sohle, die bis in die angrenzenden Böschungen reicht, Bild 32. Die entsprechenden hydraulischen Berechnungen sind dann ohne Berücksichtigung von Versickerungsanteilen für vollen Abfluss vorzunehmen.



**Bild 32:** Ausbildung des Seitengrabens mit Abdichtung

Im Gebrauch hat sich gezeigt, dass sehr große Platten wie diese deutlich auf Temperaturspannungen reagieren werden.

Besser verhalten sich dabei Aufbauten, bei denen zwischen Asphaltoberbau und Schutzplatten eine Schottertragschicht oder Frostschutzschicht eingeschaltet wird, so wie das in einem Beispiel eines anderen Bauvorhabens in Bild 33 gezeigt wird.



**Bild 33:** Ausbildung des Regelquerschnittes mit Entkopplung von Betonplatte und Asphaltoberbau

## 7. Der Aufsteller und Prüfer der Planung

Ein Bauherr sollte vorzugsweise mit Entwurf und Bemessung nur Fachingenieure beauftragen, die die Sparten Geotechnik, Objektplanung und konstruktiven Ingenieurbau in einem Büro vereinen. Spätestens bei der Festlegung der Kriterien für Vollsicherung oder Teilsicherung einer Konstruktion müssen diese Fachkompetenzen zusammenwirken. Die geotechnischen und konstruktiven

Abstimmungen laufen praktisch bis ans Ende der Ausführung parallel. Insofern erhöht eine getrennte Vergabe den Aufwand der Abstimmungen.

Das gilt gleichermaßen für den Prüflingenieur. Bei den im Büro der Autoren behandelten Bauvorhaben wurde mehrfach vorgeschlagen, Prüflingenieure zu beauftragen, die sich schon mit der Materie der Schutzkonstruktionen befasst hatten. Das war hilfreich, da sich dann die Abstimmungen zu den teils komplizierten und ungewöhnlichen Bemessungsschritten erleichtern. Auch ist bei den im konstruktiven Ingenieurbau tätigen Prüflingenieuren nicht in jedem Falle die Materie der Konstruktionen mit Geokunststoffen bekannt. Es sollte daher immer geprüft werden, ob ein Prüflingenieur vorgeschrieben werden kann.

In der deutschen Vergabepaxis wird die Ausführungsplanung von Bauwerken häufig dem Bauunternehmer übertragen. Das ist in vielen Bereichen durchaus gewünscht, da der Bauunternehmer auf diesem Wege Neuerungen auf den Markt trägt und dadurch seine Wettbewerbsfähigkeit verbessert. Bei den Erdfallschutzkonstruktionen ist das jedoch meist nicht wünschenswert, denn das tatsächliche Sicherheitsbedürfnis des Bauherren muss nicht identisch sein mit einem wettbewerbsorientierten „Sparbedürfnis“ des Unternehmers. Soll dem Bauunternehmer der Planer in der Ausführungsphase beigelegt werden, so müssten dafür die Bedingungen genau definiert werden.

Im werksvertraglichen Sinne wird bei diesen besonderen Bauwerken im Kern ein anderer Weg eingeschlagen. Der Bauherr lässt von qualifizierten, ausgewählten Geotechnikern und Planern ein Bauwerk entwerfen, bei dem die Konstruktion oft mit besonderen Bemessungsprozeduren dimensioniert wird. Das erfordert spezielle Kenntnisse des Entwerfers aber auch des Bauherren und der Prüflingenieure. Das Bauwerk entsteht in einer komplexen Abfolge von Grundlagenermittlung, Risikoabwägung und Planung. In solcher Situation sollte der planende Ingenieur von Anfang bis Ende im Auftrag des Bauherren tätig sein, auch für die Ausführungsplanung. Das folgt auch aus dem Fakt, dass es im Zuge der Bauausführung unbedingt einer intensiven fachkundigen geotechnischen und konstruktiven Bauaufsicht/Fachbegleitung bedarf. Wie das Bild 2 anschaulich zeigt, kann es in der Bauausführung immer zu neuen, ergänzenden geologischen Erkenntnissen kommen, die sehr kurzfristig im Kontext mit den Grundlagen des Objektes umgesetzt werden müssen.

Auch dem Bauunternehmer sind im Vertragswerk Grenzen aufzuzeigen. Änderungen der Konstruktion im Wege von Sondervorschlägen und sonstige Bemühungen den Amtsvorschlag „aufzuweichen“, müssen entweder verhindert werden oder die Zulässigkeit muss eindeutig definiert sein.

In Österreich besteht die Möglichkeit, durch ein Fachgutachten der Behörde *Nebenbestimmungen* festzulegen und mit Hilfe einer wasserrechtlichen (geologisch/geotechnischen) Bauaufsicht die Vorgaben durch die Verwaltungsbehörde zu überwachen. Bei Bauwerken der Schadensfolgeklasse CC3 (höchstes Bauwerks- und Baugrundrisiko) kann ein Prüflingenieur *vorgeschrieben* werden (siehe auch OIP RL1 - Richtlinie und EN1990). Dieser Prüflingenieur entspricht im Grunde genommen dem nichtamtlichen Sachverständigen.

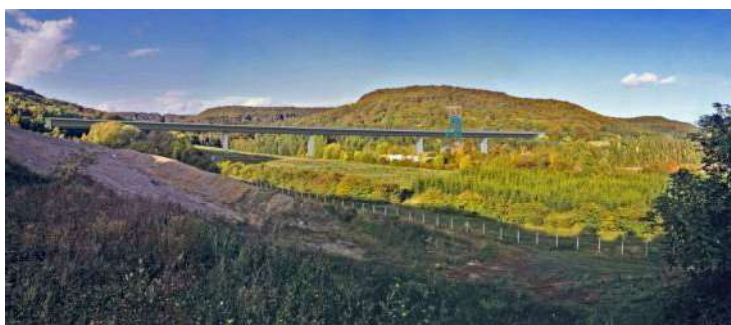
Mit Hilfe der Nebenbestimmungen können neue Erkenntnisse (Erkundungen) im Zuge der Bauarbeiten berücksichtigt werden. Dies gilt zumindest bei den Verfahren außerhalb des UVP-Verfahrens. Das Gewinnen von neuen Erkenntnissen im Zuge der Bauausführung ist Stand der Technik.

Das heißt, der Bauwerber kann sich natürlich seinen Planer und seinen Bauausführenden selbst aussuchen. Dies gilt auch für die Kombination, dass der Bauausführende den befugten Planer beistellt. Das Vertragsrecht lässt diese Kombinationen zu. Aus fachlicher Sicht muss aber sichergestellt sein, dass in allen Phasen der Realisierung eines Objektes der notwendige Sachverstand bei den Baubeteiligten gegeben ist. Zusammengefasst heißt das, die *Nebenbestimmungen* sind nach Vorlage eines detaillierten Projektes so eindeutig zu formulieren, dass die durchzuführenden Arbeiten geklärt sind.

## 8. Ausführungsbeispiele der Entscheidungs- und Bemessungsprozesse

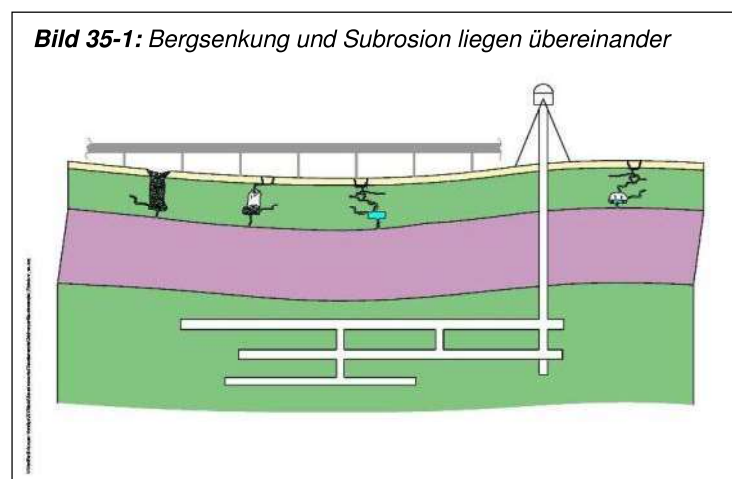
### 8.1 BAB A 38 Bereich Sollstedt in Thüringen

Im Zusammenhang mit der Planung der Bundesautobahn BAB A 38 und einer Talbrücke (Bild 34) deren Standort gleichzeitig im Subrosionsgebirge und im Senkungsgebiet ehemaligen Kalibergbaus

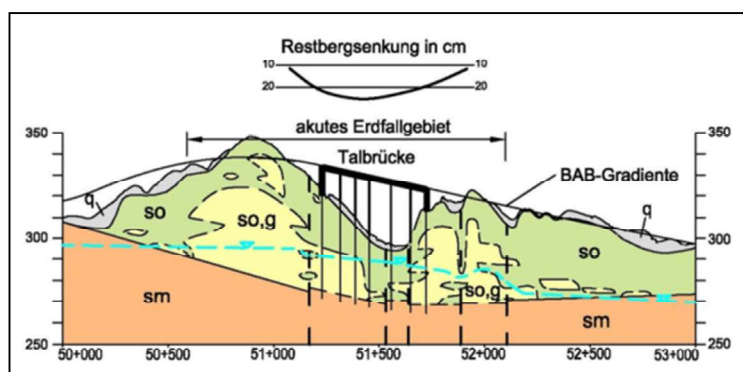


**Bild 34:** Brückenanimation

liegt, musste eine komplexe geotechnische Aufgabenstellung bearbeitet werden; Bild 35-1. Im Untergrund der Brücke streichen Festgesteine des triassischen Tafeldeckgebirges aus, überdeckt von quartären Lockergesteinen vergleichsweise geringer Mächtigkeit.



Der in Restmächtigkeiten zwischen ca. 20 m (im Talgrund) und 50 m (Widerlager) auftretende **Röt** weist, bedingt durch die Lage am Rand der Eichsfeldschwelle, in seiner Ausbildung gewisse örtliche Besonderheiten auf. So ist davon auszugehen, dass mit Ausnahme des obersten Abschnitts (sog. Untere Rote Schichten) das gesamte Rötprofil primär überdurchschnittlich intensiv mit Anhydrit bzw. Gips durchsetzt war. Folgeerscheinungen der Gipsauslaugung haben im Oberen Buntsandstein zu vielfältigen, atektonischen Lagerungsstörungen geführt.



**Bild 35-2:** Geologischer Schnitt

Aus diesem Grunde wurden der Brückenstandort und die östlich und westlich angrenzenden BAB-Abschnitte als akutes Erdfallgebiet klassifiziert, Bild 35-2. Mit unterschiedlichen planerisch-konstruktiven Anforderungen waren im Umfeld des akuten Erdfallgebietes 4 Bauwerke zu errichten. Das Brückenbauwerk wurde in der Baukategorie III mit einer besonderen Pfahlgründung errichtet.

Die Fahrbahn der BAB wurde auf beiden Seiten der Brücke als ebene Platte in der Baukategorie I errichtet. Auch die nördlich an die BAB angrenzende Einschnittsböschung (westlich der Brücke) musste mit einer Stützwand in der Baukategorie I gesichert werden. Die Böschungskegel am östlichen Widerlager wurden als Bewehrte Erde ausgeführt ohne gesondertes Sicherungsbauwerk. Aber allein durch den regulären Aufbau des Bauwerkes mit 16 Bewehrungslagen war auch eine Sicherung in der BK I gegeben.

### 7.1.1 Stützkonstruktion an BAB A 38 – am Egelskopf

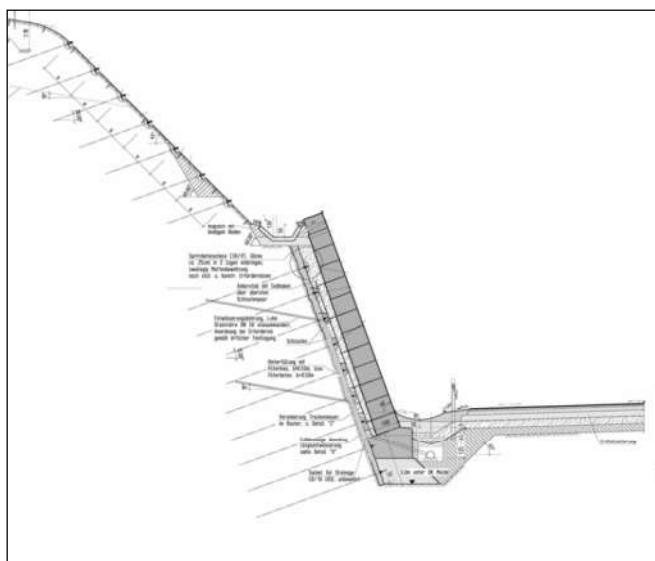


**Bild 36:** Stützkonstruktion an BAB A38 Egelskopf

Die Stützwand liegt inmitten des akuten Erdfallgebietes und sichert die nördliche Einschnittsböschung der BAB A38. Dieses Bauwerk ist konzeptionell kein Erdfallschutzbauwerk sondern eine Hangsicherung, die jedoch für eine Beanspruchung, die sich beim Ausbilden eines Erdfalls ergeben würde, bemessen werden musste.

Als Konstruktion wurde im unteren Bereich eine Spritzbeton-Nagelwand mit Natursteinverblendung und im oberen Bereich eine Böschungsvernagelung mit tragender Vernetzung ausgeführt.

Im Kontext zu den vorhergehenden Erläuterungen erfüllt das Bauwerk beim Beanspruchungsfall „Erdfall“ das Kriterium der Teilsicherung.



**Bild 37:** Querschnitt Stützkonstruktion unterer und oberer Teil

Die Gewährleistung eines Vollsicherungszustandes wurde im Vorfeld untersucht und hätte den Bau von massiven/steifen Konstruktionen zur Folge gehabt. Nach Abwägung der maßgebenden Randbedingungen wurde letztlich eine flexible und aufgelöste Konstruktion gewählt. Durch die Ausbildung einer relativ flachen Böschungsneigung würde die Wand im Versagenszustand nach hinten „einsacken“ und somit keine reale Gefahr für den Verkehr nach sich ziehen. Bis zum Erreichen dieses Bruchzustandes werden jedoch die Deformationen der Böschungsoberfläche so groß und

offensichtlich sein, dass notwendige Sanierungsmaßnahmen eingeleitet werden können. Diese flexible/ aufgelöste Bauweise wurde also explizit festgelegt, um verformungsbedingte Veränderungen der Wand- und Böschungfläche leicht feststellen zu können.



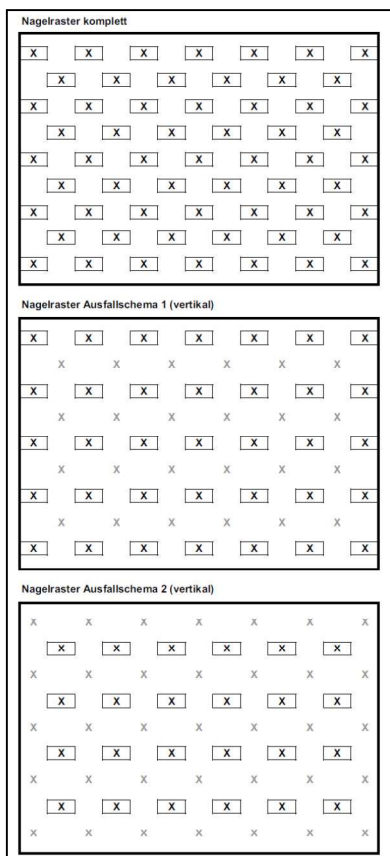
**Bild 39:** Verpress-Strumpf

Wesentliche Tragelemente der Konstruktion sind die Bodennägel, mit denen die Spritzbetonwand im Hang „vernagelt“ wird sowie der Gründungsbalken für die Naturstein- Futtermauer, welche mit Höhen von bis zu 6 m ausgeführt wurde.

In der Statik wurden sogenannte Ausfallszenarien als außergewöhnliche Bemessungssituation (LF3) berücksichtigt.

Bei Auftreten eines Erdfalls im Verankerungsbereich der Bodennägel können durch Lastumlagerungen zusätzliche Kräfte reserven aktiviert werden, indem von vornherein eine erhöhte Anzahl von Nägeln vorgesehen wird. Denkbare Ausfallszenarien als realistische Tragwerksmodelle sind in Bild 38 dargestellt.

Beim Auffahren des Einschnittes bestätigten sich die Parameter des Baugrundmodells weitgehend. Jedoch wurde erst dann offenbar, dass das Gebirge außergewöhnlich stark zerrüttet ist. Durch die Geotechnische Bauüberwachung mussten daher zusätzliche bauliche/ konstruktive Maßnahmen festgelegt werden.



**Bild 38:** Ausfallszenarien bei der Ankerbemessung (eingerahmte Nägel sind funktionsfähig)

Ein Beispiel hierfür ist der Einsatz der Verpress- „Strümpfe“ (Bild 10), die in die Bohrlöcher für die Bodennägel eingebaut wurden. Dadurch wurde das unkontrollierte Eindringen/ Verbrauch großer Mengen Verpressgut in die Hohlräume oder poröse Strukturen des Untergrundes verhindert; die Verpresskörper konnten somit planmäßig hergestellt werden.

Für den Gründungsbalken (siehe Bild 37) hätte im Standardfall unbewehrter Beton ausgereicht. Bei Auftreten eines Erdfalls fällt jedoch die Bettung unter dem Balken in einem Bereich von nicht unmaßgeblicher Länge aus. Im ungünstigsten Fall bildet sich ein Kragarm heraus, der seine Eigenlast und die Belastung aus den Natursteinen tragen muss. Der Balken musste somit als ein in nicht unerheblichem Maße bewehrtes Bauteil bemessen und hergestellt werden. Der Fundamentbalken wurde auf verschiedene Szenarien von Bettungsausfall bemessen.

### 7.1.2 Erdfallschutzplatte BAB A 38

Die Erdfallschutzplatte wurde im Bereich der zuvor beschriebenen Stützwand direkt unter dem bituminösen Oberbau eingebaut und ist ein reines Erdfallschutzbauwerk. Je Richtungsfahrbahn erfolgte die Anordnung einer separaten Platte, Bild 40, die räumliche Trennung in Längsrichtung ergab sich durch Mittelstreifen und Entwässerungseinrichtungen. Die Platten wurden als tragende Schicht Bestandteil des frostsicheren Straßenoberbaus.

Die Anforderung des Bauherrn legte für den Zustand Vollsicherung einen Bemessungserdfalldurchmesser bis 4,0 m zugrunde. Die Bemessung auf Teilsicherung erfolgte unter Ansatz eines Durchmessers bis 6,0 m. Wie oben dargelegt entsprach dieser Bemessungsalgorithmus der realistischen ingenieurgeologischen Modellierung eines allmählichen Übergangs von anfänglicher („vermeintlicher“) Vollsicherung in eine Teilsicherung.

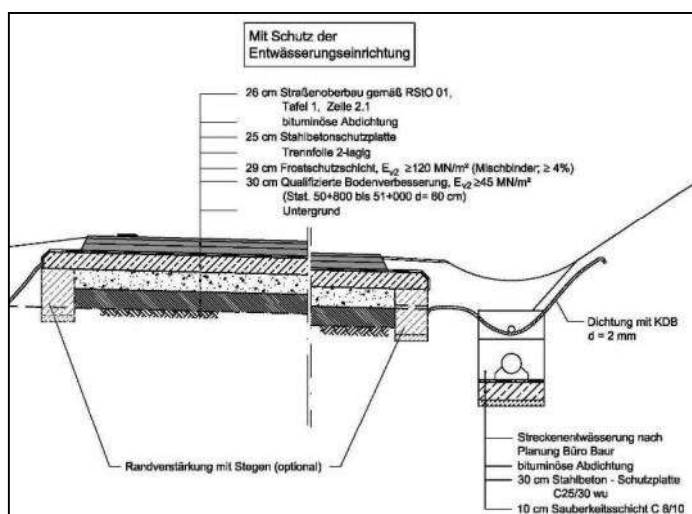


**Bild 42:**  
Bewehrung  
Erdfall-  
schutzplatte

**Bild 40:**  
Übersicht auf die  
Platte

Bei diesem Bauvorhaben wurde erstmals die Untersuchung der Plattenstatik in Systemphasen ausgearbeitet und angewandt, in ähnlicher Art wie es in diesem Beitrag dargestellt wird.

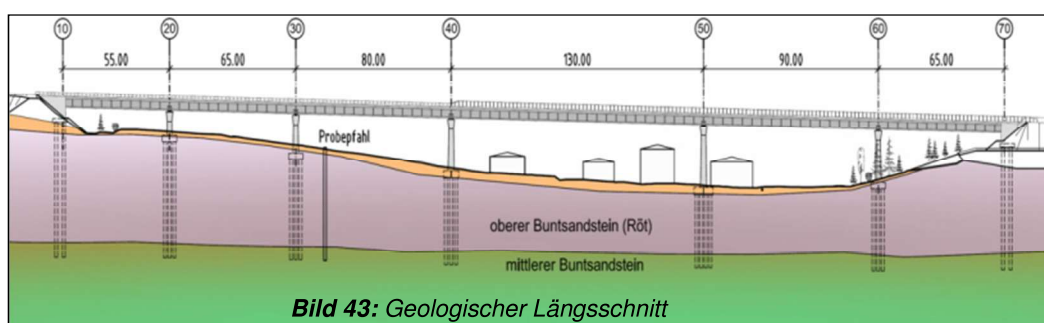
Die Platte wurde ohne Raumfugen hergestellt, die daraus resultierenden Zwangsspannungen



mussten in der Bemessung berücksichtigt werden. Die Bewehrung erfolgte mehrlagig mit Schubbügelkörben an den Plattenrändern. Die Bemessung für den Vollsicherungszustand führte zu außerordentlich hohen Bewehrungsgraden. Die Oberseite der Platte wurde mit einem flexiblen Abdichtungssystem und vorhergehender Rissverfüllung versehen.

**Bild 41:** Regelquerschnitt (Auszug)

### 7.1.3 Friedetalbrücke



**Bild 43:** Geologischer Längsschnitt

Nach einer in Etappen angelegten Baugrunduntersuchung wurde sichtbar, dass die Gründung der Brücke nur auf 20 bis 40 m langen Pfählen möglich ist. Unabhängig von den Effekten der bergbaubedingten weitflächigen Senkung des Geländes (siehe 35-1 und 35-2), die bei der Planung des Überbaus der Brücke berücksichtigt wurden, war die Gründung der Brücke nur in der Baukategorie III auf Pfählen technisch-wirtschaftlich möglich.

Eine Vergütung des Untergrundes im Sinne der Baukategorie V schied wegen der zu den Widerlagern hin deutlich zunehmenden Mächtigkeit des Röt aus. Die Pfahlgründung im mittleren Buntsandstein war naheliegend. Die Besonderheit bestand darin, dass die Dynamik der Subrosionsprozesse so eingeschätzt wurde, dass innerhalb der Standzeit des Bauwerkes diffus verteilte Senkungen des Oberen Buntsandsteins (mit aufliegendem Quartär) nicht auszuschließen waren. Diese führten zwangsläufig dazu, dass für die Nachweise der äußeren Tragfähigkeit nicht nur die Mantelreibung nicht angenommen werden durfte, es war auch noch der Effekt der negativen Mantelreibung anzunehmen.

Stratigraphie/Lithologie	Benennung	Lagerungsverhältnisse	Mächtigkeit	
	Quartär (q)	Hanglehm, Hangschutt, Rutschmassen	-	0-5 m
		Schwemmléhm, Flussskiesand	-	0-8 m
	gipsfreier Oberer Buntsandstein (Röt, so)	i. W. entfestigte ... zersetzte Ton-/Schluffsteine, > steife Gipsauslaugungsrückstände	söhlig bis steif, gestört, z. T. verstürzt/aufglockert, „Gipskarst“ (aufgeweichte Klüfte, Hohlräume?)	5-30 m
	gipsführender Oberer Buntsandstein (Röt, so, g)	i. W. Gips-Tonstein-Wechselagerungen, weiche und breite Auslaugungsrückstände		5-30 m
	Mittlerer Buntsandstein, oberer Abschnitt Soling-Folge (smSO + smSZ)	z. T. primär/sekundär bindemittellame, z. T. gipsimprägnierte Sand- und Schluffsteine	söhlig (1 ... 3° N ... NO), kleinteilektische Schichtversätze < 2 m	4 - 6 m
	Mittlerer Buntsandstein, unterer Abschnitt Soling-Folge / Liegendes (smSU, smH etc.)	bankigemassige Schluff-/Fein-sandsteine (smSU), engständige Ton-/Schluff-/Sandstein-Wechselagerungen (smH etc.)		-

**Bild 44:** Stratigraphie/Lithologie am Brückenstandort

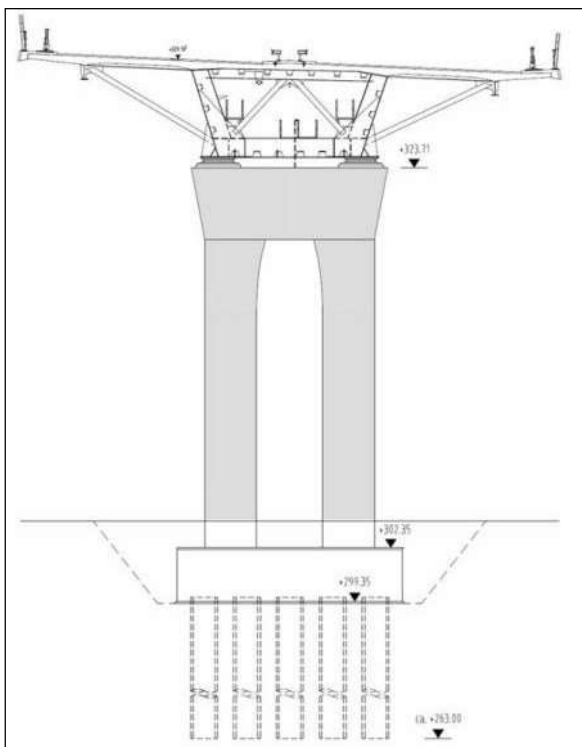
Extrem unwirtschaftlichen Gründung führen würde. Geologisch bedingt war eine Probelastung planmäßig bis 18 MN bei Lasteintrag „von oben nach unten“ nicht durchführbar, da die Mantelreibungseffekte nicht hinreichend erfassbar gewesen wären. Durchgeführt wurde eine Probelastung an einem 40 m langen Testpfahl, der in 2 Ebenen mit Osterbergzellen „von unten nach oben“ ohne äußere Widerlager belastet wurde. Im kritischen Schichtbereich wurden technische Maßnahmen zur Reduzierung der Mantelreibung (Schmierung des Pfahlmantels) getestet.

Die Ergebnisse bestätigen den Ansatz, dass bei Bauwerken in komplizierten ingenieurgeologischen Verhältnissen nur durch aufwendige geotechnische und planerische Untersuchungen einerseits das Baugrundrisiko nach Maßgabe der wissenschaftlich-technischen Möglichkeiten begrenzt wird und

andererseits wirtschaftliche

Gründungsabmessungen ermöglicht werden. Im vorliegenden Falle konnte die Planung der Pfahlgründung im Subrosionsgebirge auf Grundlage der Erwartungswerte der Pfahlbemessung aufgestellt werden, was gegenüber DIN-Werten annähernd zu einer Halbierung der erforderlichen Pfahlanzahl führte. Dieses Beispiel zeigt ferner, dass sich mit den hier beschriebenen Planungsprozessen im weiteren Sinne durchaus eine Regel der Technik für Untersuchung und Entwurf von Bauwerken im Subrosionsprozess abzeichnet.

Eine ausführliche Schilderung der ingenieurgeologische Situation, der planerischen und geotechnischen Aspekte der Planung dieser Probelastung ist in /11/ und /12/ dokumentiert.



**Bild 45:** Pfeiler mit Gründung



### 7.1.4 Bewehrte-Erde -Böschung am Widerlager Ost

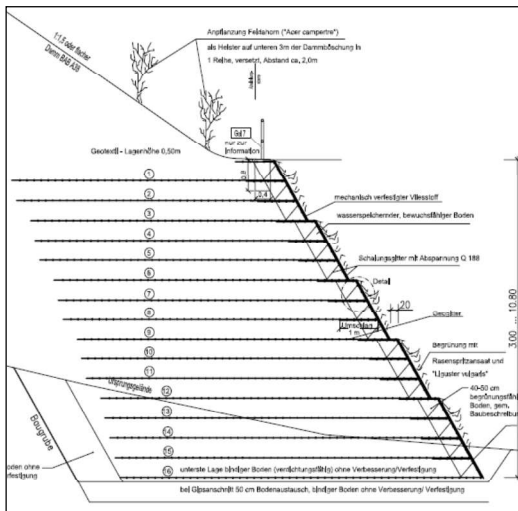


Die geplante Stützwand liegt randlich über dem Schachtfeld Sollstedt des ehem. Kalibergwerkes, Bild 35-1. Bis zum Jahr 2100 werden Restsenkungen von max. ca. 20 cm; und Schiefstellungen bis 1mm/m Jahr erwartet. Das Durchschlagen von Erdfällen bis ca. 3...5 m Durchmesser ist möglich.

Eine Stützkonstruktion musste errichtet werden, da aufgrund der vorhandenen Bebauung keine Regelböschungen angelegt werden konnten, Bild 46.

**Bild 46:** Stützwand im Bau (mit Brücke und angrenzenden Gebäuden)

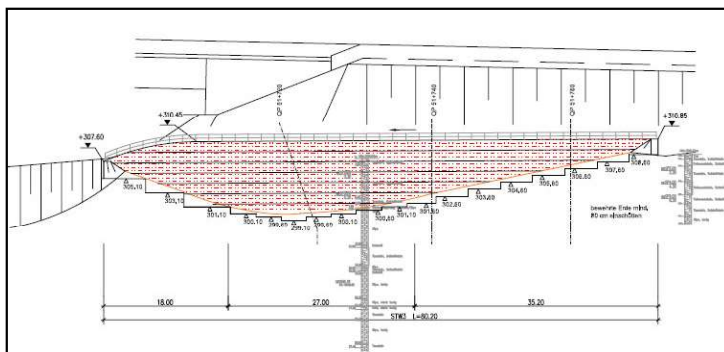
Starre Konstruktionen, wie etwa Winkelstützwände oder Ortbetonkonstruktionen sind bei den geologischen Verhältnissen und wegen der zu erwartenden Schiefstellungen nicht zu empfehlen, da Bewegungen im Gelände derartige Konstruktionen schädigen können. Außerdem sind Gründung und Formgebung einer Stahlbetonkonstruktion bei dem mehrfach gekrümmten Grundriss sehr kompliziert (Siehe Bild 46). Es musste folglich eine flexible Konstruktion gewählt werden, die auch bei



Geländebewegungen uneingeschränkt gebrauchstauglich bleibt.

Eine Kunststoff-Bewehrte-Erde-Stützkonstruktion kann als begrünte Wand hergestellt werden. Ein gesondertes Fundament ist dafür nicht erforderlich. Da das Bauwerk in Richtung Wohnbebauung zeigt, wurde aus gestalterischen Gründen eine begrünte Steilböschung als Vorzugskonstruktion gewählt. Eine Grüne Steilböschung bietet in dieser Hinsicht deutlich weniger Unterhaltungsaufwand und eine für die Anwohner natürlichere Ansicht.

**Bild 47:** Regelquerschnitt



Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Bewehrte-Erde-Konstruktion wegen der großen Anzahl von Bewehrungslagen (siehe Bild 47) gewissermaßen nebenbei die Funktion einer Erdrutschschutzkonstruktion im Sinne der EBGeo erfüllt. Gewählt wurde ein Bausystem mit tragender Außenhaut und Begrünung.

**Bild 48:** Ansicht/ Abwicklung



**Bild 49:** Fertige Wand nach Herstellung

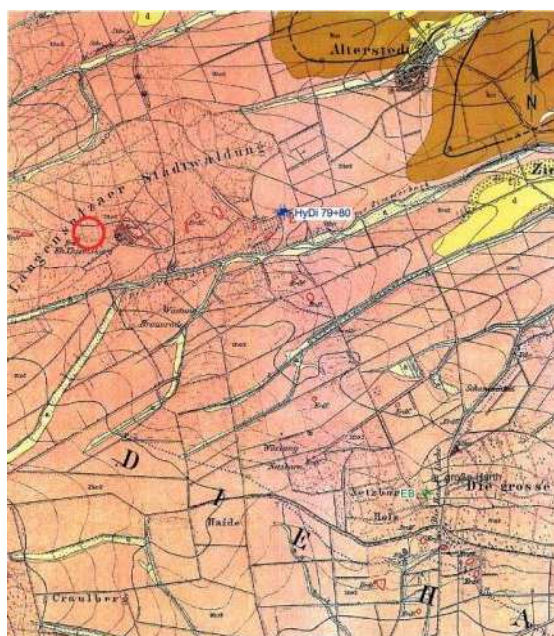
## 7.2 Baumkronenpfad im Hainich

Dieses Bauwerk ist eines der selteneren Beispiele für Karstformen mit sehr großen Abmessungen von Einbruchformen an der Tagesoberfläche; Bild 50. Mit dem Ziel der Entwicklung des Fremdenverkehrs sowie einer Verbesserung der Umweltbildung und Forschung errichtete die Stadt



**Bild 50:** Ein großer Erdfall nahe des Turmes

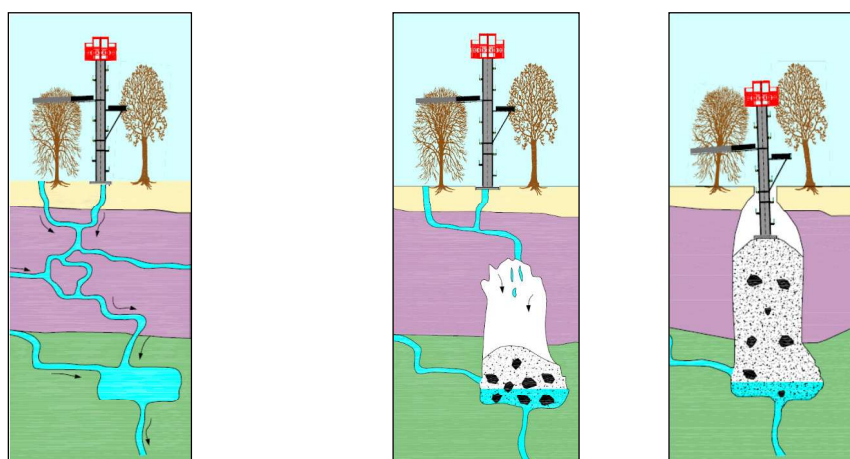
Bad Langensalza (Deutschland, Bundesland Thüringen) im *Nationalpark Hainich* einen Baumkronenpfad mit Aussichtsturm, Bild 55. Der Aussichtsturm als zentraler Punkt des Pfades hat eine Höhe von 44 m. Der 2 m breite und 306 m lange Pfad mit einem allmählichen Höhenanstieg bis über die Wipfel der Bäume ist über eine Außentreppe vom Turm aus zu erreichen. In diesem Falle waren alle Funktionen des Bauherren an einen Generalunternehmer übertragen worden.



Dieser veranlasste die geotechnischen Grundlagenermittlung und die Planung der Gründung des Turmes. Im Zuge von Geländebegehungen während der geotechnischen Spezialplanung im Auftrag des Generalunternehmers waren durch eine sorgfältige und fachübergreifende Herangehensweise in der Zusammenarbeit von Bauingenieuren und Geologen im nahen Umfeld des vorgesehenen Standortes zahlreiche morphologisch auffällige z. T. wassergefüllte, rundliche Senken auffällig geworden.

Nach Einsicht in das Subrosionskataster der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie wurde klar, dass der Standort in eine Zone akuter Erdfallgefährdung - Erdfälle und -einsenkungen sind vergleichsweise häufig - (ungünstigste Klassifizierung) aufgrund von Auslaugungsvorgängen in der salinaren Folge des Mittleren Muschelkalkes eingestuft wird, Bild 51. Der überwiegende Anteil der heute noch erkennbaren Erdfallstrukturen ist zwar fossil, allerdings gibt es vereinzelt auch Ereignisse jüngerer Datums. So ging 1968 auf einer Ackerfläche ca. 4 km südöstlich des Standortes ein Erdfall nieder, welcher sich in nur kurzer Zeit auf einen Durchmesser von ca. 40 m erweitert hatte.

Als Ursache dieser Erdfallbildungen können durch Verkarstung (Karbonatkarst) erweiterte, vermutlich tektonisch vorgeprägte Klüftzonen im Oberen Muschelkalk angesehen werden, die eine Auslaugung der salinaren Folge des unterlagernden Mittleren Muschelkalkes durch geringmineralisierte Oberflächenwässer ermöglicht haben und auch weiterhin ermöglichen. Das Resultat der unterirdischen Subrosionsprozesse sind Schlotten bzw. schichtförmige, gewölbeartige und schlotförmige Hohlräume. Diese können nach Erreichen einer bestimmten Größe zusammenbrechen (Überschreiten der Bruchspannungsgrenze des Deckgebirges) und sich dann plötzlich, schlagartig bis zur Erdoberfläche durchsetzen; Bildfolge 52.



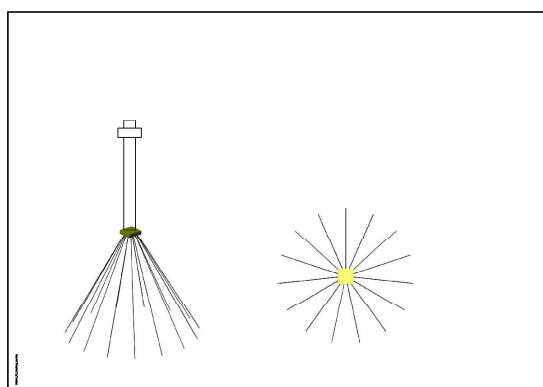
**Bild 52:** Das potenzielle Bruchscenario im Bereich des Turmes

Die oberflächigen Auswirkungen hängen dabei im Wesentlichen von Mächtigkeit, Zustand und Teufenlage des Salinars, von Mächtigkeit und Ausbildung des Deckgebirges sowie von der hydrologisch/ hydrogeologischen Situation ab. Die in Thüringen dokumentierten Erdfalldurchmesser im Mittleren Muschelkalk betragen zwischen 10 bis 50 m. Verantwortlich dafür sind u. a. die relativ große Teufenlage der Sulfathorizonte und das kompakte „Dolomit-/Kalksteindach“, Bild 51.

Zur Klärung der geologischen Situation und des möglichen Auslaugungspotentials wurde am Standortmittelpunkt des geplanten, gegenüber jeglichen Untergrundsenkungen/-setzungen sensiblen Aussichtsturmes eine **110 m tiefe Bohrung** bis in den Unteren Dolomit des Mittleren Muschelkalkes abgeteuft und geophysikalisch vermessen. Der Untere Dolomit stellt die unbeanspruchte Basisfolge

des auslaugungsgefährdeten Mittleren Muschelkalkes dar, wo faktisch keine Auslaugungen mehr stattfinden.

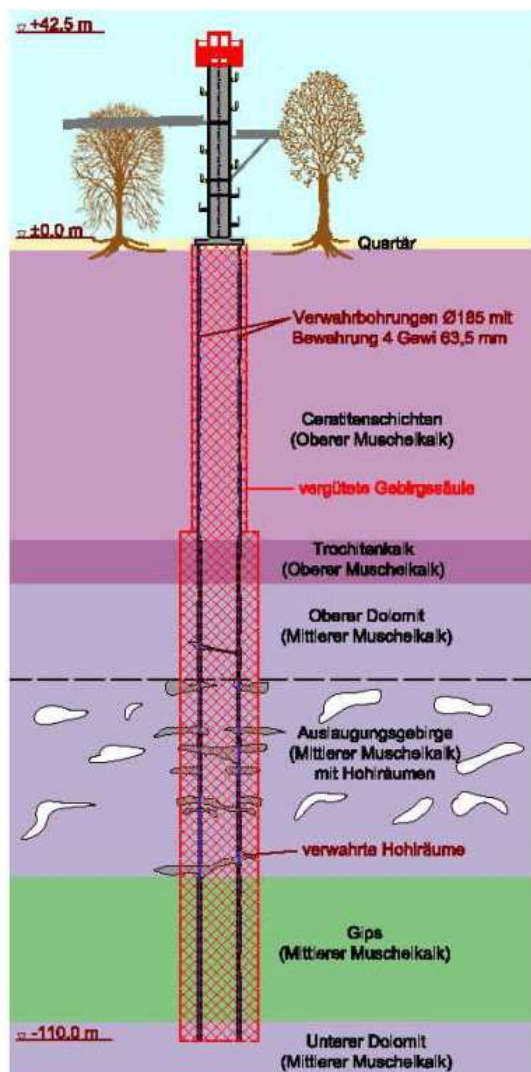
Die niedergebrachte Bohrung belegte eindrucksvoll die für das Untersuchungsgebiet vermutete Auslaugungssituation. Es ergaben sich hinreichende Indizien, dass es ein nicht auszuschließendes Risiko des Vorhandenseins größerer Hohlräume bzw. teilverbrochener, noch nicht an der Tagesoberfläche sichtbarer Zonen in der unmittelbaren Umgebung des geplanten Turmes gibt, Bild 52. Eine Bebauung derartiger Gebiete ist nur bedingt möglich. Im Ergebnis der Tiefbohrung, der geophysikalischen Bohrlochuntersuchungen und einer fachkundigen ingenieurgeologischen Auswertung unter Einbeziehung der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie wurde



geschlussfolgert, dass am Standort ein hohes Erdfallrisikopotenzial besteht.

Demnach war die Errichtung des Aussichtsturmes ohne Sicherungsmaßnahmen unvertretbar. Umso mehr, als es sich um ein Bauwerk für die Öffentlichkeit handelt, welches aufgrund seiner Höhe und schlanken Struktur auf jegliche Untergrundschwächen empfindlich reagiert.

**Bild 53:** Variante Pfahl-Schirm



Die Charakteristik der Erdfallproblematik am Standort besteht darin, dass sich unter dem Turm mit 4,5 m Durchmesser ein „Loch“ mit einem Durchmesser von > 10 m öffnen kann!, Bild 52. Das Durchbrechen von Erdfällen ist jeweils als ein plötzliches, unvorhersehbares Ereignis einzustufen. Große Hohlräume wurden mit der Bohrung unmittelbar unter dem Turm nicht erkundet, jedoch ist es kennzeichnend für die geologische Situation, dass die Verhältnisse auf kurzen Entfernungen stark wechseln können und zum Beispiel unmittelbar neben dem Standort des geplanten Turmes größere Hohlräume in den unteren Schichten des Mittleren Muschelkalkes bzw. auch schon hochgearbeitete Verbrucherscheinungen vorhanden sein können. Diese Verbrucherscheinungen gehen nicht immer ideal senkrecht vonstatten, sondern sie folgen tektonischen anderweitig vorgeprägten Schwächezonen innerhalb des Felsverbandes und können somit auch zu einer seitlichen Ausbreitung und damit bis unter den Turm führen, Bild 52.

**Bild 54:** Schematische Darstellung der gewählten Gründung und Sicherung

## Sicherungsmaßnahmen

Zu Beginn der Planung sind verschiedene Varianten einer Teilsicherung, unter anderem mittels eines „Schirmes“ aus Verpresspfählen, abgesetzt innerhalb der tragfähigen Deckgebirgsschichten, in Betracht gezogen worden, Bild 53. Dem wurden Varianten für eine Vollsicherung unter dem Turm, wie beispielsweise eine große Stahlbetonplatte oder ein großes, bewehrtes Fundamentkreuz kostenseitig und technisch gegenübergestellt. Die Sicherung musste in Baukategorie III erfolgen.

Im letztendlich gewählten Konzept wurden in einem Karree von 8 x 8 m vier Imlochhammerbohrungen mit einem Durchmesser von 185 mm bis in den Dolomit an der Basis der auslaugfähigen Gesteine abgeteuft (Tiefe ca. 104 m); Bild 54.

Diese Bohrungen sind als kombinierte (zusätzliche) Erkundungs- und Verwehrbohrungen zu betrachten. Innerhalb der auslaugbaren Schichten des Mittleren Muschelkalkes wurde eine Verwahrung der dort vorhandenen Hohlräumstrukturen mit einem hochsulfatbeständigen Beton im Kontraktorverfahren, d. h. ohne unnötig hohe Verpressdrücke, ausgeführt. Für den Abschnitt der stärker klüftigen Wechsellagerung von Tonstein und Kalkstein im Oberen Muschelkalk erfolgte eine Nachverpressung. In die Bohrungen wurde jeweils ein hochfester Bau-Stahl mit Durchmesser 63,5 mm und doppeltem Korrosionsschutz auf den oberen 9 m eingestellt.



Durch diese Maßnahmen wurde unter dem Turm eine vergütete /stabilisierte Gebirgssäule hergestellt. Somit können Erdfälle unmittelbar unter dem Turm konsequent ausgeschlossen werden. Die Verpressung des Gebirges im Oberen Muschelkalk und die Einstabbewehrung in den Pfählen dient weiterhin einer Versteifung/ Bewehrung der Gebirgssäule unter dem Turm mit dem Ziel, einen erhöhten Widerstand des Gebirges unter dem Turm zu schaffen. Damit kann auch das nicht auszuschließende, seitliche Vordringen von Verbrucherscheinungen neben dem Turm verhindert werden.

**Bild 55:** Fertiggestellter Turm

Der Turm selbst wurde als Flachgründung in den gut tragfähigen Schichten des Oberen Muschelkalkes konzipiert. Es handelt sich also nicht um eine Gründung des Turmes auf 4 Pfählen, wie man auf den ersten Blick meinen könnte, sondern um eine Flachgründung des Turmes auf einer vergüteten Gebirgssäule, bei dem Momentenbelastungen als Zugkräfte über Anker in den Untergrund abgeleitet werden. Im übertragenen Sinne ist der Turm auf dem Untergrund angeschraubt.

Resümee:

Das gewählte System ist aus ingenieurgeologischer/ geotechnischer Sicht als Vollsicherung (BK III) gegen Erdfälle einzustufen. Nach ingenieurgeologischem und geotechnischem Ermessen wird damit das Auftreten von Erdfällen unter dem Turm dauerhaft verhindert. Alternativen einer Teilsicherung haben sich bei näherer Betrachtung als in der Funktionsweise technisch nur schwer erfassbar und zudem in der Ausführung letztendlich teurer als das gewählte System erwiesen. Eine Alternative zum Verzicht auf eine Sicherung bestand nicht.

## 9. Zusammenfassung und Bewertung

Bei der Planung und Bemessung von Bauwerken im Subrosionsgebirge muss das geotechnische und planerische Risiko wesentlich stärker gewichtet werden als bei der Bemessung eines Standard-Bauwerks. Ein komplexes Regelwerk, welches alle Facetten der geotechnischen Grundlagenermittlung und Planung für Sicherungsbauwerke im Subrosionsgebiet regelt, gibt es gegenwärtig noch nicht. In Deutschland gibt es eine größere Anzahl weitflächiger Subrosionsgebiete. Aus diesem Grunde haben sich hier auf unterschiedlichen Ebenen (Bund, Länder) Regelwerke entwickelt, die über Subrosionskataster zu Spezialkartierungen der Subrosionsgebiete geführt haben. Flankierend dazu wurden Handlungsempfehlungen ausgearbeitet, die sich vor allem der Einteilung von Risiken oder Gefahren in diesen Gebieten und notwendigen Sicherungsbauwerken widmen. Dieses Regelwerk ist seit längerer Zeit in einem relativ kleinen Kreis von Spezialisten in Gebrauch. Es betrifft den Bereich der geotechnischen Grundlagen für Bauwerke, die in Subrosionsgebieten errichtet werden müssen. Es kann in dieser Form genutzt, fortgeschrieben oder für regionalgeologische Besonderheiten modifiziert werden. Dabei ist die phänomenologisch induzierte Einteilung in Gefahrenklassen aus dem IEBB, Thüringen, für den praktischen Gebrauch hervorzuheben. Je nach geologischer Standortdisposition können Sicherungsbauwerke in 5 Bauwerkskategorien eingeteilt werden, die unterschiedliche Sicherheitsstandards der Vollsicherung bzw. Teilsicherung erfüllen. Für den Bereich der Planung von Sicherungsbauwerken bedarf es eines komplexen, über den Aufwand von „normalen“ Bauwerken deutlich hinausgehenden Abstimmungsaufwand zu Funktion, Dimension, Gebrauch und Unterhaltung. Ein einschlägiges Regelwerk für Sicherungsbauwerke in Subrosionsgebieten gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur für Sicherungsbauwerke mit Geokunststoffen. Der Beitrag hat eine Bemessungsprozedur für Sicherungsbauwerke aus ebenen Stahlbetonplatten hinzugefügt. Gemessen an dem heute verfügbaren Erfahrungsschatz und dem verfügbaren Regelwerk ist es auch für den Bereich der Sicherungsbauwerke möglich, nach anerkannten Regeln zu planen und damit das Verhältnis aller Baubeteiligten von Bauherr zu Planer und Bauunternehmer zu regeln.

## Quellennachweis

- /1/ Forschungsgesellschaft für Straßen – und Verkehrswesen: Merkblatt über Straßenbau in Erdfallgebieten; 2009
  
- /2/ FREISTAAT THÜRINGEN, LANDESAMT FÜR BAU UND VERKEHR: 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)
  
- /3/ LANDESAMT FÜR STRASSENBAU SACHSEN- ANHALT: 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)
  
- /4/ DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK e.V: Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO), Verlag Ernst & Sohn, 01/ 2010; Abschnitt 11: Überbrückung von Erdeinbrüchen.
  
- /5/ DIN 4020: Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke, Berlin, Beuth- Verlag, 2003-09 (Ergänzung zum EC 7)
  
- /6/ DIN EN 1991-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC: 2010;
  
- /7/ DIN EN 1992: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetongtragwerken; Deutsche Fassung EN 1992;
  
- /8/ DIN EN 1997-1: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik- Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC: 2009
  
- /9/ FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, RSTO 12
  
- /10/ U. Köhler und F. Müller: „Stützkonstruktionen im akuten Erdfallgebiet- Bemessung und Ausführung sowie Abwägung von ingenieurgeologischen und planerischen Risiken“, *Geotechnik* 02/ 2010, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.

- /11/ Kleffner, H-J., Hecht, T., Köhler U., Kirschstein M.: Tragkraftoptimierung und Reduzierung negativer Mantelreibung bei Großbohrpfählen in erdfallgefährdetem Untergrund; Felssymposium Stuttgart 2006, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.
- /12/ Rüschkamp, H., Hecht, T., Köhler, U., Kirschstein, M., Gebert, G.: Gründungsoptimierung für Großbrücken im Karstgebirge auf der Grundlage von Probelastungen an langen Bohrpfählen. - EUROGEO Madrid 2007 (im Druck)
- /13/ Kirschstein, M., Köhler, U.: Eine Turmgründung im akuten Erdfallgebiet - Der Aussichtsturm des Baumkronenpfades im Hainich. – EUROGEO Madrid 2007