

D-02: Raummuster (hoch-)alpiner Standorte als Resultat landschaftsdynamischer Prozesse

K.-F. Wetzel¹, P. Fiener¹, S. Grashey-Jansen¹, M. Heel¹, O. Sass²

¹ Institut für Geographie, Universität Augsburg, 86135 Augsburg

² Institut für Geographie und Raumforschung, Universität Graz, 8010 Graz

Einleitung

Hochgebirge zeichnen sich durch eine hohe räumliche Variabilität von Bodentypen aus. Eine Ursache dafür ist in den auf kurzer Distanz wechselnden Standortfaktoren zu sehen, welche die Pedogenese steuern. In den Nördlichen Kalkalpen sind dies zum einen die geologischen Verhältnisse mit parallel zum Gebirgsrand streichenden Einheiten, die zu einem schroffen Wechsel verschiedener Gesteine führen. Die klimatischen Verhältnisse variieren ebenso stark, denn mit Annäherung an den Alpenrand nehmen die Niederschläge bei gleichzeitig abnehmenden Temperaturen zu. Im Lee der ersten Gebirgsketten nehmen die Niederschläge zu den inneralpinen Trockentälern wieder ab, während die Temperaturen in gleicher Höhenlage aufgrund des Massenerhebungseffektes wieder ansteigen. Dazu kommen ausgeprägte Luv- und Leeeffekte sowie einstrahlungsbedingte Expositionsunterschiede, so dass ein sehr komplexes dreidimensionales Muster unterschiedlicher klimatischer Standortbedingungen auf engstem Raum existiert. Die lokalklimatischen Verhältnisse werden an einigen Standorten darüber hinaus durch den Föhn und seine austrocknende Wirkung massiv beeinflusst. Die Bodenentwicklung am Standort wird von weiteren externen Faktoren gestört. So erfolgen an steilen Hängen häufig langsame gravitative Bewegungen. Unterhalb von Felswänden kommt es zu Steinschlag oder Felsstürzen mit Verschüttung von Böden. In Lawingassen werden Böden ebenfalls immer wieder mit neuem Material überschüttet oder aber erodiert. Extremniederschläge mit hohen Intensitäten führen zudem durch Abspülung oder lokalen Massenbewegungen zu Bodenabtrag.

Waldbrände spielen in den Nördlichen Kalkalpen eine bislang deutlich unterschätzte Rolle auch hinsichtlich der lokalen Bodenentwicklung. Ein DFG-Projekt zu den Auswirkungen von Waldbränden in den Nördlichen Kalkalpen wurde an der Universität Augsburg durchgeführt. Ein Schwerpunkt des Waldbrandgeschehens im Raum Mittenwald / Scharnitz wird im Rahmen der Exkursion besucht. Ein weiterer häufig unterschätzter Faktor bei der Bodenbildung sind stoffliche Einträge von außen. So befinden sich auf hochgelegenen alpinen Karstlandschaften lokal verbrauchte Böden mit einem deutlichen Silikatgehalt, der nur durch allochthone äolische Einträge erklärbar ist, wie am Beispiel des Karwendelgebirges gezeigt wird.

Thema und Exkursionsroute

Die Exkursion fokussiert auf Prozesse in der Landschaft, die die räumliche Differenzierung von Böden im alpinen Raum beeinflussen. Dabei werden vor allem die Waldbrandproblematik und äolische Einträge von Flugstaub thematisiert. Die Exkursionsroute vorläuft von München zunächst über die A 97 nach Eschenlohe (Abb. 1). Von dort geht es auf der B 17 über Garmisch-Patenkirchen an Mittenwald vorbei nach Scharnitz in Österreich. Wenige Kilometer südlich von Scharnitz ist der erste Haltepunkt, an dem ein Überblick über das historische Waldbrandgeschehen gegeben wird. Nach einer kurzen Fahrtstrecke zur Karwendelbahn und einer Seilbahnfahrt zum Karwendelhaus auf 2.244 m ü.d.M. wird die Waldbrandproblematik abschließend diskutiert. Im Anschluss besteht die Gelegenheit zur Mittagspause. Danach schließt sich eine Wanderung in die hochalpine Karstlandschaft des Karwendelgebirges mit Ansprache unter-

schiedlicher Bodenstandorte an, wobei ein Schwerpunkt auf den Einflüssen von geomorphologischen Prozessen äolischen Stoffeinträgen liegt.



Abb. 1: Die Exkursionsroute im Überblick.

Das Exkursionsgebiet

Das Relief und die geologischen Strukturen stehen im Exkursionsraum in einem engen Zusammenhang. Das Gebiet ist durch die tektonischen Einheiten der verschiedenen alpinen Decken mit den markanten Gebirgsstöcken des Karwendels und des Wettersteingebirges sowie den tief eingeschnittenen Längs- und Quertälern von Inn, Isar und Loisach und ihren Nebenflüssen geprägt. Von Norden kommend gehören die ersten Gipfel der Lechtaldecke an und bestehen vor allem aus dem massigen gipfelbildenden Wettersteinkalk der alpinen Trias. Auch das weiter südlich gelegene Wettersteingebirge mit der Zugspitze gehört dieser tektonischen Einheit an. Das gleiche Gestein formt weitere bedeutende Gipfel im Bereich der sogenannten Schuppenzone, einem Gebiet

zwischen Lechtal- und Inntaldecke mit intensiv verstellten Gesteinspartien vor allem im Bereich des nördlichen Karwendelgebirges. Dabei weisen die schroffen Schichtköpfe häufig nach Norden während die Südhänge im Schichtfallen ausgebildet sind, ein Umstand der bei der Bodenbildung und den Folgen von Waldbränden eine erhebliche Relevanz hat. Südlich folgen weitere zur Inntaldecke gehörende Kämme des Karwendels und schließlich das Inntal mit Innsbruck.

Die heutigen Reliefstrukturen sind dabei das Resultat der tektonischen Prozesse, die im Zuge der alpinen Orogenese zu einer starken Raumeinengung und einem quer zur Bewegungsrichtung orientierten W-E Streichen der Gebirgsstöcke geführt hat (Tollmann 1985). Zusammen mit tektonischen Störungen, die SW-NE gerichtet sind und die Faltenstrukturen unterbrechen, bilden sie die Leitlinien für die großen Talsysteme, die diesen Gebirgsraum gliedern. Es sind vor allem das in Streichrichtung verlaufende Inntal sowie die Täler von Isar und Loisach, die sowohl der Streichrichtung als Längstäler, als auch den tektonischen Störungen folgend als Quertäler das Relief prägen. Die fluvial angelegten Talsysteme wurden im Pleistozän durch Gletscher aufgeweitet und stellen heute die Achsen des Verkehrsnetzes dar. So verlaufen die B2 und die Bahnlinie München-Innsbruck zunächst durch das Loisachtal und dann über das Isartal in das Inntal.

Im Gebiet von Mittenwald und Scharnitz treffen verschiedene Gebirgsgruppen aufeinander. Es sind dies die Ausläufer des nordwestlich gelegenen Wettersteingebirges, das östlich anschließende Karwendel, im Westen das Mieminger Gebirge und das direkt bei Scharnitz gelegene Arnspitzgebiet. Die teilweise schroff aufragenden Gebirgsgruppen prägen mit ihren teilweise 1000 m hohen Wandfluchten und den darunter anschließenden Schutthalden diesen Hochgebirgsraum.

Das Klima wird dem atlantisch geprägten nordalpinen Typus mit hohen Niederschlägen und einem ausgeprägten Winter mit erheblichen Schneemengen zugerechnet (Walter & Lieth 1964). Sowohl die Niederschläge als

auch die thermischen Verhältnisse variieren mit der Meereshöhe, wobei ein Gradient mit abnehmenden Niederschlägen und steigenden Temperaturen in Richtung Süden besteht. In den Kammlagen werden z.T. 2000 mm/a Niederschlag überschritten, in den Tälern sind es unter 1000 mm/a. Die Temperaturen liegen in den Tälern im Jahresmittel bei ca. 6-8 °C, auf der Zugspitze beträgt das langjährige Jahresmittel der Lufttemperatur -2,8 °C (Müller-Westermeier 1996). Der Föhn hat in starker Abhängigkeit von den Relief- und Expositionsverhältnissen lokal eine erhebliche Bedeutung und kann durch seine austrocknende Wirkung die Entstehung von Bränden begünstigen. Bei starker Südströmung kann es darüber hinaus zu Einträgen von mineralischen Stäuben aus der Sahara und den Zentralalpen kommen.

Der Untersuchungsraum liegt vegetationsgeographisch in der Region der nördlichen Randalpen. Aufgrund der großen Höhenunterschiede im Exkursionsraum ist eine ausgesprochen starke vertikale Gliederung der Vegetation zu erkennen, die z.T. durch die drastische klimatisch bedingte Verkürzung der Vegetationsperiode um sechs bis sieben Tage pro 100 Höhenmeter zu erklären ist (Ellenberg & Leuschner 2010). In der montanen Stufe finden sich vor allem Mischwälder mit Buchen, Tannen und Fichten sowie Bergahorn; an trockeneren Standorten vor allem im Bereich der Föhngassen erreicht die Kiefer eine größere Dominanz. Mit zunehmender Höhe werden die Laubholzarten durch die Fichte verdrängt, die die beherrschende Baumart der subalpinen Höhenstufe darstellt. Die Fichte bildet in den meisten Fällen die Waldgrenze in Höhenlagen um 1.800 m. In felsigem Gelände auf nordexponierten Standorten bilden mosaikartige Vorkommen von Lärchenwäldern in ähnlichen Höhenlagen die Waldgrenze. Darüber hat das Legföhren oder Latschen-Krummholz (*Pinetum Mugi*), das bis in Höhen von über 2.000 m vorkommen kann, den Schwerpunkt seiner Verbreitung. Rasen- und Felsspaltengesellschaften schließen sich in der alpinen Stufe vertikal an.

Aufgrund der Relief- und Klimaverhältnisse herrschen im Exkursionsgebiet zumeist flach-

gründige und skelettreiche Böden mit A-C-Profilen vor. Da Kalke das dominierende Ausgangssubstrat der Bodenbildung darstellen, handelt es sich vor allem um Rendzinen und Pararendzinen. Die Mull-Rendzina besitzt einen charakteristischen Mull im A-Horizont, der durch eine Verbindung von organischer Substanz und mineralischen Bodenbestandteilen, einem engen C/N-Verhältnis und einer regen Tätigkeit der Bodenfauna aufgrund hoher pH-Werte und hoher Ca-Sättigung gekennzeichnet ist. Fortschreitende Bodenbildung führt je nach Ausgangssubstrat zur Ausbildung von verbraunten, Braunerde-, Terra fusca-, Pseudogley- und Pelosol-Rendzinen in hängigem Gelände. Durch Störung der Mullbildung z.B. durch starke Humidität oder Trockenheit sowie verkürzter Vegetationsperiode entstehen Moderrendzinen, wobei in den niederen kühlhumiden Lagen die Alpine Moderrendzina und oberhalb der Waldgrenze die Tangelrendzina verbreitet sind. Tangelrendzinen weisen ein L/Of/Oh/Ah/C-Profil mit einer Humusauflage von bis zu über 40 cm Mächtigkeit auf. Sie sind in ihrer sauren und dystrophen Ausprägung typisch für Fichtenwälder und Latschen-Krummholz. Unter Rasenbedeckung tritt an ihre Stelle die Alpine Pechrendzina, deren Humusauflage im unteren Teil dicht, feucht und schmierig erscheint. Externe Störungen wie Steinschlag, Solifluktion und schroffe Gesteinswechsel führen zu einem kleinräumigen Bodenmosaik. In den Hochlagen der Kalknordalpen spielen darüber hinaus äolische Einträge von silikatischem Material eine nicht zu unterschätzende Rolle bei der Bodenbildung, wie Untersuchungen von Küfmann (2003) und Duffy (2011) zeigen.

Waldbrände in den Kalknordalpen und ihre Auswirkungen

Untersuchungen zur Waldbrandgeschichte sind in den Alpen im Vergleich zu anderen Regionen mit häufigen Waldbränden selten. Für die Schweiz liegen Untersuchungen für die Südalpen von Berli et al. (1994) und Tinner et al. (1998, 1999), für das Wallis von Gimmi et al. (2004) und Bendel et al. (2006) sowie von Tinner et al. (2005) für die Schweiz im Überblick vor. Carcaillet et al. (1998) untersuchten

die nordfranzösischen Alpen. Für die nördlichen Kalkalpen wurden die lokalen Auswirkungen von Waldbränden in Tirol von Grabherr (1934,

1936 und 1963) untersucht. Eine systematische historische Aufarbeitung fehlte bislang.

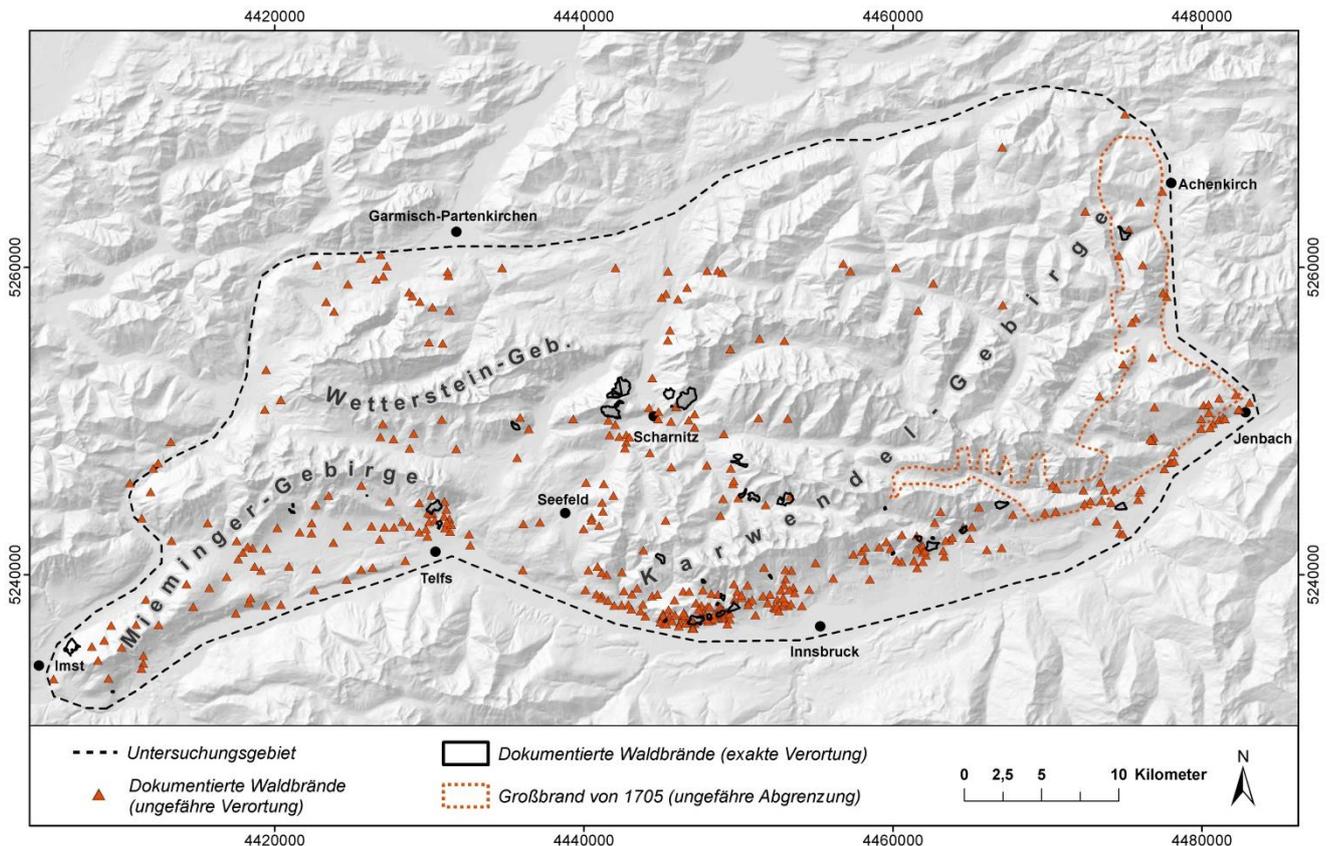


Abb. 2: Untersuchungsgebiet mit der räumlichen Verbreitung der Waldbrandflächen (Heel 2015).

In einem DFG geförderten Forschungsprojekt wurden von 2007 bis 2012 intensive Recherchen in Archiven, Zeitschriften, Luftbildern und Karten (Flurnamen) vorgenommen. Dabei wurden 499 Waldbrandereignisse im Zeitraum von 1543 bis 2010 ermittelt, wobei sich die Brände im Entlang der Innsbrucker Nordkette, des Mieminger Plateaus und im Gebiet um Scharnitz / Mittenwald konzentrieren (Abb. 2). Dabei weist der Hechenberg westlich von Innsbruck mit 71 Bränden auf 13 km² die höchste Feuerfrequenz auf. Insgesamt kann eine Abnahme der Waldbrände nach Norden hin beobachtet werden. Nur 8 % (42) der Ereignisse fanden in Bayern statt, die restlichen Brände (92%, 457) ereigneten sich in Tirol. Über 80 % der Feuer brachen auf Südexpositionen aus. Auffallend ist weiter die Nähe der Brände zu Siedlungen. Der Großteil der Brände (71 %) fand in der siedlungsnäheren montanen Stufe bis 1.300 m statt. Das Höhenintervall bis zur Waldgrenze (1.800 m) war mit 24 % seltener betroffen. Die darüber liegenden Krummholzareale sind an

der Waldbrandhäufigkeit immerhin noch mit 5 % beteiligt.

Die Häufigkeit von Waldbränden ist über den Zeitraum von fast 500 Jahren nicht gleichmäßig verteilt, was sicherlich auch der Quellenlage geschuldet ist. Innerhalb der letzten 200 Jahre kann eine deutliche Zunahme der Brandereignisse festgestellt werden, wobei insbesondere Kriegs- und nachfolgende Mangeljahre mit intensiverer Nutzung der Wälder durch erhöhte Feuerhäufigkeit auffallen. Die Zeit nach dem 2. Weltkrieg bis heute ist durch eine anhaltend hohe Feuertätigkeit wohl auch durch den zunehmenden Tourismus gekennzeichnet. Für das gesamte Untersuchungsgebiet konnte für den historischen Zeitraum ein mittleres Rekurrenzintervall von ca. 170 a ermittelt werden, an dem es auf einer 10 km² Fläche zu einem Feuer kommt. Saisonal treten die meisten Brände im Frühjahr und Sommer auf (Abb. 3), wenn genügend abgestorbenes Pflanzenmaterial als Brennstoff zur Verfügung steht. Bei den Ursachen der Brände ist eine

Abhängigkeit von der Witterung zu erkennen. In trockenen Jahren und insbesondere nach schneearmen Wintern brennt es häufiger. In den meisten Fällen (72 %) sind anthropogene Ursachen für die Entstehung der Waldbrände nachgewiesen, nur ca. 14 % sind auf natürliche Gründe (Blitzschlag) zurückzuführen und bei den restlichen Fällen (14 %) ist die Ursache unklar.

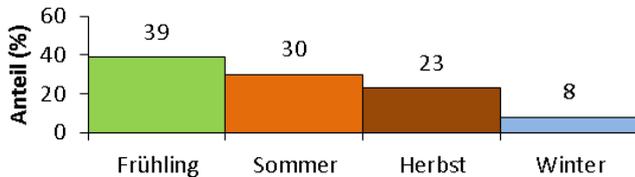


Abb. 3: Jahreszeitliche Verteilung der Waldbrandereignisse im Untersuchungsgebiet (Heel 2015).

Für 219 Brandflächen konnte die Ausdehnung erfasst werden. Ohne die Berücksichtigung der flächengrößten Brände mit bis mehreren 100 ha betroffener Fläche, beträgt die durchschnittliche Waldbrandfläche 9 ha. Eine Ausnahme stellt der Waldbrand von 1705 ein, der am Stupbach am Vomperloch durch die Unachtsamkeit von Hirten entstand und mehrere 1000 ha umfasste. Er breitete sich entlang des Achensees nach Westen und Süden aus. Erst nach Wochen beendeten Regenfälle das Feuer. Noch heute sind die Spuren des Brandes in den Hochlagen im Luftbild zu erkennen.

Für den Raum Scharnitz konnte eine längerfristige Feuerchronologie aufgestellt werden. In 80 cm mächtigen Tangelrendzinen an der Brunnensteinspitze wurden mehrere Lagen mit Holzkohleresten gefunden und datiert. Das Alter der untersten Holzkohlelage in 71 cm Tiefe wurde mit der ¹⁴C-Methode auf ein Alter von 6.305 ± 95 BP datiert. Zusammen mit 12 weiteren Holzkohlelagen im Profil konnte somit in Anlehnung an Conedera et al. (2009) ein lokales Feuerintervall (point mean fire interval, PMFI) von 530 Jahren für das Holozän berechnet werden (Sass et al. 2012). Zusammen mit anderen Holzkohlefindungen auch an der gegenüber liegenden Arnspitze sowie historischen Quellen wurden für den Raum insgesamt mindestens 16 Brände nachgewiesen (Abb. 4). Das lokale Feuerintervall liegt damit in der gleichen Größenordnung wie die von

Stähli et al. (2006) für das Holozän ermittelten Werte von ca. 600 Jahren für die Schweizer Zentralalpen.

Die Auswirkungen der Waldbrände sind von der Art des Feuers und der Feuerintensität abhängig, die ihrerseits von verschiedenen Faktoren bestimmt wird. Bei den Feuerarten werden bodennahes Lauffeuer, Wipfelfeuer, Totalbrand oder Bodenfeuer mit lange andauernden Schwelbränden in organischen Auflagen unterschieden. Die Feuerintensität wird maßgeblich über den Brennstoffvorrat und die meteorologischen Bedingungen (Trockenheit, Windverhältnisse) bestimmt (Conedera et al. 2009). Die längerfristigen Konsequenzen hängen in erster Linie von der Regenerationsfähigkeit des betroffenen Standortes ab. Dabei spielt neben den Reliefverhältnissen - steile Flächen unterliegen stärkerer Erosion - die Höhenlage eine wesentliche Rolle. Aufgrund der kürzer werdenden Vegetationsperiode nimmt die Zeitspanne bis zur Regeneration der Brandschäden mit zunehmender Höhe zu. Besonders problematisch ist das Verbrennen von Bodenmaterial und hier insbesondere des Tangelhumus zu sehen, da nach solchen Bränden oft freiliegende Felsflächen anstehen, die eine Regeneration über lange Zeiträume verhindern. Dieser Umstand wird noch verstärkt, wenn das Einfallen der Gesteine in Hangrichtung verläuft und Lösungsrückstand sofort abgespült wird. Aufgrund der tektonischen Verhältnisse weisen südexponierte Hänge im Untersuchungsgebiet häufig ein süd-wärtiges Schichtfallen auf. Der Südhang der Arnspitze, der 1946 abgebrannt ist, ist ein exponiertes Beispiel für solch eine Situation, auf dem auch fast 70 Jahre nach dem Brand kaum Anzeichen einer Wiederbegrünung festzustellen sind. Der ein Jahr später abgebrannte Osthang der Arnspitze mit ausbeißenden Schichtköpfen und einer dadurch bedingten guten Strukturierung des Hanges mit lokalen Sedimentfallen, zeigt heute ein gänzlich anderes Bild. Er ist mit einem lückigen Lärchenwald bestockt, der z.T. durch Aufforstung in den Jahren nach dem Feuer aufwachsen konnte. Die südexponierte Brandfläche ist dagegen bis heute durch intensive geomorphodynamische Prozessen (Steinschlag, Lawinen,

Abspülung) gekennzeichnet und bietet für Auf-
forstungsmaßnahmen überhaupt keine Stand-
orte.

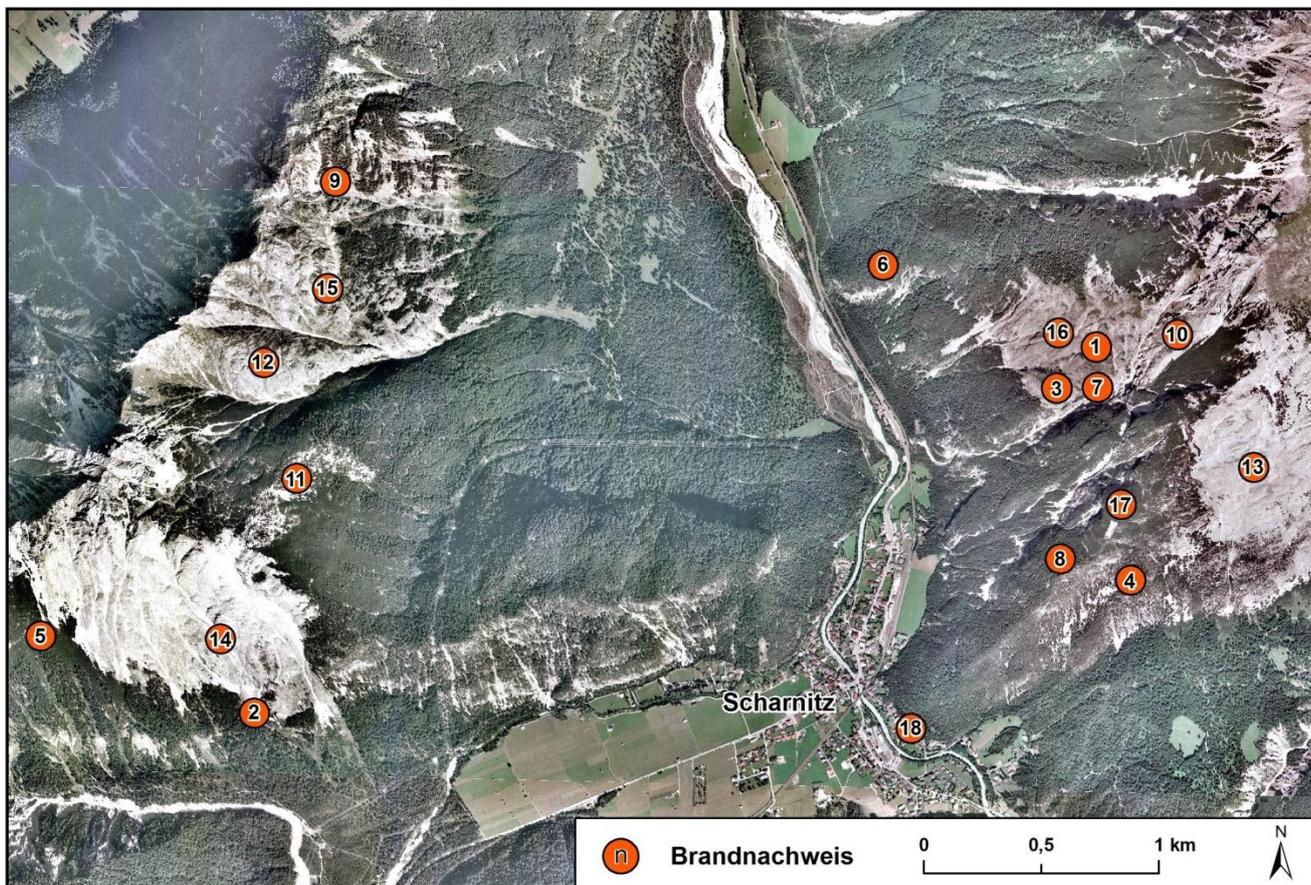


Abb. 4: Verortung der einzelnen Brandnachweise im Raum Scharnitz (HEEL 2015).

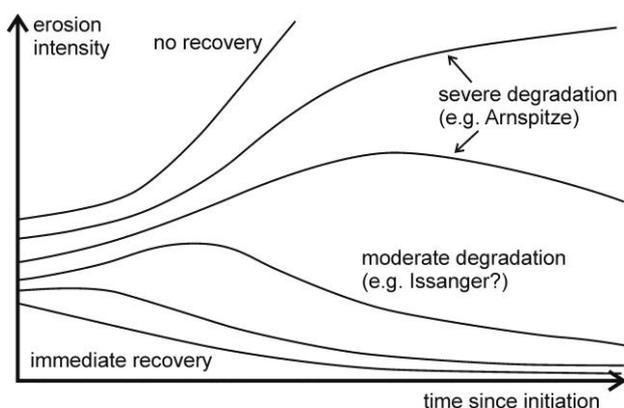


Abb. 5.: Zeitliche Verläufe von Erosionsintensität
und Wiederbewaldung als Folge unterschiedlicher
Schädigung durch Feuer (Sass et al. 2012).

Untersuchungen von Sass et al. (2012) an
über 50 Brandhängen haben ergeben, dass die
Regeneration von Waldbrandnarben je nach
Grad der Schädigung durch den Brand in
einem Zeitfenster von etwa 50 bis 500 Jahren
erfolgt. Dazu wird ein Schema vorgestellt, das

die verschiedenen Möglichkeiten der Erholung
der Brandflächen modellhaft darstellt (Abb. 5).
In den Hochlagen ist nach diesen Unters-
uchungen davon auszugehen, dass die ver-
gleichsweise weite Verbreitung des Krummhol-
zes auch auf den Einfluss von Waldbränden
zurückzuführen ist. An weitgehend vom Feuer
unbeeinflussten Standorten kann ein Aufkom-
men von Lärchen und Föhrenwäldern be-
obachtet werden, die das Krummholz lang-
fristig verdrängen. Ähnliche Ergebnisse wurden
von Stähli et al. (2006) für die zentralen
Schweizer Alpen vorgelegt. Der Einfluss von
Bränden auf die Bodenentwicklung ist zeitlich
kaum abzuschätzen, da für die Bodenbildung
ganz andere Zeitskalen gelten als für die Ve-
getation. Festzuhalten bleibt hier, dass Wald-
brände unbedingt bei der Interpretation von
Böden in alpinen Lagen berücksichtigt werden
müssen, denn sie können sowohl das Ent-
wicklungsstadium als auch die Bodenmächtig-
keit maßgeblich beeinflussen.

Bodenmuster in den Hochlagen des Karwendelgebirges

Das Exkursionsgebiet liegt im Gebiet der Vorderen Karwendelkette zwischen der Bergstation der Karwendelbahn und der Dammkarhütte. Dieses Gebiet liegt genau im Bereich der tektonischen Grenze von Lechtal- und Inntaldecke (Abb. 6). Die Geologie ist geprägt von der komplexen Tektonik, an der der Wettersteinkalk der Lechtaldecke sowie die Reichenhaller Schichten, der Alpine Muschelkalk und

der Wettersteinkalk der Inntaldecke beteiligt sind (Jerz & Ulrich 1966). Dabei erfolgen Gesteinswechsel auf kurzer Distanz und sind im Gelände teils gut erkennbar. Die Reichenhaller Schichten bestehen aus Kalken und Dolomiten, die teilweise als Breccien auftreten. Der silikatische Lösungsrückstand dieser Breccien beträgt im Mittel ca. 12 % (Schlott 1997), während die recht reinen grauen Kalke eine ähnlich Zusammensetzung wie Alpiner Muschelkalk und Wettersteinkalk mit deutlich geringerem Lösungsrückstand aufweisen.

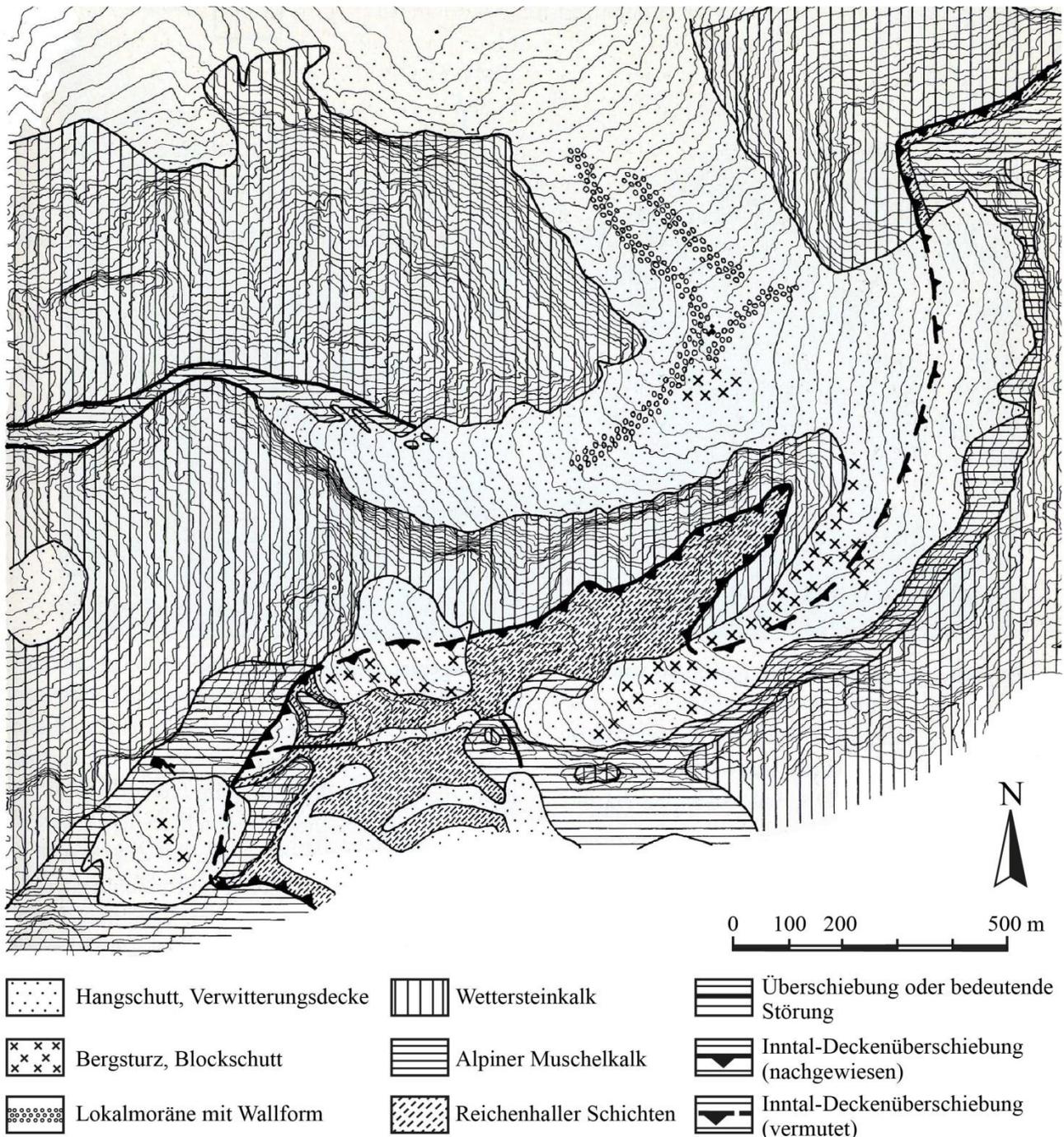


Abb. 6: Die geologischen Verhältnisse im Bereich des Dammkares im Karwendelgebirge (Jerz & Ulrich 1966).

Neben den petrographischen Verhältnissen haben geomorphologische Prozesse im Gebiet einen starken Einfluss auf die Bodenentwicklung. Steile Lagen sind meistens frei von Böden aufgrund von Abspülungsprozessen und gravitativ bedingten Bewegungen. Hangfußbereiche sind dagegen von Schutthalden unterschiedlicher Körnung gekennzeichnet. Die Korngröße richtet sich dabei nach den Gesteinsverhältnissen und der tektonischen Beanspruchung. Massige Gesteine wie der Wettersteinkalk zeigen oft grobblockige Halden, in Bereichen mit intensiven tektonischen Einflüssen können feinkörnigere Ablagerungen entstehen. Auch kann die geomorphologische Aktivität auf Schutthalden auf kurzer Distanz variieren, da sie von der Intensität der Prozesse im Einzugsgebiet wie Steinschlag- und Lawinentätigkeit abhängt. Die Bodenentwicklung auf grobem Material beschränkt sich zu meist auf Initialstadien, während auf feinkörnigem Schutt neben Protorendzinen auch Tangel- und Polsterrendzinen sowie Mullrendzinen an N-exponierten Standorten der Karwendelgrube mit deutlichem Glimmeranteil im Solum verbreitet sind. Auf einigen Standorten können verbrauchte Rendzinen und Braunerde-Rendzinen gefunden werden, die zumeist an die Breccien der Reichenhaller Schichten gebunden sind.

Äolische Einträge silikatischer Komponenten führen zu einer weiteren Bodendifferenzierung in den Hochlagen. So treten auch flach- bis mittelgründige, stark glimmerführende Braunerden mit bis über 60 cm mächtigen Profilen auf, die direkt über Muschelkalkschutt oder anstehendem Muschelkalk entwickelt sind (Küfmann 2008). Einsetzende Tonverlagerung hat vor allem bei Standorten direkt auf Anstehendem zu Wasserstau und Pseudovergleyung geführt. Die pH-Werte sind nach Untersuchungen von Küfmann (2008) vor allem bei den tiefgründigen Standorten mit hohen Glimmeranteilen im B-Horizont niedrig (pH 3,9 bis 4,3). Korngrößenanalysen und mineralogische Untersuchungen verdeutlichen die äolische Herkunft des silikatischen Materials und deuten vor allem auf die Sahara als Liefergebiet. Die in älterer Literatur zu findenden Angaben über die Zentralalpen als Liefergebiet der

Staubeinträge können nach Küfmann (2008) zumindest in dieser Ausschließlichkeit nicht aufrecht gehalten werden.

Literatur

- Bendel, M., Tinner, W., Ammann, B. (2006): Forest dynamics in the Pfyn forest in recent centuries (Valais, Switzerland, Central Alps): interaction of pine (*Pinus sylvestris*) and oak (*Quercus* sp.) under changing landuse and fire frequency. *The Holocene* 16: 81-89.
- Berli, S., Cherubini, P., Schoch, W. (1994): Rekonstruktion von Bestandesfluktuationen, Bodenmächtigkeit und Feuergeschichte über 7000 Jahre BP mittels Holzkohle-Analysen. *Botanica Helvetica* 104: 17-30.
- Carcaillet, C. (1998): A spatially precise study of Holocene fire history, climate and human impact in the Maurienne valley, North French Alps. *J. Ecol.* 86: 384-396.
- Conedera, M., Tinner, W., Neff, C., Meurer, M., Dickens, A.F., Krebs, P. (2009): Reconstructing pastfire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews* 28: 435-456.
- Duffy, L. (2011): Mikroreliefbedingte Raummuster von Böden, äolischen Substraten und Flugstäuben im Hochgebirgskarst der Nördlichen Kalkalpen (Reiteralpe, Berchtesgadener Alpen). Diss., LMU, München, 195 S.
- Ellenberg, H., Leuschner, C. (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 6. Auflage. Stuttgart, 1333 S.
- Gimmi, U., Bürgi, M., Wohlgemuth, T. (2004): Wie oft brannte der Walliser Wald im 20. Jahrhundert? *Schweizerische Z. Forstwesen* 15: 437-440.
- Grabherr, W. (1934): Der Einfluß des Feuers auf die Wälder Tirols. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 60: 289-302.
- Grabherr, W. (1936): Die Dynamik der Brandflächenvegetation auf Kalk- und Dolomitböden im Karwendelgebirge. Beihefte zum Botanischen Centralblatt, Band LV, Abteilung B, 1/2, 97 S.
- Grabherr, W. (1963): Der größte Waldbrand Nordtirols von Georgenberg bis zum Hähnerbach im hinteren Achenal im Spätherbst 1705. *Tiroler Heimatblätter* 38 (7/9): 25-27.
- Heel, M. (2015): Waldbrände in den Nördlichen Kalkalpen - raumzeitliche Verteilung und Beispiele lokaler Auswirkungen. Diss., Uni Augsburg, 249 S.
- Jerz, H., Ulrich, R. (1966): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 25.000, Blatt Nr. 8533/8633 Mittenwald. Bayerisches Geologisches Landesamt, München, 152 S.
- Küfmann, C. (2003): Soil types and eolian dust in high mountainous karst of the Northern Calcareous Alps (Zugspitzplatt, Wetterstein Mountains, Germany). –

- In: *Catena*, 53, 211-227.
- Küfmann, C. (2008): Flugstaubeintrag und Bodenbildung im Karst der Nördlichen Kalkalpen. *Forschungsberichte des Nationalparks Berchtesgaden* 54: 159 S.
- Müller-Westermeier, G. (1996): Klimadaten von Deutschland – Zeitraum 1961–1990. Offenbach.
- Sass, O., Heel, M., Leistner, I., Stoeger, F., Wetzel, K.-F., Friedmann, A. (2012): Disturbance, geomorphic processes and regeneration of wildfire slopes in North Tyrol. *Earth Surface Processes Landforms* 37: 883-894.
- Schlott, P. (1997): Die Böden der subalpinen und alpinen Stufe im Bereich des Dammkars bei Mittenwald und ihr Beitrag zur Verwitterung. Dipl. Arbeit, LMU, unveröff.
- Stähli, M., Finsinger, W., Tinner, W., Allgöwer, B. (2006): Wildfire history and fire ecology of the Swiss National Park (Central Alps): new evidence from charcoal, pollen and plant macrofossils. *The Holocene* 16: 805-817.
- Tinner, W., Conedera, M., Ammann, B., Gaggeler, H.W., Gedye, S., Jones, R., Sagesser, B. (1998): Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented forest fires in southern Switzerland since AD 1920. *The Holocene* 8: 31-42.
- Tinner, W., Hubschmid, P., Wehrli, M., Amman, B., Conedera, M. (1999): Long-term Forest fire ecology and dynamics in southern Switzerland. *J. Ecol.* 87: 273-289.
- Tinner, W., Allgöwer, B., Ammann, B., Conedera, M., Gobet, E., Lotter, A.F., Stähli, M. (2005): Ausmass und Auswirkungen der Waldbrände auf die Vegetation der Schweiz im Laufe der Jahrtausende. *Schweizerische Z. Forstwesen* 156: 325-330.
- Tollmann, A. (1985): *Geologie von Österreich. Band 2*, Wien, 710 S.
- Walter, H., Lieth, H. (1964): *Klimadiagramm-Weltatlas*. - Jena.