

**Zeitschrift:** Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie  
**Herausgeber:** Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel  
**Band:** 51 (2010)  
**Heft:** 2  
  
**Artikel:** Die Verschiebung der Waldgrenze im Kananaskis Country, Kanada : GIS-basierte Analyse des Waldgrenzökotons durch den Vergleich von Ortho- und Luftbildern  
**Autor:** Providoli, Tobias  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1088040>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Die Verschiebung der Waldgrenze im Kananaskis Country, Kanada

## GIS-basierte Analyse des Waldgrenzökotons durch den Vergleich von Ortho- und Luftbildern

Tobias Providoli

### *Zusammenfassung*

*Mit der Hilfe von Luft- und Orthobildern von 1949 und 1999 wurde in dieser Studie die Waldgrenze in einem Gebiet im Kananaskis Country in den kanadischen Rocky Mountains untersucht. Das Ziel war es, die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Waldgrenze auszumachen und vor allem die mögliche Wirkung von Klimaerwärmung und Oberflächenprozessen zu unterscheiden. Die Ergebnisse zeigten, dass nicht alle Zunahmen der Waldbedeckung auf den Klimawandel zurückgeführt werden können, sondern auch auf die nach Waldbränden folgende Sukzession.*

## 1 Einleitung

Die Waldgrenze – der fließende oder abrupte Übergang von grossen aufrecht und dicht nebeneinander stehenden Bäumen über einzelne oder in Gruppen stehende kleinere Bäume bis hin zu einsamen verkrüppelten und kaum mehr erkennbaren Baumformen – gehört zu den eindrucklichsten und bedeutendsten Vegetationsscheiden an Höhen- und Polargrenzen (Abb. 1). Im Hinblick auf die globale Klimaerwärmung wird die Waldgrenze als wichtiger Indikator betrachtet und erforscht. Die intensivsten Untersuchungen fanden in den Alpen statt (Holtmeier 1985, 271; Körner 2003, 77).

Es gibt auf der Erde verschiedene Arten von Waldgrenzen. Laut Körner (2003, 77) treten Waldgrenzen global betrachtet dort auf, wo eine Existenz von Bäumen aufgrund zu hoher oder zu niedriger Temperaturen ungünstig ist, wo es für Bäume zu feucht oder zu trocken ist, wo es zu we-



Abb. 1 Der Wald und seine obere Grenze im Kananaskis Country. Wo Oberflächenprozesse wie Lawinen, Murgänge oder Steinschläge auftreten, kann die Waldgrenze nach unten verlagert werden. Blick von einem Standort oberhalb des Elbow Lakes nach Westen.

Foto: Dominik Mösch, 28.06.2009

nig Nährstoffe für Bäume im Boden hat oder die Böden für Bäume zu salzhaltig sind. Im vorliegenden Bericht bezeichnet der Begriff "Waldgrenze" die Linie, welche entlang des oberen Randes eines geschlossenen Waldes gezogen werden kann. Diese Linie wird in Hochgebirgen primär von der Temperatur bestimmt. Neben dem Klima (u. a. Temperatur und Einstrahlung) hängt die Veränderung der Waldgrenze gemäss *Holtmeier & Broll* (2005, 397) aber auch von der Topographie (u. a. Ausrichtung und Neigung), von der Morphodynamik (gravitative Massenbewegungen, Lawinen), vom Boden (u. a. Bodentiefe und -entwicklung), von der Baumart (u. a. Regenerationsfähigkeit, Samenverbreitung), von der Landschaftsgeschichte (u. a. menschlicher Einfluss, Waldbrände), von aktuellen anthropogenen Einflüssen (u. a. Tourismus, Alpwirtschaft, Aufforstung) und von aktuellen biotischen Einflüssen (u. a. Insektenbefall, Viehtritt) ab.

Das Ziel der Studie war es, mit Hilfe geographischer Informationssysteme zu ermitteln, wie sich die Waldgrenze im Kananaskis Country während der Zeitspanne von 50 Jahren, von 1949 bis 1999, verändert hat. Dieser Beitrag zeigt auf, wo und weshalb eine Veränderung der Waldgrenze stattgefunden hat. Weiter wird analysiert, ob die Waldgrenze im Kananaskis Country Signale eines sich erwärmenden Klimas aufweist.

## 2 Untersuchungsgebiet und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet umfasst verschiedene Täler der Rocky Mountains im kanadischen Kananaskis Country, in deren Zentrum der Highwood Pass bei  $50^{\circ}35'45''$  N und  $114^{\circ}59'08''$  W liegt (Abb. 2). Es befindet sich in der Provinz Alberta und grenzt an British Columbia. Seine Grösse beträgt  $152.4 \text{ km}^2$  und es erstreckt sich von 1787 m bis 3224 m über Meer. Die auf dem Highwood Pass aufgezeichnete Jahresmitteltemperatur beträgt  $-2.0^{\circ}\text{C}$ . Der Niederschlag beläuft sich im Schnitt auf 600 bis 900 mm im Jahr (Gardner et al. 1983, 22, 24f).

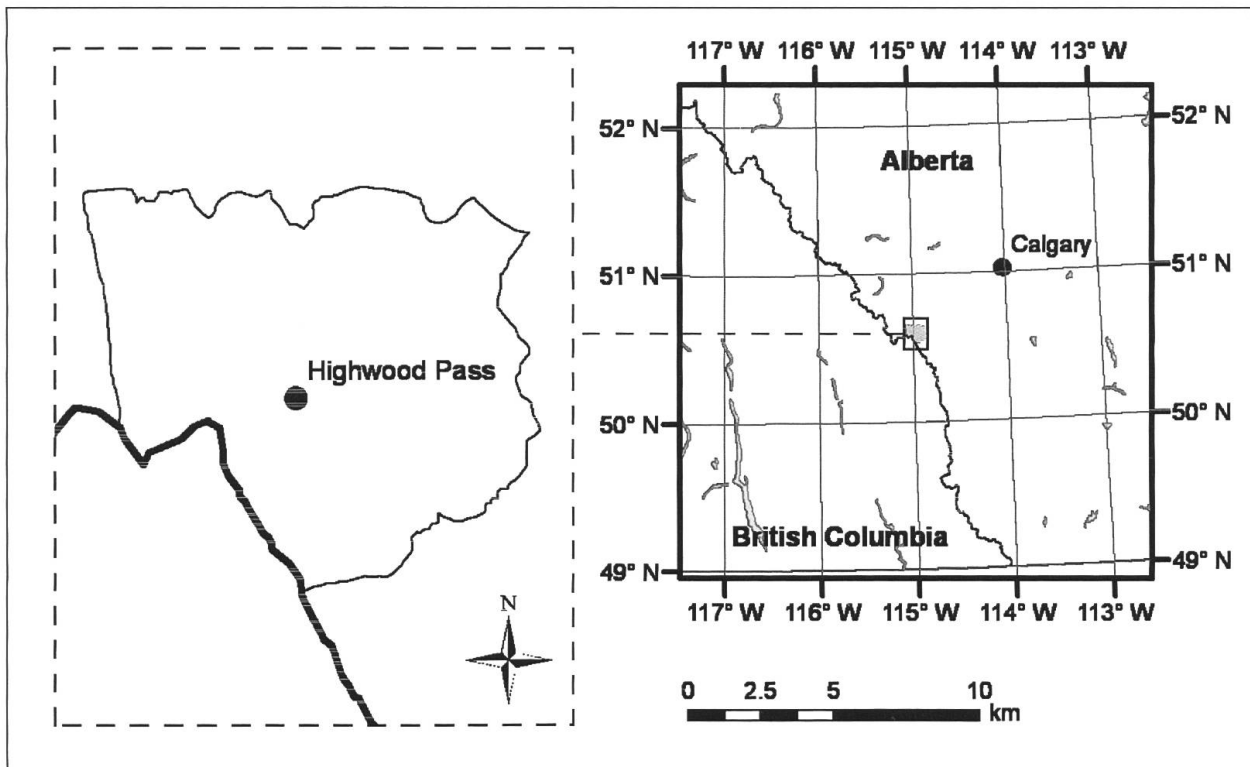


Abb. 2 Standort des Kananaskis Country an der Grenze der beiden kanadischen Provinzen Alberta und British Columbia (Daten: © GADM – Global Administrative Areas). Autor: Tobias Providoli

Da das Untersuchungsgebiet vom Menschen weitgehend ungestört ist, eignet es sich sehr gut für die Analyse der natürlichen Veränderung der Waldgrenze, ausserdem ist die räumliche Ausdehnung der oberen Waldgrenze einfach zu identifizieren. Laut Johnson & Larsen (1991, 196) und Luckman (1990, 184) erreicht die Waldgrenze in der Region Höhen zwischen 2100 bis 2350 m. Da das Kananaskis Country ein sehr trockenes Klima aufweist, kommt es immer wieder zu Waldbränden (Gardner et al. 1983, 52f). Seit 1940 ist im Untersuchungsgebiet zudem ein Anstieg der Temperaturen festzustellen (Abb. 3).

### 2.2 Klimawandel, Morphodynamik und Waldgrenze im Gebirge

Klimaerwärmung führt im Allgemeinen zu einer Ausdehnung der Waldfläche im Grenzbereich in die Höhe (Körner 2003, 77). Zieht sich beispielsweise ein Gletscher aus einem Gebiet zurück oder wird ein nahe oberhalb des Waldes gelegener Standort klimatisch attraktiver, schiebt sich die

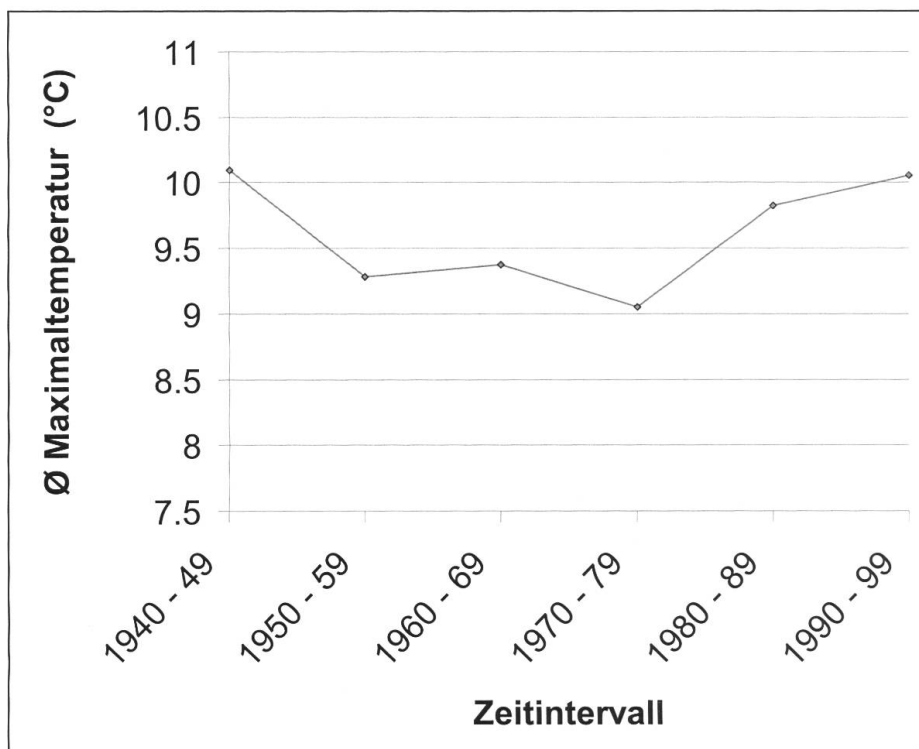



Abb. 3 Entwicklung der zehnjährigen durchschnittlichen Maximaltemperatur im Kananaskis Country (Daten: © Climate Data Library ). Autor: Tobias Providoli

Waldgrenze theoretisch langsam nach oben. Die Zunahmen, welche auf den Klimawandel zurückgehen, müssen sich folglich im Bereich der Temperaturgrenze des Waldes befinden. Zunahmen, die deutlich unterhalb dieser obersten Standorte am selben Hang liegen, sind daher nicht durch Klimaerwärmung verursacht, sondern auf eine Verdichtung des Waldes, beispielsweise als Folge von Sukzession nach einer Störung durch Feuer, Lawinen oder Massenbewegungen zurückzuführen.

In einer vom Menschen fast unberührten Gebirgslandschaft wie dem Kananaskis Country spielt ausserdem die Morphodynamik für den oberen Waldrand eine wichtige Rolle. Im Untersuchungsgebiet treten viele Fels- und Bergstürze auf. Da mindestens die Hälfte des durchschnittlichen jährlichen Niederschlags auf dem Highwood Pass als Schnee fällt, gibt es oft Lawinenereignisse. Die Karte mit den lawinengefährdeten Gebieten veranschaulicht, dass einzelne Abschnitte der Passstrasse am Fusse von Hängen vorbeiführen, wo sich Lawinen mit hoher Frequenz und Magnitude ereignen (Gardner et al. 1983, 53, 85f, 121, 128f). Oberflächenprozesse wie Lawinen, Steinschläge und Rutschungen verursachen eine Zerstörung der Bäume und somit eine Verlagerung der Waldgrenze nach unten. Für einen grossen Teil des Untersuchungsgebiets liegen eine Vegetationskarte mit Lawinenbahnen, eine geomorphologische Karte und eine Karte mit lawinengefährdeten Gebieten vor (Gardner et al. 1983, 52, 80, 129). Durch den Vergleich dieser Karten mit den Abnahmen der Vegetation an der oberen Waldgrenze konnte ermittelt werden, ob Massenbewegungen oder Lawinen den Rückgang der Baumvegetation verursacht haben. Abnahmen innerhalb der Fläche, die von Steinschlag und/oder Lawinen betroffen sind, wurden als 'potenziell morphodynamisch verursacht', solche ausserhalb als 'nicht-morphodynamisch beeinflusst' eingestuft. Diese Einstufung betont den direkten Einfluss der Oberflächenprozesse, auch wenn deren Rate durchaus eine Folge von Klimawandel sein kann – beispielsweise die Anzahl der Lawinenabgänge.

## 2.3 GIS-Analyse

Datengrundlage für die Waldkartierung im Jahre 1949 waren sechs senkrecht nach unten aufgenommene Luftbilder in Schwarz-Weiss. Bei Senkrechtbildern ist die wiedergegebene Fläche etwa quadratisch begrenzt und der Bildmassstab über die ganze Bildfläche etwa gleich. Da photographische Systeme die Erdoberfläche durch Zentralprojektion in die Bildebene abbilden und das betrachtete Gelände gebirgig ist, werden höher gelegene Geländepunkte, die über der Bezugsebene liegen, in den üblichen Senkrechtbildern vom Bildnadir radial nach aussen, tiefer gelegene dagegen nach innen versetzt wiedergegeben. Folge davon sind Verzerrungen gegen den Bildrand (Albertz 2009, 69, 71f; Baumann 1953, 16). Weil für eine Entzerrung des Luftbildes (Orthorektifizierung) der Kalibrationsreport der damals verwendeten Kamera, welcher Angaben über die Brennweite, Haupt- und Bezugspunkte enthält, nicht ausfindig gemacht werden konnte, konnten diese sechs Luftbilder nur verzerrt bearbeitet werden.

Für die Ausscheidung des Waldgebietes im Jahre 1999 konnte ein Orthophoto verwendet werden. Dieses war bereits orthorektifiziert, d. h. es weist geometrisch die Eigenschaften einer Karte auf, was im Gegensatz zu den Luftbildern von 1949 Messungen geometrischer Grössen wie Flächenausdehnung erlaubt. Die Auflösung sowohl der sechs Luftbilder wie auch des Orthophotos war 1 m x 1 m. Sämtliche Karten des Untersuchungsgebietes wurden im Koordinatensystem NAD\_1983\_UTM\_Zone\_11N projiziert. Neben Luftbildern und Orthophotos standen für das entsprechende Gebiet auch ein Höhenmodell in 30 m-Auflösung und weiteres Kartenmaterial zur Verfügung.

Ein Vergleich der Luftbilder von 1949 und 1999 ermöglicht die Ermittlung von markanten Zu- oder Abnahmen der Waldflächen an der oberen Waldgrenze. Aufgrund der Verzerrung des älteren Bildmaterials konnten jedoch nur qualitative und keine quantitativen Angaben zu den Veränderungen gemacht werden. Alle Zu- und Abnahmen wurden einer möglichen Ursache zugeordnet. Da das Areal vom Menschen bis auf den Bau der neuen Passstrasse bisher kaum beeinflusst wurde, konnten in dieser Region die Veränderungen der oberen Waldgrenze nur von der Morphodynamik oder vom Klimawandel verursacht worden sein. Der Einfluss von Lawinen und Massenbewegungen wurde mit Hilfe der entsprechenden Karten untersucht. Diese wurden dazu georeferenziert und unter den Layer mit den digitalisierten Waldabnahmen gelegt.

## 3 Veränderung der Waldbedeckung im Kananaskis Country und deren Ursachen

Die Ergebnisse der Waldbedeckungsanalyse im Kananaskis Country sind in den Abb. 4 und 5 dargestellt.

### 3.1 Morphodynamik und Waldgrenze

Die Abnahmen der Baumbedeckung an der Waldgrenze treten fast ausschliesslich in Verbindung mit bekannten Lawinenbahnen auf. Zur Veranschaulichung wurden alle kartierten Lawinengänge, Murgänge und Steinschläge aus dieser Karte digitalisiert und zusammen mit den Abnahmen der Waldfläche in Abb. 4 dargestellt. Die Abnahmen im Osten des Untersuchungsgebietes liegen ausserhalb der von Gardner et al. (1983) kartierten Fläche, werden aber ebenfalls als Folge von Lawinen entstanden sein, da sie von der Form und Lage den Abnahmen im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets entsprechen. Nur eine abnehmende Fläche im Süden des Untersuchungsge-



## Lawinen und Steinschläge im Kananaskis Country

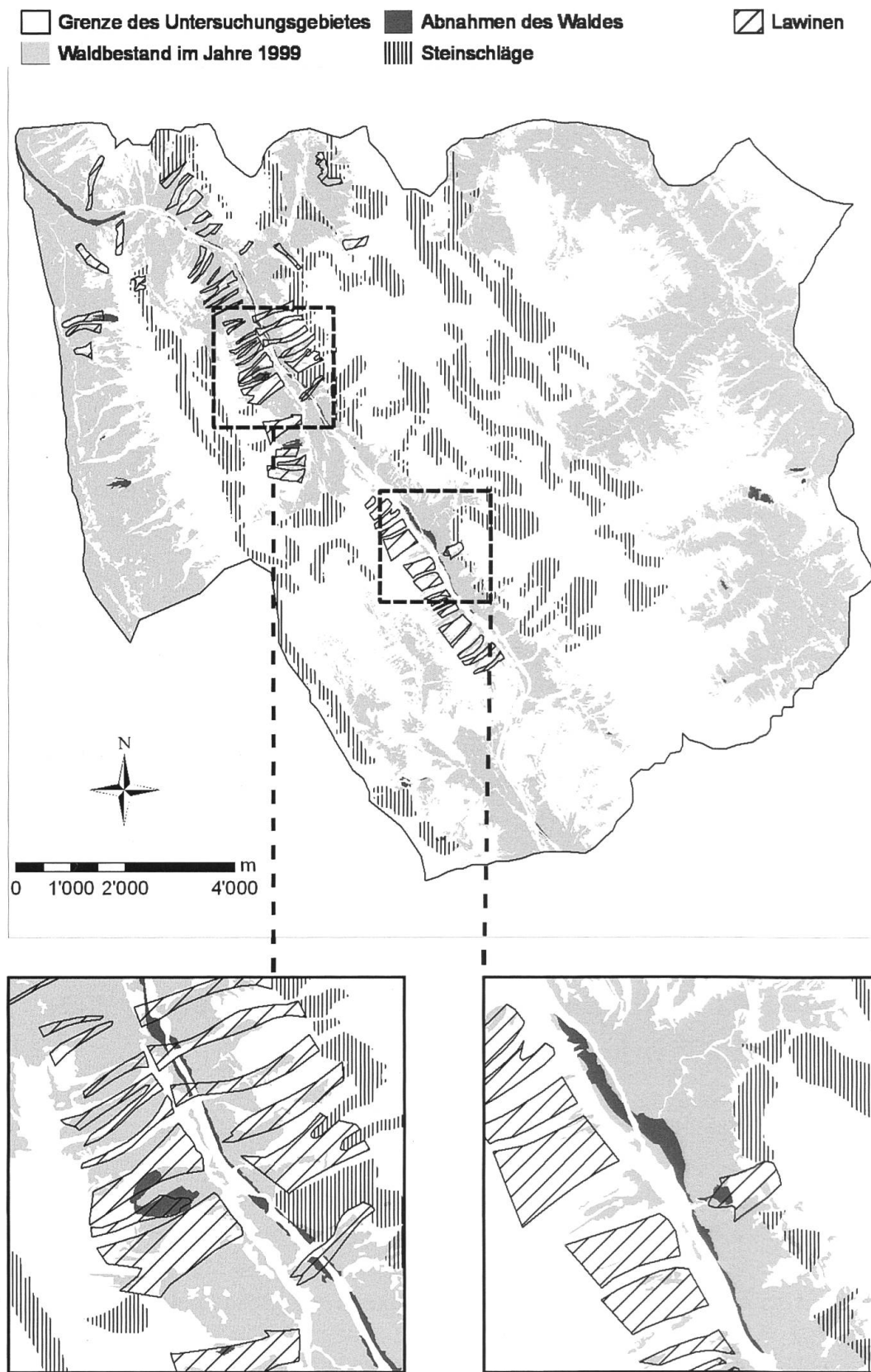


Abb. 4 Lawinen und Steinschläge im Kananaskis Country. Lawinen reißen Schneisen in den Wald und reichen teilweise bis in den Talgrund. Steinschläge ereignen sich vor allem oberhalb der Waldgrenze (Daten: © Government of Alberta).  
 Autor: Tobias Providoli

bietes wurde wahrscheinlich durch Steinschlag verursacht. Dies deutet an, dass eine weitere Ausdehnung der Höhengrenze des Waldes an vielen Hängen, die aus mobilem Geröllmaterial aufgebaut sind, durch Massenbewegungen beschränkt werden könnte, v. a. wenn sich diese bei höheren Temperaturen verstärken.

### 3.2 Klimaerwärmung und Waldgrenze

Neben den Abnahmen sind auch grössere Flächen mit Waldzunahmen im Kananaskis Country auszumachen (Abb. 5). Die meisten davon befinden sich im Süden (Storm Creek Valley) und im Norden (Procaterra Creek Valley) des Untersuchungsgebiets und reichen gar nicht oder nur teilweise bis an die Waldgrenze. Dies deutet an, dass viele dieser Zunahmen nicht auf die Klimaerwärmung zurückzuführen sind. Die grossen Zunahmen im Nordwesten des Untersuchungsgebietes gehen vielmehr auf Feuer zwischen 1920 und 1945 zurück (*Gardner et al.* 1983, 53). Die Vegetationskarte verdeutlicht, dass es sich bei diesen zunehmenden Flächen um Wälder handelt, welche vor 1949 Bränden zum Opfer gefallen sind. Zur Zeit der Kartierung wurden die Gebiete als “burned-over area” bezeichnet (*Gardner et al.* 1983, 52), die bis 1999 wieder nachgewachsen sind. Da es auf der Höhe der Waldgrenze mehr regnet und es deswegen feuchter ist, konnte sich das Feuer an vielen Hängen nicht bis an die Waldgrenze fortpflanzen (*AENR* 1984, 40f), entsprechend fand weniger Verdichtung im Bereich der Waldgrenze statt.

Neben der Verdichtung nach Feuer hat seit 1949 trotzdem in unmittelbarer Nähe oder an der Waldgrenze ein starker Verdichtungsprozess stattgefunden (Abb. 5). Waren die Bäume in diesen Zonen vor einem halben Jahrhundert noch jung, ihre Anzahl geringer und ihr Kronenbedeckungsgrad niedrig (offener Wald), so wuchsen sie bis 1999 heran, vermehrten sich und bilden nun ein dichtes Kronendach als geschlossener Wald. Laut *Körner* (2003, 88, 297) und *van der Meer et al.* (2004, 152) ist dieses Phänomen typisch für Regionen, in welchen sich das Klima erwärmt. Die Waldgrenze hinkt der Klimaveränderung jedoch hinterher und bevor die Bäume weiter in die Höhe dringen, verdichtet sich der an der Waldgrenze vorhandene Baumbestand, weil sich die Lebensbedingungen dort für die existierenden Bäume bereits verbessert haben.

## 4 Fazit

Die Flächenzu- und -abnahmen der Waldgrenze als Folge von Klimawandel oder Morphodynamik im Kananaskis Country konnten mit dem zur Verfügung stehenden Kartenmaterial analysiert werden. Es gibt im Untersuchungsgebiet Zunahmen der Waldfläche in Form von Verdichtungen, wo der Boden für das Baumwachstum schon vorhanden war und die wärmeren Temperaturen wirksam wurden. Weiter hat die Waldfläche an Standorten zugenommen, wo der Wald in früheren Zeiten von Bränden zerstört worden war. Abnahmen der Waldfläche wurden hauptsächlich durch Lawinen verursacht. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die steigenden Temperaturen die Waldgrenze verändern. Im grösseren Zusammenhang betrachtet – wie es diese Studie getan hat – spielen aber zahlreiche andere Faktoren, im Kananaskis Country v. a. die Morphodynamik und Waldbrände, ebenfalls eine entscheidende Rolle für die aktuell beobachtete Ausdehnung der Wälder im Hochgebirge. Es wird deutlich, dass jedes Landschaftssystem derzeit zwar von Klimawandel betroffen ist, ein Zusammenhang zwischen Erwärmung und Vegetationsveränderung jedoch nur mit Vorsicht und nur unter Berücksichtigung der komplexen Wirkungsgefüge im Hochgebirge festgestellt werden kann.



## Verdichtungen im Kananaskis Country

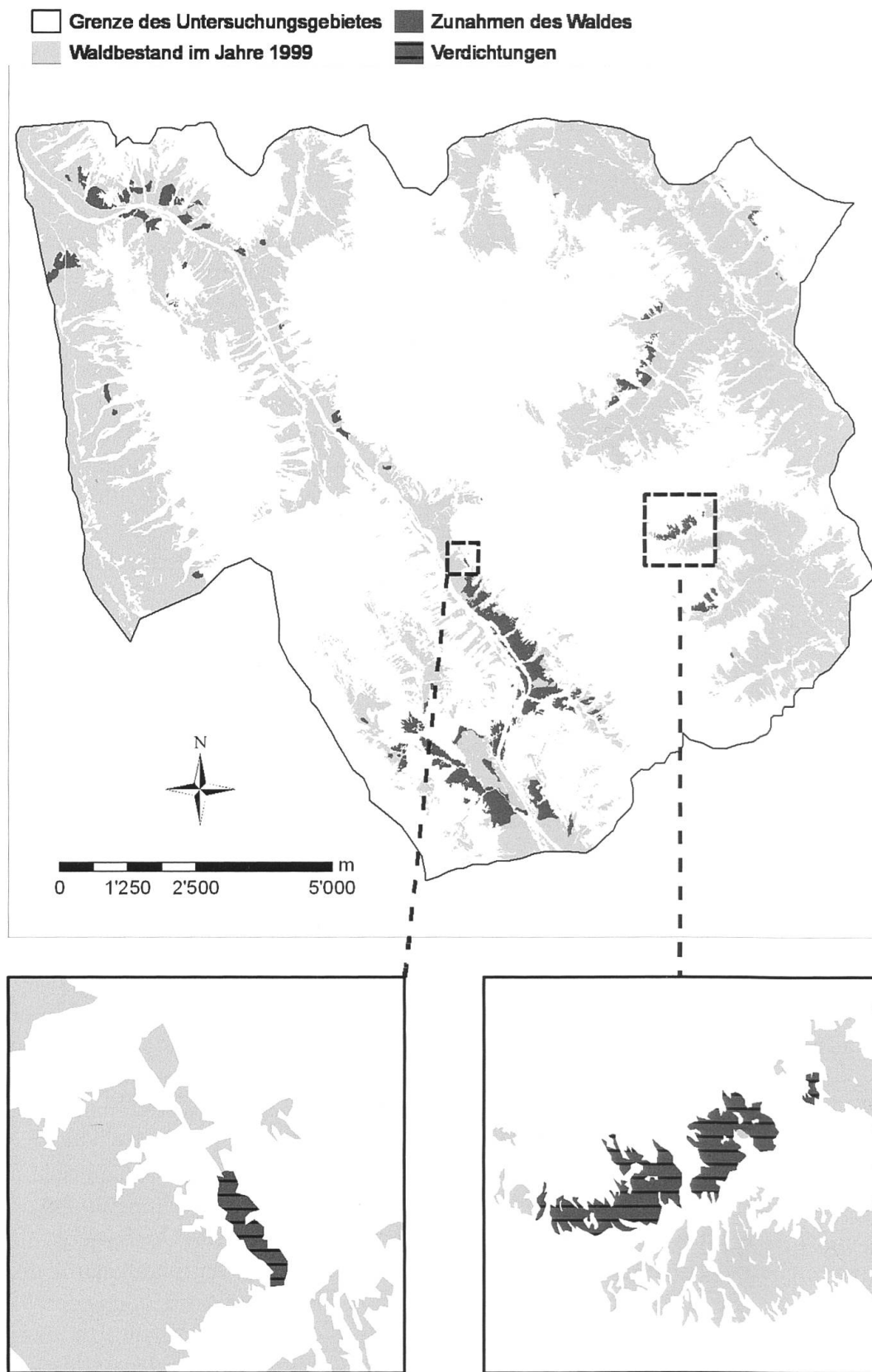


Abb. 5 Verdichtungen an der Waldgrenze im Kananaskis Country. Deutlich erkennbar sind die zahlreichen Zunahmen im Süden und im Norden, welche auf die angesprochenen Brände zurückzuführen sind (Daten: © Government of Alberta). *Autor: Tobias Providoli*

## Literatur

- AENR 1984. *Ecological land classification and evaluation*. Alberta Energy and Natural Resources, Edmonton, 1–111.
- Albertz J. 2009. *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Darmstadt, 1–254.
- Baumann H. 1953. *Forstliche Luftbild-Interpretation*. Tübingen, 1–109.
- Gardner J.S., Smith D.J. & Desloges J.R. 1983. *The dynamic geomorphology of the Mt. Rae area: a high mountain region in southwestern Alberta*. Waterloo, 1–237.
- Holtmeier F.-K. 1985. Die klimatische Waldgrenze – Linie oder Übergangssaum (Ökoton)? *Erdkunde* 39: 271–285.
- Holtmeier F.-K. & Broll G. 2005. Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography* 14: 395–410.
- Johnson E.A. & Larsen C.P.S. 1991. Climatically induced change in fire frequency in the southern Canadian Rockies. *Ecology* 72: 194–201.
- Körner C. 2003. *Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Berlin, 1–344.
- Luckman B.H. 1990. Mountain areas and global change: a view from the Canadian Rockies. *Mountain Research and Development* 10: 183–195.
- van der Meer M., Hagedorn F., Schweingruber F.H., Rigling A. & Moiseev P.A. 2004. Dynamik der alpinen Waldgrenze im südlichen Ural (Russland). *Erde* 135: 151–174.

## Link

 [http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.GHCN\\_Daily/.version1/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.GHCN_Daily/.version1/)

