

Der Bewegungsverlauf tiefgreifender Hangdeformationen

S. Weidner¹⁾ & M. Moser²⁾

1. Einleitung

Tiefgreifende, gravitative Hangdeformationen in Fels (*deep-seated gravitational slope deformations*) manifestieren sich in Talzuschub, Sackung und Bergzerreißung und werden den äußerst langsamen bis langsamen Kriech- und Fließbewegungen mit Geschwindigkeiten von wenigen Zentimetern bis einigen Metern pro Jahr zugeordnet. Unter der allgemeinen Wirkung der Schwerkraft findet vor allem aufgrund

- der geotechnisch ungünstigen Gebirgsbeschaffenheit,
- der Veränderungen im regionalen Spannungsfeld nach dem Abschmelzen der Gletscher und
- zusätzlicher Laständerungen im Hang

ein irreversibles, plastisches Kriechen der Gebirgsteilkörper statt, das auch als „stick-slip“-Bewegung bezeichnet wird (LANGER 1972). Die aus diesen Deformationen resultierenden morphologischen Phänomene und Kennzeichen sind in Abb. 1 dargestellt.

Sehr häufig sind metamorphe Gesteine in Verbindung mit einer großen Teilkörperbeweglichkeit des Gebirges von solchen Deformationen betroffen. Untergeordnet sind aber auch Beispiele in Sedimentgesteinen und granitischen Tiefengesteinen bekannt. Die Bewegungsmöglichkeiten werden durch die Rahmenbedingungen wie Petrographie, Trennflächengefüge, Exposition, Höhenlage etc. vorgegeben. Der zeitliche Bewegungsablauf erfährt bei allen bekannten, ausführlicher beschriebenen Beispielen aber immer wieder episodische oder periodische Variationen durch Unterschneidung des Hangfußes, Niederschläge, Schneeschmelze, Erdbeben oder anthropogene Eingriffe.

Der genaue zeitliche Ablauf und die Mechanismen dieser meistens sehr großflächigen Hangbewegungen können nur mittels langjähriger klimatischer, hydrogeologischer und geodätischer Messreihen geklärt werden. Die hier präsentierten Ergebnisse wurden mithilfe der Forstlichen Bundesversuchsanstalt in Wien erarbeitet und wurden in der Dissertation „Kinematik und Mechanismus tiefgreifender alpiner Hangdeformationen unter besonderer Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse“ veröffentlicht (WEIDNER 2000).

2. Charakteristische Kennwerte tiefgreifender Hangdeformationen

Der Vergleich charakteristischer Kennwerte von 17 tiefgreifenden Hangdeformationen in den Alpen zeigt viele Parallelen, aber auch Gegensätze zwischen den tiefgreifenden Hangdeformationen auf. Als Kennwerte wurden u. a. die geometrischen Abmessungen, der geologische Aufbau, die Stellung des Trennflächengefüges und die Größe der Bewegungsraten herangezogen.

Alle Beispiele in Abb. 2 liegen in einem Höhenniveau von ca. 800 bis 2600 m NA (Meter über Normal Adria). Die Höhendifferenz zwischen Hangfuß und oberster Abrißkante variiert zwischen 450 und 1400 m. Neben sich bescheiden ausnehmenden Objekten mit einer Fläche von nur einem halben Quadratkilometer gibt es nahezu gigantische Beispiele mit bis zu 45 Quadratkilometer (z. B. Lugnez in Graubünden/Schweiz).

Bei einer Tiefe der bewegten Bereiche unter Geländeniveau von minimal 50 m bis maximal 400 m resultieren daraus Volumina von mehreren Millionen bis zu einigen Milliarden Kubikmetern. Zwei von den Verfassern genauer untersuchte Objekte in Kärnten, die SE-Flanke des Eggerwiesenkopfes (Talzuschub *Gradenbach*) und die südlichen Einhänge des Oselitzenbaches (*Reppwand-Gleitung*),

Anschriften der Verfasser:

¹⁾ cognitas GmbH, Alte Landstraße 6, D-85521 Ottobrunn; eMail: stefan.weidner@cognitas.de

²⁾ Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossgarten 5, D-91054 Erlangen; eMail: moser@geol.uni-erlangen.de

nehmen mit einem Tiefgang von 50 bis mehr als 140 m eine Zwischenstellung unter den betrachteten Beispielen ein.

Parallelen

14 der 17 tiefgreifenden Hangbewegungen, und damit die überwiegenden Anzahl, ist SE- bis SW-exponiert. Bei der Hälfte dieser Objekte stimmen in etwa die Exposition und die Einfallrichtung der Schieferung miteinander überein. Meistens sind ein oder zwei konjugierte Kluftsysteme entwickelt, die zusammen mit der Schieferung oder Schichtung die geometrischen Voraussetzungen für eine Bewegung schaffen. Die mittlere Hangneigung über längere Hangabschnitte liegt dabei zwischen 15 und 35° und durchschnittlich bei ca. 25°. Das Einfallen der Bewegungsvektoren ist mit durchschnittlich 20° etwas flacher als die Hangneigung.

Gegensätze

Gegensätze sind vor allem beim generellen Bewegungsverhalten zu erkennen. Bei fünf Objekten ist eine Zunahme der Bewegungsraten vom Abrissbereich in Richtung Hangfuß festzustellen (z. B. Lugnez, Heinzenberg, Campo, La Frasse und Reppwand-Gleitung). Bei einer geringeren Anzahl (4) ist dies genau umgekehrt, d. h. im oberen Bereich sind die Bewegungen größer als im unteren Bereich (z. B. Schuders, Sedrun, Bonvillard und Talzusub Gradenbach). Von den restlichen 8 tiefgreifenden Hangbewegungen ist nicht bekannt, wie sich die Bewegungsraten über das Längsprofil verteilen.

Der Vergleich von Länge, Höhe und dem Volumen zeigt die erheblichen Unterschiede in den geometrischen Abmessungen tiefgreifender Hangdeformationen (Abb. 3). Das kleinste der Objekte ist Schuders mit $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ und das größte Lugnez mit $3800 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ bewegtem Volumen. Die Hangbewegung im Lugnez setzen sich allerdings aus verschiedenen Talzuschieben zusammen.

In Abb. 4 sind die Verschiebungsbeträge von mehreren Objekten über lange Zeiträume dargestellt. Die Unterschiede in der Größe der Beträge zeigen sich in den morphologischen Auswirkungen sowie am Umfang von Bauwerksschäden, z. B. an Wildbachverbauungen, Straßen oder Gebäuden. Durchschnittliche Verschiebungsraten für drei Objekte:

- Gradenbach in 141 Jahren: 60 m (42 cm/a)
- Schuders in 19 Jahren: 60 m (316 cm/a)
- Lugnez, Kirche Pleif, in 86 Jahren: 4 m (4,6 cm/a).

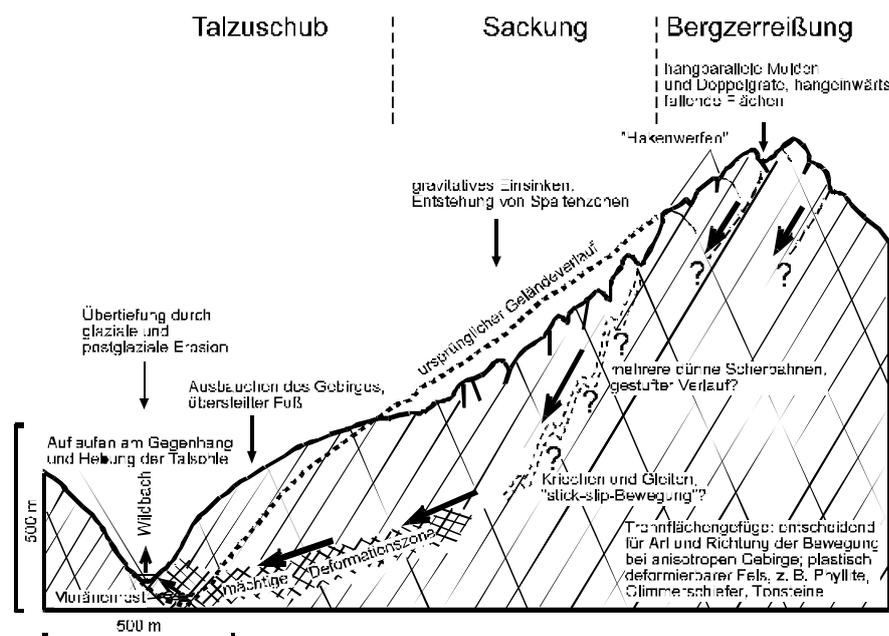


Abb. 1: Schematisierte Darstellung morphologischer Phänomene und Kennzeichen einer großflächigen, tiefgreifenden Hangdeformation im Finalstadium bei überwiegend einheitlich kompetentem, anisotropem Gebirge. Die morphologischen Veränderungen sind überhöht dargestellt.



Abb.2: Lage der Vergleichsobjekte (tiefgreifende Hangdeformationen).

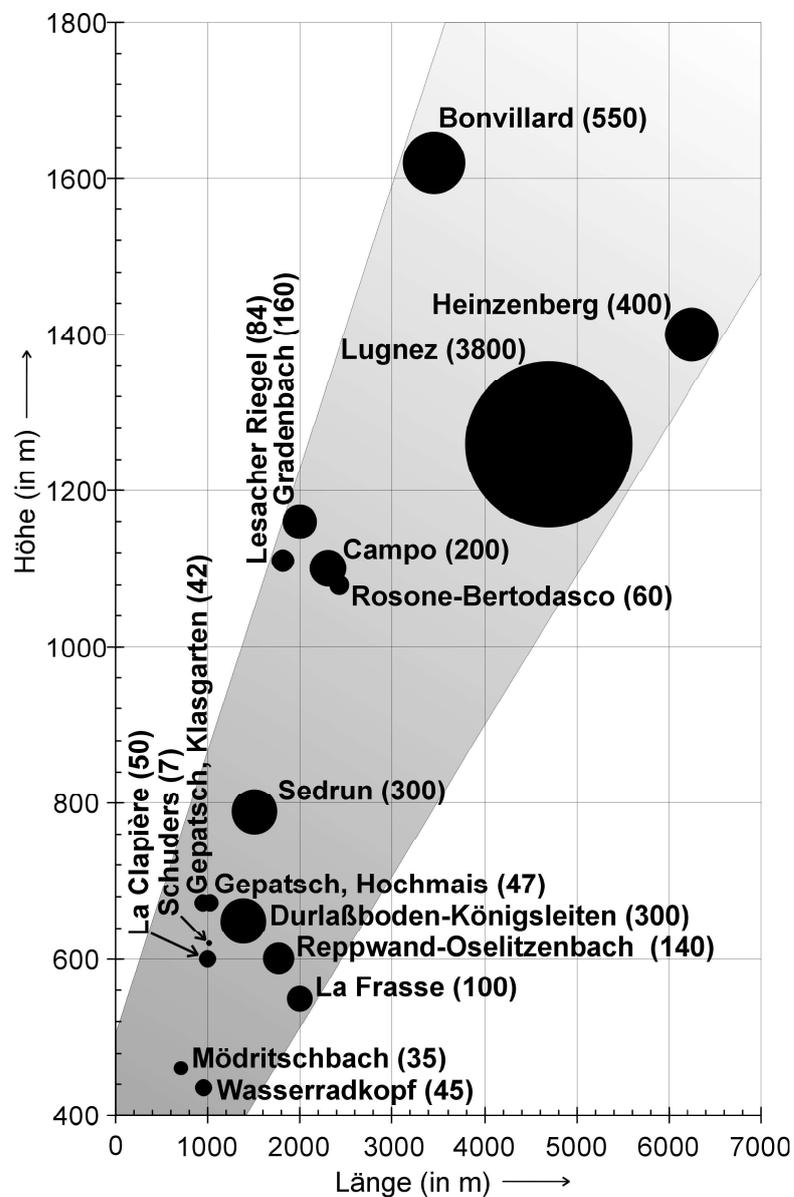


Abb. 3: Länge, Höhe und geschätztes Volumen ($\times 10^6 \text{ m}^3$) der verglichenen tiefgreifenden Hangdeformationen. – Das Volumen wird durch die Fläche der Kreise repräsentiert und ist den Objektamen in Klammern nachgestellt.

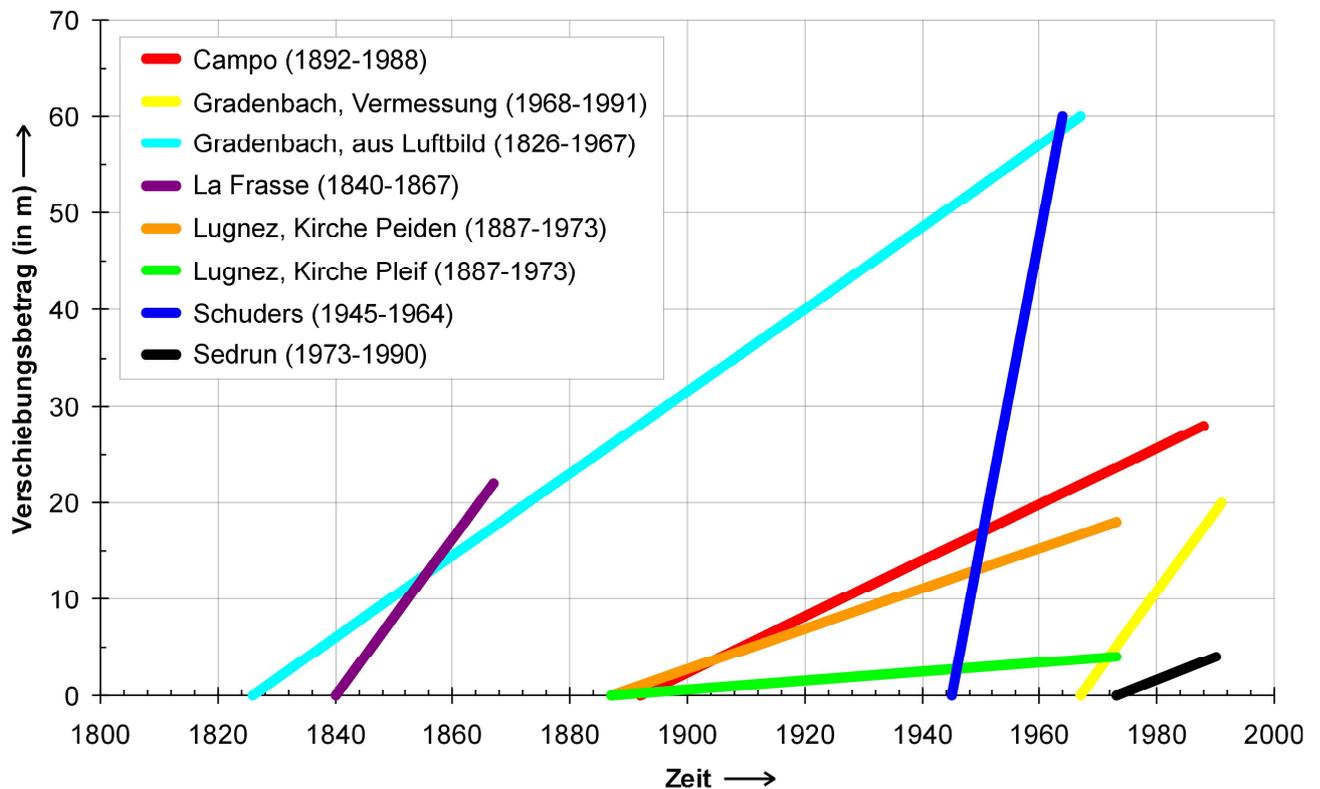


Abb. 4: Verschiebungsbeträge über lange Zeiträume an verschiedenen tiefgreifenden Hangbewegungen in den Alpen (vereinfachte, linearisierte Darstellung).

Die vergleichenden Beobachtungen stützen sich u.a. auf:

- BARLA & CHIRIOTTI (1995) – Rosone-Bertodasco (Italien)
- BLANC et al. (1987) – La Clapière (Frankreich)
- HAUSWIRTH et al. (1979) – Lesachriegel (Österreich)
- LEOBACHER & LIEGLER (1998) – Durlaßboden (Österreich)
- NOVERRAZ & BONNARD (1990) – La Frasse & Sedrun (Schweiz)
- TENTSCHERT (1998) – Gepatsch, Hochmais (Österreich)
- ZIEGLER (1982) – Lugnez, Heinzenberg, Schuders (Schweiz)

Bewegungsverhalten des Talzuschubs Gradenbach (Kärnten, Österreich)

Anhand der langjährigen Messungen von Hangbewegung und hydrologischen Verhältnissen seit Ende der 60er Jahre am Talzuschub Gradenbach lassen sich die Wesenszüge tiefgreifender Hangdeformationen sehr eindrucksvoll veranschaulichen.

Im Profil (Abb. 5) präsentiert sich die Hangdeformation wie folgt:

Es liegen hauptsächlich Phyllite und Kalkphyllite der Matreier Zone vor. Oberhalb einer sehr ausgeprägten Hauptabrissskante ist das Gebirge nur schwach aufgelockert und zur Zeit nahezu ohne Bewegungsaktivität. Unterhalb der Abrisskante ist das Gebirge zunächst stark aufgelockert und verstellt sowie im mittleren Bereich durch lange, grabenartige Strukturen gekennzeichnet.

Unterhalb etwa 1500 m NA nimmt der Auflockerungsgrad aufgrund des Auflaufens der bewegten Masse am Gegenhang wieder ab. Das Gesamtbewegungsverhalten des Hangs spiegelt sich in den von oben nach unten abnehmenden Bewegungsraten wider. An übersteillten Partien können sich sekundäre Massenbewegungen ereignen. An der Grabensohle selbst kommt es wegen der eingeschränkten Seitenausdehnungsmöglichkeit zu Hebungen.

Der genaue Verlauf der Bewegungsbahnen ist nicht bekannt. Aus den Ergebnissen der geophysikalischen Messungen und Bohrungen kann jedoch auf eine Teufe von 140 bis 180 m geschlossen werden.

In Abb. 6 sind die Horizontalverschiebungen über einen Zeitraum von 8 Jahren dargestellt. Die aktivsten Bereiche, die eine Verschiebungsrate von mehr als 30 cm/a aufweisen, befinden sich zwischen 1800 und 2100 m NA. Deutlich sichtbare morphologische Veränderungen resultieren vor allem in den Bereichen, in denen die Verschiebungsrate größer ist als 10 cm/a. Die Beträge der Vertikalkomponente zeigen ein ähnliches Verteilungsmuster wie die der Horizontalkomponente.

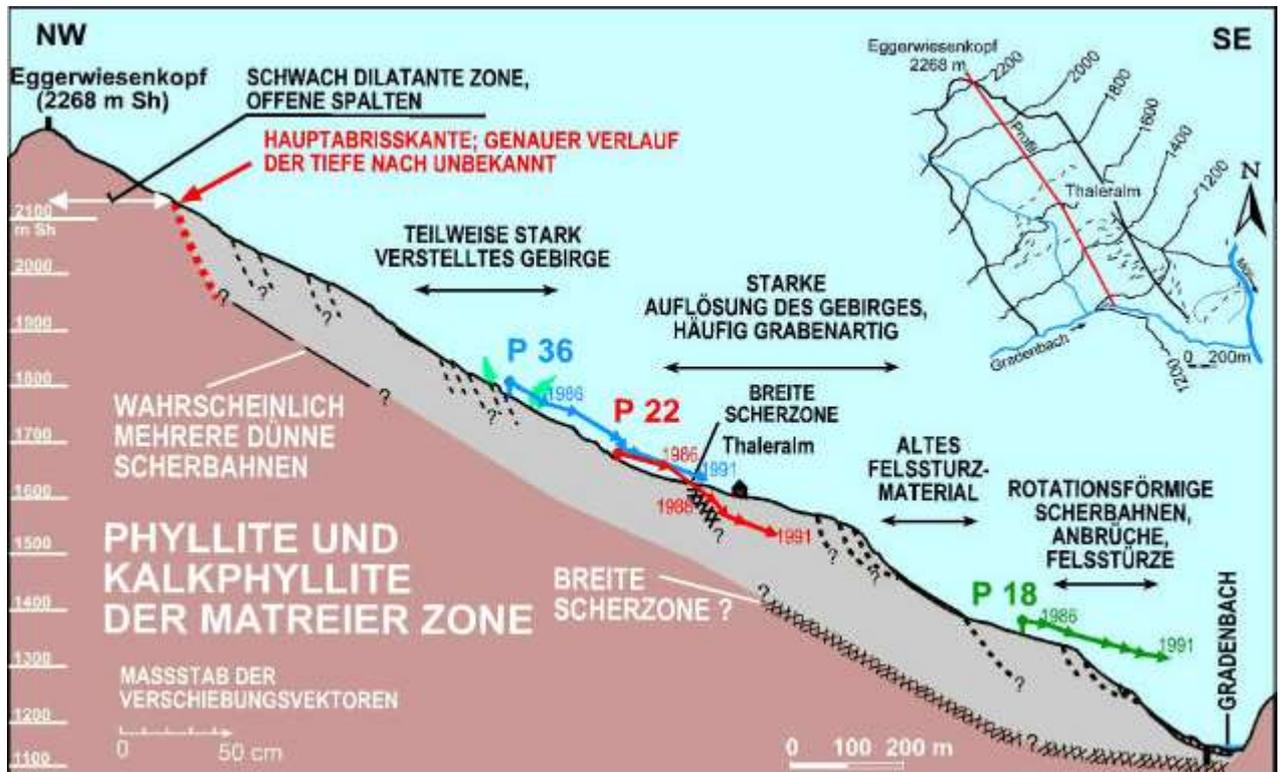


Abb. 5: Verschiebungsbeträge über lange Zeiträume (Talzuschub Gradenbach).

Am Talzuschub Gradenbach lässt sich aufgrund sehr umfangreicher und langjähriger Untersuchungen ein sehr genaues Bild des Bewegungsverlaufs erstellen und dessen Zusammenhang mit externen Faktoren erkennen. Die zeitlichen Zusammenhänge zwischen dem Bergwasserspiegel-Verlauf an verschiedenen Pegeln einerseits und zwischen dem Bergwasserspiegel-Verlauf und der daraus resultierenden Hangbewegung andererseits werden quantitativ mittels Zeitreihenanalysen beschrieben. Diese Ergebnisse lassen sich zudem für Prognosen einsetzen.

In Abb.6 ist der detaillierte Bewegungsverlauf an der Stirn des Talzschubes (Extensometer 1) und externe Faktoren (hier: Niederschläge, Schneeschmelze und Bergwasserspiegel) für die Aktivierung der Bewegung dargestellt.

Eine direkte Abhängigkeit der Bewegungen von den Niederschlägen ist so gut wie nicht feststellbar. Jedoch bedingen auch an dieser tiefgreifenden Hangdeformationen extreme Ereignisse, wie

z. B. im Oktober 1993 eine Niederschlagssumme von 304 mm, eine zumindest geringfügige Aktivierung der Bewegung. Besser geeignet für die Beurteilung der Abhängigkeiten zwischen Wasserdargebot und Bewegungsaktivität sind die abschmelzenden Wasseräquivalente im Frühjahr bis Frühsommer. Die Wasseräquivalente stellen die in Schnee und Eis fixierte Menge Wasser dar, die über den gesamten Bereich des Talzschubes aus einer Vielzahl von Schneeprofilen auf Freilandflächen und im Wald ermittelt wurde.

Am besten für die Untersuchung der Bewegungsabhängigkeiten eignen sich die an 22 Pegeln gemessenen Bergwasserspiegel-Höhen. Die Ganglinien weisen – wie die Hangbewegung auch – eine gewisse „Beharrungstendenz“ auf, wodurch zufällige Ereignisse, die eine Interpretation erschweren, stark gedämpft werden. In Abb. 7 ist die Ganglinie des 50 m tiefen Pegels 3b einge-

tragen. Diese Ganglinie hat die größte Variationsbreite von allen Pegeln und das Bergwassermaximum fällt außerdem mit den stärksten [Bewegungen](#) zusammen.

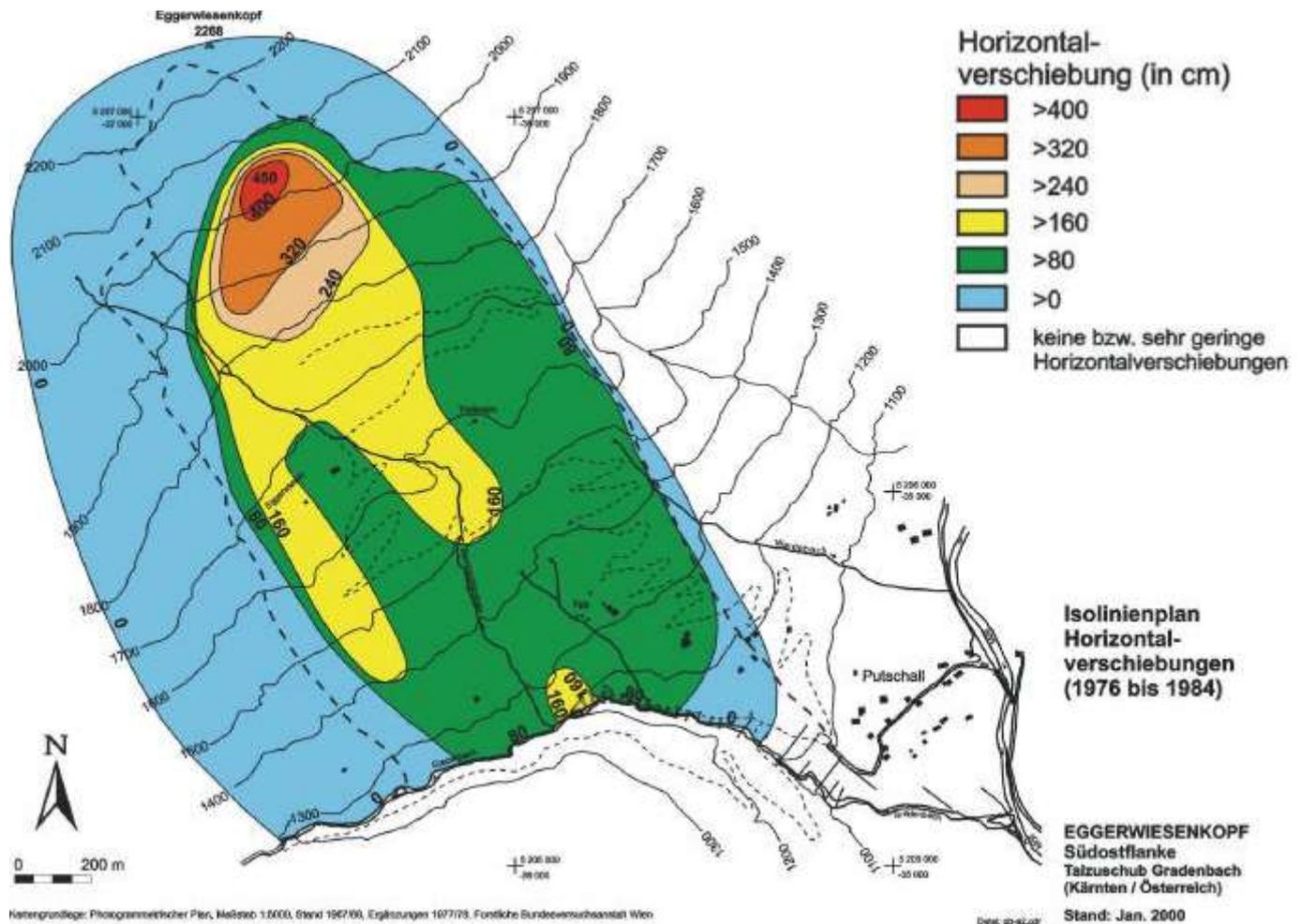


Abb. 6: Verschiebungsbeträge über lange Zeiträume (Talzuschub Gradenbach).

Zur Abschätzung der Bewegungen aus den Bergwasserspiegel-Ganglinien wurde das Verfahren der multiplen linearen Regression angewendet, da die „einfache“ lineare Regression nur unbefriedigende Ergebnisse liefert. Das liegt vor allem an den zeitlichen Differenzen des Bergwasserspiegelverlaufs innerhalb der Talflanke und der wiederum dazu zeitversetzt eintretenden Hangbewegung. Mit mehreren Bergwasserspiegel-Ganglinien lässt sich dagegen eine brauchbare Abschätzung erzielen (siehe Abb. 8).

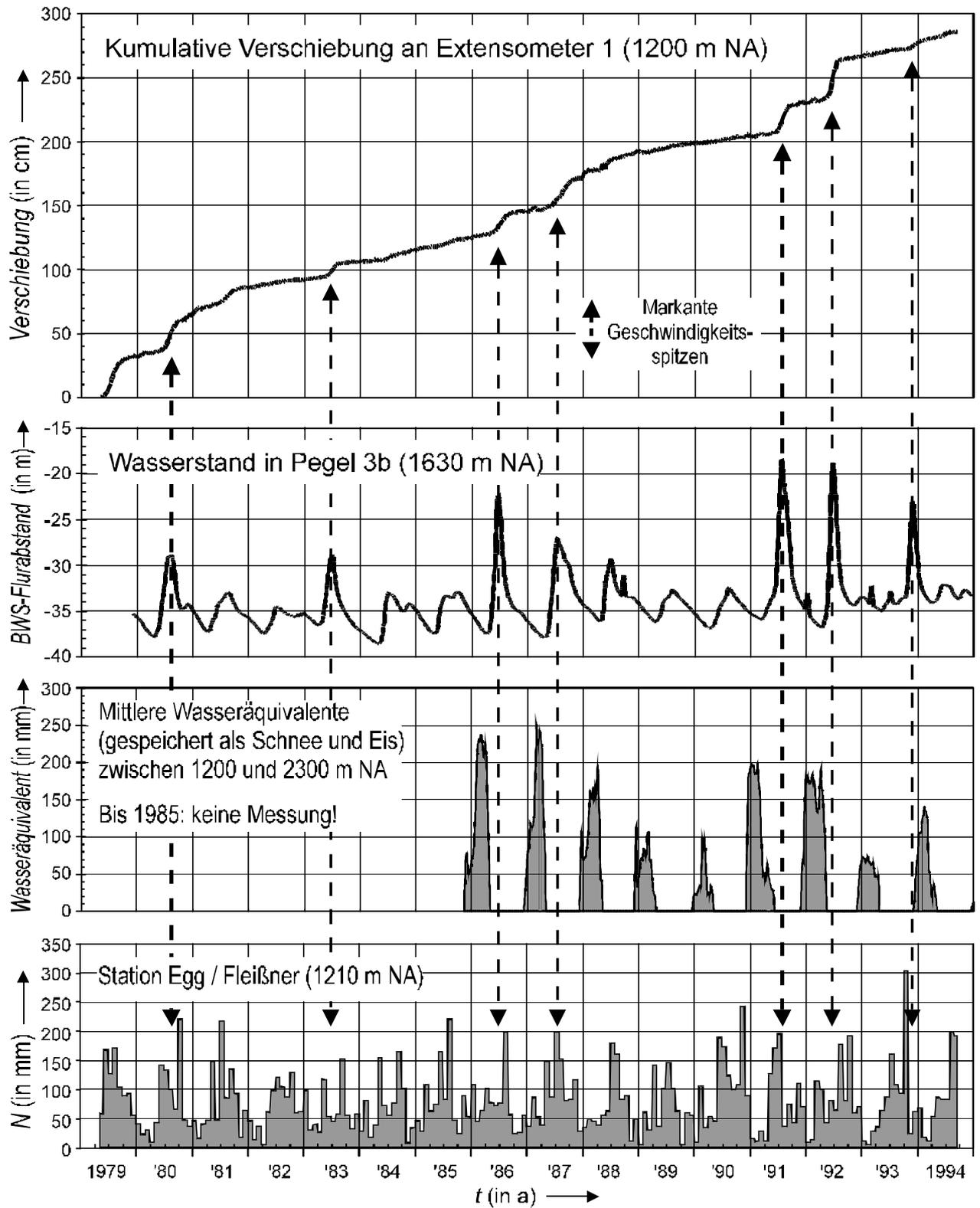


Abb. 7: Synoptische Darstellung von kumulativer Verschiebung x an Extensometer 1 sowie des Bergwasserspiegels in Pegel 3b, der mittleren Wasseräquivalente und der Monatssummen der mittleren täglichen Niederschläge N an der Station Fleißner (Talzuschub Gradenbach).

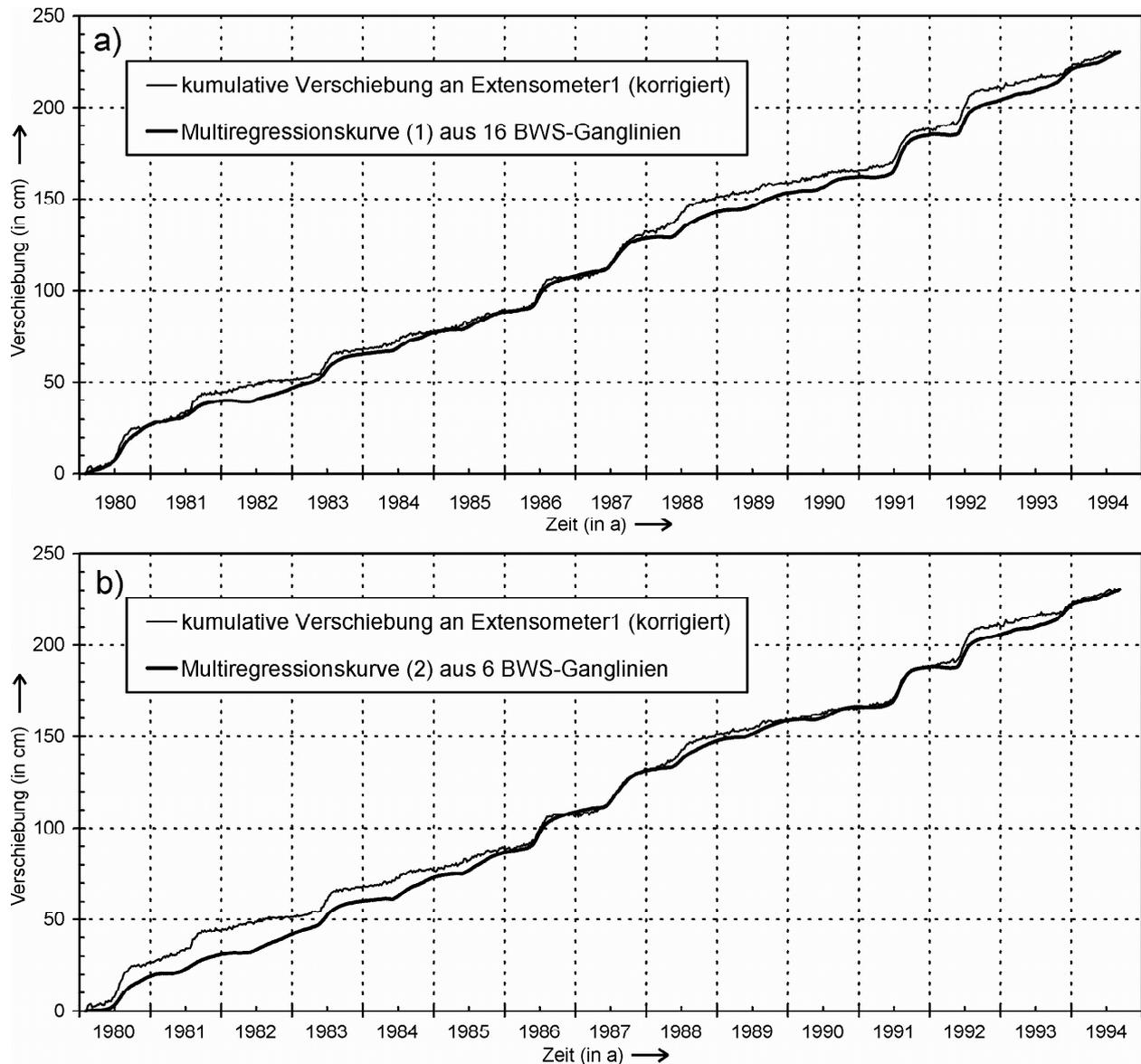


Abb. 8: Ergebnisse der Multiregressionsanalyse. – a) Für die Regression wurden die Bergwasserspiegel der Pegel 1, 2, 3a, 3b, 4, 6a, 6b, 8, 11a, 11b, 12a, 12b, 13, 14a, 15 und Egg 2 eingesetzt. b) Verwendung der Pegel 1, 3a, 3b, 8, 13, 15. Zeitraum 1980 bis 1994; Wochenwerte ($n = 736$); (Talzuschub Gradenbach).

Bewegungsverhalten der Reppwand-Gleitung (Kärnten, Österreich)

Diese tiefgreifende Hangbewegung nimmt große Teile der südlichen Einhänge des Oselitzenbaches ein. Bei der Reppwand-Gleitung konzentrierten sich die Untersuchungen hauptsächlich auf das Bewegungsverhalten der Talzuschubsstirn. Aussagen für die gesamte Hangbewegung sind daher nur eingeschränkt möglich.

In Abb. 9 ist die geotechnische Situation dargestellt. Das ursprüngliche Bachbett verlief vor der Sanierung im Jahre 1988 südlich der verbandsfesten Hochwipfelschichten. Der Bach kann nach Starkniederschlagsereignissen einen Abfluss von über $100 \text{ m}^3/\text{sec}$ aufweisen. Er tiefte sich bis zur Sanierung des Bachabschnitts enorm in die bereits hangtektonisch aufgelockerten Auernigsschichten des Oberkarbons ein. Durch die wiederholte starke Unterschneidung des rechten Ufers kam es zur weiteren Entfestigung und Verstellung der Auernigsschichten und es bildeten sich mehrere Rutschungs-Teilkörper.

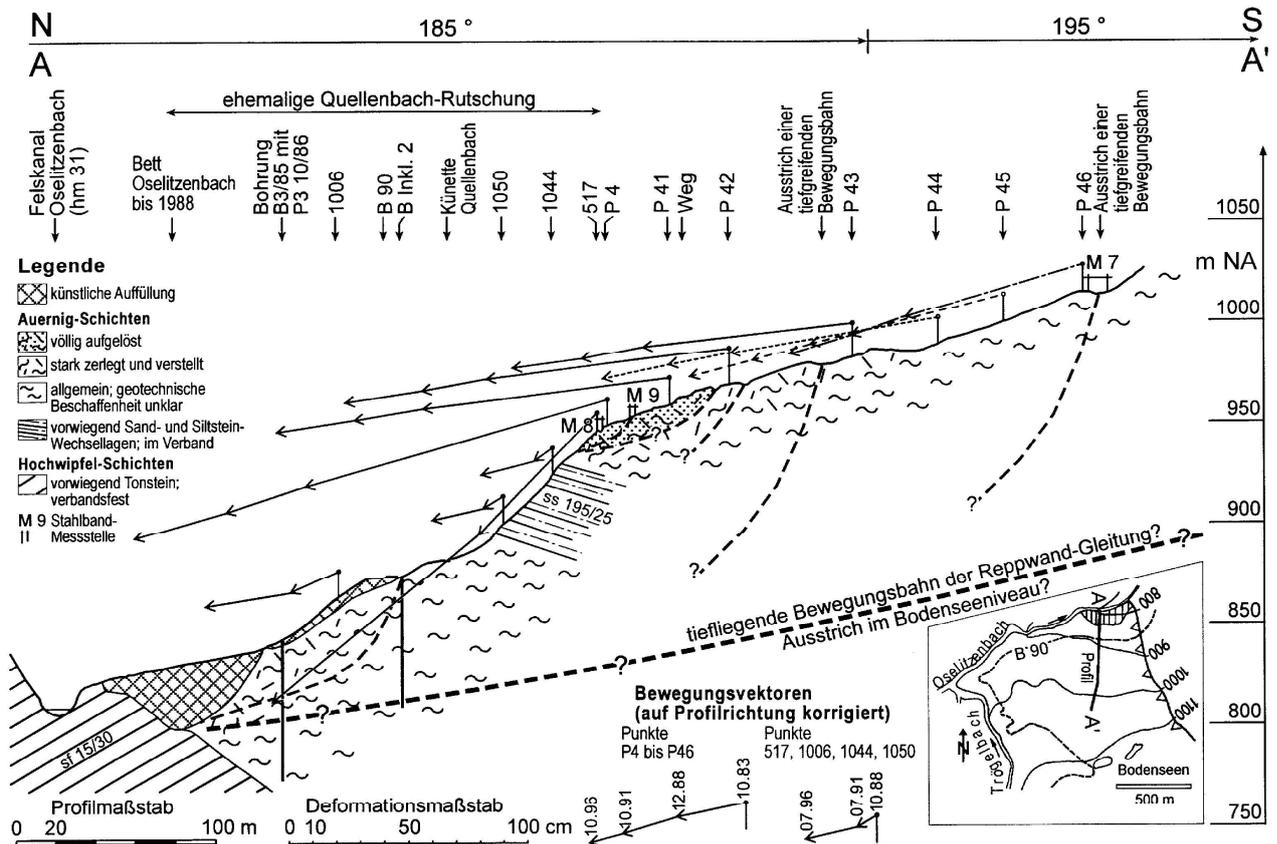


Abb.9: Profil durch die ehemalige Quellenbach-Rutschung an der Stirn der Reppwand-Gleitung. Neben den oberflächennahen geotechnischen Einheiten sind auch die Bewegungsvektoren zwischen 1983 und 1996 dargestellt.

Durch die Verlegung des Bachlaufes im kritischen Abschnitt in das künstlich angelegte Bett und das Anbringen der Fußschüttung konnte bisher eine weitgehende Konsolidierung erreicht werden. Die sehr flach einfallenden Bewegungsvektoren, vor allem an steilen Partien, sind u.a. ein wichtiger Hinweis auf die Existenz einer bisher mehr vermuteten als nachgewiesenen tiefliegenden Bewegungsbahn.

Die Abnahme der Bewegungsraten nach der Bachverlegung wird aus dem Vergleich von Abb. 10 mit Abb. 11 erkennbar. In Abb. 10 sind die Bewegungsraten direkt im Anschluss an die Hauptsanierungsarbeiten bis Mitte 1991 dargestellt. In sehr großen Bereichen liegen die Bewegungsraten über 7 bis 10 cm/a. In Abb. 11 sind die Bewegungsraten im Anschluss an den vorhergegangenen Zeitraum bis Mitte 1998 dargestellt. Es zeigt sich eine weitere Beruhigung auf weniger als 7 cm/a, die auch noch anhält. Dies wirkt sich insgesamt sehr positiv auf die Stabilität der Naßfeldbundesstraße und den gesamten Bereich aus.

Auch an der Reppwand-Gleitung lassen sich mit den geodätischen Messungen im jährlichen Zyklus nur die summarischen Beträge registrieren, die eine quasi-lineare Bewegung vortäuschen. Mit Extensometermessungen in kürzeren Intervallen lassen sich natürlich die zeitlichen Schwankungen besser auflösen.

Die Ergebnisse in Teilbereichen der Quellenbachrutschung dazu sind sehr unterschiedlich: Es gibt augenscheinliche Zerrungszonen, die sich jedoch nachgewiesenermaßen verengen oder nicht messbar verändern und es gibt Bereiche, die sich extrem schnell vom langsameren Hinterland lösen.

Bewegungsraten Epoche 1 nach 7 (10/1988 bis 07/1991)

Stirn der Reppwand-Gleitung (Kärnten / Österreich)
Oselitzenbach hm 29 bis hm 35

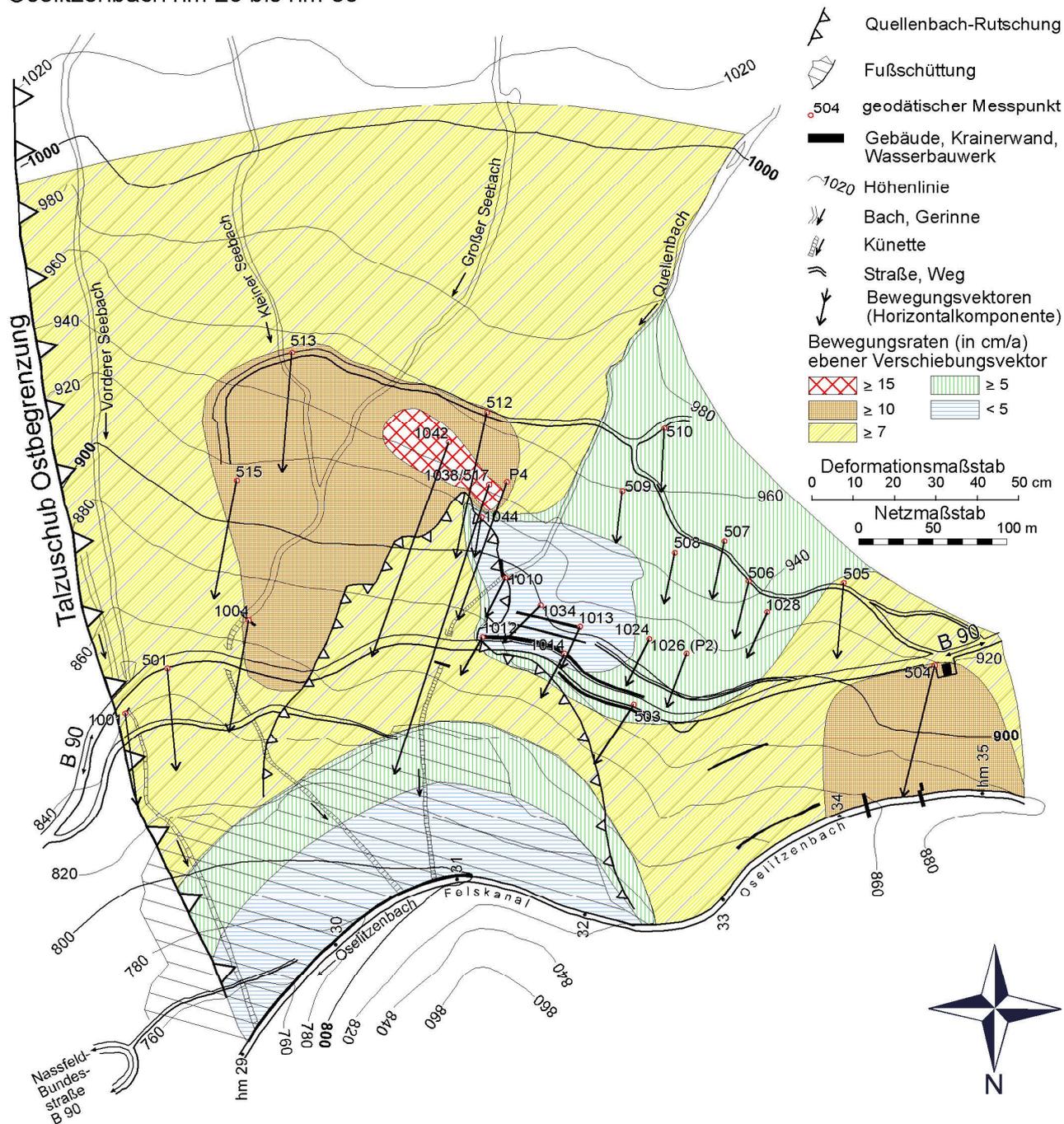


Abb. 10: Isolinenplan der Bewegungsraten und ebener Verschiebungsvektor ausgewählter Punkte der Epoche 1 nach 7, bis 3 Jahre nach Einbringen der Fußschüttung und Verlegen des Oselitzenbaches in den Felskanal.

Bewegungsraten Epoche 7 nach 13 (07/1991 bis 06/1998)

Stirn der Reppwand-Gleitung (Kärnten / Österreich)
Oselitzenbach hm 29 bis hm 35

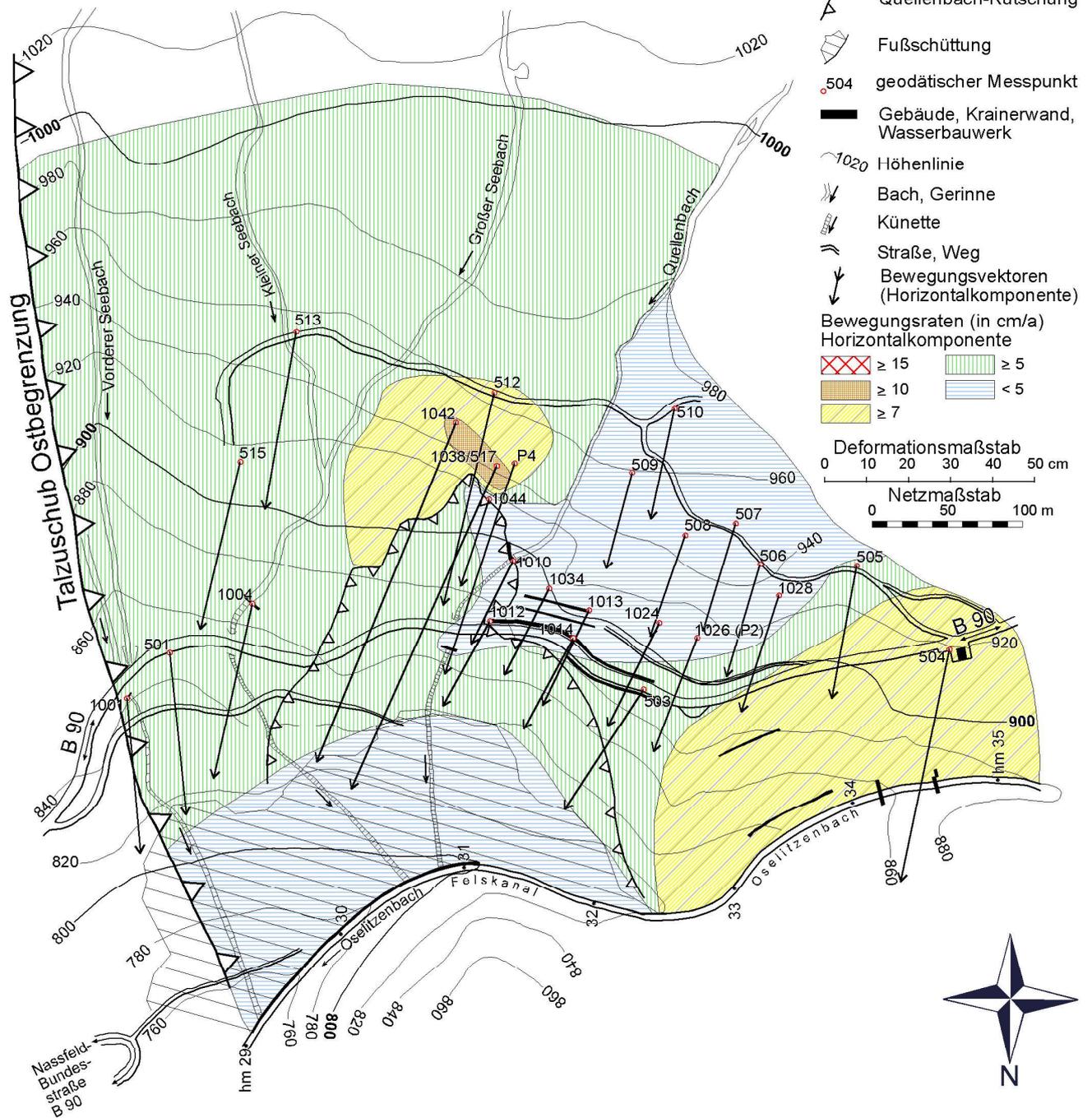


Abb. 11: Isolinenplan der Bewegungsraten und ebener Verschiebungsvektor ausgewählter Punkte der Epoche 7 nach 13, 3 bis 10 Jahre nach Einbringen der Fußschüttung und Verlegen des Oselitzenbaches in den Felskanal.

Zusammenfassung der Charakteristika tiefgreifender Hangdeformationen

- Der Tiefgang beträgt geschätzt bis 400 m unter Geländeniveau und nachgewiesen bis 270 m.
- Die Deformationsraten betragen etwa 8 cm/a und kurzfristig bis 30 cm/d.
- Aus mechanischer Sicht findet diskontinuierliches Kriechen oder translatorisches Gleiten statt, die zu irreversiblen, plastischen Verformungen des Gebirges führen.
- Externe Faktoren – in erster Linie Lastwechsel und Unterschneidung des Hangfußes – führen zu instationären, regressiv-zyklischen Bewegungen.
- Die Bewegungsrichtung (das Azimut) orientiert sich an der Falllinie des Hanges besonders bei großer Hangneigung aber auch an der Richtung der Trennflächenscharen (z. B. Einfallrichtung der Schieferung), was vor allem bei geringer Hangneigung zum tragen kommt.

Literatur

- BARLA, G. & CHIRIOTTI, E. (1995): Insights into the Behaviour of the Large Deep-Seated Gravitational Slope Deformation of Rosone, in the Piemont Region (Italy). – Felsbau, 13, 6: 425-432; Salzburg.
- BLANC, A., Durville, J.-L., Follacci, J.-P., Gaudin, B. & Pinc, B. (1987): Méthodes de surveillance d' un glissement de terrain de très grande ampleur: la Clapière, Alpes Maritime, France. – Bull. Int. Ass. Eng. Geol., 35: 37-44; Paris.
- BONNARD, C., NOVERRAZ, F., DUPRAZ, H. (1996): Long-term movements of substabilized versants and climatic changes in the Swiss Alps. – In: SENNESET [ed.], Proc. 7th Int. Symp. on Landslides, Vol. 3: 1525-1530; Rotterdam (Balkema).
- BONZANIGO, L. (1988): Etude des mecanismes d' un grand glissement en terrain cristallin: Campo Vallemaggia. – In: BONNARD, C. [ed.], Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Vol. 2: 1313-1316; Rotterdam (Balkema).
- HAUSWIRTH, E. K., PIRKL, H., ROCH, K. H. & SCHEIDEGGER, A. E. (1979): Untersuchungen eines Talzuschubes bei Lesach (Kals, Osttirols). – Verh. Geol. B.-A., 2: 51-76; Wien.
- LANGER, M. (1972): Rheologische Grundlagenforschung in der Felsmechanik. – Baugrundtagung: 463-480; Stuttgart.
- LEOBACHER, A. & LIEGLER, K. (1998): Langzeitkontrolle von Massenbewegungen der Stauraumhänge des Speichers Durlaßboden. – Felsbau 16, 3: 184-193; Essen (Glückauf).
- NOVERRAZ, F. (1996): Sagging or Deep-Seated Creep: Fiction or Reality? – In: SENNESET [ed.], Proc. 7th Int. Symp. on Landslides, Vol. 2: 821-828; Rotterdam (Balkema).
- NOVERRAZ, F. & BONNARD, C. (1990): Technical Note on the Visit of La Frasse Landslide. – In: BONNARD, C. [ed.], Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Vol. 3: 1549-1554; Rotterdam (Balkema).
- TENTSCHERT, E. (1998): Das Langzeitverhalten der Sackungshänge im Speicher Gepatsch (Tirol, Österreich). – Felsbau 16, 3: 194-200; Essen (Glückauf).
- WEIDNER, S. (2000): Kinematik und Mechanismus tiefgreifender alpiner Hangdeformationen unter besonderer Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse. – Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg, 246 S; Erlangen.
- WEIDNER, S., MOSER, M. & LANG, E. (1998): Influence of Hydrology on Sagging of Mountain Slopes ("Talzuschübe") – New Results of Time Series Analysis. – In: MOORE, D. & HUNGR, O. [eds.], Proc. 8th Int. IAEG Congr., Vol. 2: 1259-1266; Rotterdam (Balkema).
- ZIEGLER, H.-J. (1982): Die Hangbewegungen im Lugnez, am Heinzenberg und bei Schuders, Graubünden. Geologie und Geomechanik. – Diss. Univ. Bern; 106 S., 32 Abb., 3 Beilagen, VI Taf.; Bern.