

# Ingenieurgeologische Untersuchungen von Deep-seated Gravitational Slope Deformations (DSGSD) und ihre Auswirkungen im Dürnbachtal bei Neukirchen am Großvenediger in Österreich

CHRISTOPHER JELLEN<sup>1</sup>, JELENA MITROVIC<sup>2</sup> , JOACHIM ROHN<sup>3</sup> & MICHAEL MOSER<sup>3</sup>



<sup>1</sup>jellen.ch@gmail.com

<sup>2</sup>jmitrovic@t-online.de

<sup>3</sup>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Geozentrum Nordbayern, Angewandte Geologie, Schlossgarten 5, 91054 Erlangen, joachim.rohn@fau.de & michael.moser@fau.de

Geologische  
Blätter, 2024, 71, 5

JELLEN, C., MITROVIC, J., ROHN, J. & MOSER, M., 2024: Ingenieurgeologische Untersuchungen von Deep-seated Gravitational Slope Deformations (DSGSD) und ihre Auswirkungen im Dürnbachtal bei Neukirchen am Großvenediger in Österreich. — Geologische Blätter, 71, 41 S., 39 Abb. 2 Tab.; Erlangen; doi:10.23689/figeo-6017

Manuscript submitted:  
21.07.2023, manuscript  
accepted: 15.01.2024

Copyright: © 2023 by the  
author(s). This article is  
an open access article  
distributed under the  
terms and conditions of the  
Creative Commons

Attribution (CC BY) license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



**Zusammenfassung:** Tiefgreifende Hangbewegungen stellen neben Muren und Lawinen, welche durch Faktoren wie Extremniederschlagsereignisse und Unterschneidungsvorgänge entstehen, eine akute Gefahr für die Bevölkerung und die Infrastruktur im alpinen Raum dar (MOSER 2013). Talzuschübe, oder auch DSGSD für Deep-seated Gravitational Slope Deformation (CROSTA et al. 2013), sind großflächige und tiefgreifende Hangbewegungen im alpinen Raum. Im Rahmen dieser Untersuchungen erfolgte eine ingenieurgeologische Aufnahme des Dürnbachtals bei Neukirchen am Großvenediger mit der Erstellung von Hangprofilen und der Aufnahme des Trennflächengefüges. Weiter wurde der Einfluss der beidseitigen Talzuschübe auf den Wildbach und das Mureereignis nach einem Starkniederschlagsereignis am 28.07.2022 analysiert. Zuletzt wurde eine Abschätzung des Gefahrenpotentials des Dürnbachs für den Ort Neukirchen am Großvenediger erstellt.

**Abstract:** In addition to debris flows and avalanches, which are caused by factors such as extreme precipitation events and undercutting processes, deep slope movements pose an acute danger to the population and infrastructure in alpine regions (MOSER 2013). DSGSD for Deep-seated Gravitational Slope Deformation (CROSTA et al. 2013) are large-scale and far-reaching slope movements in alpine regions. An engineering geological survey of the Dürnbach valley near Neukirchen am Großvenediger was carried out with the creation of slope profiles and the recording of the interface structure. Furthermore, the influence of the two-sided valley thrusts on the torrent and the debris flow event after heavy precipitation on 28.07.2022 was analyzed. Finally, the hazard potential of the Dürnbach for the village of Neukirchen am Großvenediger was assessed.

▪ **Schlüsselwörter:** Talzuschub, counterscarps, Massenbewegung, Murgang, Starkniederschlag, Salzburger Land, Österreich

- **Keywords:** *Deep-seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD), counterscarps, mass movement, debris flow, heavy precipitation, Salzburg region, Austria*

## 1. Einführung

Das Arbeitsgebiet liegt im österreichischen Bundesland Salzburg, nordwestlich der Gemeinde Neukirchen am Großvenediger im Dürnbachtal und hat eine Fläche von 14 km<sup>2</sup> (Abb. 1). Das Gebiet grenzt im Norden an den Speikkogel (2.233 m ü. A.) und die Geige (2.084 m ü. A.), welche als natürliche Grenzen zum Bundesland Tirol bezeichnet werden können. Im Osten wird das Gebiet durch den Dürnbach und im Süden durch das Salzachtal begrenzt. Im Westen bilden der Steinkogel (2.299 m ü. A.), der Hüttenkopf (2.181 m ü. A.) und das Trattenbacheck (2.026 m ü. A.) die natürlichen Grenzen.

## 2. Geologie

Das Arbeitsgebiet liegt nördlich des Tauernfensters und gehört geologisch betrachtet zur Grauwackenzone, innerhalb welcher Quarzphyllite und Steinkogelschiefer das Grundgestein bilden (Abb. 2) (FÜRLINGER et al. 1988). Die Hauptmasse dieser Zone besteht aus Metapeliten und Metapsammiten (ROCKENSCHAUB et al. 2003). Anhand der aufgenommenen Messwerte wird eine Synklinalstruktur erkennbar, welche durch die schüsselförmige Lage des Steinkogelschieferkomplexes auf den Innsbrucker Quarzphylliten gebildet wird. Im südlichen Teil des Dürnbachtals fallen die Schichten steil nach Norden ein, in der Mitte des Profils flach (ca. 37°) nach Norden.

## 3. Geotechnische Erläuterungen und mechanische Deutung

Die »Geotechnische Karte Dürnbachtal – Neukirchen am Großvenediger« ist in Abb. 3 dargestellt und zeigt insbesondere die kartierte Westflanke des Dürnbachtals, welche flächendeckend von Massenbewegungen wie Talzuschüben geprägt ist. LAATSCH & GROTTENTHALER (1972) untergliedern das Phänomen Talzuschub nochmals genauer in die Bereiche Bergzerreißung (AMPFERER 1939), Sackung (ZISCHINSKY 1968, 1969) und Talzuschub (STINY 1941, 1942). CROSTA et al. (2013) fassen das Gesamtphänomen Talzuschub als Deep-seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD) zusammen. Typische Indikatoren für aktive Bewegung des Gebirgshanges sind sogenannte counterscarps, welche morphologisch als treppenartige Absetzungen zu erkennen sind und parallel zur Hauptabrischkante verlaufen (SAROLI et al. 2021). Derartige Strukturen sind insbesondere in der Gratregion vorzufinden (vgl. Kap 4.1).

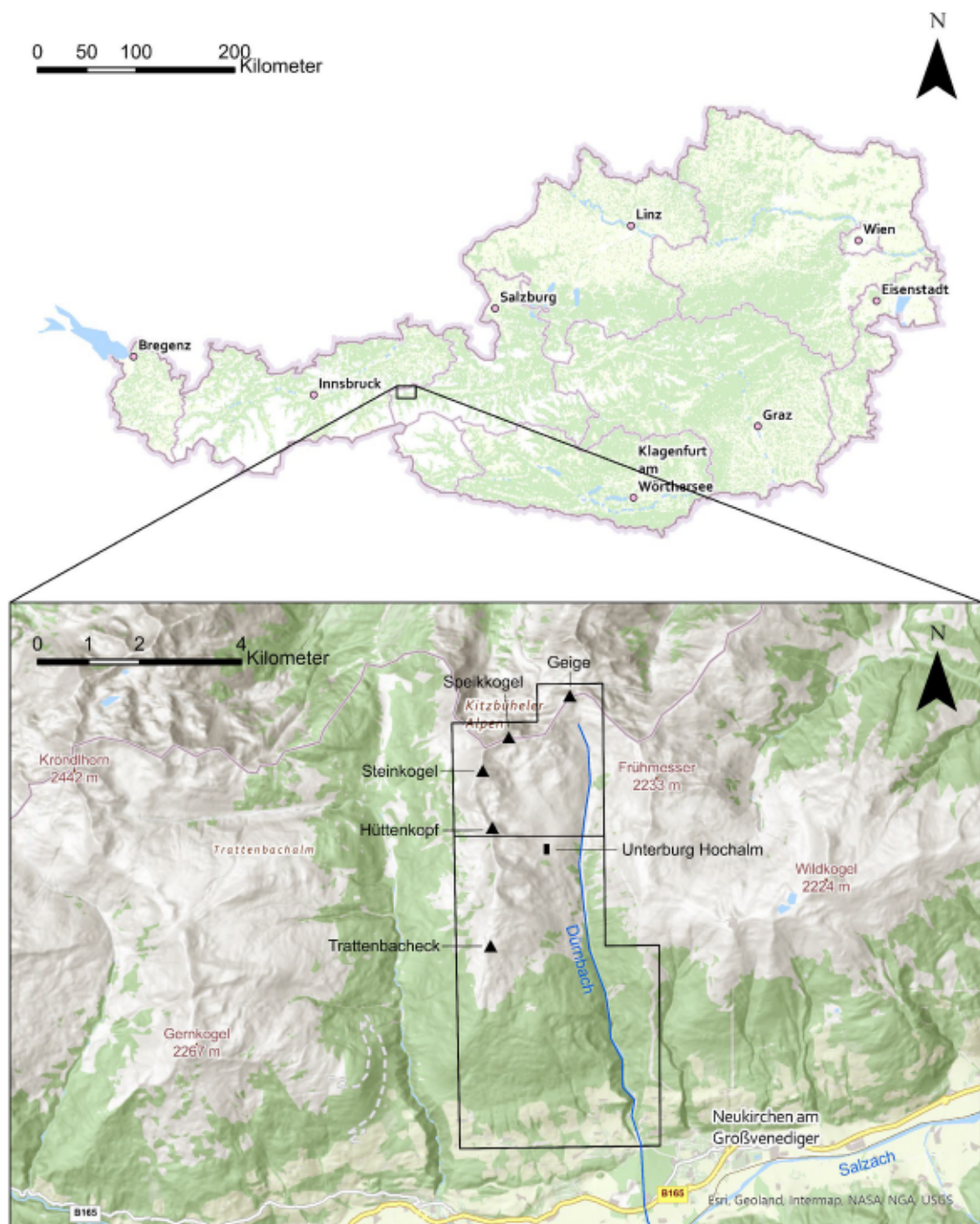
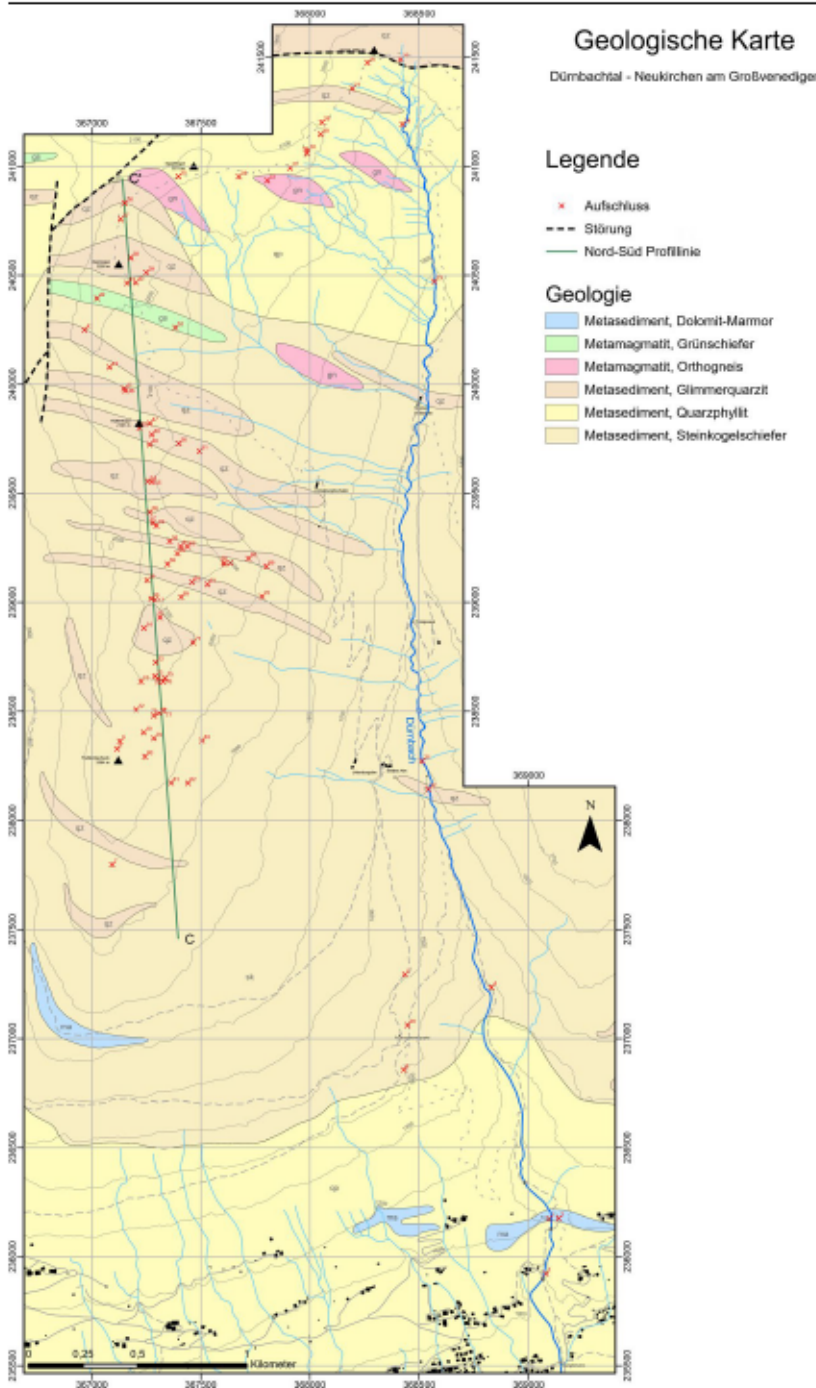


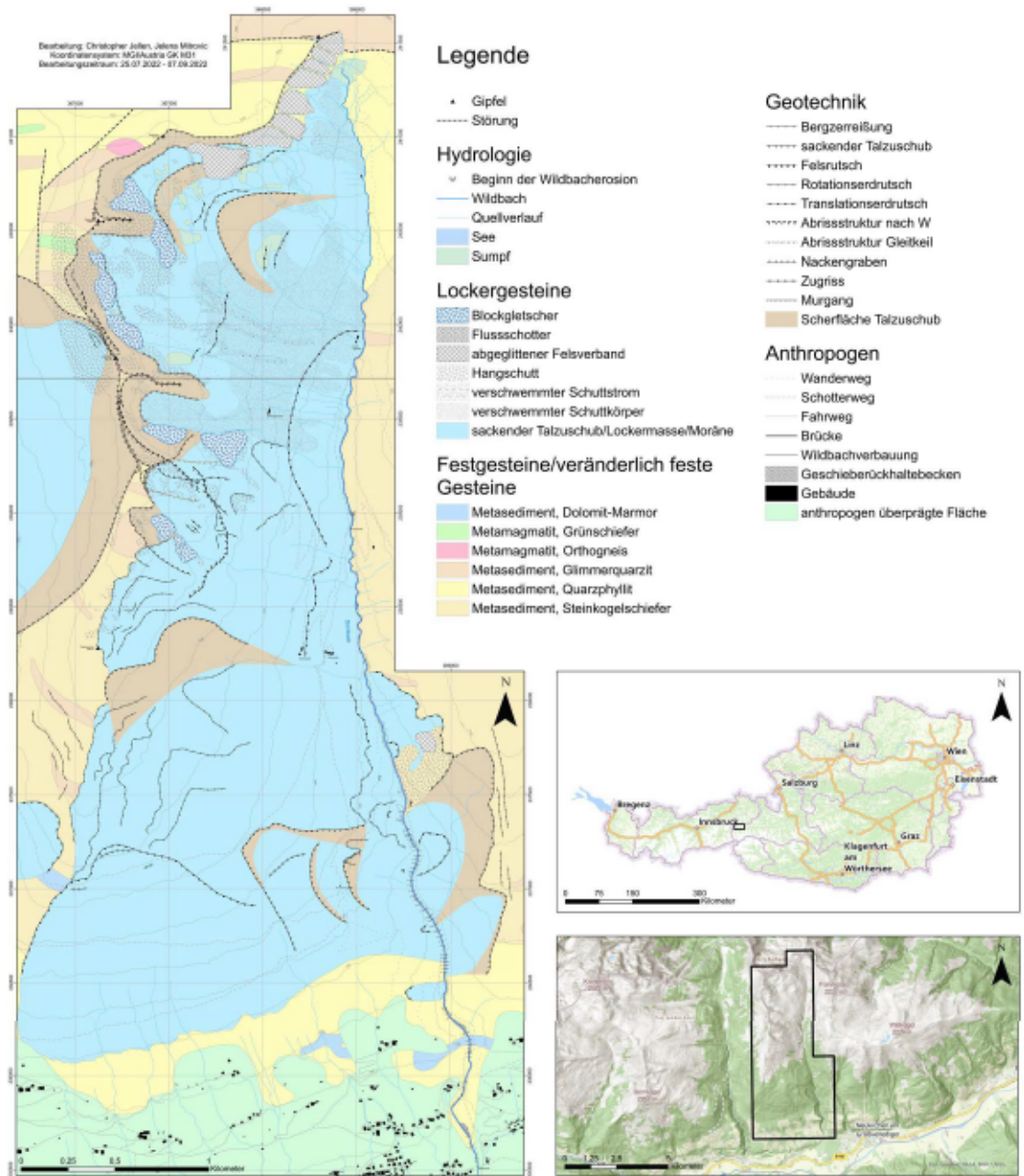
Abb. 1: Geographische Lage des Kartiergebiets.



Zur mechanischen Deutung aller auf die Talzuschübe wirkenden Kräfte sind neben den Restspannungen aus tektonischen Beanspruchungen in jedem Fall auch die Schwerkraft für die Sackungen entscheidend (ZISCHINSKY 1968). Die Veränderungen bei der Deformation eines Böschungskörpers fasst ZISCHINSKY (1968) darüber hinaus wie folgt zusammen:

Das Hangprofil lässt sich in einen konkaven oberen Hangbereich (Massenabtrag) und einen konvexen unteren Hangbereich (Massenzuwachs) gliedern. Es besteht die Möglichkeit eines großangelegten Hakenwerfers unter einem passiv mitgeschleppten, kaum verformten oberen Bereich. Die Bewegungsbahnen streichen im höheren Hangbereich nicht selten als Bergzerreißungen aus. Dabei enden diese nach unten in den konvexen Hangbereich des Böschungskörpers. In den teilbeweglichen Bereichen kommt es zum einen zur brechenden Verformung im oberen Hangbereich, zum anderen zur bruch-

**Abb. 2:** Geologische Karte des Untersuchungsgebiets (basierend auf der abgedeckten Manuskriptkarte Blatt GK50 121 Neukirchen am Großvenediger der GEOSPHERE AUSTRIA - BUNDESANSTALT FÜR GEOLOGIE, GEOPHYSIK, KLIMATOLOGIE UND METEOROLOGIE 2022).



**Abb. 3:** Geotechnische Karte Dürnbachtal - Neukirchen am Großvenediger. Mechanische Deutung der Talzuschiebe.

losen Deformation (abhängig von der Größe des verformten Körpers) im unteren Hangbereich.

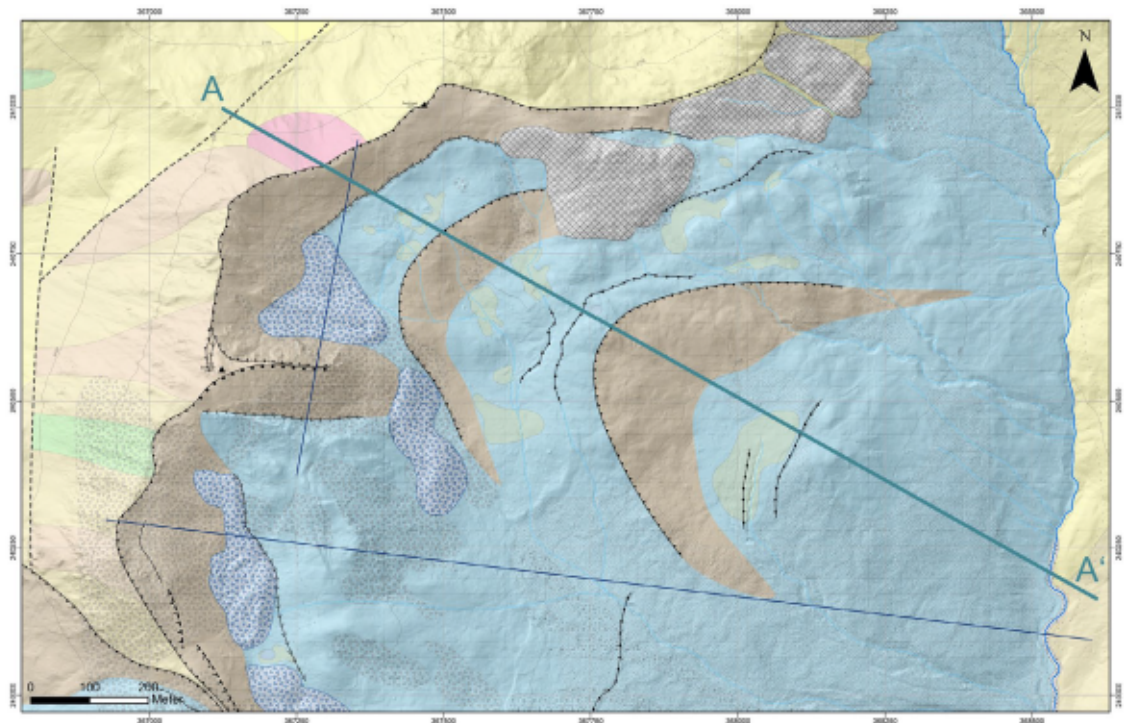
Bei der Bewegung der Sackungsmasse werden in der Literatur zwei Modelle unterschieden. Zum einen besteht das »Non shearing model« nach MENCL (1968). Dieser nimmt an, dass es durch allseitig hohe Drücke innerhalb des Zentrums der Rutschmasse nicht zur Ausbildung einer Scherfläche kommen kann, weshalb sich die Masse viskos und bruchlos ohne basale Scherbahn kontraktant bewegt und verformt. Im oberen Abrissbereich und unteren Fußbereich der Rutschmasse, an denen allseitige Drücke gering sind, bewegt sich die Masse nach MENCL (1968) entlang von Scherflächen dilatant. Das »Plastic failure model« nach SAVAGE & VARNES (1987) beschreibt das plastische Fließen der deformierten Sackungsmasse an einer kontinuierlichen Gleitfläche unter der gesamten Masse. Die plastische Verformung wird bei diesem Modell durch hohe allseitige Drücke erzeugt. Nach DIKAU et al. (1996) wird das Modell nach MENCL (1968) bevorzugt angewendet. Der Bewegungsablauf tiefgreifender Hangdeformationen ist jedoch nicht weit genug erforscht, um eindeutige Aussagen diesbezüglich treffen zu können (DIKAU et al. 1996).

#### 4. Ergebnisse der geotechnischen Kartierung

Die Westflanke des Dürnbachtals weist mehrere Schwerpunkte von Massenbewegungen auf, deren Abriss der Gratregion entspricht (HEINISCH & PANWITZ 2016b). Zur Beschreibung der großangelegten Sackungsmasse im nördlichen Dürnbachtal (Abb. 4 und Abb. 5) wurde mithilfe des Geographischen Informationssystems des Salzburger Landes (salzburg.gv.at 2022) ein Hangprofil erstellt, welches parallel zur Bewegungsrichtung der Sackungsmasse verläuft (Abb. 6).

Nach Erstellung des Profils (AA') auf Basis des DGMS, wurden Scherbahnen sowie die Bewegungsrichtung eingezeichnet (Abb. 7). HUTCHINSON (1988) klassifiziert Sackungen in verschiedene Typen, wobei diese Sackung anhand der eingezeichneten Scherbahnen, bzw. Bewegungsbahnen als rotational-sagging definiert werden kann.

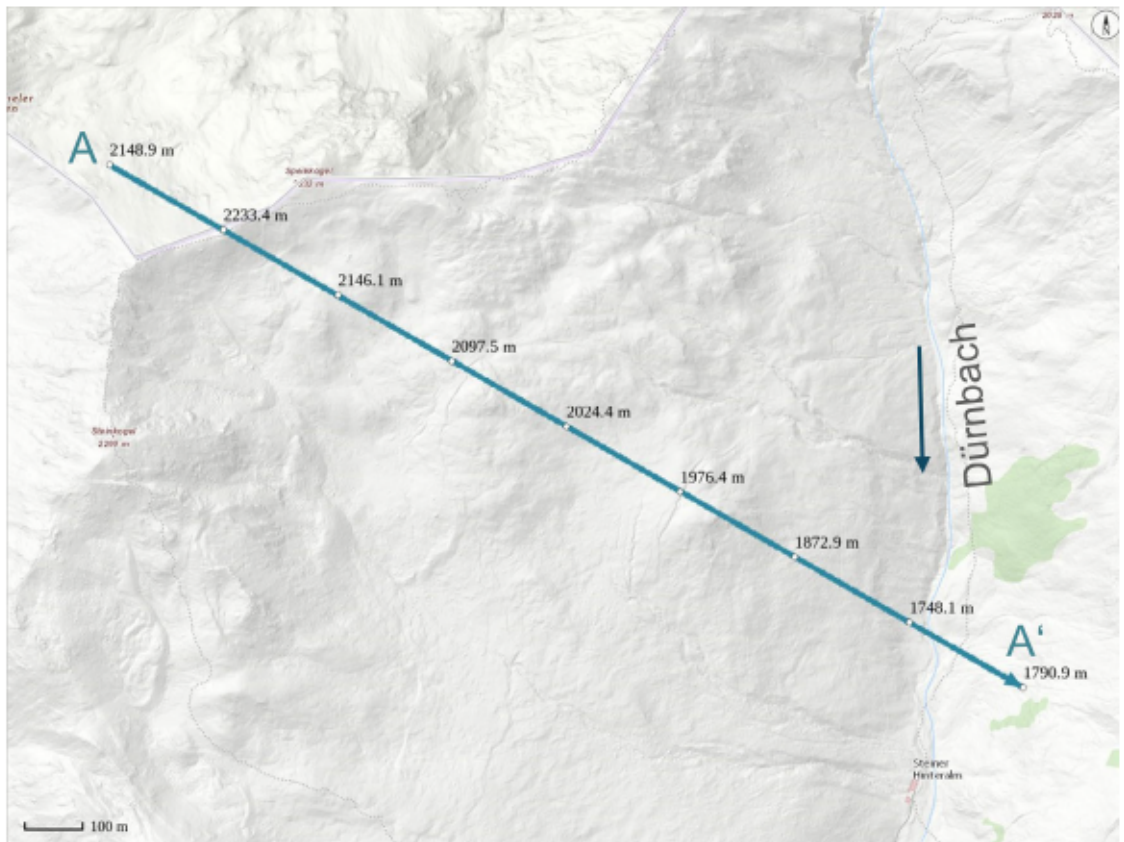
An die Abrisskante schließt sich die Gleitfläche an. Die Sackungsmasse bewegt sich in östliche Richtung auf den Dürnbach zu und ist durch eine sich nach Osten öffnende Tiefenrinne vom dahinter liegenden Sumpfbereich abgegrenzt. An der Abrisskante sind keine Bergzerreißen vorzufinden. Weiter kann festgestellt werden, dass sich die Sackungsmasse in drei unterschiedliche Hangbewegungen einteilen lässt, sodass zusätzlich zur Hauptabbrisskante zwei untergeordnete Abrisskanten mit zugehöriger Sackungsmasse vorhanden sind. Weiter ist eine zwar unscharfe, aber dennoch vorhandene Einteilung in einen konkaven oberen Hangbereich und einen konvexen unteren Hangbereich möglich. Auffallend ist die treppenartige



**Abb. 4:** Geotechnisch kartierte großangelegte Sackungsmasse im nördlichen Dürnbachtal mit Lage des Profils AA' (Legende siehe Abb. 3).



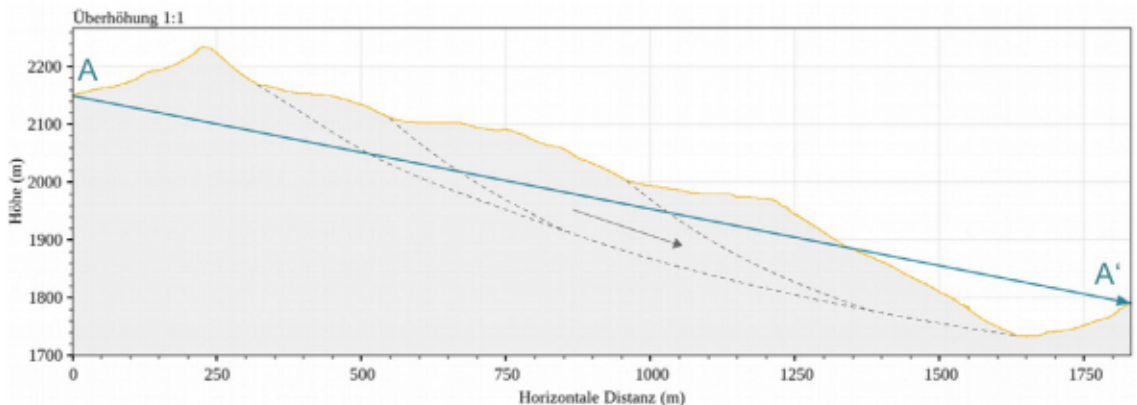
**Abb. 5:** Sackungsmasse in Richtung Dürnbach im nördlichen Dürnbachtal. Blickrichtung: NW (Drohnaufnahme).



**Abb. 6:** Profilinie AA' (blauer Pfeil) des Hangprofils der Sackungsmasse (salzburg.gv.at 2022).

Absetzung der drei Sackungsmassen, wodurch oberhalb der Sackungsmassen große Sumpfgebiete entstehen, aus denen Quellen gespeist werden. Innerhalb dieser Sumpfgebiete treten Zugrisse auf. Auch MOSER et al. (2017) erwähnen, dass Gleitflächen tiefgreifender Hangdeformationen meist nur entlang von Abrisskanten bzw. an steil einfallenden Bewegungsbahnen beobachtet werden können. Die aktive Bewegung der Sackungsmasse wird ebenfalls durch die Auswertung von InSAR-Daten (Interferometric Synthetic Aperture Radar) des Salzburger Landes bestätigt und beträgt maximal 5 mm/a (salzburg.gv.at 2022). Die Mächtigkeit des Talzuschubs wird auf bis zu 150 m geschätzt, das Volumen beläuft sich auf ca. 52 Mio. m<sup>3</sup>. Vergleicht man die Abtragung der komprimierten Talzuschubsmasse durch den Dürnbach im südlichen und nördlichen Teil, so fällt diese im Bereich der beschriebenen Sackungsmasse gering aus. Dies geht mit dem flachen Gelände und dem wenig turbulenten Fließverhalten des Wildbaches einher. Festgestellt werden konnte, dass der Druck der Sackungsmasse auf den Gegenhang so groß ist, dass dieser den Bachverlauf beginnend ab der Steiner Hinteralm bis zum Ende der Sackungsmasse am Dürnbach bei ca.





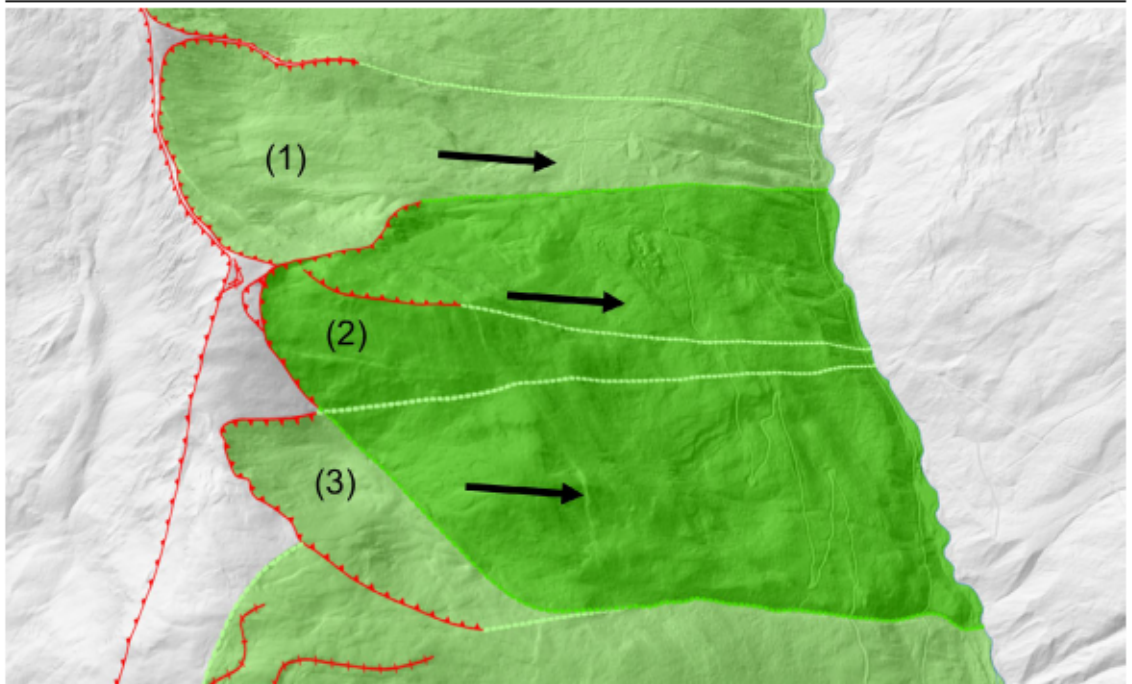
**Abb. 7:** Hangprofil AA' durch Sackungsmasse (blauer Pfeil entspricht Profillinie in Abb. 6) (verändert nach salzburg.gv.at 2022).

1.820 m ü. A. in östliche Richtung drückt, wobei ein Versatz von maximal 50 m nach Osten festgestellt werden konnte. Dieser Versatz nimmt zu beiden Enden der Sackungsmasse ab.

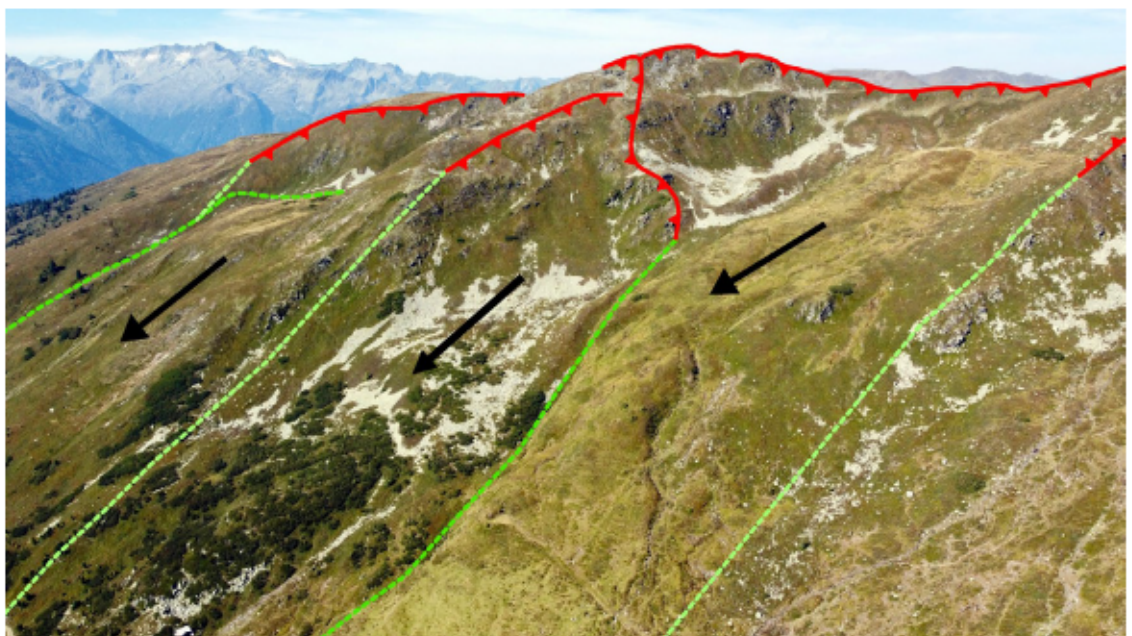
Südlich des Hüttenkopfs, im südlichen Dürnbachtal, werden drei tiefgreifende Massenbewegungen am Nord-Süd verlaufenden Grat deutlich. Sie erstrecken sich allesamt zur Talsohle des Dürnbachs im Osten. Die Sackungsmassen des nördlichen (1) und südlichen (3) Talzuschubs werden durch die mittlere (2) Massenbewegung überlagert (Abb. 8 und Abb. 9), die durchschnittliche Mächtigkeit wird auf 120 m geschätzt.

Die hier beschriebenen Hangprofile der tiefgreifenden Hangbewegungen werden in einen konkaven und konvexen Hangbereich eingeteilt, welche dem Massenabtrag und dem Massenzuwachs entsprechen (ZISCHINSKY 1968). Die Bewegungsrichtung der drei Talzuschubsmassen führt nach Osten zum Dürnbach hin, wobei sich die Bewegungsgeschwindigkeit der Massenbewegungen auf ca. 5 mm/a beläuft (InSAR-Daten). Die Instabilität der orographisch rechten Talflanke wird durch das Zusammenspiel der nach Süd-Osten einfallenden Schieferung und der orthogonal stehenden Kluftflächen begünstigt. Durch die Einschotterung der teils übersteilten Hänge befindet sich auf der ersten Sackungsmasse ein Schuttkörper. Dieser Schuttkörper wird durch zahlreiche Quellbäche zerschnitten, flächenhaft von der Sackungsmasse bis zur Talsohle erodiert und in den Dürnbach entwässert. STINY (1910) beschreibt diesen Typ von Schuttkörper als »durchfließbar«, da die Feinbestandteile bereits ausgewaschen wurden und somit kein nennenswertes Wasserrückhaltevermögen zu erwarten ist.

Die dritte Talzuschubsmasse lässt eine deutliche Sackungsmasse (Abb. 10) im höher liegenden konkaven Abschnitt und einen konvex geformten tieferen Teil erkennen. Der Abriss der Sackungsmasse befindet sich auf einer Höhe von 2.130 m ü. A. und ist auf 2.020 m ü. A. abgeglitten. Nach



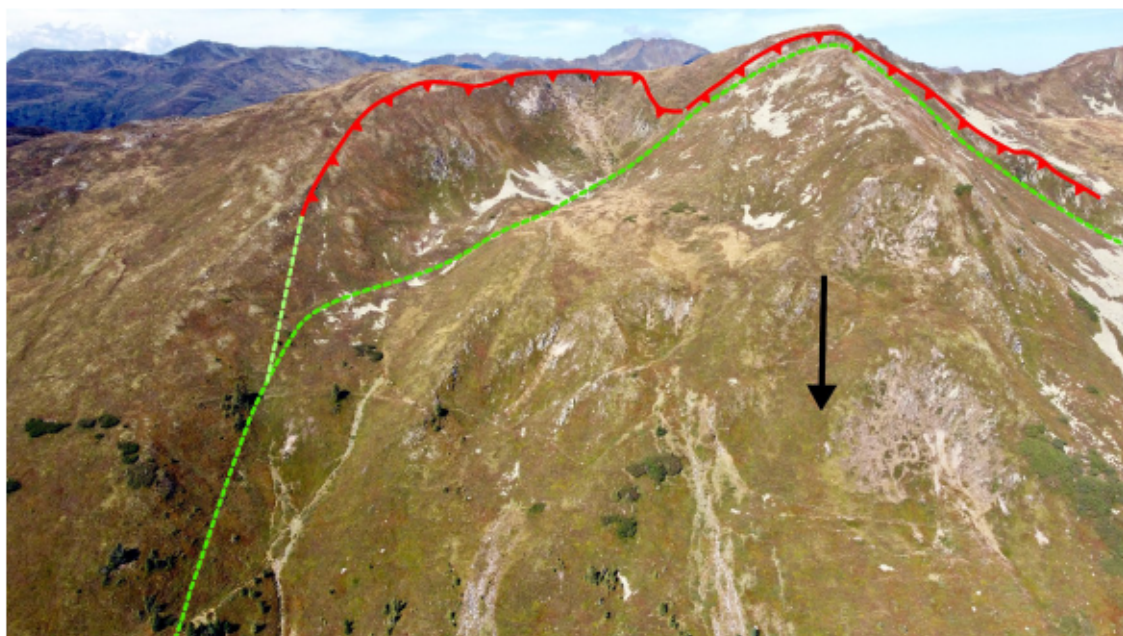
**Abb. 8:** Darstellung der drei Talzuschubmassen. Blickrichtung: N, 3D Darstellung mittels Hillshade.



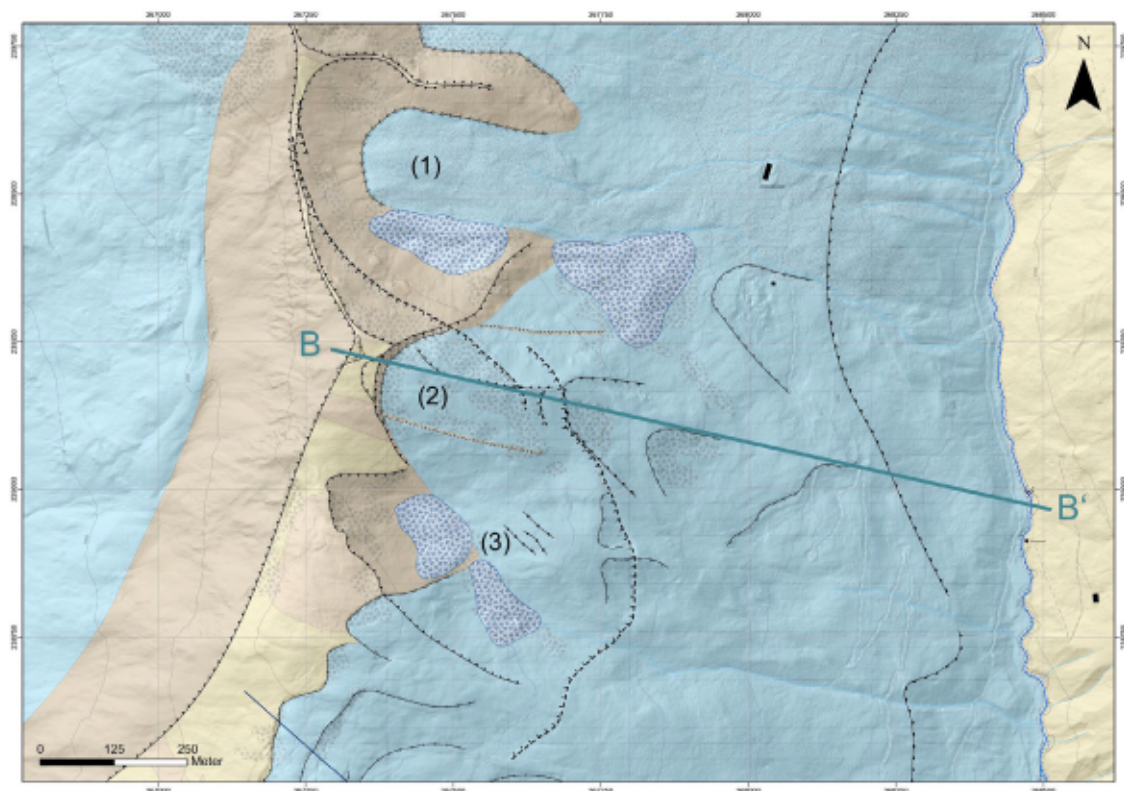
**Abb. 9:** Darstellung der drei Talzuschubmassen mit Abrisskante (rot) und Richtung des Abgleitens. Blickrichtung: SW, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 368122,26 239751,72 (Drohnenaufnahme).



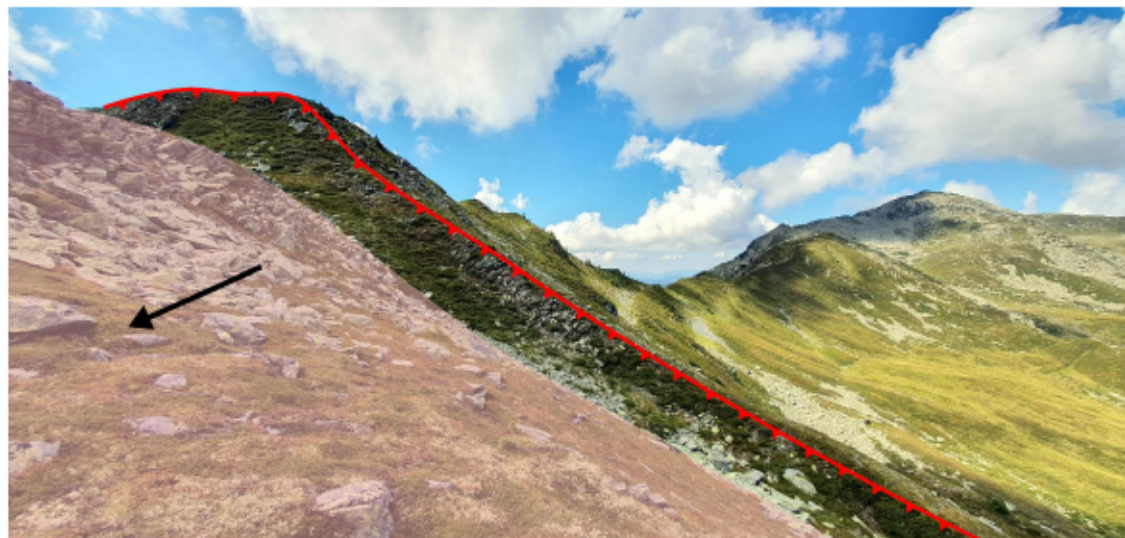
**Abb. 10:** Sackungsmasse des dritten Talzschubs. Blickrichtung: NE, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 367354,26 238716,39 (Drohnenaufnahme).



**Abb. 11:** Abriss des zweiten Talzschubs durch die Sackungsmasse des dritten Talzschubs mit Bewegungsrichtung der zweiten Talzschubsmasse. Blickrichtung: W, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 368093,09 238920,54 (Drohnenaufnahme).



**Abb. 12:** Geotechnisch kartierte Talzschübe (1), (2) und (3) mit Lage des Profils BB' durch die mittlere Talzschubmasse (Legende siehe Abb. 3).



**Abb. 13:** Abrisskante (rot) und Gleitfläche des mittleren Talzschubs mit Darstellung der Bewegungsrichtung (Pfeil). Blickrichtung: NW, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 367479,58 239233,61.

ZISCHINSKY (1968) lässt sich folgern: Je ausgeprägter die Sackung ist, desto tiefer greift die Bewegung in die Böschung ein.

TERZAGHI (1962) definiert das Vorkommen von Sackungsmassen dort, wo Hänge hohe gravitative Spannungen auf das Grundgestein ausüben.

In der beschriebenen Sackungsmasse kam es aufgrund von Dehnung zur Ausbildung von Zugrissen. Diese können durch variierende Geschwindigkeiten in der Abwärtsbewegung des oberen und unteren Teils der Sackungsmasse erklärt werden.

Folgende Strukturen deuten auf die Überlagerung der bereits beschriebenen Talzuschübe durch den zweiten Talzuschub (Abb. 11) hin: Die Abrissstruktur der mittleren Massenbewegung beginnt auf 2.160 m ü. A. und verläuft durch die gesamte Sackungsmasse des südlichen Talzuschubs bis auf 2.000 m ü. A. Weiter wurde die Abrisskante des ersten Talzuschubs durch die Sackung des mittleren um etwa 20 m abgesetzt.

#### Erläuterung des geotechnischen Profils BB'

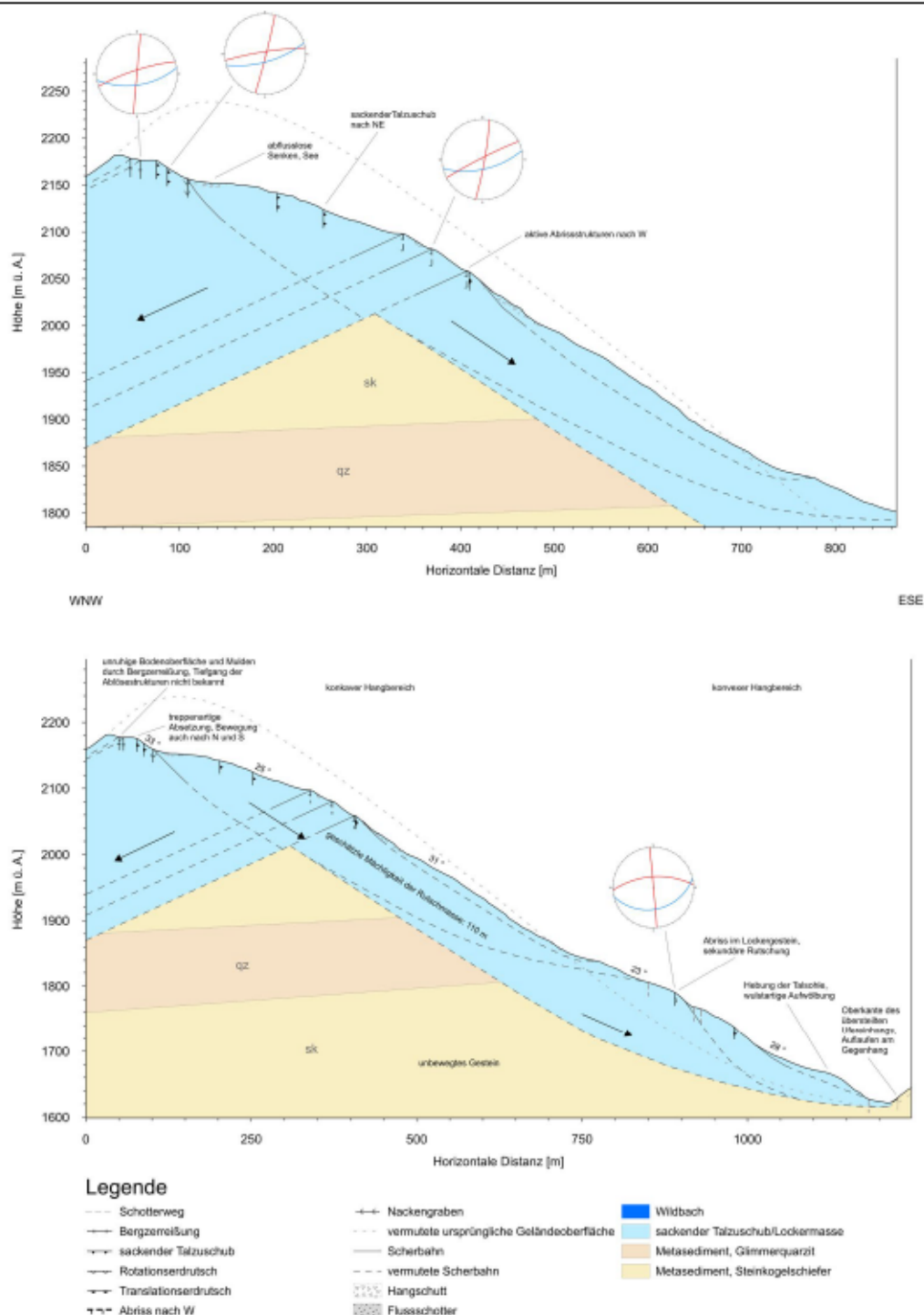
Durch den mittleren Talzuschub wurde das geotechnische Profil BB' (Lage des Profils in Abb. 12 dargestellt, Abb. 14) mit 102° gegen Norden erstellt.

In der Gratregion befinden sich Bergzerreißungsstrukturen, deren Scherbahnen gen Westen einfallen. Die Sackungsmasse gen Osten ist auf einer ca. 33° steilen Gleitfläche (Abb. 13) abgesackt. Weiter treten im oberen Bereich der Sackungsmasse abflusslose Senken auf, die durch treppenartiges Absetzen der Sackungsmasse und eine zum Hang rotierende Rutschmasse ausgeprägt wurden. Nach HUTCHINSON (1988) wird diese Bewegungsform als Rotationssackung (rotational-sagging) klassifiziert. Der konkave Hangbereich besitzt eine Hangneigung von bis zu 31°, während die Kompression mit einer Verflachung der Geländeoberfläche auf 23° erkennbar wird. Bei der Verflachung ist zudem eine wulstartige Aufwölbung der Rutschmasse entstanden. Durch diesen zweiten Talzuschub kommt es zur Anhebung der Talsohle des Dürnbachs, wobei die Talzuschubsmasse ebenfalls am Gegenhang aufläuft.

Auffallend ist, dass in der Kompressionszone dieser Talzuschubsmasse sekundäre Rutschungen im Lockergestein entstehen. Dies kann durch den Abtrag der Rutschmasse durch den Dürnbach und der damit einhergehenden rückschreitenden Erosion begründet werden. Die Sackungsmassen üben Druck auf den Gegenhang aus, wobei vermehrt Uferanbrüche entstehen.

Das Profil BB' stellt zwei Besonderheiten dar:

Eine aktive Bewegung des Gebirges in Form von tiefgreifenden Hangbewegungen besteht sowohl in das Dürnbachtal, als auch in das westlich



**Abb. 14:** Geotechnisches Profil BB': 102°. Blaue Großkreise in Lagenkugeln zeigen das Einfallen der Schieferung, rote Großkreise das Einfallen der Klüfflflächen in den jeweiligen Abschnitten.

davon gelegene Trattenbachtal. Verursacht sind die Bewegungen vor allem durch Übersteilung der Bachläufe. Im Gratbereich erfolgt somit eine Überschneidung der Talzuschubmassen, was zur Ausbildung einer Zerrüttungszone führt, sodass das Gestein in diesem Bereich als besonders instabil gilt.

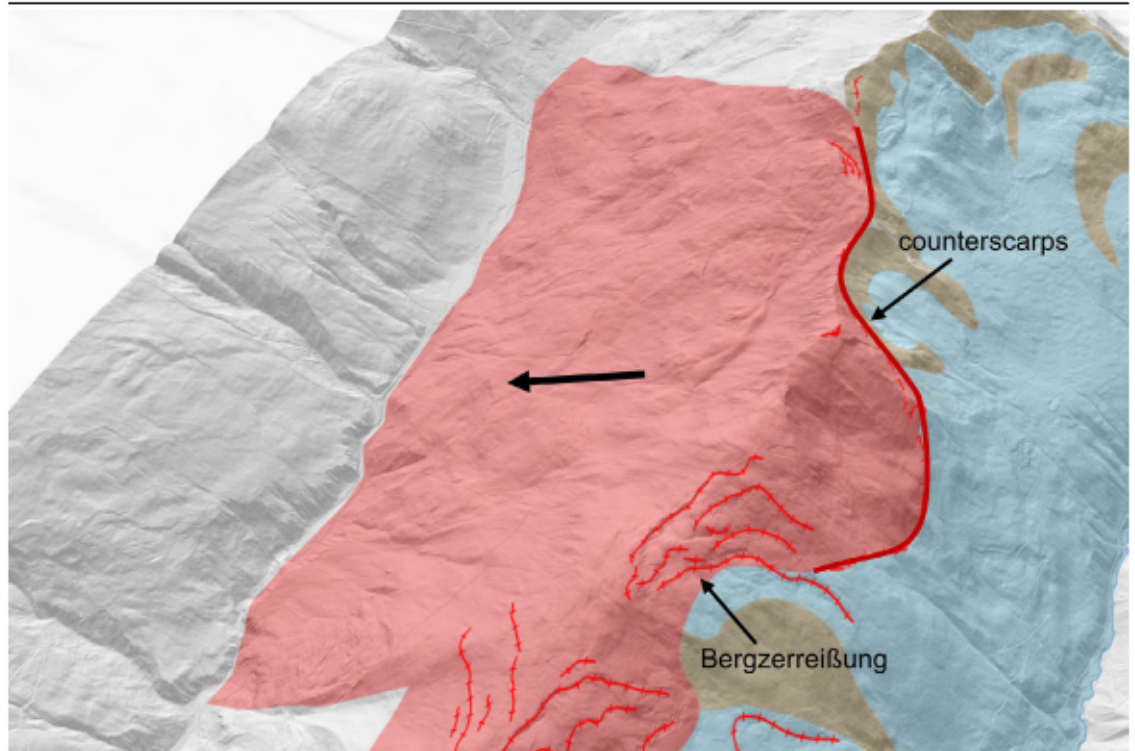
Weiter sind im Bereich von ca. 2.050-2.100 m ü. A. Abrissstrukturen (Abb. 14) zu erkennen, die die Hangbewegungen nach Westen in das Trattenbachtal bestätigen. Hierbei handelt es sich um sogenannte counterscarps, welche in digitalen Geländemodellen besonders gut erkennbar sind, sie erstrecken sich senkrecht zur Bewegungsrichtung des Talzschubs. Morphologisch bilden counterscarps im Profil Grabenstrukturen aus, welche aus tiefgreifender Hangbewegung und dazugehöriger Scherfläche ausgebildet werden. In Bezug auf Talzschübe beziehen sich scarps auf die steile, abfallende Seite eines Tals, während es sich bei counterscarps um die gegenüberliegende Seite oder den Hang handelt. Auch im Gelände sind counterscarps mit einer Höhe von ca. 3-5 m deutlich erkennbar. DOLCE et al. (2024) bestätigen ebenfalls, dass counterscarps mit frakturiertem Gestein in Verbindung stehen, sodass im Gratbereich, wo ebenfalls counterscarps vorzufinden sind, von einer Zerrüttungszone im Überschneidungsbereich der beiden Talzuschubmassen ausgegangen werden kann.

#### 4.1. Talzuschub Trattenbachtal mit counterscarps

Über das gesamte Arbeitsgebiet wurden in der Gratregion in Nord-Süd verlaufender Richtung counterscarps kartiert (Abb. 15), die mit 27° in das im Westen liegende Trattenbachtal einfallen (Abb. 16). Diese leistenartigen Strukturen gehen nördlich des Trattenbachecks in Bergerreißungen über (Abb. 15). Durch die Abrissstrukturen ist ein komplettes Absacken des Grates zwischen Steinkogel und Trattenbacheck zu beobachten (Abb. 17).

Mithilfe des Geographischen Informationssystems (GIS) des Salzburger Landes (salzburg.gv.at 2022) erfolgte beginnend ab dem Trattenbach über den Grat bis zum Dürnbach die Erstellung des Profils (DD') (Abb. 18).

Dieses Profil ist die Fortsetzung des Profils BB' in westliche Richtung in das Trattenbachtal. Damit können neben der vermuteten Scherbahn des Talzschubs ins Dürnbachtal nun auch die Scherbahnen des Talzschubs ins Trattenbachtal dargestellt werden. Aufgrund des Abrisses ins Trattenbachtal verschob sich der obere Bereich der Scherbahn der tiefgreifenden Hangbewegung ins Dürnbachtal (Abb. 19) nach Westen. Das Profil in Abb. 19 zeigt die vermuteten Scherbahnen des Talzschubs ins Dürnbachtal (1), den bereits weiter abgeglittenen Talzuschubsbereich ins Trattenbachtal (2) sowie den abgleitenden höheren Bereich des Talzschubs mit Ablösestrukturen ins Trattenbachtal (3).

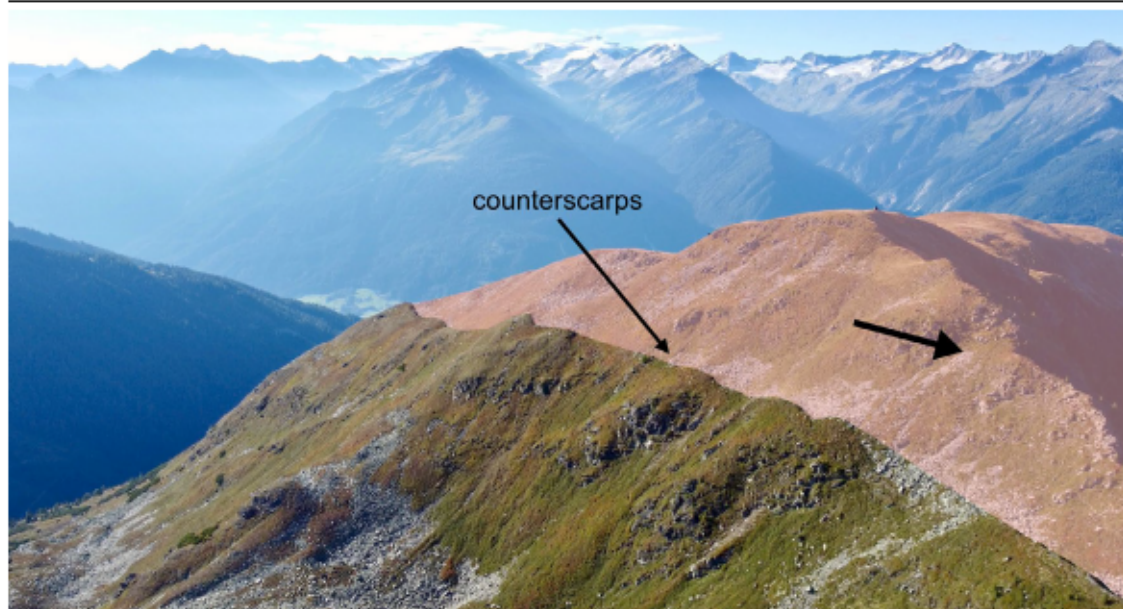


**Abb. 15:** Sich andeutender Talzuschub (rot) mit Bewegungsrichtung ins Trattenbachtal aufgrund der nach Westen einfallenden counterscarps (dunkelrote Linie). Blickrichtung: NW, 3D Darstellung mittels Hillshade.



**Abb. 16:** Mit 27° einfallende counterscarps (rot) mit Bewegungsrichtung der sich ablösenden Gesteinsmasse (rot) Richtung Trattenbachtal. Blickrichtung: E, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 367262,81 239448,83.





**Abb. 17:** Sich ablösende Gesteinsmasse (rot) nach Westen ins Trattenbachtal mit Bewegungsrichtung. Blickrichtung: S, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 367306,04 239569,05 (Drohnaufnahme).

Weiter wird in Abb. 19 ersichtlich, dass sich bereits ein Talzuschub ins Trattenbachtal mit einer mittleren Mächtigkeit von ca. 150-200 m und einem geschätzten Volumen von 550-750 Mio. m<sup>3</sup> ereignete. Dieser ca. 3,7 km<sup>2</sup> große Talzuschub lässt sich durch die abgeglittene Gesteinsmasse bestätigen. Als Ursache hierfür kann, in Anlehnung an FRANK & GRAF (2009), die Theorie der Übertiefung des Trattenbachtals durch glaziale Tiefenerosion angeführt werden. Dabei wird die glaziale Tiefenerosion durch das Abtragen und den Transport von Gesteinsmaterial durch den Gletscher verursacht. Diese Vorgänge führen zu einer ausgeprägten, vertikalen Erosion des geologischen Untergrundes unterhalb eines Gletschers oder im nahen Gletschervorfeld (FRANK & GRAF 2009). Da die Fläche des Einzugsgebiets und somit die Vergletscherung des Trattenbachtals deutlich größer, als die des Dürnbachtals war, erfolgte hier eine ausgeprägtere Übertiefung der Talsohle. Die unterschiedliche Vertiefung beider Täler kann ebenfalls Abb. 19 entnommen werden, wobei sich die Talsohle im Trattenbachtal auf 1.480 m ü. A. und im Dürnbachtal auf 1.600 m ü. A. befindet. Durch die Übertiefung und Versteilung der Hänge ist der Talzuschubsbereich (2) bereits weitgehend abgeglitten. Durch den Abtrag der Uferabhängungen durch den Wildbach und der damit einhergehenden Versteilung der Hänge werden die Abrissstrukturen in der Gratregion auch in Zukunft weiter ausgebildet, sodass sich die Ablösestrukturen des Talzuschubs (3) weiter ausprägen werden. Die oben beschriebenen counterscarps, die im gesamten Gratbereich auftreten, gelten als Ablösestruktur des noch abgleitenden

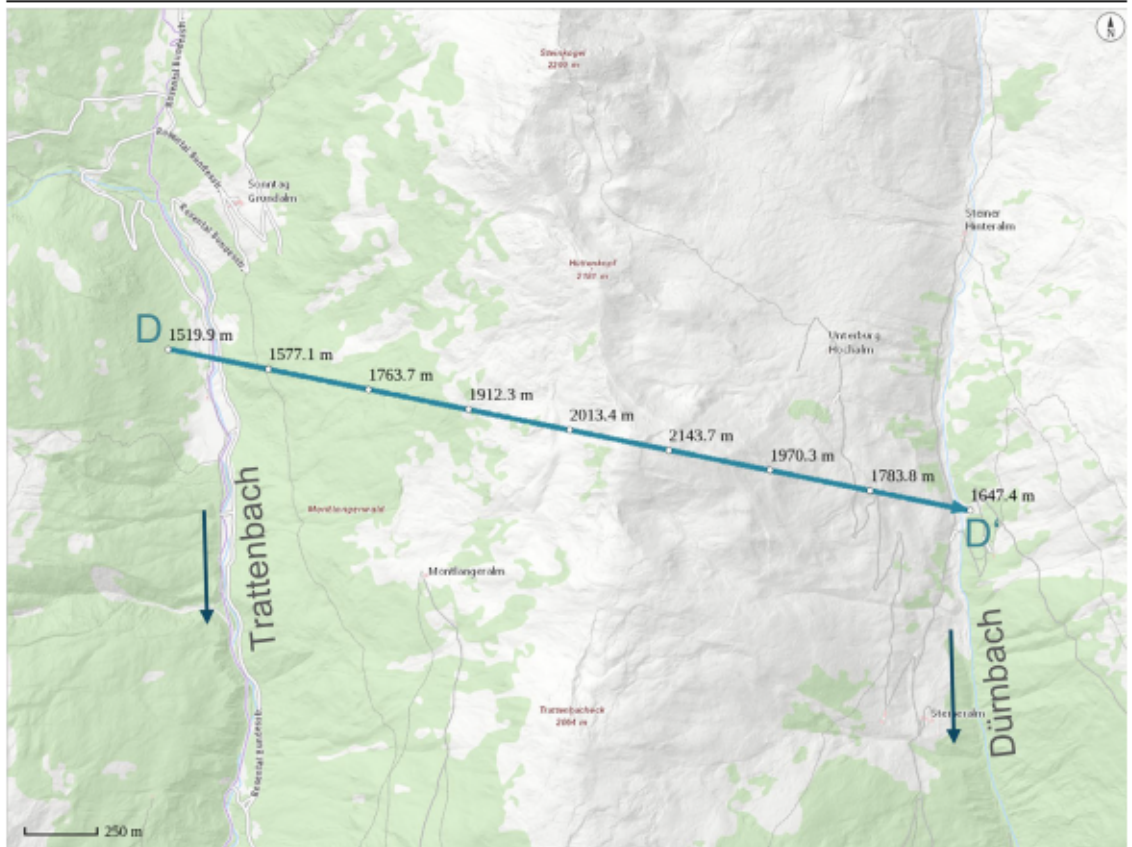


Abb. 18: Lage der Profilinie DD' (blauer Pfeil) vom Trattenbach zum Dürnbach (verändert nach salzburg.gv.at 2022).

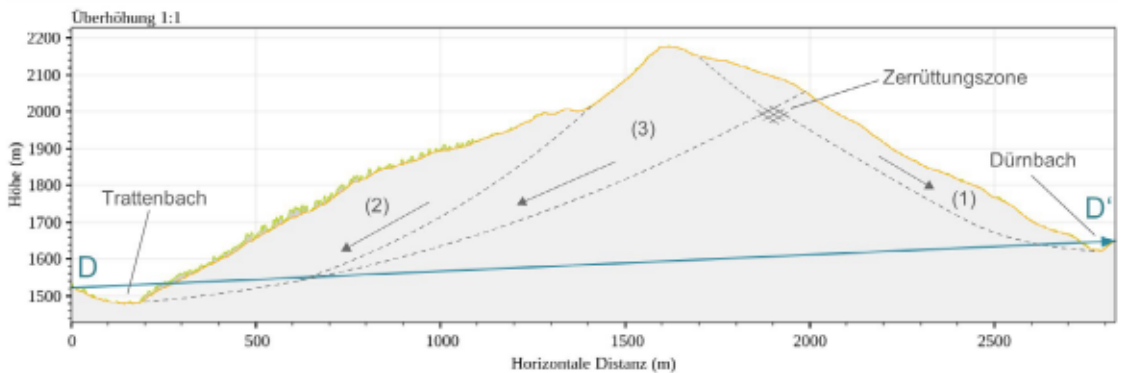


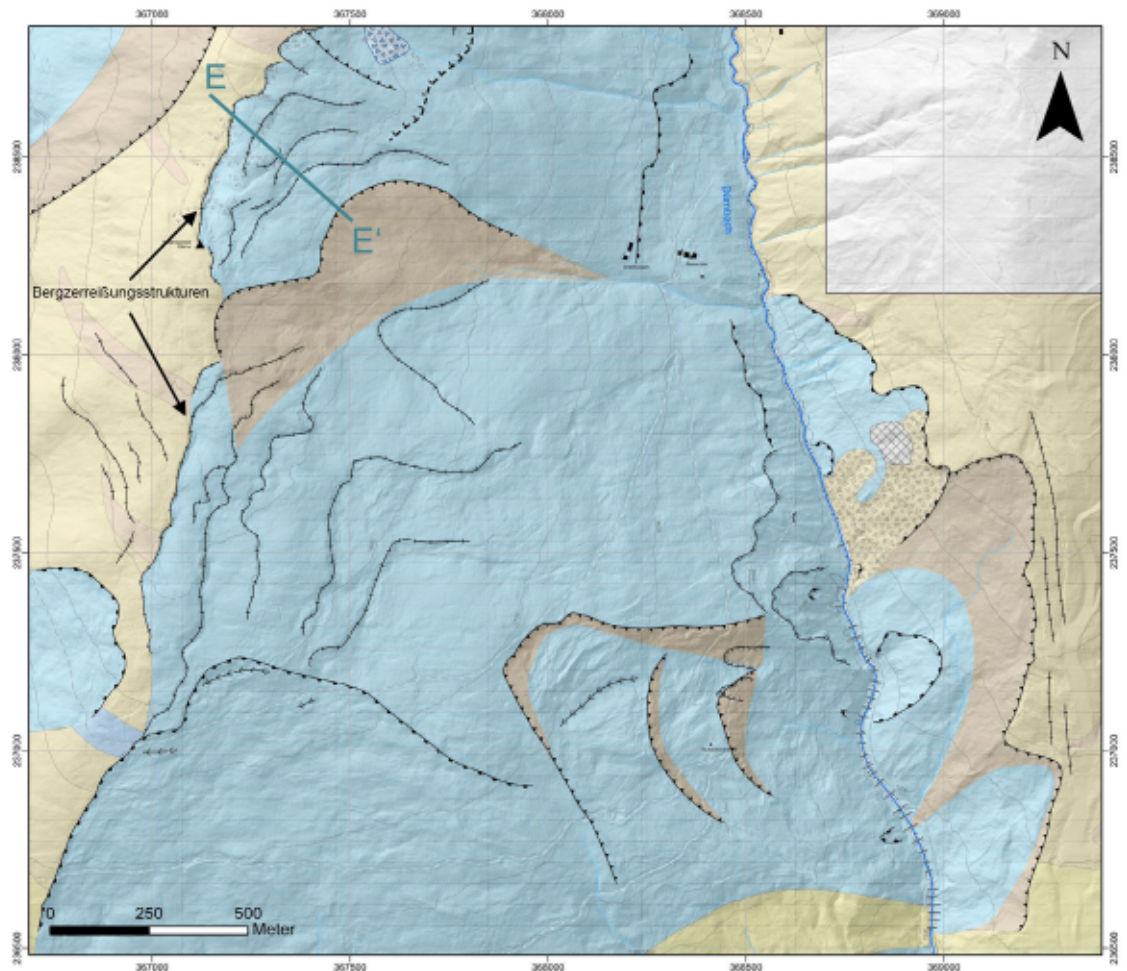
Abb. 19: Hangprofil DD' vom Trattenbachtal zum Dürnbachtal (blauer Pfeil entspricht Profilinie) (verändert nach salzburg.gv.at 2022).

Talzuschiebs (3) ins Trattenbachtal. Im Gratbereich kommt es zur Überschneidung der beiden tiefgreifenden Hangbewegungen und somit zur Ausbildung einer Zerrüttungszone in dem Bereich, in dem sich sowohl nach Westen als auch nach Osten gerichtete Bewegungen kreuzen (Abb. 19).

Es entsteht ein Bereich stark aufgelockerten Gesteinsmaterials und somit erhöhter Instabilität. Ebenso bedingt der Druck der Talzuschubmassen auf die Gegenhänge eine Instabilisierung des Hangfußes, die Beanspruchungen der beidseitigen Gebirgsdrücke übersteigen die Materialfestigkeit der Bachquerwerke, sodass diese Rissbildung aufweisen bzw. oft bereits gänzlich zerstört sind. Treten nun Starkniederschlagsereignisse auf, kommt es durch Übersteilung des Hangfußes sowie der Instabilität des Gesteinsverbandes in diesem Bereich zu einer enormen Abtragung des Gesteins und somit zur vermehrten Materialbereitstellung in Form von Uferanbrüchen. Negative Auswirkungen derartiger Murereignisse betreffen vor allem die Siedlungen von Neukirchen am Großvenediger sowie Straßen und die Verbauungsmaßnahmen am Dürnbach.

## 4.2. Bergzerreißen

Der Talbereich südlich der Unterburgalm bis südlich der Taubensteinkapelle besteht vielfach aus Sackungen (Abb. 20). Diese Strukturen beschreiben HEINISCH & PANWITZ (2016b) als inaktiv, wohingegen der Fußbereich ab der Taubensteinkapelle bis zum mit Verbauungen eingefassten Dürnbach als aktiv eingeschätzt wird. In diesem Bereich sind deshalb Murgänge charakteristisch. Der Großteil des Trattenbachecks ist von Bergzerreißen aufgelockert und zerlegt, zudem wurde südöstlich des Trattenbachecks ein weiterer Talzusub kartiert. Dieser verläuft nach Südosten zum Dürnbach hin und tritt als Sackungsmasse in Erscheinung. Durch die Erosion des Wildbachs ist eine rückschreitende Erosion aufgrund des Geschiebeabtrags zu erkennen. So beschreiben FÜRLINGER et al. (1988) den Talzusub mit vorgewölbtem Böschungsfuß als Geschiebelieferant, wobei der betroffene Felsbereich während der Bewegung entfestigt und mechanisch zerlegt wird. AMPFERER (1939) definiert diese bewegte Masse als sich bildender »Gesteinsbrei«. Durch die beschriebenen Beobachtungen kann diese Masse als ein in seine Klufkörper zerlegter Gesteinskörper beschrieben werden. Dieser Schuttkörper liefert dem Wildbach ständig Geschiebe nach. Innerhalb dieser tiefgreifenden Hangbewegung wurde ein weiterer Talzusub (Abb. 20) kartiert, wobei hier ein großflächiges Abtragen der Talzuschubsmasse durch den Wildbach beobachtet werden kann. Bei diesem Vorgang wird das Wechselspiel zwischen Talzusub und Wildbach deutlich (FÜRLINGER et al. 1988). Die Dehnungsstrukturen am Grat nördlich und südlich des Trattenbachecks werden als Bergzerreißen charakterisiert (Abb. 20). Dieses lang durchhaltende Ausstreichen von Bewegungsbahnen kennzeichnet die Aktivität der Großhangbewegung (MOSER et al. 2017). AMPFERER (1939) definiert die Scherflächen der Abrissstruktur, die an der Oberfläche am Abrissbereich ausstreichen. Hierbei handelt es sich um einen einheitlichen Bergkörper, welcher noch eine unzerrissene Kernzone



**Abb. 20:** Geotechnisch kartierte Bergzerreißungen in der Gratregion mit großangelegter Sackungsmasse und Lage des Profils EE' (Legende siehe Abb. 3).

aufweist. Die abgleitenden Gesteinsschollen sind dabei auf einer gemeinsamen Gleitbahn angeordnet.

Bei den kartierten Abrissstrukturen südlich des Trattenbachecks ist im Gegensatz zu den nördlich liegenden Abrissstrukturen kein gleichförmiges Abgleiten der Gesteinsschollen nach Westen und Osten des Grates zu beobachten. Der nach Osten exponierte Hang zum Dürnbach weist hierbei größere N-S-streichende Bergzerreißungsstrukturen auf als der nach Westen einfallende Hang. Das durch Klüftungs- und Schieferungsflächen vorgegebene Gebirgsgefüge verursacht ein System von Abrissflächen, das Sackungen und steile Geländestufen ausbildet (Abb. 21).

Der Bewegungstyp der Ablösezone und der einhergehenden Sackungen wird in nachfolgender Schemaskizze (Abb. 22) verdeutlicht.



**Abb. 21:** Abrissstruktur (rot) mit Sackungen in der Gratregion südlich des Trattenbachecks. Blickrichtung: S, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 367116,8 237887,7 (Drohnenaufnahme).

Erläuterung des geotechnischen Profils Ee'

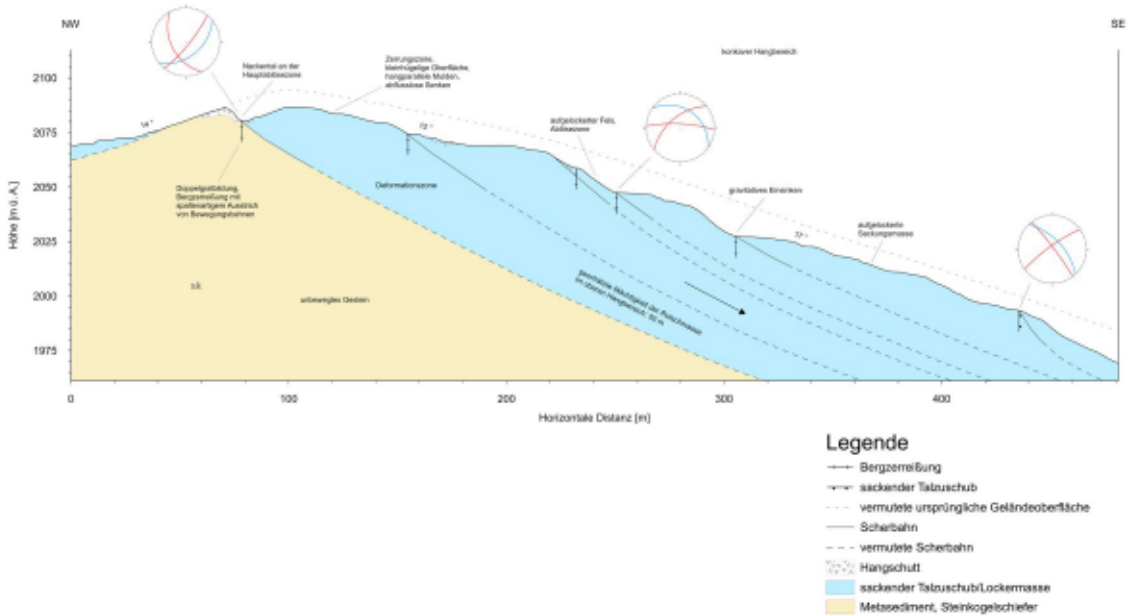
Mit dem Profil Ee' (Lage des Profils in Abb. 20 dargestellt, Abb. 23), das durch die Bergzerreißungsstrukturen nördlich des Trattenbachecks verläuft, wird der Massenabtrag und der damit einhergehende konkave Oberhang mit der vermuteten ursprünglichen Geländeoberfläche verdeutlicht. Es wird ersichtlich, dass es sich hierbei ebenfalls um einen einheitlichen Bergkrper mit einer unzerrissenen Kernzone handelt. Allerdings fällt auf, dass sich die Abwärtsbewegung der Gleitzonen hauptsächlich nach Osten zum Dürnbach erstreckt.

Bei Betrachtung des Talzuschubs bei 1.990 m . A. südlich der eben beschriebenen Bergzerreißung kommt es durch das Ablösen und die Sackung der Bergmasse gegen die offene Talfurche zu einer Entlastung und Abwärtsbewegung des darüberliegenden Gesteinskomplexes. Die Berg-

E W



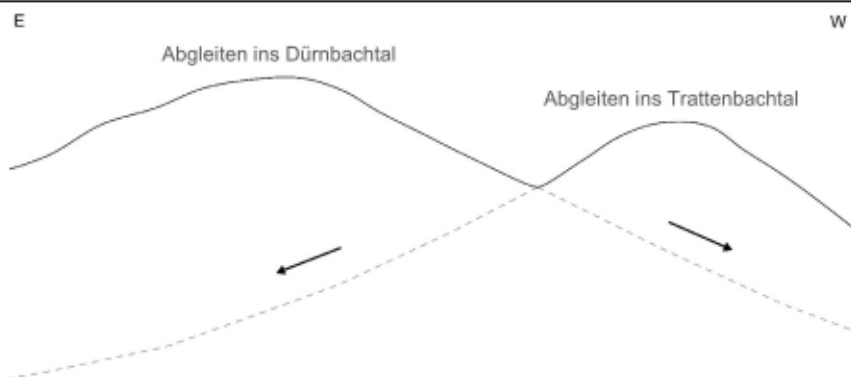
**Abb. 22:** Schemaskizze des Bewegungstyps der Ablsezzone in der Gratregion südlich des Trattenbachecks.



**Abb. 23:** Geotechnisches Profil EE': 132°. Blaue Großkreise in Lagenkugeln zeigen das Einfallen der Schieferung, rote Großkreise das Einfallen der Klüftflächen in den jeweiligen Abschnitten.



**Abb. 24:** Hauptablösezone (rot) in der Gratregion mit Bewegungsrichtung der Gebirgsmassen. Blickrichtung: S, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 367204,98 238590,43 (Drohnenaufnahme).



**Abb. 25:** Schematisches Profil der Hauptablösezone in der Gratregion mit Doppelgratbildung (Abb. 24). Bewegungsrichtung der Gebirgsmasse ins Dürnbachtal und Trattenbachtal.

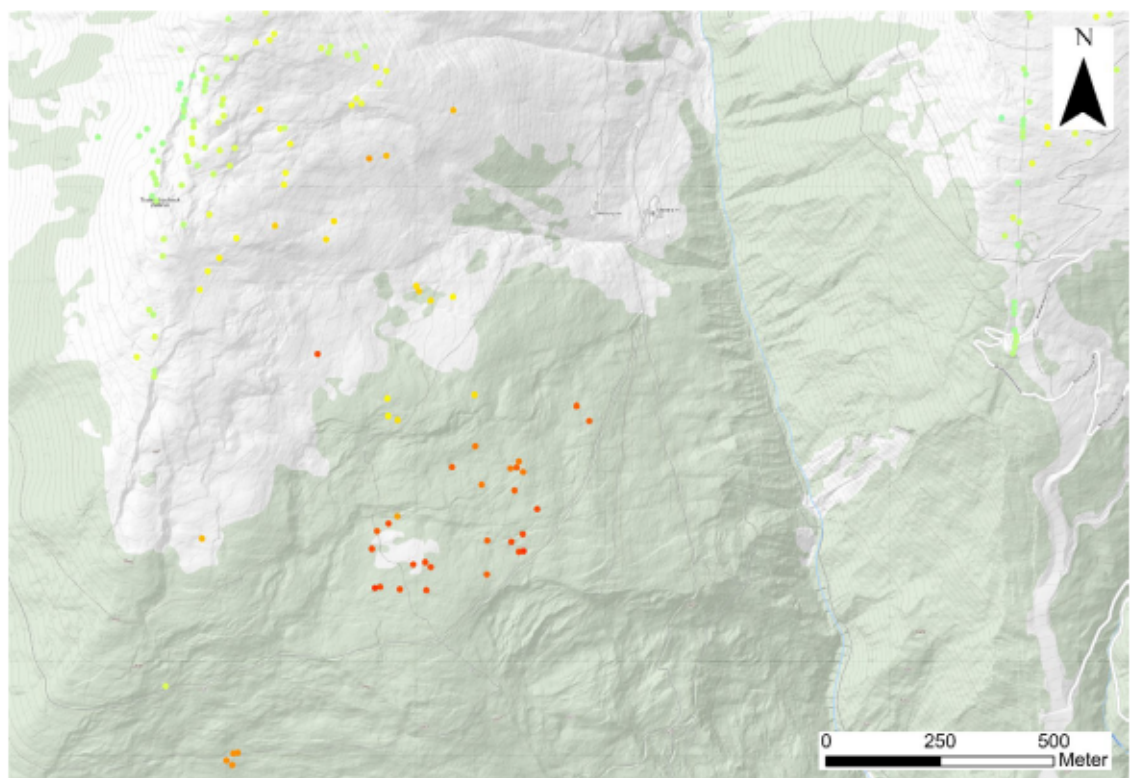
zerreiungsstrukturen werden durch das Abgleiten der Sackungsmasse gebildet. Aufgrund dieser aufeinander liegenden, stetig gravitativ einsinkenden Gesteinsschollen prägen sich die Dehnungsstrukturen in der Kammregion immer weiter aus, sodass die aufgelockerte Sackungsmasse weitere Ablösestrukturen bildet.

An den am Kamm befindlichen Zerrungszonen entstehen hangparallele Mulden und abflusslose Senken. An der Hauptablösezone (Abb. 24) auf 2.090 m . A. kommt es neben spaltenartigem Ausstreichen der Bewegungsbahnen zu einer ausgeprägten Doppelgratbildung (Abb. 25). Die geschtzte Mächtigkeit beträgt im oberen Hangbereich etwa 50 m, im unteren Hangbereich nimmt diese deutlich zu.

Durch den Wechsel von gleitfähigen Schichten und starren Gesteinskomplexen kann es zu größeren Abgleitungen kommen (AMPFERER 1939). In diesem Fall wird vermutet, dass der sackende Gebirgskörper mit dem daraus resultierenden Talzus Schub und den Bergzerreißungen in der Dehnungszone durch eine zusammenhängende Gleitbahn in einer bestimmten Tiefe von der unbewegten Kernzone abgegrenzt wird. Im Hinblick auf die mechanische Deutung von Bergzerreißungen ändert ein beanspruchter Körper seine Form, sodass er einen Zustand erreicht, bei dem keine Beanspruchung auf ihn wirkt. So wird neben der Oberfläche mit den Bergzerreißungen ebenfalls das Gefüge im Inneren des beanspruchten Gesteinskomplexes verändert (SANDER 1948). Ebenso sind in der Sackungsmasse Dehnungsstrukturen vorhanden, woraus gefolgert werden kann, dass sich der Fuß der Sackungsmasse schneller hangabwärts bewegt als der obere Teil der Sackungsmasse. Dieses schnellere Gleiten an der Talsohle lässt sich durch das Abtragen und Nachrutschen der näher am Bach liegenden Sackungsmasse des Talzuschubs durch den Wildbach erklären.

### 4.3. InSAR-Datenauswertung des südlichen Dürnbachtales

Die Fernerkundungsmethode der satellitenbasierten Radarinterferometrie (InSAR) kann geringe Bodenbewegungen präzise (millimetergenau), skalierbar (von einzelnen Gebäuden bis zu großen Flächen) und über einen längeren Zeitraum feststellen (GEORESEARCH.Ac.At 2023). Durch das Messen der Laufzeit und der Phasenverschiebung elektromagnetischer Radarwellen der reflektierten Signale durch Sentinel-Satelliten werden Entfernungen zu Punkten auf der Erdoberfläche genauestens berechnet (SALZBURG.ORE.At 2023). Dadurch kann festgestellt werden, ob ein Punkt auf einem Hang abrutscht, sich hebt oder senkt. InSAR kann allerdings nur eine eindimensionale Verschiebung in der Sichtlinie des Satelliten erkennen. Somit ist mit einem einzelnen SAR-INTERFEROGRAMM nicht feststellbar, in welche Richtung die Bodenbewegung stattfindet (VLDB.GSI.Go.Jp 2023). Bei der Beobachtung der Punkte auf der Erdoberfläche kann zwischen dem Ascending Mode (aufsteigende Umlaufbahn) und Descen-



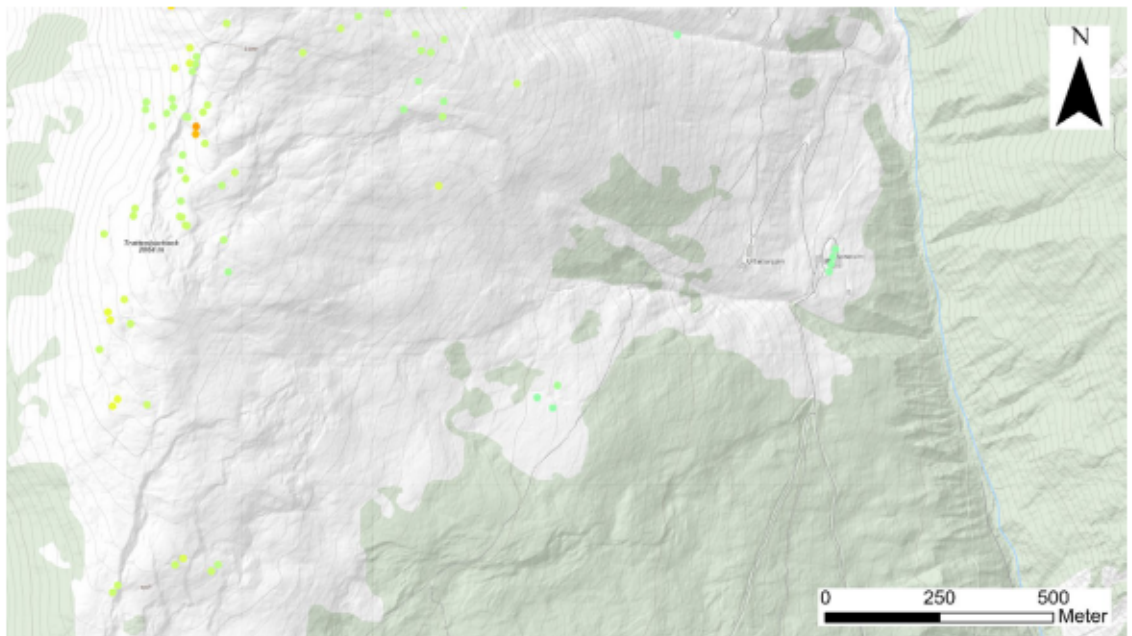
**Abb. 26:** Darstellung der Messpunkte des Ascending Modes im südlichen Dürnbachtal. Rote Punkte stellen eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 14 mm/a dar, gelbe Punkte eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 5 mm/a und grüne Punkte eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 0,5 mm/a (verändert nach salzburg.gv.at 2023).



ding Mode (absteigende Umlaufbahn) unterschieden werden. Durch die eindimensionale Verschiebung ist jedoch nicht festzustellen, ob die tatsächliche Verschiebung auf ein Absinken, eine horizontale Bewegung oder eine Mischung aus beidem zurückzuführen ist. Durch die Kombination von mehreren InSAR-Daten aus verschiedenen Richtungen (Ascending Mode und Descending Mode) und dem Vergleich mit GPS-MESSDATEN kann die exakte Bewegung ermittelt werden.

Bei Betrachtung des Ascending Modes sind Bewegungen in der Gratregion und in der Sackungsmasse nach Osten sichtbar. Diese Bewegungen werden durch farbige Punkte dargestellt (Abb. 26).

In der Gratregion sind vorwiegend grüne und gelbe Messpunkte vorzufinden, welche eine geringe Bewegung von bis zu 5 mm/a darstellen. Analysiert man orange bis rot gefärbte Messpunkte im gleichen Zeitraum in der Sackungsmasse, lässt sich feststellen, dass in diesem Gebiet die mittlere horizontale Geschwindigkeit der Messpunkte nach Osten bis zu 14,50 mm/a (SALZBURG.Gv.At 2023) beträgt, insofern muss das Gebiet aufgrund der hohen durchschnittlichen Geschwindigkeit weiter beobachtet werden. Die Bewegung des Gebirgskörpers nach Westen, die durch den Descending Mode dargestellt wird, kann vor allem in der Gratregion beobachtet werden. Es zeigt sich also, dass der Gebirgskörper, welcher in der Gratregion beim Trattenbacheck durch Bergzerreißungsstrukturen charakterisiert ist, sowohl nach Osten (Betrachtung des Ascending Modes) als auch nach Westen ab-



**Abb. 27:** Darstellung der Punkte des Descending Modes im südlichen Dürnbachtal. Orangene Punkte stellen eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 9 mm/a dar, gelb/grüne Punkte eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 4 mm/a und grüne Punkte eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 0,1 mm/a (verändert nach salzburg.gv.at 2023).

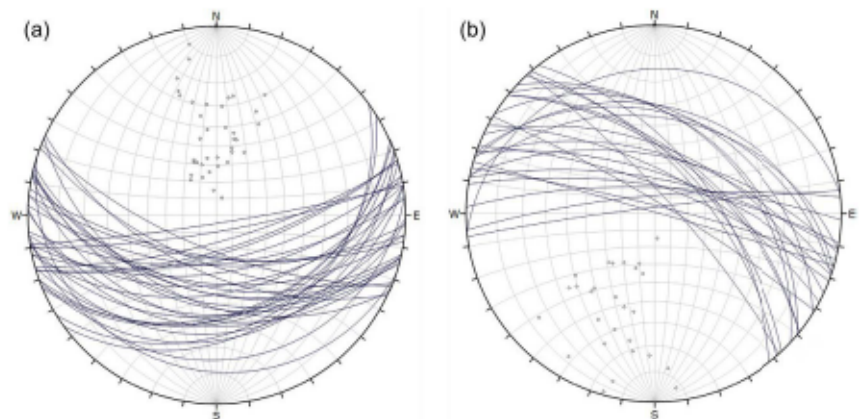
gleitet. In Abb. 27 ist erkennbar, dass die Geschwindigkeit der Bewegung in der Kammregion ca. 3,30 mm/a beträgt (SALZBURG.Gv.At 2023).

## 4.4. Gefügedaten

An insgesamt 83 Messpunkten wurden Schieferungs- und Klufflächen mit dem Gefügekompass eingemessen und die erhaltenen Messdaten ausgewertet. Die Gefügemesswerte sind dabei in Clar'scher Notation aufgeführt.

### 4.4.1. Schieferung und Faltung

Abb. 28 zeigt die Großkreisverteilung der Schieferungsflächen im nördlichen und südlichen Dürnbachtal. Es ist ersichtlich, dass die Haupteinfallrichtung der Schieferungsflächen im nördlichen Teil Süden ist, im südlichen Dürnbachtal ist die Haupteinfallrichtung wiederum Norden. Auch HEINISCH & PANWITZ (2016b) bestätigen ein Generalstreichen im Nordteil zwischen  $90^\circ$  und  $120^\circ$ , unabhängig davon, ob es sich um Steinkogelschiefer oder Quarzphyllit handelt. Weiter erwähnen sie ein Abkippen



**Abb. 28:** Großkreisverteilung der Schieferungsflächen im nördlichen Dürnbachtal (a) (Haupteinfallrichtung: S) und südlichen Dürnbachtal (b) (Haupteinfallrichtung: NNE).

der Gesamtfolge in der Mitte des Kartiergebietes nach Süden, wobei sich das flache bis subhorizontale Nordfallen des Südteils einstellt. Der Südteil streicht mit etwa  $100^\circ$ . Die genannten Streichrichtungen sind ebenfalls in den Großkreisdarstellungen der Schieferungsflächen ersichtlich (Abb. 28).

Aus den aufgenommenen Messwerten der Schieferungsflächen wurde ein Nord-Süd Profil (Abb. 29) entlang des Westhangs des Dürnbachtals nach der Grenzstrahlenmethode konstruiert. Die genaue Lage des Profils ist in der geologischen Karte (Abb. 2) einsehbar. Erkennbar ist die schüsselförmige Lage des Steinkogelschieferkomplexes auf den Innsbrucker Quarzphylliten, wodurch eine Synkinalstruktur gebildet wird.

Profil CC': 175°

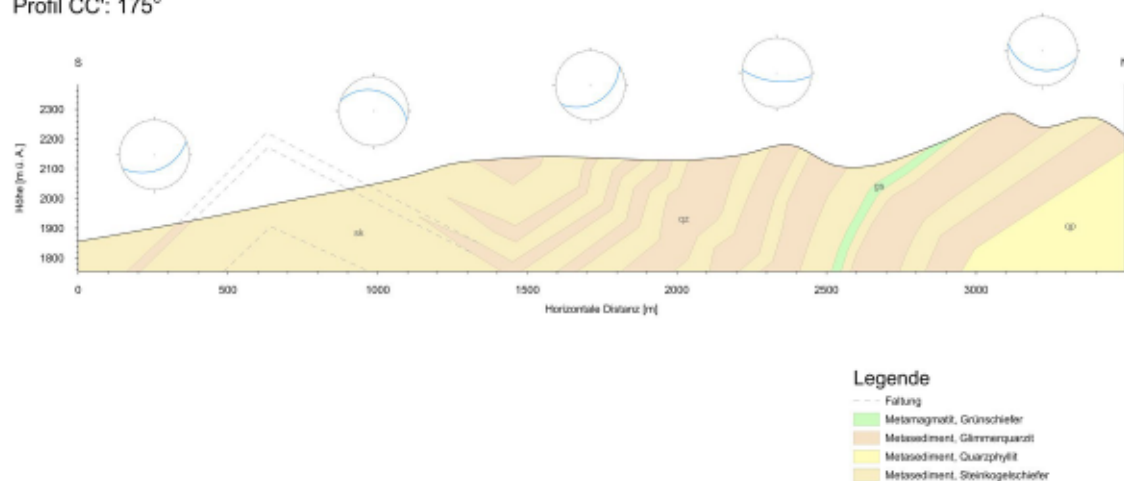


Abb. 29: Geologisches Nord-Süd Profil CC': 175°.

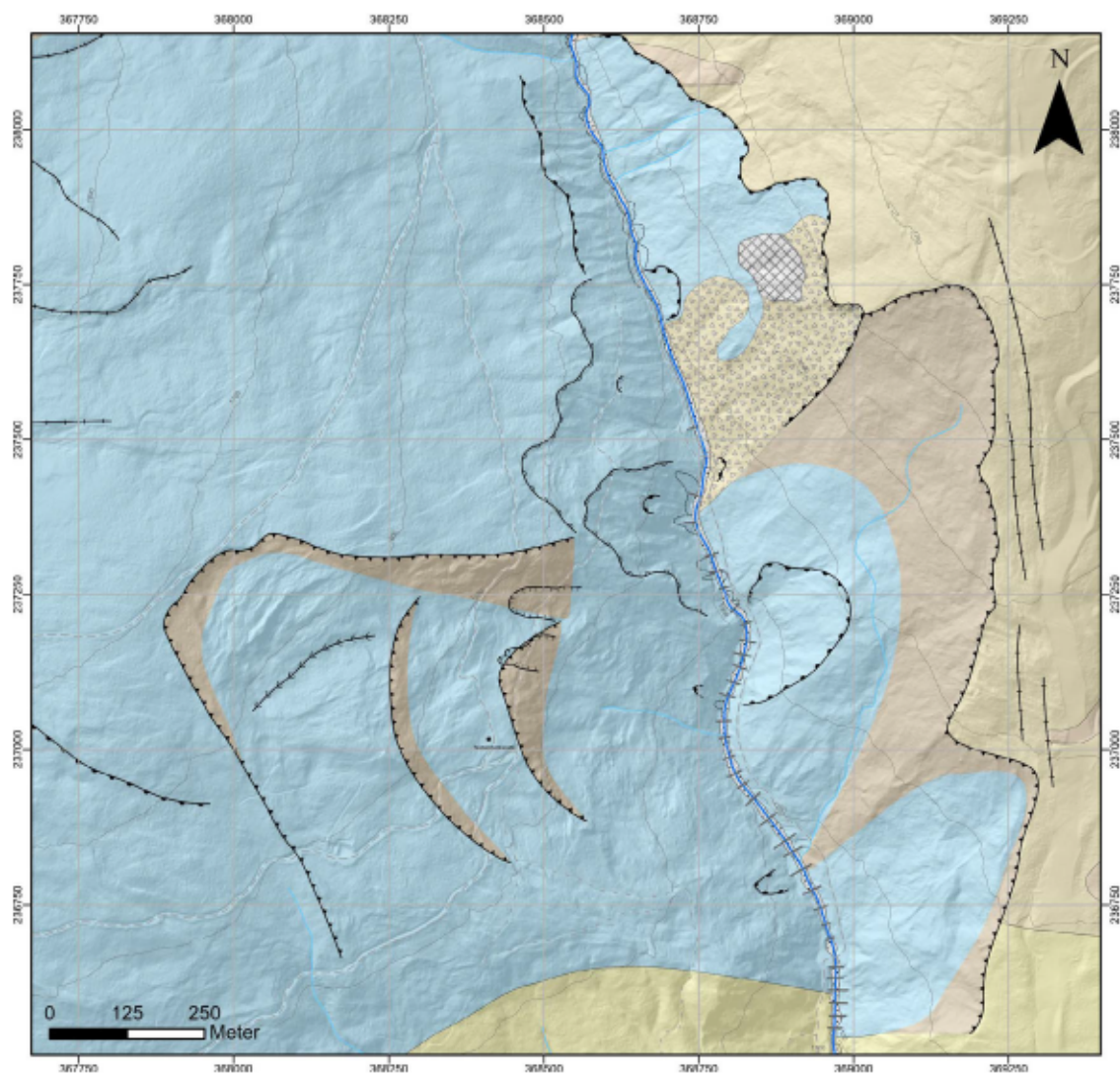
#### 4.4.2. Klüftung

Aus den aufgenommenen Klüftmessungen wurden für jeden Aufschluss die Hauptstreichrichtungen ermittelt und diese dann in eine Klüftrose für das nördliche und das südliche Dürnbachtal aufgetragen. In den meisten aufgenommenen Aufschlüssen sind zwei Klüftscharen festzustellen. Im gesamten Dürnbachtal stehen die Klüftflächen ziemlich steil (Einfallswinkel 70-90°). Im nördlichen Teil streichen die Klüfte NNE-SSW und E-W, im südlichen Teil bevorzugt NNW-SSE und E-W. Der Winkel zwischen den Klüftflächen beider Klüftflächenscharen beträgt durchschnittlich 50-70° bzw. 110-130°, oft stehen die Streichrichtungen im rechten Winkel zueinander.

Neben den vorhandenen Schieferungsflächen spielen auch Klüftflächen eine wesentliche Rolle bezüglich des Zerfalls des Gebirges in einzelne Gesteinsstücke (SUCHAN 2000; FÜRLINGER et al. 1988). Die Klüftflächen einer Klüftschar treten hauptsächlich mit Abständen im dm- bis m-Bereich auf. Allgemein kann festgestellt werden, dass die Klüftung in den kompetenteren Steinkogelschiefern deutlicher, als in dem weniger kompetenten Innsbrucker Quarzphyllit ausgeprägt ist. Diese Erkenntnis wird durch SUCHAN (2000) bestätigt. Weiter weisen die Klüfte im Innsbrucker Quarzphyllit unterschiedliche Abstände auf, wobei sich die räumliche Erstreckung nicht weit fortzieht. Dadurch kommt es zur Ausbildung unterschiedlicher Klüftkörperformen und Klüftkörpergrößen. Die Schieferungsebene sowie die zwei Klüftscharen bilden ein orthogonal stehendes Trennflächengefüge, durch welches die Gesteine zerfallen und Hangschutt gebildet wird.

Die vorliegenden Schieferungs- und Klüftflächen im Kartiergebiet begünstigen eine zunehmende mechanische Zerschering der Talzuschubkörper. Besonders die NNE-SSW streichenden Klüfte im nördlichen Dürnbachtal

sowie die NNW-SSE streichenden Klüfte im südlichen Dürnbachtal tragen wesentlich zur fortschreitenden Bewegung der Talzuschübe sowohl in das Dürnbach- als auch in das im Westen gelegene Trattenbachtal bei. Diese Bewegungen verstärken sich in Kombination mit den durch ehemalige Gletscher vertieften Tälern und der damit einhergehenden Übersteilung des Hangfußes, welche zur Instabilität des bachnahen Bereichs der tiefgreifenden Hangbewegung führen.



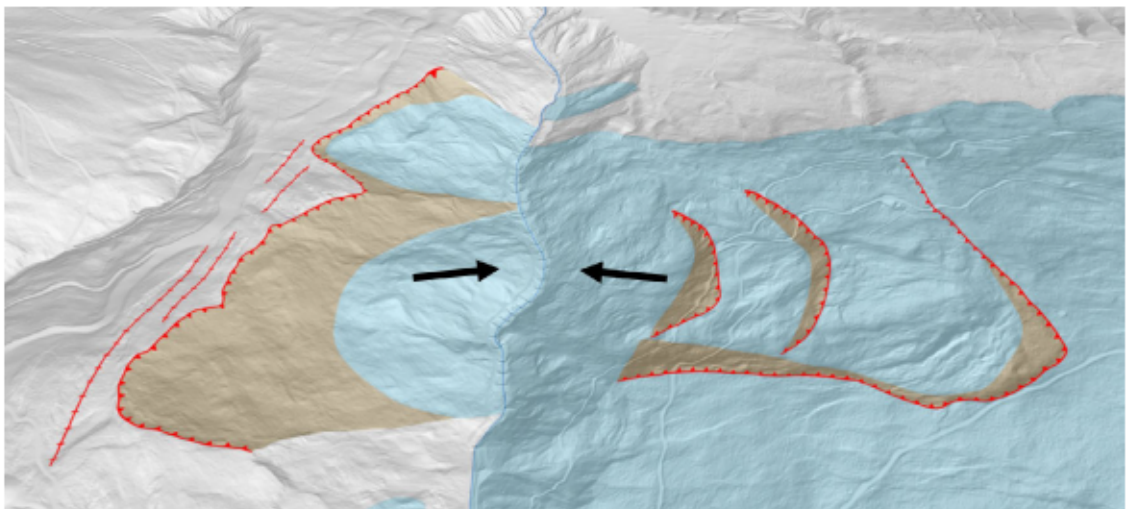
**Abb. 30:** Geotechnisch kartierte Talzuschubssysteme am Dürnbach.

## 4.5. Talzuschubssysteme am Dürnbach

Die in diesem Kapitel beschriebenen Talzuschübe sind durch den Rückgang der Gletscher nach dem Ende der letzten Vereisungsphase vor ca. 10.000 Jahren und der damit einhergehenden Hangversteilung und Entlastung der Talflanken durch Abschmelzen des Eises entstanden (BUNZA et al. 1976). Sie können der geotechnischen Karte (Abb. 30) entnommen werden. Die ehemalige Vergletscherung wird durch die Abdeckung der Talzuschubsmasse durch Moränenstreu deutlich.

Als Strukturen wurden sowohl an der orographisch linken Talflanke, als auch am orographisch rechten Hang des Dürnbachs Talzuschübe kartiert, die beide eine Bewegung auf den Dürnbach aufweisen (Abb. 31).

Aufgrund der enormen Gebirgsdrücke der talwärts kriechenden Felsmassen führen diese aufgelockerten Talzuschubsmassen zu einer erhöhten Produktion von Jungschuttmassen, die den Wildbach mit großen Mengen an Geschiebematerial beliefern (EISENBARTH et al. 2004). Durch Starkniederschlagsereignisse können sich aus diesen kriechenden aufgelockerten Felsmassen Muren entwickeln. Der Talzuschub erstreckt sich am Dürnbach von 1.140 m ü. A. bis auf 1.340 m ü. A. Dabei ist die Sackungsmasse durch interne Sackungen in verschiedene Zonen zerlegt worden, die durch Steilstufen voneinander separiert sind. Oberhalb der Hauptabbrisskante auf einer Höhe von 1.630 m ü. A. sind Bergzerreißungsstrukturen zu erkennen, die eine Länge von bis zu 540 m annehmen und senkrecht zum Hang auf Höhe des Grates verlaufen. Der Talzuschub erstreckt sich am Dürnbach



**Abb. 31:** Talzuschübe am orographisch rechten und linken Hang (mit Bewegungsrichtungen) des Dürnbachs. Blaue Flächen stellen die Talzuschubsmasse dar, braune Flächen die Scherbahnen unterhalb der Abrisskanten (rot). Blickrichtung: S, 3D Darstellung mittels Hillshade.

von 1.100 m ü. A. auf 1.330 m ü. A. In der von 1.710 m ü. A. auf 1.390 m ü. A. abgeglittenen Talzuschubsmasse hat sich zudem ein Translationserdrutsch an der Dürnbachsohle ereignet.

#### 4.5.1. »Hohe Blaike«

Die »Hohe Blaike« (Abb. 32) ist ein über 200 m hoher Uferanbruch am orographisch linken Hang des Dürnbachs mit einer durchschnittlichen Hangneigung von 37°. An dieser stark geneigten Gleitfläche der Translationsrutschung steht zerrütteter Fels an.

Das Wechselspiel zwischen Talzuschub und Wildbacherosion und der dadurch entstandene kaskadierende Effekt der Aktivierung der dem Talzuschub gegenüberliegenden Hänge wird vor allem bei Uferanbrüchen wie der »Hohen Blaike« deutlich.

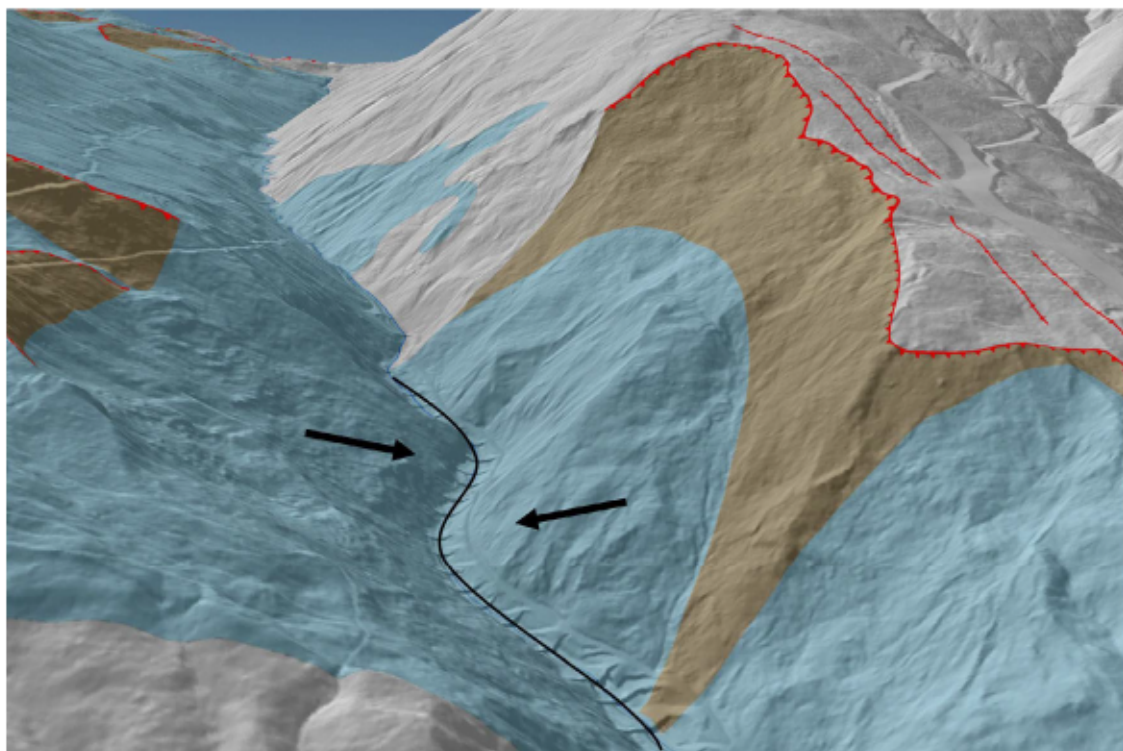
Im November 1973 ereignete sich ein Felssturz, bei dem rund 60.000 m<sup>3</sup> Felsgestein der »Hohen Blaike« mobilisiert wurden. Die »Hohe Blaike« erstreckt sich am Dürnbach von 1.350 m ü. A. auf 1.390 m ü. A. Der Großteil der »Hohen Blaike« ist mit Hangschutt bedeckt, wobei ein bewaldeter Felsverband auf 1.570 m ü. A. abgeglitten ist (FÜRLINGER et al. 1988). Der Fußbereich der »Hohen Blaike« wurde mit Steinen verbaut, welche den Hangfuß vor der Erosion durch den Wildbach schützen sollen.



**Abb. 32:** Die »Hohe Blaike«. Blickrichtung: Ne, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 368485,34 237465,91 (Drohnenaufnahme).

### 4.5.2. Bewegungsablauf der Talzuschübe

Betrachtet man den Bewegungsablauf der Talzuschübe am Dürnbach, so unterschneidet der Talzuschub den Gegenhang, wobei diese Bewegung das Gleichgewicht des Gegenhangs stört und dieser somit aktiviert wird. Aufgrund dieses Wechselspiels kommt es zu zwei gegenüberliegenden Talzuschüben, deren Hänge gegeneinander ankämpfen und so durch den Gebirgsdruck einen laufenden Geschiebelieferanten des Wildbachs darstellen (FÜRLINGER et al. 1988). Durch die daraus entstehenden Anbrüche, die sich über die gesamte Talflanke ausbreiten, kann der Dürnbach jederzeit mit Geschiebe überlastet werden. Ein Musterbeispiel eines solchen kaskadierenden Effekts ist die eben beschriebene »Hohe Blaike«. Als Folge der sich in das Tal bewegend Talzuschubmassen ist ein Versatz des Bachverlaufs nach Westen durch den orographisch linken Talzuschub sowie ein Versatz des Bachverlaufs nach Osten durch den orographisch rechten Talzuschub festzustellen. Diese sind vor allem zwischen 1.280 m ü. A. und 1.170 m ü. A. (Abb. 33) zu erkennen.



**Abb. 33:** Verlegung des Bachverlaufs (Pfeile) durch die Talzuschubmassen nach Westen und Osten. Blickrichtung: NE, 3D Darstellung mittels Hillshade.



**Abb. 34:** Durch Gebirgsdrücke der Talzuschübe entstandene Risse (Pfeil) bei Sperre 42. Blickrichtung: N, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 368829,38 237173,9.

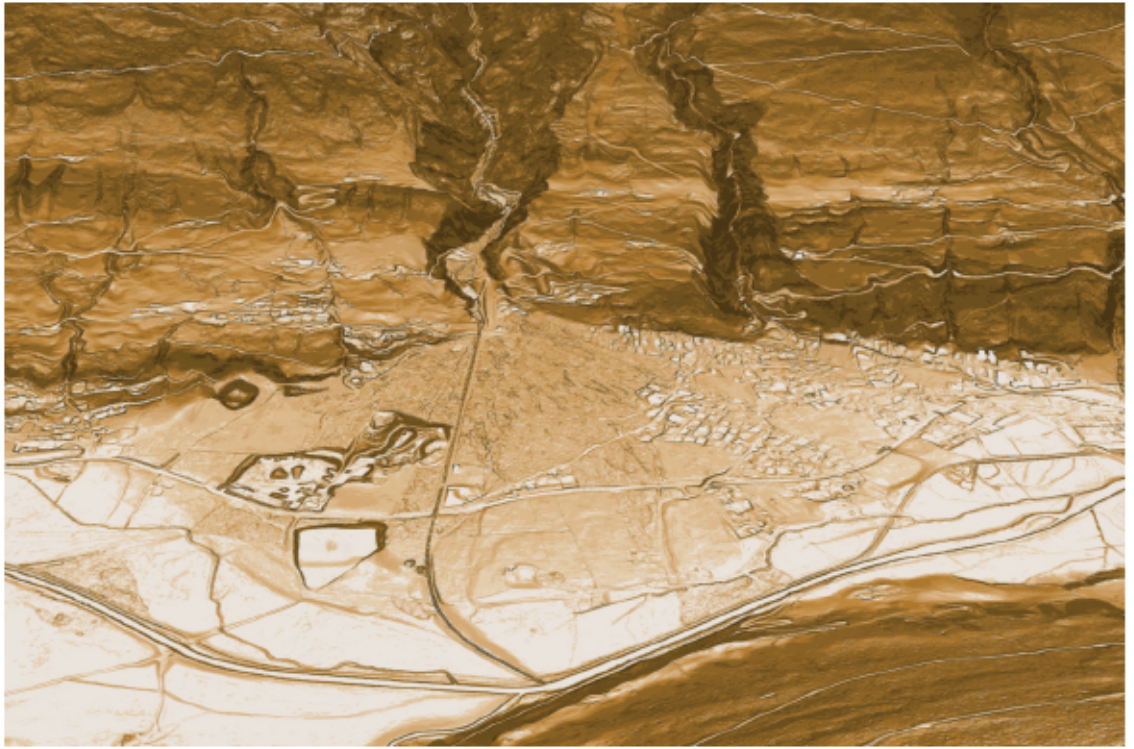
Die Bewegungsrate wird auf 5-10 cm/a geschätzt (HEINISCH & PANWITZ 2016b). Bei der von SUCHAN (2000) ermittelten Einengungsrate, die durch Konvergenzmesstrecken an den Wildbachsperrern festgestellt wurde, kommt es zu einer Verringerung des Grabenquerschnitts und somit zu einer Beeinträchtigung der Verbauungen am Dürnbach. Weiter konnten EISENBARTH et al. (2004) eine Verringerung des Bachquerschnitts im verbauten Unterlauf des Dürnbachs von 1,4 m in den letzten 20 Jahren durch Konvergenzmesstrecken bestimmen. Durch diese Beeinträchtigung kommt es zur Rissbildung in den Verbauungen, manche sind bereits vollkommen zerstört (Abb. 34). Die Muraktivitäten und der damit einhergehende Geschiebetransport begünstigen die Zerstörung der bereits durch die Gebirgsdrücke beeinträchtigten Verbauungen.

Da die Verbauungen sowohl am Fuß des orographisch rechten, als auch linken Talzschubs gleichermaßen Schäden aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass beide Talzuschübe eine ähnliche Aktivität aufweisen.

## 5. Wildbachsystem Dürnbach

Nach FÜRLINGER et al. (1988) handelt es sich beim Dürnbach um einen der gefährlichsten Wildbäche des oberen Salzachtals. Er besitzt eine Länge von fast 8 km und verläuft annähernd in Nord-Süd-Richtung. Das 9 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet des Wildbachs, welches im Norden durch die Geige (2.084 m ü. A.), im Westen durch den Steinkogel (2.299 m ü. A.) und im





**Abb. 35:** Schwemmkegel des Dürnbachs im Salzachtal. Blickrichtung: N, 3D Darstellung mittels Hillshade.

Osten durch den Frühmesser (2.233 m ü. A.) begrenzt ist, entwässert im Süden in die Salzach. Beim Übergang des Dürnbachs in das Salzachtal ist aufgrund der Abflachung ein etwa 1,8 km<sup>2</sup> großer Schwemmkegel mit einer Neigung von 5° entstanden (Abb. 35). Durch diesen großen Schwemmkegel ist es möglich, die Menge des abgetragenen Geschiebes durch Murereignisse im Laufe der Jahrhunderte abzuschätzen.

Rund zwei Drittel des Einzugsgebiets bilden einen hochgelegenen, auf 8% Gefälle verflachenden Talkessel. Das untere Drittel ist bis zu 27% steiler, wodurch die Wildbacherosion deutlich ausgeprägter ist. Folglich bildete der Dürnbach in diesem unteren Bereich einen tiefen Einschnitt aus. Zudem gibt es Auffälligkeiten bezüglich der Asymmetrie des Talquerschnitts. Der orographisch linke Hang ist mit etwa 55-65% steiler geneigt als die rechte Flanke mit 33-55% (FÜRLINGER et al. 1988). Der Verlauf des Dürnbachs von der Sanglbrücke bis zur Mündung in die Salzach wurde auf einer Länge von knapp 1,4 km in ein gemauertes Gerinne eingefasst.

## 5.1. Verbauungsmaßnahmen

Die ersten Sperren wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Jahr 1913 von der Wildbach- und Lawinerverbauung (die.wildbach) zum Schutz des



**Abb. 36:** Murbrecher mit dahinter liegendem Geschieberückhaltebecken. Blickrichtung: N, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 369088,86 236226,94.

Ortes Neukirchen am Großvenediger errichtet. Sie wurden laufend saniert bzw. neu gebaut, sodass heute 47 intakte Wildbachsperrren Geschiebemaaterial im Dürnbach aufhalten. Drei weitere Sperrren sind zerstört. Zudem wurden zwei großräumige Geschieberückhaltebecken angelegt, um den Bach vor allem bei Starkniederschlagsereignissen zu regulieren. In diesen großangelegten Geschieberückhaltebecken wird das meiste Material bei einem Murereignis abgelagert.

Bis heute belaufen sich die Gesamtkosten für die Sanierung bzw. für den Neubau der Sperrren auf rund 10,5 Mio. Euro. Seit 2005 betragen die Kosten 7,5 Mio. Euro (DIE.WILDBACH 2021). Die Verbauungen dienen nicht nur der Verhinderung von Tiefen- und Seitenerosion, sie tragen auch zur Anhebung des Bachbetts durch die Geschieberückhaltung bei. Das Bachbett soll dabei so angehoben werden, dass sich die Hänge allmählich natürlich abböschern können (STRELE 1950). Bei weiterer Analyse des Wildbachs ist auffallend, dass die Geschiebeführung des Dürnbachs weniger aus Altschutt besteht, sondern mehr aus Geschiebelieferungen von Uferabhängen, welche beidseitig von Hangbewegungen erfasst sind. Somit bedingt der Wildbach eine rückschreitende Erosion im Arbeitsgebiet. Infolge des zweiseitigen Talzuschubs herrscht Gebirgsdruck, der sich an den Geschiebesperrren auswirkt. Durch die Lage der Geschiebeherde in Talzuschüben stellen sich sowohl Sanierungen von Geländebrüchen als auch die Konstruktion von Wildbachsperrren oft als herausfordernd dar (FÜRLINGER et al. 1988). Der Bauzustand der Sperrren wird laufend von der Wildbach- und Lawinenverbauung kontrolliert und festgehalten, da sich die Sperrren deutlich in ihrem Bauzustand unterscheiden. Um Schäden

an den Sperren zu vermeiden, wird grundsätzlich versucht, den zum Teil erheblichen Gebirgsdrücken auszuweichen und ausreichend feste oder nachgebende, deformierbare Sperren zu errichten.

Bei der Verbauung des Dürnbachs wurden unterschiedliche Arten von Sperren errichtet. Gemauerte Sperren aus Natursteinen weisen bereits Scherisse durch den seitlichen Gebirgsdruck auf. Wie auch bei den gemauerten Sperren kommt es bei den Stahlbetonsperren bereits zu derartigen Schäden. Die gegliederten Stahlbetonsperren sowie die Korbreihensperren bieten mehr Sicherheit trotz großer Beanspruchung durch das Geschiebematerial und die beidseitigen Gebirgsdrücke. Zwei Wildbachsperren sind Murbrecher (Abb. 36) und befinden sich beide an den Enden der zwei großangelegten Geschieberückhaltebecken. Die Murbrecher samt der großangelegten Geschieberückhaltebecken werden bewirtschaftet, wohingegen die Sperren im weiter oben gelegenen Abschnitt nicht bewirtschaftet werden, da diese aufsedimentiert werden sollen.

## 5.2. Murgang durch Starkniederschlag am 28.07.2022

Am 28.07.2022 ereignete sich gegen 21:00 Uhr ein Starkniederschlagsereignis, welches seine Intensität vor allem im hinteren Dürnbachtal hatte. Es wird angenommen, dass dieses Ereignis eine Mindestintensität von über  $100 \text{ l/m}^2$  haben musste, was eine hohe Wasserführung des Dürnbachs begünstigt hat (MOSER 2013). Exakte Niederschlagsangaben sind aufgrund fehlender Niederschlagsmesser in der Region nicht möglich. Durch hohe Niederschlagsmengen und der draus resultierenden hohen Wasserführung bildete das neu mobilisierte Material der Uferhänge größere Geschiebestöße, die zu einem voluminösen Murstrom führten.

### 5.2.1. Folgen des Murereignisses

Das neu mobilisierte und in den Rückhaltebecken der Wildbachverbauungen abgelagerte Geschiebe des Murereignisses wurde innerhalb von zwei Wochen weitestgehend ausgehoben. Dabei wurde nach Aussagen von Richard Schopper, Obmann des Dürnbachs, insgesamt etwa  $10.000 \text{ m}^3$  Geschiebe ausgebaggert und abtransportiert. Die größte Intensität hatte das Niederschlagsereignis im hinteren Dürnbachtal. Hierbei wurde teilweise das komplette Bachbett im Oberlauf zwischen Steiner Alm (1.600 m ü. A.) und Steiner Hinteralm (1.720 m ü. A.) bis zu 3 m überflutet, was durch überflutete Wiesen nahe des Bachbettes bestätigt wurde. Weiter wurden im Oberlauf sonst trockene Quellen aktiviert, die wiederum durch den schlagartig hohen Wassereintrag Uferanbrüche auslösten. Durch den Starkniederschlag und den Anstieg des Wasserspiegels im Dürnbach entstanden insgesamt 51 neue Uferanbrüche (Abb. 37). Diese sind vom Pumpwerk auf



**Abb. 37:** Durch das Starkniederschlagsereignis verursachter Uferanbruch Nr. 17. Blickrichtung: Se, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 368564,29 238178,77.

1.230 m ü. A. bis zum unteren großangelegten Geschieberückhaltebecken bei 960 m ü. A. erodiert. Für diese 51 Uferanbrüche wurden jeweils die Maße dokumentiert. Als Ergebnis konnte ein gesamtes neu mobilisiertes Geschiebevolumen von ca. 16.000 m<sup>3</sup> ermittelt werden, welches hauptsächlich in den Rückhaltebecken der Sperren abgelagert wurde.

Weiter konnten vermehrt kleinere Murgänge an Zubringern des Wildbachs in der Sackungsmasse des Talzuschubs zum Dürnbach hin sowie an Forstwegen kartiert werden. Diese entstehen durch Übersättigung des Oberbodens mit Niederschlagswasser. Kleine Murgänge stellen allerdings keinen hohen Eintrag an Geschiebe bereit, sie können aber dennoch die Infrastruktur erheblich beeinträchtigen. Durch die neu entstandenen Uferanbrüche wurden des Weiteren zahlreiche Bäume entwurzelt und durch den Murgang flussabwärts mitgerissen. Insgesamt kam es zum Abtransport von 50 Fuhren Schwemmholz. Zudem kann festgehalten werden, dass eine Wildbachsperre durch den Murgang komplett zerstört wurde.

Eine weitere Folge des Starkniederschlagsereignisses betrifft den Weg, der auf Höhe der »Hohen Blaike« am Wildbach entlangführt. Dieser wurde fast gänzlich wegerodiert. Darüber hinaus wurden zwei Holz-Stein-Kastensperren durch das Geschiebematerial des Murgangs überlagert.

Als weitere Auswirkung des Starkniederschlags ist die Ablagerung des Geschiebes aufzuführen. In den Sperrenrückhaltebecken wurde diesbezüglich teils über 3 m Geschiebesediment abgelagert (Abb. 38).

Zudem ist festzustellen, dass im oberen Bereich des Dürnbachs zwischen »Hoher Blaike« und Pumpwerk mehr Uferanbrüche entstanden sind, als



**Abb. 38:** Sperren 24, 25 und 26 am 25.07.2022 und nach dem Starkniederschlagsereignis am 29.07.2022. Blickrichtung N, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 368967,56 236674,73.

im verbauten Bereich ab der »Hohen Blaike« flussabwärts bis zum unteren Geschieberückhaltebecken.

### 5.2.2. Ursachen der Bereitstellung des Materialvolumens

Für die Bilanzierung des bereitgestellten Geschiebes durch die 51 Uferanbrüche wurden zunächst die Ursachen für die Bereitstellung des Mate-

rialvolumens untersucht. Dafür wurde die Strecke des Dürnbachs, an der die neuen Uferanbrüche entstanden sind, in drei Abschnitte eingeteilt.

Der erste Abschnitt wurde etwa 50 m nördlich des Pumpwerks (1.620 m ü. A.) bis Höhe Steiner Alm auf 1.600 m ü. A. definiert. Der zweite Abschnitt liegt zwischen Steiner Alm und »Hoher Blaike« auf 1.370 m ü. A. und für den dritten Abschnitt wurde die Strecke von der »Hohen Blaike« bis zur Sanglbrücke (940 m ü. A.) festgelegt. Die drei Abschnitte unterscheiden sich in den Kriterien Niederschlagsintensität, Bachbettbeschaffenheit, Neigung der Uferhänge und Neigung des Bachverlaufes.

### 5.2.3. Bilanzierung des Materialvolumens

Für die Bilanzierung der bereitgestellten Materialvolumina der Uferanbrüche wurden zunächst die Abtragungsraten der einzelnen Uferanbrüche abgeschätzt. Anschließend wurde davon eine Geschiebemenge von etwa 16.000 m<sup>3</sup> ermittelt. In der Aufstellung wird ersichtlich, dass die prozentuale Verteilung der Anzahl an Uferanbrüchen in Abschnitt 2 am größten ist (Tab. 1).

Bei weiterführender Aufstellung der Geschiebevolumina [m<sup>3</sup>] der einzelnen Abschnitte in Tab. 2 wird deutlich, dass 61% des Gesamtgeschiebevolumens in Abschnitt 2 abgetragen wurde, obwohl der prozentuale Anteil der Anzahl an Uferanbrüchen in diesem Abschnitt nur 47% (Tab. 1) beträgt. Infolgedessen nehmen die Anteile am Gesamtgeschiebevolumen der Abschnitte 1 und 3 in Bezug auf die prozentuale Verteilung der Anzahl an Uferanbrüchen für diese Abschnitte ab.

Dass in Abschnitt 2 das größte Geschiebevolumen abgetragen wurde, kann durch die vorbereitenden Faktoren des starken Talzuschubs und der Zerschering des Talzuschubskörpers in diesem Bereich begründet werden. Durch eine derartig hohe Aktivität kommt es zu einem Eindringen der Talzuschubsmasse in das Einzugsgebiet des Wildbachs. Somit kommt es zu einer enormen Übersteilung des Hangfußes am Wildbach wobei die Talzuschubsmasse Druck auf den Gegenhang ausübt und diesen unter-

Abschnitt	Uferanbruch	Prozentuale Verteilung der Uferanbrüche auf die Abschnitte (gerundet) [%]
1	1-11	22
2	12-35	47
3	36-51	31
		100

**Tabelle 1:** Prozentuale Verteilung der Uferanbrüche in den drei Abschnitten.

Uferanbruch	Geschiebevolumen [m <sup>3</sup> ]	Anteil am Gesamt- geschiebevolumen (gerundet) [%]
1-11	2.240	14
12-35	9.833	61
36-51	3.991	25
	16.064	100

**Tabelle 2:** Geschiebevolumen [m<sup>3</sup>] der Abschnitte und prozentualer Anteil dieser am Gesamtgeschiebevolumen.

schneidet. Der Hangfuß wird durch den auslösenden Faktor des Starkniederschlages wegerodiert (Abb. 39).

Wie in Kapitel 5.2.1 bereits erwähnt, wurden nach dem Murereignis etwa 10.000 m<sup>3</sup> Geschiebe aus dem Bach ausgebaggert. Das Material wurde größtenteils aus den großangelegten Geschieberückhaltebecken bei 960 m ü. A. und 1.050 m ü. A. ausgehoben. Schätzungsweise waren das 3.000 m<sup>3</sup> und 4.000 m<sup>3</sup> Geschiebematerial. Weiter wurden viele kleine Geschieberückhaltebecken direkt hinter den Sperren ausgehoben und dabei teilweise Volumina von 500 m<sup>3</sup> entfernt. Zusammenfassend korreliert die ausgehobene Menge des Geschiebes nur bedingt mit dem geschätzten Gesamtvolumen des bereitgestellten Geschiebes der Uferanbrüche, da nicht das komplette Geschiebe abtransportiert wurde, welches während des Ereignisses am 28.07.2022 mobilisiert und abgelagert wurde. Es ist festzuhalten, dass insbesondere die großangelegten Geschieberückhaltebecken ausgebaggert wurden.



**Abb. 39:** Uferanbruch durch Erosion des übersteilten Hangfußes der Talzuschubsmasse. Blickrichtung: W, Koordinaten (Standort Bildaufnahme): 368776,48 237287,63.

FÜRLINGER et al. (1988) erwähnten, dass in den Jahren von 1970-1985 ca. 70.000 m<sup>3</sup> Geschiebefracht in den Dürnbach gelangten, von denen etwa 26.000 m<sup>3</sup> abtransportiert wurden. Des Weiteren prognostizierten sie einen jährlichen Gebirgsabtrag von 486 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, also knapp 4.400 m<sup>3</sup> im gesamten Einzugsgebiet. Vergleicht man diesen Wert nun mit der Geschiebefracht nach dem betrachteten Starkregenereignis, also den 16.064 m<sup>3</sup>, so entspricht dieses 2-stündige Ereignis dem 4-fachen der prognostizierten jährlichen Geschiebemenge. Hauptgrund dafür sind vor allem die in ihrer Intensität immer stärker werdenden Niederschlagsereignisse, welche eine immense Geschiebefracht im Bach mobilisieren und transportieren. Das durch DIE.WILDBACH (2021) geschätzte aktuelle Geschiebepotential des Dürnbachtals beträgt etwa 86.000 m<sup>3</sup>.

## 6. Literaturverzeichnis

- AMPFERER, O. (1939): Über einige Formen der Bergzerreißung. – In: Sitzungsber. Akad. Wiss., Band 148, S. 1-14, Wien.
- BUNZA, K., KARL, J. & MANGELSDORF, J. (1976): Geologisch-morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. – In: Schriftenreihe Bayer. L.A. Wasserwirtschaft, S. 1-128, München.
- CROSTA, G.B., FRATTINI, P. & AGLIARDI, F. (2013): Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. – In: Tectonophysics, Band 605, S. 13-33, Amsterdam.
- DIE.WILDBACH (2021): Dürnbach 2021 - Gemeinde Neukirchen am Großvenediger, Jahreshauptversammlung 2021, Wildbach- und Lawinenverbauung Forsttechnischer Dienst, Zell am See.
- DIKAU, R., BRUNSDEN, D., SCHROTT, L. & IBSEN, M. (1996): Landslide Recognition-Identification, Movement and Causes. – 1. Auflage, 251 S., John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- DOLCE, S., FORNO, M.G., GATTIGLIO, M. & GIANOTTI, F. (2024): The Lac Fallere Area as an Example of the Interplay between Deep-Seated Gravitational Slope Deformation and Glacial Shaping (Aosta Valley, Nw Italy). – In: Preprints.org, <https://www.preprints.org/manuscript/202401.0037/v1> (06.01.2024).
- EISENBARTH, S., MOSER, M. & WEIDNER, S. (2004): Zur Nachhaltigkeit von Baumaßnahmen bei tiefgreifenden Hangbewegungen im alpinen Raum. – In: Interprävent 2004-Riva/Trient, S. 115-126, Riva del Garda.
- FRANK, S. & GRAF, H.R. (2009): Beurteilung der glazialen Tiefenerosion im Rahmen der Festlegung der geologischen Standortgebiete. – Hrsg: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 24 S., Brugg.
- FÜRLINGER, W., KRONFELLNER-KRAUS, G., RUF, G., SCHAFFHAUSER, H. & NOBILIS, F. (1988): Über die Einschätzung von Wildbächen: Der Dürnbach. – In: Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Band 161, 259 S., Wien.
- GEORESEARCH (2023): InSAR Competence Center - Satellitenbasierte Detektion von Bodenbewegungen. <https://www.georesearch.ac.at/de/bereiche/insar-competence-center/insar-competence-center> (09.01.2023).
- GEOSPATIAL INFORMATION AUTHORITY OF JAPAN (2023): Monitoring the Earth Deformation from Space. <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/qanda/qanda-e.html> (09.01.2023).
- GEOSPHERE AUSTRIA - BUNDESANSTALT FÜR GEOLOGIE, GEOPHYSIK, KLIMATOLOGIE UND METEOROLOGIE (2022): Manuskriptkarte Blatt Gk50 121 Neukirchen am Großvenediger, Wien.



- HEINISCH, H. & PANWITZ, C. (2016b): Bericht 2015 über geologische Aufnahmen im Innsbrucker Quarzphyllit auf Blatt 121 Neukirchen am Großvenediger. – In: Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Band 156, S. 262-267, Wien.
- HUTCHINSON, J.N. (1988): General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. Landslides, Band 1, S. 3-35, Rotterdam (Balkema).
- LAATSCH, W. & GROTTENTHALER, W. (1972): Typen der Massenverlagerung in den Alpen und ihre Klassifikation. – In: Forstw. Cbl., Band 91, S. 309-339, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- MENCL, V. (1968): Plastizitätslehre und das wirkliche Verhalten von Gebirgsmassen. – In: Felsmech. und Ing. Geologie, Band 4, S. 1-8, Springer Verlag, Wien.
- MOSER, M. (2013): Der Motor der Hangbewegungen: »Geklärtes & Ungeklärtes«. – In: 19. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen, S. 13-21, München.
- MOSER, M., AMANN, F., MEIER, J. & WEIDNER, S. (2017): Tiefgreifende Hangdeformationen der Alpen. – 1. Auflage, 290 S., Springer Spektrum, Berlin.
- ÖSTERREICHISCHER RUNDFUNK (2023): Hangrutschungen: Extrem genau Analyse mit Satelliten. <https://salzburg.orf.at/stories/3102482/> (09.01.2023).
- ROCKENSCHAUB, M., KOLENPRAT, B. & NOWOTNY, A. (2003): Innsbrucker Quarzphyllitkomplex, Tarntaler Mesozoikum, Patscherkofelkristallin. – In: »Brenner«: Arbeitstagung 2003, Trins im Gschnitztal, 1. –5. September 2003: Geologische Kartenblätter 1:50.000, 148 Brenner, 175 Sterzing, S. 41-58, Wien.
- SAGIS-SALZBURGER GEOGRAPHISCHES INFORMATIONSSYSTEM (2022): SAGISONLINE. <https://www.salzburg.gv.at/sagismobile/sagisonline/map/Agrar%20und%20Wald/Boden> (11.12.2022).
- SANDER, B. (1948): Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. – 1. Auflage, 215 S., Springer Verlag, Wien.
- SAROLI, M., ALBANO, M., ATZORI, S., MORO, M., TOLOMEI, C., BIGNAMI, C. & STRAMONDO, S. (2021): Analysis of a large seismically induced mass movement after the December 2018 Etna volcano (southern Italy) seismic swarm. – In: Remote Sensing of Environment, EGU General Assembly 2021, online, 19-30 Apr 2021, EGU21-942.
- SAVAGE, W.Z. & VARNES, D.J. (1987): Mechanics of gravitational spreading of steep-sided ridges (»sacking«). – In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Band 35, S. 31-36, Berlin.
- STINY, J. (1910): Die Muren - Versuch einer Monographie mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in den Tiroler Alpen. – Wagnersche Universitätsbuchhandlung, Innsbruck.
- STINY, J. (1941): Unsere Täler wachsen zu. – In: Geol. u. Bauwesen, Band 13, S. 71-79.
- STINY, J. (1942): Nochmal der »Talzuschub«. – In: Geol. u. Bauwesen, Band 14, S. 10-14.
- STRELE, G. (1950): Grundriß der Wildbach- und Lawinenverbauung. – 2. Auflage, 340 S., Springer Verlag, Wien.
- SUCHAN, R. (2000): Instabile Hangflanken im Dürnbachtal (Oberpinzgau/Österreich), Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen.
- TERZAGHI, K. (1962): Stability of steep slopes on hard unweathered rock. – In: Geotechnique, Band 12, S. 251-270, London.
- ZISCHINSKY, U. (1968): Über Bergzerreißung und Talzuschub. – In: Geol. Rundschau, Band 58, S. 974-983, Stuttgart.
- ZISCHINSKY, U. (1969): Über Sackungen. – In: Rock Mechanics, Band 1, S. 30-52, Wien.
-