



Projektbericht

# Verbesserung der Beurteilung der Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung durch Modellierung von Massenbewegungsprozessen (GRAVIPROMOD)

---

Institut für Naturgefahren  
Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft  
Hofburg - Rennweg 1  
6020 Innsbruck

Januar, 2015





Institut für Naturgefahren

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft

Hofburg - Rennweg 1  
6020 Innsbruck

---

**Projektbericht:** Verbesserung der Beurteilung der Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung durch Modellierung von Massenbewegungsprozessen (GRAVIPROMOD)

**Projekt-Nr.:** BMLFUW-LE.1.3.7/0021-II/5/2012

**Autoren:** Andreas Huber, Frank Perzl, Reinhard Fromm

Projektsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft im Rahmen der technischen Hilfe des österreichischen Programms LE 07-13 mit Unterstützung von Bund, Ländern und der Europäischen Union.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziele . . . . .	1
1.2	Herangehensweise . . . . .	2
1.3	Struktur des Berichts . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Modul "Prozess"</b>	<b>3</b>
2.1	Dispositionsanalyse . . . . .	3
2.1.1	Steinschlag . . . . .	3
2.1.2	Lawine . . . . .	4
2.2	Berechnung potentieller Prozesszonen . . . . .	6
2.2.1	Steinschlag . . . . .	9
2.2.2	Lawine . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Modul "Wald mit Objektschutzfunktion"</b>	<b>15</b>
3.1	Konzeptioneller Ansatz . . . . .	15
3.2	Bestimmung des Waldes mit Objektschutzfunktion . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Modul "Implementierung"</b>	<b>19</b>
4.1	Preprocessing . . . . .	19
4.2	Reichweitenmodellierung & Rückrechnung . . . . .	20
4.3	Postprocessing . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>29</b>
5.1	Beispiel . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Synthese und Ausblick</b>	<b>33</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	33
6.2	Ausblick . . . . .	33



# 1. Einleitung

In Österreich gibt es zwei forstliche Raumpläne mit der Aufgabe Informationen über den Schutzwald und die Naturgefahren bereit zu stellen: den Waldentwicklungsplan (WEP) und den Gefahrenzonenplan (GZP). Der WEP ist die Grundlage für die Planung von Maßnahmen zur Pflege und Sanierung des Schutzwaldes. Durch die Forstgesetz-Novelle 2002 wurde der Schutzwald in Österreich in zwei Kategorien eingeteilt: (i) in den Wald mit Objektschutzwirkung (direkter Schutz von Objekten) und (ii) in den Wald mit Standortsschutzwirkung (Erhaltung von Bewuchs und Boden, indirekter Schutz).

Im WEP wird die Schutzwaldkulisse in Form von Schutzfunktionsflächen dargestellt. Der durch alpine Naturgefahren akut gefährdete Siedlungsraum wird im GZP erfaßt. Potenzielle Startflächen und Prozessräume von Naturgefahren in den Waldfunktionsflächen, sowie davon ausgehende Schadenspotenziale werden aber nicht gesondert dargestellt. Der Wald mit Objektschutzwirkung wird nach der derzeit gültigen Planungsrichtlinie (Schima und Singer, 2012) im WEP als Flächenanteil der Waldfunktionsfläche und der Waldfläche angegeben. Dieser wurde bisher nicht im gesamten Bundesgebiet kartiert.

Im Zuge der technischen Hilfe im Rahmen des Programms LE 2007-2013 wurde das Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) damit beauftragt eine zusätzliche Grundlage zur Beurteilung der Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung auszuarbeiten. Dies beinhaltet insbesondere die Entwicklung eines Modells zur großflächigen, weitgehend automatisierten, Ausweisung der Waldflächen mit Objektschutzfunktion gegenüber den Prozessen Steinschlag und Lawine. Der vorliegende Bericht dokumentiert die Arbeiten, welche im Zuge des Projektes "Verbesserung der Beurteilung der Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung durch Modellierung von Massenbewegungsprozessen" (Projekt-Nr.: BMLFUW-LE.1.3.7/0021-II/5/2012 - im folgenden kurz GRAVIPROMOD) durchgeführt wurden und präsentiert und diskutiert die erzielten Ergebnisse.

## 1.1 Ziele

Ziel von GRAVIPROMOD ist es einen Ansatz zur automatisierten Ausweisung bzw. Modellierung von Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion gegenüber Steinschlag und Lawinen zu entwickeln und anzuwenden. Insbesondere beinhaltet der Arbeitsablauf die *Modellierung bzw. Ausweisung möglicher Startzonen* für die Prozesse und daran gekoppelt die *Modellierung potentieller Prozesszonen*, d.h. der Auslauflängen und lateralen Prozessausbreitung. Zusätzlich wird im entwickelten Ansatz die Funktionalität berücksichtigt, potentiell gefährdete Objekte zu identifizieren und von den betroffenen Objekten auf die das Objekt gefährdenden Anbruchgebiete und Prozesszonen rückzuschließen.

Das Ergebnis der Modellierung ist eine kartographische Darstellung (auf Ebene einer "Gefahrenpotentialhinweiskarte") jener Waldflächen, welche sich im Bereich von potentiellen Steinschlag und Lawinenprozesszonen (d.h. Anbruchgebiete, Sturzbahnen, Ablagerungsgebiete) befinden und durch ihre Existenz möglicherweise Schäden an bestehender Infrastruktur ganz verhindern bzw. zumindest abmildern können (Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion gegenüber den betrachteten Massenverlagerungsprozessen). Die Modellierung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion soll für ganz Österreich erfolgen. Das entwickelte Modell sieht zudem die Funktionalität zur gesonderten Ausweisung verschiedener Objektschutzwaldklassen (z.B. angelehnt an die WEP-Richtlinie) vor.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich die hier vorgestellten Modelle und Modellierungsansätze auf eine Identifikation von Waldflächen mit möglicher Objektschutzfunktion<sup>1</sup> beschränken. Eine Aussage über die tatsächliche Schutzwirkung einzelner Waldbestände zu treffen ist nicht Ziel des vorgestellten Projektes.

## 1.2 Herangehensweise

Der konzeptionelle Ansatz zur Ausweisung von Waldflächen mit direkter Schutzfunktion in GRAVIPROMOD kann in folgende Schritte eingeteilt werden: (i) Dispositionsanalyse, (ii) Prozessmodellierung, (iii) Identifikation von gefährdeter Infrastruktur und (iv) Ausweisung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion (siehe auch Abschnitt 3.1 des Berichts).

Die Modellierung im Zuge von GRAVIPROMOD erfolgt auf Ebene einer Gefahrenhinweiskarte (Gefahrenpotenzialkarte). Die digitalen Projektresultate bzw. Karten werden im Rasterformat zur Verfügung gestellt. Die Rasterzellweite beträgt 10 m, der intendierte Maßstab für die Interpretation der Ergebnisse ist im Sinne einer Gefahrenhinweiskarte maximal 1:10.000 bis 1:50.000. Im Gegensatz zum Ansatz einer vollständig automatischen Modellierung der Schutzwaldfläche (z.B. SilvaProtect-CH - vgl. Giamboni, 2008) soll diese Modellierung als zusätzliche Entscheidungsgrundlage die bisherige WEP-Kartierung unterstützen und ergänzen. Dadurch soll der Informationsgehalt des WEP noch weiter erhöht und eine erweiterte Schnittstelle zur Gefahrenzonenplanung ermöglicht werden.

## 1.3 Struktur des Berichts

Die Gliederung des Berichtes ist zum Zweck der einfacheren Nachvollziehbarkeit an die im Proposal und Werkvertrag vom 8.12.2012 definierten Module angelehnt. Kapitel 2 beschreibt die verwendeten Ansätze zur *Dispositionsanalyse* sowie zur *Prozessmodellierung*. Kapitel 3 befasst sich mit der *Ausweisung von Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion* im Modell während Kapitel 4 sich mit der technischen *Implementierung* der zuvor vorgestellten Konzepte sowie der Anwendung des entwickelten Modells beschäftigt. In Kapitel 5 werden exemplarisch Ergebnisse der Modellierung präsentiert und diskutiert und Kapitel 6 liefert eine Zusammenfassung und bietet einen Ausblick auf mögliche weiterführende Ideen und Arbeiten.

<sup>1</sup>Die beiden Begriffe (*Objekt*)*schutzfunktion* und (*Objekt*)*schutzwirkung* werden in Österreich zumeist synonym verwendet (Perzl, 2014). Um Ambiguitäten hinsichtlich dieser Begriffe zu vermeiden wird im Rahmen dieses Berichtes zwischen den beiden Begriffen unterschieden. Der Begriff der *Objektschutzfunktion* bezieht sich auf die Aufgabe des Waldes Objekte vor Naturgefahren zu schützen, und der Begriff *Objektschutzwirkung* auf die Art und Weise sowie das Ausmaß der schützenden Wirkung durch den Wald. Im Gegensatz zur *Objektschutzfunktion* ist die *Objektschutzwirkung* des Waldes vom tatsächlichen Zustand des Waldes abhängig.

## 2. Modul "Prozess"

Im Zuge von GRAVIPROMOD werden die gravitativen Massenverlagerungsprozesse Schneelawine und Steinschlag betrachtet. Für die regionale Ausweisung von potentiellen Prozesszonen (d.h. Anbruchgebiete sowie Transitzone/Sturzbahn und Ablagerungsgebiete) sind zwei methodische Schritte notwendig. Zuerst müssen mögliche Anbruchgebiete für Steinschlag und Lawinen identifiziert werden (*Dispositionsanalyse*) um danach die, ausgehend von den ausgewiesenen Anbruchflächen, möglichen betroffenen Prozesszonen zu bestimmen (*Prozessmodellierung*).

### 2.1 Dispositionsanalyse

Für das in GRAVIPROMOD entwickelte und verwendete Modell zur Ausweisung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion gegenüber Steinschlag und Lawine sind als Eingangsdaten unter anderem die Dispositionsflächen für den jeweiligen Prozess notwendig. Die Dispositionsflächen geben an, ob für eine bestimmte Fläche eine erhöhte Suszeptibilität gegenüber der Auslösung von Lawinen und Steinschlag besteht, d.h. ob es sich um potentielle Anbruchgebiete bzw. Auslöseflächen für die beiden Prozesse handelt.

#### 2.1.1 Steinschlag

Die Auslösung von Steinschlag wird zumeist von einer Vielzahl an externen Faktoren und internen Parametern beeinflusst (Volkwein et al., 2011). Unter anderem können die Morphologie (z.B. Neigung, Ausrichtung), Geologie und die mechanischen Eigenschaften des Gesteins als inhärente Eigenschaften identifiziert werden, welche die Grunddisposition von Felsstrukturen gegenüber Steinschlag beeinflussen. Externe Faktoren, wie gravitative Effekte, Verwitterung und Erosion oder mikroklimatische Bedingungen können zudem weitere treibende Faktoren darstellen.

Während es für eine Charakterisierung von Steinschlaganbruchsflächen auf lokalem Maßstab (z.B. Beurteilung eines einzelnen Hangbereiches) möglich ist, sehr detaillierte Informationen in die Ausweisung der möglichen Anbruchsflächen miteinfließen zu lassen, muss für eine Dispositionsanalyse auf überregionalem oder nationalem Maßstab auf bereits verfügbare Datengrundlagen zurückgegriffen werden.

Im Hinblick auf die Zielvorgabe der Modellierung für das gesamte österreichische Bundesgebiet wird in GRAVIPROMOD deshalb ein einfacher, auf Grenzneigungswinkeln basierender, empirisch-statistischer Ansatz zur Ausweisung potentieller Steinschlagauslöseflächen verwendet (z.B. Toppe, 1987; Frattini et al., 2008; Proske et al., 2011; Clouet et al., 2012). Dabei ist es das Ziel anstehende Felsflächen, Schutt- und Geröllhalden und Böden mit hohem Grobskelettanteil zu identifizieren, von denen sich potentiell Steine lösen können. Im Hinblick auf mögliche Sekundärauslösungen aus bewaldeten Flächen (z.B. durch das Lösen von Steinen aus dem Wurzelteller entwurzelter Bäume oder im Zuge von Waldarbeiten) werden auch diese Flächen im Wald mit berücksichtigt.

Der verwendete Ansatz basiert auf den Grenzneigungswinkeln für in Niederösterreich auftretende geologische Großeinheiten nach Proske und Bauer (2013). Für das vorliegende Projekt wurden an Hand der für ganz Österreich verfügbaren geologischen Übersichtskarte im Maßstab 1:500.000 Grenzneigungswinkel (GNW) für die verschiedenen geologischen Einheiten in Anlehnung an Proske und Bauer (2013) definiert (vgl. Tab. 2.1).

Da sich die von Proske und Bauer (2013) vorgestellten GNW auf ein Geländemodell mit einer Auflösung von 1 m beziehen (Proske et al., 2011), musste eine Anpassung an das in GRAVIPROMOD verwendete Höhenmodell mit 10 m Auflösung vorgenommen werden. Da in einem feiner aufgelösten Höhenmodell im Vergleich zu gröber aufgelösten Modellen steilere Flächen stärker repräsentiert werden, müssen für das gröber aufgelöste Modell tendenziell kleinere GNW angesetzt werden, um den gleichen proportionalen Flächenanteil an möglichen Auslöseflächen zu erhalten wie im feiner aufgelösten Modell. Clouet et al. (2012) schlagen deshalb für die Ausweisung von Steinschlaganbruchsflächen einen pauschalen, nur von der DHM-Auflösung abhängigen Grenzneigungswinkel vor (vgl. Abb. 2.2). Da in GRAVIPROMOD zwischen verschiedenen geologischen Haupteinheiten unterschieden wird, erfolgt eine Anpassung der unterschiedlichen Grenzwerte auf das 10m Modell nach Abb. 2.1. Die in Abb. 2.1 ersichtlichen Isolinien wurden aus einem systematischen Vergleich des Anteils der Auslöseflächen für verschiedene Neigungsgrenzwerte und Höhenmodellauflösungen für das Landesgebiet von Vorarlberg abgeleitet. In Tabelle 2.1 sind die angepassten Neigungsgrenzwerte für verschiedene geologische Einheiten, wie sie in GRAVIPROMOD verwendet werden, angeführt. Zusätzlich zu den Neigungsgrenzwerten für verschiedene geologische Einheiten wurde zudem ein eigener Grenzwert für bewaldete Gebiete verwendet, um wie erwähnt mögliche Sekundärauslösungen aus steilen Waldbereichen mit zu berücksichtigen. Die so identifizierten Steinschlag-Dispositionsflächen sind in Kapitel 4 in einer Übersicht dargestellt.

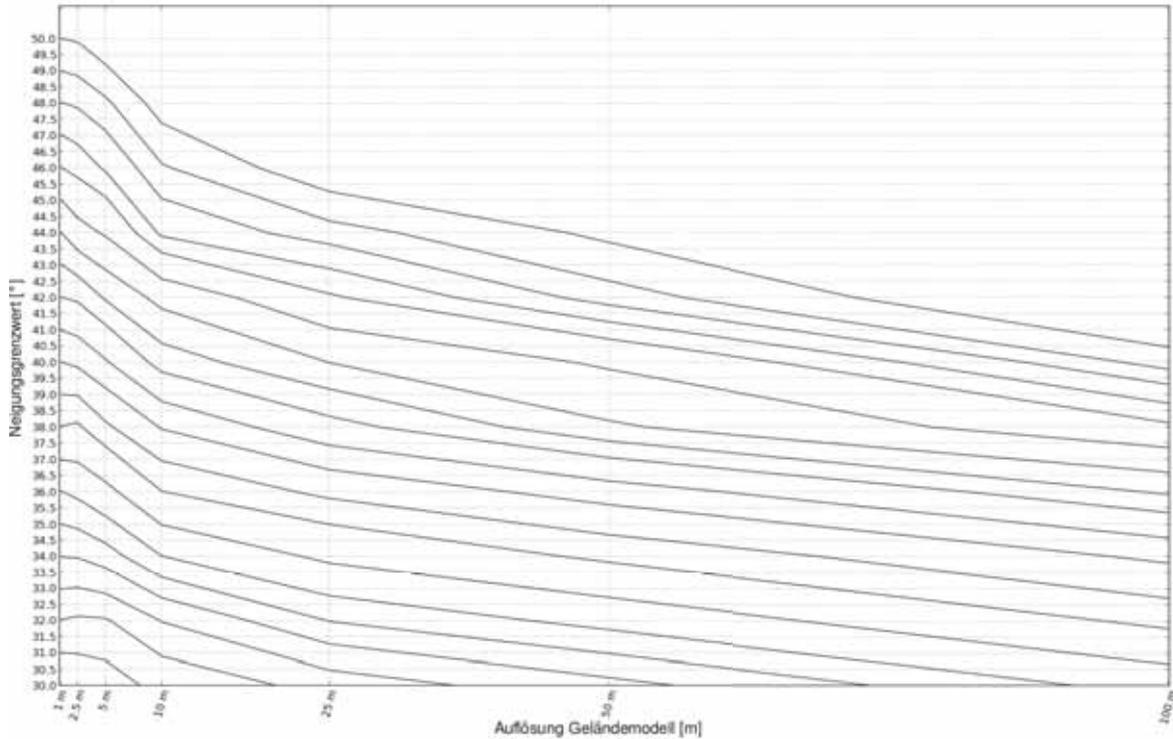
### 2.1.2 Lawine

Die Auslösung von Lawinen hängt in der Realität vom komplexen Zusammenspiel mehrerer Einflussfaktoren ab. Diese Parameter können nach Schweizer et al. (2003) grob in drei Klassen eingeteilt werden: (a) Geländeparameter, wie Hangneigung, Exposition, Wölbung, Oberflächenrauigkeit und Vegetationsbedeckung; (b) meteorologische Parameter wie Niederschlag, Wind, Lufttemperatur und -feuchte; und (c) Schneedeckenparameter wie etwa das Vorhandensein von Schwachschichten, die Bindung zwischen den einzelnen Schneeschichten, sowie das Vorkommen von freiem Wasser in der Schneedecke und mikroskopische Eigenschaften (Korngrößen und Kornformen).

Die Dispositionsanalyse für Schneelawinen in GRAVIPROMOD stützt sich vor allem auf Geländeparameter. Diese werden für die Zwecke von GRAVIPROMOD als stationär (d.h. über einen längeren Zeitraum konstant) betrachtet und sind gut aus flächendeckend verfügbaren Digitalen Geländemodellen (DGM) ableitbar. Die Idee zur automatisierten Bestimmung bzw. Charakterisierung von potentiellen Anbruchflächen (**potential release areas - PRAs**) für Lawinen auf Basis verfügbarer digitaler Höhendaten (und abgeleiteter Daten) ist nicht neu und Ansätze dazu wurden bereits von verschiedenen Autoren präsentiert (z.B. Maggioni, 2005; Rauter, 2005; Falkner, 2009; Vontobel, 2011; Bühler et al., 2013). Die Anzahl der aus dem Höhenmodell abgeleiteten Parameter, welche für die Bestimmung der PRAs herangezogen wurden, variiert zwischen den publizierten Methoden ebenso wie die für die Parameter verwendeten Grenzwerte sowie die räumliche Auflösung der zu Grunde liegenden Höhendaten. Aus diesem Grund sind publizierte Grenzwerte nicht ohne weiteres übertragbar, da die Datensätze auf denen sie beruhen oft regional und zeitlich eingeschränkt sind.

**Tabelle 2.1:** Grenzneigungswinkel (GNW) für die Bestimmung der Dispositionsflächen für Steinschlag. Die Werte für das Höhenmodell mit 1m Auflösung wurden an Hand der Abb. 2.1 auf GNW für das DHM mit 10m "übersetzt". Rundung der 10m GNW jeweils auf die nächstkleinere Ganzzahl (Werte nach Abb. 2.1 in Klammer)

Geologische Einheiten KM500			GNW[°]	
F_ID	UEBER1_DE	LITHOL_DE	1m	10m
1	Böhmische Masse	Amphibolit	50	47 (47.4)
9	Böhmische Masse	Granitoid (Südböhmischer Pluton)	50	47 (47.4)
14	Böhmische Masse	Granulit	50	47 (47.4)
8	Böhmische Masse	Klastika (Perm)	50	47 (47.4)
13	Böhmische Masse	Marmor	50	47 (47.4)
63	Böhmische Masse	Migmatit	50	47 (47.4)
11	Böhmische Masse	Orthogneis	50	47 (47.4)
10	Böhmische Masse	Paragneis, Glimmerschiefer	50	47 (47.4)
15	Böhmische Masse	Ultrabazit	50	47 (47.4)
17	Helvetische Zone i.w.S.	Lieben-/Feuerstein Decke	42	39 (39.7)
16	Helvetische Zone i.w.S.	Kontinentalrandsediment	38	36 (36.0)
46	Ostalpine Einheiten (Kristallin)	Amphibolit	50	47 (47.4)
43	Ostalpine Einheiten (Kristallin)	Granitoid	50	47 (47.4)
	Ostalpine Einheiten (Karbonat)	Karbonatgestein	42	39 (39.7)
	Ostalpine Einheiten	Klastika	42	39 (39.7)
	Ostalpine Einheiten (Altkristallin)	Kristallin	50	47 (47.4)
47	Ostalpine Einheiten (Altkristallin)	Marmor	50	47 (47.4)
45	Ostalpine Einheiten (Altkristallin)	Orthogneis	50	47 (47.4)
44	Ostalpine Einheiten (Altkristallin)	Paragneis	48	45 (45.0)
39	Ostalpine Einheiten	pelitisch-psammitisches Sediment	46	43 (43.4)
37	Ostalpine Einheiten	Phyllit, Metaklastika, Metavulkanit	47	44 (44.0)
	Ostalpine Einheiten	Porphyroid	47	44 (44.0)
58	Ostalpine Einheiten	Quarzphyllit	44	41 (41.7)
	Ostalpine Einheiten	Siliziklastika	44	41 (41.7)
48	Ostalpine Einheiten (Kristallin)	Ultrabazit	50	47 (47.4)
41	Ostalpine Einheiten	Vulkanit	50	47 (47.4)
	Penninische Einheiten		46	43 (43.4)
31	Penninische Einheiten	Amphibolit	47	44 (44.0)
23	Penninische Einheiten	Eklogit	47	44 (44.0)
22	Penninische Einheiten	Grünschiefer, Prasinit, Serpentin	47	44 (44.0)
	Penninische Einheiten	Metasediment	46	43 (43.4)
29	Penninische Einheiten	Metasediment, Metavulkanit	46	43 (43.4)
30	Penninische Einheiten	Migmatit, Anatexit, migmatischer Paragneis	47	44 (44.0)
19	Penninische Einheiten (Flyschzone)	Ophiolit	46	43 (43.4)
28	Penninische Einheiten	Orthogneis	47	44 (44.0)
21	Penninische Einheiten	Ozeanisches Metasediment	46	43 (43.4)
59	Periadriatische Intrusivgesteine	Ganggestein	48	45 (45.0)
52	Periadriatische Intrusivgesteine	Granitoid	48	45 (45.0)
53	Periadriatische Intrusivgesteine	Tonalit	50	47 (47.4)
	Quartär	(Alluvien, Gletscherschutt)	38	36 (36.0)
56	Südalpine Einheiten	Kalk, Feinklastika	42	39 (39.7)
54	Südalpine Einheiten	Karbonatgestein	43	40 (40.6)
55	Südalpine Einheiten	Klastika und Karbonatgestein	42	39 (39.7)
57	Südalpine Einheiten	Phyllit	47	44 (44.0)
60	Südalpine Einheiten	Porphyroid	47	44 (44.0)
	Tertiärbecken	(Molasse, Klippen)	46	43 (43.4)
6	Tertiärbecken	Andesit, Dazit, Trachyt	48	45 (45.0)
7	Tertiärbecken	Basalt, Basanit, Nephelinit, Tuff	48	45 (45.0)
	Waldflächen	Strauchwald, Hochwald	-	36 ()

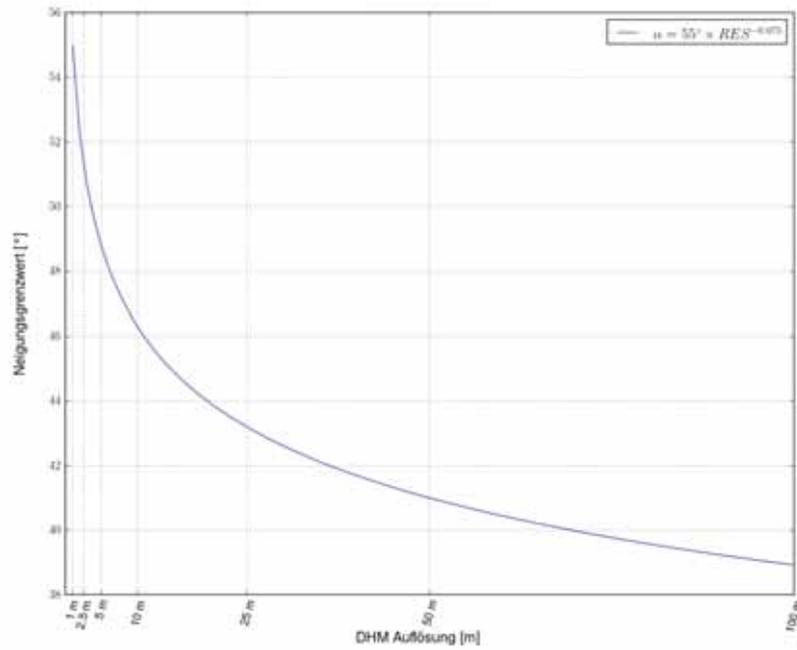


**Abbildung 2.1:** Isolinien für gleiche Flächenanteile (Auslöseflächen/Gesamtfläche) für verschiedene DHM-Auflösungen und Neigungsgrenzwerte. Um den gleichen Flächenanteil an Auslöseflächen zu erhalten müssen bei gröber aufgelösten DHMs tendenziell niedrigere Grenzwerte angesetzt werden (z.B.  $GNW_{1m} = 50^\circ \rightarrow GNW_{10m} \approx 47.5^\circ$ ). Ein Vergleich der Flächenanteile erfolgte für diskrete Schritte (d.h. für Höhenmodelle verschiedener Auflösung [1m, 2.5m, 5m, 10m, 25m, 50m, 100m] in Schritten zu jeweils  $2^\circ$  im Intervall  $30^\circ - 50^\circ$ ). Die dargestellten Isolinien entsprechen daraus interpolierten Werten.

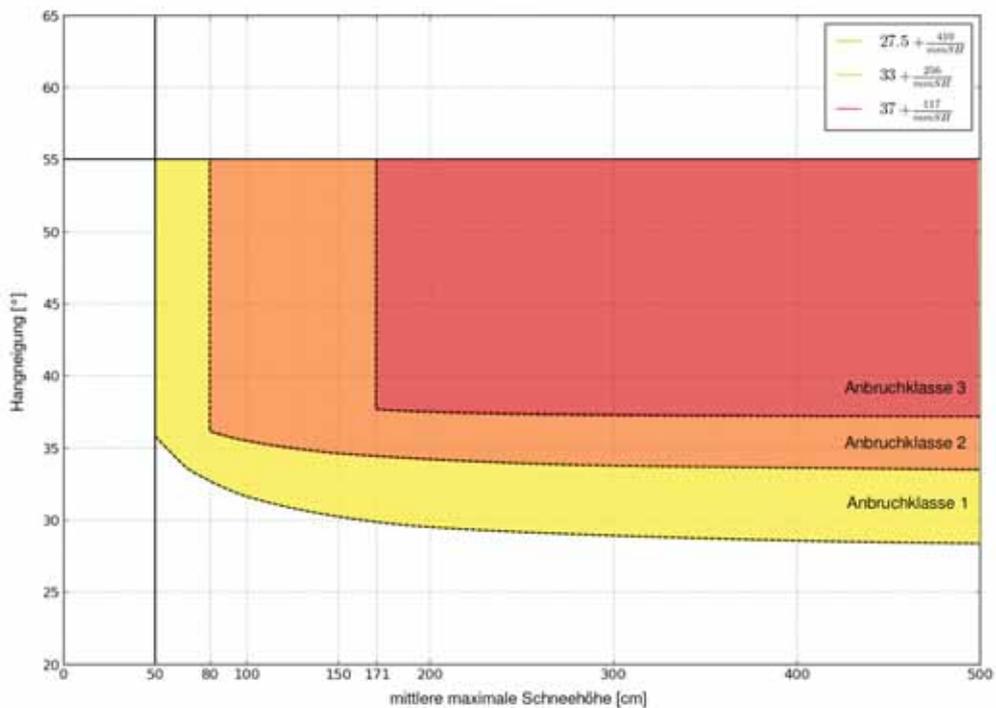
In GRAVIPROMOD wird zur Bestimmung der potentiellen Lawinenanbruchflächen ein im Zuge der technischen Hilfe am BFW entstandener Ansatz verwendet, welcher mögliche Lawinenanbruchgebiete basierend auf der Hangneigung und der mittleren maximalen Schneehöhe bestimmt (vgl. Perzl und Kammerlander, 2010; Perzl et al., 2011). An Hand der Analyse von dokumentierten Anbruchgebieten ergeben sich nach Abbildung 2.3 verschiedene Dispositionsklassen (siehe Tab. 2.2) für Schneelawinen. Eine Übersicht über die so modellierten Lawinendispositionsflächen für Österreich ist in Kapitel 4 zu finden.

## 2.2 Berechnung potentieller Prozesszonen

Im Anschluss an die Identifikation der potentiellen Anbruchgebiete (PRAs) bzw. Dispositionsflächen für die Prozesse Schneelawine und Steinschlag, erfolgt im nächsten Schritt eine Berechnung der Flächen welche potentiell (ohne Berücksichtigung der möglichen Waldschutzwirkung) durch Prozesse aus den Startzonen betroffen sein können (*Prozessmodellierung*). Für die Modellierung der Reichweiten und Intensitäten von Steinschlag und Lawinen existiert eine große Anzahl von unterschiedlichen Ansätzen und Modellen. Grundsätzlich kann dabei zwischen empirisch/statistischen und physikalisch/deterministischen Modellansätzen unterschieden werden.



**Abbildung 2.2:** Grenzwinkel für Steinschlagdispositionsflächen in Abhängigkeit der Auflösung des zu Grunde liegenden DHMs nach Clouet et al. (2012)



**Abbildung 2.3:** Dispositionsklassen in Abhängigkeit von Hangneigung und mittlerer maximaler Schneehöhe.

**Tabelle 2.2:** Beschreibung der Lawinendispositionsklassen nach Abb. 2.3

Dispositionsklasse	Eine Disposition für Lawinenanbrüche besteht ...
0	<b>sehr selten</b> bzw. für kleine Lockerschneerutsche in Lagen ab 55° Hangneigung und 10cm mmSH
1	<b>selten</b> ; in Lagen mit unter 80cm mmSH überwiegend für Nass- und Gleitschnee
2	<b>häufig</b> ; bereits ab Lawinenwarnstufe 2-3, v.a. ab Lawinenwarnstufe 4-5
3	<b>sehr häufig</b> ; bereits ab Lawinenwarnstufe 1-2; auch für große, trockene Schneebretter

Empirische Modelle ziehen, basierend auf statistischen Auswertungen beobachteter und gemessener Ereignisgrößen, Rückschlüsse auf zu erwartende Ereignisgrößen (z.B. Auslauflängen, Reichweiten). Physikalische Modelle basieren auf einer (mehr oder weniger vereinfachten) physikalischen Beschreibung der involvierten Prozessabläufe. In den letzten Dekaden wurde eine Vielzahl an Modellen für die Abschätzung von Auslauflängen, Prozessintensitäten und Prozessausbreitung für Lawinen und Steinschlag basierend auf diesen grundlegenden Konzepten entwickelt und angewendet (z.B. Lied und Bakkehoi, 1980; Perla et al., 1980; Christen et al., 2002; Sampl und Granig, 2009; Christen et al., 2010; Meissl, 1998; Stevens, 1998; Guzetti et al., 2002; Dorren, 2012, siehe auch Tab. 2.3 und 2.4).

Im Hinblick auf das Ziel, ein Modell für die Ausweisung von Objektschutzwaldflächen für ganz Österreich auf Ebene einer Gefahrenhinweiskarte zu entwickeln, bestanden für die Arbeiten in GRAVIPROMOD besondere Ansprüche:

- Die Anforderungen an das Modell hinsichtlich der benötigten Eingangsdaten, sowie der Kalibrierungsaufwand sollten für eine flächendeckende Anwendung möglichst gering sein, damit die entsprechenden Daten auch flächendeckend für ganz Österreich zur Verfügung gestellt werden können.
- Die Modellierung erfolgt auf regionalem bis nationalem Maßstab. Eine Anwendung des Modells sollte auch für große Gebiete auf handelsüblichen Rechnern vom Rechenaufwand noch möglich sein (Gesamtfläche Österreich:  $\simeq 80.000 \text{ km}^2$ ).
- Das entwickelte Modell muss die Funktionalität zur Rückrechnung von potentiell betroffenen Objekten auf die darüberliegenden Sturzbahnen und Anbruchgebiete bereitstellen (vgl. Giamboni, 2008; Perzl et al., 2011).

Die Anwendbarkeit bestehender Modelle in GRAVIPROMOD ist auf Grund dieser besonderen Anforderungen sehr limitiert. Die Anwendung von physikalisch-numerisch basierten Prozessmodellen, welche z.B. in der Gefahrenzonenplanung bzw. im Zuge der Planung von Schutzmaßnahmen zum Einsatz kommen (z.B. Sampl und Granig, 2009; Christen et al., 2010), ist auf regionalem Maßstab bzw. für größere Flächen problematisch. Zum einen ist der Rechenaufwand für diese Modelle im großflächigen Einsatz erheblich (vgl. Giamboni (2008)), zum anderen ist für die Anwendung dieser

Modelle meist eine beträchtliche Zahl an Eingangsparametern nötig. Der Aufwand zur Erfassung dieser Eingangsparameter und die dabei involvierten Unsicherheiten machen die Anwendung dieser Modelle für regionale und überregionale Fragestellungen ungeeignet (Horton et al., 2013). Für die Beurteilung verschiedener gravitativer Massenverlagerungsprozesse auf regionalem Maßstab sind in den letzten Jahren vermehrt relativ einfache, räumlich verteilte Modelle erfolgreich zum Einsatz gekommen (z.B. Zimmermann et al., 1997; Dorren und Seijmonsbergen, 2003; Barbolini et al., 2011; Jaboyedoff und Labiouse, 2011; Blahut et al., 2010; Fischer et al., 2012). Diese Modelle basieren zumeist auf einem empirischen oder einfachen physikalischen Algorithmus zur Reichweitenbestimmung in Kombination mit einem raster-basierten Ansatz zur Modellierung der Prozessausbreitung. Während diese bestehenden Modelle hinsichtlich des Parametrisierungs- und Rechenaufwandes grundsätzlich für die Fragestellungen in GRAVIPROMOD geeignet sind, ist den Autoren jedoch kein bestehendes Modell bekannt, welches die Funktionalität der automatisierten Rückrechnung von gefährdeten Objekten auf die darüberliegenden Prozesszonen bereitstellt. Eine proprietäre Lizenzierung (d.h. nicht quelloffene Codes im Sinne einer open-source Lizenzierung) vieler Modelle verhindert zudem die Anpassung und Erweiterung existierender Modell-Codes um die angesprochene Funktionalität. Aus diesem Grund wurde im Zuge von GRAVIPROMOD ein Modell entwickelt, welches die Funktionalität zur automatisierten Identifizierung von Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion durch eine Rückrechnung vom betroffenen Objekt auf die Prozesszone bereitstellt.

Im folgenden Abschnitt werden die für Steinschlag und Lawine verwendeten Ansätze zur Prozessmodellierung vorgestellt, die Rückrechnung von betroffenen Objekten auf die Sturzbahnen und Anbruchgebiete wird in Kapitel 3 besprochen.

### 2.2.1 Steinschlag

Die Ausweisung der Prozesszonen in GRAVIPROMOD kann in zwei separate Schritte gegliedert werden: (i) in einem ersten Schritt werden ausgehend von den identifizierten Anbruchflächen mögliche Prozesspfade berechnet, (ii) in einem zweiten Schritt erfolgt die Bestimmung der Prozessreichweiten oder Auslauflängen entlang dieser Pfade (vgl. Wichmann und Becht, 2005).

Die Auslauflängenberechnung entlang der Prozesspfade erfolgt im Zuge des Projektes nach dem einfachen empirisch-topographischen Pauschalgefälle- bzw. Energielinienansatz nach Heim (1932). Dabei wird die Auslauflänge entlang einer vordefinierten Prozesstrajektorie bzw. eines bekannten Profils geometrisch als der Schnittpunkt einer, unter einem definierten Winkel (Pauschalwinkel) geneigten, vom Anbruchpunkt ausgehenden, Geraden mit dem Profil der Sturzbahn definiert. Nach Heim (1932) bezeichnen die Begriffe der Fahrböschung und des geometrischen Gefälles die Steigung dieser Geraden, welche vom obersten Punkt des Anrissgebietes bis zum tiefsten Punkt der Prozessablagerung gezogen wird. Während das geometrische Gefälle als Neigung der geometrisch kürzestmöglichen Geraden zwischen den beiden Punkten definiert ist, wird die Fahrböschung entlang der (möglicherweise gekrümmten) Prozesstrajektorie bestimmt. Daraus lässt sich schließen, dass der Wert für die Fahrböschung je nach Geometrie der Sturzbahn stets kleiner oder gleich dem Wert für das geometrische Gefälle sein muss (vgl. Abb. 2.4). Bei relativ geradlinigen Prozessen, welche keine stark gekrümmten Sturzbahnen aufweisen, ist der Unterschied zwischen beiden Winkeln jedoch sehr klein (Meissl (1998) stellt z.B. für Felsstürze in Tirol und Bayern nur Unterschiede zwischen beiden Winkeln im Bereich  $\leq 1^\circ$  fest, was vermutlich im Bereich der Messungenauigkeiten angesiedelt ist, weshalb für Steinschlag beide Werte als annähernd gleich betrachtet werden können).

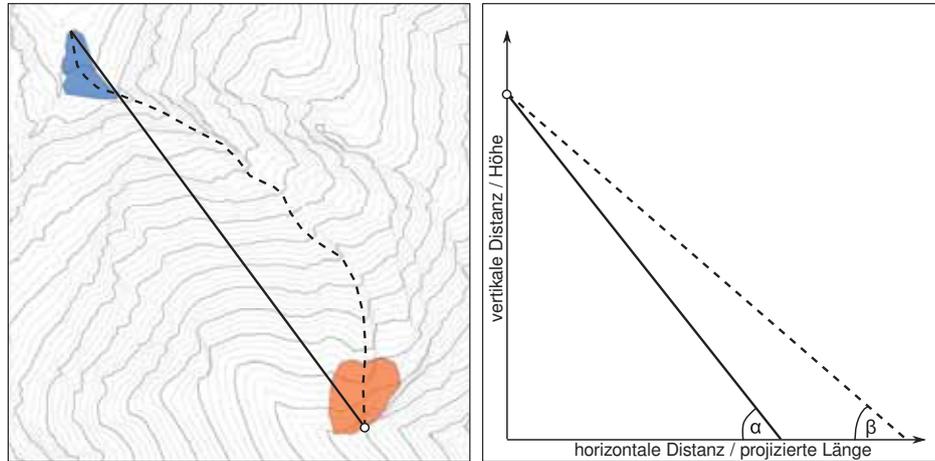
Als mögliche Ansatzpunkte für den Pauschalwinkel bzw. die Energielinie wird zumeist die obere Kante oder der Schwerpunkt der Anbruchfläche herangezogen. Im Falle der Modellierung im Zuge von GRAVIPROMOD, welche auf Rasterdaten mit einer Zellgröße von  $10m \times 10m$  basiert, ist dieser Unterschied jedoch nicht relevant, es werden jeweils die Zellmittelpunkte als Referenzpunkte herangezogen.

Neben dem geometrischen Gefälle und der Fahrböschung wird für den Prozess Steinschlag auch oft der sog. Schattenwinkel als alternative Möglichkeit zur Bestimmung der möglichen Auslauflänge entlang einer Trajektorie verwendet. Der Schattenwinkel entspricht im Prinzip dem geometrischen Gefälle mit dem Unterschied, dass als oberer Bezugspunkt der Fuß der betrachteten Felswand (d.h. der untere Rand der Anbruchfläche) herangezogen wird (vgl. Evans und Hungr, 1993; Meissl, 1998) (siehe Abb. 2.5). Dieser Ansatz eignet sich vor allem für Felssturz, wenn die potentiellen Auslöseflächen steile und hohe, wenig gegliederte Felsflächen sind (z.B. Klippen, Steilwände). Mayer & von Poschinger (2005) (zitiert aus: LfU, 2010) empfehlen die Verwendung des Schattenwinkels, wenn das Verhältnis aus dem Tangens des Schattenwinkels (bzw. der Höhendifferenz des Schuttkegels) und dem Tangens des geometrischen Gefälles (bzw. der Höhendifferenz zwischen der Obergrenze der Auslösungsfläche und dem unteren Rand des Schuttkegels) kleiner als 0.88 ist. Diese Entscheidungshilfe ist jedoch nicht ohne weiteres für großflächige Fragestellungen anwendbar (Schuttkegel sind nicht zwangsläufig existent oder in ihrer Lage und Ausdehnung ohne genaue Erhebungen im Feld bestimmbar), weshalb von der Anwendung des Schattenwinkels in GRAVIPROMOD Abstand genommen wurde.

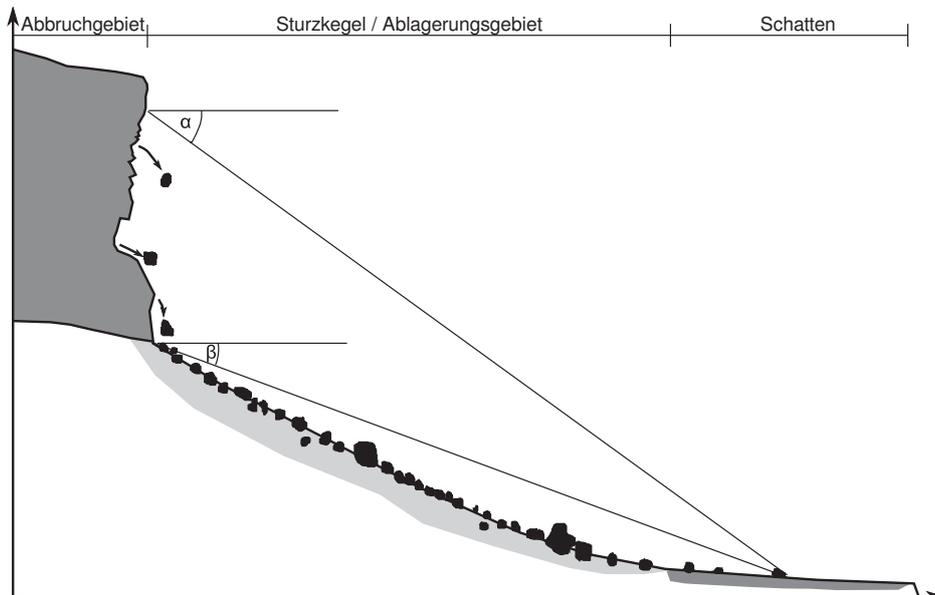
Für die Bestimmung der Prozessausbreitung bzw. der einzelnen Trajektorien, entlang derer die Auslauflängen bestimmt werden, wird im Zuge von GRAVIPROMOD für Steinschlag der bekannte D-8 Algorithmus nach O'Callaghan und Mark (1984) verwendet. Dabei ergibt sich die Prozesstrajektorie jeweils entlang des steilsten Pfades ausgehend von einer definierten Startzelle (der Algorithmus folgt ausgehend von der Startzelle jeweils dem steilsten negativen Gradienten zu einer der 8 verfügbaren Nachbarzellen, deshalb auch D-8 für "deterministic 8"). Das für Steinschlag verwendete Modell gleicht somit im Prinzip dem von Klebinder et al. (2009) vorgestellten Modell, welches auch in Perzl et al. (2011) zur Anwendung kommt (ähnliche Modelle werden auch von Lied (1977); Evans und Hungr (1993); Meissl (1998); Jaboyedoff und Labiouse (2003); Loye et al. (2008) vorgestellt). Zusätzlich zum von Klebinder et al. (2009) vorgestellten Ansatz wurde jedoch in der Version für GRAVIPROMOD die Rückrechnung von betroffenen Objekten auf die entsprechenden Sturzbahnen und Startzellen mit berücksichtigt. So werden Prozesszonen, welche sich im Prozesspfad unterhalb des letzten getroffenen Objektes befinden, nicht mehr für die Ausweisung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion berücksichtigt und dem oberhalb liegenden Teil der Prozesszonen können zusätzlich noch verschiedene Objektklassen zugewiesen werden. Diese Funktionalität erlaubt es den relevanten Prozessbereich oberhalb gefährdeter Objekte zusätzlich noch zu klassifizieren (z.B. kann einer Steinschlagtrajektorie, welche eine Forststraße gefährdet eine andere Klasse zugewiesen werden, als einem Pfad, der potentiell ein Wohngebäude gefährdet).

### 2.2.2 Lawine

Auch für Lawinen wird im Zuge von GRAVIPROMOD der bereits angesprochene Pauschalneigungsansatz zur Bestimmung der möglichen Auslauflängen entlang der Prozesspfade verwendet. Der Ansatz wurde erstmals von Körner (1975) auch für Lawinen verwendet. Im Gegensatz zu Steinschlag werden jedoch für Lawinen tendentiell kleinere Pauschalwinkel beobachtet. Weiters ist im Gegensatz zu Steinschlag bzw. Sturzprozessen bei größeren Lawinen auf Grund der oft gekrümmten Sturzbahn



**Abbildung 2.4:** Geometrisches Gefälle ( $\alpha$ ) und Fahrböschung ( $\beta$ ) am Beispiel eines gekrümmten Lawinpfades (rot=Anrissgebiet, blau=Ablagerungsgebiet). Es gilt stets:  $\beta \leq \alpha$ . Während  $\alpha - \beta$  für kleinere Prozesse mit gerader Sturzbahn typischerweise sehr klein ist, kann der Unterschied für größere Prozesse mit gekrümmter Sturzbahn durchaus signifikant sein.



**Abbildung 2.5:** Geometrisches Gefälle ( $\alpha$ ) und Schattenwinkel ( $\beta$ ) an Hand eines schematisierten Steinfall Prozessbereichs. (nach Meissl (1998))

**Tabelle 2.3:** Exemplarische Auflistung publizierter Modelle zur Berechnung von Steinschlagprozessonen basierend auf unterschiedlichen Ansätzen

Autor	Modellansatz	Dim.	Anmerkung
Meissl (1998)	empirisch-topographisch	2.5-D	Schattenwinkelmodell mit GIS Ausbreitungsalgorithmus
Meissl (1998)	physikalisch	2.5-D	1-Parameter Reibungsmodell
Dorren (2012)	physikalisch	3-D	RockyFor3D
Dorren und Seijmonsbergen (2003)	physikalisch	2.5-D	Rocky1,2,3
Wichman und Becht (2006)	empirisch, physikalisch	2.5-D	
Guzetti et al. (2002)	physikalisch	3-D	STONE
Jaboyedoff und Labiouse (2011)	empirisch-topographisch	2.5-D	CONEFALL

mit größeren Abweichungen von Fahrböschungswinkel und geometrischem Gefälle zu rechnen (vgl. Perzl et al. (2011)). Im vorgestellten Modell wird für die Bestimmung der Auslauflänge entlang des Lawinenpfades der Fahrböschungswinkel herangezogen.

Für die Bestimmung der Reichweite von Lawinen entlang definierter Trajektorien bzw. Längsprofile wurden von mehreren Autoren auch adaptierte Versionen des Pauschalgefälleansatzes entwickelt und angewendet. Eine solche adaptierte Version des Pauschalgefälleansatzes stellt z.B. das bekannte  $\alpha/\beta$  Modell nach Lied und Bakkehøi (1980) dar, welches ursprünglich an Hand von Norwegischen Daten entwickelt und von Lied et al. (1995) auch für Lawinen in Österreich kalibriert wurde. Der Grundgedanke hinter dem Modell ist es, den Fahrböschungswinkel  $\alpha$  in Abhängigkeit der Geometrie des Längsprofiles des Lawinenpfades zu bestimmen. Der Winkel  $\beta$  wird dazu als Maß für die Topographie des Lawinenlängsprofils herangezogen.  $\beta$  ist dabei als Winkel von der Anrisszone bis zum Punkt in der Sturzbahn (" $\beta$ -Punkt"), bei dem das Gefälle zum ersten Mal  $10^\circ$  unterschreitet, bestimmt. Mit Hilfe einer Regressionsfunktion lässt sich dann der Fahrböschungswinkel  $\alpha$  als Funktion  $f_{(\beta)}$  berechnen. Ein ähnlicher Ansatz den Pauschalneigungswinkel in Abhängigkeit von Charakteristika des Lawinenpfades zu bestimmen, wird von Barbolini et al. (2011) vorgeschlagen. Die Autoren bestimmen den Fahrböschungswinkel dabei basierend auf einer Regression  $f_{(\gamma, Z_{max})}$ , wobei  $\gamma$  die durchschnittliche Neigung und  $Z_{max}$  die maximale Seehöhe des Anbruchgebietes bezeichnet. Im Hinblick auf eine automatisierte, flächendeckende Anwendung des  $\alpha/\beta$ -Modells hat sich jedoch die automatisierte Definition geeigneter  $\beta$ -Punkte als schwierig erwiesen, da es entlang eines Lawinenpfades mehrere Punkte geben kann an denen das Gefälle unter  $10^\circ$  abflacht, was die automatisierte Auswahl eines eindeutigen, repräsentativen  $\beta$ -Punktes erschwert. Auch der Ansatz von Barbolini et al. (2011) kann nicht ohne weiteres für Österreichische Verhältnisse übernommen werden, weshalb für die Modellierung in GRAVIPROMOD auch für Lawinen der Ansatz eines fixen Pauschalgefälles zur Anwendung kommt.

Ähnlich wie für die Modellierung von Sturzprozessen wurden die angesprochenen Ansätze von verschiedenen Autoren auch für Lawinen in Verbindung mit raster-basierten Algorithmen zur Prozessausbreitung bzw. automatisierten Ausweisung von Prozesszonen angewendet (z.B. Barbolini et al. (2011), Perzl et al. (2011)). Für die Modellierung der Prozessausbreitung von Lawinen wird in GRAVIPROMOD ein "Multiple-Flow" Ansatz verwendet. Im Gegensatz zu Single-Flow Algorithmen (z.B. D-8 nach O'Callaghan und Mark, 1984, siehe Steinschlagmodellierung), wird bei Multiple-Flow Algorithmen (z.B. Freeman, 1991; Quinn et al., 1991) der Abfluss ausgehend von einer Startzelle auf mehrere (in vielen Fällen alle) tiefergelegene Nachbarzellen verteilt. Je nach Gewichtung

**Tabelle 2.4:** Überblick über Lawinenmodelle

<b>Modell</b>	<b>Modellansatz</b>	<b>Dim.</b>
$\alpha/\beta$ -Modell (Lied und Bakkehøi, 1980)	empirisch	1-D
PCM-Modell (Perla et al., 1980)	physikalisch	1-D
AFRA (Barbolini et al., 2011)	empirisch-topographisch	2-D
AVAL-1D (Christen et al., 2002)	physikalisch	1-D
RAMMS (Christen et al., 2010)	physikalisch	2-D
SAMOS (Sampl und Granig, 2009)	physikalisch	2-D

einzelner Parameter im entsprechenden Algorithmus (z.B. Neigung zur tiefer gelegenen Zelle, Abweichung von der Hauptfließrichtung) können so sehr breite potentielle Abflusspfade modelliert werden. Dies spiegelt sich vor allem im Bereich konvexer Geländestrukturen wieder, wo mitunter die laterale Prozessausbreitung mit einem Multiple-Flow Algorithmus (z.B. nach Quinn et al., 1991) stark überschätzt werden kann (z.B. Huggel et al., 2003). Daher wurden von verschiedenen Autoren unterschiedliche Versionen von Multiple Flow Algorithmen entwickelt (z.B. Costa-Cabral und Burges, 1994; Tarboton, 1997). Auch im Modell, welches im Zuge von GRAVIPROMOD für die Ausweisung von Lawinenschutzwald entwickelt wurde, wird ein modifizierter Multi-Flow Ansatz verwendet, bei dem Abfluss aus einer Zelle jeweils an die Nachbarzelle mit dem steilsten Gradienten (wie beim D-8) sowie auch zu tieferliegenden Zellen mit einer maximalen Abweichung der Fließrichtung von 45° zur tiefsten Zelle (d.h. zur Zelle mit dem steilsten negativen Gradienten) erfolgt. Eine proportionale Verteilung des Abflusses (wie für primär hydrologische Fragestellungen gebräuchlich) erfolgt im verwendeten Ansatz nicht, da das Modell lediglich den möglichen Prozessraum abgrenzt. Eine Differenzierung in Bereiche mit relativ höherer oder niedrigerer Wahrscheinlichkeit des möglichen Auftretens eines Prozesses (vgl. z.B. Huggel et al., 2003; Blahut et al., 2010) wird damit nicht vorgenommen.



## 3. Modul "Wald mit Objektschutzfunktion"

Eine direkte Schutzfunktion von Waldflächen ist dann gegeben, wenn ein direkter räumlicher Zusammenhang zwischen der Gefahrenquelle, der bestockten Fläche und etwaigen zu schützenden Objekten besteht (Perzl et al., 2011). Als mögliches Beispiel dafür kann ein Steinschlagschutzwald oberhalb von Verkehrswegen oder besiedeltem Gebiet angeführt werden. Ohne Waldbestand könnten Steine ungehindert die zu schützenden Objekte erreichen, der bestehende Wald kann jedoch durch seine bremsende Wirkung die bestehende Gefährdung der Objekte vermindern. Im Zuge von GRAVIPROMOD werden Waldbestände als Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion definiert, wenn diese Waldbestände entweder (i) im potentiellen Anbruchgebiet der untersuchten Gefahrenprozesse liegen (primär Schutz durch eine Verminderung der Anbruchwahrscheinlichkeit der Prozesse in den potentiellen Startzonen) oder (ii) sich zwischen dem Prozessanbruchgebiet und zu schützenden Objekten befinden und der Prozess unter Vernachlässigung der bestehenden Waldwirkung eine potentielle Gefährdung für diese Objekte darstellt (d.h. Steinschlag oder Lawinen könnten ohne den bestehenden Waldbestand Objekte erreichen, der Waldbestand kann hier primär bremsend auf den Prozess wirken). Wie bereits anfangs erwähnt, können an Hand dieser Definition Waldflächen mit potentieller Schutzfunktion gegenüber den betrachteten Prozessen identifiziert werden, über die Schutzwirkung des Waldbestandes kann hingegen ohne nähere Kenntnis über den tatsächlichen Zustand der Waldflächen bzw. über die lokalen Gegebenheiten keine Aussage getroffen werden.

### 3.1 Konzeptioneller Ansatz

Um also jene Waldflächen zu ermitteln, welche potentiell eine direkte Objektschutzfunktion gegenüber den betrachteten Naturgefahrenprozessen Steinschlag und Lawine aufweisen, sind folgende Informationen nötig:

1. Wo befinden sich potentielle Startflächen für die betrachteten Prozesse im bzw. außerhalb des Waldes ?
2. Welche Bereiche sind ohne eine mögliche Schutzwirkung des Waldes betroffen, wenn sich Lawinen oder Steinschlag aus diesen potentiellen Anbruchflächen lösen ?
3. Wo befinden sich zu schützende Objekte (z.B. gemäß Einteilung nach ISDW) und sind diese Objekte potentiell durch Naturgefahrenprozesse betroffen (d.h. befinden sich zu schützende Objekte innerhalb der ohne Waldwirkung bestimmten Prozesszonen) ?
4. Befinden sich im Anbruchgebiet bzw. in der Sturzbahn jener Prozesse, welche eine potentielle Gefährdung für bestehende Objekte darstellen, Waldflächen, welche die negativen Auswirkungen der Naturgefahrenprozesse auf möglicherweise betroffene "Schutzobjekte" verhindern oder in ihrer Intensität abmildern können (Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion nach der Definition in GRAVIPROMOD) ?

Der konzeptionelle Ansatz, der im Zuge dieses Projektes für die Identifikation von Waldbeständen mit direkter Schutzfunktion gegenüber Lawinen und Steinschlag verfolgt wurde, gliedert sich entsprechend der angeführten Fragestellungen in die folgenden Schritte: (i) Dispositionsanalyse, (ii) Prozessmodellierung, (iii) Identifikation potentiell gefährdeter Infrastrukturobjekte und abschließend (iv) Ausweisung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion (siehe auch Abb. 3.1 auf s. 18).

Bei der Dispositionsanalyse werden an Hand morphologischer und topographischer (z.B. Neigung, Wölbung, etc.), sowie etwaiger zusätzlicher Kriterien (z.B. Schneehöhenverteilung, unterschiedliche Lithologie) Gebiete mit einer erhöhten Disposition gegenüber der Auslösung von potentiell gefährlichen gravitativen Massenverlagerungsprozessen ausgewiesen. Für die Prozesse Lawine und Steinschlag, die im Zuge des vorliegenden Projektes behandelt wurden, bedeutet dies eine Ausweisung potentieller Lawinenanbruchflächen und Steinschlagstartzonen, sowohl im Wald, als auch außerhalb der Bestandesflächen (siehe Kapitel 2).

In einem weiteren Schritt werden die Flächen, welche potentiell durch den Anbruch von Schneelawinen oder die Auslösung von Steinschlag in den bereits identifizierten Prozessstartbereichen betroffen werden können, ausgewiesen. Die Abschätzung der potentiell von den Prozessen aus den Startgebieten betroffenen Bereiche erfolgt großflächig mit einem einfachen empirisch-topographischen Ansatz zur Reichweitenbestimmung in Kombination mit raster-basierten Algorithmen zur Modellierung der möglichen Prozesspfade (siehe Kapitel 2).

Nachdem die potentiellen Prozesszonen ausgewiesen worden sind, werden in einem nächsten Schritt Infrastrukturobjekte (Gebäude, Transport- und Energieinfrastruktur, etc.), welche sich in den gefährdeten Bereichen befinden, erkannt und ausgewiesen. In diesem Schritt können Anbruchgebiete und Prozesszonen, welche keine bestehende Infrastruktur gefährden, für die weitere Analyse ausgeschlossen werden. Es werden in weiterer Folge nur mehr jene Anbruchgebiete und Sturzbahnen betrachtet, welche basierend auf der Reichweitenabschätzung auch eine Gefährdung für bestehende Objekte darstellen.

Als letzter Schritt erfolgt die Ausweisung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion über eine Verschneidung der zuvor erkannten Prozesszonen, welche eine potentielle Bedrohung für Objekte darstellen, und einem Waldbestandslayer.

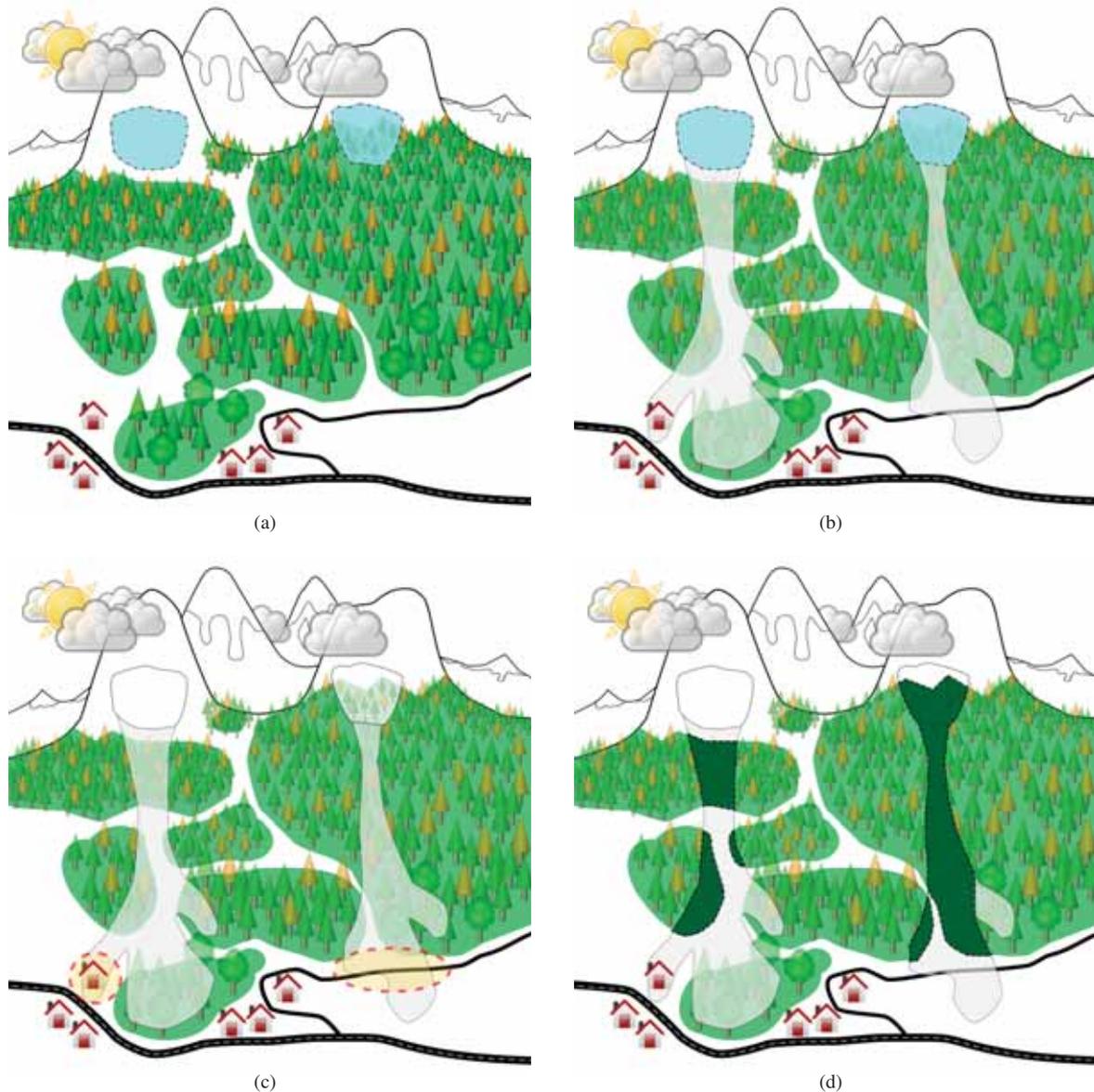
## 3.2 Bestimmung des Waldes mit Objektschutzfunktion

Während, wie in Kapitel 2 bereits angeführt, schon eine Vielzahl an Ansätzen und Methoden für die Bestimmung von möglichen Anbruchflächen und Prozessreichweiten existieren, ist für den speziellen Fall der automatisierten Ausweisung von Waldflächen mit Objektschutzfunktion zudem noch eine Rückrechnung vom gefährdeten Objekt auf die darüberliegenden Teile der Prozesszone nötig. Die Notwendigkeit einer solchen Methodik zur konsistenten Ausweisung von Waldflächen mit Objektschutzfunktion (nach der Definition in GRAVIPROMOD und gemäß Abb. 3.1) geht aus Erfahrungen ähnlich gelagerter Arbeiten (Giamboni, 2008; Perzl et al., 2011) hervor.

Um diese Funktionalität bereitzustellen, "merkt" sich das in GRAVIPROMOD entwickelte Modell, ausgehend von einer definierten Startzelle alle Rasterzellen entlang der Sturzbahn bis zum, an Hand des vorgestellten Pauschalneigungsansatzes berechneten, unteren Ende der Sturzbahn. Dabei wird in jedem Rechenschritt, an Hand eines ebenfalls als Modelleingang benötigten Raster-Layers mit zu schützenden Objekten, überprüft ob durch den modellierten Prozess Objekte potentiell gefährdet sind

(diese Abfrage wird für jede Zelle entlang des berechneten Prozesspfades durchgeführt). Wenn sich kein zu schützendes Objekt im, von einer Startzelle ausgehend, modellierten Prozessbereich befindet, so wird dieser für die weitere Auswertung der Waldflächen mit Objektschutzfunktion nicht mehr herangezogen. Befinden sich jedoch Objekte in der berechneten Sturzbahn, so erfolgt nach der Berechnung der Prozesszone (d.h. Reichweite und Ausbreitung) die angesprochene Rückrechnung. Dabei wird der berechnete, und zwischengespeicherte, Prozesspfad von "unten nach oben" (d.h. in Richtung entgegen der Sturz- bzw. Fließrichtung des Prozesses) schrittweise abgearbeitet. Teile des Prozesspfades unterhalb des (in Prozessrichtung gesehen) letzten "Objekttreffers" werden wieder verworfen, der Bereich der Prozesszone oberhalb dieses letzten betroffenen Objektes wird mit dem Waldlayer verschnitten, und ergibt so die Waldfläche mit direkter Objektschutzwirkung für das jeweils betrachtete Anbruchgebiet und die dazugehörige Prozesszone. Dieser Vorgang wird in weiterer Folge für jede einzelne, in der Dispositionsanalyse identifizierte, Startzelle im Untersuchungsgebiet durchgeführt, und so letztendlich die entsprechenden Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung für das gesamte Gebiet bestimmt.

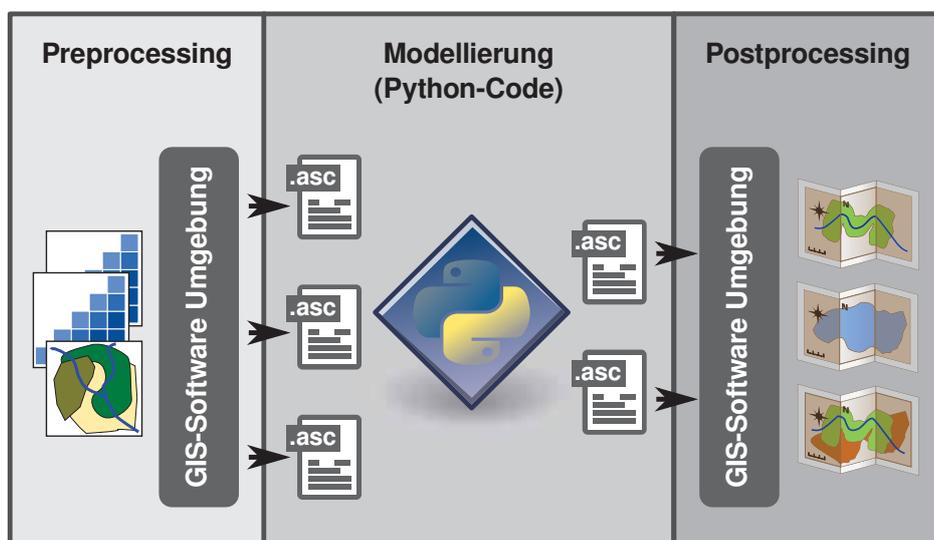
Dieser Ansatz für eine Modellierung der Prozesszonen ist mit einem "single-flow" Algorithmus, und unter der Annahme, dass alle Objekte die gleiche Schutzwürdigkeit besitzen, relativ leicht umzusetzen und kann auch von handelsüblichen Rechnern für große Flächen in relativ kurzer Zeit abgearbeitet werden. Werden allerdings Objekte mit unterschiedlicher Schutzwürdigkeit (z.B. Objektklassen in Anlehnung an ISDW) betrachtet, und für die Prozessmodellierung wird ein "multiple-flow" Algorithmus verwendet, so gestaltet sich die Fragestellung weitaus komplexer, und auch die für die Modellierung benötigten Rechnerressourcen erhöhen sich immens.



**Abbildung 3.1:** Konzeptionelle Herangehensweise für die Ausweisung von Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion: (a) Identifikation von möglichen Anbruchflächen im und außerhalb des Waldbestandes (blaue Flächen), (b) Modellierung der möglichen Prozessreichweiten ausgehend von den Dispositionsflächen (weiß), (c) Identifikation möglicher betroffener Infrastrukturobjekte und (d) Ableitung der Waldflächen mit direkter Schutzwirkung (dunkelgrün) durch Rückrechnung von den potentiell gefährdeten Objekten auf die Prozesszonen (Anbruchgebiete und Sturzbahnen).

## 4. Modul "Implementierung"

Das Modul "Implementierung" beschäftigt sich mit der tatsächlichen Anwendung des vorgestellten Modellansatzes zur Berechnung der Waldflächen mit Objektschutzfunktion. Dies beinhaltet die Vorbereitung der Modelleingangsdaten in einer GIS-Umgebung (Pre-Processing), die eigentliche Reichweitenmodellierung und Rückrechnung der entsprechenden Waldflächen mit direkter Schutzfunktion mit dem in Python entwickelten Modell, sowie der Zusammenfassung und kartographischen Präsentation der Ergebnisdaten (Postprocessing).



**Abbildung 4.1:** Schematische Darstellung der notwendigen Schritte für die Ausweisung der Waldfläche mit Objektschutzfunktion von den Eingangsdaten bis zum kartographischen Endprodukt.

### 4.1 Preprocessing

Für die bundesweite Modellierung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion mit dem vorgestellten Modell müssen die folgenden Eingangsdaten jeweils flächendeckend vorliegen:

- Digitales Geländemodell
- Potentielle Anbruchgebiete für die betrachteten Prozesse Steinschlag und Lawine
- Infrastrukturdaten
- Waldkartierung

Die Vorbereitung bzw. das "Preprocessing" der entsprechenden Datensätze erfolgt innerhalb einer GIS-Umgebung (z.B. ArcGIS, Q-GIS, GRASS-GIS, SAGA-GIS). Für das in GRAVIPROMOD entwickelte Modell zur Ausweisung des Waldes mit Objektschutzfunktion müssen die folgenden Eingangsdaten jeweils im ESRI-ASCII (.asc) Raster-Format vorliegen:

- `.asc`-Raster "Infrastruktur" (Klassen: 1, 2, 3, `noData` bzw. 0)
- `.asc`-Raster "DHM" (Höheninformation)
- `.asc`-Raster "Anbruchgebiete" (Klassen: 1, `noData` bzw. 0)

Dabei muss darauf geachtet werden, dass alle Eingangsraster den gleichen räumlichen Ausschnitt abdecken und deckungsgleich (Zelle für Zelle) übereinanderliegen. Im Zuge von GRAVIPROMOD werden für die Modellierung Datensätze, welche am BFW im Zuge der technischen Hilfe aus mehreren Quellen zusammengestellt und vorprozessiert wurden, verwendet. Die Rasterauflösung der verwendeten Eingangsdaten (Geländemodell, Infrastruktur, Wald, Dispositionsflächen) beträgt dabei jeweils 10m. Die verwendeten Datensätze sind in den Abbildungen 4.2, 4.4, 4.5, 4.6 und 4.3 an Beispielen dargestellt. Für die weitere Prozessierung bzw. die eigentliche Berechnung der Waldflächen mit Schutzfunktion wurden die für ganz Österreich zusammengestellten Daten auf einzelne Bundesländer aufgeteilt (siehe z.B. Abb. 4.6), da einerseits die Datengrundlagen zwischen den verschiedenen Bundesländern teilweise unterschiedlich ist, jedoch vor Allem um die Modellierung im Bezug auf die benötigten Rechnerressourcen überhaupt möglich zu machen.

## 4.2 Reichweitenmodellierung & Rückrechnung

Die eigentliche Modellierung der Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung erfolgt in einem eigens dafür entwickelten, in Python und Cython verfassten, Programm, welches als Eingangsdaten die angesprochenen `.asc` Raster-Dateien des Höhenmodells sowie der Anbruchgebiete und der zu schützenden Objekte benötigt. Für den Prozess Steinschlag werden die Prozesspfade mittels D-8 Algorithmus bestimmt, die Reichweiten der einzelnen Steinschlagtrajektorien ergeben sich nach den in Tabelle 4.1 definierten Grenzwerten für das Fahrböschungsgefälle, welche im Zuge der technischen Hilfe am BFW für eine mögliche Klassifizierung des Steinschlagschadenspotentials definiert wurden. Die Modellierung der Prozesspfade für Lawinen erfolgt mittels des modifizierten multiple-flow-direction Algorithmus, welcher in Kapitel 2 beschrieben wird, der Fahrböschungswinkel wird mit  $25^\circ$  basierend auf Auswertungen im Zuge der TH-Projekte am BFW festgelegt. Um eine mögliche Klassifizierung des Gefahrenpotentials zu ermöglichen wird die Modellierung getrennt für die 3 Anbruchklassen (vgl. Abb. 2.3 und Tab. 2.2) durchgeführt. Sowohl für Steinschlag als auch für Lawine erfolgt zudem die Berechnung der Prozesszonen, welche potentiell Schutzobjekte bedrohen, jeweils getrennt für Anbruchflächen im und außerhalb des Waldes. Ziel dieser Trennung ist es das mögliche Gefahrenpotential von Prozessen, welche potentiell auf derzeit bewaldeten Flächen anbrechen können und solchen, bei denen die Anbruchgebiete außerhalb der derzeit bewaldeten Flächen liegen, getrennt darzustellen.

Durch diese Vorgaben ergeben sich für die Prozesse Lawine und Steinschlag jeweils 6 Modelldurchläufe pro Bundesland (jeweils für 3 Klassen mit unterschiedlichem Gefahrenpotential ein mal für Anbruchflächen im und ein mal für Anbruchflächen außerhalb des Waldes).

Trotz der Verfügbarkeit von vergleichsweise großen Arbeitsspeichern auf den für die Modellierung verwendeten Rechnern (32 GB RAM bzw. 24 GB RAM), ist es auf Grund der großen Datenmengen (bei Rasterauflösungen von 10m) nicht möglich einen Modelldurchlauf für ein gesamtes Bundesland

**Tabelle 4.1:** Klassifizierung des Gefahrenpotentials für Steinschlag in 3 Stufen

Gefahrenpotential	Fahrböschungswinkel	Beschreibung
1	$\geq 32^\circ$ und $< 35^\circ$	Gering: potenzieller Prozessraum mittlerer bis großer Ereignisse, große Ereignisse betreffen den Prozessraum selten, mittlere nur sehr selten; geringe bis mittlere potenzielle Prozesswirkung.
2	$\geq 35^\circ$ und $< 38^\circ$	Mittel: potenzieller Prozessraum kleiner bis mittlerer Ereignisse, große Ereignisse betreffen den Bereich selten; mittlere bis starke potenzielle Prozesswirkung
3	$\geq 38^\circ$	Hoch: potenzieller Prozessraum kleiner bis großer Steinschlagereignisse; starke potenzielle Prozesswirkung

"auf einmal" (d.h. komplett im Arbeitsspeicher) zu rechnen. Aus diesem Grund wurde im entwickelten Code die Funktionalität implementiert, die jeweiligen Eingangsdaten (DHM, Objekte, Anbruchgebiete) zuerst zu "kacheln", d.h. in kleinere Gebiete aufzuteilen, diese auf der Festplatte zwischenspeichern, in weiterer Folge nacheinander abzuarbeiten und zum Ende der Berechnung wieder zu einem Ganzen zusammenzufügen. Neben dem Effekt der Reduktion des benötigten Arbeitsspeichers, konnten durch eine parallele Abarbeitung der einzelnen Kacheln auf mehreren Prozessoren (bis zu 8 Prozessoren pro Rechner), welche ebenfalls im entwickelten Code implementiert wurde, zudem auch die benötigten Rechenzeiten verringert werden.

Während, auf Grund des einfacheren verwendeten Algorithmus, die Modellierung der Waldflächen mit Objektschutzfunktion gegenüber Steinschlag so innerhalb eines überschaubaren Zeitraums möglich ist (ein Durchlauf für ein Bundesland dauert je nach Größe und Anzahl der zu modellierenden Anbruchgebiete zwischen einigen Minuten und maximal wenigen Stunden), ist der Rechenaufwand für die Modellierung der Waldflächen mit Objektschutzfunktion gegenüber Lawinen ungleich höher (hier kann ein Durchlauf mit dem verwendeten Modell für ein einzelnes Bundesland mehrere Tage in Anspruch nehmen). Im Anbetracht dessen, dass für jedes Bundesland jeweils 6 Durchläufe für jeden Prozess berechnet werden, ergibt sich so für das gesamte Bundesgebiet insgesamt eine beträchtliche Rechendauer. Der Großteil der Rechenzeit entfällt dabei auf das, im Falle von "multiple-flow-direction" Algorithmen mitunter sehr komplexe, Rückrechnen von betroffenen Objekten auf die darüber liegenden Teile der Prozesszonen.

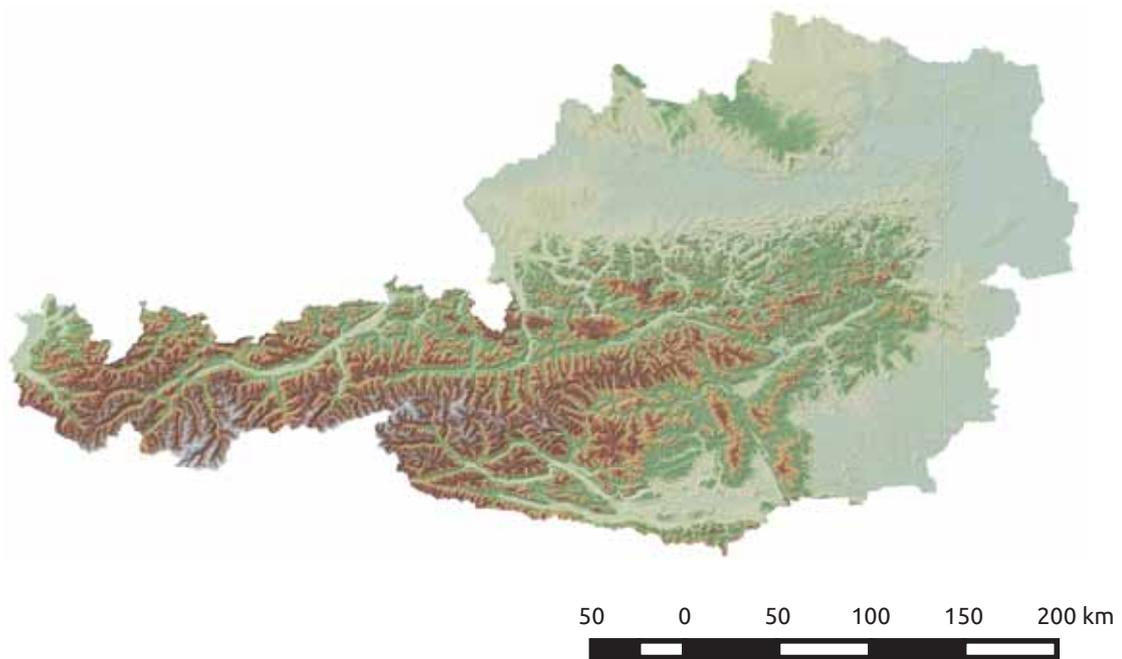
Als Ausgangsdaten liefert der GRAVIPROMOD-Code jeweils die Teile von Prozesszonen, welche potentiell eine Gefährdung für zu schützende Objekte darstellen, als `.asc` Rasterdatei zurück. Sturzbahnen, welche keine Objekte gefährden, werden dabei ebenso nicht berücksichtigt, wie Anteile von Sturzbahnen, welche sich beispielsweise unterhalb von zu schützenden Objekten befinden, dort aber keine weitere Gefährdung mehr darstellen (vgl. Abb. 5.1 (c)). Für den Fall, dass die Schutzobjekte in den Eingangsdaten klassifiziert sind (z.B. in Anlehnung an ISDW), werden auch die entsprechenden Sturzbahnen in der Ausgabedatei klassifiziert zurückgegeben, d.h. Prozesszonen, welche ein Objekt der Objektkategorie 1 gefährden, bekommen auch diesen Wert zugewiesen. Im Falle von sich überlappenden Prozesszonen mit unterschiedlicher Klassifizierung wird der maximal auftretende Wert zurückgegeben.

### 4.3 Postprocessing

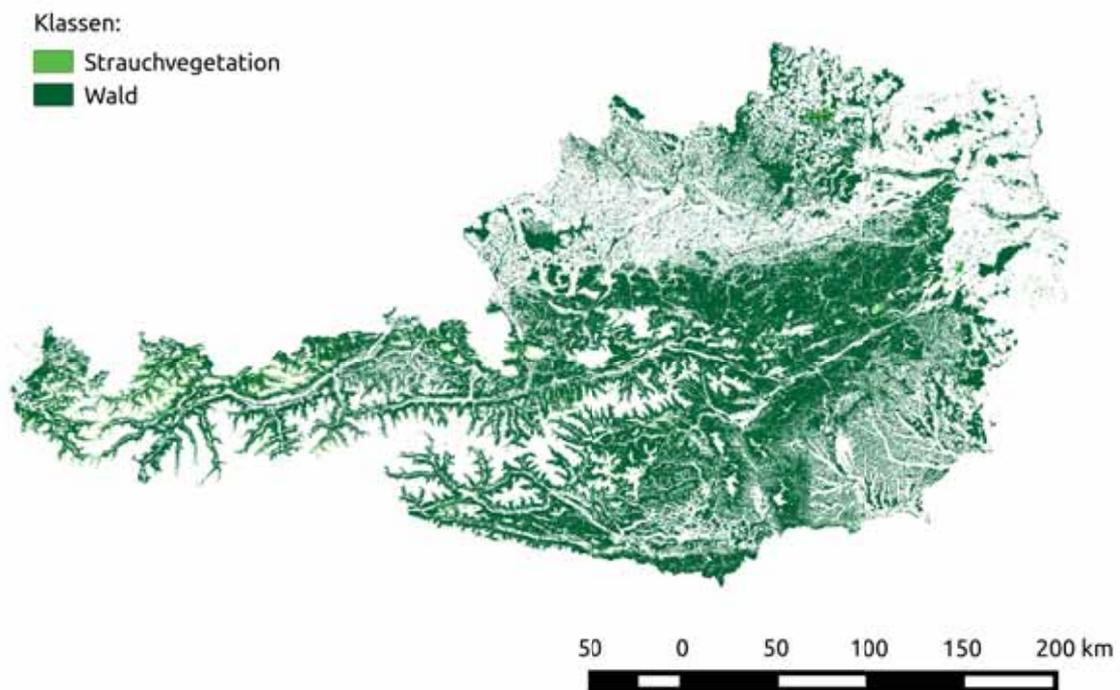
Um aus den Ausgangsdaten des Modellcodes die Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion zu berechnen müssen die vom Modell ausgegebenen "Objekt-relevanten" Prozesszonen noch mit dem Waldlayer verschnitten werden (vgl. Abb. 5.1 (c) und (d)). Um eine homogenere Darstellung der Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung zu erzielen, werden die berechneten Sturzbahnen, welche nach der Modellierung Objekte bedrohen (d.h. die Modellausgangsdaten - vgl. Abb. 5.1 (c)) , in einem Zwischenschritt (in einer GIS Umgebung) jeweils noch um 1 Rasterzellbreite (d.h. um jeweils 10m) "gebuffert" (sowohl Steinschlag, als auch Lawine). In der kommerziellen GIS-Umgebung ArcGIS kann die Bufferung mit dem Befehl »Expand(<input-raster>, 1, [1, 2, 3])« bewerkstelligt werden. Der so erhaltene Raster besteht nun aus allen relevanten "Prozesszonen" (jeweils 1 mal für Startflächen im und außerhalb des Waldes berechnet). Die Verschneidung dieser Prozesszonen mit dem Waldlayer ergibt letztendlich die Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion im Sinne von GRAVIPROMOD (vgl. Abb. 5.1 (d)).

**Tabelle 4.2:** Klassifikation der Schutzwürdigkeit von Objekten nach dem Waldentwicklungsplan (WEP) und die entsprechende "Übersetzung" der Klassen in GRAVIPROMOD (GPM).

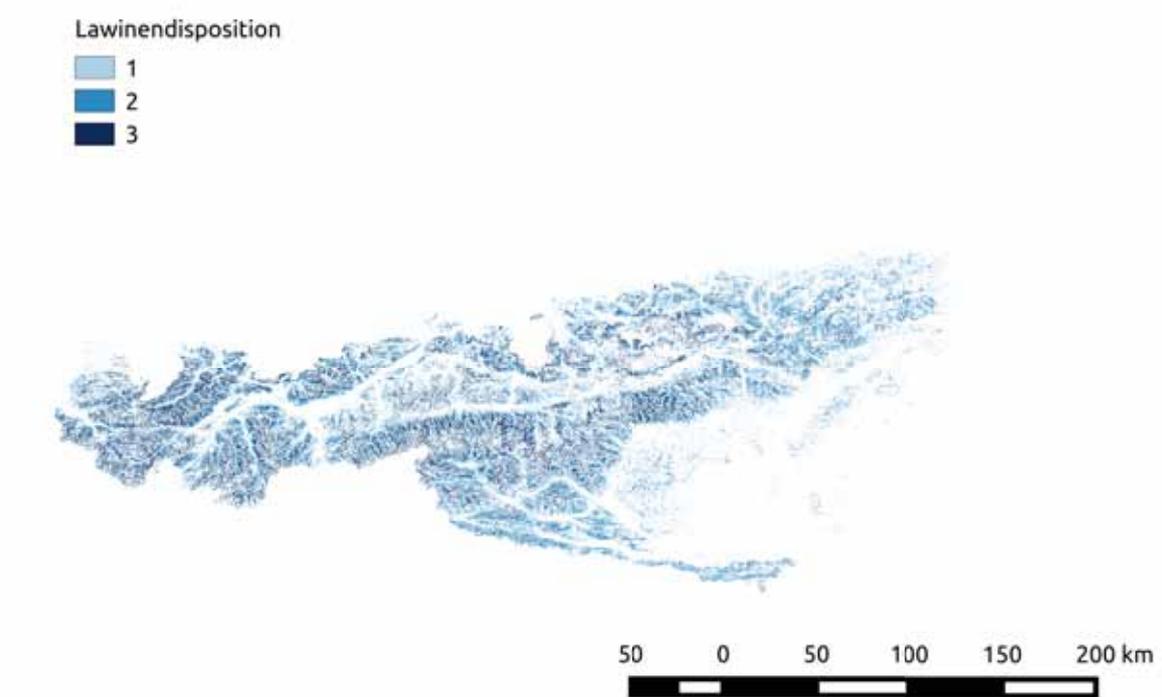
Objektklasse		Beschreibung	
WEP	GPM	WEP	GPM
III	3	Es besteht <b>besonderes öffentliches Interesse</b> an der Schutzwirkung des Waldes.	Eine <b>Überprüfung des Gefahren- und Schadenspotenzials</b> von Schneelawinen und Steinschlag aus dem Wald ist <b>vordringlich</b> .
II	2	Es besteht <b>erhöhtes öffentliches Interesse</b> an der Schutzwirkung des Waldes.	Eine <b>Überprüfung des Gefahren- und Schadenspotenzials</b> von Schneelawinen und Steinschlag aus dem Wald ist <b>dringlich</b> .
I	1	Es besteht <b>öffentliches Interesse</b> an der Schutzwirkung des Waldes.	Eine <b>Überprüfung des Gefahren- und Schadenspotenzials</b> von Schneelawinen und Steinschlag aus dem Wald ist <b>nachrangig</b> .
–	0	–	Es erfolgt <b>keine Berücksichtigung bei der Überprüfung des Gefahren- und Schadenspotenzials</b> von Schneelawinen und Steinschlag aus dem Wald.



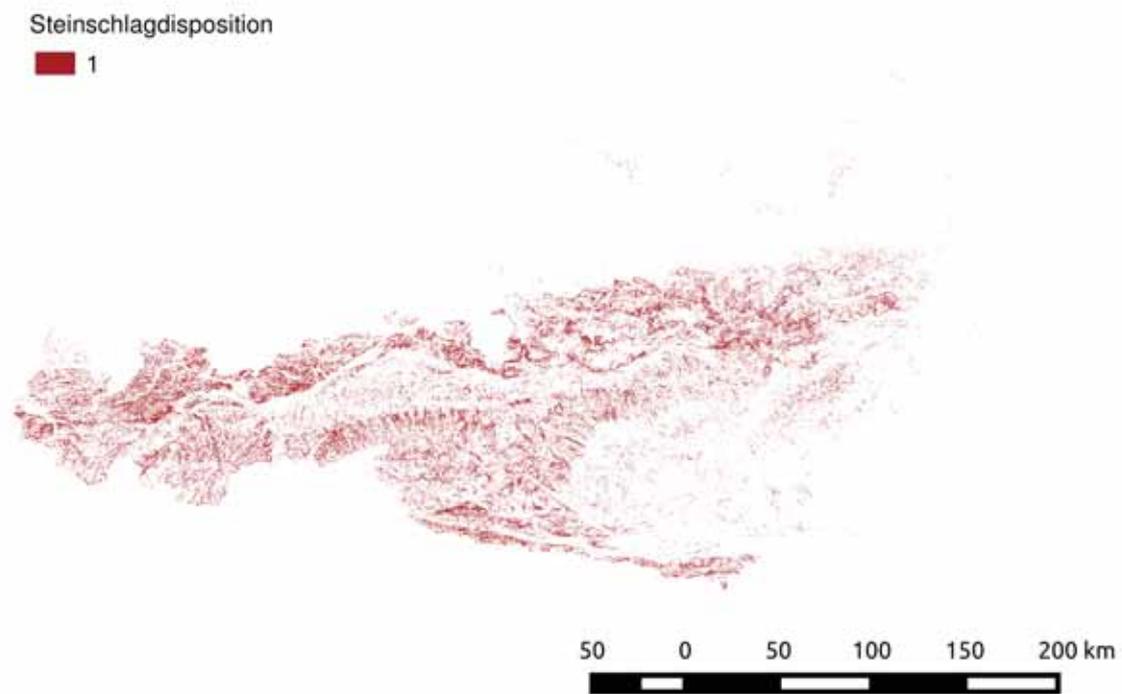
**Abbildung 4.2:** Digitales Geländemodell Österreich. Rasterzellgröße: 10m



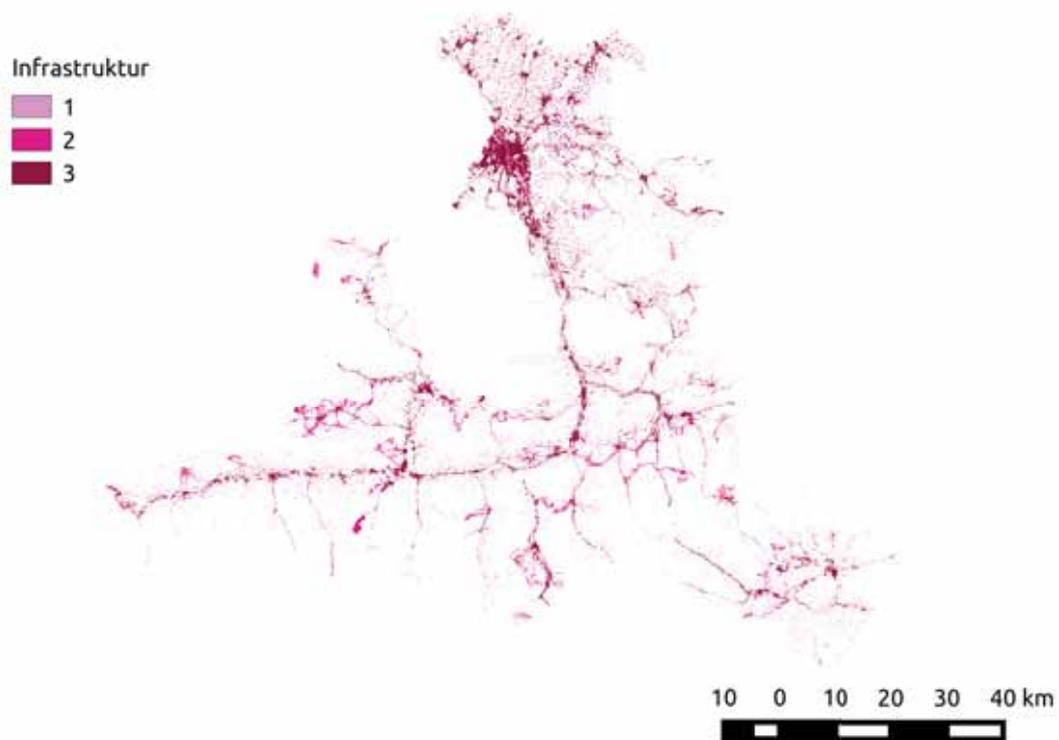
**Abbildung 4.3:** Waldlayer Österreich. Die Klassen Strauchwald und Hochwald werden im verwendeten Datensatz unterschieden. Rasterzellgröße: 10m



**Abbildung 4.4:** Dispositionslayer Lawine Österreich. Die Dispositionsklassen (Tab. 2.2) ergeben sich nach der Klassifikation in Abb. 2.3. Als mögliche Anbruchgebiete werden die Dispositionsklassen 1 bis 3 klassifiziert, Bereiche mit Dispositionsklasse 0 nach Tab. 2.2 werden nicht als mögliche Anbruchgebiete angesehen und sind nicht dargestellt. Rasterzellgröße: 10m



**Abbildung 4.5:** Dispositionslayer Steinschlag Österreich. Die rotbraune Signatur markiert potentielle Ablöseflächen für Steinschlag. Rasterzellgröße: 10m



**Abbildung 4.6:** Infrastrukturlayer am Beispiel Salzburg. In der Gesamtübersicht sind die Hauptsiedlungszentren entlang der Tallagen, sowie Bereiche mit geringer Infrastrukturdichte gut zu erkennen. Die Infrastrukturklassen (1 bis 3) ergeben sich nach Tabelle 4.2. Rasterzellgröße: 10m



## 5. Ergebnisse

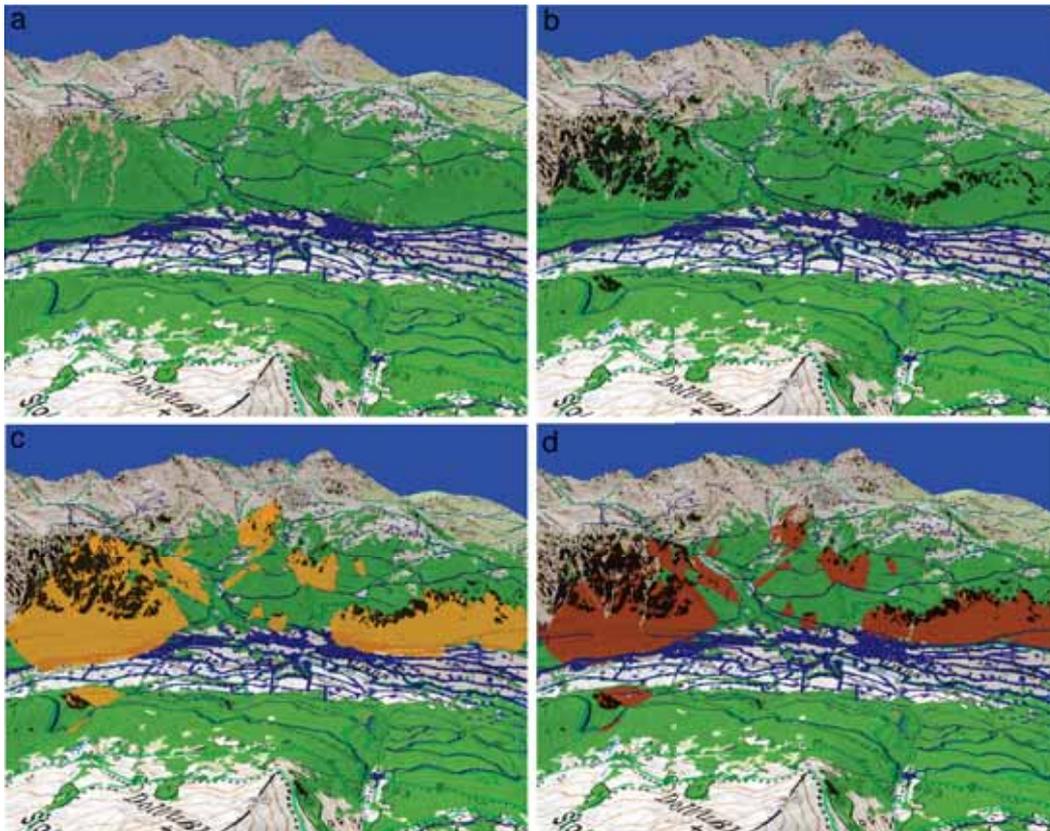
Im folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung in GRAVIPROMOD beispielhaft an Hand der Identifikation von Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung für das Bundesland Salzburg dargestellt. Die Modellierung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion erfolgte aus organisatorischen Gründen (Aufwand an Rechnerressourcen, teilweise heterogene Datengrundlagen) jeweils getrennt nach Bundesland (siehe Kapitel 4).

### 5.1 Beispiel

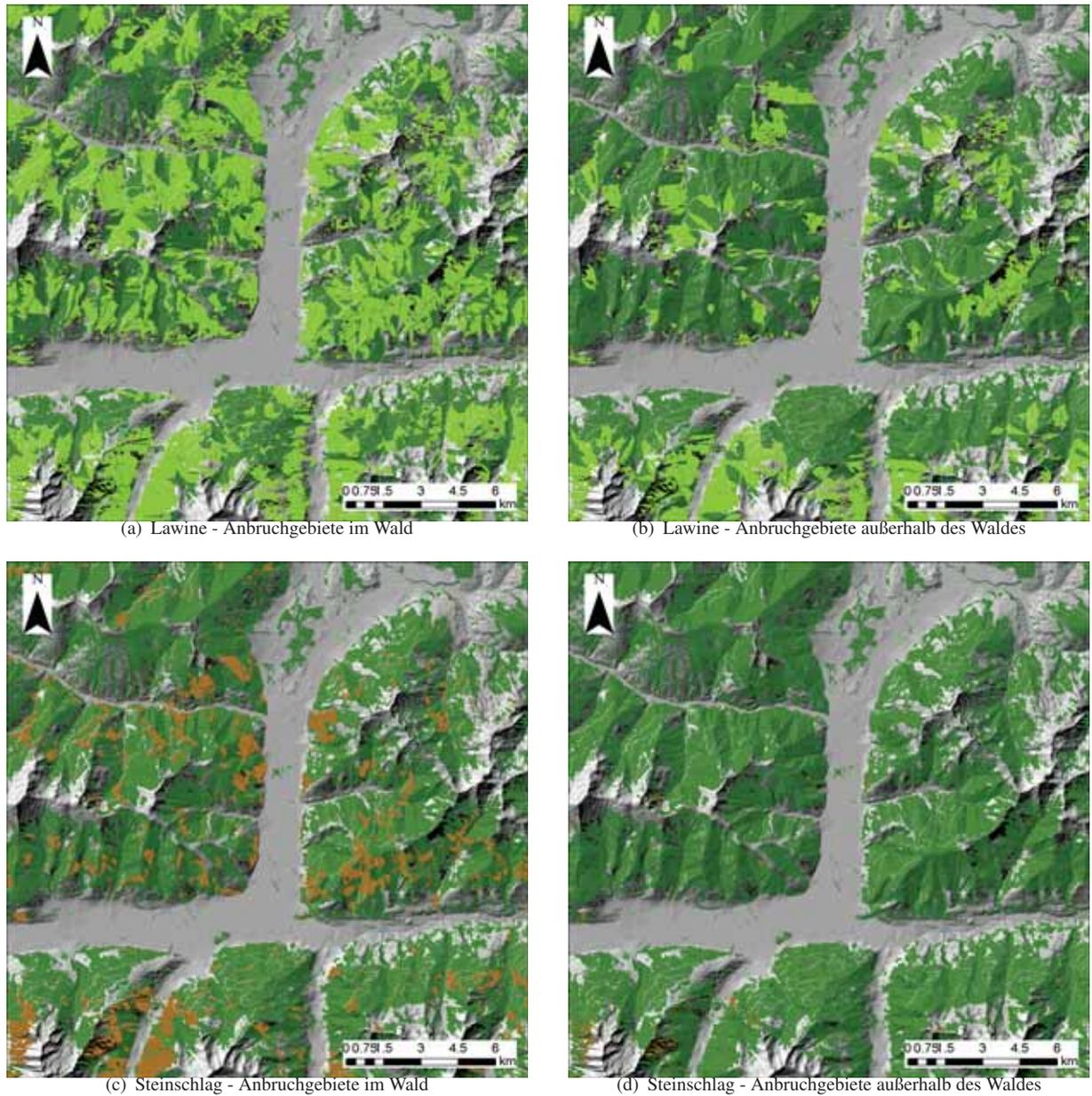
Ergebnisse der Modellierung in GRAVIPROMOD sind ausgewiesene Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion gegenüber Lawinen und Steinschlag. Die Berechnungen wurden für beide Prozesse jeweils einmal für Anbruchgebiete im und Anbruchgebiete außerhalb des Waldes durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellierung in GRAVIPROMOD liegen jeweils digital als Raster-Dateien im ERDAS-IMAGINE Raster Format (.img) in der Auflösung von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  für die einzelnen Bundesländer vor. Da es sich bei den Modellergebnissen bzw. deren kartographischen Darstellung um Informationen auf Ebene einer Gefahrenhinweiskarte handelt, ist eine Interpretation der Daten im Maßstabsbereich von 1:10.000 (maximal) bis 1:50.000 zweckmäßig. Das verwendete Referenzsystem für alle im Zuge von GRAVIPROMOD verwendeten Eingangsdaten und berechneten Ergebnisse ist "MGI / Austria Lambert" (EPSG:31287).

Neben den Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion sind für Steinschlag und Lawinen auch die an Hand der in Kapitel 2 beschriebenen Methodik berechneten Dispositionsklassen bzw. Prozessanbruchgebiete als Ergebnis im gleichen Datenformat verfügbar. Die Dispositionslayer sind in den Abbildungen 4.5 und 4.4 dargestellt und, wie alle anderen Modelleingangsdaten, auch für die einzelnen Bundesländer vorhanden.

Die Abbildung 5.2 zeigt die vier Ergebnislayer, welche die Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion gegenüber Steinschlag und Lawine (jeweils getrennt nach Anbruchgebieten im und außerhalb des Waldes) darstellen, am Beispiel des Gebietes Zell am See / Salzburg. Es zeigt sich, dass für den ausgewählten Bereich der Anteil an Schutzwaldflächen für mögliche Prozesszonen mit Anbruchgebieten im derzeit bewaldeten Gebiet vergleichsweise größer ist als jener mit Anbruchgebieten außerhalb des derzeit bewaldeten Gebietes. Auch sind für den betrachteten Bereich die Flächenanteile von Lawinenschutzwald weitaus größer als jene für Waldflächen mit Schutzfunktion gegen Steinschlag.



**Abbildung 5.1:** Beispielhaftes Ergebnis für die Modellierung von Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion mittels "multiple-flow-direction" Ansatz. (a) Zu schützende Infrastruktur (blau) und Waldflächen (grün). (b) zusätzlich sind die Prozessanbruchzonen in schwarz dargestellt. (c) Modell-Output vor dem Post-Processing: Alle Teile von Prozesszonen, welche potentiell zu schützende Infrastukturobjekte bedrohen (Prozesszonen, welche unterhalb von Objekten weiter gehen würden, jedoch dort keine Bedrohung mehr für Objekte darstellen, sind hier schon nicht mehr dargestellt). (d) Ergebnis nach dem Post-processing: Waldflächen mit direkter Objektschutzwirkung (Verschneidung der Prozesszonen aus (c) mit dem Waldlayer). Im angeführten Beispiel wurden Anbruchflächen im und außerhalb des Waldes gleichzeitig modelliert, es erfolgt auch keine Klassifizierung der Waldflächen mit Objektschutzfunktion. (Quellen: DHM - Land Tirol, OEK50 - BEV)



**Abbildung 5.2:** Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion im Bereich Zell am See, Salzburg: (a) und (b): Wald mit direkter Objektschutzfunktion gegen Lawinen (hellgrüne Signatur); (c) und (d): Wald mit direkter Objektschutzfunktion gegen Steinschlag (braune Signatur). Die dunkelgrüne Signatur stellt die gesamte Waldfläche dar, die Berechnungen sind jeweils getrennt nach Anbruchgebieten im und außerhalb des Waldes erfolgt. (Quellen: DHM - Land Salzburg)



## 6. Synthese und Ausblick

Im Zuge des Projektes GRAVIPROMOD wurde eine Methodik für eine objektive und weitgehend automatisierte Ausweisung von Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion auf überregionalem bzw. nationalem Maßstab entwickelt und flächendeckend angewendet. Die Anwendung des Modelles zur Ausweisung von Schutzwaldflächen erscheint auch für große Flächen (einzelne Bundesländer bzw. ganz Österreich) grundsätzlich geeignet, es besteht jedoch in mehreren Bereichen noch Potential für mögliche Adaptierungen bzw. Weiterentwicklungen des vorgestellten Ansatzes.

### 6.1 Zusammenfassung

Mit Hilfe des in GRAVIPROMOD entwickelten Modells ist es möglich auf regionalem bis nationalem Maßstab die Waldflächen mit direkter Schutzfunktion vor den Naturgefahrenprozessen Stein-schlag und Schneelawine standardisiert und nachvollziehbar auszuweisen. Die so modellierten Daten können als zusätzliche Informationsquelle auf Ebene einer Gefahrenhinweiskarte die forstliche Raumplanung unterstützen. Für die Modellierung der Schutzwaldflächen auf dieser Maßstabsebene hat sich die Verwendung einfacher Ansätze als geeignet bzw. teilweise notwendig erwiesen. Auf der einen Seite ist es auf Grund der teilweise sehr heterogenen Datenlage schwer möglich die benötigten Eingangsparameter für komplexere Modelle flächendeckend zur Verfügung zu stellen, andererseits steigen für die Anwendung solcher Modelle auch die benötigten Rechenzeiten, was im Hinblick auf die großflächige Modellierung auf nationaler Ebene einen nicht vernachlässigbaren Faktor darstellt bzw. die Anwendung der meisten Modelle für diese Fragestellung (Ausweisung der Waldflächen mit direkter Schutzfunktion für ganz Österreich) de facto nicht möglich macht.

Als größte Herausforderung im Rahmen von GRAVIPROMOD hat sich herausgestellt, ein Modell zu entwickeln, das unter den gegebenen Voraussetzungen (Rasterauflösung der zu Grunde liegenden Daten von 10m für ganz Österreich, Funktionalität zur Detektion von Objekttreffern und Rückrechnung auf die entsprechenden Sturzbahnen und Anbruchgebiete) für ganz Österreich anwendbar ist.

### 6.2 Ausblick

Die in GRAVIPROMOD für eine flächendeckende Modellierung der Waldflächen mit direkter Objektschutzfunktion für Österreich entwickelten und angewendeten Modellansätze beruhen auf einfachen empirisch-topographischen Verfahren (Energiefunktionsansatz). Auf Grund der Zielsetzung sowohl die Modellentwicklung als auch eine Modellierung für ganz Österreich innerhalb der Projektlaufzeit durchzuführen ist dieser Ansatz durchaus gerechtfertigt. Im Anbetracht der möglichen Anwendung des entwickelten Modelles für regional bzw. lokal begrenztere Untersuchungsgebiete, für welche die aufgezeigten Einschränkungen hinsichtlich der Verfügbarkeit geeigneter Modelleingangs- bzw. -kalibrierungsdaten und der beträchtlichen Rechenzeiten für größere Gebiete nicht gelten, ist eine Erweiterung des bestehenden Modellcodes um alternative Ansätze zur Bestimmung der Prozessreichweiten und der räumlichen Prozessausdehnung sicherlich interessant. Die Implementierung von

alternativen Ansätzen zur Reichweitenbestimmung bzw. Prozessausbreitung für die Prozesse Steinschlag und Lawine (vgl. z.B. Dorren und Seijmonsbergen, 2003; Barbolini et al., 2011; Jaboyedoff und Labiouse, 2011, etc.) kann für räumlich begrenztere Fragestellungen (z.B. auf Ebene einzelner Gemeinden oder Talschaften) durchaus zu verbesserten Aussagegenauigkeiten führen.

# Literaturverzeichnis

- Barbolini, M., Pagliardi, M., Ferro, F., und Corradeghini, P. (2011). Avalanche hazard mapping over large undocumented areas. *Natural Hazards*, 56:451–464.
- Blahut, J., Horton, P., Sterlacchini, S., und Jaboyedoff, M. (2010). Debris flow hazard modelling on medium scale: Valtellina di tirano, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10:2379–2390.
- Bühler, Y., Kumar, S., Veitinger, J., Christen, M., Stoffel, A., et al. (2013). Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13:1321–1335.
- Christen, M., Bartelt, P., und Gruber, U. (2002). AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. In *International Congress Interpraevent*, pages 715–725.
- Christen, M., Kowalski, J., und Bartelt, P. (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63:1–14.
- Clouet, N., Berger, F., und Liévois, J. (2012). Rockfall Modelling and Risk Zoning: A case study in the French Alps using Geomatics, airborne Laser Scanning, 2D & 3D Runout Models. In *12<sup>th</sup> Congress INTERPRAEVENT*, Grenoble, France.
- Costa-Cabral, M. und Burges, S. (1994). Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30(6):1681–1692.
- Dorren, L. (2012). *Rockyfor3D (v4.1) revealed - Transparent description of the complete 3D rockfall model*. ecorisQ paper ([www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org)).
- Dorren, L. K. A. und Seijmonsbergen, A. C. (2003). Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale. *Geomorphology*, 56:49–64.
- Evans, S. G. und Hungr, O. (1993). The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30:620–636.
- Falkner, M. (2009). Einsatz von Laserscanningdaten in der Lawinenmodellierung. Master's Thesis, Universität Innsbruck, Innsbruck, Austria.
- Fischer, L., Rubensdotter, L., Sletten, K., Stalsberg, K., Melchiorre, C., Horton, P., und Jaboyedoff, M. (2012). Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway. In *Landslides and Engineered slopes: Protecting Society through improved understanding*, pages 723–729. Taylor & Francis Group, London.

- Frattini, P., Crosta, G., Carrara, A., und Agliardi, F. (2008). Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches. *Geomorphology*, 94(3–4):419 – 437. {GIS} technology and models for assessing landslide hazard and risk.
- Freeman, G. T. (1991). Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17(3):413–422.
- Giamboni, M. (2008). *SilvaProtect-CH - Phase I Projektdokumentation*. Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Guzetti, F., Crosta, G. B., Detti, R., und Agliardi, F. (2002). Stone: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28:1079–1093.
- Heim, A. (1932). *Bergstürze und Menschenleben*. Zürich.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., und Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Science*, 13:869–885.
- Huggel, C., Kääh, A., Haeberli, W., und Krummenacher, B. (2003). Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3:647–662.
- Jaboyedoff, M. und Labiouse, V. (2003). Preliminary Assessment of rockfall hazard based on GIS data. In *ISRM 2003 - Technology roadmap for rock mechanics*. South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Jaboyedoff, M. und Labiouse, V. (2011). Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11:819–828.
- Klebinder, K., Fromm, R., und Perzl, F. (2009). Ausweisung von Lawinenschutzwald mittels GIS und einfachen Modellrechnungen. In *Angewandte Geoinformatik 2009. Beiträge zum 21. AGIT-Symposium, Salzburg*, Heidelberg. Strobl and Blaschke and Griesebner.
- Körner, H. (1975). Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fließlawinen. *Rock Mechanics*, 8:225–256.
- LfU (2010). Projekt: Georisiken im Klimawandel. Vorhaben Gefahrenhinweiskarte Bayerische Alpen. Steinschlag – Felsrutsch – Rutschung – Hanganbruch. Alpenanteil Landkreis Garmisch-Partenkirchen. Projektabschlussbericht, Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg.
- Lied, K. (1977). Rockfall problems in Norway. In *Rockfall dynamics and protective work effectiveness*.
- Lied, K. und Bakkehøi, S. (1980). Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. *Journal of Glaciology*, 26:165–177.
- Lied, K., Weiler, S., Bakkehøi, S., und Hopf, J. (1995). Calculation methods for avalanche runout distance for the Austrian Alps. NGI - Rep. 581240-1, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Loye, A., Pedrazzini, A., und Jaboyedoff, M. (2008). Preliminary regional rockfall hazard mapping using lidar-based slope frequency distribution and cone-fall modelling. In Locat, J., Perret, D., Turmel, D., Demers, D., und Leroueil, S., editors, *Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards: From Causes to Management.*, page 594 p., Quebec. Presse de l'Université laval.

- Maggioni, M. (2005). *Avalanche release areas and their influence on uncertainty in avalanche hazard mapping*. PhD thesis, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Zürich.
- Meissl, G. (1998). *Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayrischen und Tiroler Alpenraum*. PhD thesis, Universität Innsbruck.
- O'Callaghan, J. F. und Mark, D. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28:323–344.
- Perla, R., Cheng, T. T., und McClung, D. M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26(94):119–207.
- Perzl, F. (2014). Der Objektschutzwald - Bedeutung und Herausforderung. *BFW-Praxisinformation*, 34:20–24.
- Perzl, F., Bauerhansel, C., und Walter, D. (2011). Standardisierte Ermittlung von Wald mit Objektschutzwirkung. Final Project Report MONITOR II, Bundesforschungszentrum für Wald. Part of the European Territorial Cooperation South East European Space Project.
- Perzl, F. und Kammerlander, J. (2010). Schneehöhe und Lawinengefahr einst und im Jahre Schnee? *BFW-Praxisinformation*, 23:8–10.
- Proske, H. und Bauer, C. (2013). MoNOE - Modellierung der Sturzprozesse. Bericht Geol. B. A. 100, Geologische Bundesanstalt, Rabenstein a. d. Pielach.
- Proske, H., Bauer, C., und Granica, K. (2011). Different Approaches of Rockfall Susceptibility Maps in Lower Austria. In *Proceedings of the Second World Landslide Forum*, Rome.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., und Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5:59–79.
- Rauter, M. (2005). GIS - gestützte Analyse zur Berechnung potentieller Lawinenanbruchgebiete. Master's thesis, Carinthia University of Applied Science, Villach, Austria.
- Sampl, P. und Granig, M. (2009). Avalanche simulation with SAMOS-AT. In *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos*.
- Schima, J. und Singer, F. (2012). *Waldentwicklungsplan-Richtlinie über Inhalt und Ausgestaltung (Fassung 2012)*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW - Lebensministerium), Marxergasse 2, A-1030 Wien.
- Schweizer, J., Jamieson, J. B., und Schneebeili, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4):1016.
- Stevens, W. D. (1998). Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Master's thesis, University of Toronto.
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2):309–319.
- Toppe, R. (1987). Terrain models - a tool for natural hazard mapping. In *Avalanche formation, movement and effects*. IAHS.

- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K., Gerber, W., Jaboyedoff, M., et al. (2011). Rockfall characterisation and structural protection-a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11.
- Vontobel, I. (2011). Geländeanalyse von Unfalllawinen. Master's thesis, Geographisches Institut d. Universität Zürich, Zürich.
- Wichman, V. und Becht, M. (2006). Rockfall modelling: Methods and model application in an alpine basin. In Böhner, J., McCloy, K. R., und Strobl, J., editors, *SAGA - Analysis and Modelling Applications.*, volume 115 of *Göttinger Geographische Abhandlungen*, pages 105–116. Goltze, Göttingen.
- Wichmann, V. und Becht, M. (2005). Modelling of Geomorphic Processes in an Alpine Catchment. In Atkinson, P. M., Foody, G., Darby, S. E., und Wu, F., editors, *GeoDynamics: papers presented at the 7th international conference on GeoComputation held at the School of Geography, University of Southampton*, pages 151–167. CRC Press.
- Zimmermann, M., Mani, P., und Gamma, P. (1997). *Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich.