

Hydrogeologische Markierungsversuche in Massenbewegungen (Reppwandgleitung, Kärnten und Stubnerkogel, Salzburg)

Hydrogeological Tracer Experiments in Mass Movements (Reppwand Sagging Mass, Southern Carinthia and Stubnerkogel, Salzburg)

H. HÖTZL¹⁾, M. MOSER²⁾, B. REICHERT¹⁾ & K. RENTSCHLER²⁾

Inhalt

	Seite
1. Einführung.....	69
2. Reppwandgleitung	71
2.1. Geotechnische Charakterisierung	71
2.2. Kombiniertes Markierungsversuch.....	71
2.2.1. Versuchsdurchführung.....	73
2.2.2. Untersuchungsergebnisse	75
2.3. Versuchsbewertung im Hinblick auf Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen.....	81
3. Stubnerkogel.....	83
3.1. Geologisch-geotechnische Übersicht	83
3.2. Markierungsversuch	87
3.2.1. Tracereingabe, Beobachtung, Analytik.....	87
3.2.2. Versuchsergebnisse.....	90
3.3. Hydrogeologische Folgerungen für die Hangsicherung	91
Zusammenfassung	91
Literatur.....	92
Summary	92

1. Einführung

Schwerkraftbedingte Massenverlagerungen von Gesteinen an Böschungen, Hängen und Talflanken werden stets durch Änderungen bestehender Gleichgewichtsbedingungen ausgelöst (z. B. E. FECKER & G. REIK, 1987, L. MÜLLER, 1963, H. PRINZ, 1982). Zusätzliche äußere Beanspruchungen oder Verminderungen des

¹⁾ Prof. Dr. H. HÖTZL & Dr. B. REICHERT: Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstr. 12, D-76128 Karlsruhe.

²⁾ Prof. Dr. M. MOSER & Dipl.-Geol. K. RENTSCHLER: Geologisches Institut, Universität Erlangen-Nürnberg, Schloßgarten 5, D-8520 Erlangen.

Scher- und Reibungswiderstandes sind hierbei die Ursachen für eine Störung der bestehenden Kräfteverhältnisse.

Längerfristige geologische Prozesse wie Verwitterung und Tiefenerosion führen durch die damit verbundene Auflockerung, Übersteilung und Unterspülung zu einer allmählichen Schwächung der Böschungs- und Hangstabilität.

Wasser stellt für die genannten geologischen Prozesse den entscheidenden Wirkungsfaktor dar und trägt maßgeblich zu einer Verschiebung der Kräfteverhältnisse im Gebirgskörper bei.

Neben langfristigen Destabilisierungsvorgängen können kurzfristige Veränderungen im Bergwasserspiegel zum auslösenden Moment einer Massenbewegung werden. Ein Anstieg des Bergwasserspiegels führt in den oberen Hangbereichen zu einer Lastzunahme und bedingt im Hangfußbereich einen vermehrten Auftrieb. Der sich daraus aufbauende Kluftwasserdruck wirkt als Normalspannung auf die Kluftwände und verursacht zusätzlich treibende Kräfte entlang möglicher Gleitflächen. Zugleich kann das Wasser die mechanischen Gesteinseigenschaften verändern und so den Reibungswinkel und den Scherwiderstand erniedrigen. Eine funktionierende Entwässerung von gerade im Gleichgewicht befindlichen und insbesondere von instabilen Hängen, Böschungen und Talflanken ist daher von entscheidender Bedeutung. Eine gezielte Absenkung des Bergwasserspiegels stellt eine der wichtigsten Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen destabilisierter und von Massenbewegungen betroffener bzw. bedrohter Hänge dar. Detaillierte hydrogeologische Erhebungen über die unterirdischen Wasserwegigkeiten sind für diese geotechnische Sicherungsmaßnahme erforderlich.

Eine hydraulisch einheitliche Entwässerung ist im Bereich einer Felsgleitung oder eines Talzuschubes nicht gegeben. Der Gesteinsverband ist erheblich gestört. Neben Schollen, die gegebenenfalls nur leicht rotiert im ursprünglichen Verband bewegt worden sind, kann es zu einer völligen kleinstückigen Auflösung des Gebirges kommen. Von bevorzugten Spaltströmungen, charakteristisch in den oberen Anrißbereichen der Talzuschübe, aber auch parallel an unterschiedlich tiefgreifenden Bewegungsbahnen zu beobachten, bis hin zu Porenströmungen in stark aufgelösten Gesteinsbereichen können alle Übergänge der Wasserzirkulation beobachtet werden.

Sekundäranbrüche und Sekundärgleitungen bedingen Unterbrechungen der Entwässerungsbahnen. Einzelne Teilbereiche können dadurch vollständig hydraulisch isoliert und nur über Quellaustritte, die nach kurzen Oberflächen-Abflußstrecken in der Bewegungsmasse wieder versickern, mit dem Gesamtsystem gekoppelt sein.

Derartig komplexe unterirdische Abflußsysteme sind mit stationären hydraulischen Meßeinrichtungen nur bedingt zu erkunden.

Anhand von zwei ausgewählten Beispielen aus dem alpinen Bereich soll die Möglichkeit der integrierten Gesamtbetrachtung mittels Markierungsversuche, auch über unterschiedlich strukturierte Teilbereiche hinweg, aufgezeigt werden.

Mit dem gezielten Einsatz von Tracern können in Massenbewegungen die Zu- und Abflußbedingungen in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung bestimmt werden. Daraus lassen sich die für eine Sicherung und Sanierung entscheidenden Kenntnisse über die Herkunft der Wässer in der Massenbewegung, über den Tiefgang der Wasserzirkulation, die Durchgängigkeit der Drainfunktion einzelner Spaltensysteme sowie über die hydraulische Verknüpfung einzelner Teilbereiche ableiten.

2. Reppwandgleitung

Der Talzuschub Reppwandgleitung liegt in den Karnischen Alpen in Kärnten nahe der italienisch-österreichischen Grenze. Der aktive Gleithang hat bereits mehrfach zu einer Unterbrechung der in diesem Hangbereich verlaufenden Naßfeld-Bundesstraße geführt. Das betroffene Gebiet ist ca. 1,75 km lang und reicht von der Anbruchsnische der Reppwand (ca. 1500 m Seehöhe) im S bis zum Oselitzenbach (20 m Seehöhe) im N. Geologisch wird der Gleithang von karbonischen Tonschiefern in seinem unteren Teil und oberkarbonischen bis permischen Sandstein- und Kalksteinfolgen aufgebaut. Ein geologischer Längenschnitt ist nach F. KAHLER & S. PREY (1963) in Fig. 1 wiedergegeben.

2.1. Geotechnische Charakterisierung

Durch umfassende geotechnische Untersuchungen konnten die Hauptbewegungs-zonen der Reppwandgleitung im Detail erfaßt werden (M. MOSER et al., 1988). Auf der Basis felsenmechanischer Kriterien wurde von M. MOSER & Th. WINDISCHMANN (1989) die Talzuschubsmasse in verschiedene Homogenitätsbereiche untergliedert. Vereinfacht zeigt die Talzuschubsmasse hinsichtlich des Bewegungsablaufes und der struktureologischen Einheiten folgendes Bild (Fig. 2):

1. sehr starke Gebirgsauflösung der Naßfeldschichten bis hin zur Grobblock-schutthalde mit tiefgreifenden und weitflächigen Muschelanbrüchen; Bewegungsgeschwindigkeit z. T. > 20 cm/a;
2. noch im Verband befindliche Sandstein- und Kalksteinpartien, vielfach übersteilt und durch ein labiles Gleichgewicht gekennzeichnet; Bewegungsgeschwindigkeit z. T. < 5 cm/a;
3. deutliche Kriecherscheinungen und Herausschieben des Gebirgsverbandes entlang vorwiegend schwach geneigter Bewegungsvektoren mit der Bildung von Nackentälern und Ausstreichen von Bewegungsbahnen; Bewegungsgeschwindigkeit 10–15 cm/a;
4. wenig aktive Bereiche, keine Bewegungen meßbar;
5. morphologisch stark gegliedertes Gelände bis 1200 m Seehöhe, aufgrund des Ausstreichens von Bewegungsbahnen durch Stufen und Versteilungen von teilweise > 10 m charakterisiert; keine Bewegungen meßbar;
6. Bergsturzmaterial im m^3 -Bereich, größere zusammenhängende Bergsturzkörper im $1000\text{-}m^3$ -Bereich mit Kalksteinen der Trogkofel- und Rattendorfer Schichten mit sekundären Anbrüchen und dm-breiten Spalten; keine Bewegungen meßbar;
7. Fußschüttung zur Stabilisierung der Talzuschubsstirn.

2.2. Kombiniertes Markierungsversuch

Zur Abklärung der hydrogeologischen Verhältnisse wurde nach einer detaillierten Quellaufnahme ein kombinierter Markierungsversuch durchgeführt. Ziel dieses Versuches war es, bevorzugte Abzugsbahnen im Talzuschubskörper der Reppwandgleitung zu erfassen und die Verweilzeiten der Wässer zu ermitteln. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die hydraulische Wirksamkeit der einzelnen Bewegungsflächen und der verschiedenen, durch die Gebirgszerreißung entstandenen Spaltenzonen gerichtet. Mit dem Versuch sollten Hinweise gewonnen werden, ob eine

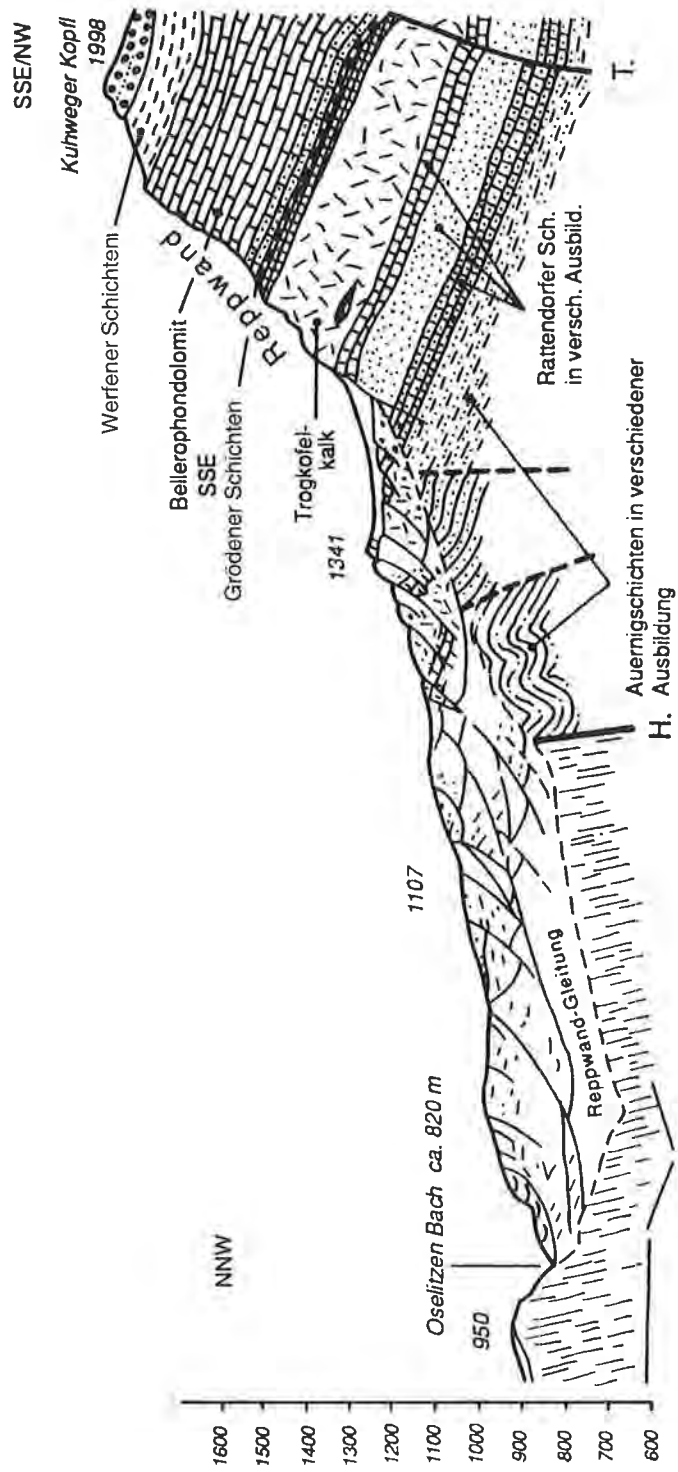


Fig. 1: Geologischer Längsschnitt (nach F. KAHLER & S. PREY, 1963) durch den Talzusub Reppwandgleitung (Karnische Alpen, Kärnten Österreich). Geological longitudinal section (according to F. KAHLER & S. PREY, 1963) through the Reppwand sagging mass.

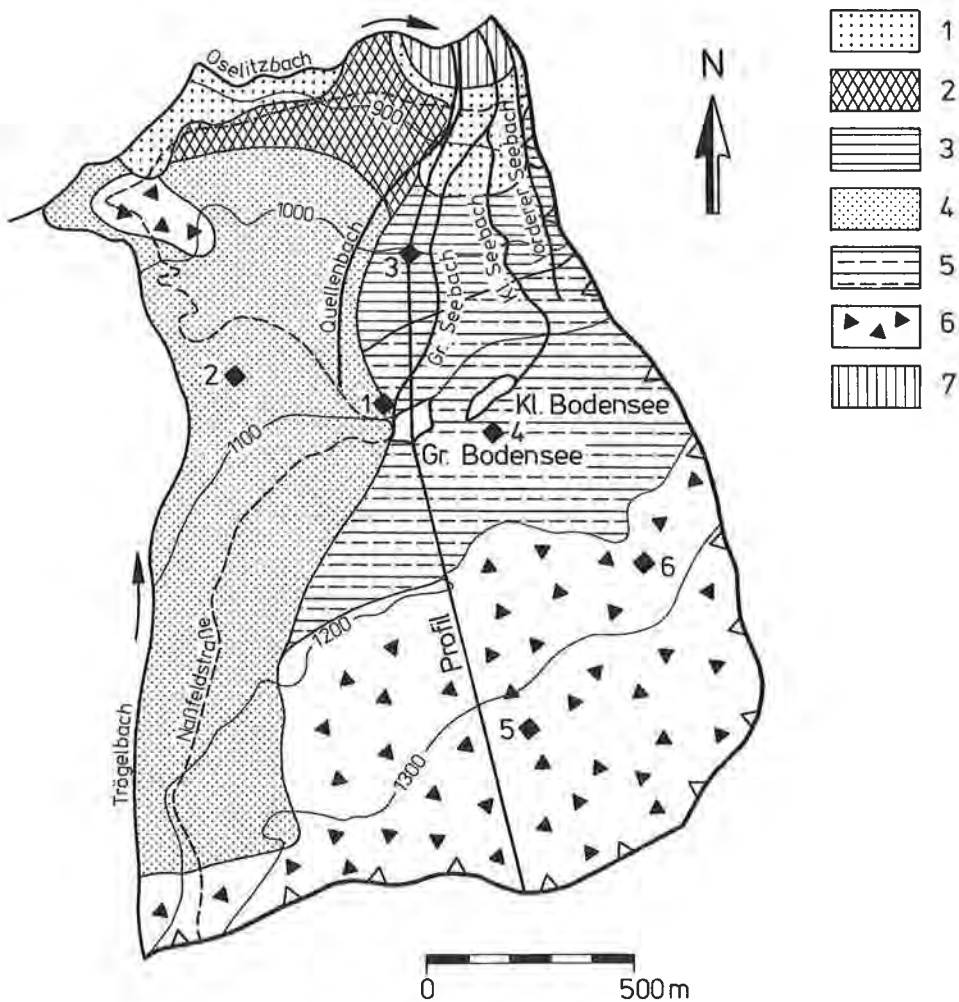


Fig. 2: Geotechnische Untergliederung der Talzschubsmasse der Reppwand. (Erläuterung der einzelnen Zonen s. Text.) Die Eingabestellen des kombinierten Markierungsversuches sind mitdargestellt.

Geotechnical subdivision of the sagging mass of the Reppwand. (Explanation of the individual zones see text.) The injection points of the combined tracer test are shown, too.

Reduzierung der Hangbewegungen durch eine gezielte Ableitung einzelner Quellen im mittleren Niveau der Talzschubsmasse zu erreichen ist.

2.2.1. Versuchsdurchführung

Als Eingabestellen wurden sechs Schwinden in den unterschiedlichen geotechnischen Homogenitätsbereichen innerhalb der Reppwandgleitung ausgewählt. Die Lage der Eingabestellen ist der Fig. 2 zu entnehmen, eine Übersicht über die eingesetzten Tracer, Tracermengen sowie Vor- und Nachspülvolumina gibt die Tab. 1.

Tab. 1: Kombierter Markierungsversuch Talzuschub Reppwandgleitung – Übersicht über Eingabestellen, Tracer und Eingabemengen und -zeiten sowie Vor- und Nachspül-volumina. (Abkürzungen: DSB = Duasynsäurerhodamin BOI, RB = Rhodamin B, EO = Eosin, PY = Pyranin, UR = Uranin).

Combined tracer test of the Reppwand sagging mass – overview of injection points, tracers and times and amounts of the injections as well as rinse volumina before and after the experiment. (Abbreviations: DSB = duasynacidrhodamine BOI, RB = rhodamine B, EO = eosine, PY = pyranine, UR = uranine).

Eingabestelle	Tracer	Eingabe [kg]	Datum / Zeit	Vor-/Nachspülung
1 (Vorversuch)	DSB	0,5	26. Mai / 15.14	0,50 l/s konst. Versickerung
2	RB	10	27. Mai / 12.15	0,25 l/s konst. Versickerung
3	EO	10	27. Mai / 12.00	0,50 l/s/2,00 l/s Bachzuleitung für 24 h
4	PY	10	27. Mai / 10.20	20 m ³ /15 m ³ Feuerwehr
5	UR	10	27. Mai / 12.22	12 m ³ /8 m ³ Feuerwehr
6	DSB	4,5	27. Mai / 11.20	8 m ³ /12 m ³ Feuerwehr

Die tiefste Einspeisungsstelle (3) bildete ein Tumpf wenige Meter westlich des Großen Seebaches mit einer konstanten Versickerung von ca. 0,5 l/s. Der Tumpf befindet sich in dem Bereich der Reppwandgleitung, der durch deutliche Kriechbewegungen, Bildung von Nackentälern und Ausstreichen von Bewegungsbahnen gekennzeichnet ist (Fig. 2: Zone 5). Der Tumpf selbst liegt in einem 280^m streichenden Nackental.

In dem morphologisch stark gegliederten Gelände im Bereich der beiden Bodenseen, das durch Geländestufen und Verteilungen charakterisiert ist, befanden sich die Eingabestellen 1 und 4 (Fig. 2: Zone 5). Bei der Eingabestelle 1 handelte es sich um eine aktive Schwinde im Bereich des Großen Seebaches, die knapp unterhalb des Großen Bodensees bei ca. 1100 m liegt. Im Frühjahr 1989 ist es in dieser Schwinde zum vollständigen Versitzen des Großen Seebaches gekommen (M. MOSER et al., 1988). Als Eingabestelle 4 wurde eine trockene Schwinde in einem kleinen Nackental oberhalb des Kleinen Bodensees ausgewählt.

Die Abflußverhältnisse im Bereich westlich des Quellenbaches, einer Zone der Reppwandgleitung mit zur Zeit wenig aktiven Bewegungszeichen, sollten mit der Eingabestelle 2 erfaßt werden (Fig. 2: Zone 4). Bei dieser Bachversickerung in 1080 m Seehöhe kommt es über eine Strecke von ca. 15 m zu einer Vollversickerung mit insgesamt ca. 0,25 l/s.

Die Eingabestellen 5 und 6 liegen im Bereich bevorzugter Spaltenzonen im Felssturzmaterial (Fig. 2: Zone 6) und sind nur während der frühjährlichen Schneeschmelze aktive Schwinden. Die Schwinde 5, die zentral in dieser Zone liegt, ist mit 1330 m die höchste Eingabestelle des kombinierten Markierungsversuches. Die Schwinde 6 (1280 m) ist im östlichen Teil des Talzuschubskörpers im Übergangsbereich zur „Bodensee-Zone“ (Fig. 2) positioniert.

Der kombinierte Markierungsversuch wurde im Mai 1989 mit der Eingabe der Tracer eingeleitet. Im Hinblick auf die möglichen tiefreichenden und dort sehr langsam zirkulierenden Wässer wurde ein Beobachtungszeitraum von mehr als 12 Monaten bis zum Sommer 1989 gewählt.

In die Beobachtung miteinbezogen waren alle Wasseraustritte innerhalb des Talzuschubes. In den ersten acht Wochen wurden Wasserproben entnommen. Als Langzeitbeobachtung kamen ausschließlich Aktivkohleadapter zum Einsatz, die im zweiwöchigen, später vierwöchigen Rhythmus gewechselt wurden. Der Nachweis der Fluoreszenztracer erfolgte spektralfluorimetrisch.

2.2.2. Untersuchungsergebnisse

Vergleichbar mit tracerhydrologischen Untersuchungen in anderen Talzuschubsmassen (z. B. M. MOSER & J. KIEFER, 1988), zeigte sich auch im Bereich der Reppwandgleitung die Schwierigkeit bei solchen hydraulisch wenig überschaubaren Verhältnissen positive Ergebnisse zu erzielen.

Tracerpositive Nachweise konnten nur für drei der insgesamt sechs Eingaben erbracht werden. Von den drei negativen Markierungen erfolgte nur die Pyranin-Eingabe (Fig. 2: Eingabestelle 4) in einer nur episodisch aktiven Schwinde. Rhodamin B und Eosin wurden in Schwinden eingespeist, die eine längerfristige aktive Versickerung aufweisen (Fig. 2: Eingabestelle 2, Bachversickerung und Eingabestelle 3, Versickerungstümpel). Die nachgewiesenen Verbindungen sind in Fig. 3 dargestellt, die aus den Durchgängen in den Wasserproben ermittelten Kennwerte sind in Tab. 2 zusammengefaßt.

Uranin

Uranin wurde in eine trockene Schwinde einer Bergsturzmasse im oberen Bereich der Reppwand (Fig. 2: Schwinde 5) eingegeben. Der direkte Wiederaustritt des Uranins beschränkt sich auf eine Quellgruppe (Q 23, Q 24 und Q 25) oberhalb des Großen Bodensees, deren Durchgangskurven in Fig. 4 dargestellt sind, und auf die im NNE dieser Quellgruppe liegenden Quelle Q 30, die am westlichen Ende des Kleinen Bodensees im See entspringt. Die genauen Kennwerte der Durchgangskurven sind in der Tab. 2 zusammengefaßt.

Die Quelle Q 25 stellt mit 16,5 % Wiederausbringung des eingespeisten Uranins bei noch nicht abgeschlossenem Farbdurchgang den Hauptaustritt dar. Die zu der gleichen Quellgruppe gehörenden Quellen Q 23 und Q 24 sind mit Wiederfindungsraten von 0,5 % (Q 23) und 0,9 % (Q 24) nur als Nebenaustritte zu bezeichnen. Für die Quelle Q 30, deren Austritt im westlichen Rand des Kleinen Bodensees liegt, konnte aufgrund der fehlenden Schüttungsangaben kein Wiedererhalt berechnet werden. Anhand eines Vergleiches der maximalen Uraninkonzentrationen und Abstandsgeschwindigkeiten der verschiedenen Quellen (Tab. 2) kann jedoch davon ausgegangen werden, daß Q 30 nur einen Nebenaustritt darstellt. Besonders deutlich kommt dies bei der signifikanten Verschiebung der Ersteinsätze von SSW (Q 25) nach NNE (Q 30) zum Ausdruck.

Zusätzlich zu den vier Quellen konnte Uranin auch in den Abflüssen der beiden Bodenseen nachgewiesen werden, prinzipiell jedoch mit deutlichen zeitlichen Verzögerungen und wesentlich geringeren Konzentrationen als in den vier Quellen. Das Uranin im Abfluß des Kleinen Bodensees ist eindeutig auf die Quelle Q 30 zurückzuführen, die unmittelbar am westlichen Ufer im See entspringt. Das im Abfluß des Großen Bodensees nachgewiesene Uranin resultiert aus den dem

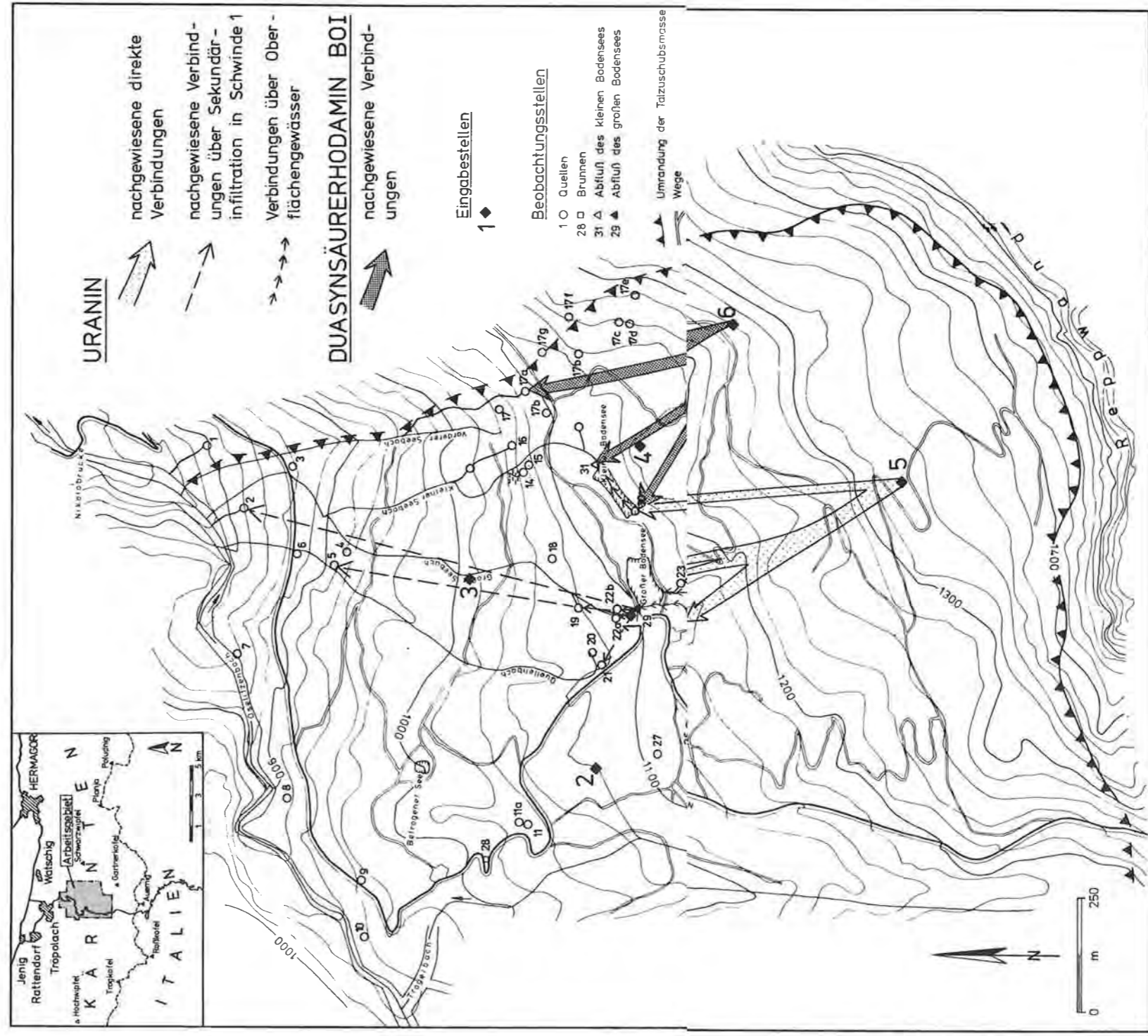


Fig. 3: Nachgewiesene Abflußverbindungen des kombinierten Markierungsversuches im Bereich der Reppwandleitung. Positive Tracernachweise erbrachten nur die Eingaben von Uranin (Eingabestelle 5) und Duasynsäurerhodamin BOI (Eingabestelle 6). Die Markierungen in den Eingabestellen 2, 3 und 4 waren negativ. Die im Rahmen eines Vorversuches nachgewiesenen Verbindungen der Bachversickerung des Großen Seebaches (Eingabestelle 1) zu den verschiedenen Quellen im unteren Hangbereich wurden beim Hauptversuch mit Uranin bestätigt. Das uranhaltige Quellwasser der Quellen 23, 24 und 25 fließt oberflächlich in den Großen Bodensee ab und versickert dann in der Schwinde 1 (Sekundärinfiltration).
 Proved flow connections of the combined tracer test in the area of the Reppwand sagging mass. Positive tracing results were only received by injections with uranine (injection point 5) and duasynacidrhodamine BOI (injection point 6). The tracings in the injection points 2, 3 and 4 were negative. The connections of the creek infiltration of the Großer Seebach (injection point 1) to the various springs in the lower slope area - detected in a pilot test - have been confirmed by the main test with uranine. The uranine-bearing spring water of the springs 23, 24 and 25 superficially flows off to the Großer Bodensee and then percolates into the sink hole 1 (secondary infiltration).

Tab. 2: Kennwerte der in Direktproben registrierten Tracerdurchgänge beim Markierungsversuch Reppwand. (Mit: x_{ein} = Entfernung zur Eingabestelle, t_{max} = Zeitpunkt des ersten Tracernachweises, v_{max} = maximale Abstandsgeschwindigkeit, t_{dom} = Zeitpunkt des Konzentrationsmaximums, v_{dom} = dominierende Abstandsgeschwindigkeit, c_{max} = maximale Tracerkonzentration, W = Wiederausbringungsrate (ermittelt mit der mittleren Schüttungsrate), UR = Uranin, DSB = Duasynsäurerhodamin; *1] Wiederausbringungsrate konnte nicht bestimmt werden, da keine Schüttungsangabe möglich ist; *2] kein kompletter Tracerdurchgang).

Results of the tracer experiments registered in water samples at the Reppwand sagging mass. (With: x_{ein} = distance to the injection point, t_{max} = time of the first tracer detection, v_{max} = max. groundwater velocity, t_{dom} = time of the concentration maximum, v_{dom} = dominant groundwater velocity, c_{max} = max. tracer concentration, W = discharge rate (determined with the mean rate of the well capacity), UR = uranine, DSB = duasynacidrhodamin; *1] discharge rate could not be determined, as no data concerning the well capacity could be given; *2] no complete breakthrough of the tracer).

Quelle	Tracer	Eingabe	x_{ein} [m]	t_{max} [h]	v_{max} [m/h]	t_{dom} [h]	v_{dom} [m/h]	c_{max} [mg/m ³]	W [%]
Q 25	UR	5	560	118	4,75	620	0,9	13,73	16,5
Q 24	UR	5	674	141	4,75	620	1,08	0,940	0,9
Q 23	UR	5	705	164	4,30	669	1,05	2,540	0,5
Q 30	UR	5	780	720	1,08	1245	0,62	0,254	*1]
Q 17a	DSB	6	651	410	1,59	1390	0,46	0,339	1,9
Q 30	DSB	6	568	2184	0,26	*2]	*2]	0,077	*1]
A 31	DSB	6	583	815	0,71	1222	0,47	0,262	0,6

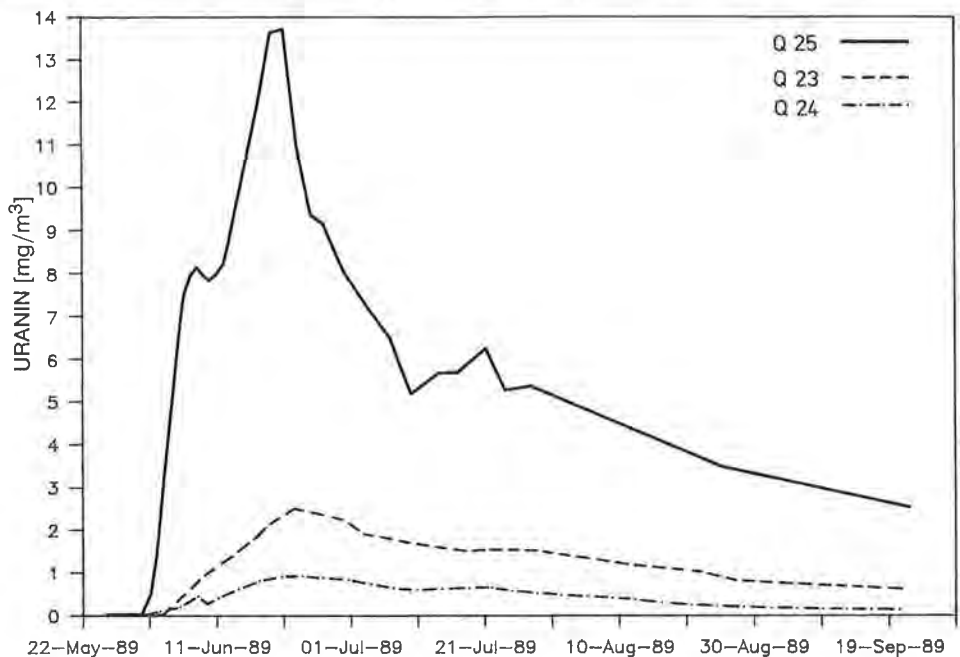


Fig. 4: Uranin-Durchgangskurven der Quellen Q 23, 24 und 25 oberhalb des Großen Bodensees (Wasserproben). Breakthrough curves of uranine of the springs Q 23, 24 and 25 above the Großer Bodensee (water samples).

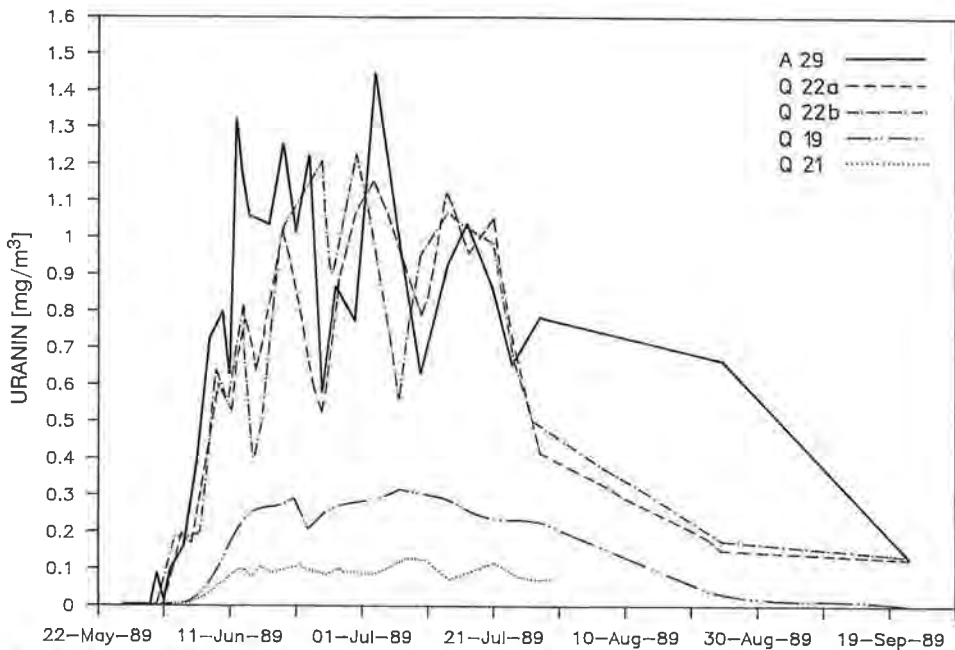


Fig. 5: Uranin-Durchgangskurven verschiedener Quellen im unteren Teilbereich der Reppwandgleitung, die auf die Sekundärinfiltration uraninhaltigen Wassers des Großen Bodensees (A 29) im Bereich der Bachschwinde des Oberen Seebachs (Fig. 2: Eingabestelle 1) zurückzuführen sind (Wasserproben).
Breakthrough curves of uranine of different springs in the lower area of the Reppwand sagging mass, which can be attributed to the secondary infiltration of uranine-bearing water of the Großer Bodensee (A 29) near the sink hole of the Oberer Seebach (Fig. 2, injection point 1) (water samples).

Bodensee tributären Oberflächenabflüssen der Quellgruppe 25. Dabei führt die Mischung mit dem Seewasser zu einer deutlichen Konzentrationsabnahme. Bedingt durch die unterschiedlichen Mischungsverhältnisse im Bodensee ist die Durchgangskurve des Abflusses (A 29) durch ein breites, fast sechs Wochen dauerndes Maximum mit zahlreichen Einzelpeaks charakterisiert, das erst ab Ende Juli abnimmt (vgl. Fig. 5). Das mit dem Uranin sekundär markierte Wasser des Abflusses versickert in der Bachschwinde 1, deren unterirdisches Abströmverhalten im Rahmen eines Vorversuches am 26. Mai 1989 mit 0,5 kg Duasynsäurerhodamin BOI nachgewiesen wurde. Wie beim Vorversuch reagierten die Quellen 22a, 22b, 19, 21, 2 und 5 auf die Infiltration des farbstoffhaltigen Wassers. Bedingt durch die kontinuierliche Tracereingabe über sechs Wochen weisen die Durchgangskurven der genannten Quellen unterhalb des Bodeseeniveaus langanhaltende Maxima auf, die außerdem eine auffällige Parallelität zur Durchgangskurve des Bodenseeabflusses zeigen (Fig. 5). Die Kennwerte der Uranindurchgänge der Quellen mit Sekundärinfiltration über die Bachschwinde 1 sowie des infiltrierenden uraninhaltigen Bachwassers (A 29) selbst können der Tab. 3 entnommen werden.

Mit der Aktivkohlebeprobung, die acht Wochen nach der Eingabe im August 1989 eingeleitet wurde, sollte die Langzeitausbringung der Tracer erfasst werden. Im Bezug auf das Gesamtbild der räumlichen Ausbreitung lieferte die Aktiv-

Tab. 3: Kennwerte der in Direktproben registrierten Uranindurchgänge durch Sekundärfiltration im Bereich der Bachversickerung (Fig. 2, Schwinde 1) des Großen Seebaches. Die Kennwerte des Abflusses (A 29) sind als Inputdaten zu Vergleichszwecken mitaufgeführt. Die Wiedererhalte wurde in Relation zu der Eingabemenge in die Schwinde 5 berechnet. Values of the breakthrough of uranine (registered in water samples) due to secondary infiltration in the sink hole 1 (Fig. 2) of the Großer Seebach. The values of the outflow (A 29) are listed as input data for reference purposes. The recharge was calculated in relation to the amount of the injection in sink hole 5.

Meßstelle	t_{\max} [h]	C_{\max} [mg/m ³]	W [%]
A 29	121	1,440	4,80
Q 22a	141	1,170	1,00
Q 22b	141	1,230	0,25
Q 19	211	0,320	0,15
Q 21	218	0,130	0,02
Q 2	335	0,049	< 0,01
Q 5	474	0,014	< 0,01

kohlebeprobung ein analoges Bild zur Direktbeprobung (Fig. 3). Lediglich die Quellen Q 6 und Q 15 im unteren Teilabschnitt der Reppwandgleitung ergaben zusätzliche Befunde, die vermutlich auf die Sekundärfiltration des gefärbten Bachwassers zurückzuführen sind. Mit den Aktivkohlen konnte die verstärkte Ausspülung des Tracers aus dem feinporigen ungesättigten bis gesättigten Bereich durch deutliche Konzentrationserhöhungen beobachtet werden. Verstärkte Auswaschungseffekte fanden einmal während der niederschlagsreichen Monate Oktober und November 1989 sowie während der Schneeschmelze im Frühjahr 1990 statt.

Duasynsäurerhodamin BOI

Duasynsäurerhodamin BOI wurde für die Erfassung der Abflußverhältnisse im östlichen Randbereich der Reppwandgleitung in die Schwinde 6 (Fig. 2) eingegeben. Von dieser Eingabe betroffen waren nur die Quellen Q 17a und Q 30 sowie der Abfluß des Kleinen Bodensees (vgl. Fig. 6, Tab. 2). Während der Uraninnachweis im Abfluß des Kleinen Bodensees aufgrund der zeitlichen Verzögerung und der wesentlich niedrigeren Konzentration eindeutig auf den Uraninaustritt der Quelle Q 30 zurückzuführen ist, kann der Duasynsäurerhodamindurchgang nur von anderen im Kleinen Bodensee austretenden Quellen stammen. Die beobachtete Maximalkonzentration im Abfluß ist mit 0,262 mg/m³ um ein Vielfaches höher als bei Q 30 (0,077 mg/m³); zusätzlich konnte Duasynsäurerhodamin im Abfluß bereits 57 Tage früher nachgewiesen werden. Die Quelle Q 17a stellt mit einer maximalen Fließgeschwindigkeit von 1,59 m/h, einer maximalen Konzentration von 0,339 mg/m³ den Hauptaustritt dar. Im Vergleich zur Uranineingabe ist die Gesamtwiederausbringung von Duasynsäurerhodamin mit insgesamt ca. 3 % relativ gering. Dies ist im wesentlichen auf die stärkere Festlegung des sorptiven Tracers in der durchflossenen Gesteinsmatrix, die teilweise hohe Sorptionskapazitäten aufweist, zurückzuführen.

Mit der Aktivkohle konnten die Quellen Q 15 und Q 17a als zusätzliche Austritte nachgewiesen werden. Bemerkenswert ist, daß es in der Quelle 17a erst knapp 10 Monate nach der Eingabe im Zusammenhang mit der Schneeschmelze zu Farbausstritten kam. Insgesamt erbrachte die Aktivkohlebeprobung für Duasynsäure-

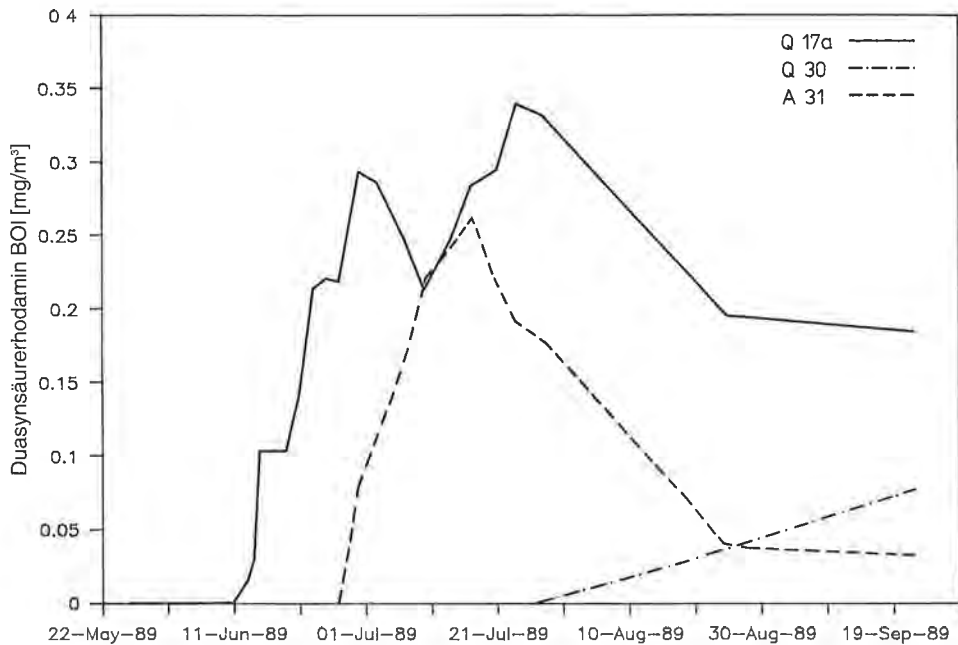


Fig. 6: Duasynsäurerhodamin BOI-Durchgangskurven der Quellen Q 17a und Q 30 sowie des Abflusses (A 31) des Kleinen Bodensees (Wasserproben).
Breakthrough curves of duasynacidrhodamine BOI of the springs Q 17a and Q 30 and the outflow (A 31) of the Kleiner Bodensee (water samples).

rhodamin, vergleichbar mit Uranin, signifikante Konzentrationserhöhungen, bedingt durch Ausspüfungseffekte während der spätherbstlichen Niederschlagsperiode und nach Einsetzen der Schneeschmelze im Frühjahr.

Die Reaktionen sind jedoch weniger ausgeprägt als bei Uranin. Duasynsäurerhodamin wird mit wesentlich höherer Bindungsenergie an die z. T. sehr feinkörnige und bindige Gesteinsmatrix festgelegt und ist daher im Vergleich zu Uranin weniger einfach zu desorbieren.

2.3. Versuchsbewertung im Hinblick auf Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen

Das Gesamtergebnis des kombinierten Markierungsversuches läßt eine deutliche Zweiteilung der Talzuschubsmasse der Reppwandgleitung erkennen (Fig. 7).

Im oberen Bereich dominieren relativ flache Felsgleitungen, deren Bewegungsbahnen im Mittelabschnitt auslaufen. Die ausgeprägten Wasserwegsamkeiten in diesem Abschnitt der Talzuschubsmasse werden durch die für Kluftkörper erheblichen Abstromgeschwindigkeiten zwischen 0,2 und 5,0 m/h dokumentiert (vgl. Tab. 2). Die beobachteten Wiederausbringungsraten von < 20 % verdeutlichen einerseits den relativ großen Anteil von diffusiven Transportvorgängen in den feinerzkleinerten Auflockerungszonen und können andererseits als Ergebnis eines signifikanten Abstromes in den unteren Teilbereich der Talzuschubsmasse bewertet werden.

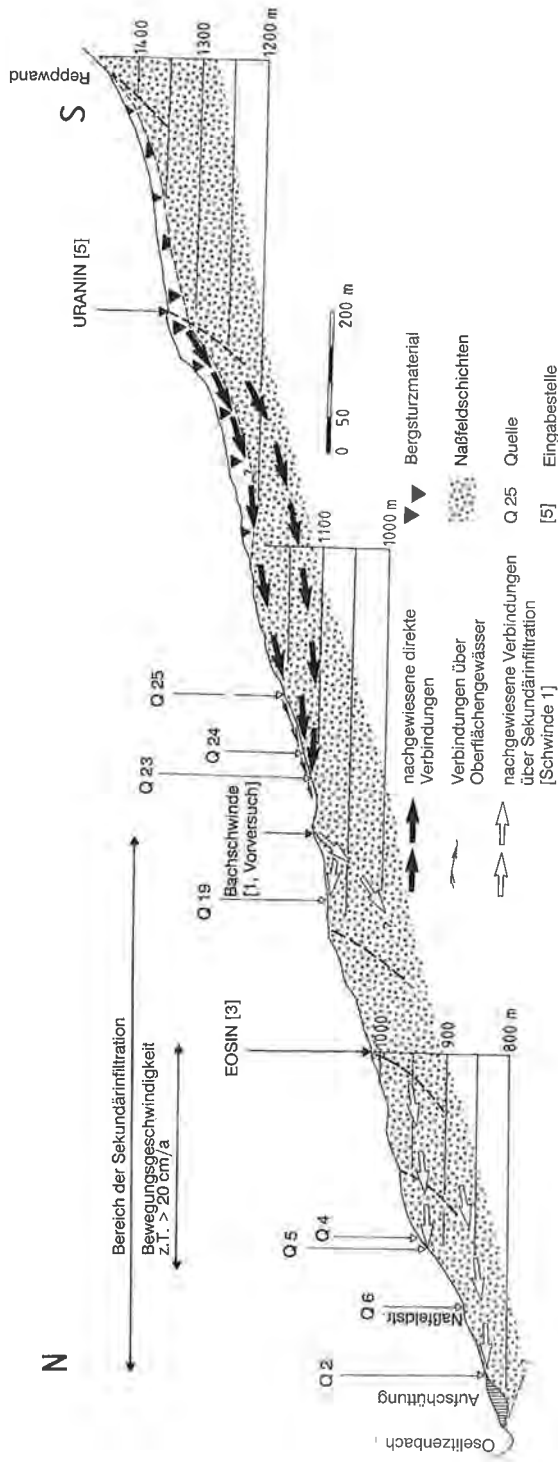


Fig. 7: Geotechnischer Längenschnitt der Reppwandgleitung mit den Versuchsergebnissen des kombinierten Markierungsversuches.
 Geotechnical longitudinal section of the Reppwand sagging mass with the results of the combined tracer test.

Die Entwässerung in der unteren Hälfte der Reppwandgleitung erfolgt vor allem über neu ansetzende, tiefgreifende rotationselliptische Bewegungsflächen. Während sie im Anrißbereich zwar weit klaffende Spalten verursachen, müssen sie im weiteren Verlauf nach der Tiefe rasch zugehen und zu einem Rückstau des einsickernden Wassers führen. Der weitere Abstrom kann daher nur als langsamer Sickerstrom mit meist diffusen Austritten im Bereich des Vorflutniveaus durch diese hochmobile Zone der Talzuschubsmasse erfolgen.

Für die Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen der Reppwandgleitung ergibt sich aus diesen Resultaten die Notwendigkeit, die im Mittelabschnitt austretenden Wässer aus dem mobilen Bereich des Hanges abzuleiten. Eine Ausleitung der aus diesen Quellen gespeisten Bäche und damit die Unterbindung der beobachteten Sekundärfiltrationen kann zu einer Beruhigung und Stabilisierung des unteren hoch mobilen Bereiches der Reppwandgleitung entscheidend beitragen.

3. Stubnerkogel

Das Bergzerreißungsgebiet „Stubnerkogel-Osthang“ liegt im österreichischen Bundesland Salzburg oberhalb des Kurortes Badgastein. In Folge verschiedener Murenkatastrophen in den Jahren 1965, 1966 und insbesondere 1977, bei der es z. B. zur Vermurung einzelner Häusergruppen am Hangfuß kam, wurden intensive geotechnische Maßnahmen durchgeführt (Wildbachverbauung, Aufforstung, Bau von Retentionsbecken und Hangdrainagen etc.). Seit den 80er Jahren wird von der Bergbahngesellschaft zusätzlich zu den Rückhaltebecken im Bereich der Mittelstation des Stubnerkogel-Osthanges eine ausgeprägte, hangparallele Spaltenzone bei ca. 100 m Seehöhe zur Ableitung und Versickerung von Oberflächenwässern genutzt.

3.1. Geologisch-geotechnische Übersicht

Im Rahmen umfangreicher geotechnischer Untersuchungen des Gefährdungspotentials für die Hangstabilität des Stubnerkogel-Osthanges durch die künstliche Versickerung von Oberflächenabflüssen im Bereich von Bergzerreißungsspalten bei ca. 2100 m Seehöhe wurde eine geologisch-geotektonische Detailkartierung des oberen Hangbereiches durchgeführt (K. RENTSCHLER, 1992).

Der Stubnerkogel ist ein weitvorgesobener Block der Zentralgneismasse des Hochalm-Ankogel-Gebietes, das nach N hin unter die Penninische Schieferhülle der Hohen Tauern abtaucht. Reste der Schieferhülle über dem Siglitzgneis sind insbesondere im Gipfelbereich des Stubnerkogels erhalten. Eine geologisch-geotechnische Übersichtskarte des Stubnerkogelgipfels zeigt die Fig. 8, einen Längenschnitt durch den Osthang Fig. 9.

Im Bereich des Stubnerkogel-Osthanges werden die flachlagernden Gesteine der penninischen Schieferhülle der Hohen Tauern von einer Wechsellagerung von Marmoren und Phylliten gebildet, deren Schieferungsflächen flach hangauswärts fallen. Als Festgestein steht diese Wechsellagerung jedoch nur im Bereich des Gipfelgrats und einzelner Steilstufen an, ansonsten sind die Hänge überwiegend mit mächtigem phyllitischem Hangschutt bedeckt (Fig. 8, 9). Strukturgeologisch zeichnet sich das Gebiet durch zwei durchwegs gut ausgebildete Kluftscharen aus, die SSW–NNE und WNW–ESE streichen und steil bis saiger zueinanderstehen.

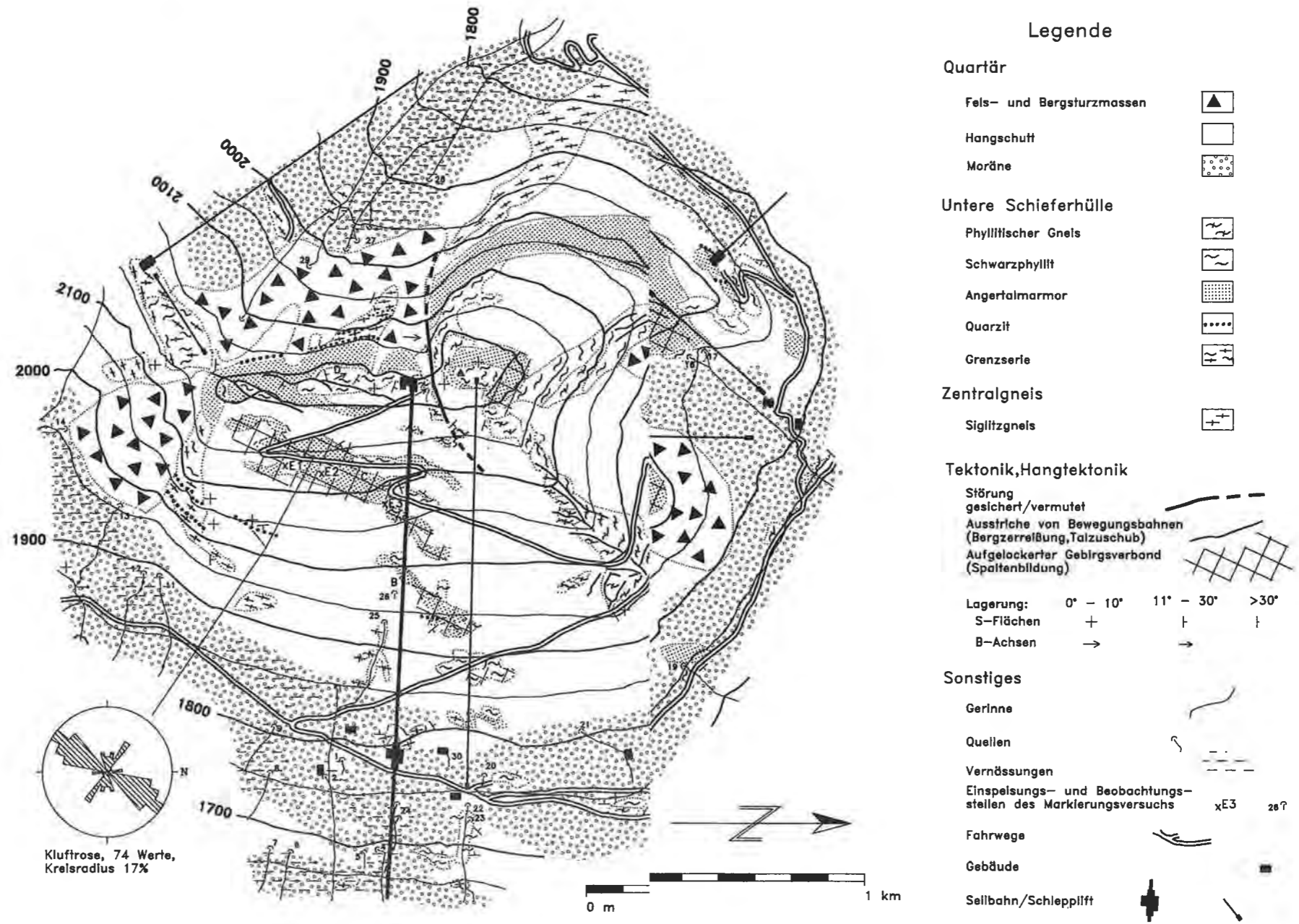


Fig. 8: Geologisch-geotechnische Übersichtskarte des Stubnerkogelgipfels mit der Lage der Eingabestellen ^{E1=Uranin, E2=Eosin und E3=Pyranin} sowie aller Beobachtungsquellen des Markierungsversuches vom 2. Juni 1990 (K. RENTSCHLER, 1992).
 Generalized geotechnical map of the summit of the Stubnerkogel with the positions of the injection points ^{E1=uranine, E2=eosine and E3=pyranine} as well as all observation wells of the tracer test dated 02/06/1990 (K. RENTSCHLER, 1992).

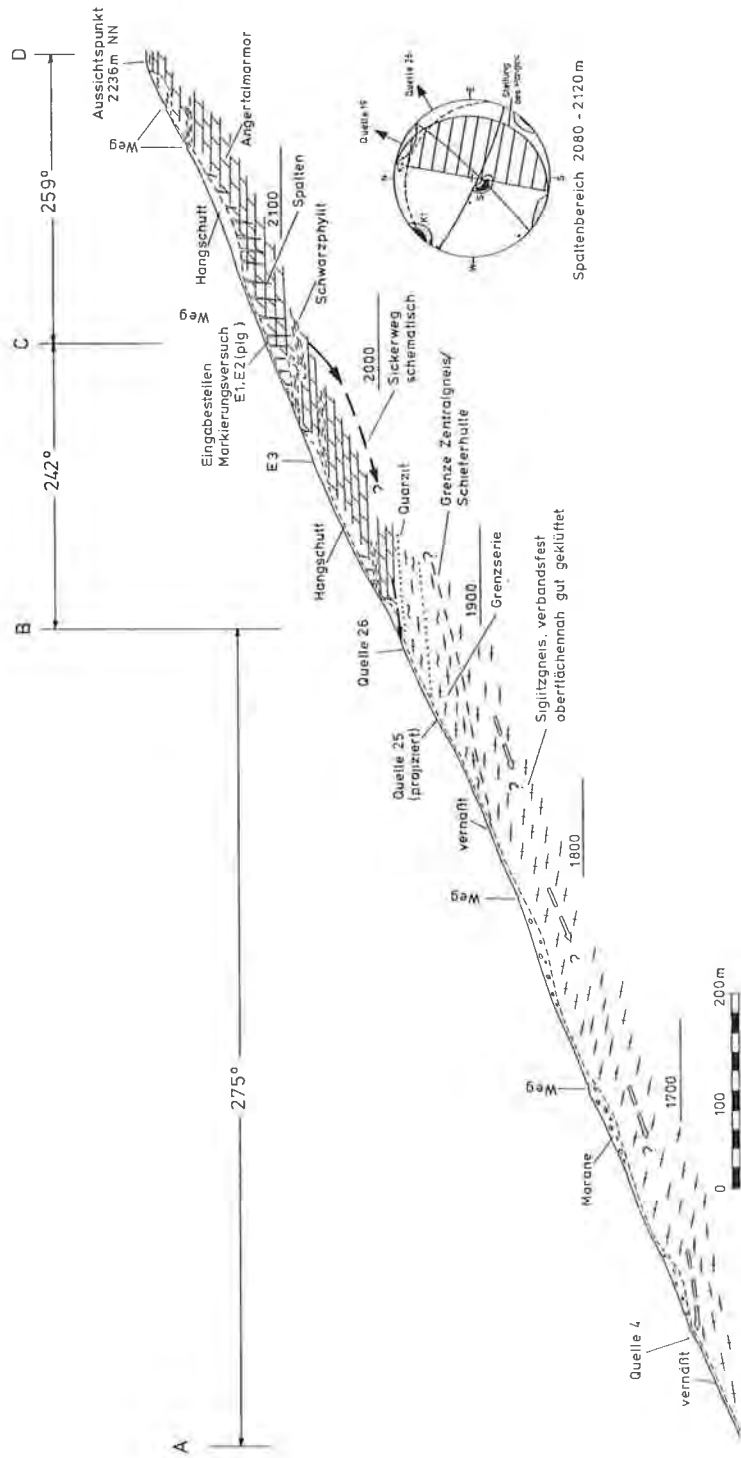


Fig. 9: Geotechnischer Längenschnitt des Oberen Stubnerkogel-Osthanges (K. RENTSCHLER, 1992). Die im Rahmen des kombinierten Markierungsversuches beobachteten Abflußbahnen sind miteingezeichnet. Die Lage des Profiles ist der Übersichtskarte Fig. 8 zu entnehmen. Geotechnical longitudinal section of the Oberer Stubnerkogel (K. RENTSCHLER, 1992). The flow paths observed in the course of the combined tracer test are also recorded. Please, find the position of the profile in the generalized map, fig. 8.

Zahlreiche Spaltenzonen, Nackentäler, Rinnen und Steilstufen zeichnen dieses Kluftmuster in dem bereits postglazial von Massenbewegungen betroffenen Stubnerkogel nach.

Für die Bergzerreißungsvorgänge von entscheidender Bedeutung sind die hochteilbeweglichen Phyllite. Sie zeigen ein duktileres Verformungsverhalten im Vergleich zu den spröde reagierenden Marmoren. Die daraus resultierenden signifikanten Unterschiede im Durchlässigkeitsverhalten der Phyllite zu den Marmoren führen teilweise zu Quellaustritten mit den Phylliten als Stauhizont (vgl. Fig. 8: Quellen 16, 17, 19, 21), generell aber zu einer Erhöhung des Kluftwasserdruckes in den tiefreichend verwitterten Phylliten selbst. Mit dieser Erhöhung kommt es zu einer wesentlichen Verschiebung der Kräfteverhältnisse im Gebirgskörper, die in Richtung treibende Kräfte weist. Künstlich verstärkt eingeleitete Wässer in Bergzerreißungszonen eines derartig labilen Hangbereichs können durch eine sprunghafte Erhöhung des Bergwasserspiegels und damit des Kluftwasserdruckes zu Felsgleitungen und/oder Hangwasserexplosionen in den Hangschutt- und Moränenaufgaben führen.

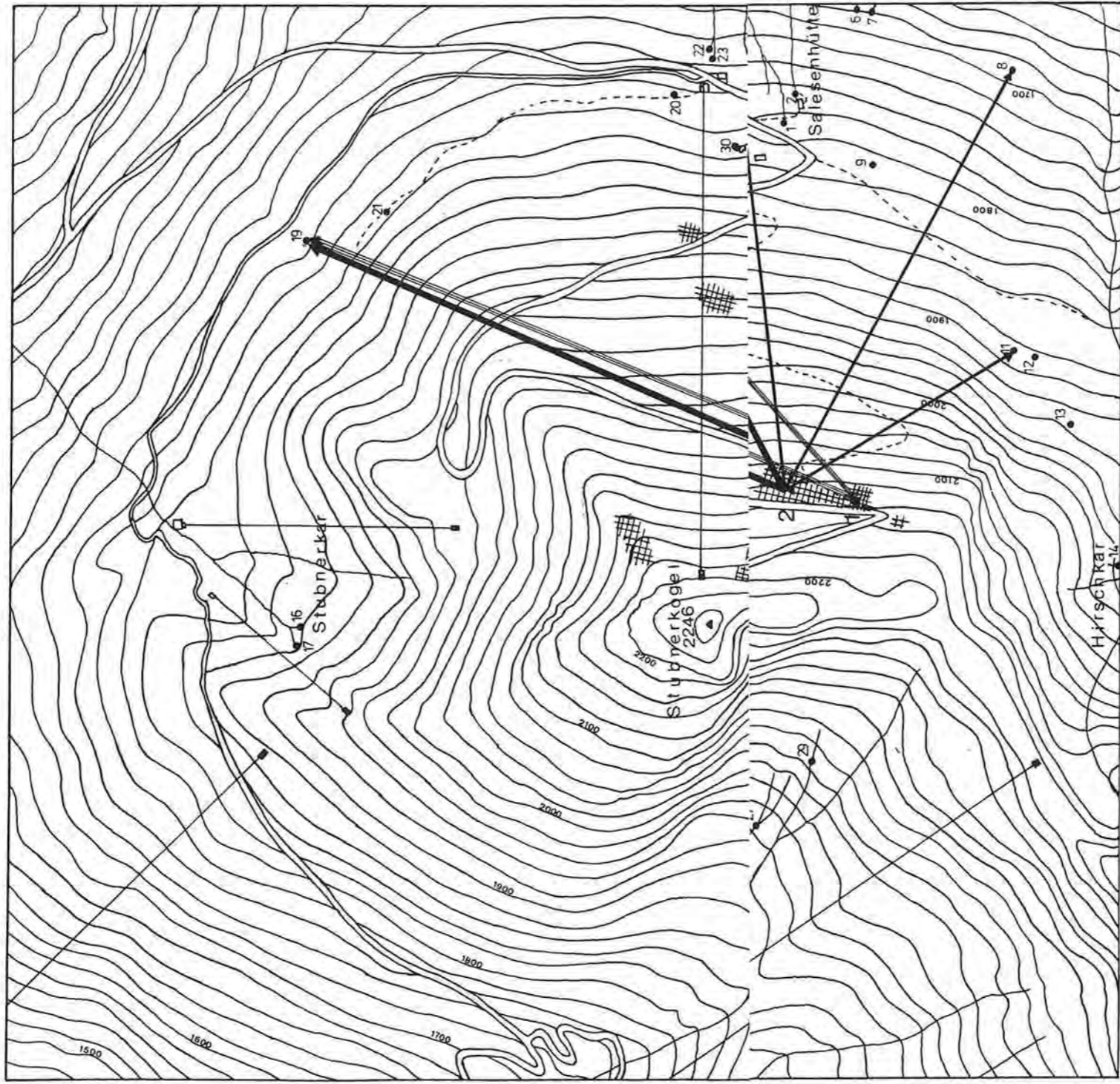
3.2. Markierungsversuch

Zielsetzung des kombinierten Markierungsversuches war es, das unterirdische Abflußverhalten im Bereich der Bergzerreißungsmasse am Stubnerkogel-Osthang möglichst weiträumig zu erfassen. Es sollten die bevorzugten Fließwege, die vorherrschende Abströmrichtung sowie die Verweilzeiten der versickernden Oberflächenwässer ermittelt werden. Insbesondere die hydraulische Wirksamkeit der ausgeprägten Spaltenzone im oberen Bereich der Bergzerreißungsmasse bei ca. 2100 m Seehöhe sollte detailliert erfaßt werden (vgl. Fig. 8, 9). Diese Spaltenzone, durch große hangparallele Dehnungsklüfte charakterisiert, wird, wie bereits erwähnt, von der Bergbahngesellschaft zur Ableitung und Versickerung von Oberflächenwässern benutzt.

3.2.1. Tracereingabe, Beobachtung, Analytik

Der Markierungsversuch wurde mit der Eingabe der Tracer am 2. Juni 1990 eingeleitet. Als Tracer wurden 5 kg Eosin (Fig. 8: Eingabestelle 1), 2,5 kg Uranin (Eingabestelle 2) und 5 kg Pyranin (Eingabestelle 3) ausgewählt. Alle Eingaben erfolgten in Dehnungsklüfte im oberen Anrißbereich der Massenbewegung in unterschiedlichen Höhenlagen (vgl. Fig. 8). Eosin wurde in eine hangparallele Kluft mit 25 cm Öffnungsweite auf 2145 m Seehöhe eingespeist. Die Uranin- (2125 m Seehöhe) und Pyranineingaben (2065 m Seehöhe) wurden jeweils in Kreuzungsbereichen von hangparallelen Dehnungsklüften mit Querklüften durchgeführt. Die Eingabestellen wiesen Öffnungsweiten von 30 cm (Pyranin) und 70 cm (Uranin) und Gesamtteufen von 2,5 m (Pyranin) und 8 m (Uranin) auf. Genügend große Vorspül- und Nachspülvolumina (zwischen 400 und 700 l) sollten bei den nur temporär aktiven Spalten eine ausreichende Einbindung der Tracerlösung in das hydraulische System gewährleisten. Um eine Verteilung der Tracer im oberflächennahen Bereich zu vermeiden, wurde die Nachspülung über längere Zeit kontinuierlich mit geringen Volumina durchgeführt. Aufgrund technischer Probleme mußte die Nachspülung bei der Pyranineingabe jedoch schwallartig erfolgen.

Für die Beobachtung wurden auf der Basis einer umfangreichen hydrogeologischen Aufnahme sämtliche Wasseraustritte im Bereich des Stubnerkogel-Osthangs mit Schüttungsraten von $> 0,01$ l/s herangezogen. Zusätzlich wurden einzelne



LEGENDE

- Quelle
- ▲ Eingabestelle
- ▨ Bergzerreißungszone
- Weg
- - - Pfad
- ≡ Seilbahn
- Skilift
- ▭ Gebäude

Abflußverbindungen

- Uranin (Wasserproben)
- Uranin (Aktivkohleproben)
- ≡ Eosin (Wasserproben)



Fig. 10: Nachgewiesene Abflußverbindungen des kombinierten Markierungsversuchs im Bereich des Stubnerkogel-Osthanges (1990).
Proved flow connections of the combined tracer test in the area of the eastern slope of the Stubnerkogel (1990).

Quellen auf der West, Nord- und Südseite mitbeprob. Für die Beobachtung wurden sowohl Wasserproben als auch Aktivkohleadapter eingesetzt. Während anfänglich eine tägliche Entnahme von Wasserproben in allen Quellen erfolgte, wurden die parallel eingesetzten Aktivkohleadapter zunächst wöchentlich gewechselt. Bei einer Gesamtbeobachtungszeit bis zum Sommer 1991 wurde die Probenahme mit zunehmender zeitlicher Streckung durchgeführt.

3.2.2. Versuchsergebnisse

Im Rahmen der Beobachtungsmaßnahme von Juni 1990 bis Juni 1991 wurden von den 26 beprobten Quellen insgesamt 830 Wasserproben und 504 Aktivkohleadapter auf die Markierungsstoffe Uranin, Pyranin und Eosin fluorimetrisch untersucht. Die nachgewiesenen Verbindungen sind in den Fig. 9 und 10 dargestellt.

Wiederaustritte von Uranin

Uraninpositiv waren die Quellen 4, 8, 11, 19 und 26. Ein direkter Nachweis in den entnommenen Wasserproben war nur in den Quellen 19 und 26 möglich. Bereits ein Tag nach der Eingabe konnte Uranin in der 440 m von der Eingabestelle entfernten Quelle 26 nachgewiesen werden. Daraus resultiert eine maximale Abstandsgeschwindigkeit von 14 m/h. Trotz eines bis in den Herbst nachweisbaren Durchgangs, mit einer maximalen Uraninkonzentration von $26,3 \text{ mg/m}^3$, ist die Wiederfindungsrate mit 1,5 % vergleichsweise gering. Auffällig ist, daß die Quelle 26 auf die verstärkte Auswaschung während der frühjährlichen Schneeschmelze keinen Uraninnachweis erbrachte. Im Gegensatz dazu konnten in der Quelle 19, deren Wiedererhalt bei ca. 2,7 % bei einem Maximum von $8,6 \text{ mg/m}^3$ liegt, noch bei der Probenahme im Juni 1991 signifikante Uraninspuren nachgewiesen werden. Die für das Tracermaximum berechneten Abstandsgeschwindigkeiten liegen mit 1,8 m/h (Q 26) und 3,6 m/h (Q 19) höher als bei den Markierversuchen in der Reppwandgleitung. Diese vergleichsweise besseren Wasserwegsamkeiten der Spaltenzone im Stubnerkogel-Osthang können jedoch bei der insgesamt geringen Wiederfindungsrate von zusammen < 5% Uranin keiner Hauptdrainfunktion zugeordnet werden. Die mehr oder weniger dispers im Hang verteilten mittels Aktivkohleadapter erbrachten Uraninnachweise in den Quellen 4, 8 und 11 (Fig. 9 und 10) zeigen deutlich, daß die offenen Querklüfte und das feinverteilte Klüftnetz entscheidend für die Entwässerung sind. Der Langzeitaustrag in diesen Quellen konnte sehr schön durch die positive Uraninbefunde im Zusammenhang mit der Schneeschmelze bestätigt werden.

Wiederaustritte von Eosin

Eosin, das aufgrund seines mäßig sorptiven Charakters eine signifikante Festlegung in der durchflossenen Gesteinsmatrix aufweist, konnte in den von der Uranineingabe betroffenen Quellen 19 und 26 nachgewiesen werden. Die höhere Sorptionrate von Eosin kommt eindeutig in einer niedrigeren Gesamtwiederausbringung von < 1 % und den geringeren Abstandsgeschwindigkeiten für das Tracermaximum zwischen 0,5 m/h (Q 26) und 1,4 m/h (Q 19) zum Ausdruck.

Wiederaustritte von Pyranin

Der in der nordöstlichen Eingabestelle eingespeiste Tracer Pyranin war in keiner der beobachteten Quellen nachweisbar. Dies ist überraschend, da wie Fig. 9 zeigt, ein Teil des Uranin- und Eosinabflusses annähernd unter der Eingabestelle 3 durchzieht. Eine mögliche Ursache des negativen Ergebnisses könnte die technisch

bedingte ungünstige Nachspülung gewesen sein. Die Nachspülung konnte nicht wie bei den beiden anderen Eingaben kontinuierlich mit geringer Rate über längere Zeit erfolgen, sondern mußte schwallartig stattfinden. Dies kann zu einer extremen Verteilung des Pyranins im oberflächennahen Bereich geführt haben. Bei der langsamen Auswaschung des Pyranins aus dem ungesättigten Bereich tritt dann eine hohe Verdünnung auf, so daß der Pyraninaustrag unterhalb der analytischen Nachweisgrenze liegt.

3.3. Hydrogeologische Folgerungen für die Hangsicherung

Die nachgewiesenen Farbaustritte zeigen, daß die in die Bergzerreißungsspalten eingeleiteten Wässer auf einen Höhenbereich zwischen 1750–1950 m Seehöhe mehr oder weniger dispers über den gesamten Osthang des Stubnerkogels verteilt austreten. Die Farbaustritte in der Quelle 19, die in der streichenden Fortsetzung der Eingabestellen liegt, bestätigen eine gewisse Drainfunktion der Spaltenzone (Fig. 10). Unter Berücksichtigung der nachgewiesenen Tracerkonzentrationen und den geringen Wiederfindungsraten, die deutlich unter 5 % liegen, muß davon ausgegangen werden, daß den hangparallelen NNE-streichenden Bergzerreißungsspalten keine Hauptentwässerungs- sondern vielmehr eine Überlauffunktion zukommt. Über die zahlreichen z. T. klaffenden Querklüfte sowie im feinverteilten Kluftnetz wird vielmehr der gesamte Stubnerkogel-Osthang bis etwa zum Bereich der Mittelstation durch die in der Spaltenzone eingeleiteten Wässer gespeist. Dies wird deutlich durch die Wiederaustritte in den über den gesamten Osthang verteilten kleinen Quellen belegt (Fig. 9, 10). Nicht nachweisbar waren die verschiedenen Tracer im Rahmen der einjährigen Beobachtungszeit in den Quellen unter 1800 m Seehöhe. Es ist jedoch wahrscheinlich, daß ein signifikanter, langfristiger Abfluß in diese Richtung erfolgt, der jedoch durch die begleitenden Verdünnungsvorgänge die Tracer unter ihre analytische Nachweisgrenze absinken läßt.

Diese Ergebnisse zeigen sehr deutlich, daß jeglicher Zufluß in die offenen Bergzerreißungsspalten zu einem beschleunigten Anstieg des Bergwasserspiegels und damit zu einer Erhöhung des Kluftwasserdruckes auf die im Hangbereich auflagernde Moränen und Schuttablagerungen führt. Dies bedingt ein akutes Gefährdungspotential für die Auslösung einer Massenbewegung in dem im oberen Teil durch Bergzerreißung bereits tiefgreifend aufgelockerten Stubnerkogel-Osthang. Für eine ausreichende Sicherung des instabilen Hangbereiches des Stubnerkogel-Osthanges muß daher als vordringliche Aufgabe eine gezielte Entwässerung und eine geordnete Ableitung der Oberflächenwässer angestrebt werden.

Zusammenfassung

Schwerkraftbedingte Massenbewegungen werden stets durch Änderungen bestehender Gleichgewichtsbedingungen ausgelöst. Von entscheidender Bedeutung für eine Verschiebung der Kräfteverhältnisse im Gebirgskörper ist der Wasserhaushalt. Die durch einen Anstieg des Bergwasserspiegels bedingte Erhöhung des Kluftwasserdruckes verursacht zusätzliche Kräfte entlang möglicher Gleitflächen. Das Wasser kann zusätzlich die mechanischen Eigenschaften des Gesteins verändern und so den Reibungswinkel und den Scherwiderstand erniedrigen. Eine gezielte

Entwässerung von gerade im Gleichgewicht befindlichen und insbesondere von instabilen Hängen stellt daher eine der wichtigsten Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen dar.

Anhand zweier Beispiele, der Reppwandgleitung, Kärnten und des Stubnerkogel-Osthangs konnte exemplarisch gezeigt werden, daß das komplexe unterirdische Abflußsystem von Massenbewegungen mit Hilfe der integrativen Gesamtbeurteilung durch kombinierte Markierungsversuche ausreichend genau charakterisiert werden kann. Auf der Basis der Versuchsergebnisse (räumliche Verteilung, Drainfunktion bevorzugter Spaltensysteme, mittlere Aufenthaltszeit, Langzeitaustrag) können die erforderlichen Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen gezielt eingeleitet werden.

Literatur

- FECKER, E. & G. REIK (1987): Baugeologie. – 418 S., Stuttgart (Enke).
- KAHLER, F. & S. PREY (1963): Erläuterungen zur geologischen Karte des Naßfeld-Gartnerkofel-Gebietes in den Karnischen Alpen. – Geologische Bundesanstalt., 116 S., Wien.
- MOSER, M. & J. KIEFER (1988): Die hydrogeologischen Verhältnisse und ihre Beziehungen zur Kinematik im Bereich des Talzuschubsmasse Gradenbach/Kärnten. – Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 39, 95–115, Graz.
- MOSER, M., J. ANGERER & S. SEITZ (1988): Geotechnische Untersuchungsergebnisse im Rahmen des Verbauungsprojektes Oselitzenbach/Kärnten. – Interpraevent, 3, 77–102, Graz.
- MOSER, M. & Th. WINDISCHMANN (1989): Die Reppwandgleitung/Kärnten. – Geologische und geotechnische Betrachtungen. – Oberrhein. geol. Abh., 35, 157–176, Stuttgart.
- MÜLLER, L. (1963): Der Felsbau. – Bd. I, Theoretischer Teil, Felsbau über Tage, 1. Teil, 624 S., Stuttgart (Enke).
- PRINZ, H. (1982): Abriß der Ingenieurgeologie. – 419 S., Stuttgart (Enke).
- RENTSCHLER, K. (1992): Geologische und Geotechnische Untersuchungen zum Gefahrenpotential des Stubnerkogelosthanges, Badgastein/Salzburg. – Unveröff. Diplomarbeit, 148 S., Universität Erlangen.

Summary

Landslides are frequently induced and accelerated by changing hydrological and hydrogeological conditions. Rising groundwater levels in unstable rock masses or slopes result in an increase of the pore water pressure and as a consequence lead to a significant change in the equilibrium of the different acting forces. The hydrogeological situation of mass movements is characterized by a complex subterranean discharge system, which limitates the suitability of stationary hydraulic equipments and measuring devices for the necessary investigations.

Two examples from hazardous mass movements in the Alpine area of Austria, the sagging mass of the Reppwand (Kärnten) and the Stubnerkogel (Salzburg), show, that with the integrated approach of multi tracer experiments the complex dewatering and discharge system of mass movements can be described reasonably. For both case studies, the direct application of tracers proved the hydraulic connections and interrelations between the various blocks and areas, the depth of the water circulation as well as the drainage function of different joint systems of the sagging masses. With this information it was possible to direct the geotechnical measures towards an efficient remediation work to stabilize the mass movements.