

Untersuchungsmethoden zur  
Sanierung von Baugebieten durch  
Hangverdübelung

**T 2471**

T 2471

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# Schlußbericht

zum Forschungsvorhaben

**Untersuchungsmethoden zur Sanierung von Baugebieten  
durch Hangverdübelung**

gefördert vom

Innenministerium Baden-Württemberg  
Institut für Bautechnik, Berlin

durchgeführt vom

Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau  
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik  
Universität Karlsruhe

Auftragnehmer:

Prof. Dr.-Ing. G. Gudehus

Sachbearbeiter:

Dipl.-Geol. H. Kreuter

Dr.-Ing. R. Lippomann

Karlsruhe, im Oktober 1992

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Das Prinzip der Hangverdübelung und seine Anwendung in Baugebieten . . . . .	4
1.2	Probleme bei der Dimensionierung einer Verdübelung toniger Hänge . . . . .	6
1.3	Ziel der Forschungsarbeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Theoretische Arbeiten</b>	<b>8</b>
2.1	Übersicht der in Baden-Württemberg vorkommenden tonigen Sedimente . . . . .	8
2.2	Erkundungsverfahren zur Untersuchung von Kriechhängen . . . . .	9
2.3	Geotechnische Klassifikation toniger Kriechhängen . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Methoden zur Untersuchung von Kriechhängen</b>	<b>15</b>
3.1	Probenahme und Aufbewahrung . . . . .	15
3.2	Laborversuche . . . . .	19
3.3	Neigungsmessung . . . . .	23
3.4	Karlsruher Seitendrucksonde . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Ausführungsbeispiele</b>	<b>30</b>
4.1	Ausführungsbeispiel Pfullingen . . . . .	32
4.2	Ausführungsbeispiel Stuttgart-Feuerbach . . . . .	44
4.3	Ausführungsbeispiel Weinsberg . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Richtlinien für die Anwendung</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassende Vorschläge zur Durchführung von Hangverdübelungen</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse</b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>66</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Rutschung Waldstetten bei Schwäbisch-Gmünd, Frühjahr 1988 . . . . .	5
2	Tonsedimente mit Kriechhängen in SW-Deutschland . . . . .	8
3	Geologische Kenngrößen und Merkmale von Kriechhängen . . . . .	10
4	Kriechhangspektrum zur geotechnischen Einteilung von Hangbewegungen .	14
5	Gerät für die Entnahme von ungestörten Bodenproben aus einem Bohrloch	16
6	Schematische Zeichnung des Probenaufbewahrungsgeräts . . . . .	18
7	Diagramm zur Bestimmung des Zähigkeitsindex' $I_{v\alpha}$ durch Korrelation mit dem Wassergehalt an der Fließgrenze $w_L$ . . . . .	20
8	Bestimmung des Zähigkeitsindex' $I_{v\alpha}$ durch Triaxialversuche . . . . .	20
9	Herausarbeiten eines Probekörpers aus einem Bohrkern mit vorhandenen Trennfläche . . . . .	22
10	Prinzip der Bohrlochneigungsmessung . . . . .	23
11	Durch bilinearen Ansatz approximiertes Verhalten von Horizontallast über Dübelverschiebung . . . . .	25
12	Schematische Darstellung der Karlsruher Seitendrucksonde und der dazugehörigen Meßeinrichtung . . . . .	26
13	Karlsruher Seitendrucksonde, Meßeinrichtung und Bohrgerät . . . . .	27
14	Sondenkörper mit Druckplatte, Lagern, Hydraulikdruckzylindern und Leitungen . . . . .	27
15	Karlsruher Seitendrucksonde mit ausgefahrener Druckplatte . . . . .	28
16	Herstellung eines Bohrlochs für die Seitendrucksondierung . . . . .	29
17	Lage der Bohransatzpunkte und Sondierungen in der ingenieurgeologischen Karte des Hanges . . . . .	34
18	Bohrprofile der Bohrungen Bo1, Bo2 und Bo3 . . . . .	34
19	Auswertung der Bohrlochneigungsmessungen . . . . .	35
20	Maßgebender Bruchmechanismus für die Rückrechnung der Scherfestigkeit auf der Gleitfuge . . . . .	36

21	Rückrechnung der Scherparameter (Computerausdruck) . . . . .	38
22	Dübelzustandslinien zur Bemessung des Einzeldübels . . . . .	41
23	Zeit-Verschiebungs-Diagramm aus der Bemessung . . . . .	41
24	Bauausführungsplan der Verdübelung . . . . .	42
25	Blockbild des verdübelten Hanges . . . . .	42
26	Vergleich zwischen vorausberechneter und gemessener Hangverformung nach Einbau der Sicherung . . . . .	43
27	Rutschhang Stuttgart-Feuerbach; Lageplan . . . . .	44
28	Schäden an der Fuge zwischen zwei Reihenhäusern . . . . .	45
29	Schäden an einer Garage und einer Garagenzufahrt . . . . .	45
30	Charakteristischer Schnitt durch den Rutschang Stuttgart-Feuerbach . . .	48
31	Seitendrucksondierung mit der im Brunnen verspannten Sonde . . . . .	50
32	Die Druckplatte der Sonde liegt am anstehenden Gipskeuper an . . . . .	50
33	Anordnung der Brunnen im Gelände . . . . .	52
34	Konstruktion eines Einzelbrunnens . . . . .	52
35	Vereinfachtes Beispiel einer Kriechhangkarte mit Raster für Erkundungs- bohrungen und -sondierungen. . . . .	56
36	Aufgabenbereiche der Erkundungsbohrungen . . . . .	57
37	Empfohlenes Bohr- und Sondiergraster für die Erkundung des Unter- grundes im Kriechhang . . . . .	57
38	Beschreibung der Vorgehensweise bei der Durchführung einer Kriechhang- sanierung durch Verdübelung . . . . .	63

# 1 Einleitung

Rutschende oder kriechende Hänge stellen häufig eine Bedrohung für vorhandene Bebauung und Infrastruktur dar. Schäden, wie sie später bei dem Ausführungsbeispiel in Stuttgart-Feuerbach beschrieben werden, sind typisch für ein betroffenes Hanggelände in bewohntem Gebiet. Hangbewegungen treten häufig in tonigem Untergrund auf, der in vielen Gegenden Baden-Württembergs oberflächennah ansteht. Seine Eigenschaften sind für die Wahl des Sanierungsverfahrens bestimmend. Mit der Methode der Hangverdübelung wurden sowohl bei der Sanierung von Schadensfällen, als auch bei der Stabilisierung von Kriechhängen vor ihrer baulichen Nutzung, hervorragende Erfolge erzielt. Sie ist wegen ihrer Anpassungsfähigkeit und großen Variationsbreite gerade für einen Einsatz in schwierigem innerstädtischen Gelände sehr gut geeignet. Die Hangverdübelung hat sich in den letzten Jahren immer deutlicher als besonders wirtschaftliche, zuverlässige und umweltfreundliche Sanierungsmethode erwiesen.

## 1.1 Das Prinzip der Hangverdübelung und seine Anwendung in Baugebieten

Tonige Sedimente, die durch die Erosion ihrer Deckschicht der Verwitterung ausgesetzt sind, weichen im Laufe der Zeit auf, verlieren ihre Festigkeit und bewegen sich schließlich selbst in Hanglagen mit geringer Neigung talabwärts. Diese kriechende Verwitterungsschicht ist nach unten durch eine geringmächtige Gleitzone vom festen Untergrund getrennt. Auf dieser Gleitfläche bewegt sich der Hang normalerweise mit einer Geschwindigkeit von einigen Millimetern bis Zentimetern im Jahr. Diese langsame Bewegung kann aber, z.B. durch starke Durchfeuchtung und Grundwasseranstieg infolge einer Periode ergiebigen Niederschlags, plötzlich in eine Rutschung übergehen. Eine solche Starkregenperiode führte im Frühjahr 1988 in Baden-Württemberg zu einer Reihe zum Teil großer Hangrutschungen (Abb. 1).

Da ein Kriechhang sich erdstatisch im Grenzgleichgewicht befindet, können auch menschliche Eingriffe in das Kräftegleichgewicht, wie sie in bewohnten oder bebauten Gebieten vorgenommen werden (Einschnitte, Anschnitte, Anlegen von Gräben und Aufschüttungen) zu einer Beschleunigung der Kriechgeschwindigkeit und zu Gebäudeschäden führen.

Das Prinzip der Verdübelung ist es, einen schubfesten Verbund zwischen der sich bewegenden Deckschicht und dem stabilen Untergrund herzustellen [Gudehus et al., 1985] und



Abbildung 1: Rutschung Waldstetten bei Schwäbisch-Gmünd, Frühjahr 1988

dabei gerade soviel Bremskraft in den Hang einzuleiten, daß die Bewegung auf ein für die Bebauung erträgliches Maß reduziert wird. Das Bemessungsverfahren nach Schwarz (1987) zur Verdübelung toniger Böden macht es möglich, eine zuverlässige Dimensionierung zu erreichen und dabei die Vorteile dieser Sanierungsmethode, kostengünstig, umweltgerecht und variabel einsetzbar zu sein, optimal zu nutzen.

Die Hangverdübelung weist Eigenschaften auf, die das Verfahren für die Anwendung in bebautem Gelände als geeigneter erscheinen läßt als alle anderen Sanierungsmethoden:

- Die Verdübelung gestattet eine in Grenzen variable Anordnung der Dübel. Die Verteilung der Dübel kann der Bebauung und der Befahrbarkeit des Geländes angepaßt werden.
- Treten plötzlich größere Schäden in einem bebauten Gebiet auf, so ist zur Abwendung weiterer Schäden und im Hinblick auf die Sicherheit für die Bewohner oder Nutzer der Gebäude sofortiger Handlungsbedarf gegeben. Weitere größere Bewegungen müssen vermieden werden, so daß für eine ausführliche Untersuchung des Rutschhangs keine Zeit vorhanden ist. In einer ersten Phase wird aufgrund eines geringen Untersuchungsaufwands mit realistischen Abschätzungen die für die Abbremsung des Hanges notwendige Anzahl von Dübeln ermittelt. Entgeltliche Sicherungsmaßnahmen können nach weiteren Untersuchungen und der Beobachtung

des Hanges festgelegt werden, wobei die Dübel der ersten Sanierungsphase voll für die Gesamtmaßnahme genutzt werden können.

- Da die Dübel nicht bis an die Oberfläche reichen, steht das sanierte Gelände für weitere Nutzung zur Verfügung und kann sogar überbaut werden.  
Eine Einschränkung der Wohnqualität durch oberirdische Stützbauwerke wird vermieden und den Bewohnern ein optisch nicht beeinträchtigtes, intaktes Wohnumfeld bewahrt.

## 1.2 Probleme bei der Dimensionierung einer Verdübelung toniger Hänge

Die zuverlässige und kostengünstige Dimensionierung einer Hangverdübelung setzt eine möglichst genaue Kenntnis der Bodenparameter, der Geometrie des Hanges und seines Bewegungsverhaltens voraus. In der Vergangenheit wurden dazu Verfahren und Erkenntnisse herangezogen, die im Rahmen anderer Anwendungen entwickelt wurden. Für einige Parameter, wie Scherfestigkeit in der Gleitfuge und Bettungsmodul des Bodens, konnten nur Abschätzungen getroffen werden, da die entsprechende Versuchstechnik noch nicht ausreichend entwickelt war.

Die Tiefenlage der Gleitfuge geht direkt in die Dimensionierung der Verdübelung ein. Sie wird zusammen mit der Bewegungsgeschwindigkeit des Kriechhanges durch das Bohrloch-Neigungsmeßverfahren bestimmt. Die rechnergesteuerte Automatisierung dieses Verfahrens kann seinen Einsatz vereinfachen und verhindert Meßfehler bei der Anwendung. Da es sich oft um aufgeweichte Tonschichten handelt, ergeben sich bei Entnahme, Transport und Aufbewahrung der empfindlichen Proben häufig Probleme.

## 1.3 Ziel der Forschungsarbeit

Ziel dieser Forschungsarbeit war es, auf der Grundlage eigener Erfahrungen und einschlägigen Forschungsarbeiten, Methoden für die ingenieurgeologische und bodenmechanische Untersuchung von Kriechhängen in tonigen Böden zu entwickeln. Als Grundlage der Auswahl der anzuwendenden Erkundungsverfahren wurden die in Baden-Württemberg von Kriechbewegungen betroffenen tonigen Böden und die in ihnen auftretenden Hangbewegungen beschrieben und klassifiziert. Die Erkundungsverfahren sollen vorrangig auf

das Methode der Hangverdübelung zugeschnitten, aber auch im Rahmen anderer Bau-  
maßnahmen in tonigen Böden einsetzbar sein. Nach der Ausarbeitung und ersten Prüfung  
der entwickelten Methoden wurden sie im Großversuch unter realistischen Bedingungen  
praktisch angewendet und auf ihre Eignung überprüft.

Mit den Erfahrungen aus der ersten Testphase und aus dem praktischen Einsatz bei ei-  
ner Verdübelungsmaßnahme können die Zweckmäßigkeit und die Art der Anwendung der  
einzelnen Verfahrensschritte beurteilt und Richtlinien für die Durchführung aufgestellt  
werden. Damit können neue Wege für einen wirtschaftlicheren Einsatz dieser umwelt-  
freundlichen und gerade auch für eine Anwendung in bebautem Gelände hervorragend  
geeigneten Sanierungsmethode von Kriech- und Rutschhängen beschritten werden.

## 2 Theoretische Arbeiten

### 2.1 Übersicht der in Baden-Württemberg vorkommenden tonigen Sedimente

Das Auftreten der Hangbewegungen in Baden-Württemberg ist an die geographische Verbreitung der tonigen Sedimente gebunden. Im Verlauf der erdgeschichtlichen Entwicklung wurde in Südwestdeutschland in den mesozoischen Schichten der Trias, des Juras und in den känozoischen tertiären Sedimenten toniges Material abgelagert. In der Abb. 2 ist die Verbreitung der tonigen Ablagerungen mit Kriechhängen in einer Übersicht dargestellt.

**Trias:** In einem Gebiet, das westlich vom Rand der Schwäbischen Alb in SW-NE-licher Richtung verläuft, sind die Ablagerungen des sog. 'Mittleren Keupers', einer Stufe der Oberen Trias aufgeschlossen. In einem großen flachen Becken wurden neben Sanden auch Tone und Mergel abgelagert, die bei zeitweiser Austrocknung der Gewässer rot, bei dauernder Wasserbedeckung grau bis grünlich gefärbt sind. Sie sind teilweise diagenetisch verfestigt, zerfallen aber unter dem Einfluß der Verwitterung kleinplattig und weichen bei Zutritt von Oberflächenwasser auf. Die Lösung von

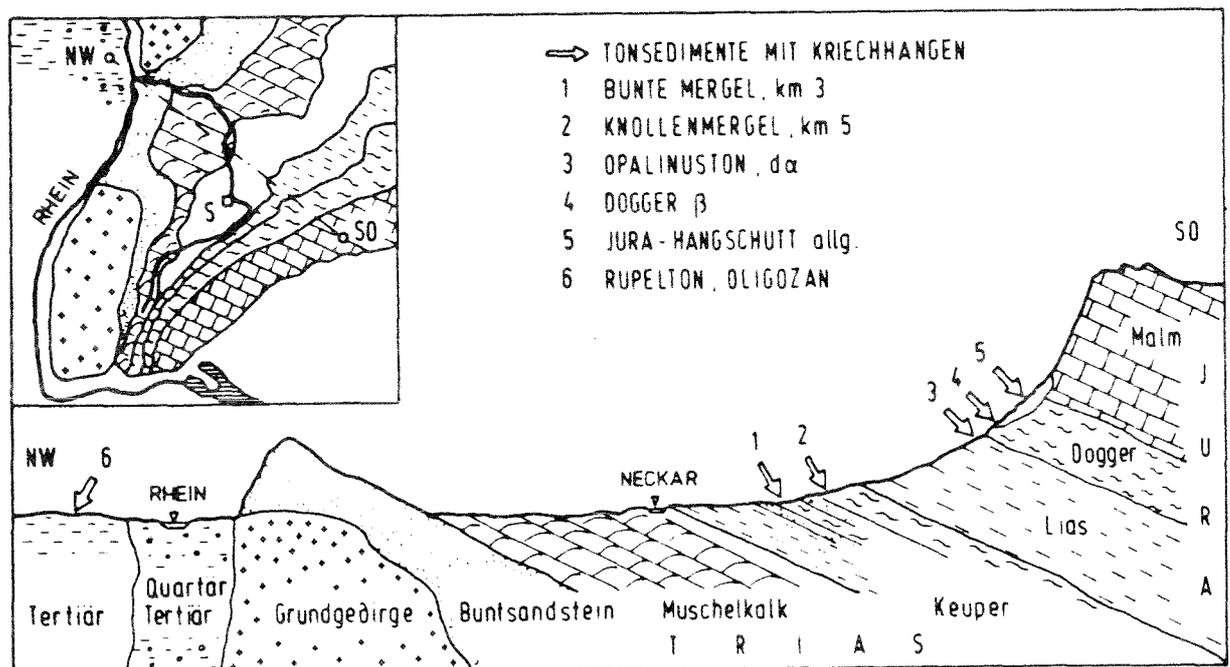


Abbildung 2: Tonsedimente mit Kriechhängen in SW-Deutschland (aus [Lippomann, 1988])

Gipseinlagerungen in den liegenden, noch von marinem Milieu geprägten Partien des Keupers tragen zur Zerstörung des Gefüges bei.

Besonders in den Schichten der Bunten Mergel (km3) und des Knollenmergels (km4) treten häufig Hangbewegungen auf. Auch der Gipskeuper (km1) kann unter ungünstigen Umständen Kriechbewegungen und Rutschungen zeigen, gerade dort, wo er, noch vom darüberliegenden Schilfsandstein (km 2) geschützt, Steilhänge bildet. Mit fortschreitender Erosion des Schilfsandsteins wird der Gipskeuper der Verwitterung ausgesetzt und Hangbewegungen stellen sich ein.

**Jura:** An das Keuperbergland schließt sich im Südosten die Schichtstufenlandschaft des Jura an. Über die vorwiegend dunklen Tone, Mergel und Kalke des Schwarzen und Braunen Jura steigt die Landschaft bis zu den hellen Kalken des Weißen Juras am Albtrauf an. Nach dem überwiegend terrestrisch bestimmten Sedimentationsmilieu des Keupers wurden die Schichten des Jura nach der Transgression des Meeres in marinem Milieu abgelagert. Rutschungen sind vor allem für die weichen Tone und Mergel des Braunen Juras, besonders dort wo sie große Mächtigkeit erreichen, charakteristisch (Opalinuston, Brauner Jura  $\beta$ ).

**Tertiär:** Im Rupel, einer Stufe des Tertiärs kam es im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens und des Mainzer Beckens zur Ablagerung von tonigen Sedimenten, dem sog. Rupelton. In einem überwiegend marinen Ablagerungsraum mit brakischen und limnischen Einschaltungen wurden dunkle Schiefertone sedimentiert. Wegen der auftretenden Hangbewegungen gilt der Rupelton im Zusammenhang mit Baumaßnahmen als problematisch.

## 2.2 Erkundungsverfahren zur Untersuchung von Kriechhängen

In der Abb. 3 sind die geologischen Kenngrößen und Merkmale von Kriechhängen aufgeführt, Wertebereiche für Kenngrößen angegeben und die jeweiligen Bestimmungsmethoden genannt. Sie werden bei der Beurteilung der Ausgangssituation und als Eingangswerte für die erdstatischen Berechnungen und die Bemessung der Sanierungsmaßnahme benötigt. Die Untersuchung eines Kriechhanges ist auf die Erkundung der Ausgangssituation, die den geologischen und topographischen Zustand des Hanges beschreibt, und der spezifischen Kenngrößen ausgerichtet. Die Ausgangssituation ist das Ergebnis von geologischen und morphologischen Prozessen, die in der Vergangenheit abliefen.

Merkmal	Wert/Beschreibung	Bestimmungsmethode
Topographie	$5^\circ < \text{Hangneigung } \beta < 25^\circ$	Ingenieurgeol. Kartierung
Oberflächenstruktur	unregelmäßig im Zentimeterbereich; Abrißkanten, Dellen, Beulen	Ingenieurgeol. Kartierung
Bewuchs	schrägstehende Bäume, Säbelwuchs, Grasnarbenrutschungen	Ingenieurgeol. Kartierung
Grundwassersituation	kein einheitlicher GW-Spiegel, Wasserwegsamkeit auf Trennflächen	Ingenieurgeol. Kartierung
Bodenart	bindig, Ton-Schluffgehalt $> 80\%$	Körnungslinie
Wichte $\gamma, \gamma_r$	Boden meist wassergesättigt, daher maßgebend $\gamma_r = 19 \div 21 \text{ kN/m}^3$	Raumgewichtsbestimmung mittels direkter Volumenermittlung
Plastizität $I_p$ Konsistenz $I_c$	$I_p > 0,25$ $0,02 < I_c < 0,06$	natürlicher Wassergehalt, Wassergehalt a.d. Konsistenzgrenzen
Zähigkeitsindex $I_{v\alpha}$	$0,02 < I_{v\alpha} < 0,06$	Dreiaxialversuche mit sprunghaften Geschwindigkeitsänderungen, Korrelation
Scherparameter $\varphi'_r$	Winkel der Restschfestigkeit maßgebend $\varphi'_r < 15^\circ$	Ringscherversuche, erdstatische Rückrechnung
maßgebende tiefe Gleitfuge	zwischen 2 und 20m tiefe, $\pm$ oberflächenparallel verlaufende Scherzone geringer Dicke (wenige Zentimeter), die als maßgebender Bewegungshorizont (Gleitfuge) wirkt.	geol. (Verwitterungs-) Profil Bohrlochneigungs- sondierungen
Kriechgeschwindigkeit $v_0$	i.d.R. $1 \text{ cm/Jahr} < v_0 < 1 \text{ m/Jahr}$	Geodätische Verschiebungsmessungen, Bohrlochneigungs- sondierungen

Abbildung 3: Geologische Kenngrößen und Merkmale von Kriehängen [Lippomann, 1988]

Der erste Schritt bei der Untersuchung eines Kriechhanges ist die ingenieurgeologische Kartierung des betroffenen Bereichs. Hierbei werden die Topographie, die flächenhafte Ausdehnung des Rutschgebiets, die Geologie und die Grundwassersituation aufgenommen. Das Ergebnis der Kartierung führt zur Planung der folgenden Untersuchungsschritte. Die Lage und Anzahl der Bohrungen, die Probennahme und die Durchführung der in-situ-Versuche werden festgelegt.

Die beobachteten Phänomene der Hangbewegungen, wie Abrißkanten, Form des Bewuchses und mögliche Schäden an Bauwerken sind in vielen Publikationen beschrieben (z.B. [Krauter, 1987]). Sie dienen zur Bestimmung der Ausdehnung des Kriechhanges und geben Hinweise auf die Bewegungsgeschwindigkeit. Anhand oberflächennaher Aufschlüsse und der regionalgeologischen Information aus Karten und Literatur werden die beteiligten geologischen Einheiten und ihre Lage im Hang ermittelt. Quellen und Vernässungsstellen im Hangbereich geben einen ersten Eindruck über die Grundwassersituation.

Die Auswertung der Bohrungen liefert weitere Informationen über die Geologie und Grundwassersituation des Hanges. Aufgeweichte und zersicherte Zonen können auf die Lage der Gleitfläche hinweisen. Die Bohrungen dienen darüber hinaus auch zur Entnahme von gestörten und ungestörten Bodenproben, der Durchführung von in-situ-Versuchen und dem Einbau einer Neigungsmeßeinrichtung.

An den Bodenproben werden im Labor konventionelle bodenmechanische Untersuchungen zur Bestimmung der Bodenart, Wichte, Wassergehalt, Plastizität und Konsistenz durchgeführt. Diese Untersuchungen sind bodenmechanische Standardversuche, die nicht für eine Anwendung auf das Kriechhangproblem modifiziert werden müssen.

Einige kriechhangspezifischen Parameter wurden bis dato aus Verfahren und Erkenntnissen, die im Rahmen anderer Anwendungen entwickelt wurden, hergeleitet oder aus Rückrechnung bestimmt. Dazu gehören der Zähigkeitsindex, die Scherfestigkeit in der Gleitfuge, der Bettungsmodul, die Grenzdehnung und die Kriechgeschwindigkeit. Neue und verbesserte Verfahren zu ihrer Bestimmung werden in Kapitel 3 vorgestellt.

### **2.3 Geotechnische Klassifikation toniger Kriechhänge**

Als Grundlage der geotechnischen Klassifikation toniger Kriechhänge dienen die Ansätze zur Standsicherheit verdübelter Hänge, wie sie ausführlich in den Arbeiten von Schwarz (1987) und Lippomann (1988) dargestellt sind. Die darin verwendeten Kenngrößen werden

mit den beschriebenen Erkundungsverfahren ermittelt. Die Bedeutung des sog. Zähigkeitsindex und die Art seiner Bestimmung werden im Abschnitt 3.2 erläutert.

Aus diesen Ansätzen ergibt sich eine Kraft, die von den Dübeln zur Bremsung in den Hang eingeleitet werden muß zu:

$$B = b \cdot l \cdot \tau_0 \cdot I_{v\alpha} \cdot \ln\left(\frac{v_0}{v_1}\right)$$

mit:

$B$  := Bremskraft

$b$  := Breite einer kriechenden Scholle

$l$  := Länge einer kriechenden Scholle

$\tau_0$  := mittlere Schubspannung auf der Gleitfuge

$I_{v\alpha}$  := Zähigkeitsindex

$v_0$  := Kriechgeschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t_0$

$v_1$  := Kriechgeschwindigkeit zum Zeitpunkt  $t_1$

Die mittlere Schubspannung in der Gleitfuge errechnet sich aus:

$$\tau_0 = \gamma \cdot h \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta$$

mit:

$\gamma$  := Wichte des Bodens

$h$  := Tiefenlage der Gleitfuge

$\beta$  := Hangneigungswinkel

Als spezifische Hangkraft, bezogen auf eine Einheitsfläche von  $1\text{m}^2$  wird nach Lippomann (1988) die Größe

$$\tau_0 \cdot I_{v\alpha}$$

bezeichnet. In ihr sind die maßgebenden geologischen Kenngrößen enthalten. Die Topographie geht als Hangneigung  $\beta$ , die Grundwassersituation und Bodenart mit der Wichte  $\gamma$  ein. Die Bodenart wird zusätzlich noch von  $I_{v\alpha}$  gekennzeichnet. Die wichtigste Kenngröße zur Beschreibung des Gleitkörpers ist die Tiefenlage der Gleitfuge  $h$ .

Aus Parameteranalysen mit den Daten verschiedener Kriechhänge konnte in Abhängigkeit von der spezifischen Hangkraft und der Kriechgeschwindigkeit ein Kriechhangspektrum zur geotechnischen Klassifikation von Hängen erarbeitet werden. Die Grenzen zwischen den Spektrenbereichen wurde dabei empirisch über Schwellenbetrachtungen festgelegt. Das Kriechhangspektrum ist auf Seite 14 dargestellt.

Folgende Kategorien werden unterschieden:

Kategorie violett (v):

'Kryptokriechhang' mit geringer Gleitfugentiefe  $h < 2\text{m}$  und kaum merklicher Bewegung;  $v_0 < 0,5\text{cm/Jahr}$ . Wird meist nicht als Kriechhang erkannt, eine Sicherung ist nur in Ausnahmefällen notwendig.

Kategorie indigo (i):

'Langsamer Kriechhang', dessen Bewegungen so langsam sind ( $v_0 < 1\text{cm/Jahr}$ ), daß auch hohe spezifische Hangkräfte nicht zu ernsthaften Problemen führen. Bauliche Nutzungen sind leicht eingeschränkt, meist ist eine Sicherung einzelner Bauwerke ausreichend. Grundsätzlich sind alle bekannten Sicherungsverfahren anwendbar.

Kategorie blau (b):

'Flacher Kriechhang' mit Gleitfugentiefe  $h < 6\text{m}$  und Kriechgeschwindigkeiten unter  $3\text{cm/Jahr}$ . Bauliche Nutzungen sind eingeschränkt, wenn keine Sicherung des gesamten Hanges erfolgt. Steife Stützkonstruktionen sind wenig, Verdübelung optimal geeignet.

Kategorie grün (g):

'Typischer Kriechhang' mit  $v_0$  bis  $10\text{cm/Jahr}$  und  $h$  bis  $8\text{m}$ . Bauliche Nutzungen sind nur nach Sanierung möglich, die Sicherung durch Verdübelung ist meist die einzige Alternative. In der Regel reichen sog. Normaldübel ( $\text{Ø}40 - 90\text{cm}$ ) aus.

Kategorie gelb (y):

'Tiefer Kriechhang' oder 'Schneller Kriechhang' mit großer Gleitfugentiefe bis  $12\text{m}$  oder mit hoher Kriechgeschwindigkeit bis  $30\text{cm/Jahr}$ , oder ungünstiger Kombination aus beiden. Eine bauliche Nutzung ist nur mit aufwendiger Sicherung möglich und z.T. trotz Sicherung noch eingeschränkt. Oft sind Kombinationen verschiedener Sicherungen notwendig, als Dübeltyp sind meist Großdübel ( $\text{Ø} > 90\text{cm}$ ) erforderlich.

Kategorie orange (o):

'Problematischer Kriechhang' mit noch ungünstigeren Werten als Kategorie y;  $v_0$  bis  $1\text{m/Jahr}$ ,  $h$  bis  $20\text{m}$ . Eine Sanierung ist nur mit sehr großem Aufwand und dennoch nur eingeschränkt möglich. Die meisten Sicherungsverfahren sind hierfür ungeeignet, die Verdübelung ist an ihrer Leistungsgrenze.

Kategorie rot (r):

'Monster-Kriechhang'. Ungewöhnlich hohe Kriechgeschwindigkeit und / oder tiefliegende Gleitfuge schließen den Hang für bauliche Nutzungen praktisch aus. Sanierungen sind meist technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unvertretbar.

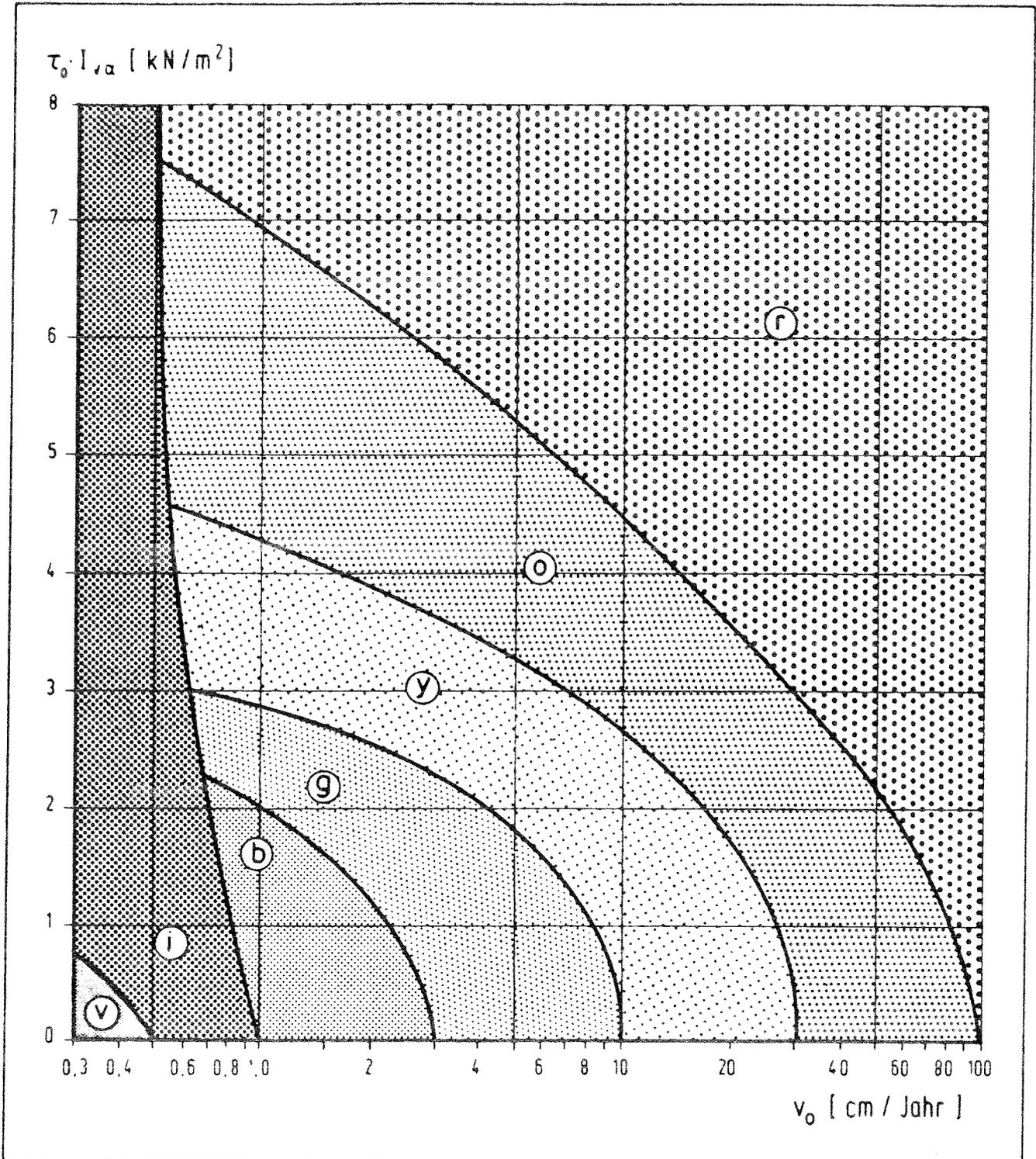


Abbildung 4: Kriechangenspektrum zur geotechnischen Einteilung von Hangbewegungen [Lippomann, 1988]

### 3 Methoden zur Untersuchung von Kriechhängen

Über die im Rahmen der ingenieurgeologischen Erkundung und den bodenmechanischen Standardversuchen hinaus ermittelten Informationen und Kennwerte ist die Kenntnis weiterer Parameter notwendig. Sie dienen der Beurteilung des Kriechhanges und der Dimensionierung einer Verdübelung. Ein Teil von ihnen wird in-situ bestimmt, ein anderer in Laborversuchen, für die eine möglichst schonende Probennahme und Aufbewahrung notwendig ist.

#### 3.1 Probenahme und Aufbewahrung

Die Untersuchung weicher toniger Böden setzt nicht nur einen sorgfältigen Umgang beim Probeneinbau und der Versuchsdurchführung im Labor voraus, sondern bedingt auch eine ebenso sorgfältige und schonende Vorgehensweise bei Probennahme und -lagerung. Aber gerade hier machen Baustellenbedingungen, unkontrollierte Einflüsse beim Bohreinsatz und beim Transport Störungen des Probenmaterials möglich.

##### Probennahme

Bei der Entnahme ungestörter Bodenproben toniger Sedimente in einem Bohrloch wird üblicherweise ein Hohlzylinder, der sich in einem Kernrohr befindet, in den anstehenden Boden der Bohrlochsohle gedrückt. Das Kernrohr mit der Probe wird gedreht, um die Probe am Fuß abzuscheren und dann gezogen. Beim Eindrücken des Zylinders wird der äußere Bereich der Probe durch das Eindringen der Schneide und die Mantelreibung des Zylinders gestört. Eine schlechte Führung des Kernrohres mit schrägem oder ungleichmäßigem Eindringen in den Boden vergrößert den gestörten äußeren Bereich der Probe.

Beim Ziehen des Kernrohrs entsteht ein Unterdruck am Bohrlochfuß, der ebenso wie das schlagartige Eindringen von Luft und die dabei entstehende Erschütterungen, häufig zum Verlust des Probenkerns führt. Erschütterungen können auch beim Ziehen des Kernrohres, besonders beim Wechseln des Bohrgestänges oder beim Anschlagen an die Bohrlochwandung entstehen.

Die geschilderten Probleme stellen sich grundsätzlich bei der Entnahme von ungestörten Bodenproben in einem Bohrloch. Weiche tonige Böden reagieren jedoch sehr empfindlich

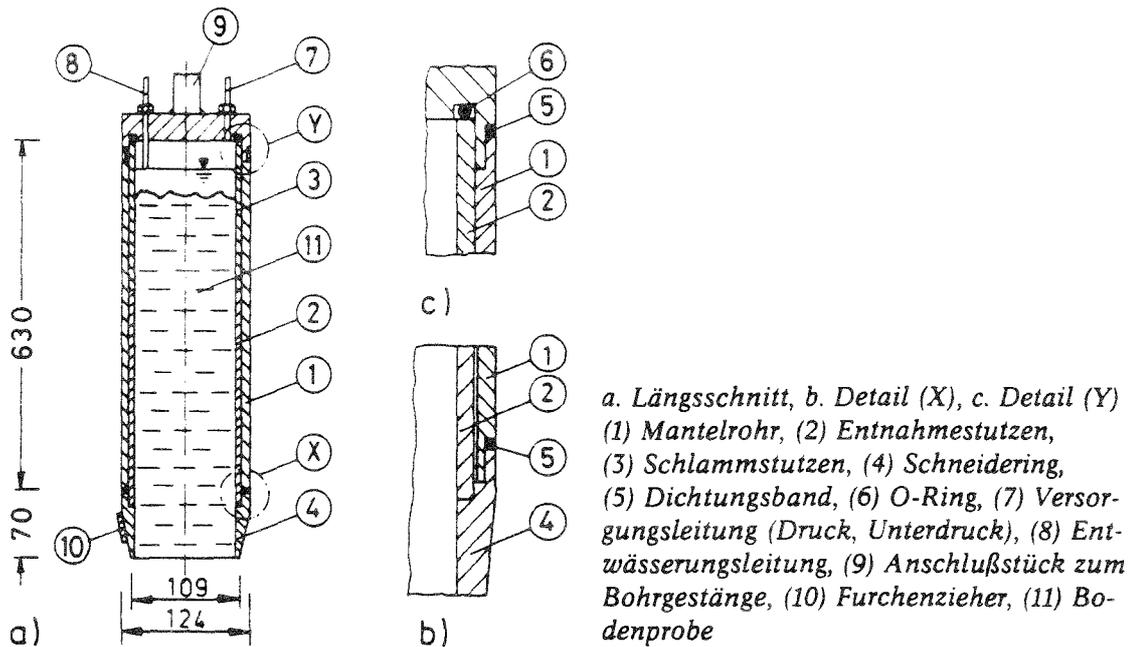


Abbildung 5: Gerät für die Entnahme von ungestörten Bodenproben aus einem Bohrloch [Goldscheider & Scherzinger, 1989]

auf diese Störungen und stellen deshalb die größten Anforderungen an Entnahmetechnik und Handhabung. Deshalb wurde speziell für diesen Zweck ein Probenahmegerät entwickelt, das nach diesem bewährten Entnahmeprinzip funktioniert, aber zur Minimierung der beschriebenen Störungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens modifiziert wurde ([Goldscheider & Scherzinger, 1989]; Abb. 5).

Der Entnahmestutzen besteht aus einem Mantelrohr (1) mit aufgeschraubtem Schneidring (4). Die Spitze der 70mm langen Schneide ist extrem dünnwandig. An der oberen Abschlußplatte befindet sich das Anschlußstück an das Bohrgestänge (9). In das Mantelrohr werden ein Entnahmestutzen (2) und ein Schlammstutzen (3) eingelegt. Mit dem Anschrauben der Schneide werden beide im Mantelrohr zwischen Schneide und dem Kopfteil verspannt. Die gewonnene Sonderprobe wird vom Entnahmestutzen aufgenommen. Der Schlammstutzen garantiert einen genügenden Abstand vom gestörten Bohrlochfuß, die Länge der Schneide sorgt dafür, daß auch hier ein genügender Abstand von der Störungszone, die durch das Abdrehen der Probe entsteht, eingehalten ist. Der Schneidring und der Entnahmestutzen sind innen glatt und haben den gleichen Innendurchmesser, um Reibungseinflüsse gering zu halten. Zur Verhinderung des Unterdrucks beim Ziehen des

Kernrohres ist an der Wandung eine Rippe (10) angeschweißt, die eine Furche durch den Boden zieht. Nach dem langsamen Eindrücken des Entnahmegeräts wird der obere, wassergefüllte Teil des Schlammstutzens über die Einleitung von Druckluft durch die Versorgungsleitung (7) und eine zweite Leitung (8) entwässert. Eine der Leitungen wird nun verschlossen und über die andere wird ein Unterdruck mit einer Pumpe erzeugt. Dieser Unterdruck wirkt beim Ziehen der Kohäsion und dem Unterdruck am Ende des Schneidringes entgegen und hält die Probe im Zylinder fest. Einem Herausrutschen der Probe durch Erschütterungen beim Ziehen wird so ebenfalls entgegengewirkt.

Das beschriebene Entnahmegerät gewährleistet bei sorgfältiger Handhabung die Gewinnung einer Probe, selbst in sehr weichem, tonigen Untergrund, wie er bei aufgeweichten Tonhängen häufig zu finden ist, bei einer nur sehr geringen Störung des Kernmaterials.

Nachdem der Entnahmestutzen aus dem Kernrohr ausgebaut und das im Schlammstutzen und im Schneidring überstehende Material abgeschnitten wurde, kann die Probe direkt in das Aufbewahrungsgerät eingebaut werden.

### **Probenaufbewahrung und Transport**

Zwischen der Entnahme einer Bodenprobe und ihrer Untersuchung im bodenmechanischen Labor ist sie den Störeinflüssen von Transport und Lagerung ausgesetzt:

- Ein Bodenkörper im Untergrund befindet sich in einem Spannungszustand, der von der Mächtigkeit der Überlagerung und der Wichte des überlagernden Materials abhängt. Entnimmt man daraus eine Probe, so ändert sich durch die Wegnahme der Überlagerung und des umgebenden Bodens im Laufe der Zeit dieser Spannungszustand. Es hat sich gezeigt, daß dies auch einen Einfluß auf die Ergebnisse von bodenmechanischen Versuchen hat. Erschütterungen, wie sie bei dem Transport der Proben vorkommen, beschleunigen diese Entspannung.
- Wird die Probe der Luft ausgesetzt, kann sich nicht nur der Wassergehalt ändern, sondern es können auch chemische Veränderungen des Tonmaterials eintreten.

Um das auszuschließen wurde ein Probenaufbewahrungsgerät konstruiert, in dem die Proben vollkommen luft- und wasserdicht verpackt und damit eine Änderung des Wassergehalts und des Chemismus verhindert wird.

Die Proben werden in dem Aufbewahrungsgerät undränniert ungefähr unter den totalen

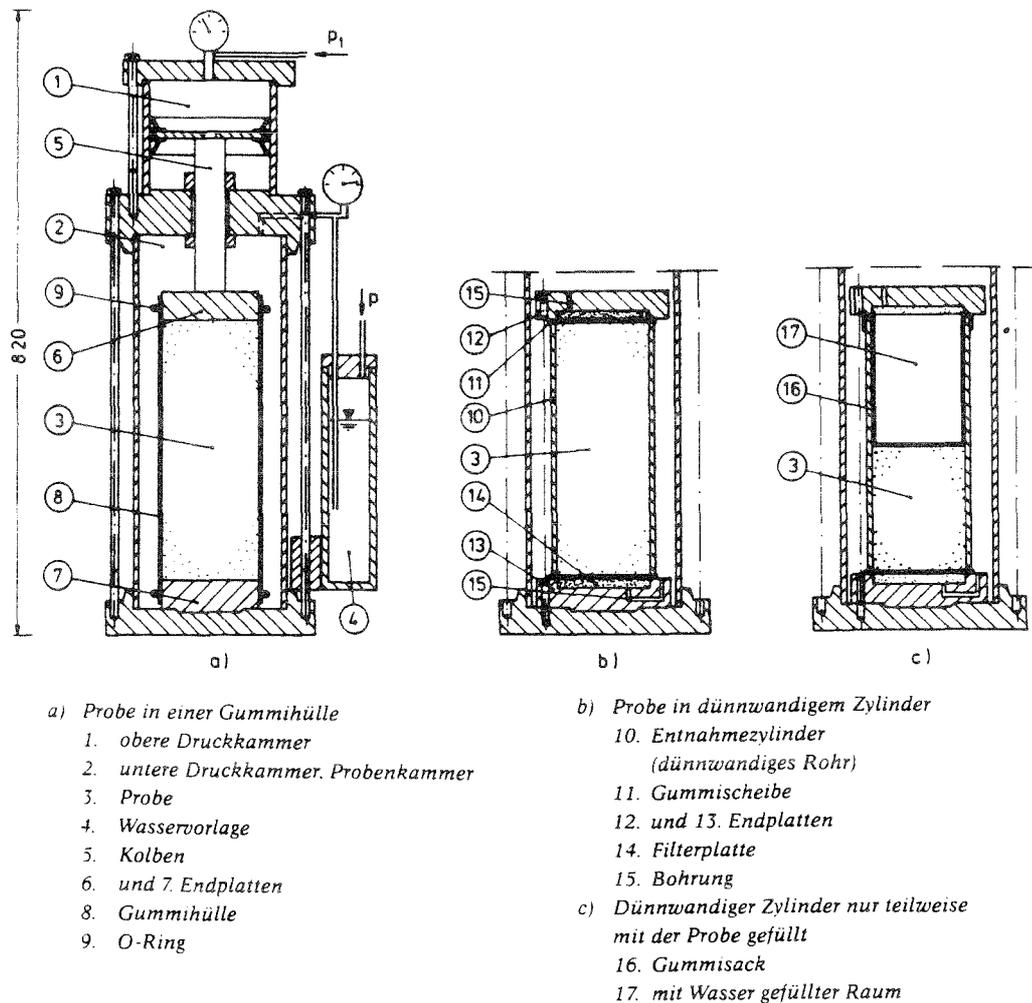


Abbildung 6: Schematische Zeichnung des Probenaufbewahrungsgeräts [Goldscheider & Scherzinger, 1987]

Druck gesetzt, dem sie zuvor im Boden ausgesetzt waren. So wird eine Entspannung während des Transports und der Lagerung verhindert.

Abb. 6 zeigt den Aufbau des Aufbewahrungsgeräts. Die Probe wird luft- und wasserdicht verpackt in die Probenkammer eingesetzt. Diese wird mit Wasser gefüllt und über die Wasservorlage mittels Druckluft allseitig unter Druck gesetzt. Soll die Probe in senkrechter Richtung einem größeren Druck ausgesetzt werden, kann über die obere Kammer und den Stempel ein zusätzlicher Druck aufgebracht werden. Die Behälter sind für Drücke bis 10 bar ausgelegt, was für Proben bis zu einer Entnahmetiefe von ca. 50m ausreicht.

### 3.2 Laborversuche

Bei der Erkundung mußten zwei für die Beurteilung des Kriechhanges und für die Dimensionierung der Verdübelungsmaßnahme wichtige Parameter aus Korrelation abgeschätzt oder durch Rückrechnung bestimmt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens verbesserte bodenmechanische Laborversuche machen es jetzt möglich, Werte für den Zähigkeitsindex und die Scherfestigkeit in der Gleitfuge direkt zu bestimmen.

#### Bestimmung des Zähigkeitsindex $I_{v\alpha}$

Typische Kriechhangböden bestehen zu über 80% aus Ton und Schluff und weisen plastisches Verhalten auf. Sie sind meist wassergesättigt und von weicher bis steifer Konsistenz. Bei solchen bindigen Erdstoffen treten Effekte auf, bei denen der Einfluß der Zeit eine Rolle spielt. Das Kriechen von Hängen und Böschungen ist ein Beispiel für dieses zeitabhängige Verhalten des Bodens, das in der Mikrostruktur der Tone begründet liegt. Das Material wird als viskos bezeichnet. Bei Verformungen kann der Einfluß der Zeit durch die Verformungsgeschwindigkeit ausgedrückt werden. Bei Scherbeanspruchungen in Versuchen tritt eine geschwindigkeitsabhängige Reaktion auf. Leinenkugel (1978) beschreibt dieses Verhalten mit dem sog. Zähigkeitsindex  $I_{v\alpha}$ . Dieser geht in die Bestimmung der spezifischen Hangkraft (Abschnitt 2.3) und bei der Bemessung der Verdübelungsmaßnahme in die Ermittlung der erforderlichen Bremskraft und der Anzahl der erforderlichen Dübel direkt ein [Gudehus, 1984].

Eine einfache, aber grobe Bestimmungsmöglichkeit von  $I_{v\alpha}$  besteht in der Korrelation mit dem Wassergehalt an der Fließgrenze. Dieser Zusammenhang wurde von Gudehus & Leinenkugel (1978) beschrieben (Abb. 7).

Im Labor läßt sich der Zähigkeitsindex durch Triaxialversuche mit sprunghafter Änderung der Kompressionsgeschwindigkeit ermitteln. Versuchsstand und Versuchsbedingungen sind in Goldscheider et al. (1983) beschrieben. Abweichend von der üblichen Vorgehensweise wird nach Erreichen eines Plateaus die Kompressionsgeschwindigkeit mehrfach geändert und jede Phase bis zum Erreichen eines Plateaus gefahren. In Abb. 8 ist ein typischer Versuchsverlauf im  $\tau - \epsilon$  Diagramm dargestellt. Der Pfad eines konventionellen Versuchs ohne Geschwindigkeitssprünge würde in Abb. 8 der gestrichelten  $\tau_2$  - Linie folgen. Durch Erhöhung bzw. Erniedrigung der Geschwindigkeit wird ein  $\tau_\alpha \hat{=} \tau_1$  bzw.  $\tau_\alpha \hat{=} \tau_3$  erreicht. Das jeweilige  $I_{v\alpha}$  für  $\dot{\epsilon}_1$  bzw.  $\dot{\epsilon}_3$  wird mit der in der Abb. 8 angegebenen Gleichung berechnet.

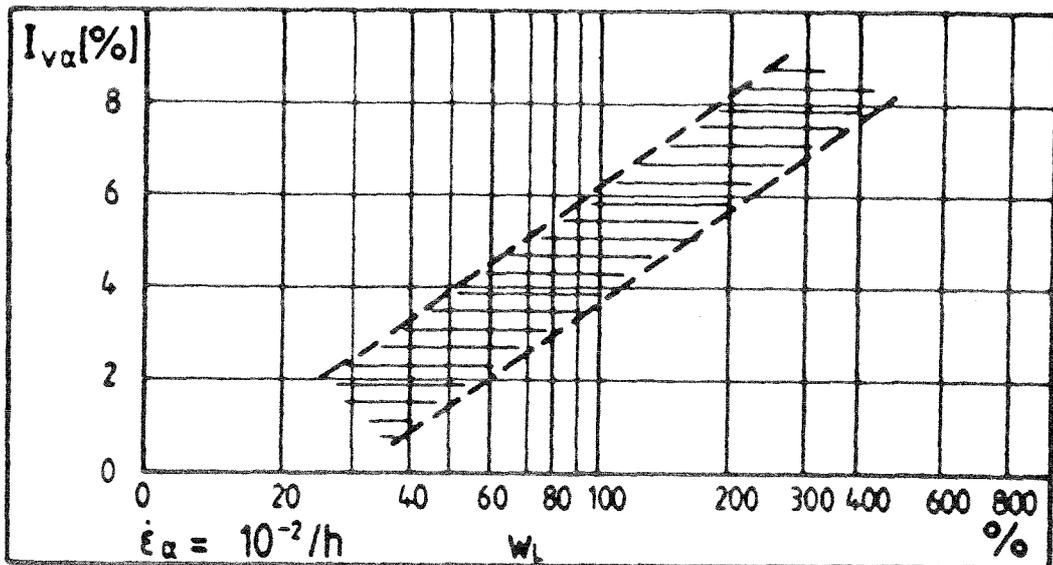


Abbildung 7: Bestimmung des Zähigkeitsindex'  $I_{v\alpha}$  durch Korrelation mit dem Wassergehalt an der Fließgrenze  $w_L$  nach Gudehus & Leinenkugel (1978).

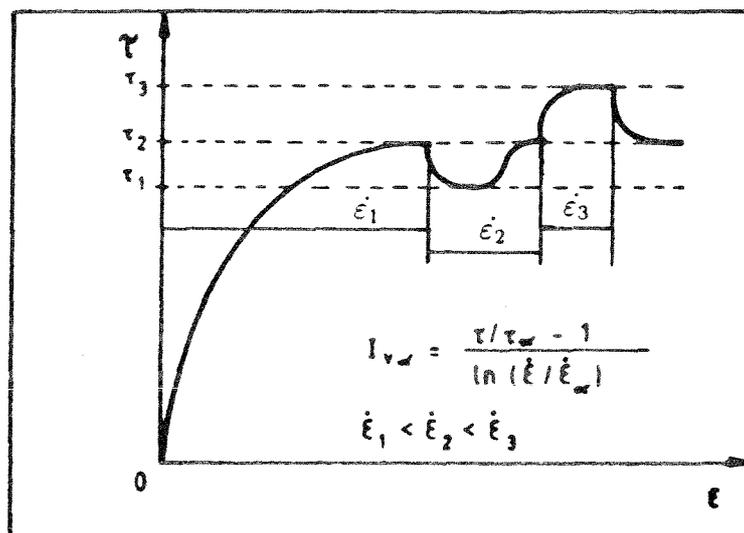


Abbildung 8: Bestimmung des Zähigkeitsindex'  $I_{v\alpha}$  durch sprunghafte Änderung der Kompressionsgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  und daraus resultierender Schubspannungsänderung im Triaxialversuch.

## Bestimmung der Scherfestigkeit in der Gleitfuge

Die Kriechbewegung eines Tonhanges findet auf einer mehr oder weniger parallel zur Hangoberfläche verlaufenden Scherfläche oder in einer geringmächtigen Scherzone statt. Diese Bewegungshorizonte verlaufen in Südwest-Deutschland normalerweise in Tiefen zwischen 2 und 20m. Ihre Dicke beträgt nur wenige Zentimeter. Da Kriechbewegungen auch bei sehr geringen Hangneigungen beobachtet werden können, muß die Scherfestigkeit in den Scherzonen sehr gering sein. Scherversuche an Kriechhangmaterial ergeben jedoch Reibungswinkel, bei denen sich die Hänge nicht bewegen dürften. Die für die Bewertung und Sanierung eines Kriechhanges maßgebende Scherfestigkeit auf der Gleitfuge wurde deshalb entweder über die Restscherfestigkeit aus Scherversuchen oder aus Rückrechnung eines sog. Bruchmechanismus abgeschätzt [Lippomann, 1988].

Eine direkte Bestimmung der Scherfestigkeit in der Gleitfuge wird durch die Anwendung von modifizierten Triaxialversuchen möglich. Dabei wird eine Probe mit einer vorhandenen Gleitfläche oder eine durchschnittene Probe in den Versuchsstand eingebaut.

Bei den Erkundungsbohrungen ist darauf zu achten, daß alle Tiefenbereiche, in denen sich Scherzonen befinden können, aufgeschlossen werden. Dies setzt die Kenntnis der regionalen Geologie und die Beurteilung des angetroffenen Untergrunds mit Verwitterungszuständen und Gefüge während der Bohrarbeiten voraus. In den in Frage kommenden Tiefenbereichen werden mit dem Entnahmegesetz Sonderproben genommen, die im Labor auf das Vorhandensein von Gleitfugen untersucht werden. Sie können entweder als Harnisch, oder über die Änderungen von Farbe und Struktur des Bodens, die auf Mineralumbildungen und chemische Umwandlungen zurückgehen, erkannt werden [Einsele & Gierer, 1976].

Vor dem Einbau in den Triaxialversuchsstand (z.B. nach [Goldscheider et al., 1983]), wird der zylindrische Probenkörper so herausgearbeitet, daß die Trennfläche unter  $45^\circ$  gegen die Zylinderachse geneigt ist (Abb. 9). Durch diese Ausrichtung der Probe in der Versuchszelle wird das Verschieben der Bruchkörper entlang der Trennfläche gewährleistet. Die Bohrlochachse stimmt jetzt jedoch nicht mehr mit der Längsachse der Probe überein. Der Probendurchmesser beträgt 40mm, die Probenhöhe 70mm. In der Triaxialzelle wird eine geschmierte Kopfplatte verwendet, damit sich der Teilkörper oberhalb der Trennfläche möglichst ohne eine Behinderung durch Reibung verschieben kann. Bei der Durchführung des Versuchs versagt die Probe nach einer kleinen axialen Stauchung entlang der Trennfläche. Der obere Teilkörper verschiebt sich auf dem unteren, wobei beide Teilkörper starr bleiben. Bei der Auswertung sind die verbleibende Endflächenreibung,

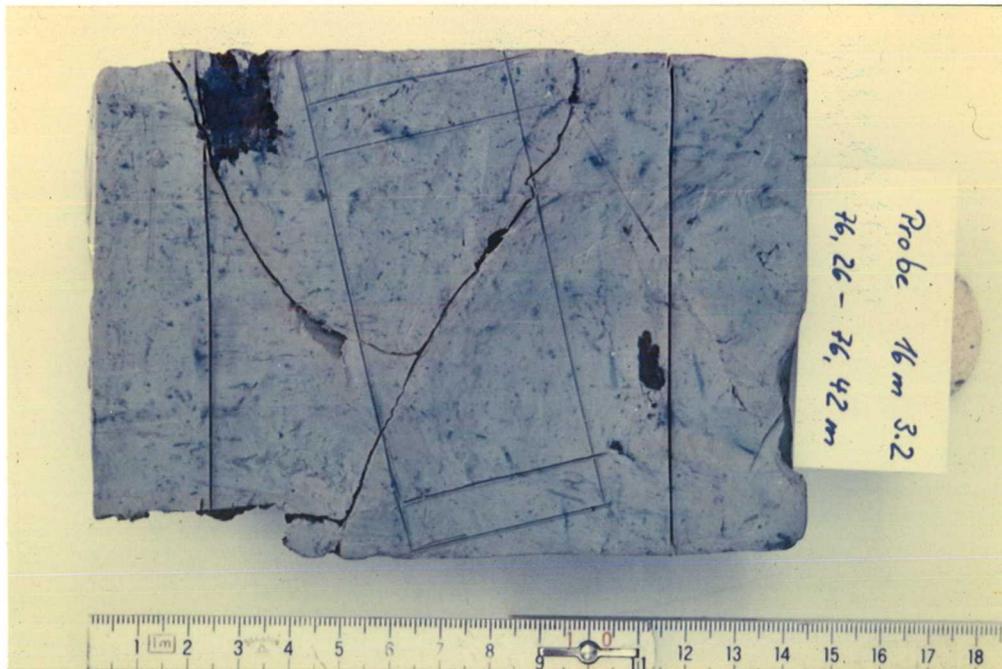


Abbildung 9: Herausarbeiten eines Probekörpers aus einem Bohrkern mit vorhandener Trennfläche [Goldscheider & Böisinger, 1989]

die Gummihülle und die beobachteten Geometrieänderungen zu berücksichtigen. Bei der Auswertung einer Versuchsserie aus mindestens drei Versuchen und ihrer Darstellung im  $\tau$ ,  $\sigma$ -Diagramm ergibt sich die gesuchte Scherfestigkeit in der Gleitfuge.

Im Rahmen eines Kriechhangproblems bei Tagebaurandböschungen konnte diese Versuchstechnik erstmals eingesetzt werden [Goldscheider & Böisinger, 1989]. Es wurden dabei nicht nur Proben mit natürlichen Trennflächen untersucht, sondern einige Probenzylinder wurden unter  $45^\circ$  durchgeschnitten, also eine künstliche Trennfläche geschaffen. Es zeigte sich, daß die Ergebnisse der Versuche mit natürlichen und künstlichen Trennflächen im wesentlichen übereinstimmten und die Reibungswinkel wesentlich kleiner waren, als sie für den Boden ohne Trennflächen ermittelt wurden. Durch Überprüfung der Ergebnisse durch Rückrechnung wurde bestätigt, daß die beschriebene Versuchsart dazu geeignet ist, die Gleitfestigkeit sehr genau zu bestimmen. Außerdem zeigte sich bei den Versuchen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, daß nicht nur Proben mit natürlichen Trennflächen gute Ergebnisse liefern, sondern auch Proben, die erst im Labor ihre Gleitfläche erhalten.



Die vorhandene Neigungsmeßeinrichtung wurde mit einem Laptop ausgestattet, der es erlaubt, den Meßvorgang zu steuern, die Daten auf einen Datenträger zu übertragen und auszudrucken. Wegen der eingeschränkten Anzeige- und Druckqualität erfolgen die Auswertung und Darstellung an einer größeren Computereinheit. Die rechnergestützte Steuerung des Meßvorganges beugt Fehlern beim Messen vor und verhindert so zeitaufwendige Meßwiederholungen. Ein Programm wurde zu diesem Zweck entwickelt.

### 3.4 Karlsruher Seitendrucksonde

Bei der Sanierung eines Kriechhanges durch Hangverdübelung werden einzelne Ortbetonpfähle in einem von der Gestalt und den Eigenschaften des Kriechhanges und der Bemessung der Sanierung abhängigen Durchmesser, Anzahl und Anordnung eingebaut. Die Wechselwirkung des Systems Einzeldübel-Boden wird dabei durch ein lineares Kraft-Verschiebungsgesetz der Form

$$H = K \cdot w$$

mit

$H$  := Auf den Dübel wirkender Seitendruck pro Tiefeneinheit

$K$  := Bettungsmodul

$w$  := Relativverschiebung des Dübels gegen den Boden

dargestellt. Diese Beziehung beschreibt ein Verhalten, das auf der Elastizität des Dübels und seiner Einbettung im Boden beruht. Der Bettungsmodul  $K$  ist maßgebend für die horizontale Tragfähigkeit des Bodens.

Wird eine bestimmte, bodenabhängige Grenzlast  $p_f$  erreicht, bleibt  $H$  auch bei weiterem Anwachsen der Verschiebung  $w$  konstant. Damit kann die Bettung strenggenommen nicht linear sein, läßt sich aber in der Form einer bilinearen Beziehung ausdrücken (Abb. 11).

Den Grenzwert  $p_f$  bezeichnet man als Fließdruck. Für die Bestimmung des Fließdrucks und des Bettungsmoduls liegen verschiedene Ansätze vor. Winter (1978) schlägt eine Abschätzung über

$$p_f \approx 5 \cdot c_u \cdot d_D$$

mit

$c_u$  := Kohäsion des undrainierten Bodens

$d_D$  := Dübeldurchmesser

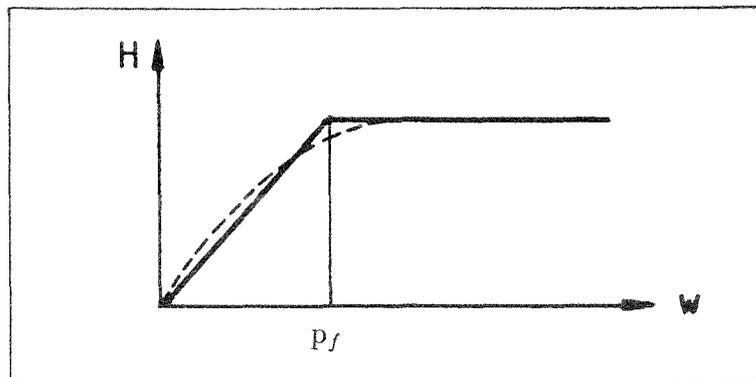


Abbildung 11: Durch bilinearen Ansatz approximiertes Verhalten von Horizontallast über Dübelverschiebung [Gudehus, 1984]

vor. Eine Möglichkeit der in situ-Ermittlung bietet eine Dübelprobelastung oder die Bohrlochaufweitung. Bei der Dübelprobelastung werden zwei Dübel am Kopf voneinander weggedrückt oder zusammengezogen und die Kraft-Verschiebungsreaktion gemessen. Der Aufwand bei diesem Versuch ist jedoch sehr groß. Weit weniger Aufwand benötigt die Bohrlochaufweitung mit einer sog. Seitendrucksonde [Seeger, 1980]. Die Aufweitung eines Bohrlochs mit einer Seitendrucksonde kommt der Beanspruchung des Bodens durch Dübel ziemlich nahe. Mittels geeigneter Übertragungsfaktoren zur Berücksichtigung der Sondengeometrie können Bettungsmodul und Fließdruck aus den Versuchsergebnissen abgeleitet werden. Seitendrucksondierungen können in verschiedenen Tiefen durchgeführt werden und daher eine sehr genaue Beurteilung des Untergrunds ermöglichen. Voraussetzung für die Ermittlung des Fließdrucks ist jedoch ein ausreichender Verformungsweg, um den Grenzzustand des Bodens zu erreichen; bei weichen Böden ist dies mit den bisher verfügbaren Sonden technisch nicht möglich.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Karlsruher Seitendrucksonde entwickelt und gebaut, die durch ihre Gestalt und ihre Eigenschaften einige der Probleme bestehender SONDENSYSTEME löst. Bisher verfügbare Sonden bestehen, wie z.B. die sog. Stuttgarter Seitendrucksonde [Seeger, 1980] aus zwei Halbschalen, die beidseitig in die Bohrlochwand gedrückt werden. Wie die Verformung im Bohrloch stattfindet, ob die Sonde z.B. aus der Senkrechten kippt, oder ob die Verformung beidseitig, oder nur an einer Seite stattfindet, kann weder beobachtet noch gesteuert werden. Da beide Halbschalen in die Bohrlochwand gedrückt werden, ist der Verformungsweg bei weichen Böden zum Erreichen des Fließdrucks meist zu gering. Da der Boden verformt und nicht seitlich über die Ränder hinaus verdrängt werden soll, ist die Druckplatte der Karlsruher Seitendrucksonde sehr lang und mit einem geraden oberen und unteren Abschluß ausgebildet

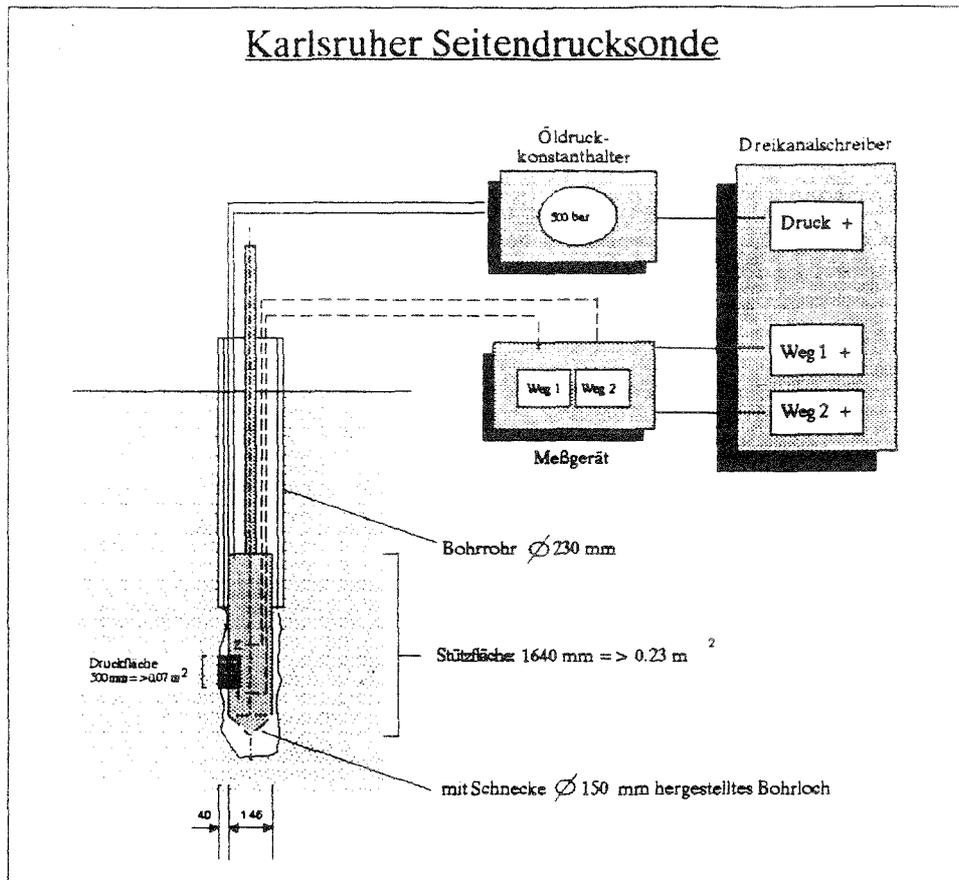


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Karlsruher Seitendrucksonde und der dazugehörigen Meßeinrichtung

worden.

Die Karlsruher Seitendrucksonde und der dazugehörige Regel- und Meßaufbau sind in den Abbildungen 12 bis 15 dargestellt. Die Sonde besteht aus einem 2,5m langen Sondenkörper, aus dem einseitig ein 500mm langes Segment um maximal 40mm ausgefahren werden kann. Der Durchmesser wurde entsprechend eines gängigen Bohrdurchmessers gewählt. Die Länge und Kompaktheit des Sondenkörpers ergibt sich aus der Anforderung, eine möglichst große und steife Stützfläche zu bieten, so daß ein Eindringen in den Boden nur entlang des Druckplattensegments stattfindet. Herausgedrückt wird die Platte mittels druckgesteuerter Hydraulikstempel. Geführt wird sie während des Ausfahrens mit drei Metallstäben in Rollenlagern. Im oberen und unteren Drittel der Druckplatte sind je ein induktiver Weggeber angebracht. Entlang des Bohrgestänges, an dem die Sonde ins Bohrloch eingelassen wird, laufen die Hydraulikleitungen zu einer Pumpe mit Kon-



Abbildung 13: Karlsruher Seitendrucksonde, Meßeinrichtung und Bohrgerät

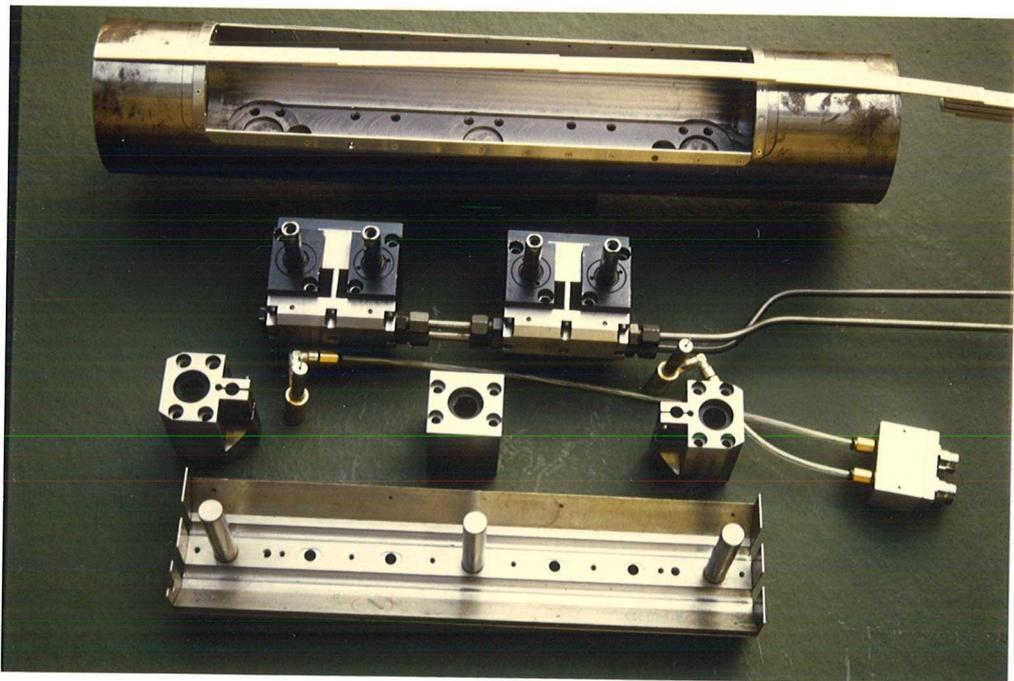


Abbildung 14: Sondenkörper mit Druckplatte, Lagern, Hydraulikdruckzylindern und Leitungen



Abbildung 15: Karlsruher Seitendrucksonde mit ausgefahrener Druckplatte

stanthalter, die eine maximale Bodenpressung von 200 kPa möglich machen. Die Werte der Weggeber werden von einem Meßgerät angezeigt und zusammen mit dem aktuellen Druck der Hydraulik mit einem Dreikanalschreiber aufgezeichnet.

Die Seitendrucksonde wird am Ende des Bohrgestänges befestigt und in das vorbereitete Bohrloch abgelassen (Abb. 16). Die Bohrung ist im oberen Teil verrohrt, damit sich der obere Teil der Sonde stabil abstützen kann. Die Bohrung eilt der Verrohrung um soweit voraus, daß die Druckplatte ca. 20cm unter der Verrohrung beginnt. Die Bohrung ist so ausgeführt, daß ein möglichst geringer offener Ringraum um den Sondenkörper bleibt. So wird gewährleistet, daß die Druckplatte und die Abstützung nach nur geringen Verschiebungen anliegen, und der größte Teil des Wegs zur Erreichung des Fließdrucks ausgenutzt werden kann. Der Versuch wird spätestens abgebrochen, wenn der

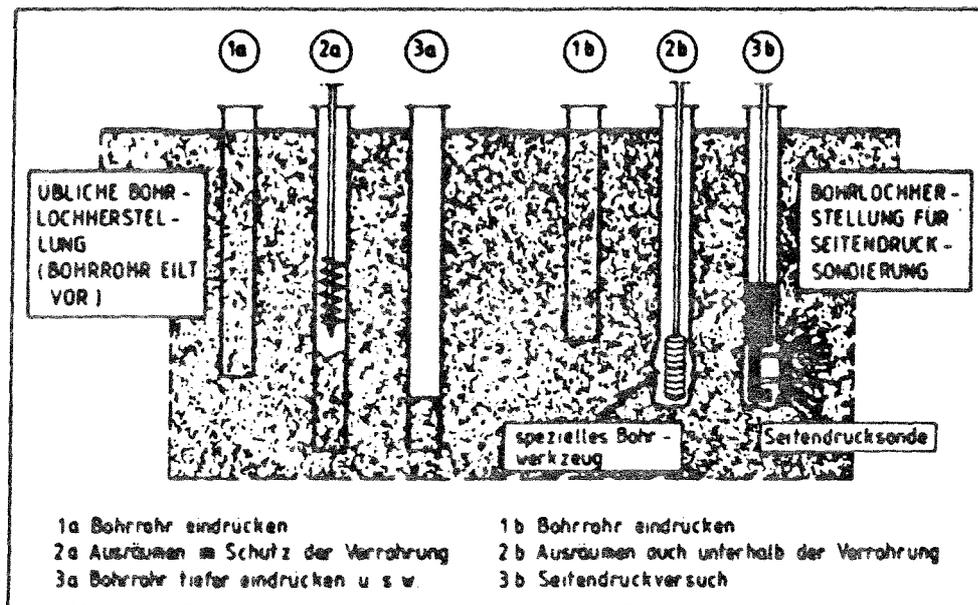


Abbildung 16: Herstellung eines Bohrlochs für die Seitendrucksondierung [Lippomann, 1988]

maximale Weg gefahren oder der maximale Druck aufgebracht ist. Mit den während des Versuchsablaufs aufgezeichneten Meßergebnissen wird das Kraft-Verschiebungsverhalten aufgezeichnet und auch der Bettungsmodul und der Fließdruck ermittelt.

Nach der Fertigstellung der Seitendrucksonde wurden erste Versuche zur Kalibrierung und zum Funktionstest durchgeführt. Versuche in Bohrungen in sandigem Material verliefen erfolgreich. Bei einem Einsatz der Karlsruher Seitendrucksonde in Tonen und Tonsteinen des Gipskeupers bei Heilbronn machte sich ein Nachteil der Sondenkonstruktion bemerkbar. Trotz der Führung der Druckplatte an Stahlstäben erwies sie sich hier als sehr empfindlich gegen Verkantung, ausgelöst durch Inhomogenitäten des anstehenden Bodens vor der Druckplatte. Die Versuche mußten bei einem Verkantungsmaß von 5mm abgebrochen werden, um eine Beschädigung der Rollenlager und der Druckstempel zu vermeiden. Die Verformungen reichten deshalb in diesen Fällen nicht aus, um den Fließdruck zu mobilisieren.

## 4 Ausführungsbeispiele

Durch die Anwendung der erarbeiteten Methoden in einem Ausführungsprojekt wird es möglich, die Forschungsergebnisse optimal darzustellen und zu erproben. Ein Kriechhang wird mit den vorgestellten Verfahren erkundet, Bohrungen entsprechend der aufgestellten Grundsätze geplant und hergestellt, Proben nach schonender Gewinnung und Aufbewahrung im Labor untersucht und in-situ Versuche durchgeführt. Nach der Auswertung der Ergebnisse, die als Grundlage erdstatischer Berechnungen dienen, wird die Verdübelungsmaßnahme geplant und bemessen. Die Ausführung wird überwacht und der Erfolg der Sanierung durch Kontrollen sichergestellt.

Aus terminlichen und organisatorischen Gründen war es nicht möglich, alle neu entwickelten Methoden in einem einzigen Ausführungsprojekt gleichzeitig anzuwenden. Deshalb werden drei Projekte vorgestellt, die alle der Überprüfung und Darstellung der Forschungsergebnisse in verschiedenen Abschnitten des Forschungsvorhabens dienen:

- **Ausführungsbeispiel Pfullingen**

Kriechbewegungen eines Hanges beschädigten ein neu errichtetes Gebäude. Auf Veranlassung der Gemeinde Pfullingen wurde die gesamte Verdübelungsmaßnahme des Kriechhanges von den Voruntersuchungen bis zur Erfolgskontrolle vom Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau betreut. Dieses Projekt ist beispielhaft ausgearbeitet und wird ausführlich dargestellt. Die Geräte zur Probenahme und -aufbewahrung und die Karlsruher Seitendrucksonde standen zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung.

- **Ausführungsbeispiel Stuttgart-Feuerbach**

Hangbewegungen in einem eng bebauten städtischen Wohngebiet in Hanglage machten eine schnelle Sanierung des Kriechhanges notwendig. Die Erkundung und Sicherung des Hanges wurde von der FMFA in Stuttgart betreut. Es bot sich die Gelegenheit einen Teil der von uns entwickelten Methoden, einschließlich der Karlsruher Seitendrucksonde und der Probenentnahme und -aufbewahrung, bei diesem interessanten und außergewöhnlichen Projekt anzuwenden.

- **Ausführungsbeispiel Weinsberg**

In Zusammenarbeit mit dem Straßenbauamt Heilbronn wurde der Hang oberhalb eines Straßenanschnitts gesichert. Wie im Ausführungsbeispiel Pfullingen standen die

Geräte zur Probenahme und -aufbewahrung und die Karlsruher Seitendrucksonde noch nicht zur Verfügung.

## 4.1 Ausführungsbeispiel Pfullingen

Anhaltende Kriechbewegungen eines aus Braunjura-Verwitterungsschutt bestehenden Hangs am südlichen Ortsrand von Pfullingen, Kreis Reutlingen, führten zur Beschädigung eines am Hangfuß gelegenen Wohnhauses durch die kriechenden Erdmassen. Zwei Jahre nach dem Bau des Hauses steigerten sich die direkt nach seiner Fertigstellung beobachteten langsamen Kriechbewegungen nach langanhaltenden Regenfällen so stark, daß Beschädigungen am Haus auftraten. Aus geodätischen Verschiebungsmessungen konnte eine maximale Kriechgeschwindigkeit von über 10cm pro Monat errechnet werden, die glücklicherweise nur kurze Zeit anhielt und anschließend deutlich sank. Dennoch mußte das Haus evakuiert werden, und zu seiner Rettung wurde eine Hangsicherung vorgesehen.

### Voruntersuchung

Auf der Basis von bereits erstellten geologischen Gutachten und geodätischen Verschiebungsmessungen wurde der Hang kartiert, und Bohransatzpunkte für Erkundungsbohrungen wurden festgelegt. Dank der Vorinformation aus bereits abgeteufte Bohrungen, aus dem Aufschluß durch die Baugrube sowie durch die Kartierungsergebnisse genügten drei weitere Bohrungen und 10 Sondierungen zur Untergrunderkundung. Die Anordnung (Abb. 17) wurde so gewählt, daß unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit sowohl eine hinreichende Untergrundbeschreibung als auch eine verlässliche Verschiebungsmessung möglich war. Die erforderliche Bohrtiefe konnte zu 10m festgelegt werden, da aufgrund der geologischen Beurteilung mittels der bereits vorhandenen Bohrprofile ab etwa 6m Tiefe feste Tonsteine zu erwarten waren.

Die drei Bohrungen wurden geologisch aufgenommen, und anschließend wurden die Bohrlöcher als Neigungspegel ausgebaut. Unmittelbar danach begannen die Neigungsmessungen zur Bestimmung der Tiefenlage der Scherzone und der Kriechgeschwindigkeit. Zwei zusätzlich angeordnete kurze Bohrungen sollten zur Beobachtung von Hangwasserständen dienen. Aus allen Bohrungen sollten aus verschiedenen Tiefen Proben für Laboruntersuchungen entnommen.

Die Erkundungsergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

Der mit 17° nach Osten einfallende Hang hat eine Länge von ca. 90m in Fallrichtung und eine Breite (höhenlinienparallel) von ca. 40m. Obere und seitliche Abgrenzungen können im Gelände an Abrißkanten und Horizontalverformungen festgestellt werden, am Hangfuß läßt sich als untere Grenze der in Bewegung befindlichen Erdscholle ein Gleitfugenausbiß

beobachten. Eine genauere Untersuchung der Abrißkanten zeigt, daß die jüngsten Bewegungen auf einen Bereich von 40m Länge und 25m Breite im untersten Hangabschnitt begrenzt waren.

Der Untergrund besteht aus bindigem Verwitterungsmaterial des mittleren Braunen Juras mit Anteilen des darüber befindlichen Weißen Juras. Darunter stehen halbsteife bis feste Tonsteine des unteren Braunen Juras (Dogger  $\beta$ ) an. Die Grenze zwischen diesen beiden Schichten verläuft annähernd oberflächenparallel, ist jedoch unter 5-8° nach Süden geneigt. Im nördlichen Hangabschnitt befindet sie sich in ca. 5m Tiefe unter Geländeoberkante, im Südteil in ca. 7m (Abb. 18).

Wasseraustritte waren im Hangbereich nicht zu beobachten. Die Sickerlinie - ein zusammenhängender Grundwasserspiegel bildet sich in dem Tonmaterial nicht aus - wurde in den Grundwasserbeobachtungsbohrungen und Sondierungen in Tiefen zwischen 3,5m und 6m unter Geländeoberfläche angetroffen.

In den bodenmechanischen Laborversuchen an den entnommenen Proben wurden die erforderlichen Bodenkennwerte bestimmt.

Aus den Indexversuchen erhielt man:

Kornverteilung:	45% Ton, 40% Schluff, 15% Feinsand
natürlicher Wassergehalt:	$w_n = 26\%$
Wassergehalt an der Ausrollgrenze:	$w_P = 20\%$
Wassergehalt an der Fließgrenze:	$w_L = 52\%$
Plastizitätsindex:	$I_P = 32\%$
Konsistenzzahl:	$I_C = 0,8$

Das Material ist daher als schluffiger, schwach feinsandiger Ton steifer Konsistenz mit ausgeprägt plastischen Eigenschaften (TA, nach DIN 18196) anzusprechen.

An vier ungestörten Proben wurden CU - Triaxialversuche (consolidated, undrained) in Mehrstufentechnik und mit Geschwindigkeitssprüngen durchgeführt.

Unter Berücksichtigung der maßgeblichen Einflußfaktoren ergaben sich gewogene Mittelwerte der Scherparameter von  $\varphi' = 27^\circ$  und  $c' = 10\text{kN/m}^2$ . Zu beachten ist hierbei, daß diese Scherparameter außerhalb von Gleitfugen gültig sind. Die in Gleitfugenbereichen wirksame Restscherfestigkeit, die für die Standsicherheit maßgebend ist, liegt deutlich niedriger und wurde im vorliegenden Fall durch Rückrechnung bestimmt. Mittels Geschwindigkeitsänderung während der Triaxialversuche ließ sich ein Zähigkeitsindex von

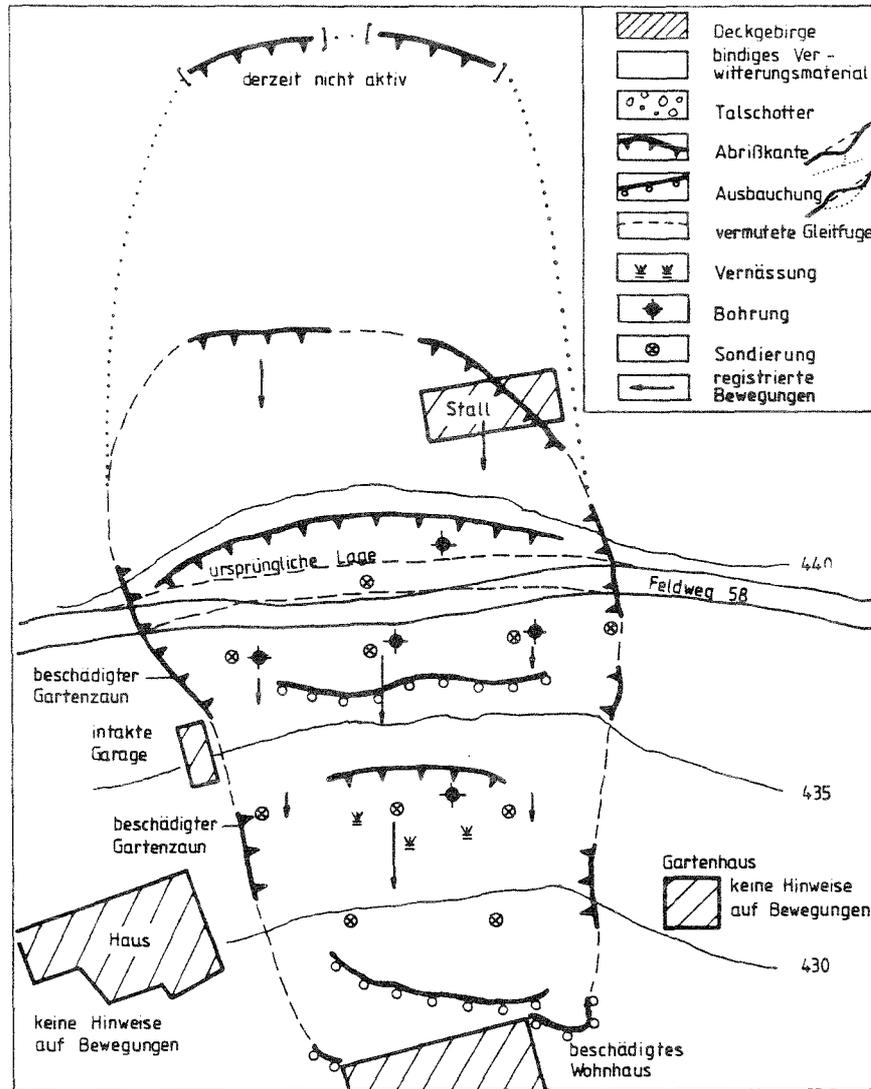


Abbildung 17: Lage der Bohransatzpunkte und Sondierungen in der ingenieurgeologischen Karte des Hanges

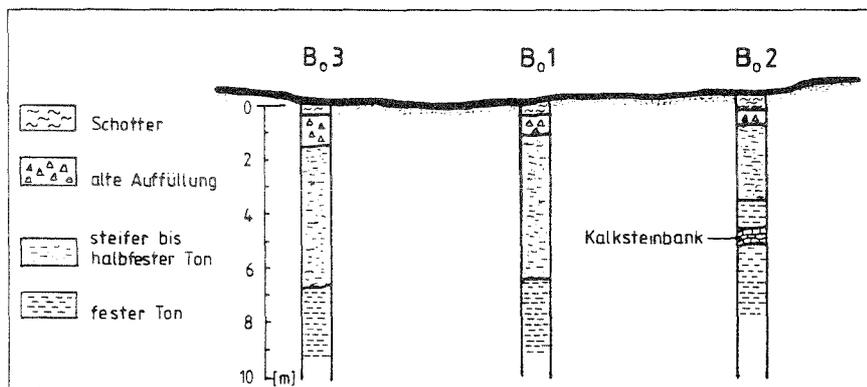


Abbildung 18: Bohrprofile der Bohrungen Bo1, Bo2 und Bo3

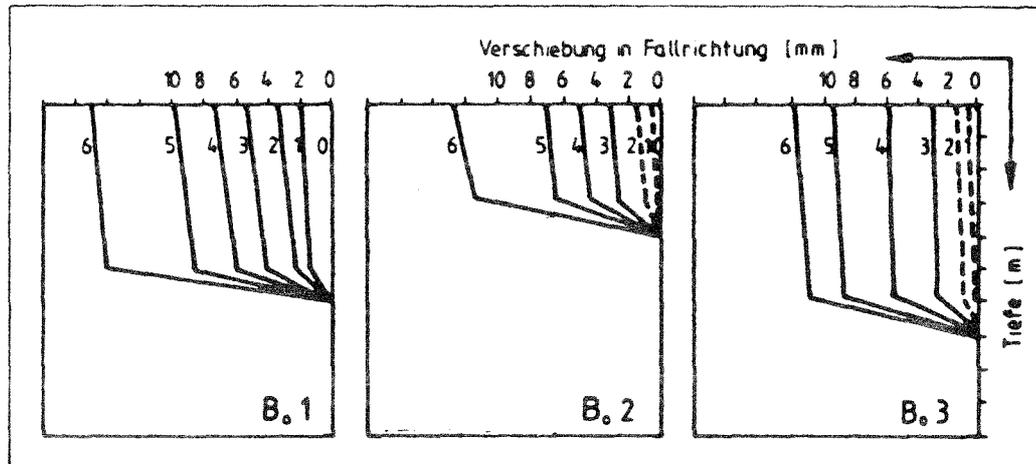


Abbildung 19: Auswertung der Bohrlochneigungsmessungen

$I_{va} = 0,036$  ermitteln; der gleiche Wert ergibt sich aus der Korrelation zwischen Zähigkeit und Wassergehalt an der Fließgrenze  $w_L$ . Ebenfalls aus den Triaxialversuchen konnten aus der Dehnung im Bruchzustand die Grenzdehnung  $\varepsilon_P = 5\%$  für den steifen und  $\varepsilon_P = 3\%$  für den halbfesten Ton bestimmt werden.

Für Proben aus einer Tiefe von 0,3m unter Geländeoberkante ergab sich bei Messungen mit einer Flügelsonde für die undrainierte Kohäsion  $c_u = 78\text{kN/m}^2$ . Da die Kohäsion in größeren Tiefen noch zunimmt, ist im folgenden mit  $c_u = 85\text{kN/m}^2$  gerechnet worden. An Proben der halbfesten Schichten unterhalb der Gleitfuge wurden keine Versuche durchgeführt; für die weiteren Berechnungen wurde der Erfahrungswert  $c_u = 300\text{kN/m}^2$ , wie er für derartige Schichten in früheren Versuchen ermittelt worden war, angesetzt.

Die Auswertung von Neigungsmessungen in den drei Bohrungen Bo1, Bo2 und Bo3 (Abb. 19) ergab im Beobachtungszeitraum von 13 Monaten durchschnittliche Verschiebungen von 15mm. Unter Berücksichtigung der geodätischen Verschiebungsmessungen wurden für die Berechnungen von einer Kriechgeschwindigkeit von 20mm pro Jahr ausgegangen. Die Tiefenlage der Scherzone zeigte keine signifikante Korrelation mit bestimmten Schichtgliedern; in Bohrung Bo1 lag sie in 5m Tiefe, in Bohrung Bo2 in 3m Tiefe und in Bo3 in 7m Tiefe. In einer erdstatischen Berechnung wurde die für die Standsicherheit maßgebenden Scherparameter durch eine Rückrechnung bestimmt. Dabei wurde die stattgefundenene Rutschung wie ein großmaßstäblicher Scherversuch betrachtet und ausgewertet. Für die Untersuchungen fand die kinematische Methode unter Annahme von Bruchmechanismen aus starren Körpern und ebenen Gleitfugen Anwendung. Aus den Daten der Gelände- und Untergrunduntersuchungen und den Ergebnissen der Neigungs Sondierungen wurden die möglichen Bruchmechanismen abgeleitet. Durch Iteration wurde der maßgebende Bruch-

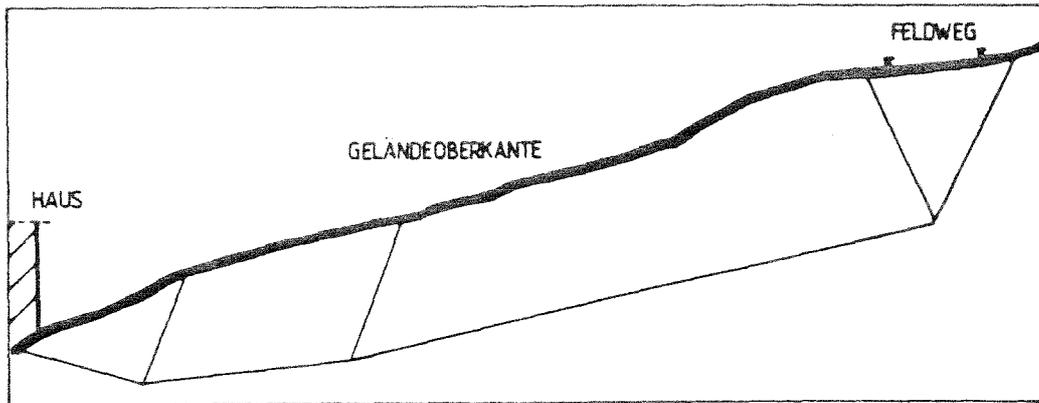


Abbildung 20: Maßgebender Bruchmechanismus für die Rückrechnung der Scherfestigkeit auf der Gleitfuge

mechanismus gefunden (Abb. 20); die Berechnung erfolgte auf einem HP-87 Computer.

Die Scherfestigkeit für den ungünstigsten Bruchmechanismus - ausgedrückt durch den Winkel der Gesamtscherfestigkeit  $\varphi'_s$  - betrug  $\varphi'_s = 17,64^\circ$  (Abb. 21). Das entspricht einem  $c_u$  - Wert auf der Gleitfuge von  $c_u = 25\text{kN/m}^2$ .

Mit den voranstehenden Daten konnte das Ergebnis der Voruntersuchen folgendermaßen formuliert werden:

Der flache Kriechhang hat einen charakteristischen Untergrundaufbau und Morphologie.

Die spezifische Hangkraft beträgt unter der Annahme von

$\tau_0 = c_u = 25\text{kN/m}^2$  auf der Gleitfläche und mit

$$I_{v\alpha} = 0,036$$

$$\tau_0 \cdot I_{v\alpha} = 0,9, \text{ bzw. mit } \tau_0 = \gamma \cdot h \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta : \tau_0 \cdot I_{v\alpha} = 1,03$$

und der durchschnittlichen Kriechgeschwindigkeit  $v_0 = 2\text{cm/Jahr}$  ist der Kriechhang der Kriechhang-Kategorie blau (b) zuzuordnen.

Ursache für die Hangbewegung ist die Verwitterung des Tonmaterials, aus dem die Deckschicht besteht; als Auslöser für stärkere und schwächere Bewegungsphasen wirken die Änderungen der Geometrie infolge baulicher Maßnahmen oder Hangwasserständen. Eine langfristige Stabilisierung wäre wegen des zähen Verhaltens des anstehenden Tonmaterials durch steife Konstruktionen nur schwierig zu realisieren. Darüberhinaus stünde der erforderliche finanzielle Aufwand nicht im Einklang mit dem angestrebten Nutzeffekt.

Die Wirksamkeit eines Drainagesystems kann bei den vorliegenden Untergrundverhältnissen mit vertretbarem Aufwand nicht sichergestellt werden.

Als dauerhafte, sichere und wirtschaftliche Stabilisierungsmaßnahme bietet sich eine Verdübelung der Gleitscholle mit dem festen Untergrund an.

### Bemessung

Dimensioniert wurde die Sicherung nach dem Bemessungsverfahren von Schwarz (1987), auf der Grundlage eines am Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau der Universität Karlsruhe entwickelten viskosen Stoffansatzes ([Leinenkugel, 1976]) sowie eines Berechnungsansatzes für horizontalen Fließdruck auf Pfähle ([Winter, 1979]). In einem Iterationsverfahren wird unter Vorgabe einer zulässigen Verschiebung bis zur vollen Wirksamkeit der Stabilisierung sowie einer Verschiebung innerhalb der vorgesehenen Lebensdauer zunächst das Sanierungsziel festgelegt. Nach Wahl eines durch die Geometrie bedingten Dübeldurchmessers bzw. einer Dübelsteifigkeit läßt sich unter Einbeziehung der Geländedaten und Bodenkennwerte die erforderliche Dübelzahl ermitteln. Nach Festlegung der optimalen Kenngrößen für den Einzeldübel in einer Vorbemessung mit Bemessungsdiagrammen wurde die erforderliche Dübelanzahl mit einer numerischen Berechnung bestimmt.

Soweit erforderlich, weil nicht durch die anschließende Meßüberwachung kontrolliert, wurden Streuungen der Kennwerte durch entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt.

Als Eingangsdaten für die Berechnung wurden verwendet:

#### Hangdaten:

Hangneigungswinkel	$\beta = 17,5^\circ$
Länge der Gleitscholle	$l = 90 \text{ m}$
Breite der Gleitscholle	$b = 40 \text{ m}$
Tiefe der Gleitfuge (Mittelwert)	$d_0 = 5 \text{ m}$
Kriechgeschwindigkeit	$v_0 = 0,02 \text{ m/Jahr}$

#### Bodenkennwerte:

Wichte des Hangmaterials	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
Zähigkeitsindex	$I_{v\alpha} = 0,036$
undrainierte Kohäsion oberhalb der Gleitfuge	$c_{uo} = 85 \text{ kN/m}^2$
undrainierte Kohäsion auf der Gleitfuge	$c_{uo} = 25 \text{ kN/m}^2$

```

**R**L*I*P*O*M*A*N*****PROGRAMM 'BRIT'*****
*
*   *BERECHNUNG EINES BRUCHMECHANISMUS' AUS VIER STARREN KOERPERN.*
*
PFU3:D710
*****

*** FLAECHENBERECHNUNG ***
Koerper 1 : Flaechе oben      13.22
Koerper 1 : Flaechе unten     8.09
Koerper 2 : Flaechе oben     55.94
Koerper 2 : Flaechе unten     83.43
Koerper 3 : Flaechе oben     20.05
Koerper 3 : Flaechе unten     23.41
Koerper 4 : Flaechе oben       5.78
Koerper 4 : Flaechе unten     3.71

*** EINGABEWERTE ***
gamma = 20.0 kN/m^3   gamma' = 10.0 kN/m^3   beta = 15.3 grad

*** STROMUNGSKRAEFTE ***
S(1) = 21.33
S(2) = 219.87
S(3) = 61.68
S(4) = 9.77

*** KRAEFTE IN X-RICHTUNG ***
X(1) = 20.58
X(2) = 212.10
X(3) = 59.50
X(4) = 9.43

*** KRAEFTE IN Z-RICHTUNG ***
Z(1) = 350.98
Z(2) = 2011.14
Z(3) = 651.42
Z(4) = 154.86

. *** GLEITFUGENWINKEL ***
THETA 10 = 63.3
THETA 21 = -62.4
THETA 20 = 13.5
THETA 32 = 68.4
THETA 30 = 7.5
THETA 43 = 67.5
THETA 40 = -14.6

*** Q-KRAEFTE ***
Q 10 = 196.3
Q 21 = 236.4
Q 20 = 2190.3
Q 32 = 195.8
Q 30 = 669.5
Q 43 = 137.8
Q 40 = 221.3
DT20 = 3.3

```

\*\*\*\*\* E R G E B N I S \*\*\*\*\*

Bei den Reibungswinkeln  
17.6 grad (  $c_u = 25 \text{ kN/m}^2$  ) auf den tiefen Gleitfugen, und  
27.0 grad auf den restlichen Gleitfugen  
ist :

DT20 = 3.260  
DT20/T20 = .005

ETAPHI = 1.00 ( - 1.00 )

Die Werte fuer die Reibungswinkel bzw. ETAPHI sind ausreichend genau !

\*\*\*\*\*

Abbildung 21: Rückrechnung der Scherparameter (Computerausdruck)

undrainierte Kohäsion unterhalb der Gleitfuge	$c_{uo} = 300 \text{ kN/m}^2$
Grenzdehnung oberhalb der Gleitfuge	$\varepsilon_{po} = 0,05$
Grenzdehnung unterhalb der Gleitfuge	$\varepsilon_{pu} = 0,03$

Zum Schutz des Wohnhauses wurde als ausreichendes Sanierungsziel eine Mindestgebrauchsdauer von 100 Jahren und eine maximale Verschiebung von 7cm innerhalb dieses Zeitraumes festgelegt.

Mindestgebrauchszeitraum	100 Jahre
zulässige Verschiebung während t	7 cm

Bei einer durchschnittlichen Gleitfugentiefe von 5m ist ein Dübeldurchmesser von mindestens 60cm erforderlich, womit sich eine spezifische Dübelkraft von  $83 \text{ kN/m}^2$  ergibt. Da zum Erreichen des Sanierungsziels ein Reduktionsfaktor von  $v_0/v_1 \approx 130$  nötig ist, beträgt die erforderliche spezifische Bremskraft (siehe S. 12):

$$B_{erf} = \tau_0 \cdot I_{v\alpha} \cdot \ln(v_0/v_1) = 1,03 \cdot \ln 130 \approx 5.$$

Die Betrachtung des Einzeldübels ergab bei der zulässigen Verschiebung von 7cm unter den gegebenen Belastungszuständen eine erforderliche Dübelquerkraft von ca. 500kN und ein Dübelmoment von ca. 650kN (Abb. 22). Durch eine stärkere Bewehrung ist dies ebenfalls mit dem Dübeldurchmesser von 60cm realisierbar.

Somit erhielt man aus der Vorbemessung die Dübelanzahl mit

$$n_D = \frac{b \cdot l \cdot \gamma \cdot h \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta \cdot I_{v\alpha} \cdot \ln(v_0/v_1)}{Q_s}$$

mit  $n_D :=$  Dübelanzahl

und  $Q_s :=$  Querkraft des Einzeldübels

$$n_D = \frac{90m \cdot 40m \cdot 1,03kN/m^2 \cdot \ln 130}{500kN} = 36$$

Mit den elastischen Längen  $l_o = 2,9m$  und  $l_u = 1,9m$  lassen sich die maximalen Einbindelängen zu  $h_o = 3,5m$  und  $h_u = 4,75m$  berechnen. Wegen der festen Tonsteine mit Kalksteinlagen ab ca. 7m Tiefe war es jedoch notwendig, die Bohrtiefe auf 8,5m zu begrenzen, d.h. eine untere Einbindelänge von ebenfalls 3,5m zu wählen.

Mit den durch die Vorbemessung optimierten Dübeln

Durchmesser	$d_D = 0,57 \text{ m}$
Länge	$d_l = 7 \text{ m}$

Steifigkeit	$EJ = 155.000 \text{ kN m}^2$
Bruchmoment	650 kNm
Bruchquerkraft	500 kN

erhält man als Ergebnis einer numerischen Berechnung auf einer Rechneranlage VAX 11/750 (Abb. 23):

erforderliche Dübelanzahl  $n_D = 36$ .

Aus geologischen und erdstatischen Gründen wurden  
erforderliche Bohrtiefe

$$d_t = 8,5 \text{ m}$$

Anordnung in 3 oder 4 höhenlinienparallelen Reihen  
zu je 12 bzw. 9 Dübeln

Dübelabstand  $a_D = 2-4 \text{ m}$

Reihenabstand  $a_R = 4 \text{ m}$

festgelegt.

### Bauausführung

Zur Ausführung kamen gemäß der o.a. Dimensionierung 36 Stahlbetonbohrpfähle mit Bohrdurchmesser 60 cm, angeordnet in einem aus erdstatischen und baubetrieblichen Gründen vorgegebenen Raster mit drei Reihen. Der Achsabstand innerhalb der Reihen betrug 2,5m, die beiden oberen Reihen haben einen Abstand (in Fallrichtung) von 4 m, der Abstand zwischen mittlerer und unterer Reihe beträgt 8 bis 15 m. Die genaue Anordnung der einzelnen Dübel ist in (Abb. 24) und (Abb. 25) dargestellt.

Wegen der kurzfristig sehr hohen Standfestigkeit und aufgrund der günstigen Witterungsverhältnisse konnten die Bohrungen unverroht niedergebracht werden. Die Bohrtiefe betrug 8,5 bzw. 9 m, die Länge der Bohrpfähle 7 m, d.h. sie reichen nur bis ca. 1m unter die Geländeoberfläche. Die dadurch entstandenen Leerbohrungen wurden mit Aushubmaterial verfüllt. Sechs Pfähle wurden durch den Einbau von Vierkantrohren für Neigungsmessungen zur anschließenden Verschiebungskontrolle eingerichtet. Zusätzlich erfolgte der Einbau eines 6m tiefen, unbewehrten Betonmeßpfahls am Rande der mittleren Pfahlreihe. Nach Beendigung der Bauarbeiten konnte der ursprüngliche Geländezustand wiederhergestellt werden.

Die Nettobauzeit betrug 10 Arbeitstage, die Baumaßnahme beanspruchte ca. 5% der Hangfläche, die jedoch nach Abschluß der Sanierung wieder genutzt werden kann.

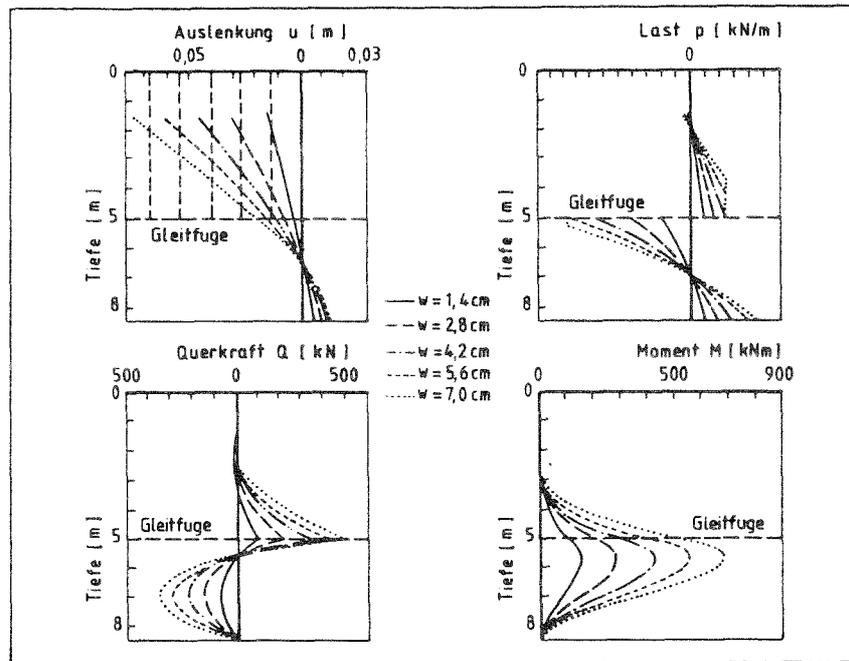


Abbildung 22: Dubelzustandslinien zur Bemessung des Einzeldubels

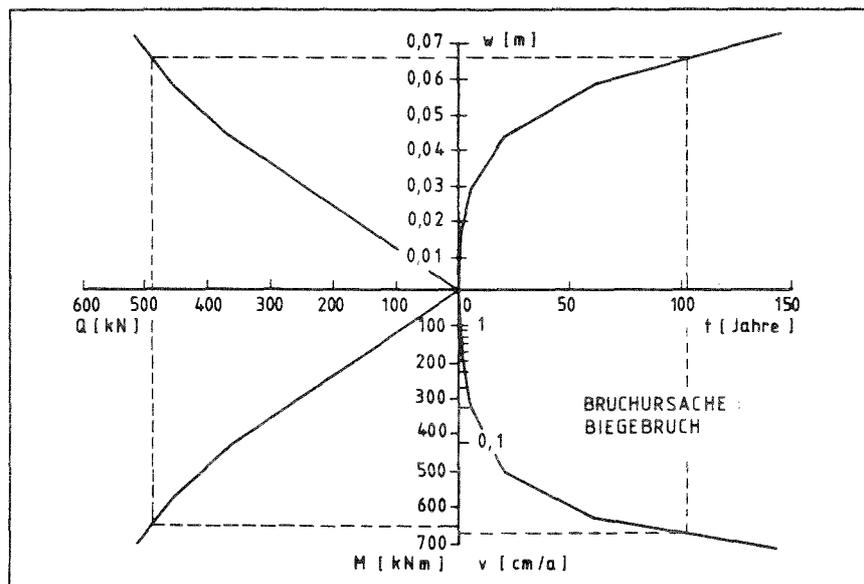


Abbildung 23: Zeit-Verschiebungs-Diagramm aus der Bemessung

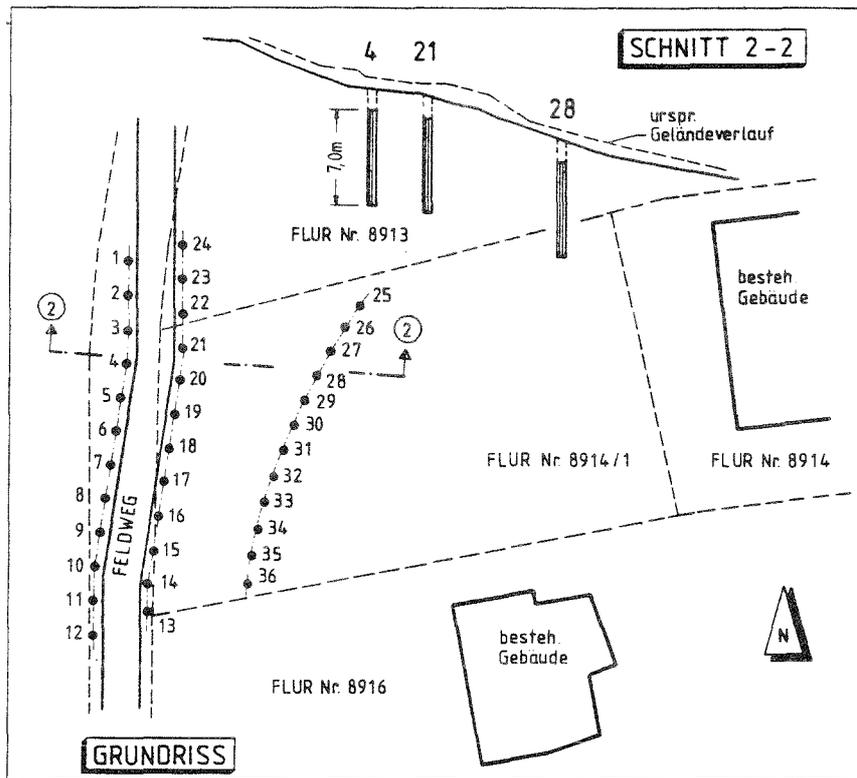


Abbildung 24: Bauausführungsplan der Verdübelung

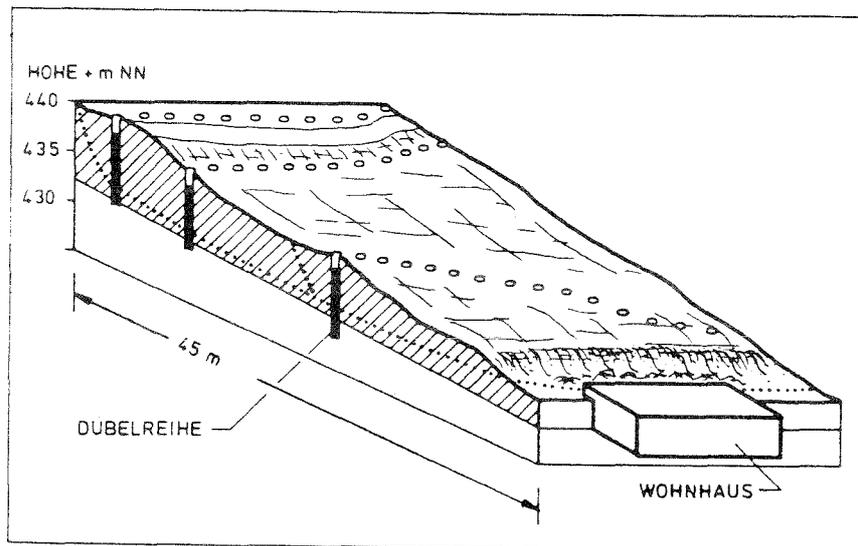


Abbildung 25: Blockbild des verdübelten Hanges

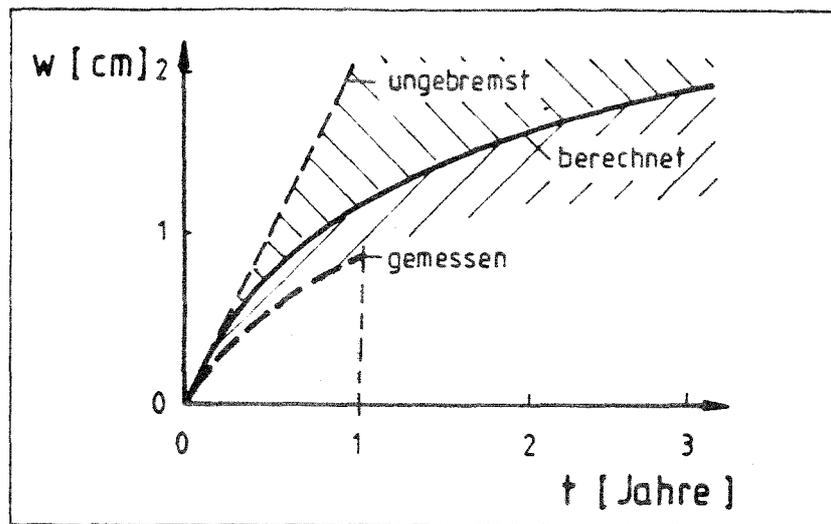


Abbildung 26: Vergleich zwischen vorausberechneter und gemessener Hangverformung nach Einbau der Sicherung

### Meßüberwachung und Auswertung

Während und nach Abschluß der Arbeiten durchgeführte Neigungs Sondierungen dienten dazu, den Einfluß der Baumaßnahme auf den Kriechhang beobachten zu können und den Erfolg der Sicherung zu dokumentieren. Für diese Messungen standen die Meßpegel der Voruntersuchung (Abb. 17) sowie die erwähnten Meßpfähle zur Verfügung.

Die Überwachung während der Bauphase zeigte nur im Bereich der Geländeoberfläche leichte Verformungen; ein Einfluß auf die Kriechgeschwindigkeit war, nicht zuletzt wegen der kurzen Bauzeit, nicht feststellbar.

Die Meßergebnisse des ersten Beobachtungsjahres standen im Einklang mit dem aus theoretischen Überlegungen erwarteten Verhalten: Durch das direkt nach Abschluß der Bauarbeiten begonnene Neigungsmeßprogramm konnte eine deutliche Abnahme der Kriechbewegung festgestellt werden, die gut mit dem aus den Berechnungen erwarteten Verhalten übereinstimmt.

Die gemessene Hangverschiebung betrug nach einem halben Jahr 6mm und innerhalb des ersten Jahres nach der Verdübelung 8mm. Der Sanierungserfolg war sogar geringfügig größer als erwartet (Abb. 26).

Nach einem weiteren Jahr der Meßüberwachung mit erwarteten 3mm Verschiebung werden voraussichtlich keine meßbaren Bewegungen mehr stattfinden.

## 4.2 Ausführungsbeispiel Stuttgart-Feuerbach

Im Frühjahr des Jahres 1988 kam es in Stuttgart-Feuerbach, wie auch in anderen Teilen Baden-Württembergs, zu größeren Hangbewegungen. Ausgelöst wurden diese Bewegungen durch eine Starkregenperiode, in der durchschnittlich eine vier mal größere Niederschlagsmenge gemessen wurde als in anderen Jahren. In den letzten Märztagen des Jahres 1988 traten Schäden an der Bebauung des Hanges und den Verkehrs- und Versorgungseinrichtungen auf. Diese Schäden waren zum überwiegenden Teil auf die Randbereiche der Rutschscholle beschränkt. Durch die enge Bebauung des attraktiven Wohnhanges und die Größe der Rutschung waren viele Gebäude und Anlagen betroffen (Abb. 28 und 29). Der Lageplan des Rutschhanges ist in Abb. 27 dargestellt.

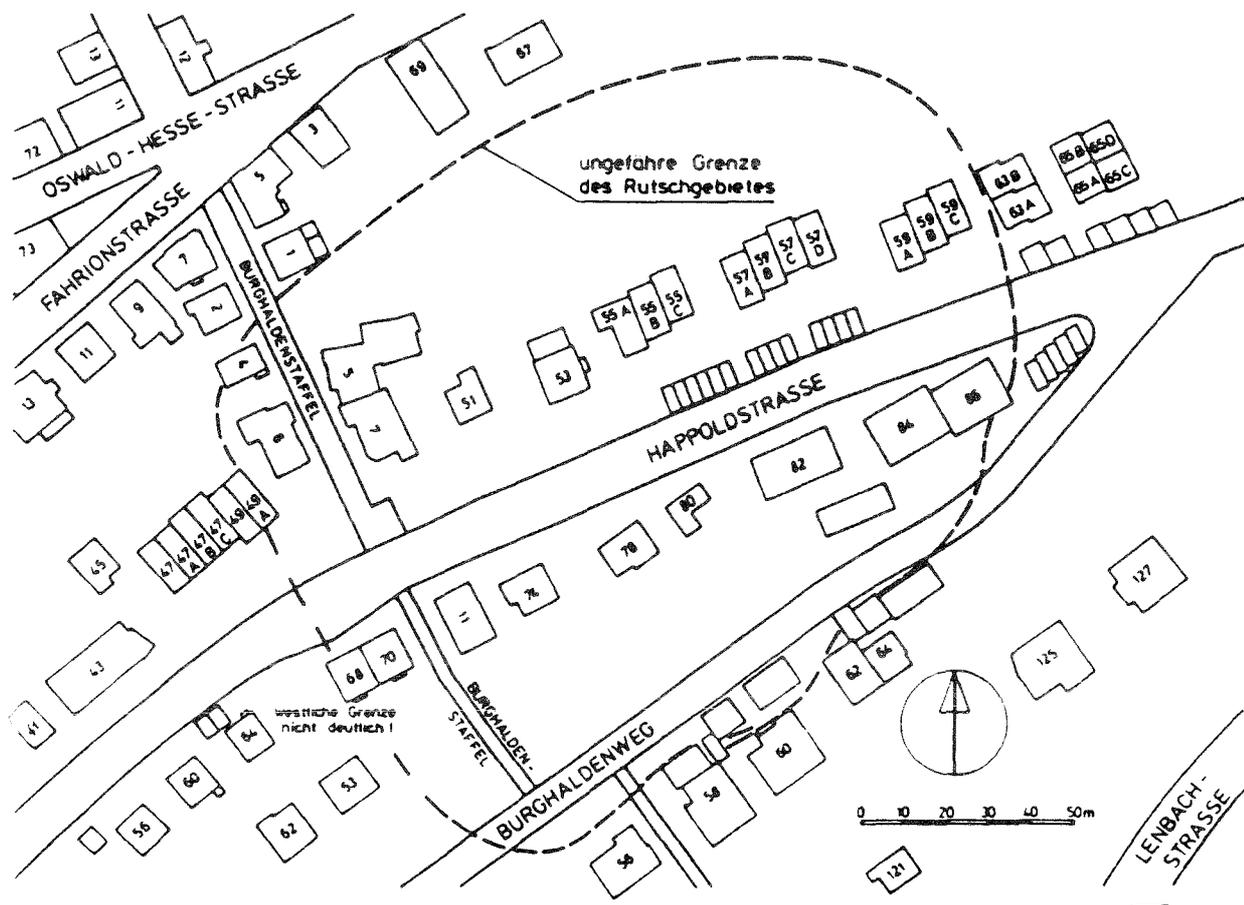


Abbildung 27: Rutschhang Stuttgart-Feuerbach; Lageplan [Wichter et al., 1990]



Abbildung 28: Schäden an der Fuge zwischen zwei Reihenhäusern [Wichter et al., 1990]



Abbildung 29: Schäden an einer Garage und einer Garagenzufahrt [Wichter et al., 1990]

Die Abteilung Baugrund der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg – Otto-Graf-Institut – (FMPA) wurde mit der geotechnischen Untersuchung und der Ausarbeitung und Überwachung der Sanierung der Hangrutschung Stuttgart-Feuerbach beauftragt. Dem Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau der Universität Karlsruhe wurde die Gelegenheit gegeben, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten Verfahren und Konzepte bei diesem Projekt anzuwenden. Es ist mit seiner Größe, seiner Lage in einem sehr dicht bebauten Stadtgebiet und wegen des außergewöhnlichen Sanierungskonzepts ein hervorragendes Beispiel für die Erkundung und Sanierung von Kriechhängen in Baden-Württemberg.

Der Gipskeuperhang war als rutschgefährdet bekannt, obwohl seit den 40er Jahren keine größeren Bewegungen mehr festgestellt wurden. In der Baugrundkarte der Stadt Stuttgart, wie auch in der geologischen Karte, waren das Gebiet als Rutschungsgebiet gekennzeichnet und in der Vergangenheit aufgetretene Schäden beschrieben. Oberhalb des Hanges befanden sich Steinbrüche in denen Schilfsandstein abgebaut wurde. Während des Betriebs der Steinbrüche wurde das Abraummateriale auf den Gipskeuperhang abgelagert, was die Einschätzung der geotechnischen Situation erschwerte. Nach dem Rutschungsereignis wurde noch im Jahre 1988 mit einem geotechnischen Untersuchungsprogramm begonnen. Weitere Bewegungen des Hanges und die Gefahr größerer Schäden machten jedoch eine erste schnelle Sanierung notwendig, noch bevor die Ergebnisse einer längeren Hangüberwachung vorlagen.

### **Geotechnische Untersuchung**

Als wir die Gelegenheit erhielten, unsere Untersuchungen an dem Kriechhang Stuttgart-Feuerbach durchzuführen, waren die geotechnischen Untersuchungen und die Erkundungsbohrungen der FMPA bereits abgeschlossen. Das Sanierungskonzept war ausgearbeitet und die erste Phase der Sanierung bereits beendet. Die Ergebnisse der Untersuchungen der FMPA bilden zusammen mit eigenen Ergebnissen die Grundlage der Beschreibung der geotechnischen Situation des Kriechhanges. Während der zweiten Phase der Sanierung standen Aufschlüsse in den verschiedenen Schichtgliedern des Hanges zur Verfügung. Hier wurden die Probennahmen und Sondierungen mit der Karlsruher Seitendrucksonde durchgeführt.

Die Aufnahme der Schäden und der Morphologie des Hanges machten es möglich, die Umrisse der Rutschung relativ genau festzulegen. Die größten Schäden waren dort entstanden, wo der sich bewegende Teil des Hanges an den unbewegten angrenzte. Durch die

engständige Bebauung und die dazwischen liegenden Straßen, Wege und Mauern lagen sehr viele Schadenshinweise auf den Verlauf der Begrenzung der Rutschscholle vor. Ihre Umrandung ist in Abb. 27 eingetragen, die Fläche beträgt ca. 25.000m<sup>2</sup>.

Erkundungsbohrungen waren nur im oberen Teil des Hanges entlang zweier Straßen und den angrenzenden Zufahrtswegen zu den Höfen und Garagen möglich. Der untere Teil des Hanges ist steil und nur über Fußwege zu erreichen. Es wurden 20 Bohrungen ausgeführt, die geologisch aufgenommen und beprobt wurden. In einige Bohrungen wurden Pegel zur Beobachtung des Grundwassers eingebaut, andere wurden mit Neigungsmeßrohren ausgestattet.

Die geologische Vorinformation aus Kartenmaterial und Literatur sowie die Ergebnisse der Erkundungsbohrungen zeigten, daß das Material zum überwiegenden Teil dem Gipskeuper (km1) angehört. Er steht im tieferen Untergrund unverwittert an, wird aber in unterschiedlicher Mächtigkeit von verwittertem Gipskeuper, umgelagertem Gipskeuper und Steinbruchabraum überlagert. Die Mächtigkeit der Überdeckung des unverwitterten Gipskeupers schwankt zwischen 1 und 14m. Direkt oberhalb der Abrißkante steht der Schilfsandstein (km2) an. Die auf ihm gegründeten Häuser waren von den Hangbewegungen nicht betroffen. Der Schilfsandstein wurde als Bau- und Werkstein in Steinbrüchen abgebaut. Teilweise war er nur tonig gebunden, nicht fest genug und deshalb nicht verwertbar und wurde als Abraum auf den Gipskeuperhang gekippt.

Der Gipskeuper wirkt wegen seiner geringen Durchlässigkeit als Wasserstauer. Deshalb tritt das in den Klüften des Schilfsandsteins zirkulierende Grundwasser an seiner Oberkante aus, oder sickert in das Auffüllungsmaterial ein. In den Bohrungen wurden aufgeweichte Vernässungshorizonte in dem Material der Überdeckung festgestellt. Die Abb. 30 zeigt einen Schnitt durch den Rutschhang.

In der zweiten Sanierungsphase wurden Brunnen, die bis in den anstehenden Gipskeuper reichten, im Hang angelegt. Der Brunnenquerschnitt von ca. 6m bot die Gelegenheit, nicht nur Proben aus dem anstehenden Boden zu nehmen, sondern auch Seitendrucksondierungen außerhalb eines Bohrlochs vorzunehmen.

Bei der Probennahme konnte auf das Entnahmegesetz für Bohrlöcher verzichtet werden, da der Boden am Fuß der Brunnen mit einem Ausstechzylinder kontrolliert entnommen werden konnte. Die Probenzylinder wurden nach dem Ausgraben direkt in die Probenbehälter eingebaut und unter den ihrer Überlagerung entsprechenden Druck gebracht. In Abhängigkeit vom Bauzustand der Brunnen konnten Proben aus dem umgelagerten Gipskeuper mit Schilfsandsteinschutt und gering verwittertem Gipskeupermaterial genommen

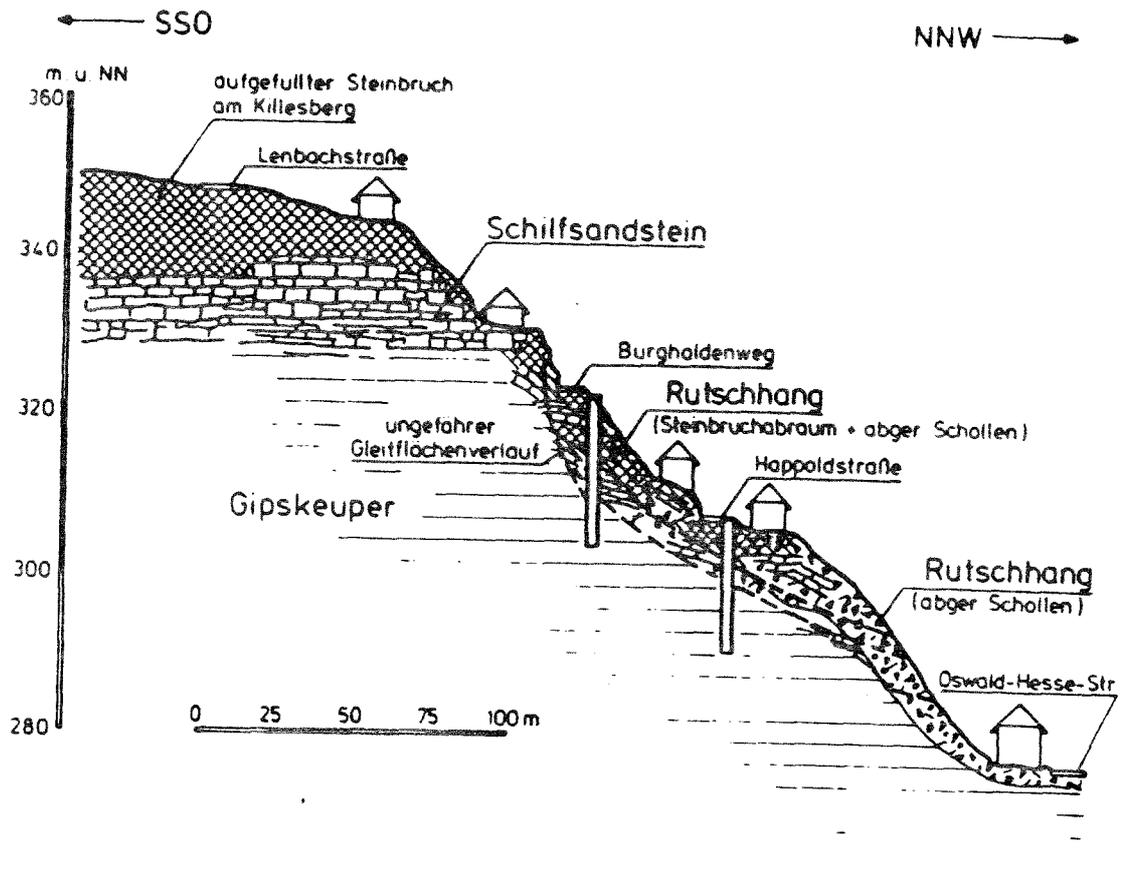


Abbildung 30: Charakteristischer Schnitt durch den Rutschhang Stuttgart-Fuerbach [Wichter et al., 1990]

werden.

Das Gipskeupermaterial besteht aus Ton-, Schluff- und Mergelsteinschichten von roter bis grünlich-grauer Farbe, die teilweise als feste, kompakte Einheiten anstehen, meist aber bröcklig, kleinplattig zerfallen. Die einzelnen, unterschiedlich mächtigen Schichten werden von geringmächtigen tonig-schluffigen Lagen getrennt. Sie sind die Rückstände der Auslaugung der ehemals vorhandenen Gips- und Anhydritschichten und weichen bei Wasserzutritt stark auf.

Proben für Laboruntersuchungen konnten nur aus den bröckelig aufgelockerten Ton- und Schluffsteinen entnommen werden. Die kompakten Schichten waren zu fest, die aufgeweichten Gipsauslaugungsrückstände zu geringmächtig. Das entnommene Material kann bodenmechanisch als toniger Sand (ST) von steifer Konsistenz angesprochen werden. Der Reibungswinkel an aufgearbeitetem Probenmaterial wurde im Rahmenschergerät mit  $40,1^\circ$  ermittelt. Wegen der plattigen und harten Bestandteile war es nicht möglich, aus

dem ausgestochenen Boden Probenzylinder zum Einbau in die Triaxialzelle zu gewinnen.

Der aufgearbeitete Gipskeuper war in seinen Farben meist heller und die Schichtstrukturen waren aufgelöst. Kompakte Schichtstapel waren noch vorhanden, aber die plattig zerfallenden Bereiche waren häufiger. Die tonig-schluffigen Lagen waren oft aufgeweicht. Es waren Vernässungshorizonte zu beobachten, aus denen Wasser in den Brunnen austrat. Im oberen Teil der aufgeschlossenen Brunnenwand lag Schilfsandsteinschutt zwischen dem Gipskeupermaterial. Die Proben, die wieder nur aus dem bröckeligen Tonstein entnommen werden konnten, zeigten im Vergleich mit dem unverwitterten Gipskeuper einen höheren Tongehalt und einen geringeren Reibungswinkel ( $37^\circ$ ). Auch bei diesen Proben war es nicht möglich, Triaxialversuche durchzuführen.

Die Karlsruher Seitendrucksonde kann wegen ihres Aufbaus mit nur einer seitlich ausfahrbaren Druckplatte nicht nur in einem Bohrloch eingesetzt werden. Der Durchmesser der Brunnen machte es möglich, die Druckplatte gegen den anstehenden Boden zu setzen und den Sondenkörper gegen die Brunnenwand abzustützen (Abb. 31 und 32). Die Bewegungen des Sondenkörpers wurden gemessen und eine ebene Andruckfläche im Boden kontrolliert hergestellt, um so einen besser auswertbaren Versuchsablauf zu gewährleisten. Zusätzlich wurde die Druckplatte durch Aufschrauben von Metallplatten verdickt, um sie bei Versuchsbeginn direkt an dem anstehenden Boden anliegen zu lassen. Bei der Durchführung der Versuche zeigte sich aber wieder, daß die Druckplatte bei Festigkeitsunterschieden des Bodens vor der Druckplatte leicht verkantet. Selbst die Reduzierung der Druckplattenfläche um die Hälfte brachte bei dem heterogenen Aufbau des Gipskeupers und seiner Überdeckung keine Verbesserung. Die Versuche mußten jeweils vor Erreichen einer ausreichenden Verformung wegen des zu großen Verkantungsmaßes abgebrochen werden.

Die Gleitfugen haben sich in den nur wenige Zentimeter dicken, aufgeweichten Ton- und Schluffbändern im Übergangsbereich zwischen unverwittertem Gipskeuper und seiner Überlagerung aus umgelagertem Gipskeuper oder Auffüllungsmaterial ausgebildet. In einem Teil der Brunnen wurden Rutschschollen aus größeren zusammenhängenden Schilfsandsteinblöcken aufgeschlossen. An ihrer Unterkante waren große Wasserzutritte und Überschiebungsflächen über den darunter anstehenden Gipskeuper zu beobachten. Diese für das Schichtstufenland des Keupers in Baden-Württemberg typischen Scholengleitungen des Pleistozäns wurden durch die Überschüttung mit Steinbruchabraum ausgelöst und von den starken Niederschlägen reaktiviert.



Abbildung 31: Seitendrucksondierung mit der im Brunnen verspannten Sonde.



Abbildung 32: Die Druckplatte der Sonde liegt am anstehenden Gipskeuper an.

### Sanierung

Die nach dem Rutschungsereignis im Frühjahr 1988 andauernde Gefährdung des Wohngebietes machte ein schnelles Eingreifen zur Stabilisierung des Hanges notwendig. Das Konzept der FMPA sah deshalb vor, in einer ersten Sanierungsphase haltende Kräfte über das Einbringen von Dübeln in den Hang einzuleiten. Um diese in die zweite Phase, die dauerhafte Sanierung des Hanges, mit einzubinden, wurden an 12 Stellen entlang der Straßen jeweils 4 Stahlbetonbohrpfähle mit einem Durchmesser von 1,2m in Reihe nebeneinander gesetzt. Die Bohrpfähle waren 16,5m lang, um zu gewährleisten, daß ein

schubfester Verbund bis in den unbewegten Untergrund hergestellt wird. Wie Kontrollen mit der Neigungsmeßsonde zeigten, konnte der Hang durch die Dübelwirkung so gebremst werden, daß keine weiteren Schäden zu befürchten waren. Im Schutze der 12 Dübelreihen wurden in der zweiten Sanierungsphase die Brunnen hergestellt (Abb. 33). Über die ca. 5,7m durchmessenden und ca. 16m tiefen Brunnen wurden die Bohrpfähle an mehreren Balken rückverankert und so die haltenden Kräfte erhöht (Abb. 34). Zusätzlich wurden Drainagebohrungen hergestellt, um den Hang wirkungsvoll zu entwässern. Fortlaufende Kontrollen der Hangbewegungen mit Neigungsmessungen und die Möglichkeiten weiterer Maßnahmen, wie das Einbringen weiterer Anker, gewährleisteten eine dauerhafte Sicherung des städtischen Wohngebiets in Stuttgart-Feuerbach.

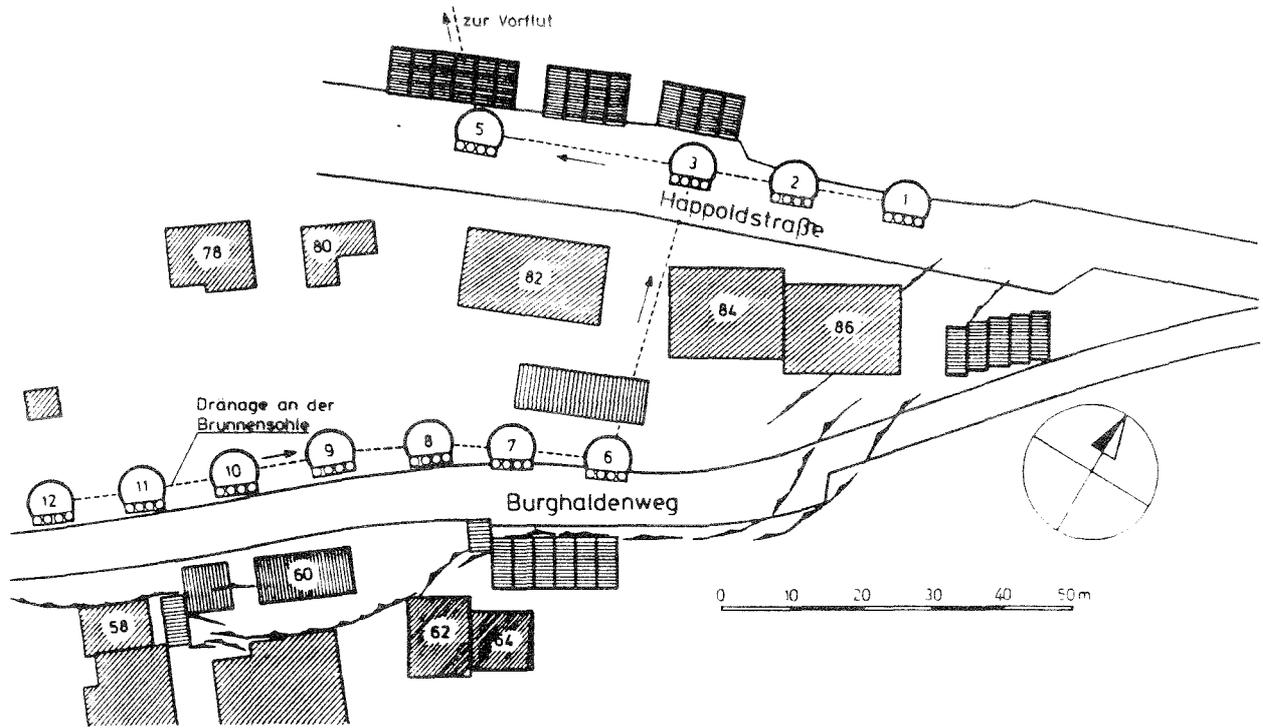


Abbildung 33: Anordnung der Brunnen im Gelände [Wichter et al., 1990]

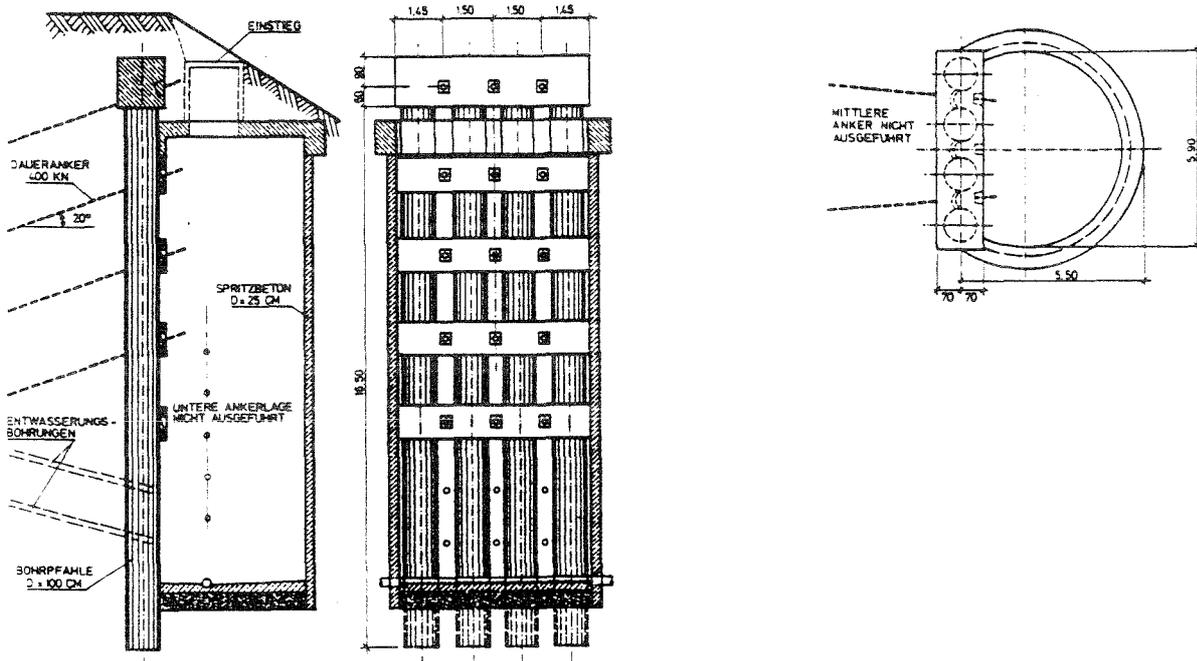


Abbildung 34: Konstruktion eines Einzelbrunnens [Wichter et al., 1990]

### 4.3 Ausführungsbeispiel Weinsberg

Der Bau einer Umgehungsstraße im Zuge der B 39 um Weinsberg bei Heilbronn machte eine Durchtunnelung und einen Anschnitt des Schemmelsberges notwendig. Nach den Ergebnissen der geologischen Voruntersuchungen wurde der angeschnittene Hang als ein inaktiver, ehemaliger Kriechhang beurteilt. Vor der Herstellung des bis ca. 5,5m hohen Anschnitts am Hangfuß sollte eine Sicherung des darüberliegenden Hanges erfolgen.

#### Geotechnische Untersuchung

In Ergänzung zu den im Rahmen der Planung des Gesamtprojekts erfolgten Untersuchungen wurden drei weitere Bohrungen mit Probenahme und eine ingenieurgeologische Kartierung des Hanges durchgeführt. Der Einbau von Neigungsmeßrohren war zu diesem Zeitpunkt nicht notwendig, da der Hang sich vor der Ausführung des Anschnitts noch in Ruhe befand.

Der an der Nordseite des Schemmelsberges gelegene Hang hat eine durchschnittliche Neigung von  $15^\circ$ , ist ca. 150m breit (höhenlinienparallel) und ca. 95m lang. Die oberen zwei Meter des Bodenprofils werden von einer dünnen Lage Mutterboden, Lößlehm und schluffigem Hangschuttmaterial mit Tonsteinbruchstücken eingenommen. Darunter folgt eine ca. 18m mächtige Wechsellagerung aus Tonen und Tonsteinen des Gipskeupers. Die Schichten fallen in etwa parallel der Hangoberfläche ein. Bis ca. 6m unter Geländeoberkante ist das Material von steifer bis halbfester Konsistenz. Mit zunehmender Tiefe ist es meist halbfest bis fest. In einigen Bereichen wurden aber auch unterschiedlich mächtige weiche Tonschichten erbohrt, die nach Anschnitt des Hanges als Gleitzonen aktiv werden können.

In den bodenmechanischen Laborversuchen an den entnommenen Proben konnten die erforderlichen Bodenkennwerte bestimmt werden. An ungestörten Proben wurden CU - Triaxialversuche in Mehrstufentechnik und mit Geschwindigkeitssprüngen zur Bestimmung des Winkels der Gesamtscherfestigkeit und von  $I_{v\alpha}$  durchgeführt.

Die wirksame Restscherfestigkeit, die für die Standsicherheit maßgebend ist, wurde für die möglichen Gleitfugenbereiche in den weichen Tonschichten durch Rückrechnung bestimmt. Die geometrischen Größen etwaiger Rutschkörper und Gleitfugen wurden aufgrund der Geländeaufnahme und der Untergrunderkundung festgelegt und solange variiert, bis sich der sog. ungünstigste Mechanismus ergab. Für den ungünstigsten Bruchmechanismus ergab sich eine Sicherheit von  $\eta = \frac{\tan \varphi_{vorh.}}{\tan \varphi_{erf.}} = 1,2$ . Nach Herstellung der Einschnittböschung

beträgt die Sicherheit jedoch nur noch  $\eta \approx 1,0$ . Zur Beibehaltung eines Sicherheitsfaktors von mindestens  $\eta = 1,1$  im ungünstigsten Fall, muß eine Hangsicherungsmaßnahme die sich daraus ergebende erforderliche Querkraft in den Hang einleiten.

### Ausführung

Die Verdübelung war auch in diesem Fall die technisch und wirtschaftlich am besten geeignete Methode, das Defizit an haltenden Kräften auszugleichen und Bewegungen auf etwaigen Gleitbahnen zu verhindern. Es kamen 57 Stahlbetondübel mit einem Durchmesser von 0,9m und einer Länge von 13m zur Ausführung. Sie wurden in einem Abstand von ca. 3m in einer Reihe hinter der geplanten Oberkante des Hanganschnitts hergestellt. In vier der Dübel wurden Neigungsmeßrohre eingebaut, um Bewegungen des Hanges während des Anlegens der Böschung und in der Zeit danach verfolgen zu können. Während der Bauausführung wurden nur geringfügige Bewegungen von wenigen Millimetern, in der Folgezeit nur Bewegungen im Bereich der Meßgenauigkeit beobachtet.

## 5 Richtlinien für die Anwendung

Die Zweckmäßigkeit der entwickelten Untersuchungsmethoden und die Art ihrer Anwendung wurden bei den durchgeführten Tests und den, bei der Bearbeitung von Projekten gemachten Erfahrungen, bestätigt. Auf diesen Grundlagen konnten Richtlinien für die bei einer Hangverdübelung notwendigen Untersuchungen ausgearbeitet werden. In diesem Abschnitt werden Richtlinien für Ablauf und Vorgehensweise formuliert, die in einer schrittweisen Abfolge gemäß den Erfordernissen für eine Kriechhangsanierung angegeben werden.

### Ingenieurgeologische Kartierung

In einer Kartierung des gefährdeten Bereichs werden zunächst geologische Grenzen sowie Ausmaß und Umfang der Kriechbewegung bestimmt. Die eigene Bearbeitung sollte beginnen mit der eingehenden Durchsicht der geologischen Karten, Baugrunderkarten und der Literatur. Zusammen mit Erhebungen vor Ort über Besonderheiten des Geländes kann daraus eine Karte des Kriechhangs erstellt werden, um Ansatzpunkte für Erkundungsbohrungen, Sondierungen und die Anlage von Schürfen festlegen zu können (Abb. 35).

### Erkundungsbohrungen

Die Anzahl und Anordnung der Bohrungen werden, ausgehend von den Ergebnissen der Kartierung, aufgrund der ingenieurgeologischen Beurteilung festgelegt. Auch Rahmenbedingungen, wie die Zugänglichkeit und Befahrbarkeit des Geländes, können die Auswahl der Bohrpunkte beeinflussen. Die ausgeführten Bohrungen dienen bei der Untersuchung des Hanges verschiedenen Aufgabenstellungen:

Aus der Ansprache und Auswertung von Bohrkernen wird ein geologisches Schichtenprofil oder ein Verwitterungsprofil zur Untergrundbeschreibung erstellt. Mit dem Probenahmegerät werden Sonderproben für die bodenmechanischen Laborversuche entnommen, aus denen sich die wichtigen charakteristischen Größen bestimmen lassen. Darüber hinaus können während der Bohrung Bohrlochaufweitungsversuche mit einer Seitendrucksonde durchgeführt werden, um eine Aussage über das Verformungsverhalten zu bekommen. Die für Bohrlochneigungs Sondierungen ausgestatteten Erkundungsbohrungen

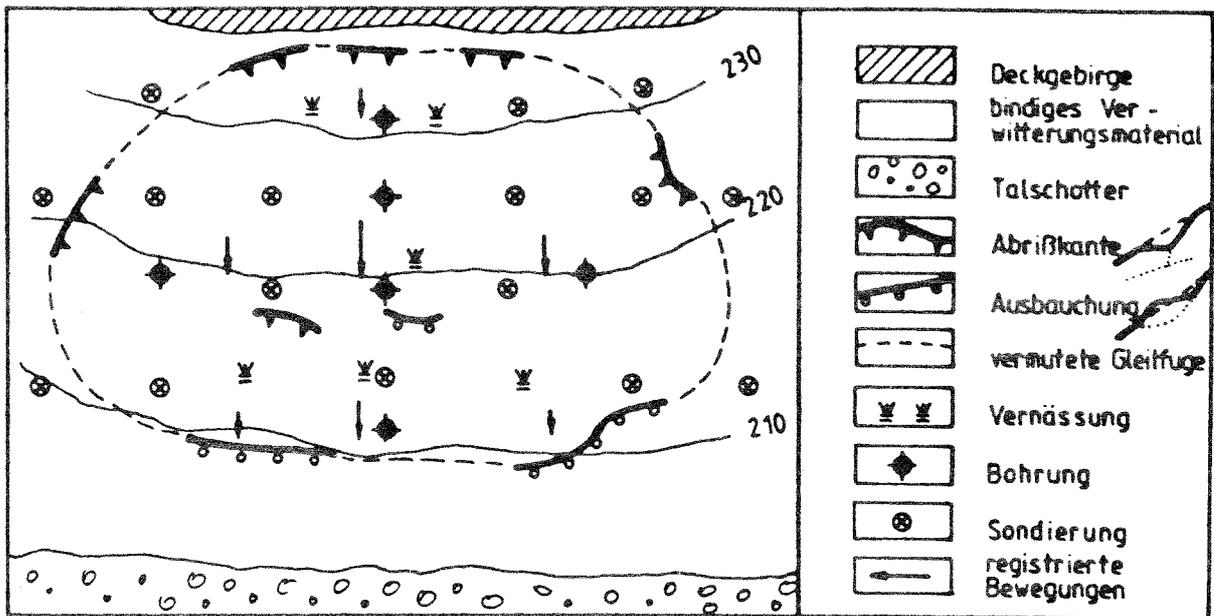


Abbildung 35: Vereinfachtes Beispiel einer Kriechhangkarte mit Raster für Erkundungsbohrungen und -sondierungen [Lippomann, 1988].

dienen zur Bestimmung von Scherzone und Messung der Hangverschiebung (Abb. 36). Erkundungsbohrungen als Grundwasserbeobachtungspegel zu verwenden, ist im Regelfall nicht sinnvoll, da nicht ein von der Bohrung erreichter tieferer Grundwasserspiegel maßgebend ist, sondern nur der durch kurze Pegelrohre meßbare Hangwasser- bzw. Sickerwasserspiegel relevant ist.

Als Mindestumfang der Erkundungsbohrungen ist eine möglichst in Hangmitte verlaufende Bohrlochreihe in Fallinie vorzusehen, mit der sich ein repräsentatives Hangprofil erstellen läßt. Dabei müssen die Bereiche rechts und links davon bis zu den seitlichen Grenzen durch mindestens zwei weitere Bohrungen abgeklärt werden (Abb. 37). Die Bohrungen sollen nicht nur im Hinblick auf die Topographie und Morphologie repräsentativ sein, sondern auch auf die Entnahme von Bodenproben. Die Anordnung der Bohrlochreihe in der mittleren Fallinie ist für die Verschiebungsmessung und der daraus herzuleitenden Kriechgeschwindigkeit und Tiefe der Gleitscholle wichtig.

Mit Hilfe von Schürfen und Sondierungen können die Abschnitte zwischen den Bohrlöchern auf Inhomogenität des Untergrundaufbaus geprüft werden. Die Abstände zwischen den Bohrungen sollen auch bei ausreichender Sondierung 30 bis 50m nicht überschreiten. Bei einer seitlichen Ausdehnung des Kriechhanges über ca. 150m sind zusätzlich zu den drei in der Abbildung 37 dargestellten weitere Profile durch Bohrungen aufzuschließen. Die

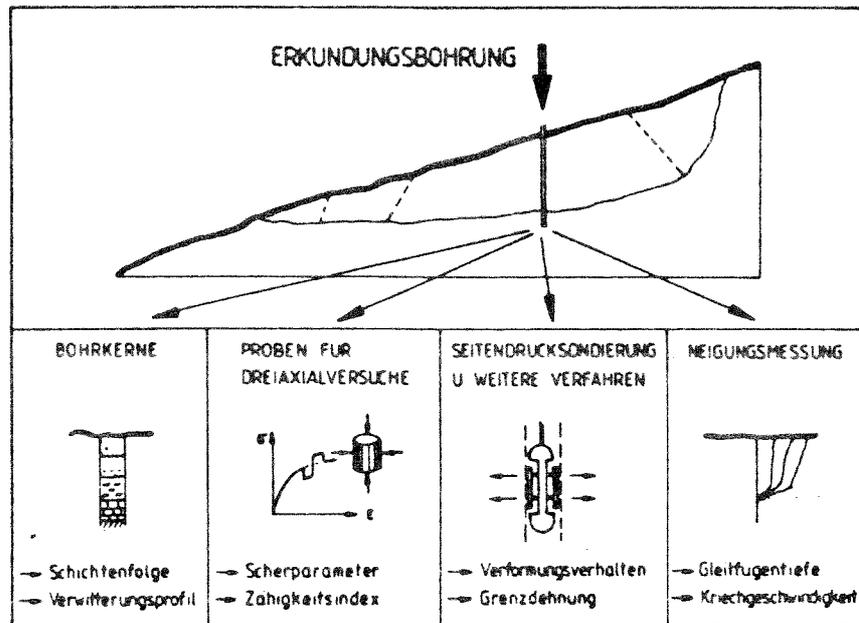


Abbildung 36: Aufgabenbereiche der Erkundungsbohrungen [Lippomann, 1988].

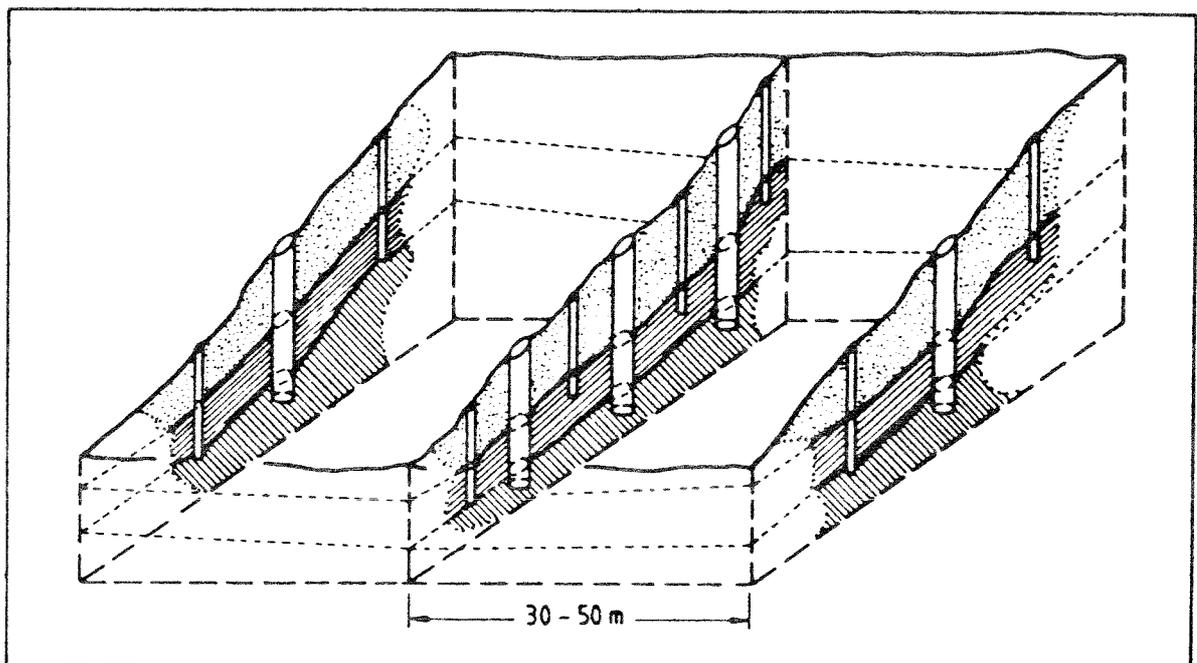


Abbildung 37: Empfohlenes Bohr- und Sondiergraster für die Erkundung des Untergrundes im Kriechhang [Lippomann, 1988].

erforderliche Bohrtiefe kann nur geologisch festgelegt werden; und zwar entweder aus der Kenntnis der regionalen Geologie oder über die Beurteilung der Verwitterungszustände während der Bohrarbeiten. Der Zustand des unverwitterten Materials muß deshalb hinreichend bekannt sein.

## Geländeversuche und Messungen

Der wichtigste Bohrlochversuch für eine Kriechhangsanierung mit Dübeln ist eine Bohrlochaufweitung mit der Seitendrucksonde. Die Versuchsergebnisse werden zur Bemessung horizontal belasteter Pfähle bzw. Dübel verwendet. Dazu eignen sich Sonden, bei denen im Bohrloch horizontale Belastungen mit Lastplatten erzeugt werden. Die Karlsruher Seitendrucksonde war speziell auf diese Anwendung zugeschnitten, da ihre Geometrie sehr große Verformungswege erlaubt, was besonders bei relativ weichen Böden mit großer Grenzdehnung erforderlich ist. Sie gewährleistete auch eine kontrollierte einseitige Belastung mit einer Druckplatte bei nur minimaler Verschiebung des Sondenkörpers. Die Verkantungsanfälligkeit der Druckplatte und die gewichtsabhängigen Unhandlichkeit der Sonde beschränken ihren Einsatz jedoch auf Sonderfälle unter speziellen Rahmenbedingungen für Forschungszwecke.

Mit der sog. 'Stuttgarter Seitendrucksonde' [Smolczyk & Seeger, 1980] steht eine Sonde mit zwei halbkreisförmigen Lastplatten zur Verfügung, die sich trotz ihrer ungünstigeren Geometrie und den daraus folgenden Mängeln im Einsatz bewährt hat. Über die Kraft-Verformungslinie der Sondierung wird der horizontale Bettungsmodul des Bodens in den für die Verdübelung maßgebenden Tiefen an der möglichst ungestörten Bohrlochwandung bestimmt. Sollten keine Seitendrucksondierungen möglich sein, kann der Fließdruck auch über die in Abschnitt 3.4 angegebene Beziehung abgeschätzt werden. Eine bessere Abschätzung von Bettungsmodul und Fließdruck, als aus Versuchen an Proben mit kleinen Durchmessern, ermöglicht die Auswertung von Versuchen an Großproben mit einem Durchmesser von 60cm [Wichter & Gudehus, 1978]. Die Entnahme und Versuchsdurchführung sind zwar aufwendiger, die genaueren Ergebnisse durch die geringeren Auswirkungen örtlicher Inhomogenitäten rechtfertigen jedoch ihren Einsatz.

Nach Erreichen der Endtiefe werden die Bohrlöcher für Neigungssondierungen eingerichtet. Die Dauer der damit durchgeführten Verschiebungsmessung muß in Abhängigkeit von der Größenordnung bereits registrierter Bewegungen und je nach Dringlichkeit der Sicherung gewählt werden. Die Genauigkeit der Einzelmessung beträgt dabei 1mm Hori-

zontalabweichung auf 10m Tiefe [Bösinger et al., 1983]. Die Meßhäufigkeit und der Beobachtungszeitraum hängen von den jeweiligen Gegebenheiten ab und können bei Bedarf angepaßt werden. Die Länge der Meßintervalle ist von der Kriechgeschwindigkeit abhängig. Bei den typischen Kriechgeschwindigkeiten, wie sie bei Hängen in Baden-Württemberg beobachtet wurden, erhält man Meßintervalle von 2 bis 6 Wochen. Über die Tiefenlage der Bewegungshorizonte lassen sich im allgemeinen bereits nach 3 Messungen Aussagen machen, und die Bewegungsgeschwindigkeit kann grob abgeschätzt werden. Die Mindestbeobachtungsdauer beträgt somit 3 Monate.

## Laborversuche

Da die Qualität der Ergebnisse von Laborversuchen gerade bei weichen Böden von der Entnahme, dem Transport und der Lagerung des Probenmaterials abhängt, sollten die besonderen Entnahme- und Aufbewahrungstechniken angewendet werden.

Die für die Beurteilung eines Kriechhanges und die Dimensionierung einer Verdübelung wichtigen Parameter, Zähigkeitsindex  $I_{v\alpha}$  und Scherfestigkeit in der Gleitfuge, können mit modifizierter Triaxialtechnik ermittelt werden. Bei der Scherfestigkeitsbestimmung werden durchschnittene Proben oder Proben mit natürlichen Gleitflächen in eine Triaxialversuchszelle eingebaut. Der Zähigkeitsindex ergibt sich aus Versuchen, bei denen die Verformungsgeschwindigkeit variiert wird.

Sollte es wie im Gipskeupermaterial des Rutschhanges Stuttgart-Feuerbach nicht möglich sein, Probenkörper für die Triaxialversuche zu gewinnen, kann der Zähigkeitsindex aus den Ergebnissen der Indexversuche abgeleitet werden. Die Scherfestigkeit auf der Gleitfuge kann über erdstatische Berechnungen ermittelt werden. Für das Versagen der Bodenscholle wird ein Bruchmechanismus angenommen und der Wert der maßgebenden Scherfestigkeit rückgerechnet (siehe z.B. [Lippomann, 1988]).

Zur notwendigen weiteren bodenmechanischen Beschreibung des Kriechhangmaterials werden Indexversuche wie Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Wichte, Plastizität und die Konsistenzgrenzen bestimmt. Rahmenscher- und Triaxialversuche geben Auskunft über das Festigkeitsverhalten des Bodens außerhalb der Gleitfuge.

## 6 Zusammenfassende Vorschläge zur Durchführung von Hangverdübelungen

### Voruntersuchungen

- Ingenieurgeologische Kartierung

In einer Kartierung des gefährdeten Bereichs werden die geologischen Grenzen sowie Ausmaß und Umfang der Kriechbewegung und Besonderheiten des Geländes erfaßt. Auf Grundlage dieser Kartierung können Ansatzpunkte für Erkundungsbohrungen, Sondierungen und die Anlage von Schürfgruben festgelegt werden

- Erkundungsbohrungen und Sondierungen

Aus Ansprache und Auswertung von Bohrgut und Bohrkernen wird ein geologisches Schichtenprofil oder ein Verwitterungsprofil zur Untergrundbeschreibung erstellt. Ebenfalls aus den Bohrkernen werden Sonderproben für bodenmechanische Laborversuche entnommen. In den Bohrlöchern lassen sich Bohrlochaufweitungsversuche mit einer Seitendrucksonde durchführen und Neigungsmeßpegel einbauen.

Preisgünstigere Sondierungen können zwischen den Bohrungen Inhomogenitäten im geologischen Aufbau erfassen.

- Versuche und Messungen im Gelände

Die Geländeversuche- und messungen werden in den Bohrungen durchgeführt. Der wichtigste Versuch für eine Kriechhangsanierung mit Dübeln ist dabei die Bohrlochaufweitung mit einer Seitendrucksonde, deren Ergebnis in die Bemessung der Dübel eingeht.

In einige der Bohrungen wird im Anschluß an Probenahme und Sondierung ein Neigungsmeßpegel eingebaut. Die Neigungsmessungen liefern Angaben über Gleitfugentiefe und Kriechgeschwindigkeit.

- Laborversuche

Zur Beschreibung und Beurteilung des Kriechhangmaterials sind folgende Versuche notwendig:

- Indexversuche zur Bestimmung des natürlichen Wassergehalts, Korngrößenverteilung und des Wassergehalts an den Konsistenzgrenzen (DIN 18121, 18122 und 18123)

- Ermittlung der undrännierten Kohäsion  $c_u$  durch einen Rotationsviskosimeterversuch oder besser einen Triaxialversuch
  - Bestimmung der Scherfestigkeit auf der Gleitfuge in einem Triaxialversuch mit einer Probe mit natürlicher oder künstlicher Gleitfuge
  - Ermittlung des Zähigkeitsindex  $I_{v\alpha}$  aus den Ergebnissen der Indexversuche oder durch Triaxialversuche mit Geschwindigkeitsänderung
- Erdstatische Untersuchungen
 

Mit einer Anwendung für den Standsicherheitsnachweis einer Böschung, dem sog. Starrkörperbruchmechanismus-Verfahren, läßt sich die Scherfestigkeit auf der Gleitfuge und die Schubspannung auf der Gleitfuge ( $\tau_0$ ) rückrechnen. Aus den Ergebnissen der Kartierung, der Bohrungen, der Labor- und Feldversuche wird der maßgebende Bruchmechanismus hergeleitet.

## Planung und Ausführung

- Anforderungen
 

Vor einer Bemessung der Sanierung mit Stahlbetondübeln müssen die Anforderungen festgelegt werden:

  - Die spezifische Hangkraft  $\tau_0 \cdot I_{v\alpha}$  bezeichnet die treibende Kraft, die für die Kriechbewegung des Hanges verantwortlich ist.
  - Die spezifische Bremskraft läßt sich nach Festlegung der zulässigen Verschiebung  $w_1$  und der Nutzungsdauer  $t_1$  mittels des Reduktionsfaktors  $v_0/v_1$  (Kriechgeschwindigkeit/Geschwindigkeit, die sich aus  $w_1$  und  $t_1$  ergibt) für den Kriechhang der Fläche  $A = l \cdot b$  errechnen:

$$B_{erf} = A \cdot \tau_0 \cdot I_{v\alpha} \cdot \ln(v_0/v_1)$$

- Vorbemessung der Dübel
 

Bei der Vorbemessung der Dübel werden Durchmesser, Anzahl und Anordnung der Dübel aufgrund von wirtschaftlichen und baubetrieblichen Anforderungen im wesentlichen festgelegt. Der Bremskraft  $B_{erf}$  wird das Produkt aus Querkraft der Einzeldübel mal der Anzahl der Dübel entgegengesetzt:

$$B_{erf} = Q_s \cdot n_D$$

Die Querkraft der Einzeldübel ist vom Dübeldurchmesser abhängig, der sich aus der Gleitfugentiefe und der notwendigen Dübellänge ergibt. Die Bemessung von Verdübelungsmaßnahmen ist in Schwarz (1987) und Lippomann (1988) ausführlich dargestellt.

– Anordnung der Dübel

Der Maximalabstand der Dübel in Fallrichtung darf nur so groß sein, daß sich keine Geländebrüche zwischen den Dübelreihen ereignen können. Dies kann am besten mit Hilfe erdstatischer Betrachtungen des maßgebenden Bruchmechanismus gewährleistet werden.

Senkrecht zur Fallrichtung beträgt der Maximalabstand ca. 15 Dübeldurchmesser.

Der Minimalabstand in Fallrichtung beträgt 4, senkrecht dazu 2,5 Dübeldurchmesser

- Überwachung während der Bauzeit

Da der Hang sich im Grenzgleichgewicht befindet, müssen erdstatisch ungünstige Zustände vermieden werden (z.B. bei den Erdbauarbeiten oder Ausführung in nasser Jahreszeit). Durch genauere Kenntnisse über den Untergrundaufbau, die bei der Herstellung der Dübel gewonnen wurden, kann eine Anpassungen der Maßnahme notwendig werden.

## Erfolgskontrolle und Nachbesserung

- Erfolgskontrolle

Der Erfolg der Verdübelung dokumentiert sich durch die planmäßige Verringerung der Kriechgeschwindigkeit. Sie kann mit Neigungsmessungen in den noch vorhandenen Neigungsmesspegeln und in Neigungsmessrohren, die zusätzlich in einzelne Dübel eingebaut wurden, nachgewiesen werden.

- Nachbesserung

Falls die Verringerung der Kriechgeschwindigkeit des gesamten Hanges oder eines Teilbereichs nicht gelingt, kann durch das Einbauen zusätzlicher Dübel oder gegebenenfalls durch das Abtrennen eines Teilbereichs das Sanierungsziel erreicht werden.

ERKENNEN		
Schäden an Häusern, Verkehrswegen usw.		
Veränderung der Oberflächenmorphologie und des Bewuchses (z.B. schiefstehende Bäume)		
UNTERSUCHEN		
Tätigkeit	Beschreibung	Ergebnisse
Ingenieurgeologische Kartierung	Kartieren von Abrißkanten, Rissen, Spalten, Wülsten, Vernässungszonen usw.	Festlegung der geolog. und morpholog. Grenzen, Länge und Breite der Kriechscholle, Ansatzpunkte für Bohrungen, Sondierungen und Schürfgruben
	Aufnahme von Schäden, Versatzbeträgen usw.	Ausmaß der Kriechbewegung
Erkundungsbohrungen und Sondierungen	Bohrgut- und Bohrkernauswertung	geologisches Schichtenprofil und Verwitterungsprofil
	Sonderproben für Laborversuche	s.u.
	Bohrlochversuche	s.u.
	Einbau von Neigungsmessrohren	s.u.
Versuche und Messungen im Gelände	Bohrlochaufweitung mit einer Seitendrucksonde	Bettungsmodul $K$ , Grenzdehnung $\epsilon$ , Fließdruck $p_f$
	Neigungsmessungen	Tiefe der Gleitfuge $h$ und Kriechgeschwindigkeit $v_0$
Laborversuche	Indexversuche	Wassergehalt $w$ , Korngrößenverteilung und Wassergehalt an den Konsistenzgrenzen
	Triaxial- oder Rotationsviskosimeterversuch	undrainierte Kohäsion $c_u$
	Triaxialversuch mit einer Probe mit natürlicher oder künstlicher Gleitfuge	Scherfestigkeit auf der Gleitfuge $\varphi'_s$
	Triaxialversuch mit Geschwindigkeitsänderung oder abgeleitet aus Indexversuchen	Zähigkeitsindex $I_{v\alpha}$
Erdstatische Untersuchungen	Rückrechnung der Rutschung als Starrkörperbruchmechanismus	Scherfestigkeit auf der Gleitfuge $\varphi'_s$ und Schubspannung $\tau_0$
PLANEN		
Tätigkeit	Beschreibung	Ergebnisse
Vorgaben	Schubspannung in der Gleitfuge aus Kriechangdaten oder aus einer Rückrechnung	$\tau_0 = \gamma \cdot h \cdot \sin\beta \cdot \cos\beta$
	spezifische Hangkraft	$\tau_0 \cdot I_{v\alpha}$
Festlegung der Anforderungen	Nutzungsdauer	$t$
	Zulässige Verschiebung während der Nutzungsdauer	$w$
	Kriechgeschwindigkeit vor ( $v_0$ ) und nach ( $v_1$ ) der Sanierung	Reduktionsfaktor $v_0/v_1$
Bemessung	Berechnung der spezifische Bremskraft	$B_{erf} = \tau_0 \cdot I_{v\alpha} \cdot \ln(v_0/v_1)$
	Bemessung der Dübel unter Verwendung der relevanten Bodenkennwerte ( $K, p_f$ und $c_u$ )	Durchmesser $d_D$ , Ausbildung und Anzahl der Dübel
	Anordnung der Dübel	Abstand senkrecht und horizontal zur Fallrichtung
SANIEREN		
Tätigkeit	Beschreibung	Ergebnisse
Überwachung während der Bauzeit	ungünstige Verhältnisse bei der Sanierung vermeiden	sichere Ausführung
	Kontrolle des Schichtenverlaufs bei der Bohrpfahlerstellung	Anpassung der Dübelanzahl und -länge
KONTROLLIEREN		
Tätigkeit	Beschreibung	Ergebnisse
Erfolgskontrolle	Neigungsmessungen in den noch vorhandenen und in einigen Dübeln eingebauten Neigungsrohren	Übereinstimmung oder Abweichung von der prognostizierten Bremsung
Nachbesserung	bei unzureichender Bremswirkung oder sekundären Rutschschollen	zusätzliche Dübel oder Abtrennung von Teilbereichen des Kriechhanges

Abbildung 38: Beschreibung der Vorgehensweise bei der Durchführung einer Kriechhangsanierung durch Verdübelung

## 7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben befaßte sich mit ingenieurgeologischen Problemstellungen, die bei der Sicherung von Kriechhängen durch Verdübelung auftreten. Ziel war es, Untersuchungsmethoden zu entwickeln, die eine sichere und wirtschaftliche Sanierung von Baugebieten durch diese bewährte Hangstabilisierungsmaßnahme ermöglichen. Nach theoretischen Vorarbeiten und Fertigstellung der Geräte wurden erste Versuche durchgeführt. Praktische Anwendungen in einem Verdübelungsprojekt sollten den Nachweis über die Zweckmäßigkeit der ausgearbeiteten Methoden und die Tauglichkeit der Geräte erbringen. Auf Grundlage der Ergebnisse und Erfahrungen wurden praxisgerechte Richtlinien für ihre Anwendung formuliert.

Kriechhänge, in langsamer Bewegung befindliche Hänge aus tonigen Sedimenten, können nur dann baulich genutzt und sicher bewohnt werden, wenn die Bewegungen durch eine Hangsicherungsmaßnahme auf ein erträgliches Maß reduziert werden. Die Verdübelung erfüllt diesen Anspruch gerade in bebautem Gelände besser als alle anderen Sicherungsmaßnahmen und ist dabei umweltgerecht und kostengünstig. Kriechhänge sind in Baden-Württemberg im Keuperbergland und in Gebieten mit tonigen Jurasedimenten wie dem Opalinuston weit verbreitet. Zu ihrer geotechnischen Beurteilung und zur Dimensionierung der Dübel werden Messungen, Feld- und Laborversuche durchgeführt. Die Erkundungsverfahren zur Untersuchung von Kriechhängen wurden zusammenfassend dargestellt und ein Kriechhangspektrum zur geotechnischen Klassifikation der Hangbewegungen vorgeschlagen.

Folgende Verfahren wurden für die Anwendung bei der Untersuchung von Kriechhängen entwickelt:

- Für die Probennahme in tonigen, weichen Böden steht jetzt ein Entnahmegerät zur Anwendung in Bohrlöchern zur Verfügung, das den Probenkern möglichst schonend entnimmt und durch den Einsatz von Vakuumtechnik sicher nach oben bringt.
- In einem Probenaufbewahrungsgerät wird die empfindliche Probe luftdicht verpackt und unter den Druck gesetzt, der ihrer Entnahmetiefe entspricht, um sie vor den schädlichen Einflüssen von Transport und Lagerung zu schützen.
- Modifizierte Triaxialversuchstechnik ermöglicht die Bestimmung des Zähigkeitsindex und der Scherfestigkeit in der Gleitfuge. Die direkte Ermittlung dieser beiden

wichtigen Parameter im Labor kann ihre indirekte und ungenauere Abschätzung aus anderen Kennwerten ersetzen.

- Die Neigungsmeßsondierung in einem Bohrloch gibt Auskunft über die Hangbewegung und die Tiefenlage der Bewegungshorizonte. Die Steuerung des Meßvorgangs und die Aufnahme der Daten mit einem Computer vereinfachen die Messung und beugen Meßfehlern vor.
- Die Versuchsergebnisse einer im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelten Seitendrucksonde sollen bei der Bemessung der horizontal belasteten Pfähle verwendet werden. Ihre Geometrie wurde den Erfordernissen weicher, toniger Böden und ihrem Einsatz im Bohrloch speziell angepaßt.

In drei Ausführungsbeispielen in Baden-Württemberg wurden diese Untersuchungsmethoden eingesetzt und überprüft. Die Verdübelung eines Kriechhanges oberhalb eines Wohnhauses wird als Demonstrationsprojekt ausführlich dargestellt. Von allen neu entwickelten Verfahren und Geräten konnte nur die Seitendrucksonde den in sie gesetzten Erwartungen nicht gerecht werden. Sie erwies sich als zu empfindlich gegen die Verkantung der Druckplatte und durch ihr konstruktionsbedingt hohes Gewicht als unhandlich. Sie konnte deshalb ihre konzeptionellen Vorteile gegenüber anderen Systemen nicht ausspielen.

Aus den gewonnenen Erfahrungen wurden Richtlinien für die Anwendung formuliert, die bei der Untersuchung eines Kriechhangproblems ein Hilfsmittel an die Hand gibt, mit dem eine Verdübelungsmaßnahme zuverlässiger und kostengünstiger geplant werden kann. Dabei wurden konventionelle mit neu entwickelten Verfahren zu einer schrittweisen Abfolge gemäß den Erfordernissen einer Kriechhanguntersuchung verbunden.

In den Fällen, die im Rahmen dieses Forschungsauftrags untersucht wurden, bestätigte die Abnahme der Kriechbewegungen die Richtigkeit

- der theoretischen Überlegungen,
- der angewandten Untersuchungsmethoden und
- des Sanierungsverfahrens.

Damit steht nunmehr für die Stabilisierung von Kriechhängen ein theoretisch belegtes und praktisch erprobtes Sanierungsverfahren zur Verfügung.

## 8 Literatur

- [Bösinger et al., 1983] Bösinger, E. & Huber, G. & Schwarz, W. (1983). Fehleranalyse bei Neigungssondierungen. *Vortr. Symp. Meßtechnik im Erd- und Grundbau. München. Dtsch. Ges. Erd- und Grundbau e. V.*, S.: 151–156.
- [Einsele & Gierer, 1976] Einsele, G. & Gierer, H. (1976). Entfärbung bei Desintegration und Gleitflächenbildung im Knollenmergel. *Geologisches Jahrbuch*, C, 16, S.: 3–21.
- [Goldscheider & Bösinger, 1989] Goldscheider, M. & Bösinger, E. (1989). Bestimmung der Scherfestigkeit von Tonschichten im Bereich tiefer Tagebaurandböschungen. *Neue Bergbautechnik*, (3), S.: 87–90.
- [Goldscheider et al., 1983] Goldscheider, M. & Bösinger, E. & Huber, G. (1983). Meßtechnische Ausrüstung von Dreiaxialversuchsständen. In *Symp. Meßtechnik im Erd- und Grundbau, München, DGEg*, S.: 91–98.
- [Goldscheider & Scherzinger, 1987] Goldscheider, M. & Scherzinger, T. (1987). Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Sonderdruck, Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe; Ernst & Sohn: Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, S.: 259–272.
- [Goldscheider & Scherzinger, 1989] Goldscheider, M. & Scherzinger, T. (1989). Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. Sonderdruck, Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe; Ernst & Sohn: Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, S.: 235–282.
- [Gudehus, 1984] Gudehus, G. (1984). Seitendruck auf Pfähle in tonigen Böden. *Geotechnik*, H 2(7), S.: 73–84.
- [Gudehus et al., 1985] Gudehus, G. & Goldscheider, M. & Lippomann, R. (1985). Ingenieurgeologische und bodenmechanische Untersuchungen an Kriechhängen. In Heitfeld, Herausgeber, *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*, S.: 316–335. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Gudehus & Leinenkugel, 1978] Gudehus, G. & Leinenkugel, H.-J. (1978). Fließdruck und Fließbewegungen in bindigen Böden: neue Methoden. *Vortrag Baugrundtagung, Berlin*, S.: 411–419.

- [Krauter, 1987] Krauter, E. (1987). Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hängen) und ihre Massenbewegungen. In Smoltczyk, U., Herausgeber, *Grundbautaschenbuch, Teil 3*, S.: 1–46. Ernst, Berlin.
- [Leinenkugel, 1976] Leinenkugel, H.-J. (1976). Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Experimentelle Ergebnisse und ihre physikalischer Deutung. Heft 66, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- [Lippomann, 1988] Lippomann, R. (1988). Ingenieurgeologische Kriechhangsicherung durch Dübel. Heft 111, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- [Schwarz, 1987] Schwarz, W. (1987). Verdübelung toniger Böden. Heft 105, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe.
- [Seeger, 1980] Seeger, H. (1980). Beitrag zur Ermittlung des horizontalen Bettungsmoduls von Böden durch Seitendruckversuche im Bohrloch. Mitteilung 13, Baugrundinstitut Stuttgart.
- [Smoltczyk & Seeger, 1980] Smoltczyk, U. & Seeger, H. (1980). Erfahrungen mit der Stuttgarter Seitendrucksonde. *Geotechnik*, 3(4), S.: 165–173.
- [Wichter et al., 1990] Wichter, L. & Ehrke, E. & Rogowski, E. (1990). Hangstabilisierung mit verankerten Tiefbrunnen in einem Wohngebiet. In *Vortrag 9. Bodenseetagung der DGEG, Friedrichshafen*.
- [Wichter & Gudehus, 1978] Wichter, L. & Gudehus, G. (1978). Ein Verfahren zur Entnahme und Prüfung von geklüfteten Großbohrkernen. In *Votr. 2. Nat. Tag. Felsm., Aachen*, S.: 5–11.
- [Winter, 1979] Winter, H. (1979). Bemessung von Pfahlgründungen und Hangverdübelungen auf Fließdruck. *Vorträge Baugrundtagung Mainz*, S.: 563–593.

## Méthodes d'expérimentation à l'assainissement des zones de culture au moyen de goujonnage des pentes

Le projet de recherche s'est préoccupé des problèmes géologiques, qui se présentent pendant la consolidation des pentes solifluctantes par goujonnage. Le but fut d'élaborer des méthodes d'expérimentation pour rendre possible un assainissement solide et économique des zones de construction par cette mesure de stabilisation des pentes éprouvée. Après des préparations théorétiques et de la finition des instruments, de premières expériences furent effectuées. La mise en pratiques à un projet de goujonnage apporterait la preuve de la convenance des méthodes élaborés et de l'aptitude des instruments. A partir des résultats et des expériences, des lignes de conduite pratiques furent formulées pour l'application. Pentas solifluctantes, étant des pentes de sédiments argileux en mouvements lents, ne pourraient être utilisées constructivement et habitées sans danger que si les mouvements sont réduits à une dimension supportable par une mesure de consolidation de la pente. Le goujonnage accomplit cet exigence en zones bâties parce qu'il est de prix modéré et non polluant. Les pentes solifluctantes sont étendues sur Baden-Württemberg, sur le Keuperbergland et dans les zones de sédiments argileux du Jura comme l'argile Opalinus. Des mesurages et des expériences au laboratoire et au champ furent faits pour le jugement géotechnique et la détermination de dimensions des mesures de goujonnage. Les procédés suivants furent développés pour l'examination des pentes solifluctantes.

– Maintenant un appareil est à la disposition pour le prélèvement d'échantillon en sol argileux et mou dans le trou de forage. L'appareil prend le noyau d'échantillon avec ménagements et le ramène par technique à vide au niveau du sol.

– Le prélèvement conservé dans un appareil est emballé hermétiquement et sous pression correspondant à la profondeur d'emprunt. Le prélèvement est protégé contre les influences nuisibles de transport et de stockage.

– La technique d'essai triaxial modifiée rend possible la spécification d'index de la tenacité et de la résistance limitée au cisaillement du joint de glissement.

– La mesure d'abaissement par sonde dans un trou de forage donne des renseignements sur le mouvement de la pente et la situation profonde du tassement horizontal. Le guidage de procédé de mesure et la prise de dates par ordinateur simplifie la mesure et évite les fautes.

– Les résultats d'expérimentation d'un appareil pénétromètre de la pression latérale développé pour ce projet seront utilisés pour le dimensionnement des pieux soumis à un effort horizontal. La géométrie de l'appareil pénétromètre fut adaptée à l'exigence de sol argileux et mou.

Les méthodes d'expérimentation furent appliquées aux trois projets de démonstration en Baden-Württemberg. Le goujonnage d'une pente au-dessus d'une maison est présenté en détail. Seulement l'appareil pénétromètre de la pression latérale ne répondit pas à l'attente. Il se trouve être trop sensible au rebord de la plaque de pression et peu maniable par le poids. C'est pourquoi il n'est pas plus avantageux conceptionnellement que les autres systèmes.

Un guide d'application fut élaboré à partir des ces dernières expériences faites. Il aide à l'étude du problème d'une pente solifluctante en vue de prévoir une mesure de goujonnage plus sûre et à un coût plus modéré. En plus des procédés nouveaux conformes aux exigences d'une expérimentation des pentes solifluctantes.

## Research Methods for the Stabilization of Developed Areas by Dowelling

The research project dealt with engineering geological problems occurring with the stabilization of creeping slopes by dowelling. Research methods and strategies were developed to ensure an efficient and economical stabilization of developed areas by the dowelling method. Theoretical work followed by tests on the newly designed equipment led to their application in a dowelling project. The purpose was to prove their suitability for creeping slopes in a realistic project. Based on these results, guidelines were set up for the application of research methods and strategies for the investigation of slopes.

Creeping slopes, i.e. slowly moving hillsides consisting of clayey sediments, are of little use for construction projects unless creep movements are reduced to tolerable values. The dowelling method meets this demand especially in developed areas usually better than any other stabilization method, being less expensive and more reliable. Creeping slopes can be found in Baden-Württemberg in the hilly Keuper region and in areas with clayey jurassic sediments. For the geotechnical evaluation of a creeping slope and the design of the dowelling measurements, field and laboratory tests were carried out. The following methods were developed for their use on slope stability problems:

- A sampling device for soft, clayey soil for application in boreholes is now available, which guarantees the sampling of an undisturbed core and the remaining of the core in the tube by vacuum.
- A sample storage device seals the core to protect it from any chemical alteration by air. At the same time swelling is avoided by storing the sample under the pressure corresponding to the in-situ stress state. By this method any alteration during transport and storage is avoided.
- Modified triaxial tests make it possible to determine the value of the viscosity index and the shear strength in the shear zone.
- Inclinomometer measurements in boreholes give information about the amount of soil creep and the depth of the shear zone. The control of the measurement and the recording of the measurement values using a computer simplifies the measurement process and prevents misreadings.
- Test results of a lateral pressure sounding device developed in this research project, are used in the design of laterally loaded piles. The geometry of the borehole sounding device was especially designed for its application in soft, clayey soil.

In three projects, situated in Baden-Württemberg, the research methods and strategies were applied and tested. The dowelling of a creeping slope above a house is described in detail as a demonstration project. Only the lateral pressure sounding device couldn't meet the expectations. It proved to be too sensitive to tilting of the pressure plate and difficult to handle because of its weight. Hence, the various advantages which were built in could not be effectively used. Experience gained made it possible to set up guidelines for research strategies and methods on creeping slopes. Stabilizing a slope by dowelling can now be planned and carried out more reliably and economically. Conventional and newly developed methods are combined in a stepwise pattern according to the requirements of the investigation of a creeping slope.