

Von: Teich, Michaela

geboren am: 25. Juni 1980

in: Radebeul

wurde der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der Technischen
Universität Dresden

zur
Erlangung des ersten akademischen Grades
Magister Scientiarum
für das Fachgebiet Forstwissenschaften

die Magisterarbeit mit dem Thema

Der Lawinenschutzwald in GIS-basierten Risikoanalysen –
Untersuchung einer Fallstudie:
„Der Bannwald von Andermatt“

vorgelegt.

Tag der Einreichung:

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr. Andreas W. Bitter

Institut: Institut für Forstökonomie und Forsteinrichtung

Betreuer: Dr. Peter Bebi
Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos,
Schweiz

Für die Ausleihe zugelassen/nicht zugelassen

Dresden, den

.....
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Betreuer Dr. Peter Bebi vom Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF in Davos für die Anregung zu dieser Arbeit, für die fachliche Unterstützung sowie für die vielen interessanten Hinweise im Entstehungsprozess der Arbeit bedanken.

Ebenso gilt mein Dank Prof. Dr. Andreas W. Bitter, der sich als Vertreter vom Institut für Forstökonomie und Forsteinrichtung der TU Dresden immer Zeit für produktive Diskussionen während meiner Aufenthalte in Dresden nahm.

Beim Amt für Forst und Jagd des Kantons Uri möchte ich mich für die vielen wichtigen Datengrundlagen und Informationen zum Untersuchungsgebiet bedanken, welche mir zur Verfügung gestellt wurden.

Vielen Dank gilt Urs Gruber, Ariane Walz, Andreas Stoffel, Corina Lardelli und Adrienne Grêt-Regamey für die vielen Hilfestellungen sowie allen anderen SLF-Mitarbeitern, Bürokollegen, Mitbewohnern, Freunden und meinen Eltern, die mich während meines Aufenthaltes in Davos oder während meines ganzen Studiums unterstützt haben.

Kurzfassung

Die expansive Nutzung der Alpen durch eine dichtere Besiedlung, zunehmenden Verkehr und gesteigerte Bedürfnisse in Beruf und Freizeit haben das Risiko durch Naturgefahren in der Schweiz in den letzten Jahrzehnten vergrößert. Unter dem Motto „*Von der Gefahrenabwehr hin zu einer umfassenden Risikokultur*“ fordert die Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT) ein Umdenken, weg von gefahrenorientierten hin zu risikobasierten Managementstrategien. Die Risikoanalyse, als Verfahren zur Bestimmung des Risikos, ist Bestandteil des Risikokonzepts, welches heute als einzig verfügbarer methodischer Ansatz für den zukünftigen Umgang mit Naturgefahren gilt (PLANAT 2005). Die Anwendung risikobasierter Strategien erlaubt eine transparente Darstellung und Beurteilung von Risiken und unterstützt politische Entscheidungen auf allen Ebenen. Während risikobasierte Analyse- und Bewertungsmethoden in vielen Gebieten des Naturgefahrenmanagements bereits erfolgreich angewendet werden, fehlen diese im Bereich des Schutzwaldmanagements weitgehend (Bebi et al. 2004).

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Durchführung einer GIS-basierten Risikoanalyse nach dem Vorgehen von Borter (1999a) und Wilhelm (1997) unter besonderer Berücksichtigung des Lawinenschutzwaldes im Sinne einer effizienten biologischen Schutzmaßnahme. Anhand einer Fallstudie zum „Bannwald von Andermatt“ wurde das Risiko der Gemeinde Andermatt infolge eines 300jährigen Lawinenereignisses unter fünf verschiedenen Waldzustandsszenarien berechnet. Die Szenarien wurden mit Hilfe einer luftbildgestützten Kartierung und Digitalisierung der Waldstrukturen entwickelt. Die Abgrenzung potentieller Lawinenanrissgebiete sowie die Berechnung der Lawinengeschah mit dem rechnergestützten Lawinenmodellierungssystem AVAL-2D (Gruber 1998) und dem darin integrierten 2-dimensionalen numerischen Simulationsmodell VS-2D (Gruber 1998).

Folgende Ergebnisse können festgehalten werden:

- Bei der aktuellen Ausgangssituation, unter Berücksichtigung des Schutzwaldes und existenter Lawinenverbauungen, besteht für die Gemeinde Andermatt ein Risiko von rund 72.000,00 CHF/a.

- Bleiben die technischen Lawinenschutzmaßnahmen unberücksichtigt, erhöht sich das Risiko auf rund 500.000,00 CHF/a.
- Aus einem Windwurfereignis im unteren Hangbereich resultiert nur eine geringe Veränderung des Risikos (ca. 560.000,00 CHF/a).
- Hingegen hätte eine Entwaldung im oberen Hangbereich mindestens eine Verdopplung des Risikos zur Folge (ca. 1,4 Mio. CHF/a).
- Bei einer vollumfänglichen Zerstörung des Bannwaldes von Andermatt beträgt das Risiko für ein 300jähriges Lawineneignis rund 3 Mio. CHF/a.

Durch die Variation der Reibungsparameter μ und ξ für bewaldete Hangzonen wurde die Sensitivität von VS-2D auf derartige Veränderungen getestet. Die Veränderungen der Reibungsparameter in den gewählten Stufen wirkten sich nur gering auf die Auslaufdistancen der Lawinen aus. Die geplante Abbildung unterschiedlicher Waldstrukturen war nicht möglich. Dessen ungeachtet ist die Implementierung von AVAL-2D in Risikoanalysen für den Naturgefahrenprozess Lawine zur Darstellung zukünftiger Veränderungen der Waldfläche zu empfehlen.

Durch den Vergleich der Risiken unter den verschiedenen Waldzuständen konnte die herausragende Bedeutung des Bannwaldes für die Gemeinde Andermatt aufgezeigt werden. Es wurden wertvolle Hinweise und generelle Vorzüge risikobasierter Strategien für ein zukünftiges Schutzwaldmanagement im Rahmen eines integralen Risikomanagements herausgearbeitet:

- Die Erstellung von risikobasierten Waldpflegeplänen erlaubt eine zielgerichtete und damit kosteneffiziente Durchführung von Waldpflegemaßnahmen.
- Risikobasierte Bewertungsansätze machen Maßnahmen im Schutzwaldmanagement mit anderen Maßnahmen im Rahmen eines integralen Risikomanagements auf monetärer Ebene vergleichbar.
- Risikobasierte Kartierungsansätze zur Schutzwaldausscheidung fördern die Subventionierung nach einheitlichen Maßstäben.
- Die Leistung des Waldes als Schutz vor Naturgefahren kann auf der Grundlage risikobasierter Ansätze monetär bewertet werden.

Die vorliegende Arbeit zeigt Potentiale und bestehende Defizite von Risikoanalysen auf und skizziert eine Möglichkeit die Lawinenschutzleistung des Waldes in dieses Verfahren zu integrieren.

Abstract

Over recent decades encroaching settlements, greater traffic and recent trends in occupation and alpine leisure activities has increased the risk by natural hazards in Switzerland. The National Platform for Natural Hazards (PLANAT) promotes a shift from solely averting danger into a 'risk culture'. New risk based management strategies are needed to deal with natural hazards in the future (PLANAT 2005). Risk based strategies permit a transparent representation and evaluation of existing risks and support political decisions at all levels. Risk analysis is recognized as the best method for estimating the danger from various natural hazards. It is a component of the 'risk concept', as defined by PLANAT, which is the only available methodical framework for handling natural hazards. Risk based analysis and evaluation methods are already used successfully in different fields of natural hazards management and assessment. However, these are currently minimally addressed in the management of protection forest (Bebi et al. 2004).

The objective of the present masters thesis is to conduct a risk analysis using a Geographic Information System (GIS) which considers the forest as an efficient biological protection against snow avalanches. The risk of a 300-year snow avalanche event was determined for the case study "The Bannwald of Andermatt" under five different forest covers. The scenarios were developed with the support of an aerial photographic analysis and digitization of the forest structures. The run-out distances were calculated by using the two-dimensional avalanche dynamic program VS-2D (Gruber 1998).

The following results can be noted:

- Under current conditions a risk of approximately 72.000,00 CHF/a exists for the municipality of Andermatt.
- The risk increases to approximately 500.000,00 CHF/a without the existing avalanche defence measures.
- Only a small variation of the risk results from a wind throw area in the lower part of the slope (approx. 560.000,00 CHF/a).

- However, clearing within the upper part of the slope would result in at least a doubling of the risk (approx. 1,4 Mio. CHF/a).
- A total destruction of the protection forest would increase the risk to approximately 3 Mio. CHF/a for a 300-years snow avalanche event.

The sensitivity of VS-2D was tested by the variation of the friction parameters μ and ξ for forest covered slope zones. The variation of the friction parameters in the selected steps had only a small effect on the run-out distances of the avalanches; an illustration of different forest structures was not possible. The implementation of this model into risk analyses to represent future changes in forest cover is highly recommended.

This comparison of the risks under the different forest conditions has shown the high importance of the protection forest for the municipality of Andermatt. Helpful details and general advantages of risk based strategies for the future management of protection forest in the context of an integral risk management are noted below:

- A local forest maintenance map provides the information needed for a cost-efficient realisation of silvicultural interventions.
- Risk based evaluation methods allow the comparison of silvicultural interventions with other avalanche safety projects.
- Risk based protection forest mapping supports a consistent specific subsidisation.
- Forest is an efficient protection against natural hazards whose monetary value can be determined through risk based strategies.

This study is an objective analysis of the potential and of the current weaknesses of risk analyses in general and shows how avalanche protection forest can be integrated into this procedure.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	VI
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIV
Abkürzungen	XV
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung: Von der Gefahrenabwehr hin zur Risikokultur.....	1
1.2 Forschungsfrage und Ziel der Arbeit	2
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen und Definitionen	4
2.1 Waldlawinen und Lawinenschutzwälder	4
2.1.1 Definitionen	4
2.1.2 Wald als Lawinenschutz	6
2.1.3 Walddynamik und Schutzwaldpflege	8
2.1.4 Schweizer Lawinenschutzwälder: Gesetzliche Grundlagen, Schutz- waldpflege und -kartierung	10
2.2 Einführung in das Risikokonzept	11
2.2.1 Definitionen	11
2.2.2 Grundlagen der Lawinengefahrenkartierung in der Schweiz	12
2.2.3 Das Risikokonzept	13
2.2.4 Der Lawinenschutzwald im Risikokonzept	15
2.2.5 Aktuelle Forschungsansätze	16
3 Das Untersuchungsgebiet: Andermatt und sein Bannwald	19
3.1 Allgemeiner Überblick	19
3.2 Klimatische Bedingungen	20
3.3 Geologische Gegebenheiten.....	20
3.4 Geschichtlicher Hintergrund	21
3.5 Forstwirtschaftliche Kennzahlen und Pflegestrategien	22

4	Methodik	25
4.1	Grundlagen	25
4.1.1	Einführung	25
4.1.2	Geräte und Software	26
4.1.3	Digitale Datengrundlagen	27
4.2	Analyse der Waldstrukturen anhand eines digitalen Orthophotos	28
4.2.1	Einführung	28
4.2.2	Verwendeter Kartierschlüssel	28
4.2.3	Der Kartierablauf	32
4.2.4	Weiterverarbeitung der digitalisierten Waldstrukturen	34
4.3	Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald	35
4.3.1	Einführung	35
4.3.2	Modell zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald	35
4.4	Die Risikoanalyse – Ermittlung des Lawinenrisikos	37
4.4.1	Einführung	37
4.4.2	Ereignisanalyse als Element der Gefahrenanalyse	39
4.4.2.1	Überblick	39
4.4.2.2	Das rechnergestützte Lawinenmodellierungs-System AVAL-2D	41
4.4.2.3	Automatisierte Abgrenzung potentieller Anrissgebiete	41
4.4.2.4	Ausscheiden der potentiellen Anrissgebiete für das Untersuchungsgebiet	43
4.4.3	Wirkungsanalyse als Element der Gefahrenanalyse	44
4.4.3.1	Das Voellmy-Salm Modell	44
4.4.3.2	Durchführung der Simulation	48
4.4.3.3	Berücksichtigung des Schutzwaldes in der Simulation	49
4.4.3.4	Sensitivitätsanalyse	50
4.4.4	Expositionsanalyse	51
4.4.5	Folgenanalyse	54
4.4.6	Risikobestimmung und Darstellung	56
4.5	Das Risiko in Abhängigkeit vom Waldzustand	58
4.5.1	Waldzustandsszenarien	58
4.5.2	Ermitteln der Risikoveränderung	60
5	Ergebnisse	61
5.1	Die Waldstrukturen und die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Bannwald von Andermatt	61
5.2	Ergebnisse der Risikoanalysen	63

5.2.1	Gefahrenanalyse.....	63
5.2.2	Expositionsanalyse.....	69
5.2.3	Folgenanalyse	71
5.2.4	Risikobestimmung und Darstellung.....	75
5.3	Die Sensitivitätsanalyse: Auswirkung der Reibungsparameter auf die Lawinensimulation mit VS-2D	78
5.4	Der Einfluss von Waldveränderungen auf das Risiko und die Schlussfolgerungen.....	85
6	Diskussion.....	88
6.1	Diskussion der Ergebnisse	88
6.1.1	Die Ergebnisse der Risikoanalyse im Vergleich.....	88
6.1.2	Die Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen der Reibungsparameter μ und ξ auf die Lawinesimulation mit VS-2D	91
6.2	Diskussion der Methoden.....	92
6.2.1	Die Risikoanalyse als methodischer Ansatz zur Bestimmung des Risikos	92
6.2.2	Die Analyse der Waldstrukturen und die Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit.....	94
6.2.3	Beurteilung des 2-dimensionalen numerischen Lawinensimulationsmodells VS-2D	95
6.3	Bedeutung der Untersuchung für das Schutzwaldmanagement.....	97
6.3.1	Zielgerichtete Waldpflege durch risikobasierte Waldpflegepläne.....	97
6.3.2	Risikobasierte Bewertungsansätze als Investitionskriterien für die Schutzwaldpflege.....	101
6.3.3	Schutzwaldausscheidung mit Unterstützung risikobasierter Kartierungsansätze.....	103
6.3.4	Die monetäre Bewertung der Schutzleistung des Waldes	104
6.4	Ungeklärte Fragen und zukünftiger Forschungsbedarf.....	107
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	110
	Literaturverzeichnis	113
	Anhang.....	123

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Modell zur Wirkung von Störungen auf Walddynamik, Waldstruktur und auf die Schutzwirkung des Waldes (in Anlehnung an Brang et al. 2004).	8
Abbildung 2:	Grundmodell des Risikokonzepts (in Anlehnung an Borter 1999a).	14
Abbildung 3:	Der Bannwald von Andermatt.	19
Abbildung 4:	Bannwald von Andermatt: (a) Fichtenverjüngung auf Moderholz; (b) Lawinenverbauung (Fotos: M. Teich, 26.10.2005).	23
Abbildung 5:	Übersicht über die Arbeitsschritte.	25
Abbildung 6:	Schematischer Luftbildschlüssel für die Waldstrukturkartierung in subalpinen fichtendominierten Wäldern. DG = Deckungsgrad, h_{Dom} = Oberhöhe, US = Unterschicht (in Anlehnung an Bebi 2000).	29
Abbildung 7:	Modellhafte Darstellung des Schlussgrades zur Beurteilung im Luftbild (in Anlehnung an Lardelli 2003).	30
Abbildung 8:	Schematischer Ablauf der Waldstrukturkartierung anhand eines digitalen Orthophotos.	33
Abbildung 9:	Auswahl an GIS-Layer zur Modellierung der Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit.	37
Abbildung 10:	Arbeitsschritte der Risikoanalyse.	38
Abbildung 11:	Ausschnitte (a) aus dem Lawinenatlas Uri und (b) aus Aufzeichnungen zu vorhandenen Lawinenzügen in der Region Andermatt von C. Wilhelm (1997).	40
Abbildung 12:	Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur Ausscheidung potentieller Lawinenanrissgebiete mit „ASA-Prog“: (a) automatisierte Abgrenzung, (b) & (c) manuelle Modifikation, (d) Ergebnis.	44
Abbildung 13:	Ablaufschema für die Durchführung von Simulationsrechnungen, in den eckigen Klammern ist das Format der Daten spezifiziert (Gruber 1998).	48
Abbildung 14:	Beispiel zweier RIKO Excel-Datenblätter zur Eingabe wichtiger Eingangsgrößen und zur automatischen Berechnung der Risikos.	53
Abbildung 15:	Schematische Darstellung von Risikomatrizen (in Anlehnung an Borter 1999a).	57
Abbildung 16:	Darstellung der Waldflächen der Szenarien I bis IV anhand der Input-GRIDs zur Bestimmung der Reibungsparameter μ und ξ in AVAL-2D.	59
Abbildung 17:	Kartierte Strukturklassen im Bannwald von Andermatt.	61
Abbildung 18:	Die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Bannwald von Andermatt in [%].	62

Abbildung 19: Intensitätskarte Andermatt Szenario I: „mit Wald – mit Lawinenverbauung“	64
Abbildung 20: Intensitätskarte Andermatt Szenario II: „mit Wald – ohne Lawinenverbauung“	65
Abbildung 21: Intensitätskarte Andermatt Szenario III: „Wald mit kleiner Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung“	66
Abbildung 22: Intensitätskarte Andermatt Szenario IV: „Wald mit großer Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung“	67
Abbildung 23: Intensitätskarte Andermatt Szenario V: „ohne Wald – ohne Lawinenverbauungen“	68
Abbildung 24: Objektartenkarte Andermatt	70
Abbildung 25: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario I.....	71
Abbildung 26: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario II.	72
Abbildung 27: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario III.	73
Abbildung 28: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario IV.....	73
Abbildung 29: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario V.	74
Abbildung 30: Anzahl betroffener Gebäude bei der Lawinensimulation mit VS-2D in Abhängigkeit vom Waldzustand.	74
Abbildung 31: Risikomatrizen für Szenario I, getrennt nach Personen- und Sachrisiken.	76
Abbildung 32: Ausschnitte aus den Intensitätskarten für T = 300: a) Szenario II, b) Kombination 1 und c) Kombination 2; mit Angabe der für „Wald“ variierten Reibungsparameter μ und ξ	79
Abbildung 33: Ausschnitte aus den Intensitätskarten für T = 300: a) Kombination 3, b) Kombination 4 und c) Kombination 5; mit Angabe der für „Wald“ variierten Reibungsparameter μ und ξ	80
Abbildung 34: Ausschnitte aus den Intensitätskarten für T = 300: a) Kombination 6, b) Kombination 7 und c) Kombination 8; mit Angabe der für „Wald“ variierten Reibungsparameter μ und ξ	81
Abbildung 35: Gegenüberstellung der prozentualen Flächenänderung der μ - ξ -Kombinationen (K) 1 bis 8 im Verhältnis zur Lawinenfläche des Szenario II (Fläche = 0).	82
Abbildung 36: Grafische Darstellung der Randmittelwerte der prozentualen Flächenänderung in Abhängigkeit von den Faktorstufen der Reibungsparameter μ bzw. ξ	85
Abbildung 37: Kollektives Personenrisiko, kollektives Sachrisiko und jährliches kollektives Gesamtrisiko in [CHF/a] in Abhängigkeit vom Waldzustand.	86
Abbildung 38: Schematische Darstellung des Entwicklungsprozesses eines risikobasierten Waldpflegeplans (links: potentiellen Anrissgebieten; rechts: Überlagerung der Anrissgebietenzone mit der Bestandeskarte).	99

Abbildung 39: Waldpflegezonenplan in Abhängigkeit von der risikomindernden
Waldwirkung für den Bannwald von Andermatt. 100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Variablen und Koeffizienten (a und B_i) für das Waldlawinenmodell (Bebi 2000).....	36
Tabelle 2:	Übersicht über die Parameter-Kombination zur automatischen Strukturierung der Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet.....	42
Tabelle 3:	Verwendete Reibungsparameterkombination von μ und ξ für Großlawinen ($> 60.000 \text{ m}^3$) und eine Wiederkehrdauer von $T = 300$ Jahre.....	50
Tabelle 4:	Zusammenstellung der μ - ξ -Parameterkombinationen als Inputparameter für die Lawinensimulation mit VS-2D für bewaldete Fläche im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.....	51
Tabelle 5:	Objektarten und zugehörige Gebäudeklassen.....	69
Tabelle 6:	Schadenausmaß (A_S) für Personenschäden [Anzahl der Todesfälle/Ereignis] und Sachwerte [CHF/Ereignis] für die Szenarien I bis V.....	75
Tabelle 7:	Jährliches Kollektivrisiko des Systems (R) als Summe der monetarisierten Personen- und Sachrisiken der Szenarien I bis V.....	77
Tabelle 8:	Berechnung der Randmittelwerte für den Reibungsparameter μ der Flächenänderung in [%] der Lawinenfläche des Szenario II durch Berechnung des arithmetischen Mittelwertes der prozentualen Flächenänderung der jeweiligen Kombinationen (K) in den Faktorstufen 1 bis 3.....	83
Tabelle 9:	Randmittelwerte der Faktorstufen 1 bis 3 des Reibungsparameters ξ der Flächenänderung in [%] der Lawinenfläche des Szenario II.....	84

Abkürzungen

λ	Letalität = Sterbewahrscheinlichkeit von Personen in einem Objekt
μ	Faktor der trockenen Reibung
ξ	Faktor der turbulenten Reibung
ψ_{0m}	Mittlere Hangneigung
ψ_k	Kritische Hangneigung
ψ_{pm}	Mittlere Hangneigung am Ende der Sturzbahn einer Lawine
ψ_r	Hangneigung am Ende der Auslaufzone einer Lawine
A	Schadenpotential
AML	ArcInfo-Macro-Language
A_S	Schadenausmaß
ASA-Prog	Programm zur Abgrenzung und Strukturierung von Anrissgebieten (Gruber 1998)
ASF	Allgemeine Schutzfunktion
AVAL-2D	Rechnergestütztes Lawinenmodellierungs-System (Gruber 1998)
BN	Bayes'sches Netz
BSF	Besondere Schutzfunktion
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
CHF	Schweizer Franken
d_0	Mittlere Anrissmächtigkeit einer Lawine
d_0^*	Mittlere Schneehöhe
DG	Deckungsgrad
DHM	Digitales Höhenmodell
d_p	Fließhöhe einer Lawine am Ende der Sturzbahn
d_r	Mittlere Ablagerungshöhe einer Lawine
effor2	Projekt: Leistungsorientierte Subventionspolitik im Bereich des Waldgesetzes
Eidg.	Eidgenössisch
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
$f(\psi_{0m})$	Neigungsfaktor
f_A	Faktor für Gebäudeabbruchkosten

g	Erdbeschleunigung
GIS	Geografisches Informationssystem
h_{dom}	Oberhöhe
h_E	Eintretenshäufigkeit eines Lawinenereignisses
h_P	Aufenthalt von Personen in einem Objekt in h pro Tag
KNA	Kosten-Nutzen Analyse
K	Kombination
KWA	Kosten-Wirksamkeitsanalyse
LFI	Landesforstinventar
LFI2-SW	Schutzwald im 2. Landesforstinventar
N_P	Anzahl der Personen in einem Gebäude
PLANAT	Nationale Plattform Naturgefahren
p_{Pr}	Präsenzwahrscheinlichkeit von Personengruppen in einem Objekt
p_{rA}	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Naturgefahrenprozesses
Q	Durchflussmenge am Ende der Anrisszone einer Lawine
r	Objektbezogenes Risiko
R	Kollektivrisiko
RIKO	Excel-Applikation zur Berechnung des Risikos (SLF 2005)
s	Auslaufdistanz einer Lawine
S_{est}	Schadempfindlichkeit von Gebäuden
S_{Ih}	Schadempfindlichkeit des Inhaltswertes eines Gebäudes
SLF	Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos (CH)
S_{St}	Schadempfindlichkeit des Strukturwertes eines Gebäudes
SZ	Szenario
T	Wiederkehrperiode eines Lawinenereignisses in Jahren
t_P	Aufenthalt von Personen in einem Objekt in Tagen pro Woche
UR	Kanton Uri
US	Unterschicht
v_0	Fließgeschwindigkeit einer Lawine am Ende der Anrisszone
Vfm	Vorratsfestmeter
v_p	Fließgeschwindigkeit einer Lawine am Ende der Sturzbahn
v_r	Fließgeschwindigkeit einer Lawine in der Auslaufzone
VS-2D	2-dimensionales numerisches Lawinensimulationsmodell (Gruber 1998)

w_0	Größte Breite einer Lawine im Anrissgebiet
WaG	Waldgesetz
WAP-CH	Waldprogramm der Schweiz
W_{Ih}	Inhaltswert eines Gebäudes
w_P	Aufenthalt von Personen in einem Gebäude in Wochen
w_p	Breite einer Lawine am Ende der Sturzbahn
w_r	Größte Breite einer Lawine in der Auslaufzone
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
W_{St}	Strukturwert eines Gebäudes
WTP	Willingness to Pay-Methode

1 Einleitung

1.1 Problemstellung: Von der Gefahrenabwehr hin zur Risikokultur

„Als typisch schweizerische Exportartikel gelten heute etwa das Rote Kreuz oder das integrale Risikomanagement.“ heißt es in einem Artikel des Tages-Anzeigers (Bolli 2006). Der Beitrag mit der Überschrift „*Risikomanagement als Schweizer Kulturgut*“ berichtet von der langen Tradition der Schweizer im Umgang mit Naturgefahren. Die Schweiz ist ein Alpenland; die Menschen waren stets gezwungen, mit den allgegenwärtigen Gefahren und Risiken umzugehen. Dennoch haben eine immer dichtere Besiedlung, zunehmender Verkehr und die vielfältigen Bedürfnisse in Beruf und Freizeit das Risiko durch Naturgefahren in den letzten Jahrzehnten vergrößert. Diese sich wandelnden Ansprüche der Gesellschaft erfordern eine kontinuierliche Anpassung alter und die Entwicklung neuer Strategien im Umgang mit der Gefahr (Wilhelm et al. 2001).

Unter dem Motto „*Von der Gefahrenabwehr hin zu einer umfassenden Risikokultur*“ fordert die Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT 2005)¹ ein Umdenken weg von gefahrenorientierten Managementstrategien hin zu einem integralen Risikomanagement. Der Entwicklungsprozess in der Schweiz im Umgang mit Naturgefahren lässt sich in vier Phasen einteilen (verändert nach PLANAT 2005):

- Reaktion auf Ereignisse,
- Punktuell vorausschauende Maßnahmenplanung,
- Systematisch vorausschauende Gefahrenbeurteilung,
- Und der Beginn risikobasierter Schutzplanung mit der Entwicklung erster risikobasierter Beurteilungsinstrumente anfangs der 90er Jahre.

Risikobasierte Strategien erlauben eine transparente Darstellung und Beurteilung von Risiken, deren Veränderung und von Schutzmaßnahmen (PLANAT 2005).

Einen besonderen Stellenwert im Schutz vor Naturgefahren nimmt seit Jahrhunderten der Gebirgswald im Sinne einer effizienten, biologischen Schutzmaßnahme ein. In-

¹ Nationale Plattform Naturgefahren: gegründet 1997 vom Bundesrat, beauftragt mit der konzeptionellen Koordination im Bereich der Vorbeugung vor Naturgefahren.

samt werden in der Schweiz 7.000 ha tiefer gelegene Siedlungs- und Industriezonen sowie unzählige Verkehrswege vor Naturgefahren geschützt (Draeger 2005). Jedoch wird der Schutzwald im Rahmen eines integralen Risikomanagements bisher kaum beachtet; risikobasierte Analyse- und Bewertungsmethoden fehlen für diesen Bereich weitgehend (Bebi et al. 2004). Um die Leistung des Waldes bei der Bewertung und beim Vergleich mit alternativen Schutzmaßnahmen beurteilen zu können, gilt es risikobasierte Strategien im Bereich des Schutzwaldmanagements als Teil eines integralen Risikomanagements zu entwickeln.

1.2 Forschungsfrage und Ziel der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit setzt sich zum Ziel, Veränderungen des Schutzwaldes in eine Risikoanalyse als Verfahren zur Bestimmung des Risikos im Umgang mit Naturgefahren zu integrieren. Daraus sollen wichtige Hinweise und Rückschlüsse für die Bewirtschaftung des Schutzwaldes im Rahmen eines integralen Risikomanagements abgeleitet werden.

Folgende Forschungsfrage gilt es zu bearbeiten:

Wie wirken sich verschiedene Annahmen bezüglich Waldveränderung und Wirkung des Waldes auf das Resultat einer Risikoanalyse aus?

Durch die Kombination verschiedener Arbeitstechniken wird ein methodischer Rahmen erarbeitet, welcher es erlaubt den Gebirgswald als sich verändernde, effektive und biologische Schutzmaßnahme bei der Bestimmung des Risikos infolge von Naturgefahren zu berücksichtigen. Es sollen Empfehlungen zur Integration der gewonnenen Erkenntnisse in ein risikobasiertes Schutzwaldmanagement zur Reduktion der Kosten und zur Optimierung von externen Effekten bei der Schutzwaldpflege entwickelt werden.

Bearbeitet wird die Forschungsfrage anhand einer Fallstudie zum „Bannwald von Andermatt“; untersucht wird der Naturgefahrenprozess Lawine.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Hauptkapitel. Im ersten Kapitel wurden bereits die Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit erörtert.

Das zweite Kapitel widmet sich den theoretischen Grundlagen. Es werden für das Verständnis wichtige Begriffe definiert und rechtliche Grundlagen für die Schutzwaldauscheidung sowie die Subventionierung der Schutzwaldpflege benannt. Des Weiteren wird das Risikokzept als methodischer Ansatz für den Umgang mit Sicherheitsbeurteilungen infolge von Naturgefahren vorgestellt. Ein kurzer Überblick über aktuelle Forschungsprojekte soll die Entwicklung risikobasierter Strategien in der Schutzwaldforschung sowie die Integration solcher Ansätze in die Praxis skizzieren.

Im dritten Kapitel wird das Untersuchungsgebiet der Fallstudie unter besonderer Berücksichtigung forstwirtschaftlicher Aspekte vorgestellt.

In Kapitel 4 werden die verwendeten Methoden detailliert beschrieben. Der Schwerpunkt liegt in der Risikoanalyse, welche als allgemeingültige Vorgehensweise im Rahmen eines integralen Risikomanagements ausführlich erläutert wird. Die Risikoanalyse wird mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) und rechnergestützter Simulationen durchgeführt.

Das fünfte Kapitel dient der Präsentation der Ergebnisse, welche im anschließenden sechsten Kapitel ausgewertet und diskutiert werden. Des Weiteren werden in Kapitel 6 die angewandten Methoden kritisch beurteilt, sowie Handlungsempfehlungen und alternative Lösungsansätze erarbeitet.

Das Kapitel 7 dient der Zusammenfassung der Ergebnisse und einer kritischen Beurteilung der gesamten Arbeit unter dem Aspekt der erreichten Lösung der Forschungsfrage. Daraus werden Schlussfolgerungen zum weiteren Forschungsbedarf abgeleitet.

2 Grundlagen und Definitionen

2.1 Waldlawinen und Lawinenschutzwälder

2.1.1 Definitionen

Zur Einführung in das Thema „Wald als Lawinenschutz“ gilt es im Vorfeld für das Verständnis wichtige Begriffe zu klären. Durch gezielte Fragestellungen wird eine logische Reihenfolge zur Erklärung der Begriffe aufgebaut.

Lawinen sind Massenbewegungen, die Schneemassen von einem Anrissgebiet über eine Sturzbahn in ein Ablagerungsgebiet transportieren. Ihr Auftreten ist abhängig von der Topographie, dem Klima sowie den Witterungsbedingungen (Föhn 1993).

Es wird unterschieden in **Lockerschnee- und Schneebrettlawinen**. Erstere haben einen punktförmigen Anriss und erzeugen eine birnenförmige Abgleitform. Bei Schneebrettlawinen gleitet eine ganze Schneetafel auf einer Schwachschicht großflächig ab. Der Anriss ist linienförmig, scharfkantig und senkrecht zur Gleitfläche (z.B. Salm 1987; Margreth 2004).

Was sind Waldlawinen?

Nach Meyer-Grass & Imbeck (1985) sind **Waldlawinen** solche Lawinen, deren Anrisszonen sich im Bereich der Waldbestockung befinden. Lawinen, die oberhalb des Waldes anreißen, sind keine Waldlawinen.

Was ist Wald nach dieser Definition?

Nach Art. 2 WaG gilt **Wald** als „jede Fläche, die mit Waldbäumen oder Waldsträuchern bestockt ist und Waldfunktionen erfüllen kann“. Diese Definition lässt jedem Kanton einen Spielraum für eine eigene Festlegung der Grenzwerte für Breite, Fläche und Alter der bestockten Fläche. Zur Erhebung von Inventurdaten ist es notwendig, fortwährend geltende Regeln zu schaffen. Die Walddefinition des Landesforstinventars (LFI) stützt sich auf die Kriterien Waldbreite, Deckungsgrad (DG)² und Oberhöhe

² Verhältnis der durch die vertikalen Kronenprojektionen überschirmten Fläche zur Gesamtfläche (SAFE 1986).

$(h_{\text{dom}})^3$ (nach Mahrer 1976): Eine bestockte Fläche wird als Wald bezeichnet, wenn ihr DG mindestens 20 % bei einer minimalen Breite von 50 m beträgt. Schmalere Flächen müssen einen höheren DG aufweisen. Die h_{dom} der Bestockung muss mindestens 3 m betragen, mit Ausnahme von Aufforstungen, Schlag-, Brand- und Sturmflächen, Legföhren- oder Alpenerlenbeständen (Brassel & Brändli 1999).

Was macht Wald zu Schutzwald?

Die Schutzfunktion des Waldes lässt sich unterscheiden in den Schutz vor Naturgefahren (Steinschlag, Bodenerosion, Murgang, Lawine) und den Schutz vor Zivilisationsgefahren (Lärm, Abgase, Ruß/Staub, Klima, Sicht) (Duc et al. 2004). In den meisten alpinen Ländern Europas hat die erstgenannte Funktion eine herausragende Bedeutung. **Schutzwald** wird vorwiegend als Wald mit objektbezogener bzw. direkter Schutzfunktion aufgefasst (Dorreen et al. 2004). Er schützt Menschen, Gebäude und Infrastruktur gegen Naturgefahren wie Lawinen oder Steinschlag (Brang 2001).

Wann wird Schutzwald zum Lawinenschutzwald?

Zum potentiellen **Lawinenschutzwald** wird ein Schutzwald, wenn eine Grunddisposition für die Naturgefahr „Lawine“ vorhanden ist. Diese Grunddisposition ist im Wesentlichen von den folgenden Standortmerkmalen abhängig (nach Perzl 2005):

- Eine Hangneigungen über 30°,
- Eine Schneedeckenhöhe, welche die Bildung von größeren Schneebrettern oder Gleitschneelawinen ermöglicht,
- Konvexe Hangformen und Hanglängen von etwa 20 bis 50 m.

³ Mittlere Höhe der 100 stärksten (= dicksten) Bäume pro ha (Brassel & Brändli 1999).

2.1.2 Wald als Lawinenschutz

Die Schutzwirkung vor Lawinenanrissen basiert auf Eigenschaften des Waldes, die in der Literatur umfassend beschrieben sind und im folgenden kurz erläutert werden (z.B. Salm 1978; Stöckli et al. 1997; Mayer & Ott 1991; Margreth 2004; Frehner et al. 2005):

- *Schneeinterzeption*: Durch das Auffangen fallenden Schnees in den Baumkronen und nachträgliches Herabfallen auf den Boden kommt es zur Bildung inhomogener Schneeschichten.
- *Unterschiedliche Strahlungsverhältnisse*: Die abschirmende Wirkung der Bäume reduziert den Aufbau instabiler homogener Schneeschichten wie Schwimmschnee⁴ und Oberflächenreif⁵, welche gefährliche Schwachschichten in der Schneedecke darstellen.
- *Reduktion der Windeinwirkung*: Die reduzierte Windgeschwindigkeit im Bestand im Vergleich zum Freiland verhindert mögliche Schneeverfrachtungen.
- *Stützwirkung der Stämme*: Die mechanische Abstützung und Stabilisierung der Schneedecke durch die Stämme ist zu erwähnen, hat aber nach Salm (1978) eine untergeordnete Bedeutung.
- *Erhöhung der Bodenrauigkeit*: Durchragen Rauigkeitselemente wie Gesteinsblöcke, Stöcke oder liegendes Holz die Schneedecke kann ein Anreißen von Lawinen verhindert werden.

Ob es zum Anreißen einer Lawine kommt oder nicht wird durch die Kombination von Bestandesparametern und Standortfaktoren bestimmt.

⁴ Neubildung von Schneekristallen durch aufbauende Umwandlung (Metamorphose) im Innern der Schneedecke (Munter 2003).

⁵ Bildung einer Reifschicht aus blätterförmigen Eiskristallen durch Sublimation auf unterkühlten Festkörpern, z.B. in sternklaren Frostnächten. Eingeschneite Oberflächenreife bilden ideale Gleitschichten für Schneebrettlawinen (Munter 2003).

Zur Ermittlung der Schlüsselparameter und deren kritische Größen wurden in den Wintern 1985/86 bis 1989/90 im ganzen schweizerischen Alpenraum aktuelle Waldlawineneignisse aufgenommen und 25 für die Analyse relevant gefundene Standortparameter systematisch erfasst (Meyer-Grass & Schneebeli 1992). Mittels der statistischen Auswertung der Daten wurden folgende Schlüsselgrößen herausdifferenziert (Meyer-Grass & Schneebeli 1992):

Die **mittlere Lückenbreite**⁶, der **Kronendeckungsgrad**⁷, welcher stark korreliert mit der **Stammzahl pro Hektar**, und der **Vegetationsdeckungsgrad**⁸, in Kombination mit der **Hangneigung**.

So führen Lückenbreiten größer als 10 bis 15 m in Höhenstufen über 1.500 m ü. M. bei entsprechender Hangneigung häufig zu Lawinenanrissen. Weitere kritische Größen der Schlüsselfaktoren zur Lawinenauslösung und der Vergleich verschiedener Waldtypen sind in Meyer-Grass & Schneebeli (1992) eingehend erläutert.

In weiterführenden Untersuchungen von Pfister (1997) und Bebi (2000) wurden diese Parameter durch den der **Hangneigungsänderung** ergänzt; der Vegetationsdeckungsgrad trat in seiner Bedeutung zurück.

Die Lückenlänge⁹ hat Einfluss auf die Geschwindigkeit und Gewalt einer Lawine. Lawinen mit einer Auslaufstrecke von mehr als 150 m können nicht mehr von Wald gestoppt werden (Schneebeli & Bebi 2004). Ebenso ist die Bremswirkung des Waldes bei Lawinen, die hoch über der Waldgrenze anreißen, sehr beschränkt. Gestoppt werden können nur knapp oberhalb der Waldgrenze angerissene Lawinen (Margreth 2004).

⁶ Abstand zwischen den Kronenrändern (Meyer-Grass & Schneebeli 1992).

⁷ Vgl. Deckungsgrad

⁸ Verhältnis der mit Vegetation bewachsener Fläche zur Gesamtfläche (Meyer-Grass & Schneebeli 1992).

⁹ Distanz von der Lawinenanrissstelle in einer Lücke bis zum nächsten, in der Falllinie gelegenen Waldsaum (Lardelli 2003).

2.1.3 Walddynamik und Schutzwaldpflege

Die Bestandesentwicklung von Waldökosystemen ist geprägt durch Aufbauprozesse wie Verjüngung und Baumwachstum sowie Abbauprozesse, d.h. das Absterben von Bäumen. Diese Prozesse werden in der Regel durch Störungen¹⁰ initiiert (Brang et al. 2004). In alpinen Wäldern sind insbesondere Lawinen, Käferkalamitäten und Windwürfe entscheidend für die natürliche Entwicklung eines Bestandes (Kulakowski & Bebi 2004).

Die Waldstruktur bestimmt maßgeblich die Schutzwirkung des Waldes und kann durch waldbauliche Eingriffe gesteuert und gelenkt werden. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 1 zusammenfassend dargestellt.

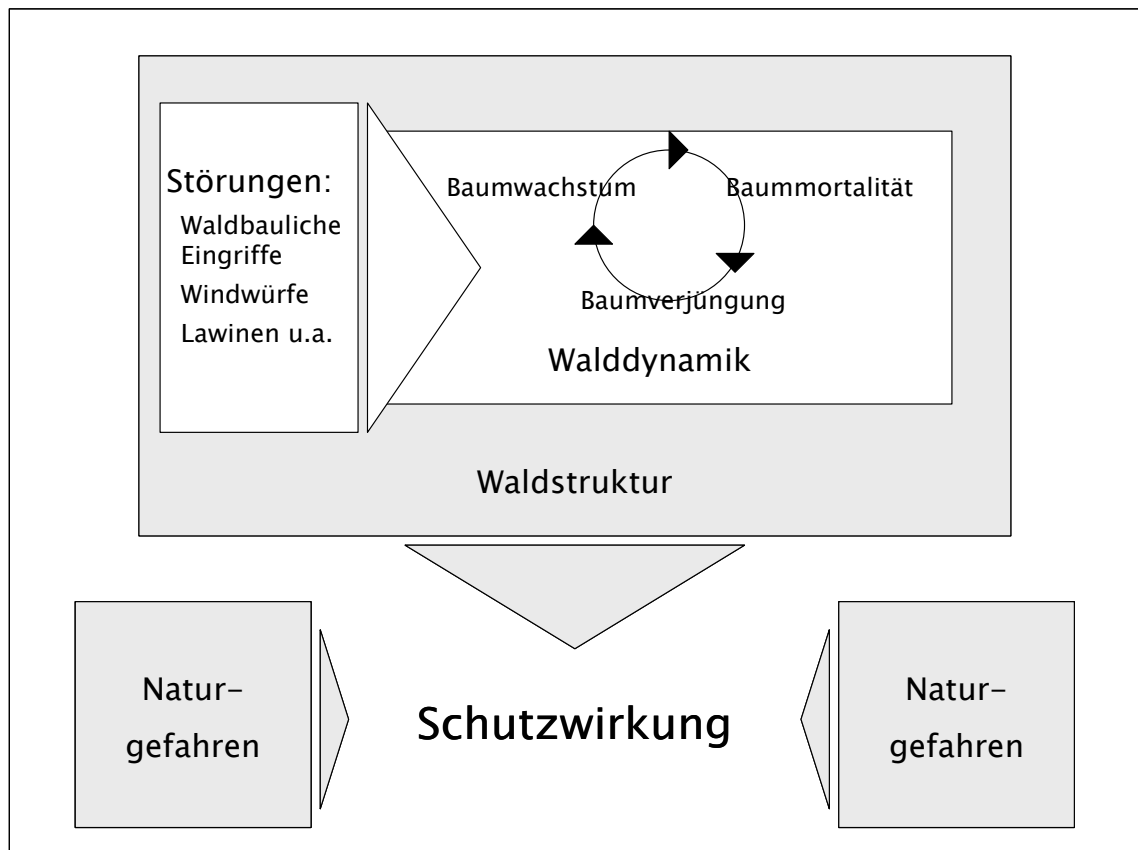


Abbildung 1: Modell zur Wirkung von Störungen auf Walddynamik, Waldstruktur und auf die Schutzwirkung des Waldes (in Anlehnung an Brang et al. 2004).

¹⁰ Ereignisse, welche die Struktur eines Ökosystems, einer Organismengemeinschaft oder von Populationen abrupt umgestalten und so die Ressource, die Substratverfügbarkeit oder die Umwelt verändern (White & Pickett 1985).

Bei der Schutzwaldpflege werden Strategien verfolgt, welche die Schutzwirkung als Leistung des Waldes aufrechterhalten und verbessern sollen. Durch die Kombination von präventiven und kurativen Eingriffen wird versucht, größtmöglichen Schutz vor Naturgefahren zu garantieren. Präventive Maßnahmen verfolgen das Ziel, die Walddynamik auf diejenigen Phasen einzuschränken, in denen die Schutzwirkung genügend gewährleistet ist (Brang 2001). Die Schutzwälder sollen also störungsresistenter¹¹ und störungselastischer¹² werden. Kurative Eingriffe dienen der raschen Wiederherstellung der Schutzwirkung nach einer natürlichen Störung.

Die Publikation „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion“ (Frehner et al. 2005) soll die Entscheidungsfindung bei der Schutzwaldpflege auf Bestandesebene unterstützen. Es sind Zielvorstellungen festgehalten und Anforderungsprofile beschrieben, die mit dem Ist-Zustand verglichen werden können, um daraus notwendige Maßnahmen abzuleiten. Darin heißt es: „*Langfristig minimal und damit möglichst wirksam ist Schutzwaldpflege dann, wenn die natürliche Walddynamik optimal genutzt werden kann*“ (Frehner et al. 2005). Dabei stützen sich Frehner et al. (2005) auf die Annahme, dass mit zunehmender Naturnähe der Aufwand für die Schutzwaldpflege abnimmt.

Noch unzureichend geklärt ist, unter welchen Voraussetzungen die natürliche Waldentwicklung in Schutzwäldern unbeeinflusst bleiben kann, ohne unvertretbare Risiken einzugehen und damit die Frage: „*Was passiert in einem Schutzwald wirklich, wenn wir nicht eingreifen?*“ (Brang et al. 2004). „*In some cases, there may be a convergence of the goal to manage forests in a natural condition and the goal to minimize hazards to human settlements. But in other cases, these two goals may be incompatible*“ (Kulakowski & Bebi 2004).

¹¹ Störungsresistenz: Fähigkeit eines Waldes, Belastungen durch einen Störungsfaktor ohne Veränderungen zu überstehen (Grimm & Wissel 1997).

¹² Störungselastizität: Geschwindigkeit mit der ein Wald nach einer Störung wieder in den Ausgangszustand zurückkehrt (Grimm & Wissel 1997).

2.1.4 Schweizer Lawinenschutzwälder: Gesetzliche Grundlagen, Schutzwaldpflege und -kartierung

Wie bereits erwähnt hat die Funktion der Bergwälder als Schutz vor Naturgefahren im Schweizer Alpenraum eine herausragende Bedeutung. Seit dem ersten Forstpolizeigesetz von 1876 investiert der Bund in die Pflege der Hochgebirgswälder zur Aufrechterhaltung ihrer Schutzfunktion (Schärer 2004). Heute stellt das Bundesgesetz über den Wald vom 4. Oktober 1991 (Waldgesetz, WaG) die Grundlage für den Schutz von Menschen oder erheblicher Sachwerte vor Naturgefahren dar: *„Dieses Gesetz soll [...] dafür sorgen, dass der Wald seine Funktionen, namentlich seine Schutz, Wohlfahrts- und Nutzfunktion (Waldfunktionen) erfüllen kann [...]. Es soll ausserdem dazu beitragen, dass Menschen und erhebliche Sachwerte vor Lawinen, Rutschungen, Erosion und Steinschlag (Naturereignisse) geschützt werden“* (WaG Art. 1, Abs. 1c, Abs. 2). Artikel 19, WaG betont besonders die präventive Komponente von Pflegemaßnahmen und die Verantwortung der Kantone zum Schutz von Menschenleben vor Naturgefahren: *„Wo es der Schutz von Menschen oder erheblichen Sachwerten erfordert, sichern die Kantone die Anrissgebiete von Lawinen sowie Rutsch-, Erosions- und Steinschlaggebiete und sorgen für den forstlichen Bachverbau. Für die Massnahmen sind möglichst naturnahe Methoden anzuwenden.“*

Artikel 1, WaG dient als Grundlage für die Subventionierung von technischen und waldbaulichen Maßnahmen zur Erhaltung der Schutzwirkung des Waldes. Weitere rechtliche Grundlagen für Fördermaßnahmen des Bundes sind die Art. 20, Abs. 5 sowie Art. 38, Abs. 1 des WaG.

Die Voraussetzung für die Subventionierung ist die Ausscheidung von Wäldern mit besonderer Schutzfunktion (BSF), welche den Kantonen obliegt (BUWAL 2003). Gefordert wird der Nachweis des Schadenpotentials, die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Waldes und die Ermittlung des Gefahrenpotentials.

In Art. 33, Abs. 1 verpflichtet sich der Bund *„[...] für periodische Erhebungen über die Standorte, die Funktionen und den Zustand des Waldes [...]“* zu sorgen. Im Rahmen des Landesforstinventars (LFI) werden im Abstand von 10 Jahren systematisch Erhebungen auf Waldprobeflächen im Kilometer-Koordinatennetz der Landeskarte durchgeführt (Duc et al. 2004). Im Rahmen des LFI2 wurde die Schutzwaldfläche mit Hilfe computergestützter Modelle hergeleitet. Nur Wald mit einer gefahrenmindernden Wirkung

wird als Schutzwald angesehen. Rund 9 % der Schweizer Waldfläche konnten im Rahmen des LFI2 als Wälder mit einer Schutzfunktion (LFI2-SW) bestimmt werden. Demgegenüber meldeten die Kantone der Eidgenössischen Forstdirektion rund 28.000 ha (23 % der Waldfläche) als BSF-Wälder und Waldflächen mit allgemeiner Schutzfunktion (ASF-Wald) im Umfang von 430.000 ha (36 %) (Duc et al. 2004).

Im Waldprogramm der Schweiz (WAP-CH) vom 26.01.2004 ist eines der prioritären Ziele des Bundes die Erhaltung des Schutzwaldes. Eine wichtige Komponente dieser umfangreichen Aufgabenstellung ist die Kartierung von Schutzwaldflächen nach objektiven, einheitlichen und gesamtschweizerischen Kriterien (Schärer 2004). Damit werden kantonale Schutzwaldausscheidungen vergleichbar und Subventionen können nach einheitlichen Maßstäben eingesetzt und verteilt werden. Die im vorangegangenen Abschnitt erwähnte Schutzwaldausscheidung im LFI2 auf der Basis von Modellierungen der wichtigsten Gefahrenprozesse mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS), ist ein wichtiger Ansatz zur Erhebung der gesamtschweizerischen Schutzwaldfläche. Dieses Vorgehen wird in Kapitel 2.2.5 dieser Arbeit erneut aufgegriffen und erläutert.

2.2 Einführung in das Risikokonzept

2.2.1 Definitionen

Das Risikokonzept ist ein allgemeingültiger methodischer Ansatz, welcher die Abläufe bei der Beurteilung von Sicherheitsproblemen strukturiert (PLANAT 2005) und soll in Kapitel 2.2.3 eingehen erläutert werden. Zuvor gilt es für das Verständnis wichtige Begriffe aus der Sicherheitswissenschaft¹³ zu definieren und das Vorgehen bei der Lawinengefahrenkartierung zu erläutern (vgl. Kap. 2.2.2).

Allgemein wird **Sicherheit** als relativer Zustand der Gefahrenfreiheit angesehen, der stets nur für einen bestimmten Zeitraum, eine bestimmte Umgebung oder unter bestimmten Bedingungen gegeben ist und damit letztlich unerreichbar wird (Borner 1999b).

¹³ Die Entwicklung der Sicherheitswissenschaft steht in engem Zusammenhang mit der Einführung neuer Technologien. Charakteristisch für die moderne Sicherheitswissenschaft sind interdisziplinäre Problemstellungen, ein enger Bezug zu den Grundlagenwissenschaften und die Ausrichtung des gesamten Denkens auf Teamarbeit (Hollenstein 1997).

Dies ist im komplementären Verhältnis von Gefahr und Sicherheit begründet (Wilhelm 1997). **Gefahr** ist ein Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden¹⁴ für Mensch, Umwelt und/oder Sachgüter entstehen kann (Borter 1999b).

Eine **Gefährdung** ist eine ganz konkrete auf eine bestimmte Situation oder ein bestimmtes Objekt bezogene Gefahr (Borter 1999b).

Das **Risiko**¹⁵ (R) ist das Maß für die Größe einer Gefährdung. Es lässt sich durch die beiden Komponenten Schadenausmaß (A_S) und Eintretenshäufigkeit (h_E)¹⁶ einer Gefährdung charakterisieren und kann in einfacher Form durch die Produktformel dargestellt werden (Borter 1999a):

$$R = A_S \cdot h_E$$

(Gleichung 1)

Unter **Schadenausmaß** (A_S) wird die Gesamtheit aller aus einer Gefährdung möglicherweise resultierender Schäden zusammengefasst. Es wird bestimmt durch den Wert der gefährdeten Objekte und der Anzahl in einem Schadereignis betroffener Personen (Hollenstein 1997). Die Angabe erfolgt in „Anzahl der Todesfälle/Ereignis“ oder in monetären Werten (z.B. CHF/Ereignis).

Die **Eintretenshäufigkeit** (h_E) eines Naturereignisses als Ergebnis einer umfassenden Gefahren- und Szenarienanalyse ist dimensionslos und bewegt sich zwischen 0 und 1 (Borter 1999a).

2.2.2 Grundlagen der Lawinengefahrenkartierung in der Schweiz

Lawinengefahrenkarten sind das Ergebnis einer Gefahrenanalyse. Sie werden nach den „Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten“ (BFF/EISLF 1984) erarbeitet. In diesen Richtlinien sind die Gefahrenstufen der Lawinengefahrenkarten definiert und die Vorgehensweisen zu deren Erstellung erläutert.

¹⁴ Negativ bewertete Folge eines Zustandes oder Vorganges. Ein Schaden kann die materielle Beeinträchtigung eines Wertes sein, aber auch eine reduzierte Nutzbarkeit (Hollenstein 1997).

¹⁵ Das Lawinenrisiko ist die Möglichkeit eines durch Lawinen verursachten Schadens (Wilhelm 1997).

¹⁶ Es wird der Begriff „Häufigkeit“ und nicht „Wahrscheinlichkeit“ verwendet, da sich der Wert auf ein bestimmtes Zeitintervall bezieht (Schneider 1996).

Als Maß für die potentielle Gefährdung eines Geländepunktes gelten **Häufigkeit** und **Intensität** eines Ereignisses:

- Häufigkeit (Wiederkehrdauer): Als größtes zu betrachtendes Extremereignis wird als Zielvorstellung dasjenige mit einer Wiederkehrdauer von $T = 300$ Jahren¹⁷ festgelegt. Ebenso werden relativ häufige Ereignisse mit einer Wiederkehrdauer von $T = 30$ Jahren berücksichtigt.
- Intensität (Lawinendruck) ist der maximale stationäre Druck auf ein unendlich ausgedehntes, senkrecht zur Lawinenfließrichtung stehendes und ebenes Hindernis. Er ist abhängig von der Dichte und der Geschwindigkeit der fließenden Schneemassen.

In einer Lawinengefahrenkarte werden vier verschiedene Grade der Gefährdung unterschieden: Rot, Blau, Gelb und Weiß.

Rot: Erheblich gefährdetes Gebiet.

Druckwirkung $> 30 \text{ kN/m}^2$ für $T = 300$

Druckwirkung $< 30 \text{ kN/m}^2$ für $T = 30$

Blau: Gebiet wird nur selten von Lawinen mit kleiner Intensität erreicht.

Druckwirkung $< 30 \text{ kN/m}^2$ für $T = 30 - 300$

Gelb: Geringe Lawinengefahr; Ausscheidung ist fakultativ.

Staublawineneinwirkung $< 3 \text{ kN/m}^2$ für $T > 30$

Weiß: Keine Lawinenwirkungen.

2.2.3 Das Risikokonzept

Das Risikokonzept¹⁸ bildet einen einheitlichen Rahmen für den Umgang mit Sicherheitsbeurteilungen und Risiken infolge von Naturgefahren (Borter 1999a). Es gilt heute als einzig verfügbarer methodischer Ansatz für den Umgang mit Naturgefahren im Rahmen eines integralen Risikomanagements (PLANAT 2005).

Das Grundschema dieser Handlungsstrategie ist in Abbildung 2 dargestellt.

¹⁷ Die Wahl von 300 Jahren liegt darin begründet, dass vielerorts Lawinenchroniken bis ins 16. Jh. zurück reichen und dass zur Bestimmung der Anrissmächtigkeit notwendige Niederschlagsmessungen aus teilweise über 60jährigen Messungen noch knapp extrapoliert werden können (Margreth 1999).

¹⁸ Das Risikokonzept wurde zum Großteil in der Nuklearindustrie entwickelt; heute wird es unter anderem auch bei chemischen, technischen und Verkehrs-Risiken angewandt (Borter 1999a).

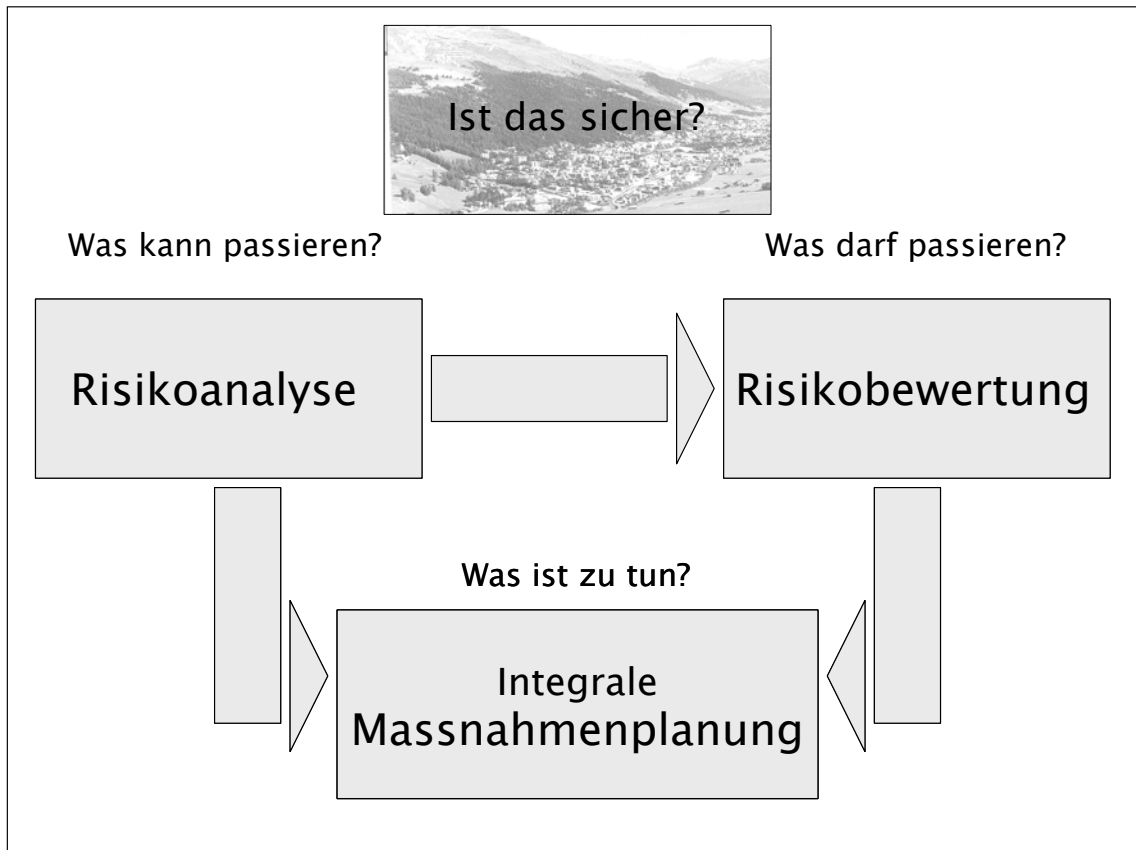


Abbildung 2: Grundmodell des Risikokonzepts (in Anlehnung an Borter 1999a).

Im Rahmen der **Risikoanalyse** soll ein systematischer und transparenter Überblick über vorhandene Szenarien gegeben werden, um die daraus resultierenden Risiken aufzuzeigen. Es werden auslösende Faktoren und Umstände beschrieben und analysiert:

„Was kann passieren?“

Die **Risikobewertung** dient der Beurteilung des ermittelten Risikos bezüglich seiner Akzeptierbarkeit:

„Was darf passieren?“

Weiterhin können im konkreten Einzelfall bestehende Sicherheitsdefizite aufgezeigt werden. Ist das Risiko zu hoch, werden im Rahmen der **Integralen Maßnahmenplanung** Maßnahmen und Mittel zur Risikoreduktion erarbeitet:

„Was ist zu tun?“

Auf die detaillierte Vorgehensweise bei der Risikoanalyse wird in Kapitel 4.4 eingegangen.

Das Risikokonzept ist ein Modell zur Analyse und Bewertung von anspruchsvollen Sicherheitsproblemen und somit nur ein Abbild der Realität. „Dies ermöglicht einen einheitlichen, vergleichbaren Umgang mit jeder Art von Sicherheitsproblemen“ (PLANAT 2005).

2.2.4 Der Lawinenschutzwald im Risikokonzept

Im vorangegangenen Kapitel wurde das Risikokonzept als einheitlicher Handlungsrahmen für die Bewertung von Sicherheitsproblemen und die Evaluation von Schutzmaßnahmen vorgestellt. Im Bereich des bautechnischen Lawinenschutzes existieren bereits umfangreiche Arbeiten; risikobasierte Strategien wurden in der Praxis erfolgreich eingeführt (z.B. Wilhelm 1997; Heinimann et al. 1998; Borter 1999a & b; Urban 2001).

Im Gegensatz dazu wurde die Leistung des Waldes als nachhaltige, biologische Schutzmaßnahme vor Naturgefahren in Risikoanalysen bisher kaum beachtet (Bebi et al. 2004). Erste Risikoberechnungen mit Berücksichtigung verschiedener Waldzustände wurden im Rahmen der Dissertation von Adrienne Grêt-Regamey für den Naturgefahrenprozess Lawine durchgeführt (Bebi et al. 2004; Grêt-Regamey 2003; Grêt-Regamey et al. 2005). Dabei handelt es sich um Extremszenarien, d.h. um Berechnungen für den Zustand „ohne Wald“.

Da sämtliche Maßnahmen im Schutzwald verbunden sind mit unterschiedlichen Kosten und externen Effekten, wird die Anwendung des Risikokonzeptes im Schutzwaldmanagement zur Prävention von Schadereignissen zum volkswirtschaftlichen Anliegen (Bratschi 2002). Zum einen lassen sich waldbauliche Maßnahmen und resultierende Leistungen des Schutzwaldes gegenüberstellen mit alternativen Investitionen im bautechnischen Lawinenschutz. Zum anderen werden Pflegemaßnahmen im Lawinenschutzwald selbst vergleichbar und Waldpflegeprojekte können quantitativ sowie qualitativ gezielter durchgeführt werden.

Zusammenfassend werden folgende Vorteile risikobasierter Strategien für das Schutzwaldmanagement benannt (vgl. Bebi et al. 2004):

- Verbesserung der Kosten-Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen,
- Besserer Vergleich von Maßnahmen innerhalb des Schutzwaldmanagements,
- Besserer Vergleich mit anderen Maßnahmen im Rahmen eines integralen Risikomanagements,
- Objektivere Festsetzen der Prioritäten zwischen verschiedenen Maßnahmen,
- Gezielteres Einsetzen bzw. Einsparen öffentlicher Gelder.

Um diese Vorzüge risikobasierter Schutzwaldstrategien in die Praxis zu integrieren und optimal nutzen zu können, gilt es weitere wichtige Wissenslücken aus der Ökosystemforschung, der waldbaulichen Forschung, der Ökonomie und anderen Forschungsfeldern zu schließen.

So ist unzureichend geklärt wie sich die Dynamik des Waldes unter verschiedenen Standortfaktoren auf die Eintretenshäufigkeit von Lawinen tatsächlich auswirkt (Brang et al. 2004). Ebenso ist aufgrund der langen Zeiträume zwischen Eingriff und dessen Auswirkung der direkte Nachweis des Einflusses von Schutzwaldpflegemaßnahmen auf die Sicherheit vor Naturgefahren schwierig (Frehner et al. 2005). Hinzu kommt die Frage der ökonomischen Bewertung von Waldleistungen (Turner et al. 1998; Turner et al. 2003).

Im folgenden Kapitel werden weitere Ansätze aus Forschung und Praxis zum Einbezug risikobasierter Strategien in die Schutzwaldproblematik vorgestellt.

2.2.5 Aktuelle Forschungsansätze

Ein erstes aktuelles Forschungsprojekt zur Berücksichtigung der Leistung des Schutzwaldes in Risikoanalysen wurde im vorangegangenen Kapitel kurz erläutert (vgl. Grêt-Regamey 2003). Im Folgenden werden weitere Forschungsansätze vorgestellt bei denen versucht wird, die risikoreduzierende Wirkung des Schutzwaldes zu erfassen, zu bewerten und in verschiedene Anwendungen zu integrieren.

Berger & Rey (2004) stellen ein französisches Projekt zum Einbezug des Schutzwaldes in die Risikozonenkartierung zur Erstellung von Risikoverhütungsplänen¹⁹ vor. Es werden neben den roten, blauen und weißen Gefahrenstufen (vgl. Kap. 2.2.2) sog. grüne Zonen für Wald mit herausragender Schutzfunktion ausgeschieden und in Risikoverhütungspläne integriert. Die Entwicklung von Indizes für die Bedeutung der Schutzfunktion des betrachteten Waldes erlaubt eine selektive Waldbehandlung und fungiert als Entscheidungsinstrument für die kosteneffiziente Gestaltung waldbaulicher Eingriffe. Diese Indizes können an walddynamische Entwicklungen sowie an Veränderungen der Risiken und der ökonomischen Gegebenheiten angepasst werden.

Eine weitere Studie beschäftigt sich mit der Entwicklung eines methodischen Ansatzes, den Einfluss verschiedener Regenerationsstadien des Schutzwaldes auf das Risiko zu ermitteln. In dem Forschungsprojekt der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) wurde versucht, bereits existierende Simulationsmodelle für die Walddynamik und für den Naturgefahrenprozess Steinschlag zu koppeln (Wehrli et al. 2003). Das Waldsukzessionsmodell FORCLIM (Bugmann 1996) erwies sich als geeignet zur Modellierung der walddynamischen Prozesse (Wehrli et al. 2005). Die Ableitung von sog. Regenerationsindikatoren und die Definition kritischer Regenerationslevel für den Steinschlagschutzwald ist das Ziel dieser Studie. Durch den Vergleich mit den akzeptierbaren Risiken, entnommen aus den existierenden Gefahrenkarten der Schweiz, sollen diese kritischen Werte hergeleitet werden (Wehrli et al. 2003).

Im Zuge des Zweiten Schweizerischen Landesforstinventar (LFI2) wurde Schutzwald bereits mit Hilfe risikobasierter Methoden ausgeschieden (Duc et al. 2004). Wald mit besonderer Schutzfunktion (BSF-Wald) konnte durch das Verschneiden räumlicher Informationen zum Start-, Transit- und Auslaufgebiet gravitativer Prozesse mit den Daten zum Schadenpotential hergeleitet werden. Für die Simulation der Naturgefahrenprozesse Steinschlag und Lawine wurden computergestützte Modelle verwendet. Die Ausscheidung des Schutzwaldes nach diesem Verfahren barg einige Unschärfen, die auf das

¹⁹ Risikoverhütungspläne sind standardisierte Dokumente zur Kennzeichnung von Risiko- und Bauzonen. Eingeteilt wird in drei Zonen: In der roten Zone darf nicht gebaut werden; in der blauen Zone sind Neu- und Wiederaufbauten unter gewissen Einschränkungen gestattet; innerhalb der weißen Zone sind keine Sicherheitsmaßnahmen notwendig (Berger & Rey 2004). Diese Einteilung ist analog der Gliederung der sog. Lawinengefahrenkarten in der Schweiz, welche in Kapitel 2.2.2 beschrieben wurden.

grobe Geländemodell (DHM 100)²⁰, Ungenauigkeiten bezüglich Lage und Relevanz von Schadobjekten und Schwächen bei der Ermittlung der Pauschalgefälle²¹ zurückzuführen sind (Duc et al. 2004).

Zur einheitlichen Ausscheidung von Schutzwäldern und zur gerechten Mittelverteilung unter den Kantonen wurde mit den Erfahrungen aus dem LFI2 vom Bereich Schutzwald und Naturgefahren der Eidgenössischen Forstdirektion das Projekt *SilvaProtec-CH* lanciert (BUWAL 2004 a & b). Im Rahmen dieses Projektes werden schweizweit flächendeckend Daten über die Lage und Ausdehnung der Schutzwälder auf der Grundlage risikobasierter Arbeitsansätze gesammelt und in einer Schutzwaldhinweiskarte erfasst. Ein einheitlicher Schutzwaldperimeter unter Berücksichtigung aller Naturgefahrenprozesse und aller relevanter Schadenpotentiale ist das übergeordnete Ziel dieses Projektes (BUWAL 2005; BUWAL 2006). Die Modellierungen für den Prozess Lawine werden mit Hilfe des rechnergestützten Lawinenmodellierungs-Systems AVAL-2D, welches auch im Rahmen dieser Masterarbeit angewendet wird, am Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) durchgeführt (Gruber & Bartelt 2005)²².

²⁰ Mitte der 90er Jahre war das feiner aufgelösten Digitale Höhenmodell mit einer Rasterweite von 25 m (DHM 25) noch nicht flächendeckend vorhanden. Es musste auf das DHM 100 (Rasterweite 100 m) zurückgegriffen werden. Dies führte zu Ungenauigkeiten bei der Ableitung der Hangneigung (Duc et al. 2004).

²¹ Pauschalgefällemethode für die Bestimmung der Reichweite von Naturgefahrenprozesse, nachzulesen in Brändli & Herold (1999).

²² Weitere Informationen zu *SilvaProtec-CH* sind im Internet unter: http://www.umwelt-schweiz.ch/buwal/fr/fachgebiete/fg_natgef/projekte/projekte_uebersicht/schutzwaldhinweiskarte/index.html zu finden (Stand 14.03.2006).

3 Das Untersuchungsgebiet: Andermatt und sein Bannwald

3.1 Allgemeiner Überblick

Der Wald oberhalb der Gemeinde Andermatt (vgl. Abb. 3) ist für deren Einwohner von herausragender Bedeutung. Der Bannwald von Andermatt schützt seit Jahrhunderten Menschenleben und Infrastruktur vor der Zerstörung durch Lawinen. Die besondere Schutzwirkung dieses Waldes wurde früh erkannt und durch strikte Betretensverbote und Nutzungseinschränkungen bereits 1397 in einem Bannbrief sichergestellt (Oechslin 1986).

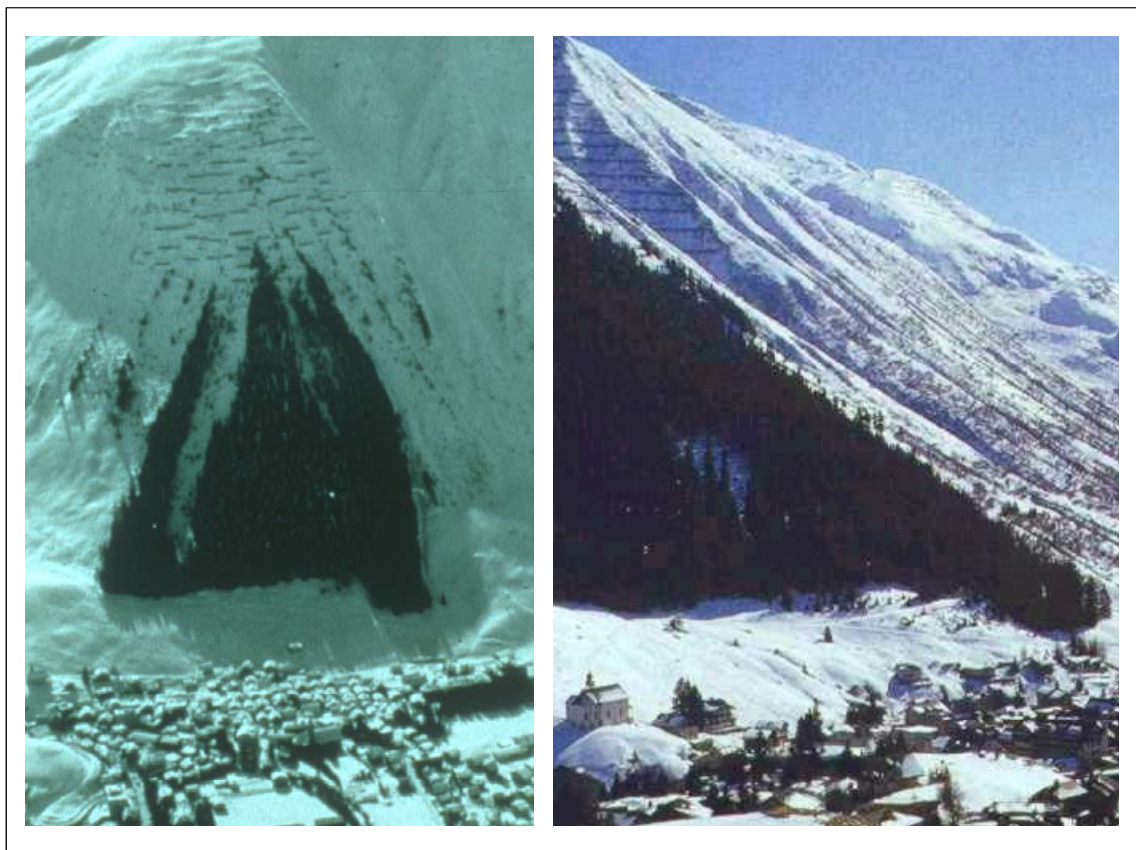


Abbildung 3: Der Bannwald von Andermatt²³.

²³ Fotos: <http://www.kfunigraz.ac.at/geowww/geoskript/Seiten/bilder.htm>

Andermatt ist mit 1.316 Einwohnern (Stand 31.12.2005) und einer Siedlungsfläche von 6.142 ha die größte Gemeinde im Urserental²⁴.

Im SO des Kanton Uri in der Großregion Zentralschweiz gelegen, erstreckt sich das Tal von SW nach NO; begrenzt vom Gotthartmassiv im Süden und dem Aaremassiv im Norden.

Andermatt liegt auf einer Höhe von 1.447 m ü. M.; die umliegenden Berge reichen in Höhen bis zu 3.000 m ü. M.

3.2 Klimatische Bedingungen

Gegen Westen und Osten hin ungeschützt ist Andermatt mannigfaltigen klimatischen Einflüssen ausgesetzt. Das hochalpine Klima mit Wetterextremen erschwert das Baumwachstum im Urserental und lässt Aufforstungen zur Herausforderung werden. Durch den Föhn²⁵ beeinflusste Temperaturschwankungen, nasskühle Westwinde, die Bise²⁶ und tageszeitlich bedingte Berg- und Talwinde machen es zu einem kühlen Hochgebirgstal (Marx 1992).

Für Andermatt wurde eine mittlere Jahreslufttemperatur von 2,7°C bestimmt; die mittlere Jahresniederschlagssumme beträgt 1.480 mm, die mittlere Schneehöhe 1,7 m mit maximalen Werten von 3,2 m (Frey 1999).

3.3 Geologische Gegebenheiten

Das Urserental bildet die geologische Grenze zwischen dem Aar- und dem Gotthartmassiv. Im Norden finden sich Aargranit und daran anschließend verschiedene Gneise des Aarmassivs. Im Süden treten erneut silikatische Gesteine (Gneis) hervor, gefolgt vom Granit des Gotthardmassivs. Die Ursernzone im Talboden besteht aus verschiedenen kalkigen Sedimentablagerungen der Jura Zeit (Amt für Forst- und Jagdwesen 1995). Während den Eiszeiten entwickelte sich ein ausgeprägtes Trogtal mit steilen, die Lawi-

²⁴ <http://www.gemeinde-anderlatt.ch/de/portrait/anderlatt-heute-m413/> (Stand 13.03.2006)

²⁵ Föhn: warmer, trockener, böiger Fallwind im Lee von Gebirgen, oft mit guter Fernsicht (Brockhaus, Naturwissenschaften und Technik 1989).

²⁶ Bise: kalter Nord- bis Nordostwind im Vorland der schweizerischen und französischen Alpen bei winterlichen Hochdrucklagen (Meyers Grosses Universallexikon 1981).

mentätigkeit begünstigenden Hängen, welche durch unterschiedlich große Rinnen zerfurcht sind²⁷.

3.4 Geschichtlicher Hintergrund

Der Bannwald von Andermatt war vor rund 200 Jahren mit einer Größe von ca. 4 ha der letzte Beleg für eine ursprünglich ausgedehnte Bewaldung im Urserntal. Die Entwaldung des Tales hat bereits im frühen Mittelalter stattgefunden. Großflächige Rodungen wurden nicht vorgenommen, aber härtere natürliche Bedingungen durch die Verschlechterung des Klimas drückten die Waldgrenze herab, unterstützt von einem hohen Nutzungsdruck durch steigende Besiedlung und zunehmenden Passverkehr. Der ständige Weidedruck verhinderte das Aufkommen von Naturverjüngung und führte zu einem unaufhaltsamen Rückgang des Waldes (Oechslin 1986). Der Wald oberhalb von Andermatt war mit dem Inkrafttreten des Bannbriefes im Jahr 1397 vor einer Übernutzung und Beweidung geschützt. Es war verboten lebendes und abgestorbenes Holz, Zapfen oder Laub zu sammeln (Marx 1992).

Größere Lawinenunglücke in der Vergangenheit führten zur intensiven Auseinandersetzung mit Wiederaufforstungsprojekten. Bis 1950 hatte sich die Fläche des Bannwaldes von Andermatt verdoppelt. Im ganzen Tal konnte die Waldfläche von 4,4 ha (1879) auf 72,4 ha (1950) erhöht werden. Die Lawinenwinter 1951/52 und 1974/75 ließen weitere Aufforstungsmaßnahmen kombiniert mit technischen Lawinenschutzverbauungen folgen (Oechslin 1986). Heute beträgt die Gesamtwaldfläche im Urserntal, einschließlich unproduktiver Flächen und Blößen, rund 160 ha (Amt für Forst- und Jagdwesen 1995). Für die Pflanzungen verwendet wurden fast ausschließlich Fichte (*Picea abies* (L.) H. KARST.), Lärche (*Larix decidua* MILL.) und Arve (*Pinus cembra* L.), wobei die beiden letztgenannten Arten weitestgehend ausgefallen sind (Marx 2005). Versuche mit exotischen Baumarten schlugen fehl. Die Verwendung von für diese Lage ungeeigneten Provenienzen führte zu heute großflächigen schlechten Zuständen der Bestände (Amt für Forst- und Jagdwesen 1995).

²⁷ <http://www.gemeinde-anderlatt.ch/de/portrait/geologie-m386/> (Stand: 13.03.2006)

3.5 Forstwirtschaftliche Kennzahlen und Pflegestrategien

Der Bannwald von Andermatt ist **Eigentum** der Kooperation Ursern, welche auch den Forstbetrieb Ursern unterhält; das Nutzungsrecht hat die Bürgergemeinde Andermatt.

Laut der 1995 erstmalig durchgeführten Forsteinrichtung hat die gesamte Waldfläche eine **Größe** von 24,03 ha. Ausgeschieden wurden 37 Bestände; die Bestandesnummern und wichtige Kennzahlen sind der Bestandskarte in Anhang 11 zu entnehmen.

Lage und Exposition: Der nordexponierte Hang an der südlichen Grenze von Andermatt ist von ca. 1.460 m ü. M. bis in eine Höhe von ca. 1.980 m ü. M. bestockt. Die Fläche ist der subalpinen Höhenstufe zuzuordnen (Mayer & Ott 1991). Besonders der obere Teil des Hanges ist kontinuierlich über 30° geneigt und damit potentiell Lawinenanrissgebiet (vgl. Kap. 2.2.2).

Baumartenzusammensetzung: Die Hauptbaumart ist Fichte (*Picea abies* (L.) H. KARST.); einzelne Lärchen (*Larix decidua* MILL.) und Arven (*Pinus cembra* L.) sind eingemischt. Die an der oberen Waldgrenze gelegenen Bestände der sogenannten Krüppelzone²⁸ sind geprägt durch das Auftreten von Grünerle (*Alnus viridis* (CHAIX) DC.) und Vogelbeere (*Sorbus aucuparia* L.), welche selten eine Oberhöhe von 2 m überschreiten.

Standortstyp: Typischer Hochstauden-Fichtenwald *Adenostylo alliariae-Piceetum typicum*, 60²⁹: Die Fichte dominiert im Erscheinungsbild dieses Standortstyps, kombiniert mit üppigen Hochstaudenfluren mit typischen Arten wie Grauer Alpendost (*Adenostyles alliariae* (GOUAN) A. KERN.) und Alpenmilchlattich (*Cicerbita alpina* (L.) WALLR.) (Ott et al. 1997). Das mittlere maximale Bestandesalter für derartige Bestände beträgt rund 300 Jahre (Brang & Duc 2002). Der Kernbestand des Bannwaldes hat dieses Alter bereits erreicht.

Für die **Verjüngung** im Hochstauden-Fichtenwald sind der Schneeschimmel (*Herpotrichia juniperi*) und die stark konkurrierende Bodenvegetation limitierende Faktoren. Moderholz ist eine wichtige Voraussetzung zur Verjüngung der Fichte (Ott et al. 1997). Im Bannwald von Andermatt ist wenig bis keine Naturverjüngung zu finden. Nur vereinzelt konnten sich Fichtensämlinge auf Moderholz etablieren (vgl. Abb. 4). Eine

²⁸ Infolge von Wärmemangel oberhalb der Waldgrenze, kommt es zum Verbuschen der Bäume (Ott et al. 1997).

²⁹ Nomenklatur und Nummerierung im Sinne von Ellenberg & Klötzli (1972).

aktive Jungwuchspflege, insbesondere das Zurückschneiden der Hochstauden ist notwendig, um den Regenerationsproblemen entgegen zu wirken.

Waldfunktionen: Zusätzlich zur im Vordergrund stehenden Schutzfunktion steigt fortwährend die Bedeutung der Erholungsfunktion der dorfnahen Waldungen durch wachsenden Tourismus. Die damit einhergehenden Probleme, insbesondere durch das Touren- und Variantenskifahren, wurden durch ein Verbot des Skifahrens in sämtlichen Waldungen in der kantonalen Forstverordnung geregelt (Amt für Forst- und Jagdwesen 1995). Ausgeschiedene Waldschutzgebiete sind in den Skitourenkarten 1:50.000 dargestellt. Die Nutzfunktion hat keine Bedeutung.

Die Schutzleistung des Waldes wird vom Amt für Forst- und Jagdwesen (1995) als mäßig bis gut eingeschätzt. Diese Beurteilung bezieht sich auf den einzelnen Bestand unter Berücksichtigung des Standortes und der gegenwärtigen Entwicklungsstufe.



Abbildung 4: Bannwald von Andermatt: (a) Fichtenverjüngung auf Moderholz; (b) Lawenverbauung (Fotos: M. Teich, 26.10.2005).

Waldgeschichte: Der Kernbestand des Bannwaldes von Andermatt ist rund 300 Jahre alt. Von jeglicher Nutzung ausgeschlossen, wurden keine Aufforstungen in diesem durchgeführt. Erst seit 1850 werden Aufforstungen um das Kerngebiet vorgenommen, welche zum heutigen Erscheinungsbild des Bannwaldes führten. Die Pflanzungen im oberen Hangbereich wurden mit umfangreichen Lawinenschutzverbauungen gekoppelt, um die Etablierung der Pflanzen zu unterstützen.

Durch den Sturm Vivian im Januar 1990 wurde ein kleiner Teil (ca. 0,9 ha) des Altbestandes geworfen. Die Kombination mit einer mächtigen Schneefahne zum Zeitpunkt des Sturmes führte zu diesem erstmaligen Ereignis in dem sonst nicht explizit sturmgefährdeten Bestand (Marx 2005). Erst durch diese Öffnung wurden Verjüngungsmaßnahmen des Altbestandes eingeleitet. Die Fläche wurde zu 100 % mit Fichte bepflanzt; ein ständiges Zurückschneiden der konkurrenzkräftigen Hochstauden ist unbedingt notwendig.

Aktuelle Entwicklung: Im Rahmen des Waldbauprojektes „Urseren“ wurden seit 1995 Pflegemaßnahmen in den Wäldern des Urserntals durchgeführt. Die Eingriffe zur Stabilitätspflege basieren auf einem im Herbst 1994 erstellten Pflegeplan, dem erstmalig eine detaillierte Bestandesbeschreibung aufgrund von Luftbildern zugrunde liegt. Mit der daraus abgeleiteten Maßnahmenkarte entstand das erste forsteinrichtungstechnische Werk in Ursern (Amt für Forst- und Jagdwesen 1995). Da die Nutzfunktion für die Wälder im Urserntal keine Bedeutung hat, war dieser Pflegeplan primär auf die Schutzfunktion ausgerichtet. Der Vorrat wurde im Rahmen dieser Inventur nicht erfasst, da der gesamte Holzeinschlag nur die Stabilitätspflege zum Ziel hat. Laut einer Schätzung des Kreisforstmeisters Jann Marx (2005) beträgt der aktuelle Vorrat in den Altbeständen des Bannwaldes ca. 800 bis 900 Vfm/ha.

Selbst im Kernbestand des Bannwaldes von Andermatt ist eine Holznutzung aufgrund des hohen Alters und schlechter Qualitäten ohne Bedeutung. Die Stämme werden zur Erhöhung der Bodenrauhigkeit im Bestand belassen. Das Projekt hatte eine Laufzeit von 10 Jahren; weitere Folgeprojekte sind bereits in Planung (Marx 2005).

4 Methodik

4.1 Grundlagen

4.1.1 Einführung

Die Forschungsfrage soll durch eine Kombination verschiedener Verfahren beantwortet werden. Ein Teil der angewandten Methoden wurde im Arbeitsprozess entwickelt oder angepasst, andere Arbeitsschritte, wie die Risikoanalyse, sind anerkannte Herangehensweisen zur Lösung bestimmter Aufgabenstellungen. Die Risikoanalyse ist ein allgemeingültiger methodischer Ansatz zur Beurteilung von Sicherheitsproblemen und wird in der Praxis, z.B. zur Bestimmung des Risikos infolge gravitativer Naturgefahren (z.B. Borter 1999b, Gächter & Bart 2002) bereits erfolgreich angewandt (vgl. Kap. 2.2).

In Abbildung 5 wird eine Übersicht über die einzelnen Arbeitsschritte gegeben.

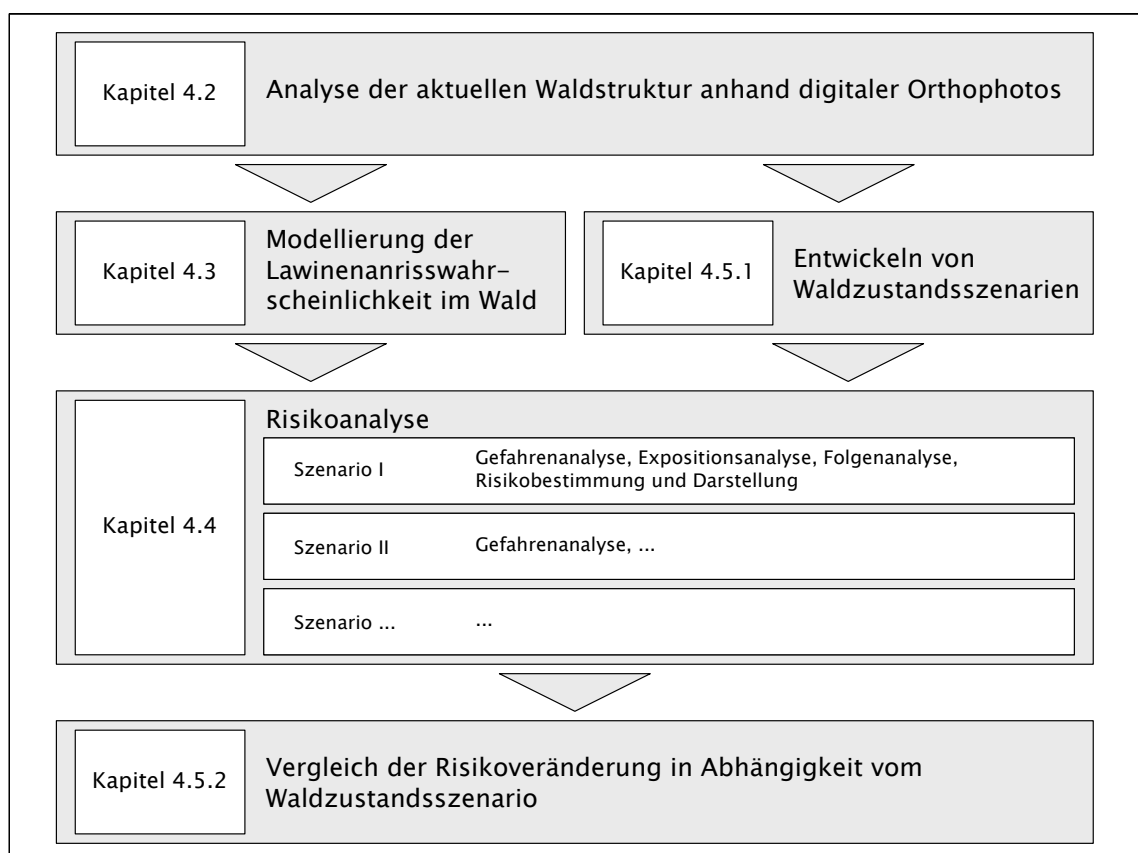


Abbildung 5: Übersicht über die Arbeitsschritte.

Vorangestellt wird eine Aufzählung und Beschreibung der verwendeten Geräte, der Software und der digitalen Datengrundlagen.

4.1.2 Geräte und Software

Hardware:

Gearbeitet wurde an einem Desktop-PC mit einem Intel® Pentium® 4-Prozessor, 2,80 GHz Taktfrequenz, 512 MB Arbeitsspeicher und einer 80 GB Festplatte. Der Rechner war mit einem 19 Zoll Grafik-Monitor ausgestattet.

Software:

Betriebssysteme:

- Microsoft® Windows 2000 Professional
- SunOS 5.8 (Copyright©2001 Sun Microsystems Inc.)

Anwendungssoftware:

- ArcInfo 8.3 von ESRI (Copyright©2002 Environmental Systems Research Institute ESRI)
- ArcView 3.2 von ESRI (Copyright©2002 Environmental Systems Research Institute ESRI)
- ArcGIS™ 9 von ESRI (Copyright©1999-2005 Environmental Systems Research Institute ESRI)
- Microsoft® Excel 2000 (Copyright©1985-1999 Microsoft Corporation)
- X-Win32 Version 7.1 (Copyright©1992-2005 StarNet Communications Corporation)

Grundlage für die Arbeiten im GIS bildete die Software ArcGIS™ 9 der Firma ESRI. Dieses Programm wurde verwendet zum Digitalisieren, Georeferenzieren, Konvertieren verschiedener Datenformate und zur Ergebnispräsentation. Sämtliche Karten wurden mit der ArcGIS-Anwendung ArcMap 9.1 erzeugt und bearbeitet. Die Simulationsrechnungen wurden mit ArcInfo 8.3 in einer Unix Umgebung durchgeführt. Gearbeitet wurde vom selben PC mit Hilfe der Software X-Win32 7.1. Durch dieses Anwendungsprogramm der Firma StarNet Communications wird es möglich auf Anwendungen, die sich auf Unix-Servern befinden, zuzugreifen. Für bestimmte Verschneid-Operationen kam

das Programm ArcView 3.2 zum Einsatz. Die Risikoberechnung wurde mit Unterstützung des Programms Microsoft® Excel 2000 durchgeführt.

4.1.3 Digitale Datengrundlagen

Geländemodell DHM 25: Das digitale Geländemodell der Schweiz wurde aus der Landeskarte 1:25.000 (LK 25) abgeleitet und ist seit Mitte 1996 für die ganze Schweiz erhältlich. Die digitale Höheninformation wird vom Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) in zwei verschiedenen Versionen angeboten, dem DHM 25-Basismodell und dem DHM 25-Matrixmodell. Letzteres wurde aus dem Basismodell durch Interpolieren mit einer räumlichen Auflösung von 25 m erstellt (DHM 25©2006 swisstopo).

Datenformat: Raster/LAT

Digitales Orthophoto: Das Orthophotomosaik SWISSIMAGE ist eine Zusammensetzung digitaler Farbluftbilder und wird von der swisstopo für die Schweiz mit einer Auflösung (Bodenpixel) von 0,25 m, einer Lagegenauigkeit von 1 m und einer Bildtiefe von 24 Bit (16,7 Millionen Farben) flächendeckend angeboten. Die Flugperiode erstreckt sich gemäss den meteorologischen Bedingungen von Juni bis September. Die analogen Bildaufnahmen werden in einer Höhe zwischen 5.000 bis 7.000 m im Maßstab von 1:30.000 durchgeführt, anschließend gescannt und georeferenziert. Das Untersuchungsgebiet wurde im Rahmen einer Aktualisierung 2004 aufgenommen (swissimage©2006 swisstopo, DV 033594).

Datenformat: TIFF mit TFW (World File)-Georeferenz

Pixelkarte der Schweiz 1:25.000: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz ©Bundesamt für Landestopographie. Die entsprechende Legende ist in Anhang 10 abgebildet.

Datenformat: Raster

Vector 25: Digitales Landschaftsmodell der Schweiz, welches inhaltlich und geometrisch auf der Landeskarte 1:25.000 basiert. VECTOR 25 gibt die natürlichen und künstlichen Objekte der Landschaft im flexiblen Vectorformat wieder und wird in 9 thematischen Ebenen angeboten (Vector 25©2006 swisstopo, DV033594).

Datenformat: Vector

4.2 Analyse der Waldstrukturen anhand eines digitalen Orthophotos

4.2.1 Einführung

Die Struktur des Schutzwaldes in Kombination mit wichtigen Standortfaktoren bestimmt das Anreißen von Waldlawinen maßgeblich (Brang et al. 2004). So sind vor allem die mittlere Lückenbreite und der Kronendeckungsgrad in Kombination mit der Hangneigung wichtige Schlüsselparameter bei der Beurteilung der Waldlawinengefahr (Meyer-Grass & Schneebeili 1992; vgl. Kap. 2.1.2).

In einem ersten Arbeitsschritt werden die Waldstrukturen im Bannwald von Andermatt mit Hilfe der Luftbildinterpretation analysiert und im GIS digitalisiert. Die so entstehenden digitalen Daten werden in weiteren Arbeitsschritten modifiziert und als Inputparameter bei den folgenden Modellierungen verwendet (vgl. Kap. 4.3 bis 4.5). Sie können ebenso als Grundlage zur Beurteilung der Waldlawinengefahrsituation dienen oder bei der Entwicklung von Waldpflegeplänen helfen. Die Digitalisierungsarbeiten wurden mit der Software ArcGISTM 9 von ESRI im Maßstab 1:1.500 durchgeführt.

4.2.2 Verwendeter Kartierschlüssel

Für die Kartierung der Waldstrukturen wurde der Luftbildschlüssel von Bebi (2000) für subalpine, fichtendominierte Wälder herangezogen. Dieser detaillierte Luftbildschlüssel wurde auf der Grundlage stereoskopischer Auswertungen von Infrarot-Luftbildern im Maßstab 1:9.000 entwickelt (Bebi 2000).

Für die Kartierung der Waldstrukturen des Bannwaldes von Andermatt anhand des digitalen Orthophotos wurde der Kartierschlüssel modifiziert und den Anforderungen an die Kartierung sowie den Möglichkeiten, die sich aus der Betrachtung des Orthophotos ergaben, angepasst (vgl. Abb. 6).

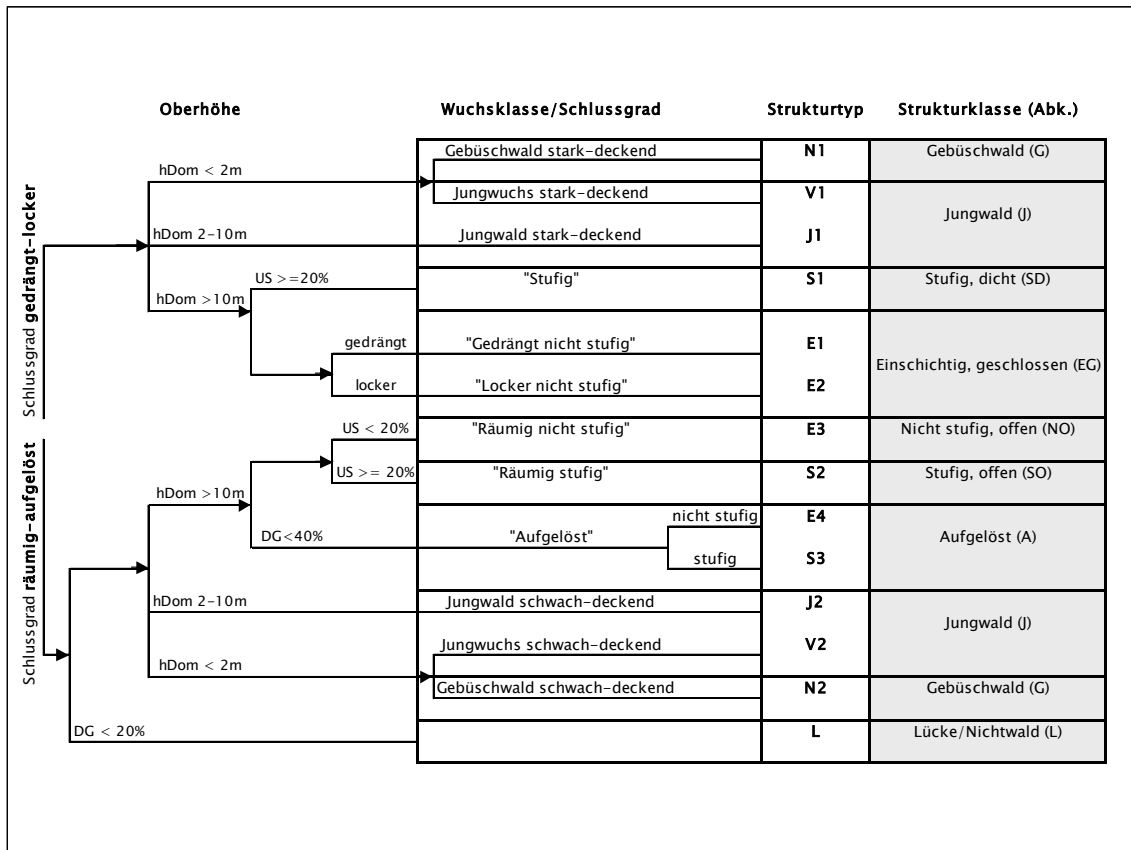


Abbildung 6: Schematischer Luftbildschlüssel für die Waldstrukturkartierung in subalpinen fichtendominierten Wäldern. DG = Deckungsgrad, h_{Dom} = Oberhöhe, US = Unterschicht (in Anlehnung an Bebi 2000).

Folgende im Orthophoto erkennbare Parameter liegen dem Luftbildschlüssel zugrunde:

Der Schlussgrad³⁰

Unterschieden wird nach 5 Typen (vgl. Bebi et al. 2000; Lardelli 2003):

Gedrängt: Deckungsgrad (DG) > 90 %

Durch die starke Berührung der Baumkronen sind der Boden und die Schlagschatten selten sichtbar. Meist sind nur die Baumspitzen oder die oberen Kronenhälften im Luftbild erkennbar.

³⁰ Maß der gegenseitigen Bedrängung der Baumkronen einer Bestockung (SAFE 1986). Der Schlussgrad korreliert mit der Kronenprojektion, welche das Verhältnis der durch die Kronen übershirmten Fläche zur Gesamtfläche beschreibt (Brassel & Brändli 1999).

Locker: DG 70 - 90 %

Die sichtbaren Lücken sind kleiner als die durchschnittlichen Kronendurchmesser; Boden und Schlagschatten sind selten sichtbar.

Räumig: DG 40 - 70 %

Durch unregelmäßige Verteilung der Bäume kommt es zu teilweise größeren Unterbrechungen des Kronenschlusses; Schlagschatten und Boden sind häufig sichtbar.

Aufgelöst: DG 20 - 40 %

Mit Einzelbäumen wenig zusammenhängend bestockte Fläche; Schlagschatten und Boden sind sehr häufig sichtbar.

Lücke/Nichtwald: DG < 20 %

In Abbildung 7 sind die vier erstgenannten Schlussgrade schematisch dargestellt.

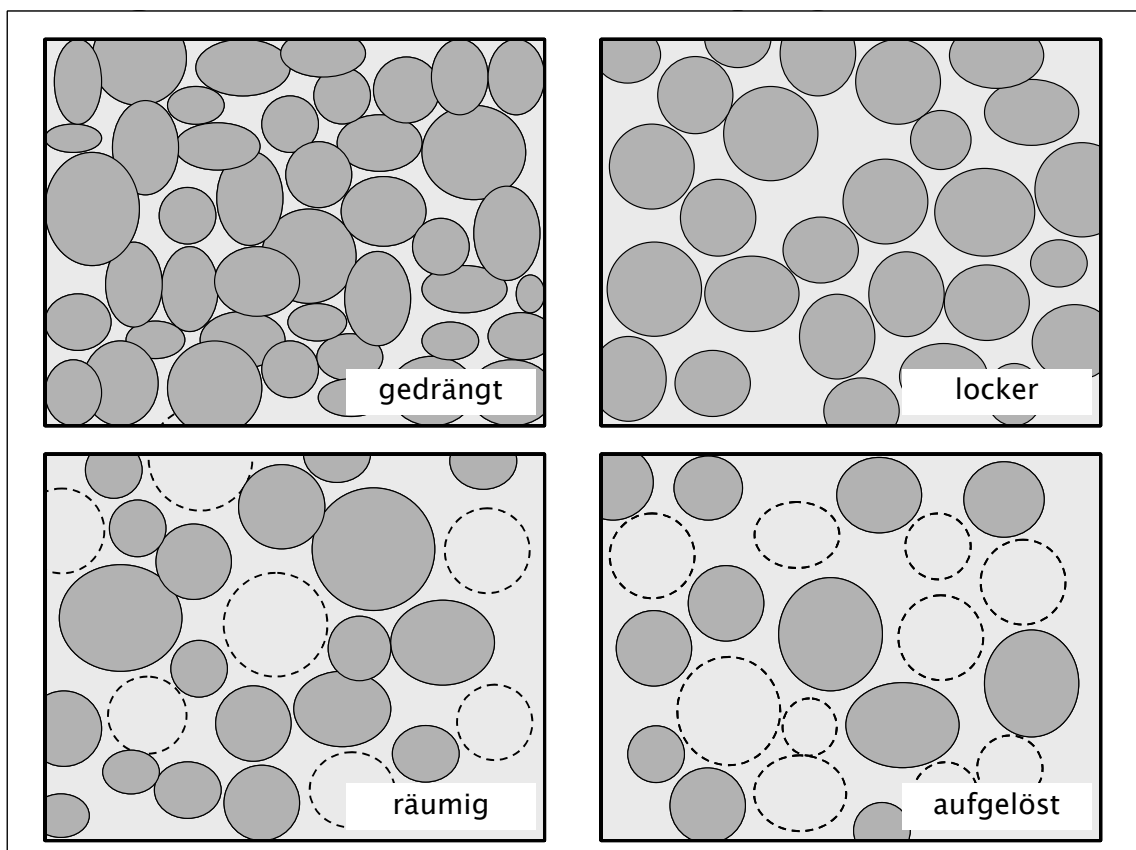


Abbildung 7: Modellhafte Darstellung des Schlussgrades zur Beurteilung im Luftbild (in Anlehnung an Lardelli 2003).

Die vertikale Bestandesstruktur³¹

Stufig: Die Bäume sind in mehreren, trennbaren Schichten vorhanden. Der Deckungsgrad der Unterschicht³² ist $\geq 20\%$, eine Mittelschicht ist vorhanden. Bei aufgelösten Strukturen ist der Deckungsgrad von Unterschicht und Mittelschicht zusammen mindestens so groß, wie der Deckungsgrad der Oberschicht.

Nicht stufig: Es ist nur eine Schicht erkennbar.

Die Oberhöhe h_{dom}

Aus der Oberhöhe (h_{dom}) konnte folgende Einteilung nach verschiedenen Entwicklungsstufen abgeleitet werden:

Jungwuchs: $h_{\text{dom}} < 2$ m, aber kein Gebüschwald

Gebüschwald³³: $h_{\text{dom}} 0 - 10$ m

Als Gebüschwald werden Bestände an der oberen Waldgrenze bezeichnet, die durch harte standörtliche Bedingungen selten eine Höhe von 10 m überschreiten und der sog. Krüppelzone³⁴ angehören oder durch wiederkehrende Störungen, z.B. Lawinen, niedriggehaltene Bestände an steilen Hängen oder in Rinnen. Dieser Strukturtyp³⁵ ist für die Lawinenschutzfunktion von untergeordneter Bedeutung, wurde aber in der Kartierung berücksichtigt.

³¹ Vertikaler Aufbau eines Bestandes definiert durch die Anteile verschiedener Baumschichten. Normalerweise wird unterschieden in einschichtiger, mehrschichtiger und stufiger Bestand (Lardelli 2003). Diese detaillierte Gliederung ist im Luftbild schwer erkennbar. Deshalb wurde gemäss Bebi (2000) die beschriebene Einteilung gewählt.

³² Unterschicht (Brünig & Mayer 1980): Untere Bestandesschicht bis 1/3 der Oberhöhe (h_{dom}). Unterstes Kronenstockwerk aus den niedersten und schwächsten Bäumen.

³³ Gebüsch (Brünig & Mayer 1980): Eine vorwiegend aus holzigen Phanerogamen (Sträuchern) bestehende Pflanzengesellschaft, die im reifen Stadium 0.5 bis 5 m hoch wird und einen mehr oder minder geschlossenen Bestand bildet. In der vorliegenden Masterarbeit werden als Gebüschwald auch solche Bestände bezeichnet, welche infolge periodisch wiederkehrender Störungen niedrig gehalten werden.

³⁴ Vgl. Ott et al. (1997)

³⁵ Die Herleitung der Strukturtypen erfolgte aufgrund der statistischen Auswertung von 200 terrestrischen Aufnahmeflächen (Bebi 2000). Es wurden 13 Strukturtypen von Bebi (2000) ausgeschieden und charakterisiert.

Jungwald: $h_{\text{dom}} 2 - 10 \text{ m}$

Die Oberhöhe wurde mit Hilfe der im Luftbild erkennbaren Schlagschatten geschätzt und mit Angaben aus der letzten Forstinventur (vgl. Kap. 3.5) verifiziert. Entwicklungsstadien mit einer $h_{\text{dom}} > 10 \text{ m}$, die in der Forsteinrichtung als Baumholz bezeichnet werden, wurden nicht separat benannt (vgl. von Bebi 2000). Die wichtigsten Strukturtypen subalpiner fichtendominierter Wälder sind in Bebi (2000) ausführlich beschrieben.

4.2.3 Der Kartierablauf

Die Kartierung der Waldstrukturen des Bannwaldes von Andermatt erfolgte in den Arbeitsschritten³⁶:

- Flächenabgrenzung: Abgrenzen und Digitalisieren von im Luftbild klar erkennbaren Struktureinheiten.
- Flächenbeschreibung: Zuordnen der Attribute Strukturtyp und Strukturklasse³⁷ zu jeder digitalisierten Einheit nach den Kriterien des beschriebenen Luftbildschlüssels (vgl. Kap. 4.2.2).
- Überprüfen der Kartierung.

Der letzte Arbeitsschritt, die Kontrolle der Luftbildinterpretation, wurde in den laufenden Kartierungsprozess integriert und sah abhängig vom Einzelfall wie folgt aus³⁸:

- Heranziehen flächiger Zusatzinformationen aus der früheren Forsteinrichtung.
- Bei Zweifelsfällen Hinzuziehen eines Kointerpreten.
- Vergleich mit Werten aus terrestrischen Stichprobenaufnahmen der letzten Forstinventur, z.B. Informationen zu Baumartenverteilung, Bestandesoberhöhe oder Deckungsgrad.
- Gezieltes Aufsuchen von Zweifelsfällen im Gelände.

³⁶ Die Arbeitsschritte Flächenabgrenzung und Flächenbeschreibung orientieren sich an den Angaben und Hinweisen von Bebi (2000) und Lardelli (2003).

³⁷ Ähnliche Strukturtypen werden jeweils in Strukturklassen zusammengefasst. Die Strukturklassen sind im Luftbild deutlich voneinander unterscheidbar und weisen im Hinblick auf die Walddynamik ähnliche Voraussetzungen auf (Bebi 2000). Auf eine detaillierte Beschreibung der Strukturklasse wird in dieser Arbeit verzichtet. Ausführliche Erläuterungen der Strukturklassen und der Strukturtypen sind in Bebi (2000) zu finden.

³⁸ Orientiert wurde sich dabei am von Ahrens (2001) beschriebenen Verfahren zur „Analyse der Waldentwicklung in Naturwaldreservaten auf Basis digitaler Orthobilder“.

Zum Vergleich mit flächiger Zusatzinformation wurde die Bestandeskarte, die im Rahmen der erstmaligen Forstinventur 1995 entstand, digitalisiert (vgl. Anhang 11) und mit den kartierten Waldstrukturen überlagert. In Zweifelsfällen konnten so Flächengrenzen überarbeitet und angenommene Bestandesinformationen bestätigt oder korrigiert werden. Korrekturen, die sich aus dieser Vorgehensweise ergaben, wurden fortlaufend eingearbeitet. Der Kartierablauf ist zur Übersicht in Abbildung 8 dargestellt.

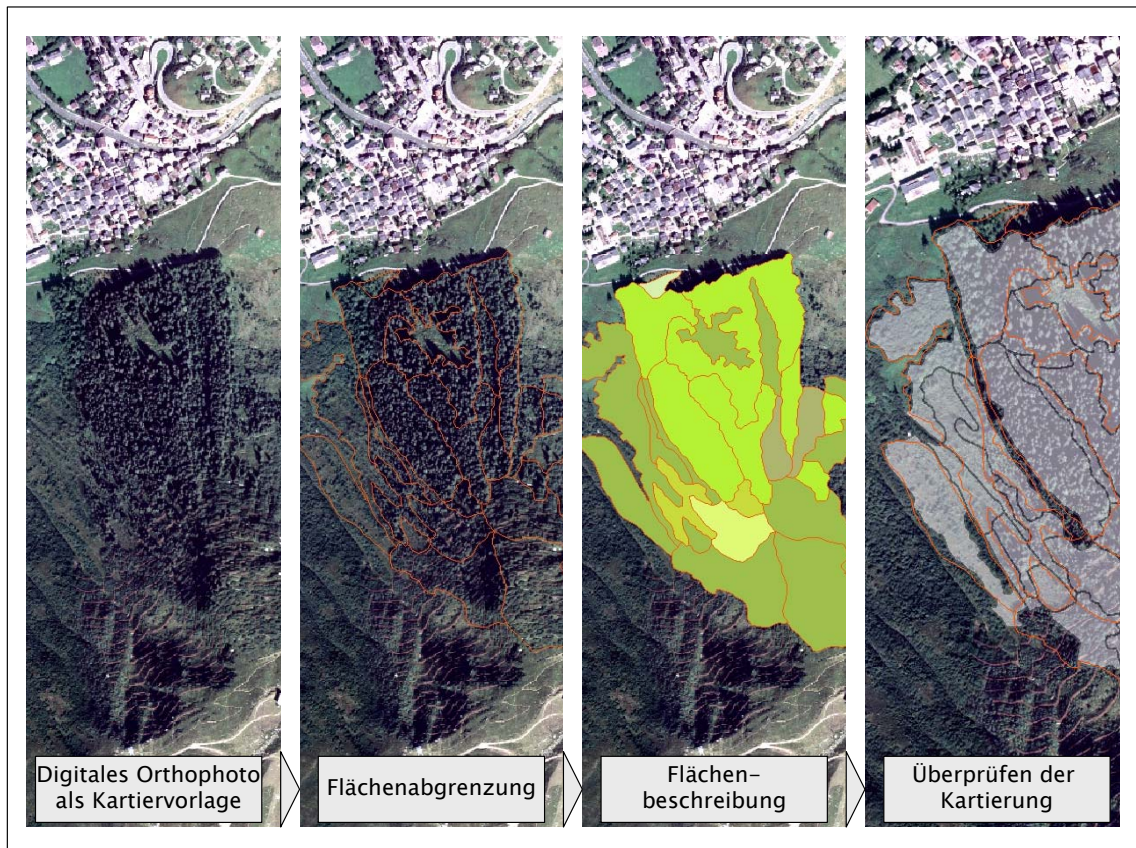


Abbildung 8: Schematischer Ablauf der Waldstrukturkartierung anhand eines digitalen Orthophotos.

4.2.4 Weiterverarbeitung der digitalisierten Waldstrukturen

Die mittels Luftbildinterpretation kartierten und digitalisierten Waldstrukturen dienten als Grundlage für die folgenden Arbeitsschritte:

[1] Als Basis für die Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald (vgl. Kap. 4.3) wurde das erstellte Shapefile³⁹ in das Rasterdatenformat GRID konvertiert. Den Polygonen mit den Attributen gedrängt, locker, räumig, aufgelöst und Lücke wurden vor dem Konvertieren die Werte 0 bis 4 zugeordnet, da die Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanrisses im Wald ganz entscheidend vom Deckungsgrad und der Lückenbreite, ausgedrückt im kartierten Schlussgrad, mitbestimmt wird. Die Konvertierung erfolgte mit der ArcGIS Anwendung ArcToolbox.

[2] Des Weiteren diente das entstandene Shapefile als Grundlage für die lawinendynamischen Berechnungen mit AVAL-2D (vgl. Kap. 4.4.2. und 4.4.3). Dazu wurden die Polygone mit den Werten „1“ für Wald und „0“ für kein Wald versehen und zusammengefasst. Anschließend wurde das Shapefile in das GRID Datenformat umgewandelt. Waldteile mit einer Oberhöhe $h_{\text{dom}} < 2$ m wurden mit dem Attribut „0 = kein Wald“ versehen, da die lawinenverhindernde Wirkung bei diesen Bestockungen nicht gegeben ist (Brang & Duc 2002). Dies betrifft die Aufforstungsflächen am oberen Waldrand, die Gebüschwaldflächen und die vom Sturm Vivian 1990 herbeiführte Windwurffläche im Kern des Altbestandes. Diese wurde zwar 1995 aufgeforstet, allerdings haben die Pflanzen eine h_{dom} von 2 m noch nicht überschritten.

[3] Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird anhand verschiedener Waldzustandsszenarien die Auswirkung von Schutzwaldveränderungen auf das Ergebnis einer Risikoanalyse untersucht. Aus den digitalisierten Waldstrukturen werden nach dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Vorgehen neue Input-GRIDs für die lawinendynamischen Berechnungen mit AVAL-2D erzeugt. Die erfassten Waldstrukturen und zusammengestellten geografischen Informationen fließen dabei in die Überlegungen zu zukünftigen Waldentwicklungen ein.

³⁹ Vektordatenformat von ArcGIS und ArcView

4.3 Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald

4.3.1 Einführung

Im nächsten Arbeitsschritt dieser Untersuchung gilt es, potentielle Lawinenanrissgebiete im Wald und außerhalb des Bannwaldes von Andermatt auszuscheiden.

Die räumliche Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit mit Hilfe einer GIS-Analyse soll die Bestimmung von Waldlawinenanrissgebieten⁴⁰ unterstützen. Auf der Basis der vorangegangenen Strukturkartierung und auf der Grundlage der daraus abgeleiteten Inputparameter soll eine plausible Erklärung für das mögliche Anreißen von Waldlawinen beim derzeitigen Waldzustand gefunden werden. Die errechneten Anrissgebiete werden in die Ausscheidung potentieller Anrissgebiete im Rahmen der Risikoanalyse integriert.

4.3.2 Modell zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald

Im Rahmen des Waldlawinenprojektes wurden in den Wintern 1985/86 bis 1989/90 im gesamten Alpenraum Daten zu Waldlawinen gesammelt und ausgewertet (Meyer-Grass & Schneebeli 1992; vgl. Kap. 2.1.2). Die Auswertung der Daten ergab, dass einige signifikante Merkmale für den Anriss von Waldlawinen verantwortlich sind (vgl. Kap. 2.1.2). Pfister (1997) wertete diese Daten aus und konnte die Anzahl der Parameter durch eine schrittweise Reduktion auf ein Minimum reduzieren. Er modellierte die Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanrisses im Wald in Abhängigkeit von den erklärenden Variablen mittlere Neigung, Kronenprojektion, Lückenbreite und Neigungsänderung.

Das von ihm erstellte multiple, logistische Regressionsmodell (Logit-Modell) sieht mathematisch wie folgt aus:

$$\log\left\langle \frac{P(Y_i = 1)}{1 - P(Y_i = 1)} \right\rangle = a + B_1 x^{(1)} + B_2 x^{(2)} + B_3 x^{(3)} + \dots + B_m x^{(m)}$$

wobei: $P(Y_i = 1)$...Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanrisses

$x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}$...Struktur- und Standortmerkmale

a, B_1, B_2, \dots, B_m ...zu schätzende Koeffizienten

(Gleichung 2)

⁴⁰ Vgl. Definitionen: „Was sind Waldlawinen?“ (Kap. 2.1.1)

Die Wahrscheinlichkeit eines Lawinenanrisses $P(Y_i = 1)$ kann nur Werte zwischen 0 (Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit = 0 %) und 1 (Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit = 100 %) annehmen. Pfister (1997) erreichte in seinem Modell mit einem Minimum an Variablen ein Maximum an Signifikanz.

Tabelle 1: Variablen und Koeffizienten (a und B_i) für das Waldlawinenmodell (Bebi 2000).

Variable (x)	B_i	Std.Err	Z appr.	Pr(> z)	Signif.
Kronenprojektion aller Baumarten [%]	-0,051	0,016	-3,15	0,002	**
Lückenbreite [m]	0,105	0,032	3,27	0,001	**
Mittlere Neigung [°]	0,153	0,035	4,33	0,000	***
Neigungsänderung	1,106	0,560	1,97	0,048	*
Intercept (a)	-5,784	1,591	-3,64	0,000	***

Bebi (2000) hat das Modell Pfister (1997) anhand eines Anwendungsbeispiels überprüft; es musste nur geringfügig angepasst werden. Die signifikanten Größen, die für das Anreißen von Waldlawinen ausschlaggebend sind, sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Werte für a und B_i werden in die Gleichung 2 eingesetzt (Bebi 2000).

Zur räumlichen Umsetzung wurde das logistische Regressionsmodell mit Hilfe eines AML⁴¹-Programmes im ArcInfo-Modul „grid“ von Bebi (2000) modelliert. Für die Anwendung des Modells in dieser Arbeit wurden am vorhandenen Skript einige Änderungen vorgenommen. Das Skript ist in Anhang 6 einzusehen.

Die in Tabelle 1 aufgeführten Merkmale konnten aus der Waldstrukturkartierung oder dem Geländemodell DHM 25 abgeleitet werden. Es wurde für jede Variable des Modells ein ArcInfo-GRID mit gemeinsamen Ursprung und gleicher Zellgröße (5 x 5 m) erstellt (vgl. Abb. 9)⁴².

Die Kronenprojektion und die Lückenbreite wurden aus der Waldstrukturkartierung ermittelt. Die Hangneigung wurde direkt aus dem DHM 25 abgeleitet. Die Neigungsänderung konnte aufgrund der geringen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes und der damit unbedeutenden Änderungen vernachlässigt werden.

⁴¹ ArcInfo-Macro-Language: Programmiersprache von ArcGIS

⁴² AML-Programme zum Erzeugen der GIS-Layer sind in den Anhängen 7 und 8 zu finden.

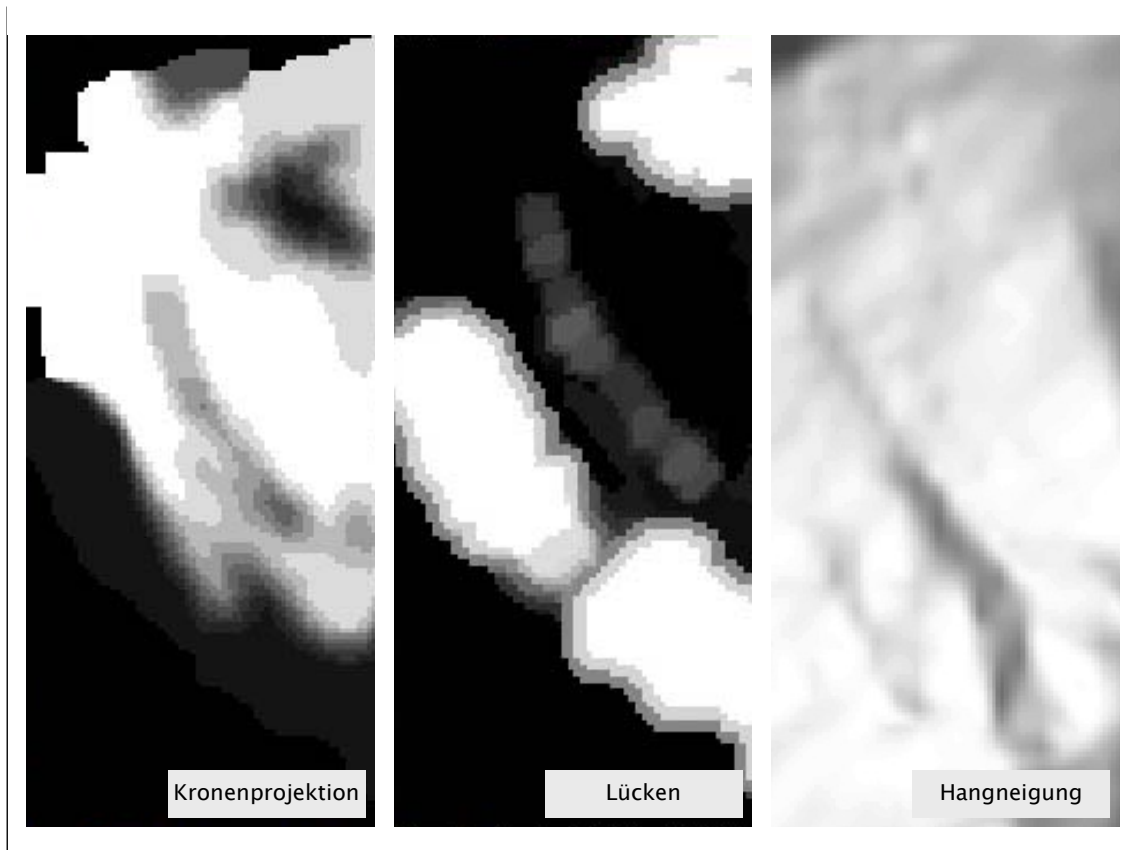


Abbildung 9: Auswahl an GIS-Layer zur Modellierung der Waldlawinenanrisswahrscheinlichkeit.

4.4 Die Risikoanalyse – Ermittlung des Lawinenrisikos

4.4.1 Einführung

„Die Risikoanalyse, als Bestandteil des Risikokonzepts, dient der objektiven Ermittlung der Risikogrößen für ein konkretes Schadereignis, für ein konkretes Objekt oder ein bestimmtes Gebiet“ (PLANAT 2005).

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Arbeitsschritte der Risikoanalyse für die Fallstudie Andermatt ausführlich erläutert; vorangestellt wird eine Darstellung der Grobstruktur (vgl. Abb. 10). Das Verfahren orientiert sich an der Vorgehensweise von Wilhelm (1997) und Borter (1999a).

Die Durchführung der Risikoanalyse erfolgte mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) unter Anwendung der Software ArcGIS™9 von ESRI. Die Bestim-

mung des Risikos wurde durch eine Excel-Applikation⁴³ durchgeführt, welche im Rahmen des RIKO-Workshops am SLF Davos entstand (SLF 2005). Sie soll die Zusammenstellung der notwendigen Daten und Informationen sowie die Berechnung des Risikos erleichtern und wurde für dieses Fallbeispiel modifiziert. RIKO ist mit den Daten für die Fallstudie ausgefüllt auf der beiliegenden CD-ROM gespeichert.

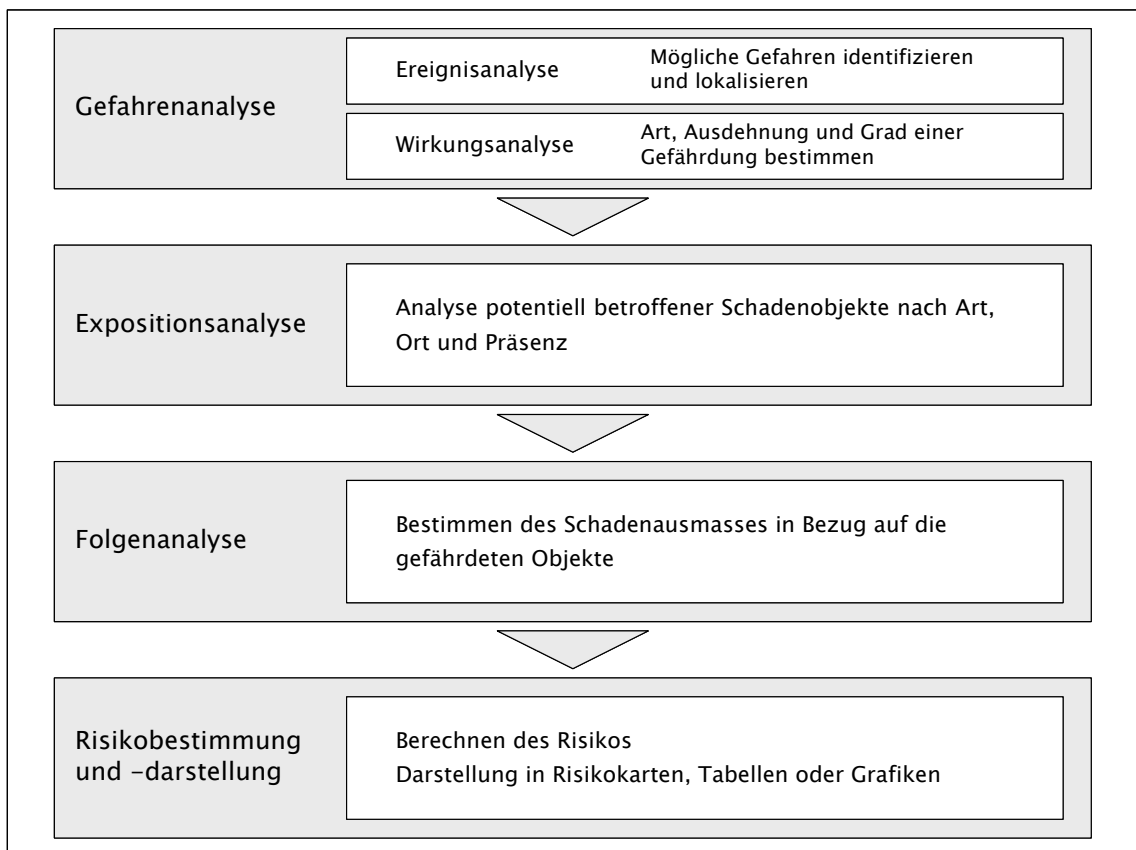


Abbildung 10: Arbeitsschritte der Risikoanalyse.

Zur Vorbereitung der eigentlichen Risikoanalyse ist das zu untersuchende Gebiet geographisch und inhaltlich abzugrenzen. Dies wurde mit der Beschreibung des Untersuchungsgebietes in Kapitel 3 bereits weitestgehend durchgeführt. Es folgt eine kurze Zusammenfassung:

Analysiert wird das Risiko für den Gefahrenprozess Lawine im Gebiet der Gemeinde Andermatt. Der Untersuchungsperimeter beschränkt sich auf potentielle Lawinenanrissgebiete des nordexponierten Hanges an der südlichen Gemeindegrenze. Betrachtet werden Anrissgebiete außerhalb und innerhalb des Bannwaldes von Andermatt, welche eine

⁴³ Zum besseren Verständnis wird die Excel-Applikation in der Arbeit als RIKO bezeichnet.

mögliche Gefahr für das Dorf darstellen. In den Berechnungen berücksichtigt werden die Schadenarten Personenschäden⁴⁴ und Sachschäden⁴⁵.

Für die Analyse der Ausgangssituation verwendete Karten und Datengrundlagen:

- [1] **Amt für Lawinenverbau und Meliorationen Uri (1974)**
- [2] **Amt für Lawinenverbau Uri (1986)**
- [3] **Frutiger, H. (1971)**
- [4] **Lawinenatlas Uri 1:25.000**: Blatt Nr. 8 Gebiet Göschenalp, Landeskartenblatt Urseren LK Nr. 1231; Auszug Andermatt, Ausgabe 1988; (vgl. Abb. 11)
- [5] **Lawinenkataster** für Andermatt; Aufzeichnungen von 1601-2003
- [6] **Lawinenzonenplan Andermatt** (Gefahrenkarte) 1:5.000
- [7] **Wilhelm, C. (1997)**: gesammelte Daten zu Andermatt; (vgl. Abb. 11)

4.4.2 Ereignisanalyse als Element der Gefahrenanalyse

„In der Gefahrenanalyse identifiziert und lokalisiert man die möglichen Gefahren (Ereignisanalyse) und bestimmt die Art, Ausdehnung und den Grad der Gefährdung (Wirkungsanalyse“ (Borter 1999a).

4.4.2.1 Überblick

Die Lawinengefahrensituation objektiv zu beurteilen verlangt eine sorgfältige Auseinandersetzung mit dem Untersuchungsgebiet. Es wurden Geländebegehungen mit Vegetationsanalysen durchgeführt, um „stumme Zeugen“, Schadwirkungen an Wald sowie Gebäuden zu erkennen und zu interpretieren. Ebenso wurden das Gelände anhand von Karten und Luftbildern beurteilt und die klimatischen Bedingungen zusammengetragen und ausgewertet (vgl. Kap. 3).

⁴⁴ Personenschäden: Anzahl möglicher Todesopfer in Wohnzonen (Ein- und Zweifamilienhäuser).

⁴⁵ Sachschäden: Monetäre Bewertung des Verlustes von Sachwerten.

Die weitere Ereignisanalyse gliederte sich in die folgenden Arbeitsschritte:

- Überblick über mögliche Gefahren durch die Auswertung der Dokumente [1] bis [7] verschaffen.
- Berechnung potentieller Anrissgebiete mit Hilfe von „ASA-Prog“ als Modul des rechnergestützten Lawinenmodellierungs-Systems AVAL-2D (Gruber 1998; vgl. Kap. 4.4.2.2 und 4.4.2.3).
- Überprüfen der errechneten Anrissgebiete auf Plausibilität und Korrektur unter zu Hilfenahme der oben angeführten Datengrundlagen [1] bis [7].
- Einbeziehen der modellierten Lawinanrissgebiete im Wald (vgl. Kap. 4.3) in die Betrachtung.
- Erzeugen von ArcInfo-Polygon-Coverages⁴⁶ für potentielle Anrissgebiete bei unterschiedlichen Waldzuständen als Grundlage für die Wirkungsanalyse.

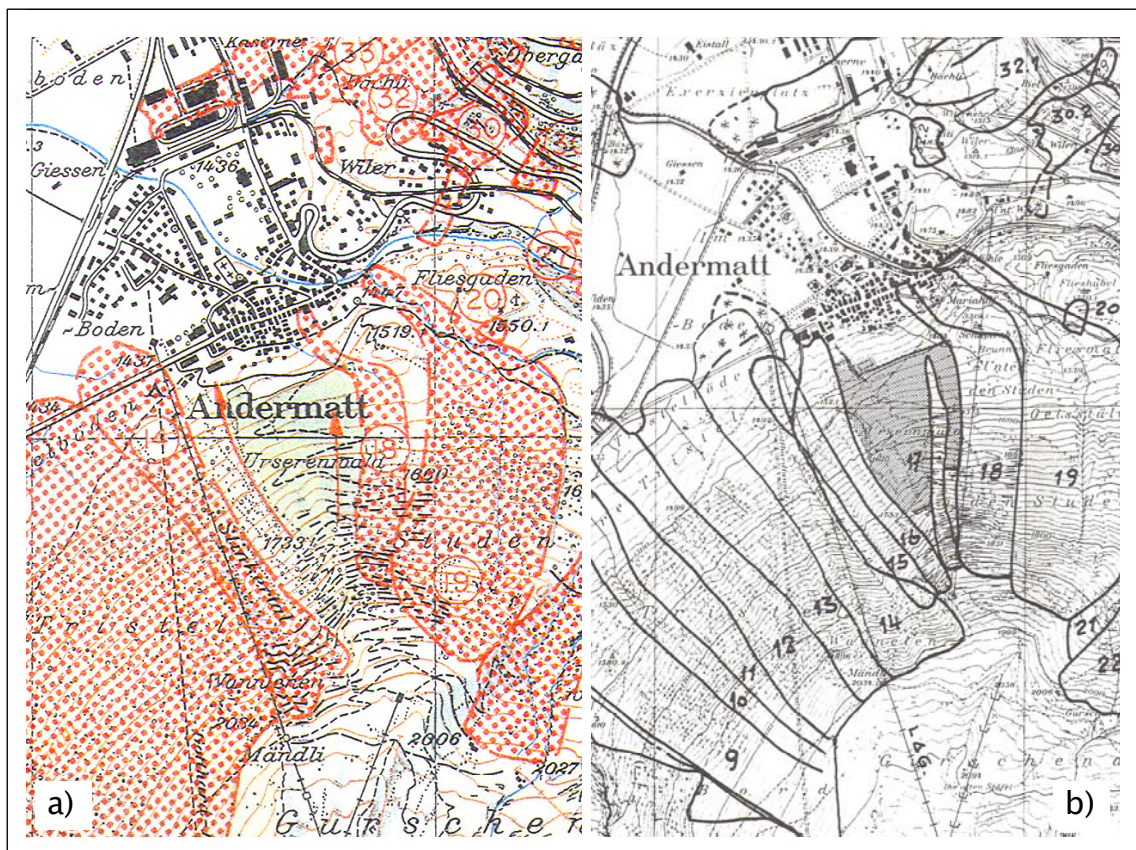


Abbildung 11: Ausschnitte (a) aus dem Lawinenatlas Uri und (b) aus Aufzeichnung zu vorhandenen Lawenzügen in der Region Andermatt von C. Wilhelm (1997).

⁴⁶ ArcInfo-Vectordatenformat

Folgende Lawinenzüge sind für die weitere Untersuchung relevant (vgl. Abb. 11):

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| (13) Tristellau | (14) Stinkertallau |
| (15) Blindenbodenzug | (16) Hotelzug |
| (16a) Pflanzgartenzug | (17) Kleinwäldlizug |
| (18) Brunnenzug | (19) Geisstälerlau |

4.4.2.2 *Das rechnergestützte Lawinenmodellierungs-System AVAL-2D*

AVAL-2D ist ein rechnergestütztes Gesamtsystem, mit den folgenden Funktionalitäten, die für die Anwendung numerischer Simulationsmodelle notwendig sind (Gruber 1998; Gruber 2001):

- Aufbereitung der Grundlagendaten,
- Spezifizierung der räumlichen variablen Modellparameter,
- Durchführung der Simulationsrechnungen,
- Visualisierung der Simulationsergebnisse,
- Erzeugen von Druckzonen- bzw. Lawinengefahrenkarten.

Im Zentrum dieses Systems steht ein GIS unter der Anwendung der Software ArcInfo 8.3 von ESRI. Nach der automatisierten Abgrenzung potentieller Anrissgebiete mit Hilfe des AVAL-2D-Moduls „ASA-Prog“ (vgl. Kap.4.4.2.3) besteht die Möglichkeit zwischen drei verschiedenen Simulationsmodellen zu wählen. In dieser Arbeit wurde das 2-dimensionale numerische Lawinensimulationsmodell VS-2D verwendet, welches insbesondere für flächenhafte Untersuchungen der Lawinengefahr über größere Geländeabschnitte geeignet ist. Diese Applikation wurde auf der Grundlage des Voellmy-Salm Modells zur Berechnung von Fließlawinen (Salm et al. 1990) entwickelt (vgl. Kap. 4.4.3.1).

4.4.2.3 *Automatisierte Abgrenzung potentieller Anrissgebiete*

Die Berechnung der Anrissgebiete basiert auf der Tatsache, dass Extremlawinen nur bei Hangneigungen zwischen 30° und 50° außerhalb von dichtem Wald auftreten können. Dafür werden die im Geländemodell und den Pixelkarten gespeicherten Informationen so aufbereitet, dass sie einen Überblick über die potentiellen Lawinenanrissgebiete er-

möglichen. Das Programm „ASA-Prog“ wurde mit der ArcInfo-Macro-Language (AML) erstellt und beruht auf Prozeduren des ArcInfo-Moduls „grid“⁴⁷.

Die folgenden Funktionalitäten dienen als Grundlage für die Berechnung der Anrissgebiete und können bei der Eingabe der Inputparameter modifiziert werden (vgl. Gruber 1998):

- Das potentielle Anrissgebiet ist durch Hangneigungen zwischen einer bestimmten Untergrenze und einer Obergrenze definiert.
- Im dichten Wald ist kein Anriss möglich.
- Ein Anrissgebiet muss eine zusammenhängende Mindestfläche aufweisen.
- Anrissgebiete, die nicht eine Mindestanrisslänge aufweisen, werden nicht berücksichtigt.
- Eine Option ermöglicht das Weglassen von Anrissgebieten unmittelbar oberhalb der Waldgrenze.

Das Ergebnis ist ein ArcInfo-Polygon-Coverage, welches direkt als Input für die Lawinensimulation in VS-2D verwendet werden kann. Zusätzlich werden die wichtigsten Kenngrößen der Anrissgebiete (maximale Länge, mittlere Hangneigung, mittlere Höhenlage) von „ASA-Prog“ berechnet (Gruber 1998).

Folgende Parameterkombination wurden zur Berechnung der Anrissgebiete für das Untersuchungsgebiet gewählt:

Tabelle 2: Übersicht über die Parameter-Kombination zur automatischen Strukturierung der Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet.

Parameter	Parameter
Hangneigungsuntergrenze 30°	Trennabstand 20 m
Hangneigungsobergrenze 60°	Strukturlinienlänge 20 m
Mindestfläche 5.000 m ²	Anriss oberhalb Wald 30 m möglich
Mindestanrisslänge 50 m	d ₀ * 30 Jahre 1,3 m
	d ₀ * 300 Jahre 1,8 m

Der Grenzabstand für einen möglichen Lawinenanriss oberhalb der Waldgrenze wurde auf 30 m festgelegt, da in diesem Bereich ein Anriss kaum möglich ist (Margreth 2004).

⁴⁷ Einzelheiten zu den zugrunde liegenden ArcInfo Prozeduren sind Gruber (1998) zu entnehmen.

Bei einer Hangneigung von 35° sind Hanglängen von etwa 50 m, bei 45° steilen Hängen Hanglängen von etwa 30 m für einen Lawinenanriss nötig (Gubler & Rychetnik 1991). Die potentiellen Anrissgebiete oberhalb der Gemeinde Andermatt sind zwischen 31° und 40° steil.

Die Anrissmächtigkeit d_0 , charakterisiert durch die mittlere Schneehöhe d_0^* , ist abhängig vom örtlichen Klima und der Wiederkehrperiode T eines Lawinenereignisses. Sie wird bestimmt durch den maximal möglichen Schneehöhenzuwachs in drei Tagen und variiert in den Regionen der Schweiz. Aufgrund einer guten Datenbasis über die Neuschneemengen konnte d_0^* recht zuverlässig ermittelt werden. Die Werte für d_0^* können als Richtwerte aus Grafiken für eine mittlere Hangneigung (ψ_{0m}) von 28° und für Wiederkehrperioden von $T = 30$ und $T = 300$ Jahre für die Regionen der Schweizer Alpen abgelesen werden (vgl. Anhang 9). Nach Anwendung eines Korrekturfaktors, der durch die Höhenlage der potentiellen Anrissgebiete bestimmt wird, kann d_0^* direkt in „ASA-Prog“ eingegeben werden.

4.4.2.4 Ausscheiden der potentiellen Anrissgebiete für das Untersuchungsgebiet

Die mit Hilfe von „ASA-Prog“ ermittelten Anrissgebiete wurden auf für die Risikoanalyse relevante reduziert, mit den Angaben aus den Datengrundlagen [1] bis [7] verglichen und bis zu einem plausiblen Ergebnis modifiziert. Das durch die Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald zusätzlich ausgeschiedene Anrissgebiet (vgl. Kap. 4.3) wurde bei dieser Überarbeitung manuell integriert. Die Modifizierung wurde mit dem ArcInfo-Modul „arcedit“ durchgeführt. Der Ablauf dieses Arbeitsprozesses ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt.

Als Ergebnis entstand ein ArcInfo-Polygon-Coverage, welches für die Lawinenberechnungen mit VS-2D (Gruber 1998) verwendet wurde.

Sämtliche Input-Coverages unter Berücksichtigung verschiedener Waldzustände wurden mit dem gleichen Verfahren erstellt.

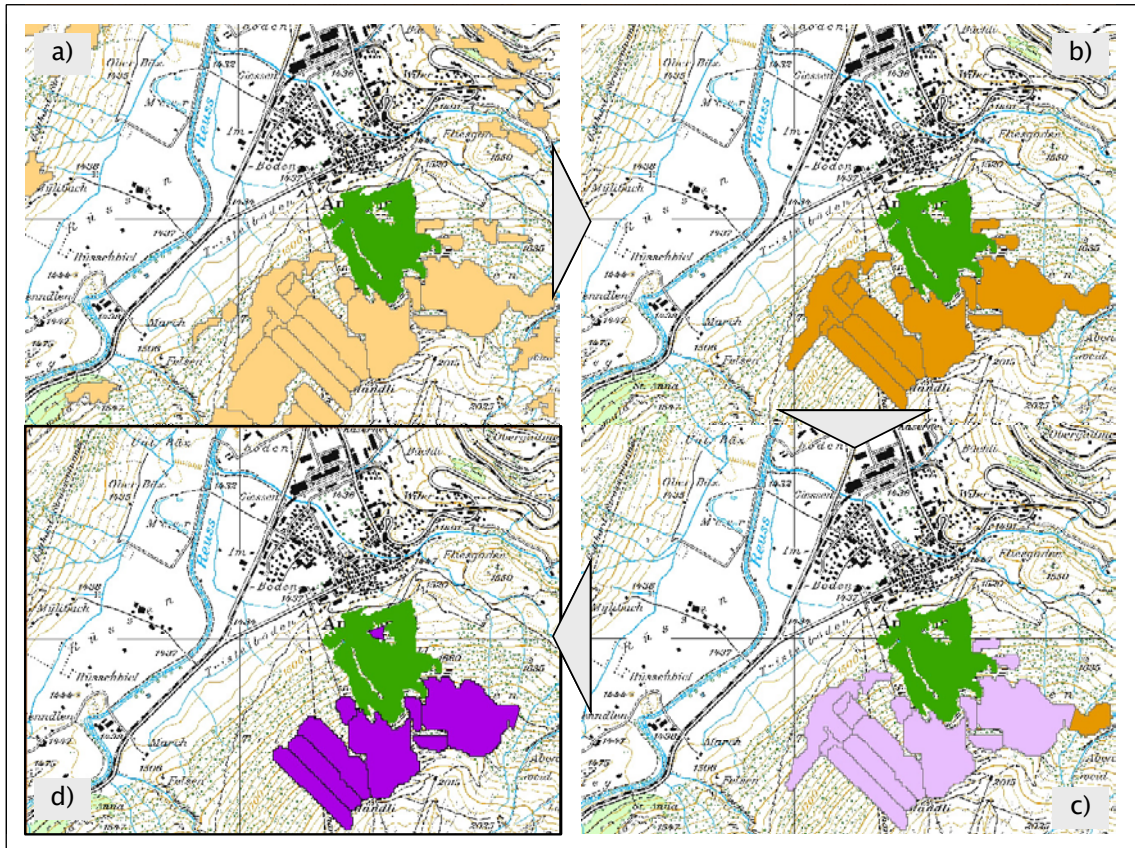


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte zur Ausscheidung potentieller Lawinanrissgebiete mit „ASA-Prog“: (a) automatisierte Abgrenzung, (b) & (c) manuelle Modifikation, (d) Ergebnis.

4.4.3 Wirkungsanalyse als Element der Gefahrenanalyse

„Lawindynamische Berechnungen stützen sich auf Gelände- und Schneeverhältnisse. Das Ziel solcher Berechnungen besteht darin, Einwirkungen und Auslaufstrecken von Lawinen quantitativ mittels eines normierten Verfahrens festzulegen. Sowie potentielle Lawinen zu erfassen, die im Lawinenkataster nicht im extrem möglichen Ausmass vermerkt sind oder fehlen, aber unter extremen Verhältnissen doch auftreten können“ (Margreth 1999).

4.4.3.1 Das Voellmy-Salm Modell

Das analytische Voellmy-Salm Modell⁴⁸ zur Berechnung von Fließlawinen hat sich in der Praxis bereits gut bewährt und wird in der Schweiz erfolgreich zur Ausarbeitung von Lawengefahrenkarten angewendet (Gruber & Margreth 2001; Gruber & Bartelt

⁴⁸ Zusammengestellte Grundlagen und eine ausführliche Evaluation dieses Modells sind in Gruber (1998) zu finden.

2005). Die im folgenden beschriebenen Modellannahmen und Grundlagen beruhen auf Salm et al. (1990), Salm (1993) und Bartelt et al. (1999).

Folgende **Inputparameter** werden benötigt:

- Mittlere Anrissmächtigkeit d_0 (vgl. Kap. 4.4.2.3)
- Faktor der turbulenten Reibung ξ
- Faktor der trockenen Reibung μ

Die Basis für die **mittlere Anrissmächtigkeit d_0** bildet die maximal mögliche Neuschneemenge innerhalb von drei Tagen d_0^* (vgl. Kap. 4.4.2.3), welche mit einem Neigungsfaktor $f(\psi_0)$ multipliziert wird.

$$d_0 = d_0^* \cdot f(\psi_{0m})$$

(Gleichung 2)

Der Neigungsfaktor $f(\psi_{0m})$ ist auf die Abnahme der Stabilität der Schneedecke mit zunehmender Hangneigung zurückzuführen und wird wie folgt berechnet (Burkhard & Salm 1992):

$$f(\psi_{0m}) = \frac{0,291}{\sin \psi_{0m} - 0,202 \cos \psi_{0m}}$$

wobei: ψ_{0m} ...mittlere Hangneigung

(Gleichung 3)

Der **Faktor der turbulenten Reibung ξ** hängt vorwiegend von der Geometrie und der Rauigkeit der Gleitfläche ab und variiert in den verschiedenen Abschnitten der Lawine. Die **trockene Reibung μ** ist ein Reibungskoeffizient, der durch die Schneeeigenschaften und den Druck senkrecht zur Bodenoberfläche bestimmt wird. Für die lawinedynamischen Berechnungen werden Richtkombinationen verwendet, welche auf Erfahrungswerten basieren (vgl. Tab. 3).

Der Berechnungsvorgang:

Zur Berechnung einer Lawine wird die Topographie des Untersuchungsgebietes in die Abschnitte Anrissgebiet, Sturzbahn unmittelbar vor der Auslaufstrecke und die Auslaufstrecke selbst unterteilt. Jede dieser Strecken ist durch eine konstante Hangneigung

und Breite charakterisiert. Entsprechend dieser werden die Berechnungen in drei Schritte gegliedert:

[1] Berechnung der Fließgeschwindigkeit v_0 und der Durchflussmenge Q am Ende der Anrisszone hier für rechteckförmige Anrissgebiete:

$$v_0 = \sqrt{d_0 \xi (\sin \psi_{0m} - \mu \cos \psi_{0m})}$$

wobei: d_0 ...Fließhöhe im Anrissgebiet (= Anrissmächtigkeit)

ψ_{0m} ...mittlere Hangneigung im Anrissgebiet

(Gleichung 4)

$$Q = d_0 \cdot w_0 \cdot v_0$$

wobei: w_0 ...größte Breite im Anrissgebiet

(Gleichung 5)

[2] Berechnung der Fließhöhe d_p und der Fließgeschwindigkeit v_p am Ende der Sturzbahn beim sog. Punkt P:

$$d_p = \frac{Q}{w_p \cdot v_p}$$

wobei: w_p ...Breite einer Lawine am Ende der Sturzbahn

(Gleichung 6)

$$v_p = \left[\frac{Q}{w_p} \xi (\sin \psi_{pm} - \mu \cos \psi_{pm}) \right]^{\frac{1}{3}}$$

wobei: ψ_{pm} ...mittlere Hangneigung am Ende der Sturzbahn

(Gleichung 7)

Der Punkt P stellt den Anfangspunkt der Auslaufstrecke dar und muss auf einem deutlichen Geländeknick liegen. Seine Lage ist durch eine kritische Hangneigung ψ_k definiert, welche vom Reibungskoeffizienten μ abhängt:

$$\tan \psi_k = \mu$$

(Gleichung 8)

[3] Berechnung der mittleren Ablagerungshöhe d_r und der Fließgeschwindigkeit in der Auslaufzone v_r :

$$d_r = d_p + \frac{v_p^2}{4g\lambda}$$

wobei: g ...Erdbeschleunigung

λ ...Aktiver und passiver Erddruck

Richtwerte für λ : leichte, trockene Lawinen $\lambda = 1,5$

dichte Lawinen $\lambda = 3$

(Gleichung 9)

$$v_r = \sqrt{d_r \xi (\mu \cos \psi_r - \sin \psi_r)}$$

wobei: ψ_r ...Hangneigung am Ende der Auslaufzone

(Gleichung 10)

Zur Darstellung der verschiedenen Druckzonen in Lawinengefahrenkarten muss die Auslaufdistanz s einer Lawine für verschiedenen Wiederkehrperioden berechnet werden:

$$s = \frac{d_r \xi}{2g} \ln \left[1 + \frac{v_p^2}{v_r^2} \right]$$

(Gleichung 11)

Sämtliche Berechnungen sind ausführlich in Salm et al. (1990) beschrieben und mit etlichen Beispielen illustriert.

Physikalische Vorgänge lassen sich durch Differentialgleichungen beschreiben, wobei es mehrerer Möglichkeiten zur mathematischen Lösung dieser Gleichungen gibt. Analytische Methoden vereinfachen durch verschiedenen Annahmen und Bedingungen die Gleichungen so stark, dass ohne Differentialoperationen gearbeitet werden kann. Das beschriebene Voellmy-Salm Modell ist ein analytisches Modell zur Berechnung von Fließlawinen. Die lawinendynamischen Berechnungen in dem rechnergestützten Gesamtsystem AVAL-2D (Gruber 1998) beruhen auf diesen Grundgleichungen; daraus erarbeitete Differentialgleichungen werden numerisch gelöst. Auf eine Beschreibung dieser Rechenoperationen wird aufgrund der großen Komplexität und des enormen Umfangs verzichtet. Sie können detailliert in Bartelt et al. (1999) nachgelesen werden.

4.4.3.2 Durchführung der Simulation

Abbildung 13 zeigt den Ablauf zur Durchführung einer Simulation in VS-2D anhand eines Fluss-Diagrammes. Für die Simulation steht ein spezifisches Eingabeformular zur Verfügung, welches alle notwendigen Inputparameter abfragt.

Die Basis für das Digitale Geländemodell bildet das DHM 25. Durch Eingabe der Koordinaten des Untersuchungsgebietes in VS-2D, wird der gewählte Ausschnitt automatisch extrahiert. Bei den räumlich konstanten Modellparametern wird der Wert in Form einer Zahl, bei den räumlich variablen Parametern durch die Angabe der entsprechenden ArcInfo-Datei eingegeben. Räumlich variable Modellparameter beschreiben z.B. die räumliche Variation der Reibungsparameter μ und ξ . Die Erzeugung dieser ArcInfo-Dateien wird in Kapitel 4.4.3.3 erläutert.

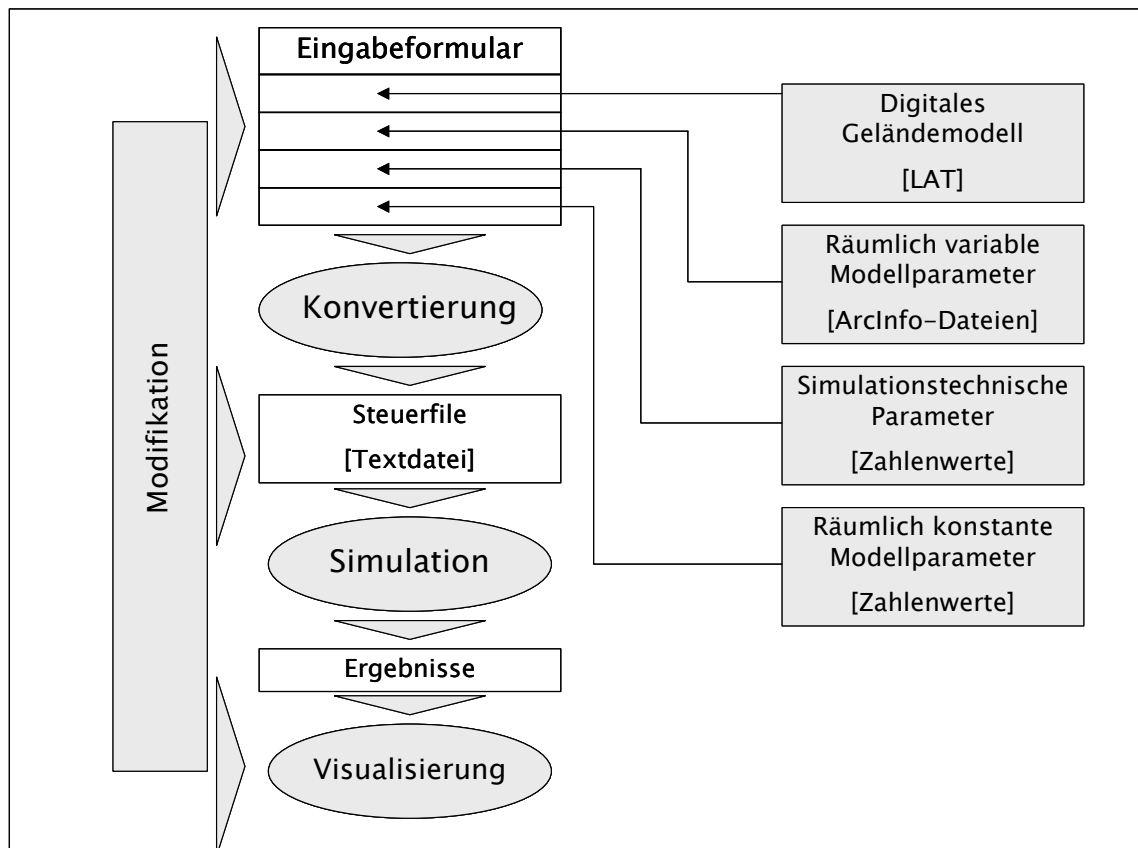


Abbildung 13: Ablaufschema für die Durchführung von Simulationsrechnungen, in den eckigen Klammern ist das Format der Daten spezifiziert (Gruber 1998).

Zusätzlich müssen einige simulationstechnische Parameter wie beispielsweise die Maximaldauer und die Auflösung der Simulationsrechnung spezifiziert werden. Nach der Eingabe aller geforderten Inputparameter werden die Informationen in ein einheitliches

Datenformat konvertiert. Das Resultat dieser Konvertierung wird im sog. „Steuerfile“ des Simulationsprogramms abgespeichert; das Steuerfile startet die Simulation.

Für die Lawinensimulationen im Rahmen dieser Masterarbeit wurde eine Wiederkehrdauer von $T = 300$ Jahre gewählt. Daraus abgeleitet berechnet sich die Eintretenshäufigkeit⁴⁹ des Lawinenereignisses (h_E) nach der Formel:

$$h_E = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{\text{Jahr}} \right]$$

(Gleichung 12)

Alle Simulationen wurden mit einer Maximaldauer von 196 Sekunden und einer Auflösung von 10 m für jedes ausgeschiedene Anrissgebiet separat durchgeführt.

Die so entstandenen Ereigniskarten wurden zu einer Intensitätskarte⁵⁰ für die gewählte Wiederkehrdauer $T = 300$ verschnitten. Die Intensitätskarte gibt die ganzheitliche Lawinengefahrensituation der Gemeinde Andermatt wieder.

4.4.3.3 Berücksichtigung des Schutzwaldes in der Simulation

Waldflächen werden durch die Veränderung des Reibungskoeffizienten μ und des Faktors der turbulenten Reibung ξ im Modell berücksichtigt (vgl. Tab. 3). ξ hängt vor allem von der Geometrie der Sturzbahn ab; μ wird bestimmt von den Schneeeigenschaften Temperatur, Dichte, Wassergehalt, aber auch vom Druck des Lawinenschnees senkrecht zur Bodenoberfläche und von der Geschwindigkeit der Lawine (Gruber et al. 1999).

In Tabelle 3 sind die Werte für μ und ξ zusammengestellt, die für die Simulationen angenommen wurden. Diese basieren auf empfohlenen Richtkombinationen, welche aus Erfahrungswerten und durch die Evaluation einer Vielzahl von Lawinenereignissen ermittelt wurden (Gruber 1998).

Mit Hilfe der Richtwerte für μ und ξ , dem Geländemodell und dem auf der Grundlage der digitalisierten Waldstrukturen modifizierten GRID (vgl. Kap. 4.2.4), wurde im Simulationsmodell automatisch ein ArcInfo-Polygon-Coverage für die räumliche Variation von μ und ξ erzeugt. Dieses wird als Input für die Lawinensimulation eingelesen.

⁴⁹ Eintretenshäufigkeit: Relative Häufigkeit pro Jahr, mit der ein Ereignis mit der Wiederkehrperiode T eintritt (Schneider 1996).

⁵⁰ Vgl. Kap. 2.2.2 „Grundlagen der Lawinengefahrenkartierung in der Schweiz“

Tabelle 3: Verwendete Reibungsparameterkombination von μ und ξ für Großlawinen ($> 60.000 \text{ m}^3$) und eine Wiederkehrdauer von $T = 300$ Jahre.

Topographie	Höhenlage [m ü. M.]	μ	ξ [m/s^2]
offen, steil	über 1500	0,155	3000
	1000-1500	0,17	2500
	unter1000	0,19	2000
kanalisiert ⁵¹	über 1500	0,24	2000
	1000-1500	0,25	1500
	unter1000	0,27	1500
Runse ⁵²	über 1500	0,27	1200
	1000-1500	0,28	1200
	unter1000	0,30	1200
offen, flach	über 1500	0,14	4000
	1000-1500	0,14	4000
	unter1000	0,22	2000
bewaldete Hangzonen	über 1500	0,02	400
	1000-1500	0,02	400
	unter1000	0,02	400

4.4.3.4 Sensitivitätsanalyse

Die Reibungsparameter sind neben den Geländeeigenschaften und der Anrissmächtigkeit die wichtigsten Faktoren, welche die Reichweite einer Lawine beeinflussen. So führt eine Erhöhung des ξ -Wertes resp. eine Senkung des μ -Wertes zu einem Energieverlust in Fließrichtung und zum Herabsetzen der Reibung (Gruber 1998).

In der Sensitivitätsanalyse soll die Auswirkung verschiedener μ - ξ -Kombinationen für bewaldete Hangzonen auf das Simulationsergebnis getestet werden. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Waldstrukturen bei der Simulation von Lawinenereignissen ist das Ziel dieser Analyse. In Tabelle 4 sind die gewählten μ - ξ -Parameterkombinationen für die bewaldeten Hangzonen zur Evaluation des VS-2D-Modells zusammengestellt.

⁵¹ Das Verhältnis von Lawinenbreite/Fließhöhe $> 3/1$, Höhenlinienkrümmung $< 90^\circ$ (Gruber et al. 1999).

⁵² Geographischer Begriff für eine Erosionsschlucht mit kerbenförmigem Querschnitt, die in Folge anthropogener Eingriffe in die Landschaft, hauptsächlich Entwaldung und Überweidung, während starker Unwetter entstehen kann. Höhenlinienkrümmung $< 60^\circ$, Verhältnis Fließbreite/Fließhöhe $< 3/1$, sehr große Rauigkeit (Gruber et al. 1999).

Tabelle 4: Zusammenstellung der μ - ξ -Parameterkombinationen als Inputparameter für die Lawinensimulation mit VS-2D für bewaldete Fläche im Rahmen der Sensitivitätsanalyse.

Kombination	Parameter		Kombination	Parameter	
	μ	ξ [m/s ²]		μ	ξ [m/s ²]
1	0,02	600	5	0,04	800
2	0,02	800	6	0,06	400
3	0,04	400	7	0,06	600
4	0,04	600	8	0,06	800

Als Referenzwert dient die in Tabelle 3 angegebene μ - ξ -Kombination für bewaldete Hangzonen ($\mu = 0,02$; $\xi = 400$ m/s²).

Alle weiteren Inputparameter gehen unverändert in die Simulationsrechnungen ein.

4.4.4 Expositionsanalyse

„Die Expositionsanalyse erfasst die Wertobjekte, auf welche die untersuchten gefährlichen Prozesse potentiell einwirken können“ (Hollenstein 1997).

Die Expositionsanalyse umfasst drei Teilarbeitsschritte zur Bestimmung der für die Risikoanalyse notwendigen Parameter:

1. Identifikation der gefährdeten Objekte nach Art und Lage,
2. Ermitteln der Anzahl und der zeitlichen Präsenz von Personen in den Objekten,
3. Bestimmen der Höhe der Sachwerte.

Teil I: Identifikation der gefährdeten Objekte nach Art und Lage

Zur Erhebung des Schadenpotentials wurden alle potentiell durch ein Lawinenereignis gefährdeten Gebäude im Untersuchungsperimeter identifiziert und einer bestimmten Objektart zugeordnet. Die Objektarten fassen Rechtsgüter mit ähnlichem Wert oder ähnlicher Personenbelegung zusammen und werden in einer Objektartenkarte dargestellt. I. d. R. geschieht dies durch die Digitalisierung des Nutzungsplanes mit Hilfe eines GIS (Borter 1999a). Da für die Gemeinde Andermatt derzeit kein Nutzungsplan existiert, diente als Grundlage für die Erhebung der Objektarten deshalb eine von C. Wilhelm (1997) durchgeführte detaillierte Analyse der Gebäudestruktur im Kernsiedlungsbereich von Andermatt. Die von ihm gesammelten Informationen wurden den be-

reits digital vorliegenden Gebäudestrukturen der VECTOR 25-Daten zugeordnet. Fehlende Informationen wurden anhand der Luftbildinterpretation oder den Angaben aus den Attributtabelle der VECTOR 25-Daten ergänzt.

Den Gebäuden im Untersuchungsperimeter wurden entsprechende Schadempfindlichkeiten zugewiesen. Die Schadempfindlichkeit eines Gebäudes basiert auf Erfahrungswerten und lässt sich aus der Gebäudeklasse ableiten⁵³.

Dazu werden die in der Objektartenkarte definierten Gebäudearten in fünf Gebäudeklassen eingeteilt von denen jede eine andere Schadempfindlichkeit aufweist⁵⁴:

- | | | |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| 1...Leichtbauweise | 3...Mauerwerk | 5...Verstärkte Bauten |
| 2...Gemischte Bauten | 4...Betonbauten armiert | |

Die potentiell gefährdeten Gebäude wurden mit entsprechender Gebäudeklasse in ein ausgearbeitetes Datenblatt von RIKO eingetragen (vgl. Abb. 14).

Teil II: Ermitteln der Anzahl und der zeitlichen Präsenz von Personen in den Objekten

Die Präsenzwahrscheinlichkeit⁵⁵ der Personengruppen (P_{Pr}) berechnet sich wie folgt:

$$P_{Pr} = \frac{h_p \cdot t_p \cdot w_p}{24 \cdot 7 \cdot 52}$$

wobei: h_p ...Aufenthalt in Stunden pro Tag

t_p ...Aufenthalt in Tagen pro Woche

w_p ...Aufenthalt in Wochen

(Gleichung 13)

Das Produkt aus 24 Stunden, 7 Tagen und 52 Wochen umfasst alle Tage des Jahres und ergibt die maximal mögliche Aufenthaltsdauer von 8.736 h. Da Lawinen nur in den sechs Wintermonaten November bis April auftreten, verringert sich die Anzahl der Wochen entsprechend auf 26 Wochen; das gesamte Zeitintervall beträgt 4.368 h.

⁵³ Die Werte für die Schadempfindlichkeit der Gebäudestruktur (S_{St}) und des Gebäudeinhalts (S_{Ih}) sind in Abhängigkeit von der Objektart und der zugehörigen Gebäudeklasse in Anhang 1 und Anhang 2 zusammengestellt.

⁵⁴ Vgl. Anhang 1

⁵⁵ Präsenzwahrscheinlichkeit: Zeitliche Aufenthaltswahrscheinlichkeit in Lawinengefahrenräumen, die zufällig oder systematisch variieren kann (Wilhelm 1997).

Die mittlere Aufenthaltszeit von Personen in Gebäuden basiert auf Pauschalannahmen und beträgt in Wohngebäuden (h_p) durchschnittlich 20 h pro Tag, in Industrie- und Gewerbegebäuden mit Tagbetrieb ca. 10 h, in Garagen und Ställen 2 h.

Die Berechnung der Präsenzwahrscheinlichkeit von Personen in Gebäuden wird von RIKO unterstützt. Die Anzahl der anwesenden Personen wurde in ein Excel-Datenblatt eingetragen (vgl. Abb. 14). Lagen keine genauen Angaben zur Personenanzahl in den Häusern vor, wurden diese geschätzt (vgl. Anhang 5).

Auszufüllen:

- Objekte
- Aufenthalt von Personen in den Objekten
- Gebäudeklasse
- Anzahl von Personen in den Objekten

Zu ergänzen:

- Strukturwert /Inhaltswert
- Schadempfindlichkeit der Struktur und des Inhaltes

Berechnet wird

- Schadausmass
- Risiko [CHF /a]

Objekt	Gebäudeart	Strukturwert	Schadempfindlichkeit Bauweise	Schadempfindlichkeit Objektschut	Gebäudestruktur	Gebäudestruktur [SE GS]	Inhaltswert	Schadempfindlichkeit Gebäudeinh	Schadempfindlichkeit Gebäudeinh SE GI	SA 300	Risiko Fr./a
1	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	17500.00	0	0	0.00	0.00
2	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
3	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
4	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
5	Stall	30000.00	1	0	0	0	75000.00	0	0	0.00	0.00
6	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
7	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
8	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
9	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
10	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
11	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
12	Stall	30000.00	1	0	0	0	75000.00	0	0	0.00	0.00
13	Stall	30000.00	1	0	0	0	75000.00	0	0	0.00	0.00
14	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
15	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
16	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
17	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
18	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
19	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
20	Stall	30000.00	1	0	0	0	75000.00	0	0	0.00	0.00
21	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
22	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
23	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
24	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
25	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
26	Stall	30000.00	1	0	0	0	75000.00	0	0	0.00	0.00
27	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
28	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
29	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
30	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
31	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
32	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
33	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
34	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
35	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
36	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
37	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
38	MF-amtHaus	80000.00	3	0	0	0	200000.00	0	0	0.00	0.00
39	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
40	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
41	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
42	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
43	Lag/Gar	50000.00	2	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00
44	EF-amtHaus	50000.00	3	0	0	0	125000.00	0	0	0.00	0.00

Abbildung 14: Beispiel zweier RIKO Excel-Datenblätter zur Eingabe wichtiger Eingangsgrößen und zur automatischen Berechnung der Risiken.

Teil III: Bestimmen der Höhe der Sachwerte

Zur Bestimmung der Höhe der Sachwerte für die Risikoberechnung ist der Gebäudewert relevant. Dieser gliedert sich in Strukturwert (W_{St}) und Inhaltswert (W_{In}). Meist wird als Strukturwert der Versicherungswert eines Gebäudes angenommen; Marktpreise sind oft schwer zu ermitteln und großen Schwankungen unterlegen. Sind keine Angaben zu Versicherungswerten vorhanden, wird der Strukturwert mit Hilfe von Anhaltswerten

geschätzt. Für diese Fallstudie wurde sich weitestgehend an den Angaben von Borter (1999b) orientiert⁵⁶.

Der Inhaltswert wird vereinfacht mit 25 % des Strukturwertes eines Gebäudes angenommen.

Die Struktur- und Inhaltswerte für die betroffenen Gebäude wurden in das entsprechende RIKO-Datenblatt eingetragen (vgl. Abb. 14).

4.4.5 Folgenanalyse

„Die Folgenanalyse ergibt das Risiko. Mit den Daten der Gefahrenabschätzung und der Expositionsanalyse wird bestimmt, welche Schäden an den Objekten durch die Einwirkungen entstehen“ (Hollenstein 1997).

Im Rahmen der Folgenanalyse wird das Schadenausmaß (A_S)⁵⁷ getrennt nach Personen- und Sachrisiken bestimmt. Im ersten Arbeitsschritt wird die Objektartenkarte mit den in der Wirkungsanalyse erstellten Intensitätskarten im GIS verschnitten. Mit der Verschnidung werden räumliche (Geometrie) und sachliche (Attribute) Informationen verknüpft. Anhand der entstandenen Karte (Objektartenkarte x Intensitätskarte) lässt sich leicht überprüfen, ob ein Gebäude durch ein bestimmtes Szenario betroffen ist oder nicht.

Personenrisiken

Personenrisiken sind Risiken bezogen auf Personen in einem Objekt (Borter 1999a)⁵⁸. Entsprechend der Druckzone, in der ein Gebäude liegt, lässt sich die Schadenempfindlichkeit (S_{est}) und die Letalität⁵⁹ (λ) der Personen im Gebäude ableiten.

⁵⁶ Angaben für Strukturwerte (W_{St}) und Inhaltswerte (W_{In}) in Abhängigkeit von der Objektart sind in Anhang 4 zusammengestellt.

⁵⁷ Erwartetes Ausmaß eines Schadenereignisses (in Anzahl Todesfällen), bezogen auf die Personen in den von einem Schaden betroffenen Gebäuden oder die Gebäude selbst (in CHF/a) (Borter 1999a).

⁵⁸ Einziger Schadenindikator ist die Anzahl der Todesfälle. Unberücksichtigt bleiben Verletzungen oder andere Schädigungen von Personen.

⁵⁹ Sterbewahrscheinlichkeit

Das Schadenausmaß (A_S) wird nach folgender Formel berechnet:

$$A_S = p_{rA} \cdot p_{Pr} \cdot N_P \cdot S_{est} \cdot \lambda$$

wobei: N_P ...Anzahl der Personen im Gebäude

p_{rA} ...räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit des Prozesses

p_{Pr} ...Präsenzwahrscheinlichkeit von Personen im Gebäude

S_{est} ...Schadenempfindlichkeit der Gebäude

λ ...Letalität der Personen im jeweiligen Gebäude

(Gleichung 14)

Die Werte für S_{est} und λ sind Erfahrungswerte und können Anhang 1 bis Anhang 3 entnommen werden. Liegt ein Gebäude innerhalb der blauen oder roten Gefahrenzone wird ihm eine räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit (p_{rA}) von „1“, sonst der Wert „0“ zugeordnet.

In einem vorbereiteten Excel-Datenblatt von RIKO wurden entsprechend der Druckzone für jedes Gebäude die Werte für S_{est} und λ eingegeben. Die Berechnung des Schadenausmaßes erfolgte automatisch.

Auf eine Berechnung des Todesfallrisikos auf Straßen oder Bahnlinien wird an dieser Stelle verzichtet.

Sachrisiken

Sachrisiken sind monetäre Risiken (Schadenerwartung in CHF) bezogen auf ein Objekt (Borter 1999a). Die Berechnung des Schadenausmaßes (A_{Sw}) erfolgt nach dem gleichen Prinzip nach dem das Schadenausmaß bezüglich Personen in Gebäuden bestimmt wurde. Die betroffenen Gebäude werden den Druckzonen entsprechend in der „Objektartenkarte x Intensitätskarte“ identifiziert und die Schadempfindlichkeit (S_{est}) jedes Gebäudes bestimmt.

Das Schadenausmaß (A_S) wird nach folgender Formel berechnet:

$$A_S = [(1 + f_A) \cdot W_{St} \cdot S_{est}] + (W_{Ih} \cdot S_{Ih})$$

wobei: W_{St} ...Strukturwert eines Gebäudes

S_{est} ...Schadenempfindlichkeit eines Gebäudes

f_A ...Faktor für Gebäudeabbruchskosten

W_{Ih} ...Inhaltswert eines Gebäudes

S_{Ih} ...Schadenempfindlichkeit der Inhaltswerte eines Gebäudes

(Gleichung 15)

Ist der Abbruch eines Gebäudes nach einem Schaden wahrscheinlich wird für f_A 0,05 eingesetzt. Die Berechnung des Schadenausmaßes für Gebäude erfolgte automatisch nach Ausfüllen des entsprechenden Excel-Datenblatts in RIKO.

4.4.6 Risikobestimmung und Darstellung

Das objektbezogene Risiko ($r_{i,j}$) wird für jedes Szenario (SZ_j) durch Verknüpfen des Schadenausmaßes (A_S) (vgl. Gleichung 15) mit der Eintretenshäufigkeit (h_E) (vgl. Gleichung 12) anhand folgender Formel berechnet:

$$r_{i,j} = A_S \cdot h_E$$

(Gleichung 16)

Durch Aufsummieren der objekt- und szenarienbezogenen Risiken ($r_{i,j}$) wird das jährliche Kollektivrisiko (R) getrennt nach Personen⁶⁰- und Sachrisiken⁶¹ berechnet.

Durch sog. Risikomatrizen, schematisch dargestellt in Abbildung 15 wird eine vollständige numerische Beschreibung der Risiken des betrachteten Systems wiedergegeben. Sie zeigen die Wirkung der Szenarien auf die gefährdeten Personen und Objekte.

⁶⁰ Da ausschließlich Todesfälle betrachtet werden spricht man auch vom jährlichen kollektiven Todesfallrisiko ausgedrückt in Todesfällen pro Jahr oder Geldeinheiten (CHF) pro Jahr.

⁶¹ Ausgedrückt in Geldeinheit pro Jahr, hier in CHF/Jahr.

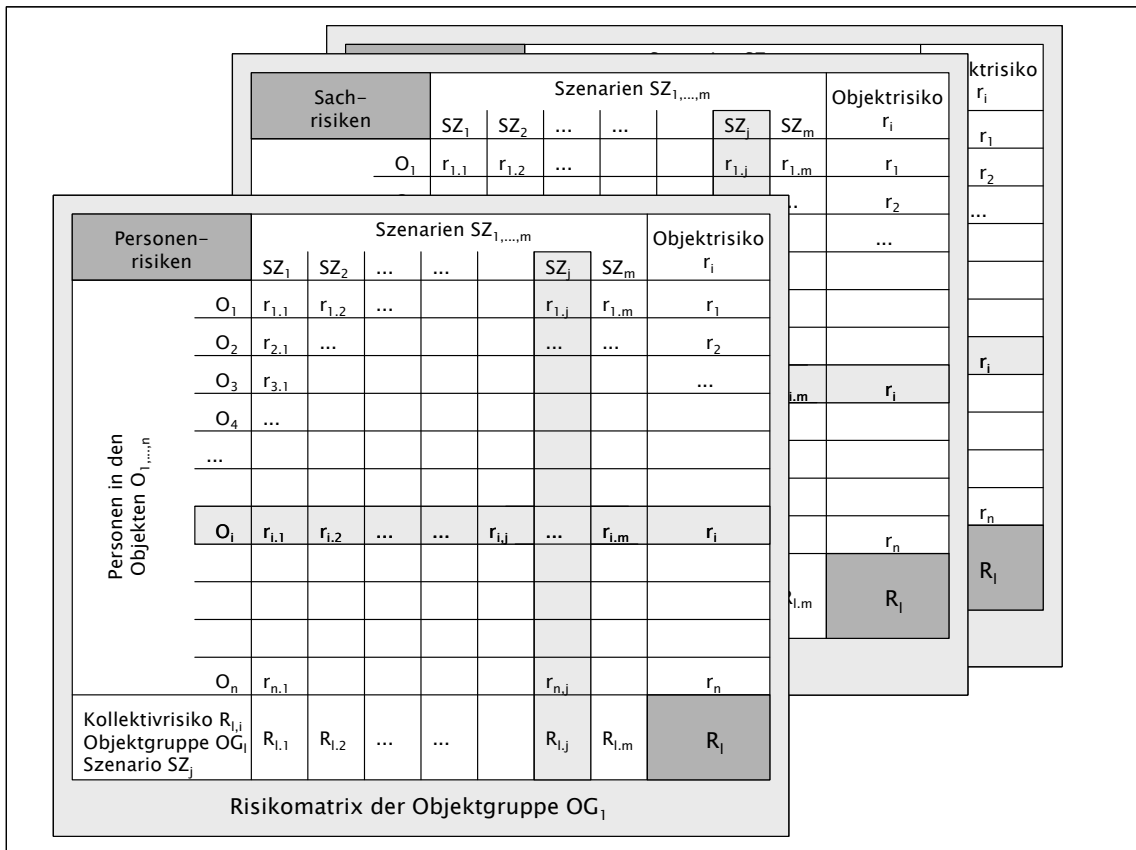


Abbildung 15: Schematische Darstellung von Risikomatrizen (in Anlehnung an Borter 1999a).

Um kollektive Personen- und Sachrisiken zu einem Wert verknüpfen zu können, gilt es das bis dahin in Todesfällen/Jahr angegebene Personenrisiko in Geldeinheiten zu bewerten. Zur Monetarisierung dieser Größe wurde ein Bewertungsansatz nach sog. Risikokategorien gewählt. Das Konzept der Risikokategorien stellt die Risikoakzeptanz in Abhängigkeit vom Selbstbestimmungsgrad der beteiligten Personen für die eingegangene Risikosituation dar.

Eingeteilt wird in vier Kategorien (vgl. PLANAT 2005):

- Kategorie 1: 100 % freiwillig
- Kategorie 2: hohe Selbstverantwortung
- Kategorie 3: niedrige Selbstverantwortung
- Kategorie 4: 100 % unfreiwillig

Die kollektiven Personenrisiken im Fallbeispiel „Andermatt“ können der Kategorie 3 „niedrige Selbstverantwortung“ zugeordnet werden. Die Angaben zum Bewertungsansatz

satz der Grenzkosten pro gerettetes Menschenleben⁶² sind als Richtwerte in Tabellen festgehalten⁶³; der für diese Risikoberechnung gewählte Wert ist 5 Mio. CHF pro gerettetes Menschenleben.

Nach der Monetarisierung können die kollektiven Personen- und Sachrisiken zum Kollektivrisiko des Systems verknüpft werden.

4.5 Das Risiko in Abhängigkeit vom Waldzustand

4.5.1 Waldzustandsszenarien

Struktur und Ausdehnung von Lawinenschutzwäldern beeinflussen die Anrisswahrscheinlichkeit und Auslaufdistanz von Lawinen maßgeblich (Brang 2001).

Anhand verschiedener Waldzustände soll untersucht werden, wie sich Veränderungen des Bannwaldes von Andermatt auf das Ergebnis der Risikoanalyse auswirken.

Folgende Waldzustände wurden unter den Szenarien I bis V untersucht (vgl. Abb. 16):

- Szenario I: Aktueller Waldzustand mit Berücksichtigung der vorhandenen bautechnischen Lawinenschutzmaßnahmen.
- Szenario II: Aktueller Waldzustand ohne Berücksichtigung der vorhandenen bautechnischen Lawinenschutzmaßnahmen. Beachtet wurde nur der schutzwirksame Teil des Bannwaldes (vgl. Kap. 4.2.4).
- Szenario III: Die vom Sturm Vivian 1990 verursachte Windwurffläche im Kernbestand des Bannwaldes diente als Initial für die Entwicklung dieses Szenarios (vgl. Kap. 3.4). Die angrenzenden Bestände sind überwiegend älter als 250 Jahre. Das mittlere maximale Bestandesalter für derartige Bestände beträgt rund 300 Jahre (vgl. Brang & Duc 2002). Es ist nicht ausgeschlossen, dass diese Bestände bei einem erneuten Sturmereignis geworfen werden. Deshalb wurde die Windwurffläche in untere Hangbereiche ausgedehnt. Vorhandene bautechnische Lawinenschutzmaßnahmen bleiben unberücksichtigt.

⁶² Die Festlegung konkreter Werte für Grenzkosten beinhaltet die Frage der Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft für Sicherheit und die Frage der Verhältnismäßigkeit der Maßnahme. Umfangreiche Untersuchungen über die Zahlungsbereitschaft für konkrete Sicherheitsplanungen, bilden eine breite Erfahrungsbasis für die Festlegung von Schutzziele und Grenzkosten (PLANAT 2005).

⁶³ PLANAT (2005): http://www.cenat.ch/ressources/planat_product_de_543.pdf (Seite 20, Stand: 11.05.2006)

- Szenario IV: Vergrößerung der Windwurffläche in obere Hangbereiche; keine Berücksichtigung der existenten bautechnischen Lawenschutzmaßnahmen.
- Szenario V: Vollumfängliche Zerstörung des Schutzwaldes; keine Berücksichtigung der existenten bautechnischen Lawenschutzmaßnahmen.

Die Waldflächenausdehnungen der Szenarien I bis IV sind zur Übersicht in Abbildung 16 dargestellt. Abgebildet sind die zur Ausscheidung der Anrissgebiete und zur Bestimmung der Reibungsparameter μ und ξ verwendeten Input-GRIDs (vgl. Kap. 4.4.2 und 4.4.3).

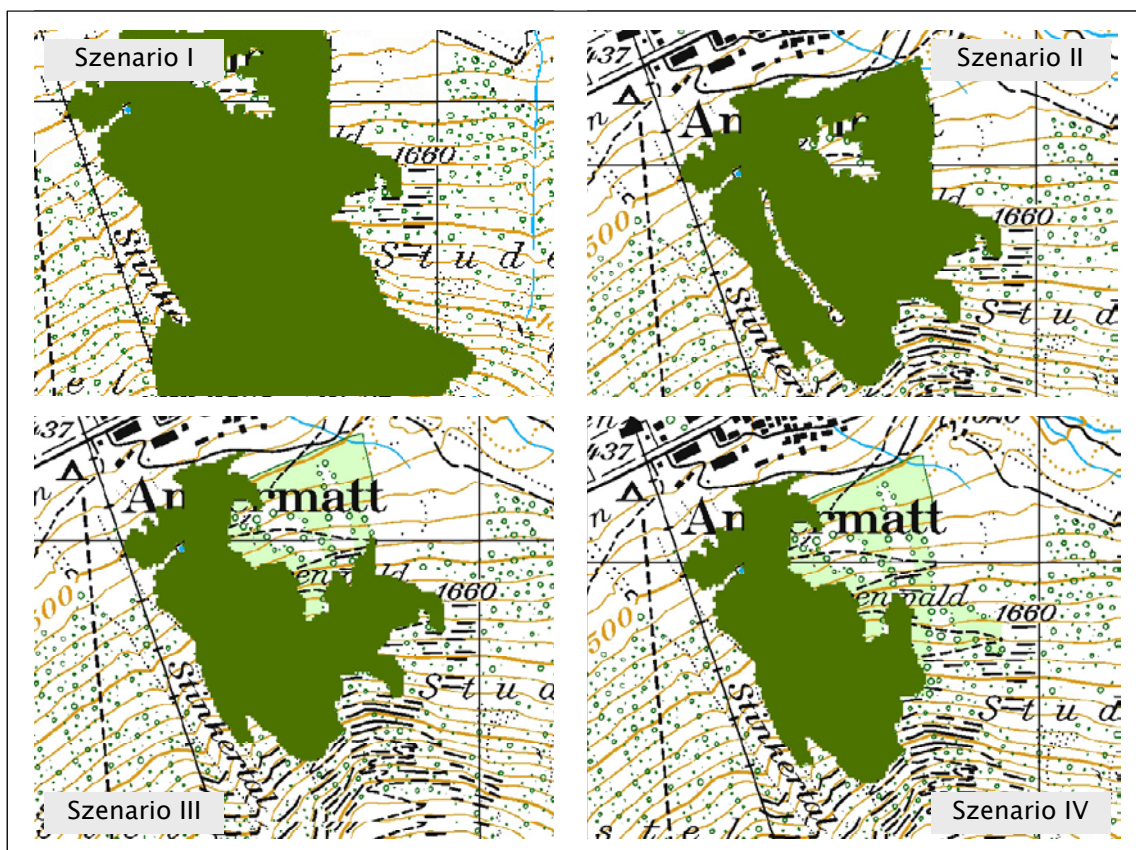


Abbildung 16: Darstellung der Waldflächen der Szenarien I bis IV anhand der Input-GRIDs zur Bestimmung der Reibungsparameter μ und ξ in AVAL-2D.

4.5.2 Ermitteln der Risikoveränderung

Die Risikoanalyse wurde für jedes Szenario analog den in Kapitel 4.4 beschriebenen Arbeitsschritten durchgeführt. Eine Veränderung des Schutzwaldes ist insbesondere bei der Gefahrenanalyse zu beachten, welche durch die Anwendung des Lawinenmodellierungs-Systems AVAL-2D (Gruber 1998) unterstützt wurde.

Analog den in Kapitel 4.4.2. „Ereignisanalyse“ beschriebenen Methoden wurden die potentiellen Lawinenanrissgebiete für jedes Szenario separat mit Hilfe von „ASA-Prog“ (Gruber 1998) berechnet, auf Plausibilität geprüft und entsprechend geändert.

Die räumliche Variation der Reibungsparameter μ und ξ in Abhängigkeit von der Waldflächenveränderung wurde im Simulationsmodell automatisch bestimmt (vgl. Kap. 4.4.3.3). Das Ergebnis ist ein ArcInfo-Polygon-Coverage für jedes Waldzustandsszenario als Input für die anschließende Lawinensimulation.

Die lawinendynamischen Berechnungen wurden mit dem 2-dimensionalen numerischen Lawinensimulationsmodell VS-2D für jedes Anrissgebiet mit einer Wiederkehrdauer von $T = 300$ Jahre durchgeführt. Die so entstandenen ArcInfo-Polygon-Coverages wurden im ArcGIS 9 mit der Funktion „copy“ in das Datenformat Shapefile umgewandelt und im ArcView 3.2 mit der Funktion „union“ zu einem Shapefile verschnitten. Die Darstellung der Auslaufdistanzen der Lawinen erfolgt in Intensitätskarten.

Das Risikos für die Szenarien I bis V wurde entsprechend den vorher beschriebenen Arbeitsschritten mit Hilfe von RIKO bestimmt (vgl. Kap. 4.4.4 bis 4.4.6). Nach dem Verschneiden der Objektartenkarte mit den Intensitätskarten für die einzelnen Szenarien konnten die von einem Lawinenereignis betroffenen Gebäude identifiziert werden. Die Gebäude wurden über eine Zuordnung von „1“ (betroffen) oder „0“ (nicht betroffen) für die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit (p_{rA}) in dem entsprechenden RIKO-Datenblatt in die Risikoberechnung einbezogen.

Die weiteren Berechnungsschritte wurden in RIKO ausgeführt und das Ergebnis anhand von Risikomatrizen dargestellt.

Der Vergleich der ermittelten Risiken in Abhängigkeit von Waldausdehnung und Waldstruktur soll die Lawinenschutzwirkung des Bannwaldes von Andermatt verdeutlichen.

5 Ergebnisse

5.1 Die Waldstrukturen und die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Bannwald von Andermatt

Mit Hilfe der Luftbildinterpretation unter Verwendung des „Luftbildschlüssel für die Waldstrukturkartierung in subalpinen fichtendominierten Wäldern“ von Bebi (2000) konnten die Strukturklassen:

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| ▪ Aufgelöst | Einschichtig geschlossen |
| ▪ Jungwald/Gebüschwald | Nicht stufig, offen |
| ▪ Stufig dicht und | Stufig, offen |

ausgeschieden werden (vgl. Abb. 17).

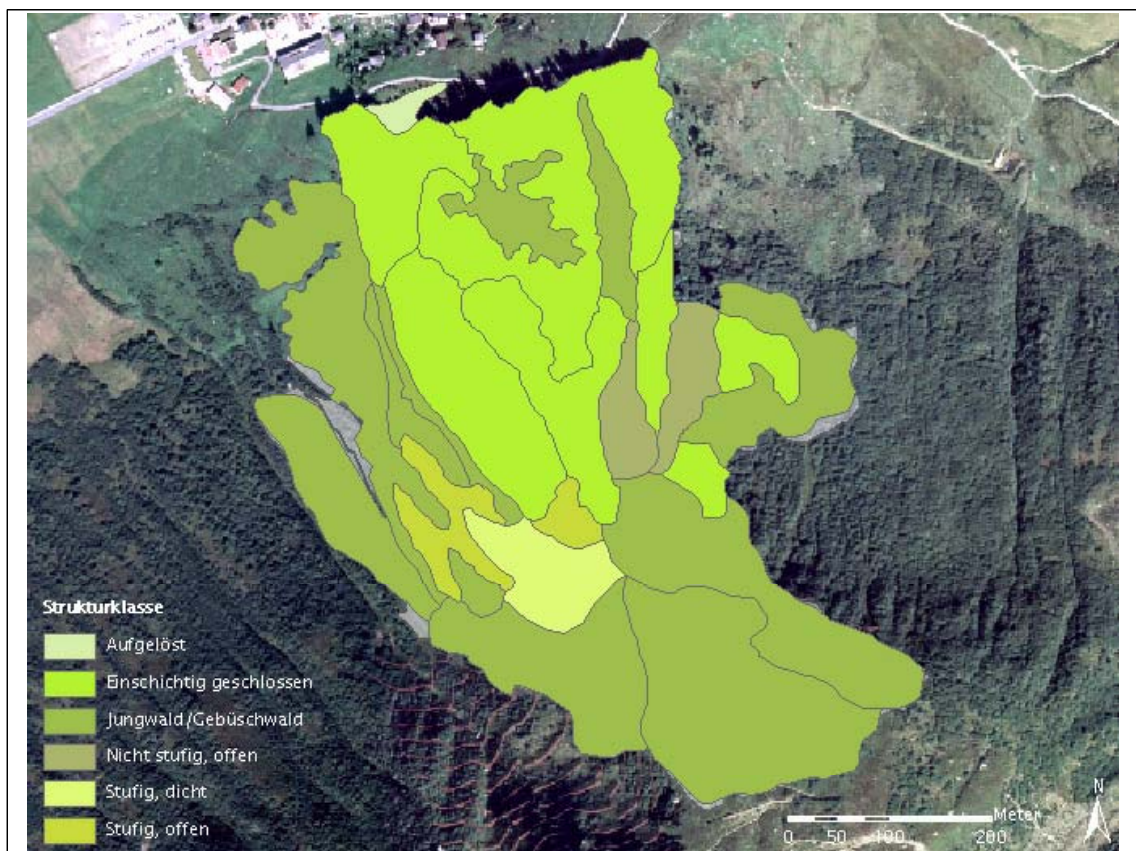


Abbildung 17: Kartierte Strukturklassen im Bannwald von Andermatt.

Die Digitalisierung im GIS (vgl. Kap. 4.2) erlaubt eine grafische Darstellung als Mosaik verschiedener Strukturklassen (vgl. Abb. 17) und die Verknüpfung mit sachlichen Informationen. Durch Abfragen können Informationen über den Strukturtyp, die Entwicklungsstufe oder die Oberhöhe selektiert werden.

Das entstandene Shapefile war Vorlage zur Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald und diente als Diskussionsgrundlage für die Entwicklung der Waldzustandsszenarien I bis IV (vgl. Kap. 4.5.1).

Die räumliche Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald auf Grundlage der Waldstrukturenkartierung liefert ein plausibles Ergebnis. Waldzonen mit einer Lawinenanrisswahrscheinlichkeit $< 50\%$ überwiegen im Bannwald von Andermatt (vgl. Abb. 18). Im unteren Hangbereich wurde eine Fläche mit großer Lawinenanrissgefährdung ($75 - 100\%$) ausgeschieden (vgl. Abb. 18). Hierbei handelt es sich um die vom Sturm Vivian 1990 geworfene Fläche im Kernbestand des Bannwaldes (vgl. Kap. 3.4). Trotz der Aufforstung 1995 ist ein Schutz vor Lawinenanrissen noch nicht gewährleistet.

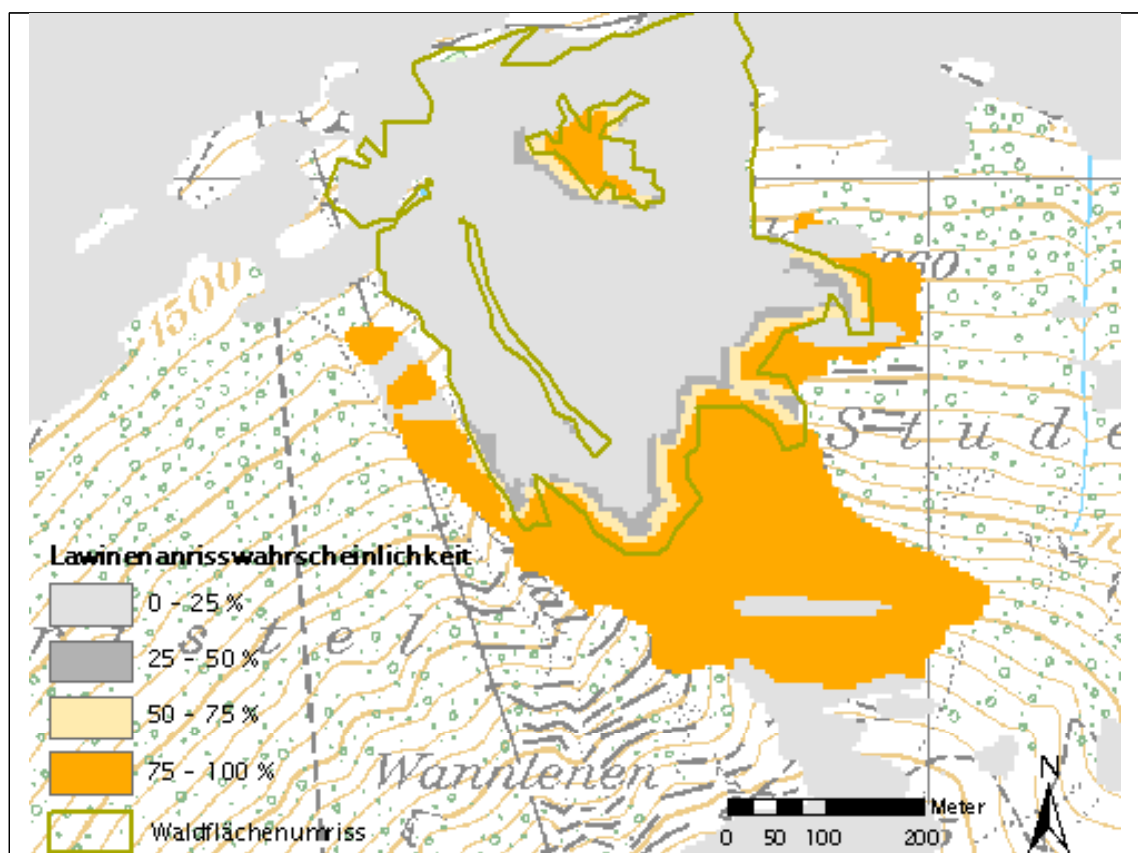


Abbildung 18: Die Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Bannwald von Andermatt in [%].

5.2 Ergebnisse der Risikoanalysen

5.2.1 Gefahrenanalyse

Das Ergebnis der Gefahrenanalyse sind Intensitätskarten für die Szenarien I bis V für eine Wiederkehrdauer von $T = 300$ Jahre (vgl. Abb. 19 bis 23).

Neben den blauen und roten Gefahrenzonen, welche unterschiedliche Druckwirkungen charakterisieren, sind die im Arbeitsschritt „Ereignisanalyse“ ausgeschiedenen Anrissgebiete abgebildet. Diese wurden mit „ASA-Prog“ (Gruber 1998) in Abhängigkeit von der szenarienspezifischen Waldfläche berechnet und durch den Vergleich mit Angaben aus dem Lawinenkataster und anderen relevanten Aufzeichnungen auf Plausibilität überprüft. Das durch die Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald ausgeschiedene Anrissgebiet (vgl. Abb. 18) wurde manuell im ArcInfo-Modul „arcedit“ editiert.

Die Simulationen wurden mit identischen Inputparametern durchgeführt; einzig die maximal mögliche Neuschneemenge d_0^* musste für das manuell editierte Anrissgebiet separat eingegeben werden. Entsprechend den Angaben für lawinendynamische Berechnungen wurde ein Wert von 1,60 m gewählt⁶⁴.

Ausmaß und Druckzonenaufteilung der Lawinen, sowie die Lokalisierung der potentiellen Anrissgebiete ist offensichtlich abhängig vom Waldzustand (vgl. Abb. 16). Unter Szenario V („ohne Wald“) sind die Auslaufdistancen am größten, unter den Szenarien I bis IV verringern sie sich je nach Waldfläche. Die Reichweiten der Lawinen zeigen ein Minimum unter Szenario I („mit Wald – mit Lawinenverbauung“), welches die reale Situation der Gemeinde Andermatt charakterisiert (vgl. Abb. 19). Die Szenarien II bis V wurden ohne Berücksichtigung der existenten Lawinenverbauungen gerechnet.

Eine deutliche Gefahr geht vom Anrissgebiet im Wald aus. Die Auslaufzone dieser Lawine stößt unter allen Szenarien teilweise bis in den Dorfkern vor (vgl. Abb. 19 bis 23).

⁶⁴ Richtwert für d_0^* ($T = 300$) gültig für Meereshöhen von ca. 2.000 m ü. M.: 1,80 m (vgl. Anhang 9). Abzug von 5 cm/100 m Höhenunterschied (Gruber et al. 1999): Reduktion um 20 cm, da das Anrissgebiet auf ca. 1.600 m ü. M. lokalisiert ist.

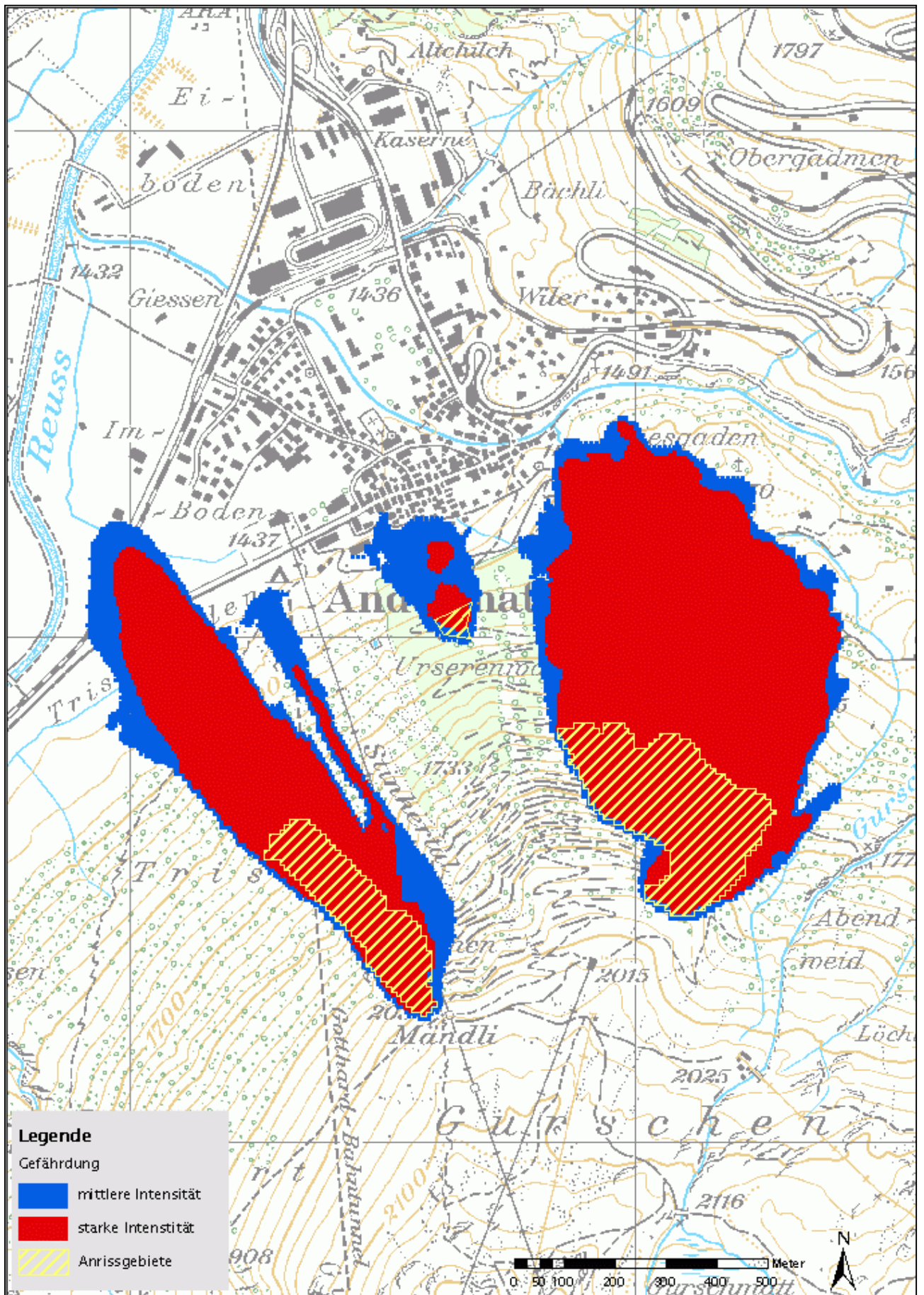


Abbildung 19: Intensitätskarte Andermatt Szenario I: „mit Wald – mit Lawinenverbauung“

mittlere Intensität: Druckwirkung $< 30\text{kN/m}^2$
 starke Intensität: Druckwirkung $> 30\text{kN/m}^2$
 Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

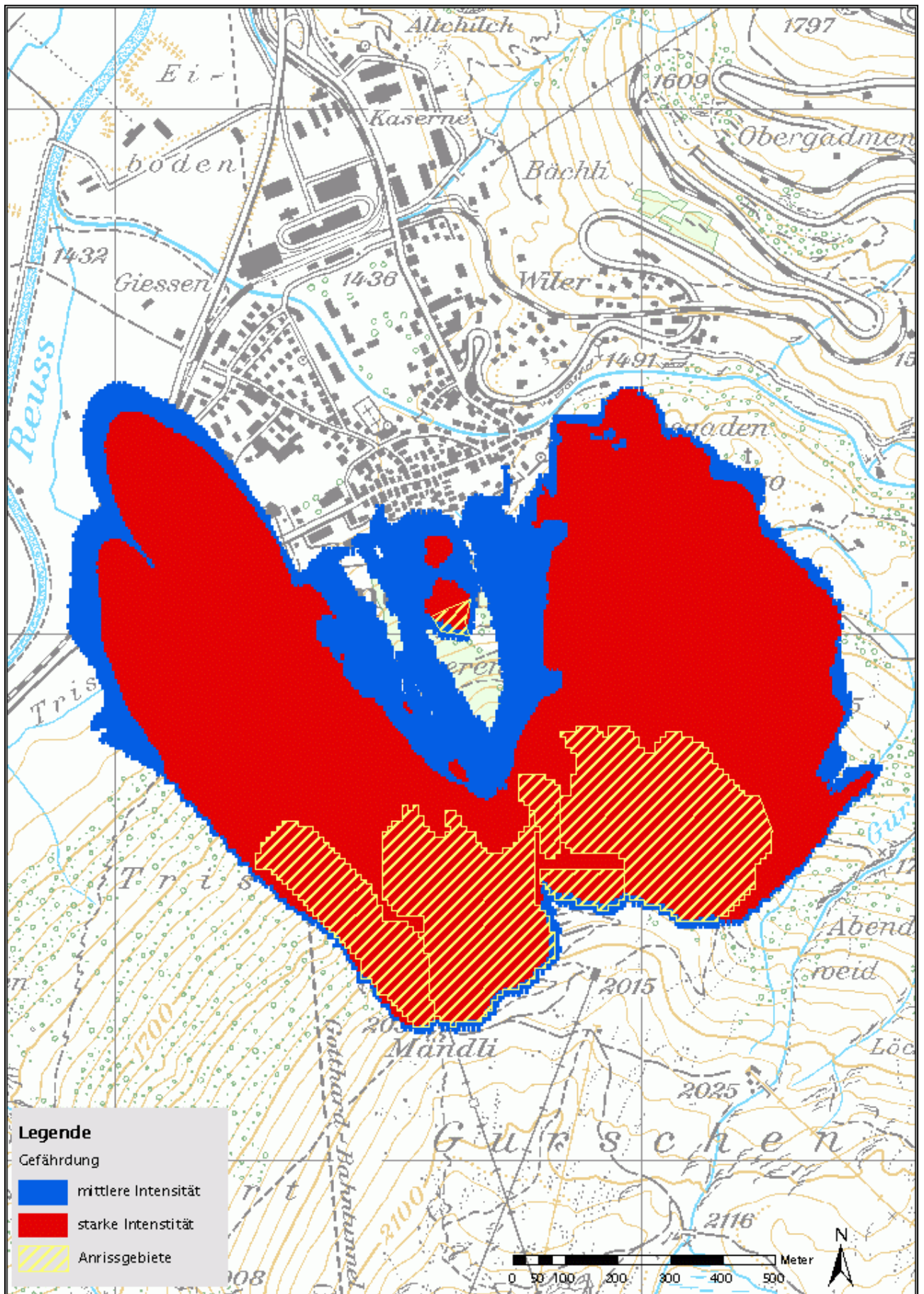


Abbildung 20: Intensitätskarte Andermatt Szenario II: „mit Wald – ohne Lawinenverbauung“

mittlere Intensität: Druckwirkung $< 30\text{kN/m}^2$
 starke Intensität: Druckwirkung $> 30\text{kN/m}^2$
 Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

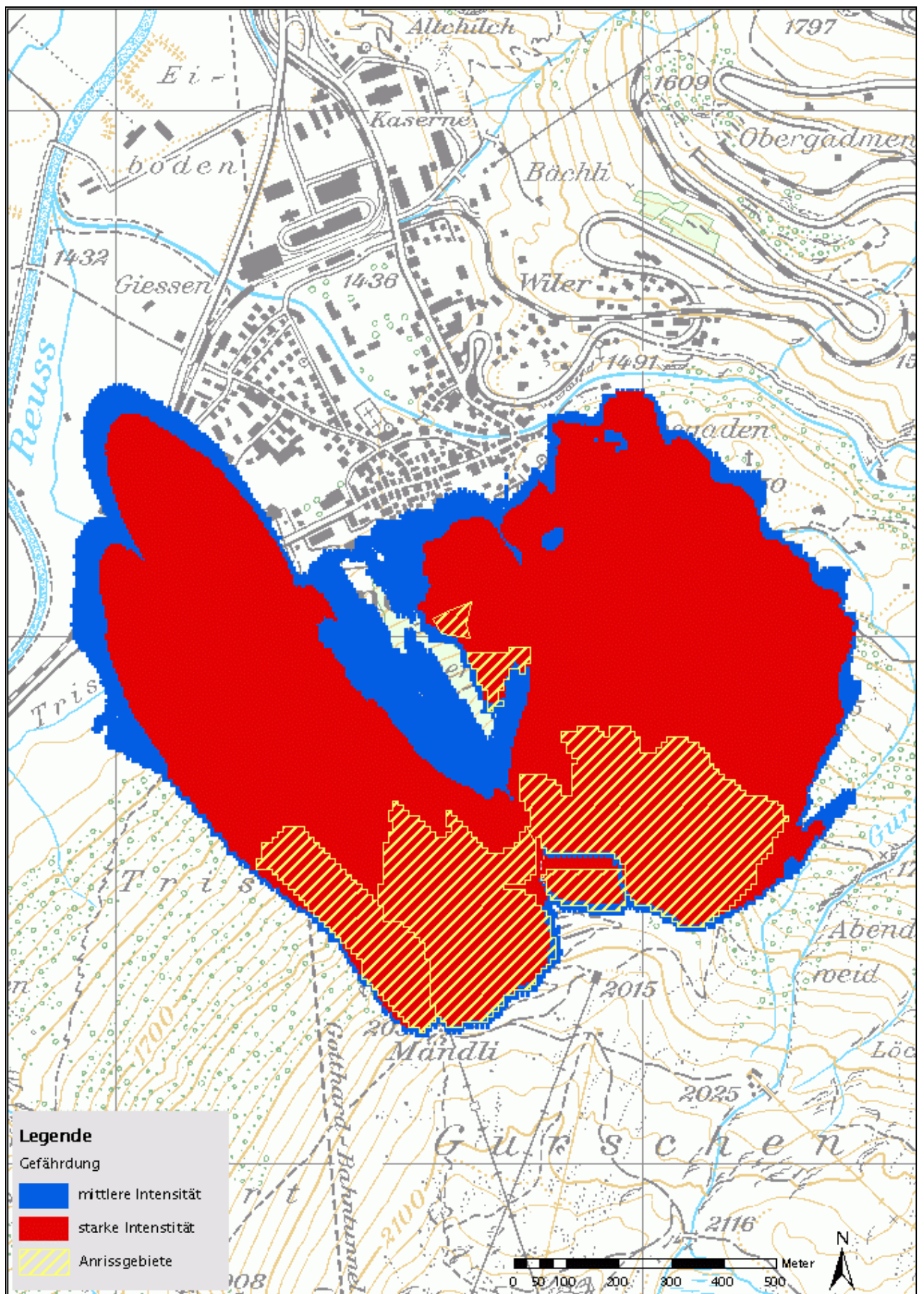


Abbildung 21: Intensitätskarte Andermatt Szenario III: „Wald mit kleiner Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung“

mittlere Intensität: Druckwirkung $< 30\text{kN/m}^2$

starke Intensität: Druckwirkung $> 30\text{kN/m}^2$

Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

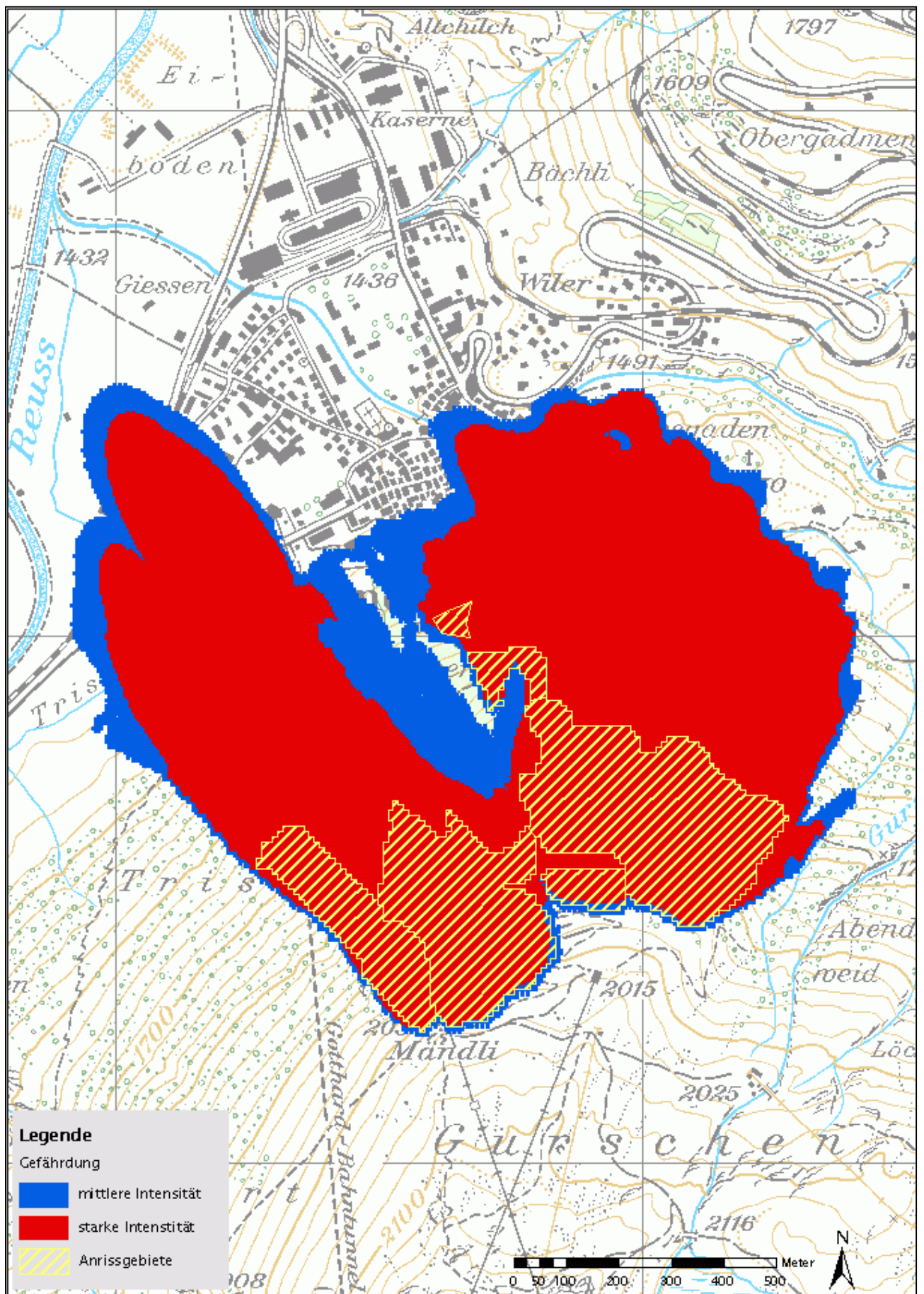


Abbildung 22: Intensitätskarte Andermatt Szenario IV: „Wald mit großer Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung“

mittlere Intensität: Druckwirkung $< 30\text{kN/m}^2$

starke Intensität: Druckwirkung $> 30\text{kN/m}^2$

Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

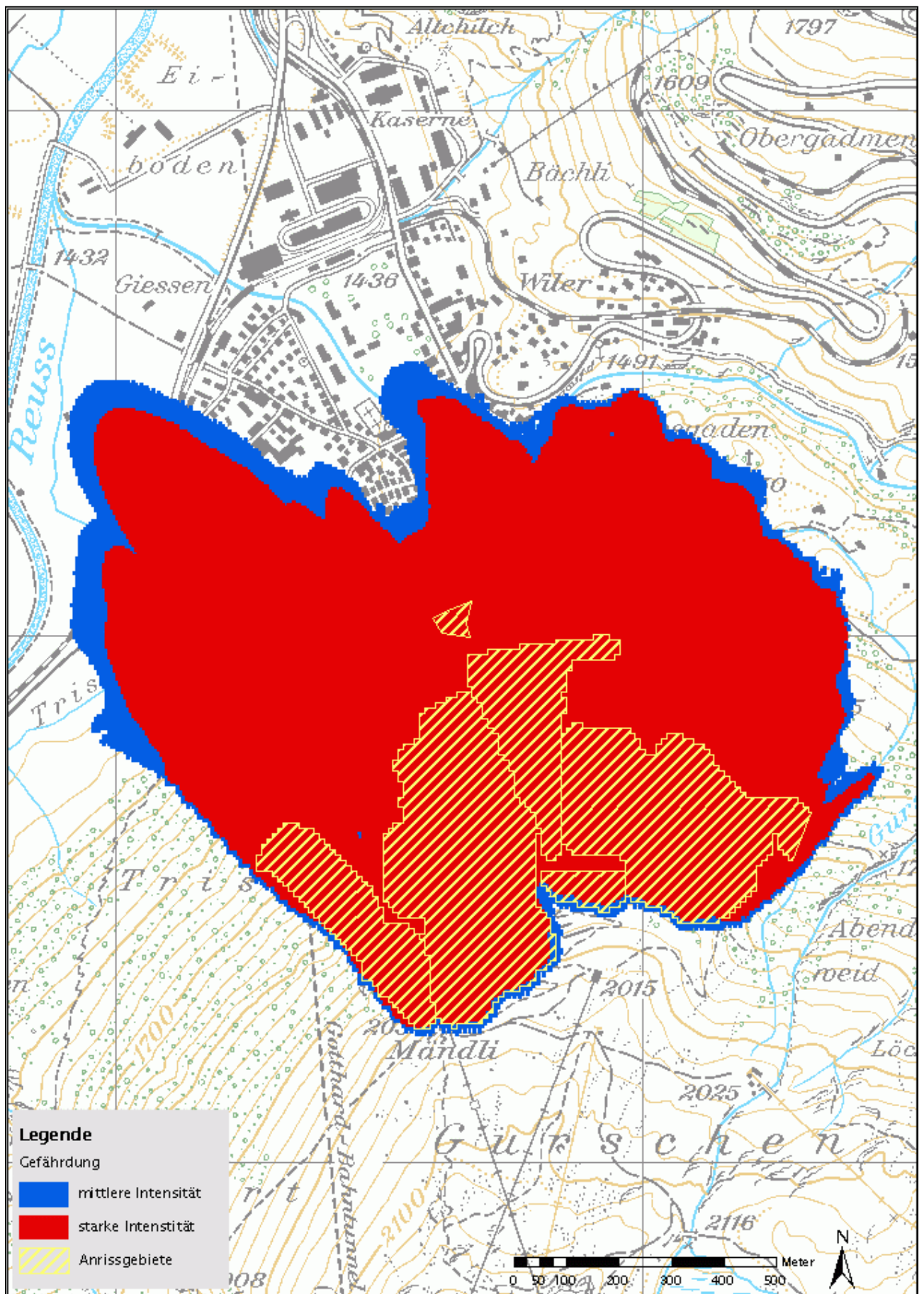


Abbildung 23: Intensitätskarte Andermatt Szenario V: „ohne Wald – ohne Lawinenverbauungen“

mittlere Intensität: Druckwirkung $< 30\text{kN/m}^2$
 starke Intensität: Druckwirkung $> 30\text{kN/m}^2$
 Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

5.2.2 Expositionsanalyse

Mit Hilfe des Geografischen Informationssystems ArcGISTM9 wurde die Objektartenkarte für Andermatt auf Grundlage einer Analyse der Gebäudestruktur von C. Wilhelm (1997) und der Luftbildinterpretation erstellt (vgl. Abb. 24). Die Objektartenkarte umfasst alle Gebäude Andermatts mit Zuordnung folgender Objektarten und den zugehörigen Gebäudeklassen:

Tabelle 5: Objektarten und zugehörige Gebäudeklassen.

Objektart	Gebäudeklasse	Objektart	Gebäudeklasse
Einfamilienhaus	3	Mehrfamilienhaus	3
Öffentliches Gebäude	3	Hotel/Restaurant	3
Gewerbebaute	3	Kirche	4
Lager/Garage	2	Stall	1

Den Gebäudeklassen sind Schadempfindlichkeiten (S_{est}), sowie den einzelnen Gebäuden Strukturwert (W_{St}), Inhaltswert (W_{Ih}) und die Anzahl anwesender Personen (N_P) zugeordnet⁶⁵.

⁶⁵ Die verwendeten Werte für S_{est} , W_{St} , W_{Ih} und N_P sind in den Anhängen 1, 4 und 5 aufgelistet.

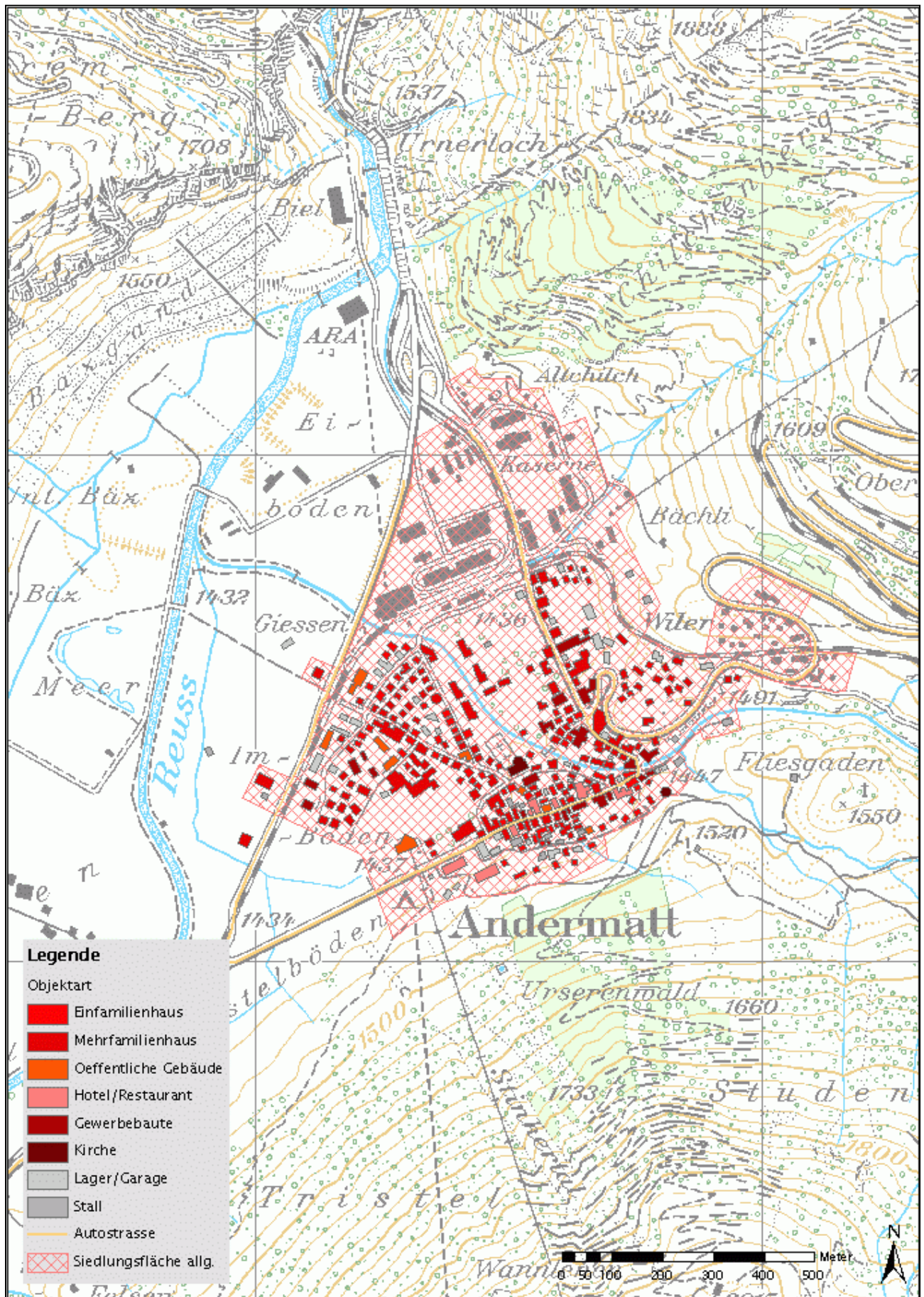


Abbildung 24: Objektartenkarte Andermatt

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

5.2.3 Folgenanalyse

Aus der Verschneidung der Intensitätskarten⁶⁶ mit der Objektartenkarte⁶⁷ im GIS (Arc-View 3.2) resultieren szenarienspezifische „Objektartenkarte x Intensitätskarten“ (vgl. Anhang 12 bis 16). Die Abbildungen 25 bis 29 zeigen einen Ausschnitt aus diesen Karten für die Szenarien I bis V. Zu erkennen sind die innerhalb der blauen und roten Gefahrenzonen liegenden Gebäude; diese sind orange eingefärbt.

Die Anzahl betroffener Gebäude variiert stark zwischen den Szenarien (vgl. Abb. 30). Szenario I charakterisiert die gegenwärtige Waldsituation einschließlich der vorhandenen bautechnischen Lawinenschutzmaßnahmen oberhalb sowie rechts und links des Schutzwaldes. Durch die Verbauungen wird ein Schutz vor Lawinen erreicht, der eine ausgedehnte Zerstörung Andermatts verhindert (vgl. Abb. 25). Im Falle eines 300jährigen Lawinenereignisses wären 16 Gebäude betroffen. Wird die in absehbarer Zeit zurückkehrende Schutzwirkung des Waldes auf der Windwurffläche im Kernbestand berücksichtigt, so ist unter den Voraussetzungen dieses Szenarios einer Zerstörung Andermatts vorgebeugt.

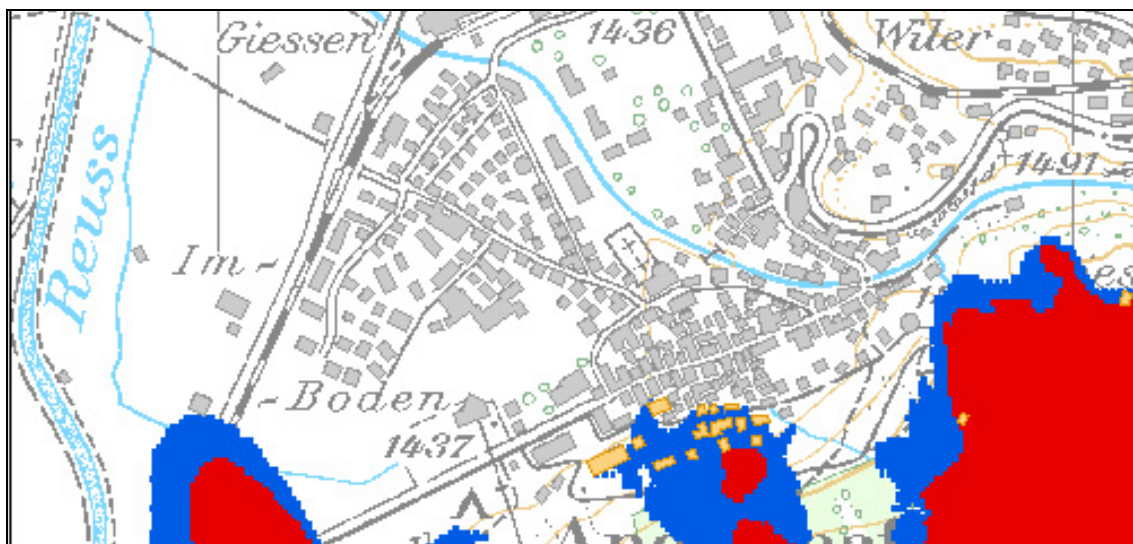


Abbildung 25: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario I.

Unter Szenario II sind 40 Häuser betroffen (vgl. Abb. 26); dieses Szenario stellt die momentane Waldsituation ohne Berücksichtigung existenter bautechnischer Lawinen-

⁶⁶ Vgl. Abb. 19 bis 23

⁶⁷ Vgl. Abb. 24

schutzmaßnahmen dar. Auch ohne zusätzliche Lawinenverbauungen schützt der Bannwald den Dorfkern Andermatts vor einer großflächigen Zerstörung durch ein Extremereignis ($T = 300$).



Abbildung 26: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario II.

Die Waldzustandsszenarien III und IV stellen eine Verkleinerung der Waldfläche infolge eines Sturmereignis dar. Die durch Sturm Vivian 1990 hervorgerufenen Störung im Kernbestand des Bannwaldes wurde bei der Entwicklung dieser Szenarien schrittweise ausgedehnt. Unter Szenario III wären 49 Häuser betroffen (vgl. Abb. 27); ein 300jähriges Lawinenereignis unter den Bedingungen von Szenario IV hätte die Beschädigung bzw. Zerstörung von 90 Gebäuden zur Folge (vgl. Abb. 28). Die waldfreie Fläche unter Szenario IV ist im oberen Hangteil lokalisiert⁶⁸. Daraus resultieren die Ausdehnungen der potentiellen Anrissgebiete⁶⁹ und der auffällige Anstieg des Schadenausmaßes. Eine Vergrößerung der Windwurffläche im Unterhang⁷⁰ unter Szenario III hat, im Vergleich zur aktuellen Waldsituation (Szenario II), keinen bedeutenden Einfluss auf Andermatts Lawinengefahrensituation (vgl. Abb. 27 und Abb. 26).

⁶⁸ Vgl. Abb. 16

⁶⁹ Vgl. Abb. 19 bis 23

⁷⁰ Vgl. Abb. 16



Abbildung 27: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario III.



Abbildung 28: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario IV.

Eine vollumfängliche Zerstörung des Bannwaldes hätte bei einem 300jährigen Lawineneignis eine ausgedehnte Zerstörung der Siedlungsfläche Andermatts zur Folge (vgl. Abb. 29). Bei einer Katastrophe dieses Ausmaßes wären 147 Gebäude betroffen.

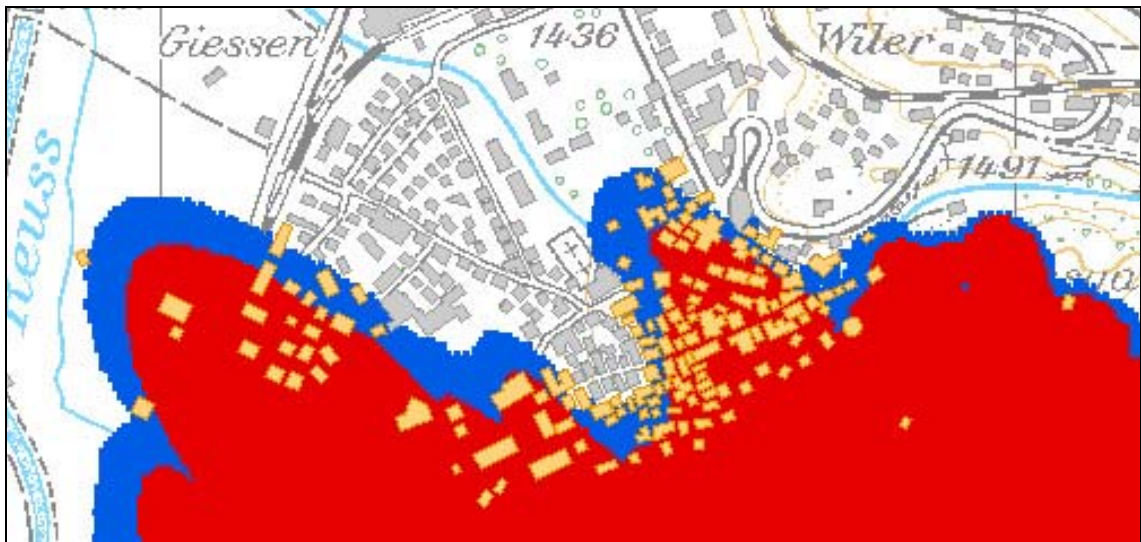


Abbildung 29: Ausschnitt aus der Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario V.

Aus allen „Objektartenkarte x Intensitätskarten“ deutlich zu erkennen ist die vom Anrissgebiet im Wald ausgehende Gefahr. Die Windwurffläche wurde 1995 aufgefördert, hat aber eine Oberhöhe (h_{dom}) von 2 m zur Verhinderung eines Lawinenanrisses noch nicht erreicht (vgl. Brang & Duc 2002).

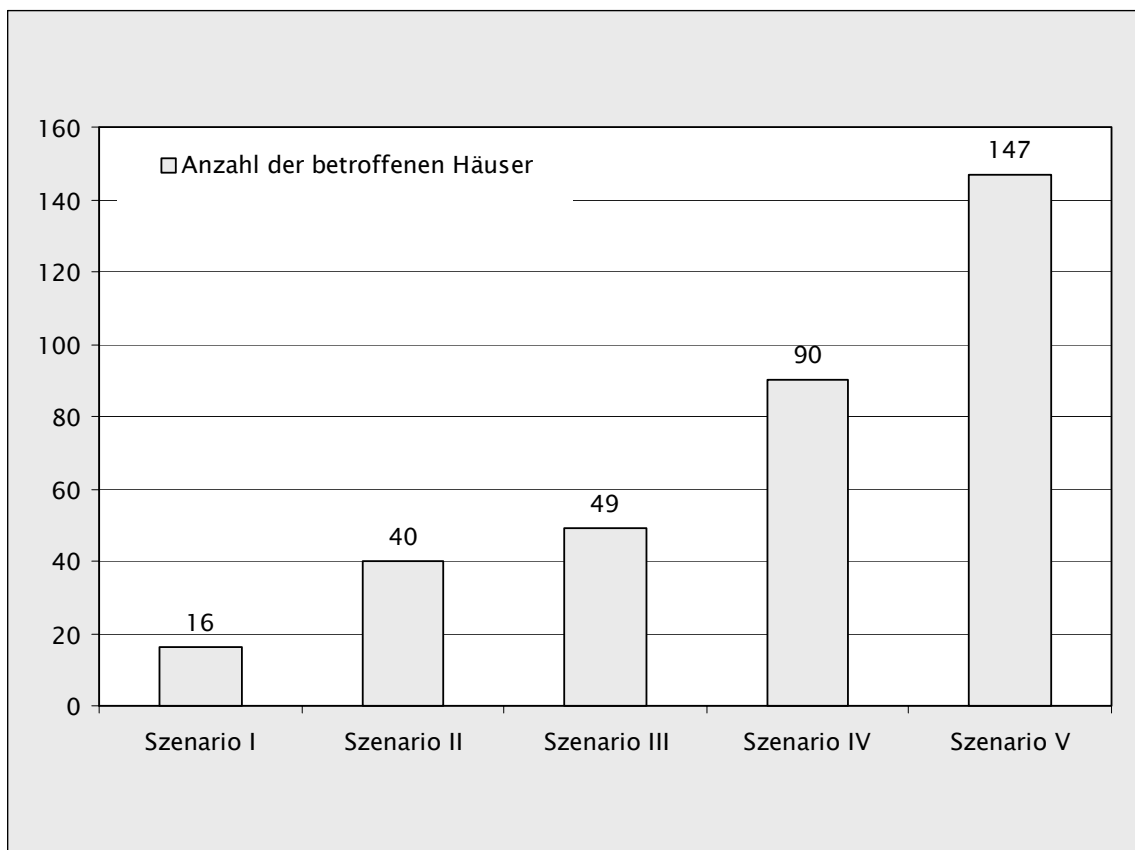


Abbildung 30: Anzahl betroffener Gebäude bei der Lawinensimulation mit VS-2D in Abhängigkeit vom Waldzustand.

Durch die Verknüpfung von räumlicher und sachlicher Information im GIS konnte das Schadenausmaß (A_S) getrennt nach Personen- und Sachrisiken ermittelt werden (vgl. Tab. 6). Im Falle eines 300jährigen Lawinenereignisses und einer vollumfänglichen Zerstörung des Schutzwaldes (Szenario V) wären ca. 163 Personen betroffen, bei der bestehenden Situation (Szenario I) ca. 3 und beim aktuellen Zustand des Bannwaldes ohne Berücksichtigung existenter Lawinenverbauungen (Szenario II) ca. 26 Personen. Eine Verkleinerung der Schutzwaldfläche im unteren Hangbereich infolge eines konstruierten Sturmereignisses (Szenario IV) hätte nur einen geringen Anstieg der Anzahl betroffener Personen im Vergleich zu Szenario II zur Folge; bei einer Ausweitung der Windwurf- fläche in obere Hangbereiche (Szenario IV) würde sich dagegen die Anzahl der Todesfälle pro Ereignis mehr als verdoppeln (vgl. Tab. 6).

Tabelle 6: Schadenausmaß (A_S) für Personenschäden [Anzahl der Todesfälle/Ereignis] und Sachwerte [CHF/Ereignis] für die Szenarien I bis V.

Waldzustandsszenario	Schadenausmaß (A_S)	
	Personenschäden Todesfälle/Ereignis	Sachschäden CHF/Ereignis
Szenario I: „mit Wald – mit Lawinenverbauung“	3,24	5.517.500,00
Szenario II: „mit Wald - ohne Lawinenverbauung“	25,78	21.040.000,00
Szenario III: „kleiner Windwurf – ohne Lawinenverbauung“	28,65	24.762.500,00
Szenario IV: „großer Windwurf – ohne Lawinenverbauung“	71,39	53.495.000,00
Szenario V: „ohne Wald – ohne Lawinenverbauung“	162,85	98.648.750,00

Das Schadenausmaß für Sachschäden zeigt identische Verhältnisse auf (vgl. Tab. 6). Das zu erwartende Schadenausmaß ist mit rund 98,6 Mio. CHF/Ereignis unter Szenario V („ohne Wald“) am höchsten; bei der gegenwärtigen Ausgangssituation (Szenario I) am geringsten (ca. 5,5 Mio. CHF/Ereignis). Ein 300jähriges Lawinenereignis unter alleiniger Berücksichtigung des Waldes in seiner aktuellen Ausdehnung hätte einen Sachschaden von rund 21 Mio. CHF zur Folge. Unter dem Szenario III („kleine Windwurf- fläche“) würde ein ähnlich hoher und unter Szenario IV („große Windwurf- fläche“) ein mehr als doppelt so hoher Schaden an Gebäuden (53,5 Mio. CHF/Ereignis) entstehen.

5.2.4 Risikobestimmung und Darstellung

Die objektbezogenen Risiken (r) wurden durch Multiplizieren des Schadenausmaßes (A_S) mit der Eintretenshäufigkeit (h_E) berechnet; die Darstellung erfolgt anhand sog.

Risikomatrizen⁷¹ getrennt nach Personen- und Sachrisiken (vgl. Abb. 31 als Beispiel für Szenario I). Durch Aufsummieren der objektbezogenen Risiken (r) wird das jährliche Kollektivrisiko (R) getrennt nach Personen- und Sachrisiken berechnet.

Personenrisiken SZI T=300				Risikomatrizen Waldzustandsszenario I Wiederkehrdauer T=300 Jahre			
Objekt-Nr.	Objektart	Schadenausmass S [Tf/Ereignis]	Objektrisiko r in [Tf/a]	Objekt-Nr.	Objektart	Schadenausmass S [CHF/Ereignis]	Objektrisiko r in [CHF/a]
196	Stall	4.17E-02	1.39E-04	Sachrisiken SZI T=300			
289	Stall	4.17E-02	1.39E-04				
292	Stall	1.67E-02	5.56E-05	196	Stall	375'000.00	1'250.00
293	Einfamilienhaus	2.00E-01	6.67E-04	289	Stall	375'000.00	1'250.00
294	Gewerbebaute	2.83E-01	9.44E-04	292	Stall	337'500.00	1'125.00
298	Stall	4.17E-02	1.39E-04	293	Einfamilienhaus	312'500.00	1'041.67
300	Lager/Garage	1.33E-02	4.44E-05	294	Gewerbebaute	625'000.00	2'083.33
301	Mehrfamilienhaus	4.00E-01	1.33E-03	298	Stall	375'000.00	1'250.00
302	Lager/Garage	1.33E-02	4.44E-05	300	Lager/Garage	46'250.00	154.17
304	Stall	1.67E-02	5.56E-05	301	Mehrfamilienhaus	500'000.00	1'666.67
306	Einfamilienhaus	2.00E-01	6.67E-04	302	Lager/Garage	46'250.00	154.17
307	Einfamilienhaus	2.00E-01	6.67E-04	304	Stall	337'500.00	1'125.00
308	Einfamilienhaus	2.00E-01	6.67E-04	306	Einfamilienhaus	312'500.00	1'041.67
309	Hotel/Restaurant	1.17E+00	3.89E-03	307	Einfamilienhaus	312'500.00	1'041.67
310	Einfamilienhaus	2.00E-01	6.67E-04	308	Einfamilienhaus	312'500.00	1'041.67
312	Einfamilienhaus	2.00E-01	6.67E-04	309	Hotel/Restaurant	625'000.00	2'083.33
Kollektivrisiko R (Personenrisiken) in [Tf/a]			1.08E-02	310	Einfamilienhaus	312'500.00	1'041.67
				312	Einfamilienhaus	312'500.00	1'041.67
Kollektivrisiko R (Sachrisiken) in [CHF/a]							18'391.67

Abbildung 31: Risikomatrizen für Szenario I, getrennt nach Personen- und Sachrisiken.

Die Risikomatrix macht für den Bearbeiter eine objektbezogene Auswertung der Risikoberechnung möglich und unterstützt die Planung neuer und die Evaluation vorhandener Schutzmaßnahmen. Darüber hinaus können bestehende Sicherheitsdefizite leichter aufgezeigt werden.

Das Kollektivrisiko für Personenrisiken ist in Anzahl der Todesfälle/Jahr [Tf/a] angegeben (vgl. Abb. 31). Es wird zur Verknüpfung von kollektiven Personen- und Sachrisiken zum jährlichen Kollektivrisiko des Systems monetarisiert (vgl. Tab. 7). Der hier gewählte Bewertungsansatz stützt sich auf das Konzept der Risikokategorien (vgl. Kap. 4.4.6). Die Grenzkosten pro gerettetes Menschenleben sind für Kategorie 3 („niedrige Selbstverantwortung“) mit 5 Mio. CHF pro gerettetes Menschenleben zu bemessen.

⁷¹ Die Risikomatrizen aller Szenarien sind als Datenblätter in der Excel-Applikation RIKO (SLF 2005) für Andermatt (vgl. beigelegte CD-ROM) zu finden.

Tabelle 7: Jährliches Kollektivrisiko des Systems (R) als Summe der monetarisierten Personen- und Sachrisiken der Szenarien I bis V.

Waldzustandsszenario	Ausgangsrisiko Personen [Tf/a]	Personenrisiko (monetarisiert) [CHF/a]	Sachrisiko [CHF/a]	Jährliches Kollektivrisiko R [CHF/a]
Szenario I: „mit Wald – mit Lawinenverbauung“	0,011	53.916,67	18.391,67	72.308,33
Szenario II: „mit Wald - ohne Lawinenverbauung“	0,086	429.733,43	70.133,33	499.866,76
Szenario III: „kleiner Wind- wurf – ohne Lawinenverbauung“	0,095	477.465,93	82.541,67	560.007,60
Szenario IV: „großer Wind- wurf – ohne Lawinenverbauung“	0,238	1.189.820,29	178.316,67	1.368.136,96
Szenario V: „ohne Wald – ohne Lawinenverbauung“	0,543	2.714.015,65	328.829,17	3.042.844,82

Das jährliche Kollektivrisiko R gibt Auskunft über das von der Gemeinde Andermatt zu tragende Risiko, welches von einem 300jährigen Lawinenereignis ausgeht. Ohne Bannwald und Lawinenverbauungen (Szenario V) würde das jährliche Kollektivrisiko rund 3 Mio. CHF betragen (vgl. Tab. 7). Im Vergleich dazu ist bei der heutigen Ausgangssituation, charakterisiert durch Szenario I, das Restrisiko mit rund 72.000,00 CHF/a sehr gering. Würde der Bannwald den alleinigen Schutz der Gemeinde darstellen (Szenario II), wäre mit einem jährlichen Kollektivrisiko von rund 500.000,00 CHF zu rechnen. Eine durch ein Sturmereignis hervorgerufene Entwaldung im oberen Hangbereich (Szenario IV) hätte mindestens eine Verdoppelung dieses Wertes zur Folge. Dagegen hätte eine Ausdehnung der waldfreien Fläche am Unterhang (Szenario III) wenig Einfluss auf eine Änderung des jährlichen Kollektivrisikos (vgl. Tab. 7).

5.3 Die Sensitivitätsanalyse: Auswirkung der Reibungsparameter auf die Lawinensimulation mit VS-2D

Mittels der Variation der Reibungsparameter μ und ξ für bewaldete Hangzonen bei der Lawinenberechnung mit VS-2D (vgl. Kap. 4.4.3.4, Tab. 4) sollte die Sensitivität des Simulationsmodells getestet werden. Für alle Simulationen wurde ein identisches Input-Coverage zur Charakterisierung der Waldfläche verwendet; gleich dem in Szenario II „mit Wald – ohne Lawinenverbauungen“.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen sind Intensitätskarten für die Parameterkombinationen 1 bis 8. Die berechneten Auslaufdistancen der Kombinationen 1 bis 8 (vgl. Abb. 32 bis 34) zeigen keine bedeutenden Veränderungen im Vergleich zur Simulation mit der empfohlenen Richtkombination für Wald, $\mu = 0,02$ und $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ (vgl. Abb. 32a).



Abbildung 32: Ausschnitte aus den Intensitätskarten für $T = 300$: a) Szenario II, b) Kombination 1 und c) Kombination 2; mit Angabe der für „Wald“ variierten Reibungsparameter μ und ξ .



Abbildung 33: Ausschnitte aus den Intensitätskarten für $T = 300$: a) Kombination 3, b) Kombination 4 und c) Kombination 5; mit Angabe der für „Wald“ variierten Reibungsparameter μ und ξ .



Abbildung 34: Ausschnitte aus den Intensitätskarten für $T = 300$: a) Kombination 6, b) Kombination 7 und c) Kombination 8; mit Angabe der für „Wald“ variierten Reibungsparameter μ und ξ .

Anhand der Intensitätskarten sind die Unterschiede zwischen den gewählten μ - ξ -Parameterkombinationen nur undeutlich zu erkennen. Deshalb wird eine zusätzliche Darstellung der Lawinenflächenänderung in Form eines Säulendiagramms gewählt (vgl. Abb. 35). Abgebildet ist die prozentuale Lawinenflächenänderung der μ - ξ -Kombinationen 1 bis 8 im Verhältnis zur Lawinenfläche des Szenario II.

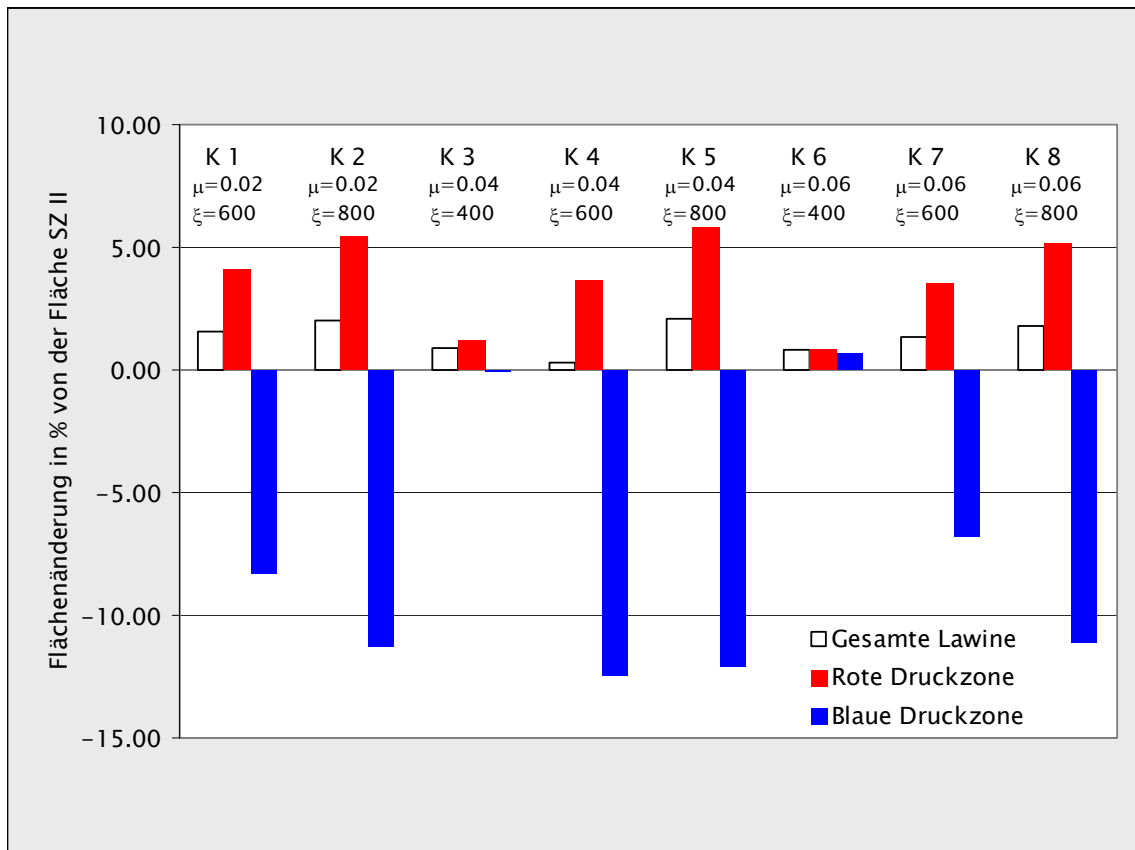


Abbildung 35: Gegenüberstellung der prozentualen Flächenänderung der μ - ξ -Kombinationen (K) 1 bis 8 im Verhältnis zur Lawinenfläche des Szenario II (Fläche = 0).

Ein geringer Anstieg der gesamten Lawinenfläche ist für alle Reibungsparameterkombinationen (max. 2,12 % für K 5) festzustellen. Die Fläche der roten Druckzone vergrößert sich um bis zu 5,8 % (K 5); die der blauen Druckzone wird kleiner (max. -12,5 % für K 4). Eine Ausnahme bildet allein die Kombination 6 (vgl. Abb. 35). Die prozentualen Flächenänderungen lassen vermuten, dass die Veränderung von ξ in den hier gewählten Stufen einen größeren Einfluss auf das Simulationsergebnis haben als die des Reibungskoeffizienten μ .

Der Einfluss der Reibungsparameter μ und ξ auf das Simulationsergebnis wird durch die Berechnung der sog. Randmittelwerte (vgl. Kleppmann 2003) der prozentualen Flä-

chenänderung aufgezeigt. Diese Methode ist ein praktikabler Ansatz zur Demonstration des Einflusses mehrstufiger Faktoren auf eine Zielgröße (Kleppmann 2003). Die Zielgröße stellt in diesem Fall die Flächenänderung in [%] der Lawinenfläche des Szenario II („mit Wald – ohne Lawinenverbauungen“) dar. Die Faktoren μ und ξ wurden in je drei Stufen variiert⁷². Daraus ergeben sich 9 mögliche Parameter-Kombinationen; Kombination 1 bis 8 sowie die Kombination von Szenario II (Flächenänderung = 0).

Zur Berechnung der Randmittelwerte wurde der arithmetische Mittelwert der prozentualen Flächenänderung einer Faktorstufenkombination von μ oder ξ bestimmt. Die Randmittelwerte von μ und ξ wurden getrennt für die prozentualen Flächenänderungen der gesamten Lawinenfläche, der roten und der blauen Druckzone berechnet.

In Tabelle 8 ist das beschriebene Vorgehen für den Reibungskoeffizienten μ dargestellt.

Tabelle 8: Berechnung der Randmittelwerte für den Reibungsparameter μ der Flächenänderung in [%] der Lawinenfläche des Szenario II durch Berechnung des arithmetischen Mittelwertes der prozentualen Flächenänderung der jeweiligen Kombinationen (K) in den Faktorstufen 1 bis 3.

Fakto- renstufe	Kombi- nation	μ	ξ	Flächenänderung in [%]		
				Gesamt	Rot	Blau
Stufe 1	SZ II	0,2	400	0,00	0,00	0,00
	K 1	0,2	600	1,54	4,11	-8,28
	K 2	0,2	800	2,00	5,47	-11,25
Randmittelwert μ Stufe 1				1,18	3,19	-6,51
Stufe 2	K 3	0,4	400	0,92	1,17	-0,04
	K 4	0,4	600	0,31	3,65	-12,46
	K 5	0,4	800	2,12	5,85	-12,10
Randmittelwert μ Stufe 2				1,11	3,56	-8,20
Stufe 3	K 6	0,6	400	0,81	0,84	0,67
	K 7	0,6	600	1,37	3,51	-6,80
	K 8	0,6	800	1,79	5,17	-11,11
Randmittelwert μ Stufe 3				1,32	3,18	-5,75

⁷² Vgl. Tab. 4

Zur Berechnung der Randmittelwerte der prozentualen Flächenänderung für die drei Faktorstufen von ξ (vgl. Tab. 9) wurde analog dem in Tabelle 8 demonstrierten Verfahren vorgegangen.

Tabelle 9: Randmittelwerte der Faktorstufen 1 bis 3 des Reibungsparameters ξ der Flächenänderung in [%] der Lawinenfläche des Szenario II.

Faktorenstufe	ξ	μ	Randmittelwerte ξ der Flächenänderung in [%]		
			Gesamt	Rot	Blau
Stufe 1	400	0,2; 0,4; 0,6	0,00	0,00	0,00
Stufe 2	600	0,2; 0,4; 0,6	0,92	1,17	-0,04
Stufe 3	800	0,2; 0,4; 0,6	0,81	0,84	0,67

Um den Einfluss der variierten Faktoren auf die Zielgröße veranschaulichen zu können, werden die berechneten Randmittelwerte für μ und ξ in einem Diagramm abgebildet. Der grafische Vergleich der Randmittelwerte lässt auf einen größeren Einfluss von ξ in den gewählten μ - ξ -Kombinationen auf die Auslaufdistanz einer Lawine schließen (vgl. Abb. 36).

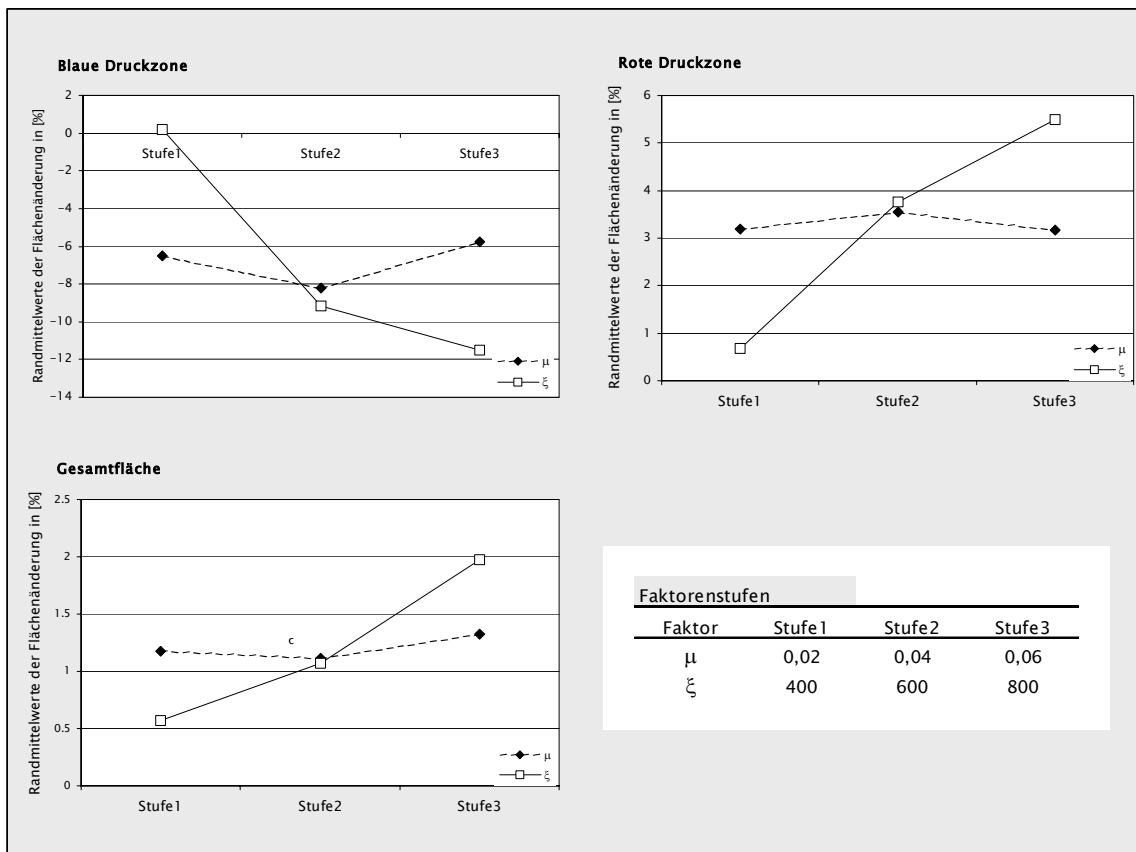


Abbildung 36: Grafische Darstellung der Randmittelwerte der prozentualen Flächenänderung in Abhängigkeit von den Faktorstufen der Reibungsparameter μ bzw. ξ .

5.4 Der Einfluss von Waldveränderungen auf das Risiko und die Schlussfolgerungen

Die Schutzwirkung des Waldes ändert sich deutlich mit den angenommenen Waldzuständen. Abbildung 37 stellt die Szenarien anhand des kollektiven Personenrisikos, des kollektiven Sachrisikos und des jährlichen Kollektivrisikos gegenüber.

Beim Vergleich des jährlichen Kollektivrisikos werden neben der Anzahl betroffener Gebäude (vgl. Abb. 30) auch ihr Wert in Abhängigkeit von der Objektart und die monetarisierten potentiellen Todesfälle einbezogen.

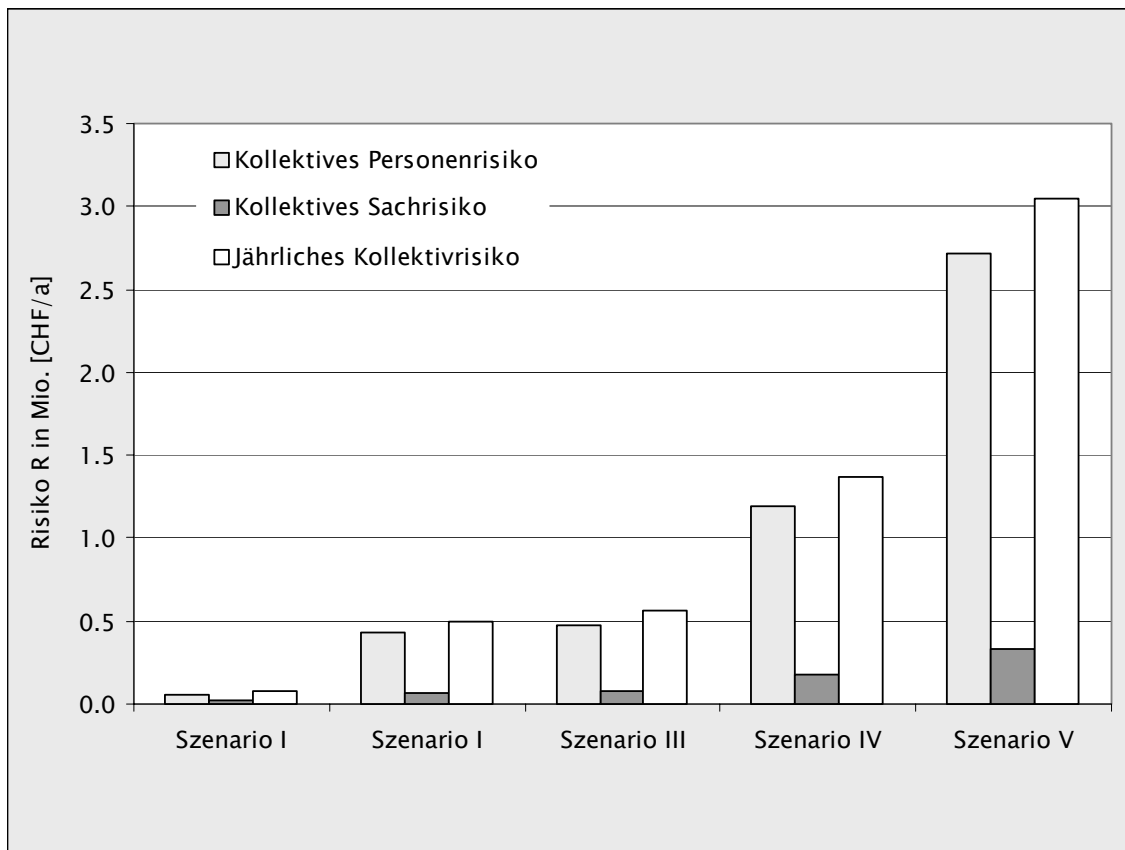


Abbildung 37: Kollektives Personenrisiko, kollektives Sachrisiko und jährliches kollektives Gesamtrisiko in [CHF/a] in Abhängigkeit vom Waldzustand.

Das geringste Restrisiko für die Gemeinde Andermatt besteht mit rund 72.000,00 CHF/a beim aktuellen Waldzustand und den existenten bautechnischen Lawenschutzmaßnahmen (Szenario I). Im Gegensatz dazu beträgt das Risiko bei einer Ausgangssituation ohne Wald (Szenario V) rund 3 Mio. CHF/a. Wird nur die Schutzleistung des Waldes ohne die Wirkung zusätzlicher Schutzmaßnahmen berücksichtigt, ist das jährliche Kollektivrisiko mit rund 500.000,00 CHF/a im Vergleich zu dem Ergebnis unter Szenario V („ohne Wald – ohne Lawinenverbauung“) sehr niedrig.

Die jährlichen Kollektivrisiken unter Szenario II (ca. 500.000,00 CHF/a) und Szenario III (ca. 560.000,00 CHF/a) unterscheiden sich nur wenig. Demgegenüber ist das Risiko unter Szenario IV mit rund 1,4 Mio. CHF/a mehr als doppelt so hoch wie das für Szenario III. Die Lawinengefahr für die Gemeinde Andermatt ist deutlich abhängig von der Lage der waldfreien Zone.

Der große Anteil der Personenrisiken am Gesamtrisiko (vgl. Abb. 37) ist neben der Anzahl potentiell gefährdeter Personen vor allem vom Bewertungsansatz abhängig (vgl. Kap. 4.4.6).

Aus den präsentierten Ergebnissen können folgende Überlegungen bzw. Fragestellungen abgeleitet werden:

- Welche Schlussfolgerungen für das Schutzwaldmanagement, unter dem Aspekt eines effizienten Mitteleinsatzes für die Waldpflege, können aus der Herauskristallisierung einer lageabhängigen risikomindernden Wirkung des Schutzwaldes gezogen werden?
- Könnten Entscheidungen über Investitionen in die Waldpflege mit Unterstützung von Risikoanalysen getroffen werden?
- Könnte die Gegenüberstellung des Risikos unter Berücksichtigung verschiedener Waldzustände eine Möglichkeit für die monetäre Bewertung der Schutzleistung des Waldes sein?

Diese und weitere Fragen werden in der anschließenden Diskussion aufgegriffen und erörtert.

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Ergebnisse

6.1.1 Die Ergebnisse der Risikoanalyse im Vergleich

Die Gegenüberstellung der ermittelten Risiken verdeutlicht die Leistung und die Bedeutung des Bannwaldes für die Gemeinde Andermatt. Ohne Schutzwald und bautechnischen Lawinenschutz würde das jährliche Kollektivrisiko für ein extremes Lawinereignis ($T = 300$) rund 3 Mio. CHF betragen (Szenario V). Durch die alleinige Wirkung des Schutzwaldes unter Szenario II verringert sich das Risiko auf rund 500.000,00 CHF/a. Dies entspricht einer Differenz von rund 2,5 Mio. CHF/a oder rund 183.900,00 CHF/a/ha Schutzwald bei einer angenommenen schutzwirksamen Waldfläche von 13,83 ha. Wird die gesamte Waldfläche (24,03 ha) berücksichtigt, ergibt sich eine Schutzleistung von rund 105.800,00 CHF/a/ha Wald.

Durch zusätzliche bautechnische Lawinenschutzmaßnahmen hat die Gemeinde Andermatt derzeit ein Risiko von rund 72.000,00 CHF/a zu tragen. Das Risiko unter diesem Szenario (Szenario I) wäre ohne die Berücksichtigung der vorhandenen Windwurffläche im Kernbestand des Bannwaldes als potentielles Lawinenanrissgebiet annähernd Null (vgl. Kap. 5.2.1). Diese Fläche wurde 1995 aufgeforstet (vgl. Kap. 3.4) und wird die zur optimalen Erfüllung der Schutzleistung erforderliche Bestandesoberhöhe (h_{dom}) von 2 m in absehbarer Zeit erreicht haben.

Es konnten nur wenige weitere Studien über die Berücksichtigung der Lawinenschutzleistung des Gebirgswaldes in Risikoanalysen zur Gegenüberstellung der ermittelten Ergebnisse herangezogen werden. Oft sind Rahmenbedingungen, Input-Faktoren und Methoden so verschieden, dass sie keinen objektiven Vergleich zulassen. Dennoch wird im Folgenden versucht, ähnliche Forschungsprojekte und Anwendungsbeispiele zum Vergleich heranzuziehen und somit auf die Stärken und Schwächen risikobasierter Bewertungsansätze aufmerksam zu machen.

Wilhelm (1997) hat verschiedene Projekte aus dem Lawinenschutz in Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit im Siedlungsschutz bewertet. Ein Projekt repräsentiert die vollumfängliche Zerstörung des Bannwaldes oberhalb von Andermatt durch ein Sturmereignis.

Anhand der Risikodifferenz der „Ist-Situation“ und des Szenarios „Zerstörung des Bannwaldes“ ermittelte er eine Verringerung des Risikos bezogen auf die Schutzwaldfläche von 420.000,00 CHF/a/ha Wald. Dieses Ergebnis ist mehr als doppelt so hoch wie der Wert von 183.900,00 CHF/a/ha schutzwirksamer Wald, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit errechnet wurde. Wilhelm (1997) geht von einer Schutzwaldfläche von 6 ha aus und bezieht neben Extremereignissen ($T = 300$ Jahre) auch Lawineneignisse mit geringeren Eintretenshäufigkeiten ($T = 30$ Jahre; $T = 5$ Jahre) in seine Berechnungen ein. Das Lawinenausmaß bestimmte er entsprechend den „Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten“ (BFF/EISLF 1984) ohne die Unterstützung eines computergestützten Simulationsmodells. In der vorliegenden Arbeit wurden die Auslaufdistancen der Lawinen mit dem 2-dimensionalen numerischen Simulationsmodell VS-2D (Gruber 1998) berechnet. Die Anwendung dieses Modells ermöglicht eine einfache Variation der Waldfläche und die Bestimmung des Risikos unter verschiedenen Waldzustandsszenarien. Die Konstanzhaltung sämtlicher weiterer Inputparameter erlaubt eine objektive Beurteilung der Lawinengefahr in Abhängigkeit vom Waldzustand.

Das von Wilhelm (1997) ermittelte Schadenausmaß (A_S) für die Gemeinde Andermatt berücksichtigt neben Sachschäden und Todesfallrisiken von Personen in Gebäuden, auch verletzte Personen, Todesfälle von Großvieh⁷³, Personen im freien Gelände, Flurschäden, Schäden an Infrastruktur, Fahrhabe⁷⁴ und volkswirtschaftliche Schäden. Auf eine derart detaillierte Erhebung des Schadenpotentials wurde in der vorliegenden Arbeit verzichtet, um den Aufwand für die Bestimmung des Schadenausmaßes gering sowie Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Studie möglichst groß zu halten.

Bei der Einführung in das Risikokzept wurde ein Forschungsprojekt, welches verschiedene Waldszenarien in Risikoanalysen in der Landschaft Davos berücksichtigt, vorgestellt (Grêt-Regamey 2003; Grêt-Regamey et al. 2005; vgl. Kap. 2.2.4). Die Methoden zur Bestimmung des Risikos infolge von Lawinen sind denen in der vorliegenden Arbeit verwendeten identisch; allerdings wurde eine Wiederkehrdauer von $T = 30$ Jahre angenommen. Anhand der Untersuchung von Grêt-Regamey et al. (2005) ist die Abhängigkeit der Schutzleistung des Waldes von der Höhe des Schadenpotentials sehr

⁷³ Pferde, Kühe, Schafe, Ziegen und Schweine, aufgerechnet zu Großvieheinheiten (Wilhelm 1997).

⁷⁴ Mobilien wie Fahrzeuge, Wohnwagen usw.

gut zu erkennen. Das Risiko wurde für die Szenarien „mit Wald“ und „ohne Wald“ für zwei Untersuchungsgebiete mit unterschiedlichem Schadenpotential berechnet. Für das Gebiet „Davos-Platz“ mit einem außerordentlich hohen Schadenpotential ergab sich eine Differenz zwischen beiden Szenarien bezogen auf die Fläche des Schutzwaldes von 9.937,00 CHF/a/ha. Für das Untersuchungsgebiet „Dischmatal“, gekennzeichnet durch ein geringes Schadenpotential, beträgt diese Differenz 121,00 CHF/a/ha (vgl. Bebi et al. 2004). Die Verringerung des Risikos durch den Bannwald von Andermatt ist für ein 300jähriges Lawinenereignis fast doppelt so hoch wie die in „Davos-Platz“. Diese auffällige Differenz lässt sich auf die unterschiedlichen Annahmen für die Betrachtungszeiträume zurückführen. Ein 300jähriges Lawinenereignis ist seltener, hat aber in Abhängigkeit von den Geländeeigenschaften und der Anrissmächtigkeit eine bedeutend größere Auslaufstrecke als ein 30jähriges Ereignis (Gruber et al. 1999).

Die Wahl einer Wiederkehrdauer von $T = 300$ Jahre ist mit dem dargestellten Ausmaß einer solchen Katastrophe und dessen Konsequenzen für die Einwohner der Gemeinde zu begründen. Ein 300jähriges Lawinenereignis repräsentiert die total betroffene Siedlungsfläche. Diese zu kennen ist entscheidend für politische Entscheidungsprozesse in Maßnahmen- und Raumnutzungsplanung (Fuchs & McAlpin 2005).

Einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe des gesamten Kollektivrisikos hat der gewählte Bewertungsansatz zur Monetarisierung der Personenrisiken. Im Fallbeispiel Andermatt wurde ein Bewertungsansatz von 5 Mio. CHF pro gerettetes Menschenleben gewählt (vgl. Kap. 4.4.6). Sind wie unter Szenario V ca. 163 Personen von einem solchen Extremereignis betroffen, steigt das gesamte Kollektivrisiko im Vergleich zu einem Szenario mit geringen Personenschäden (z.B. Szenario I: ca. 3 Personen/Ereignis) stark an. Der gewählte Wert orientiert sich am Vorschlag der PLANAT (2005) zur Anwendung des Kategorienansatzes zur Bewertung von Todesfällen in Risikoanalysen (vgl. Kap. 4.4.6). Grêt-Regamey et al. (2005) wählten einen Bewertungsansatz von 1,5 Mio CHF pro betroffener Person (vgl. Bebi et al. 2004).

Durch die Variation der Waldfläche unter den Szenarien III und IV konnte eine deutliche Abhängigkeit des Risikos von den flächenspezifischen Gegebenheiten nachgewiesen werden. Gächter & Bart (2002) zogen die gleichen Schlussfolgerungen aus einer risikobasierten Untersuchung des Fallbeispiels „Diesbach“ für den Naturgefahrenprozess „Hochwasser“. Die Durchführung einer Risikoanalyse erlaubte den Vergleich von erarbeiteten Maßnahmen zur Verringerung des Risikos. *„Das Vorgehen erzwingt die*

genaue Betrachtung aller Folgen (erwünschter und unerwünschter), weil sie sich auf die Risiken in der Fläche auswirken“ (Gächter & Bart 2002). Werden Risiken als Maßeinheit gewählt, sind die genauen Flächenwirkungen von Maßnahmen von größtem Interesse; das Schadenpotential ist ausschlaggebend für ihre ökonomische Rechtfertigung (Gächter & Bart 2002).

In Kapitel 6.2.1 werden die Stärken und Schwächen der Risikoanalyse als methodischer Ansatz zur Ermittlung von Naturrisiken zusammengefasst und diskutiert.

6.1.2 Die Sensitivitätsanalyse: Auswirkungen der Reibungsparameter μ und ξ auf die Lawinesimulation mit VS-2D

Im Rahmen der Risikoanalyse wurde die Wirkungsanalyse mit Unterstützung des 2-dimensionalen numerischen Lawinensimulationsmodells VS-2D durchgeführt. Mittels Variation der Reibungsparameter μ und ξ für bewaldete Hangzonen, wurden die Auswirkungen einer solchen Veränderung auf das Ergebnis der Lawinensimulation analysiert.

Die Resultate zeigen keine bedeutenden Unterschiede zwischen den Parameterkombinationen; eine geringe Vergrößerung der Auslaufdistanz ist für alle Kombinationen zu beobachten (vgl. Kap. 5.3). Dies ist mit der Herabsetzung der Reibung infolge einer Erhöhung des Faktors der turbulenten Reibung ξ zu begründen. Der daraus resultierende Energieverlust in Fließrichtung beeinflusst die Reichweite einer Lawine maßgeblich (Gruber 1998).

Barbolini et al. (2000) beobachteten einen deutlich größeren Einfluss der Topographie eines Untersuchungsgebietes auf das Ergebnis einer Lawinensimulation. Die Evaluation verschiedener Simulationsmodelle, unter anderem auch des hier verwendeten VS-2D Modells, in drei Testgebieten ließ diese Schlussfolgerung zu. *„The sensitivity analysis for the runout distance results are heavily influenced by the site topography, [...]“*. (Barbolini et al. 2000). Auffällig war der Einfluss des Faktors der trockenen Reibung μ auf die Simulationsergebnisse aller Modelle. Aus eine Variation von μ um 15 % resultierte eine bis zu 10 %ige Variation in der Auslaufzone (Barbolini et al. 2000). In der vorliegenden Arbeit konnte dagegen anhand der Sensitivitätsanalyse ein größerer Einfluss von ξ bei den gewählten Parameterkombinationen beobachtet werden (vgl. Abb. 36; Kap. 5.3).

In Tabelle 3 (Kap. 4.4.3.3) sind die empfohlenen Richtkombinationen für verschiedene Geländeeigenschaften zusammengestellt; Wald wird normalerweise mit $\mu = 0,02$ und $\xi = 400 \text{ m/s}^2$ in der Simulation berücksichtigt. Die anhand dieser Fallstudie getesteten Parameterkombinationen (vgl. Tab. 4; Kap. 4.4.3.4) eignen sich aufgrund der geringen Unterschiede alle für bewaldete Hangzonen. Empfehlungen für Parameterkombinationen zur Abbildung verschiedener Waldstrukturen können aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse nicht abgeleitet werden. Dazu bedarf es einer umfassenderen Untersuchung und dem Vergleich mit realen Lawinenereignissen zur Kalibrierung der Inputparameter.

6.2 Diskussion der Methoden

6.2.1 Die Risikoanalyse als methodischer Ansatz zur Bestimmung des Risikos

Das Risikokonzept gilt heute als einzig verfügbarer methodischer Ansatz für den zukünftigen Umgang mit Naturgefahren im Rahmen eines integralen Risikomanagements (PLANAT 2005). Die Risikoanalyse als Bestandteil dieses Konzepts zur Ermittlung des Risikos infolge von Naturgefahren birgt Stärken und Schwächen die es aufzudecken gilt, um und einen bewussten Umgang mit diesen bei der Interpretation der Ergebnisse zu fördern. Im Folgenden werden Stärken und Schwächen der Methode benannt und Schlussfolgerungen für zukünftigen Handlungsbedarf zur Verbesserung gezogen.

Stärken:

- Die Risikoanalyse erlaubt Entstehung und Ablauf von Naturgefahrenprozessen sowie ihre Auswirkungen auf Wertobjekte abzubilden. Die differenzierten Resultate liefern wertvolle Hinweise für den Umgang mit Risiken (Hollenstein 1997).
- Durch Risikoanalysen wird eine Maßeinheit für die Bewertung und Rechtfertigung von Maßnahmen geschaffen (Gächter & Bart 2002).
- Durch ein logisch strukturiertes Vorgehen werden Wissenslücken erkannt, deren Bedeutung beurteilt und gezielte Anstrengungen zur Verbesserung ermöglicht (PLANAT 2005).
- Die Risikoanalyse ist ein hilfreiches Instrument zur Unterstützung politischer Entscheidungen (Bohnenblust & Troxler 1987).

Schwächen:

- Die quantitative Risikoanalyse wird in verschiedenen Arbeitsschritten mit unscharfen Größen (Variablen) durchgeführt. Diese Unschärfen wirken sich auf das Resultat des folgenden Arbeitsschrittes und potenziert auf das Risiko als Endergebnis aus (Borter 1999a; Faber & Stewart 2003).
- Das errechnete Risiko entspricht der realen Situation nur bedingt. Als Eingangsgrößen fungieren oft Schätz- oder Erfahrungswerte (Borter 1999a).
- Es entsteht ein großer Aufwand durch die Beschaffung der Datengrundlagen. Eine gut strukturierte Datenbasis ist notwendig, um das Risiko so objektiv wie möglich zu ermitteln (Heinimann et al. 1998).

Schlussfolgerungen:

- Zur Anwendung der Risikoanalyse bedarf es einer methodischen Vorgabe um Ungenauigkeiten, zu große Abweichungen im Vorgehen und die Gefahr von Manipulationen zu verringern.
- Der große Aufwand bei der Datenbeschaffung und –aufbereitung ist ein Kernproblem der Risikoanalyse im Naturgefahrenbereich. Insbesondere bei der Anwendung von Geographischen Informationssystemen (GIS) ist der Zeitaufwand zum Digitalisieren der Daten sehr hoch. Durch das Angebot bereits digitalisierter Nutzungspläne und Gefahrenkarten wird dieses Problem in absehbarer Zeit gelöst.
- Datengrundlagen müssen verbessert und systematisiert werden, um ein einheitliches Vorgehen zu gewährleisten. Insbesondere die Evaluation bereits durchgeführter Risikoanalysen ist hilfreich zur Verbesserung der Instrumente und Methoden; die praktische Anwendung sollte gefördert werden.
- Unsicherheiten auf allen Stufen der Risikoanalyse, hervorgerufen durch die Arbeit mit unscharfen Größen und den Einbezug von Modellen, müssen verringert oder so dargelegt werden, dass Entscheidungsträger diese in ihren Überlegungen berücksichtigen können.

Es existieren bereits Ansätze zur Standardisierung der Risikoanalyse im Naturgefahrenbereich (Wilhelm 1997; Borter 1999a). Die PLANAT (2005) hat sich zum Ziel gesetzt eine einheitliche Methode im Rahmen des Risikokonzepts zu definieren, die vorhande-

nen Instrumente anzupassen und zu ergänzen sowie bestehende Wissenslücken zu schließen.

Ein Ansatz welcher den bewussten Umgang mit Unsicherheiten im Naturgefahrenmanagement fördert und diese offen darlegt sind sog. Bayes'sche Netze (Straub 2003). Bayes'sche Netze (BN) dienen der Repräsentation von unsicherem Wissen und erlauben durch ihre spezielle Form der Formulierung wahrnehmungstheoretischer Modelle, Rückschlüsse zu ziehen. Grêt-Regamey & Straub (2006) kombinieren ein BN mit einem GIS als Informationsinstrument im Lawinenrisikomanagement. Anhand einer Fallstudie wurde dieser Ansatz erstmalig für den Naturgefahrenprozess Lawine zur Risikoüberwachung erarbeitet. Die Kombination von BN und GIS erlaubt eine detaillierte Evaluation der Risiken und deckt damit verbundene Unsicherheiten auf (Grêt-Regamey & Straub 2006).

Bei der Bearbeitung der Fallstudie „Der Bannwald von Andermatt“ erwies sich die Risikoanalyse nach den Vorgaben von Borter (1999 a & b) und Wilhelm (1997) als einfach zu handhabende, gut nachvollziehbare Methode zur Ermittlung des Risikos für den Naturgefahrenprozess Lawine. Die Gliederung in die verschiedenen Arbeitsschritte⁷⁵ gewährleistete ein strukturiertes Vorgehen und half Ungenauigkeiten und Probleme schnell aufzudecken. Allerdings wird anhand der Gegenüberstellung mit anderen Forschungsprojekten und Praxisbeispielen (vgl. Kap. 6.1) deutlich, dass unterschiedliche Auffassungen zum Vorgehen und uneinheitliche Annahmen zur Größe wichtiger Inputparametern keinen objektiven Vergleich zulassen.

6.2.2 Die Analyse der Waldstrukturen und die Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit

Die visuelle Erfassung der Waldstrukturen anhand des digitalen Orthophotos erwies sich als einfach zu handhabende und schnell durchzuführende Methode zur räumlichen Strukturkartierung von Gebirgswäldern (vgl. Kap. 4.2). Die Vorgaben des verwendeten Luftbildschlüssels⁷⁶ waren verständlich und nachvollziehbar. Die Merkmale „Schlussgrad“ und „Stufigkeit“ konnten im Luftbild gut erfasst und abgegrenzt werden. Die

⁷⁵ Gefahrenanalyse, Expositionsanalyse, Folgenanalyse und Risikobestimmung und -darstellung (vgl. Kap. 4.4).

⁷⁶ Schematischer Luftbildschlüssel für die Waldstrukturkartierung in subalpinen fichtendominierten Wäldern (Bebi 2000).

Oberhöhe h_{dom} wurde anhand der Kronenbreiten und der Schlagschatten geschätzt und bedurfte teilweise der Korrektur mit den Angaben der Bestandskarte.

Die Kartierung von Waldstrukturen mit Hilfe der Luftbildinterpretation hat im Gebirgswald große Vorteile gegenüber terrestrischen Kartierungsverfahren. Durch gebirgsspezifische Geländeeigenschaften wird die Begehbarkeit erschwert; häufig sind Untersuchungsgebiete nur unter großen Anstrengungen oder gar nicht zu erreichen.

Besonders zur Erfassung typischer kleinflächiger Mosaikstrukturen (Dorren et al. 2004; Grassi et al. 2003), aufgelöster Waldstrukturen nahe der Baumgrenze oder der häufig anzutreffenden Rottenstrukturen⁷⁷ eignet sich die Auswertung von Luftbildern explizit (Bebi et al. 2001). Bei großflächigen Untersuchungsgebieten wird der Zeitaufwand für eine visuelle Erfassung der Waldstrukturen sehr hoch; eine Lösung sind automatische Verfahren (z.B. Bebi 2000).

Das mittels der Waldstrukturkartierung und Digitalisierung entstandene Shapefile erwies sich als sehr hilfreiche Grundlage für Überlegungen zu den Waldzustandsszenarien (vgl. Kap. 4.5.1) und für die Erstellung von Input-GRIDs als Grundlage der Lawinensimulation mit VS-2D (vgl. Kap. 4.4.2 und 4.4.3).

Die Modellierung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit im Wald in Abhängigkeit von der Waldstruktur und der Topographie ergab ein plausibles Resultat (vgl. Kap. 5.1). Das ausgeschiedene Anrissgebiet im Kernbestand des Bannwaldes repräsentiert eine aufgeförmte Windwurffläche. Die gepflanzten Fichten haben eine zur Erfüllung der Lawinenschutzfunktion notwendige Oberhöhe h_{dom} von 2 m noch nicht erreicht (vgl. Kap. 3.5). Eine ausführliche Evaluation und Diskussion des logistischen Modells von Pfister (1997) ist in Bebi (2000) und Lardelli (2003) zu finden.

6.2.3 Beurteilung des 2-dimensionalen numerischen Lawinensimulationsmodells VS-2D

Die lawinendynamischen Berechnungen zur Erstellung der Intensitätskarten wurden mit dem 2-dimensionalen Lawinensimulationsmodell VS-2D (Gruber 1998) durchgeführt.

Der numerischen Simulation liegt das analytische Voellmy-Salm Modell zugrunde (Salm et al. 1990; vgl. Kap. 4.4.3.1), welches zur Lawinengefahrenkartierung in der

⁷⁷ Typische unregelmäßige, „klumpige“ Anordnung der Bäume im subalpinen Wald (Ott et al. 1997).

Schweiz verwendet wird (Gruber & Margreth 2001). Eine sehr ausführliche Beurteilung und Begründung für die Wahl des Voellmy-Salm Modells im numerischen Simulationsmodell VS-2D ist in Gruber (1998) zu finden.

Im Folgenden wird auf Stärken und Schwächen des VS-2D Modells sowie des Modells zur automatischen Abgrenzung der Lawinenanrissgebiete „ASA-Prog“ hingewiesen.

Stärken:

- Implementiert in ein rechnergestütztes Gesamtsystem (AVAL-2D) mit einer benutzerfreundlichen grafischen Oberfläche, lässt sich das VS-2D Modell einfach anwenden.
- Es kann rasch eine Übersicht über mögliche Lawinenereignisse erstellt werden.
- Durch Variation der Inputparameter kann die Lawinengefahrensituation eines Untersuchungsgebietes unter verschiedenen Szenarien schnell und einfach berechnet werden.
- Besonders für Gebiete mit sporadischen Datengrundlagen zu historischen Lawinenereignissen liefert VS-2D wichtige Hinweise für den Experten zur Erstellung von Gefahrenkarten (Maggioni & Gruber 2003).
- Vor allem in gut strukturiertem Gelände ist die Genauigkeit des Modells zufriedenstellend (Gruber 1998).

Schwächen:

Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse muss auf die Grenzen des Modells hingewiesen werden. Diese basieren auf Unsicherheiten im Zusammenhang mit:

- der exakten Abgrenzung potentieller Anrissgebiete (Maggioni & Gruber 2003),
- unsicheren Aussagen zur mittleren Anrissmächtigkeit d_0 bei Extremereignissen (Gruber & Margreth 2001),
- der Variation der Reibungsparameter μ und ξ (Barbolini et al. 2000),
- der Vergrößerung der Auslaufdistanz bei simultanen Lawinenanrissen (Gruber & Margreth 2001),
- dem Mitreißen von in der Lawinensturzbahn liegendem Schnee (Sovilla & Bartelt 2005).

Schlussfolgerungen:

- Durch die Evaluation des Modells anhand weiterer Fallstudien und die fortwährende Kalibrierung der Inputparameter können diese Unsicherheiten verringert werden.

Zur Ermittlung des Risikos für die Fallstudie „Der Bannwald von Andermatt“ erwies sich das Lawinenmodellierungs-System AVAL-2D als sehr hilfreiches Instrument; die lawinendynamischen Berechnungen lieferten plausible Ergebnisse. Durch die Variation der Waldfläche war eine Darstellung denkbarer zukünftiger Entwicklungen der Lawinengefahrsituation Andermatts möglich. Dies liefert wichtige Hinweise für die Maßnahmenplanung sowie risikobasierte Managementstrategien. Die Implementierung von AVAL-2D in die Risikoanalyse als Methode zur Gefahrenabschätzung für den Naturgefahrenprozess Lawine kann demzufolge empfohlen werden.

6.3 Bedeutung der Untersuchung für das Schutzwaldmanagement

6.3.1 Zielgerichtete Waldpflege durch risikobasierte Waldpflegepläne

Aus dem Vergleich der jährlichen Kollektivrisiken R lässt sich eine deutliche Abhängigkeit des Risikos vom Waldzustand ableiten (vgl. Kap. 5.4). Explizit auffällig ist die Differenz zwischen dem unter Szenario III berechneten Risiko und dem Risiko des Szenario IV. Beide Szenarien sind durch eine Windwurffläche charakterisiert; Szenario III im Unterhang, welche unter Szenario IV in obere Hanglagen ausgeweitet wird. Existente bautechnische Lawinenschutzmaßnahmen bleiben unberücksichtigt. Das Risiko von Szenario IV ist mit rund 1,3 Mio. CHF/a mehr als doppelt so hoch wie das Risiko von Szenario III (ca. 560.000,00 CHF/a). Hingegen zeigt der Vergleich von R unter Szenario II (ca. 500.000 CHF/a; „mit Wald – ohne Lawinenverbauung“) mit dem Risiko von Szenario III keinen markanten Unterschied, obwohl unter Szenario III eine deutliche Verkleinerung der Waldfläche von Szenario II vorgenommen wurde.

Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus diesen Resultaten für die Schutzwaldbewirtschaftung und -pflege ziehen?

Innerhalb eines Schutzwaldes existieren Zonen in denen der Wald seine Schutzfunktion explizit erfüllt und zu einer Risikominderung beiträgt; und Zonen in denen Wald keinen Einfluss auf die Bildung von Lawinen hat, da es aufgrund der fehlenden Grunddisposi-

tion auch ohne Wald nicht zum Anreißen von Lawinen kommen würde. Diese Grunddisposition wird im Wesentlichen von der Hangneigung ($> 30^\circ$), der maximalen Schneedeckenhöhe und der Hanglänge (ca. 20 bis 50 m) bestimmt (vgl. Kap. 2.1.1).

Dementsprechend gibt es Bestände in einem Schutzwald, die einer gezielten und intensiven Waldpflege zur optimalen Erfüllung der Schutzfunktion bedürfen; andere Bereiche sind in Abhängigkeit von den standörtlichen Gegebenheiten weniger pflegebedürftig.

Mit Hilfe der im Rahmen einer GIS-basierten Risikoanalyse erfassten Daten und entstandenen Karten kann ein lokaler zonenspezifischer Waldpflegeplan erstellt werden. Dieser erlaubt es die Mittel für die Waldpflege quantitativ sowie qualitativ gezielt einzusetzen.

Die Erstellung eines solchen Planes kann durch die Überlagerung der digitalisierten Bestandskarte mit denen durch „ASA-Prog“ in Abhängigkeit von Hangneigung und Schneedeckenhöhe berechneten potentiellen Anrissgebieten für das Szenario V „ohne Wald“ geschehen (vgl. Abb. 38). So entsteht ein Waldpflegeplan, welcher Zonen mit risikobeeinflussender Wirkung aufzeigt.

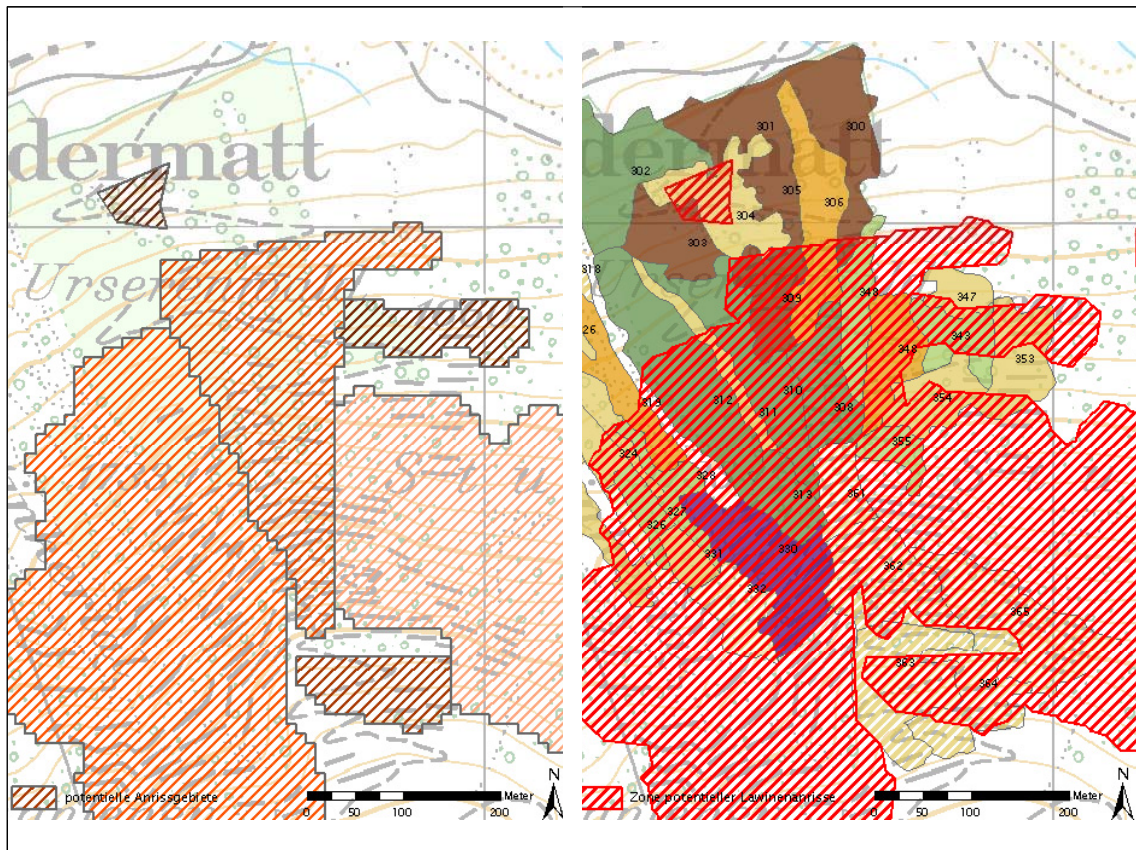


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Entwicklungsprozesses eines risikobasierten Waldpflegeplans (links: potentiellen Anrissgebieten; rechts: Überlagerung der Anrissgebietenzone mit der Bestandeskarte).

In Abbildung 39 ist ein Vorschlag für einen solchen Waldpflegeplan in Abhängigkeit von der risikomindernden Waldwirkung für den Bannwald von Andermatt dargestellt. Unterschieden wird in zwei Zonen:

- Pflegezone hoher Priorität
- Pflegezone niedriger Priorität

Eine Ausscheidung weitere Zonen in den Übergangsbereichen ist denkbar.

Waldpflegemaßnahmen⁷⁸ werden auf Pflegezonen mit hoher Priorität fokussiert. In den Zonen niedriger Priorität können ungesteuerte walddynamische Prozesse weitestgehend die weitere Bestandesentwicklung bestimmen (vgl. Kap. 2.1.3).

Ein ähnliches Vorgehen beschreiben Berger & Rey (2004) (vgl. Kap. 2.2.5), indem sie den Schutzwald in der Risikozonenkartierung berücksichtigen und sog. „Grüne Zonen“

⁷⁸ Betrachtet wurde die Waldpflege in Bezug auf die Lawinenschutzfunktion des Waldes. Weitere Waldfunktionen, insbesondere die Nutzfunktion, wurde nicht in die Überlegungen einbezogen.

für Wald mit herausragender Schutzfunktion ausscheiden. Sie unterstreichen in ihrem Beitrag die selektive Waldbehandlung und daraus resultierende kosteneffiziente Gestaltung waldbaulicher Eingriffe (Berger & Rey 2004).

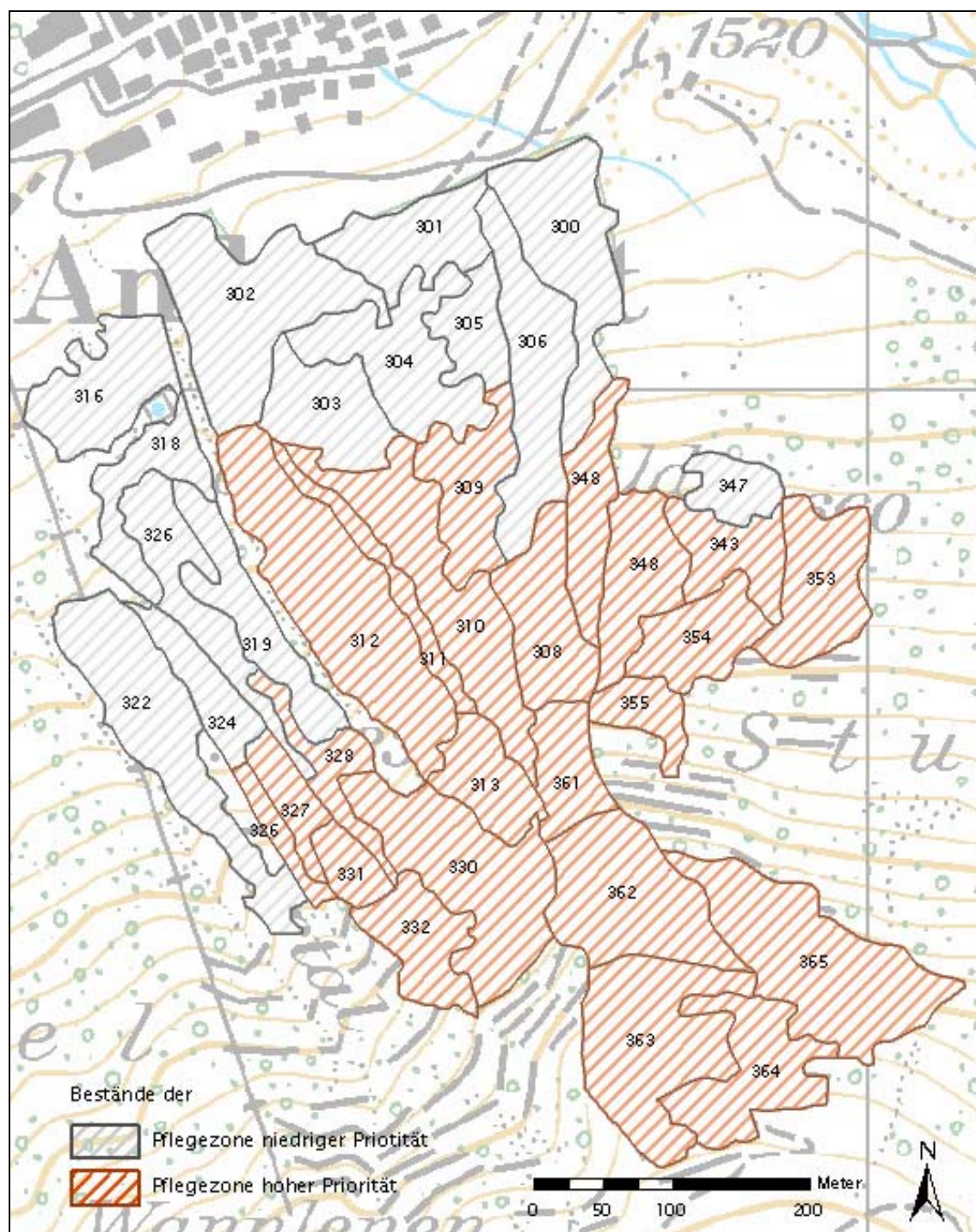


Abbildung 39: Waldpflegezonenplan in Abhängigkeit von der risikomindernden Waldwirkung für den Bannwald von Andermatt.

Motta & Haudemand (2000) entwickelten einen ähnlichen Plan für Schutzwald im Aostatal (Italien) auf Grundlage eines sog. „Silvicultural stability index“. Nach einer Analyse der Waldstrukturen im Luftbild und dem Vergleich mit der Bestandeskarte im GIS wurden jedem Bestand schutzfunktionsspezifische Attribute zugewiesen, wie z.B. Hangneigung, Oberflächenbeschaffenheit, Struktur, maximale und minimale Höhenlage. Ferner wurde jeder Bestand mit 16 „Stabilitätskriterien“ bewertet und auf Basis der gewonnenen Informationen der „Silvicultural stability index“ mit einer Skala von 1 bis 4⁷⁹ abgeleitet. Mit diesen Informationen entwickelten sie eine Karte die bestandesweise den Stabilitätsindex in Zusammenhang mit der Schutzfunktion aufzeigt und so Zonen mit höherer Waldpflegebedürftigkeit sichtbar macht.

Durch Ausscheiden von Waldpflegezonen unterschiedlicher Priorität mit Hilfe risikobasierter Ansätze wird es möglich, die Mittel für die Waldpflege qualitativ und quantitativ gezielter einzusetzen. Dies ist insbesondere im volkswirtschaftlichen Kontext zur Einsparung öffentlicher Gelder von großer Relevanz (vgl. Bebi et al. 2004; Bratschi 2002; Motta & Haudemand 2000).

6.3.2 Risikobasierte Bewertungsansätze als Investitionskriterien für die Schutzwaldpflege

Die optimale Allokation öffentlicher Ressourcen zur Bereitstellung von Lawinenschutzleistungen durch Bund und Kantone ist Schwerpunkt bei der Beurteilung von Maßnahmen im Lawinenschutz. Ziel ist es, die bestmögliche Lösung durch die Bewertung von Effizienz⁸⁰ und Effektivität⁸¹ zu finden.

⁷⁹ “1 = indicating a stand suitable for protection that is stable; 2 = a stand suitable for protection but that is partially unstable; 3 = a stand partially suitable for protection that is unstable; 4 = unsuitable for protection or partially suitable for protection that is seriously unstable” (Motta & Haudemand 2000).

⁸⁰ Effizienz: Verhältnis zwischen Input und Output. Wird das Adjektiv effizient ohne weiteren Zusatz gebraucht, ist damit in der Regel Pareto-Effizienz gemeint (Wilhelm 1997), eine Allokation, in der es nicht mehr möglich ist, ein Wirtschaftssubjekt besser zu stellen, ohne gleichzeitig (mindestens) ein Wirtschaftssubjekt schlechter zu stellen.

⁸¹ Effektivität: Zielerreichungsgrad. Notwendige Aktivitäten und Maßnahmen zum richtigen Zeitpunkt in der gewünschten Qualität am richtigen Ort mit verhältnismäßigem Aufwand ausführen. Die Effektivität ist das der Effizienz übergeordnete Ziel für die Gewährleistung der Schutzfunktion des Gebirgswaldes (Bieger et al. 2003).

Der Beurteilung von Maßnahmen nach Effizienzkriterien liegt ein Input-Output Vergleich zugrunde. Wirtschaftlich ist eine Handlung dann, wenn ein bestmögliches Verhältnis⁸² zwischen Input und Output erreicht wird.

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Lawinenschutzprojekten aus ökonomischer Sicht stehen mehrere Methoden zur Verfügung (z.B. Wilhelm 1997; Hollenstein 1997). Die im Rahmen eines integralen Risikomanagements am häufigsten verwendeten sind:

- Die Kosten-Nutzen Analyse (KNA) und
- Die Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA).

Mit der KNA werden relevante Kosten und Nutzen einer Maßnahme unter gesamtwirtschaftlicher Zielsetzung erfasst, monetär bewertet und zur Beurteilung und Entscheidungsfindung einander gegenübergestellt.

Aber: Viele Maßnahmen zielen auf seltene Extremereignisse ab, die eventuell während der ganzen Wirkungszeit nicht eintreten. Ein realer Nutzen existiert dann nicht, ein statistischer ist hingegen vorhanden (Hollenstein 1997).

Bei der KWA werden monetäre (Kosten) und nichtmonetären (positive Wirkungen) Bewertungsansätzen kombiniert und die beste Lösung aufgrund der Zielerreichung ausfindig gemacht.

Aber: Die wichtigsten Parameter, der Zielerreichungsgrad und die Gewichtung der Maßnahmen, sind subjektive Größen und abhängig vom definierten Zielsystem. Bei der Ausgestaltung der Zielsysteme, im Sicherheitsbereich unter dem Begriff „Risikokommunikation“ zusammengefasst (Renn 1991), sollten die Präferenzen aller Betroffenen einbezogen werden (Wilhelm 1997).

Ein grundlegendes Problem ist die Quantifizierung des Nutzens bei der Bewertung von Lawinenschutzleistungen. Der Nutzen einer Schutzmaßnahme stellt eine Schadenverhinderung und demzufolge eine Risikominderung dar. Durch die Berechnung des Risikos wird es möglich, eine Maßeinheit (CHF/a oder Todesfälle/a) zu definieren und Maßnahmen im technischen sowie forstlichen Lawinenschutz vergleichbar zu machen (Gächter & Bart 2002). Die Durchführung von Kosten-Nutzenanalysen auf risikobasierenden Grundlagen ist für bautechnische Schutzmaßnahmen ein gebräuchliches Verfahren

⁸² Erreichbar nach dem Minimumprinzip (ein bestimmtes Ziel mit geringstem Aufwand erreichen) oder dem Maximumprinzip (mit vorgegebenem Mitteleinsatz das maximale mögliche Ziel erreichen).

(Fuchs & McAlpin 2005; Urban 2001; Borter 1999a; Hollenstein 1997; Wilhelm 1997); analoge Bewertungen von Investitionen in die Schutzwaldpflege fehlen weitgehend (Bebi et al. 2004).

Durch den Einbezug des Lawinenschutzwaldes in Risikoanalysen und die Abschätzung verschiedener Entwicklungen kann der Nutzen einer Maßnahme berechnet und als monetäre Größe abgebildet werden.

Wie die Fallstudie „Der Bannwald von Andermatt“ zeigt, wird es möglich Risikoveränderungen anhand entwickelter Waldzustandsszenarien aufzuzeigen. Es wird eine Maßeinheit auf monetärer Ebene zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit verschiedener Waldpflegemaßnahmen und zur Gegenüberstellung mit bautechnischen Lawinenschutzprojekten geschaffen. Politische Entscheidungen über Waldpflege- oder Alternativprojekte können durch eine Verminderung des Risikos gerechtfertigt werden (Fuchs & McAlpin 2005).

Bei den vorangegangenen Überlegungen unberücksichtigt blieben sog. externe Effekte. Jede Maßnahme geht mit nichtmarktvermittelten Wirkungen, Nutzen bzw. Kosten, einher (Frey, R.L et al. 1991). Als externe Kosten im forstlichen Lawinenschutz können z.B. Eingriffe ins Landschaftsbild durch unterstützende Lawinenverbauungen oder anderweitige Nutzungsbeschränkungen infolge von Aufforstungen bezeichnet werden. Eine Maßnahmenoptimierung muss alle relevanten Aspekte einbeziehen.

6.3.3 Schutzwaldausscheidung mit Unterstützung risikobasierter Kartierungsansätze

Die Voraussetzung für die Subventionierung von Waldpflegemaßnahmen ist die Ausscheidung von Wäldern mit besonderer Schutzfunktion (BSF). Bisher oblag die Durchführung der Schutzwaldkartierung den Kantonen; gefordert war ein Nachweis des Schadenpotentials, die Ermittlung des Gefahrenpotentials und die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Waldes (BUWAL 2003). Dieses uneinheitliche Vorgehen gestaltete den Prozess der Schutzwaldkartierung wenig transparent und schwer kontrollierbar.

Die Knappheit öffentlicher Gelder fordert ein Umdenken und die Einführung neuer Subventionsstrategien. Öffentliche Ressourcen müssen effizient für walddpolitische Ziele eingesetzt werden. Indem Bundesbeiträge nicht mehr kosten-, sondern leistungsorientiert vergeben werden, will der Bund seine Subventionspolitik im Bereich des Waldge-

setzes neu gestalten und reagiert damit auf die aktuellen Entwicklungen (BUWAL 2004c).

Mit dem in der Einführung beschriebenen Projekt *SilvaProtec-CH: Schutzwaldhinweiskarte Schweiz*⁸³ (BUWAL 2004 a & b; BUWAL 2005; BUWAL 2006) wird Schutzwald nach einheitlichen risikobasierten Kriterien ausgeschieden. Durch die Verknüpfung des Schadenpotentials mit dem Gefahrenpotential und der Waldfläche wird Schutzwald nur dort definiert, wo Wald wirklich eine Schutzfunktion erfüllt und führt zu einem gesamtschweizerischen Schutzwaldperimeter unter Berücksichtigung aller Naturgefahrenprozesse. Die kantonalen Differenzen können somit objektiv beurteilt und in gemeinsamer Diskussion mit den Kantonen zu einem einheitlichen vergleichbaren Standard geführt werden (BUWAL 2004c). Die Umsetzung erfolgt im Rahmen des Projektes *effor2 – Leistungsorientierte Subventionspolitik im Bereich des Waldgesetzes (WaG)*, mit geplanter Einführung 2008.

Durch die vorangegangenen Ausführungen soll explizit die Bedeutung risikobasierter Strategien zur Beurteilung der Schutzwaldeistung für die Subventionspolitik des Bundes hervorgehoben werden. Durch risikobasierte Strategien auf den verschiedensten Ebenen, lokal (vgl. Kap. 6.3.1), kantonal (vgl. Kap. 6.3.2) oder bundesweit, können öffentliche Gelder effizient und effektiv nach einheitlichen Kriterien eingesetzt werden.

6.3.4 Die monetäre Bewertung der Schutzleistung des Waldes

Wieviel ist ein ha Schutzwald wert?

Die Bewertung von Ökosystemleistungen und –veränderungen ist von herausragender Bedeutung für politische und wirtschaftliche Entscheidungsprozesse (Turner et al. 2003). Marktgängige Güter und Leistungen werden mit Hilfe von Angebots- und Nachfragekurven bewertet. Marktpreise als Bewertungsgrößen entstehen nur unter Konkurrenzbedingungen. Lawinenschutzleistungen sind vorwiegend lokal öffentliche Güter, so dass außermärkliche Methoden zur Bewertung herangezogen werden müssen (Wilhelm 1997).

⁸³ Weitere Informationen zu *SilvaProtec-CH* sind im Internet unter: <http://www.umweltschweiz.ch/buwal/de/fachgebiete/wald/wald/schutzwald/projekte/index.html#sprungmarke2> zu finden (Stand 22.05.2006).

Wilhelm (1997) gibt eine ausführliche Übersicht über Bewertungsverfahren zur Beurteilung von Schutzmaßnahmen und diskutiert diese detailliert hinsichtlich ihrer Anwendung im Lawinenschutz. Hervorzuheben ist die sog. Schadenmethode, welche sich in Kombination mit anderen Verfahren als geeignete Methode zur Bewertung von Lawinenschutzleistungen herauskristallisiert hat (Wilhelm 1997; Wilhelm 1999; Urban 2001). Diese und zwei weitere Verfahren werden im Folgenden, unter dem Aspekt ihrer Anwendbarkeit zur Beurteilung der Lawinenschutzleistung des Waldes, kurz vorgestellt und diskutiert.

Die **Schadenmethode** bewertet den Nutzen eines Gutes oder einer Leistung mindestens so hoch, wie die Kosten zur Reparatur entstandener Schäden bei Nichtbereitstellung des Gutes. Die Bereitstellung von Lawinenschutzleistungen erfordert den Einsatz von Produktionsfaktoren. Die Produktionsfaktoren, die für ein Projekt eingesetzt werden, stehen einer Volkswirtschaft für andere Projekte nicht mehr zur Verfügung. Kosten sind daher stets Opportunitätskosten, d.h. entgangener Nutzen einer alternativen, theoretisch nächstbesten Mittelverwendung (Wilhelm 1997). Dabei wird sich am tatsächlich eingetretenen Schaden oder am Risiko orientiert. Die Risikobetrachtung bezieht die Wahrscheinlichkeit des zu erwartenden Schadens in die Überlegung mit ein.

Für die bearbeitete Fallstudie würde die Brutto-Schutzleistung⁸⁴ des Waldes nach der Schadenmethode wie folgt bewertet⁸⁵:

- Das jährliche Risiko eines 300jährigen Lawinenereignisses **ohne** die Schutzleistung des Waldes beträgt rund: **3.043.000,00 CHF/a**
- Das jährliche Risiko eines 300jährigen Lawinenereignisses **mit** Schutzwald in seinem heutigen Ausmaß beträgt rund: **499.900,00 CHF/a**
- Der Nutzen des Schutzwaldes der Gemeinde Andermatt entspricht einer Risikominderung von rund: **2.543.100,00 CHF/a**

Unter Szenario II, welches die aktuelle Waldausdehnung ohne die Berücksichtigung vorhandener Lawinenverbauungen charakterisiert, wurde eine schutzwirksame Waldfläche von 13,83 ha angenommen. Daraus ergibt sich eine Schutzleistung von **183.900,00 CHF/a/ha** Schutzwald.

⁸⁴ Die Kosten für die Waldbewirtschaftung bleiben unberücksichtigt (vgl. Wilhelm 1997).

⁸⁵ Existente bautechnische Lawinenschutzmaßnahmen bleiben bei der Überlegung unberücksichtigt.

Die Nutzenbewertung mit der Schadenmethode führt zu Untergrenzen, da nicht alle Schäden quantifizierbar sind und die Konsumentenrente unberücksichtigt bleibt (Wilhelm 1997; Löwenstein 1995). Durch eine Kombination mit anderen Verfahren, z.B. dem Einsatz direkter Befragungsmethoden, wäre dies zu umgehen.

Urban (2001) verwendete zur Erfassung der Schutzleistung bautechnischer Lawinenschutzmaßnahmen das sog. **Bodenrentenkonzept**⁸⁶. Anhand dieser Vorgehensweise ist es möglich die Opportunitätskosten der Gefahrenzonierung zu ermitteln. Durch Lawinenschutzmaßnahmen werden die Gefahrenzonen verkleinert; der Nutzen der Maßnahme entspricht den Kosten, welche aufgrund fehlenden Lawinenschutzes durch Verlust an Siedlungsfläche entstehen würden (Urban 2001). Bei der Anwendung dieser Methode im Lawinenschutz treten Probleme auf, die vor allem aus der Wahrnehmungsschwierigkeit von Lawinenrisiken resultieren.

Das Bewusstsein der Bevölkerung gegenüber Naturgefahren ist im allgemeinen gering; die Erinnerung an Naturkatastrophen gerät schnell in Vergessenheit (Urban 2001; Wilhelm 1997). Implizite Marktpreise sind selten realistisches Abbild analytisch festgestellter Lawinenrisiken (Wilhelm 1997). Ebenfalls kann eine Bewertung der Besiedlung mit dem Bodenrentenkonzept in touristisch stark frequentierten Gebieten zu einer Unterschätzung des Nutzens einer Schutzmaßnahme führen. Hier empfiehlt es sich, die touristische Wertschöpfung in die Überlegungen einzubeziehen (Rütter et al. 1995).

Grêt-Regamey (2003) hat im Rahmen ihrer Dissertation eine zur vorliegenden Arbeit analoge Berechnung des Risikos für den Prozess Lawine in der Landschaft Davos durchgeführt (vgl. Grêt-Regamey et al. 2005; vgl. Kap. 6.1.1). Zur monetären Bewertung individueller Personenrisiken wendete sie die sog. **Willingness to pay (WPT) Methode** an. Ein Ansatz, welcher den Waldwert hinsichtlich seiner Schutzleistung über die marginale Zahlungsbereitschaft der Konsumenten quantifiziert (Elsasser & Küpker 2002). Die WTP-Methode ist ein spezifischer Ansatz im Rahmen der Bedingten Bewertungsmethode. Es handelt sich dabei um ein nachfrageorientiertes Verfahren, bei dem die Präferenzen der Nutznießer ausschlaggebend für die Bewertung des öffentlichen

⁸⁶ Bodenrente: Bodenpreis durch Kapitalisierung der erwarteten zukünftigen Grundrenten (Hilber 1998). Das Bodenrentenkonzept entspricht im ökonomischen Kontext der Impliziten Preismethode. Diese Methode versucht die unterschiedliche räumliche Ausdehnung nach Quantität und Qualität des öffentlichen Gutes auszunützen. Bodenpreise, Mietpreise, Immobilienpreise usw. können im Vergleich von gefährdeten und geschützten Lawinenstandorten wertvolle Informationen bezüglich den Lawinenschutzleistungen enthalten (Wilhelm 1997).

Gutes sind (Weck-Hannemann 1994). Zur Bewertung der Lawinenschutzleistung des Waldes ist dieses Verfahren mit den folgenden Problemen behaftet: Die Seltenheit von Lawinenereignissen und deren langer Zeithorizont machen eine objektive Bewertung durch Befragungen problematisch und können zu falschen Einschätzungen des wirklichen Nutzens einer Schutzmaßnahme, im speziellen Fall des Schutzwaldes, führen (Wilhelm 1997). Erforderlich wäre eine zeitlich, räumlich und sachlich abgrenzbare Lawinenschutzleistung, die Konsumenten mehrmals im Winter in Anspruch nehmen (Wilhelm 1997).

Löwenstein (1995) setzt die Bedingte Bewertungsmethode zur monetären Bewertung der Schutzfunktion des Waldes in Hinterstein im Allgäu ein. Im Rahmen dieser Fallstudie wurden die Einwohner nach ihrer maximalen Zahlungsbereitschaft für Optionspreise zur Aufrechterhaltung der Schutzleistung des Waldes gefragt mit der Möglichkeit, ihre ursprüngliche Antwort zu korrigieren. Löwenstein begründet anhand dieser Fallstudie die Zuverlässigkeit Bedingter Bewertungsmethoden. Er kritisiert die Implizite Preismethode insofern, dass derzeit Marktdaten wie Versicherungsprämien nicht in ausreichendem Masse zur Verfügung stehen (Löwenstein 1995).

6.4 Ungeklärte Fragen und zukünftiger Forschungsbedarf

Die Diskussion der Ergebnisse, der Vergleich mit anderen Forschungsprojekten, die kritische Beurteilung der Methoden sowie die Überlegungen zur Bedeutung für ein risikobasiertes Schutzwaldmanagement haben Potentiale und Limite dieser Masterarbeit offengelegt. Es konnten konzeptionelle Lösungsansätze anhand der bearbeiteten Fallstudie erarbeitet und skizziert werden (vgl. Kap. 6.3); einige Fragen wurden nicht geklärt:

Die Wirkungen unterschiedlicher Waldstrukturen blieben im Rahmen der durchgeführten Risikoanalyse unberücksichtigt. Die Integration des Schutzwaldes in das Verfahren erfolgte über seine generelle Existenz und die Variation der Waldfläche. Wie das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zeigt, ist eine Abbildung unterschiedlicher Waldstrukturen bei der Lawinensimulation mit VS-2D durch die Veränderung der Reibungsparameter μ und ξ in den gewählten Kombinationen nicht möglich (vgl. Kap. 5.3).

Zur Abbildung verschiedener Waldentwicklungsstadien und Waldstrukturen wäre eine umfassendere Evaluation des Lawinensimulationsmodells und ein umfangrei-

ches Monitoring realer Lawinenereignisse zur Kalibrierung der Reibungsparameter notwendig.

Des Weiteren blieb die Walddynamik im Schutzwald, als entscheidende strukturprägende Komponente, unberücksichtigt. Wald ist kein statisches Gebilde, sondern wird durch Auf- und Abbauprozesse laufend verändert (vgl. Kap. 2.1.3). Im Rahmen dieser Untersuchung wurde „Wald“ als statisches Raumelement berücksichtigt. Es wurden verschiedene Waldzustandsszenarien entwickelt ohne walddynamische Prozesse und damit eine mögliche Risikoveränderung über die Zeit zu beachten.

Der Einbezug von Wachstumsmodellen in Risikoanalysen ist ein Forschungsansatz, um dieses Problem in Zukunft zu bearbeiten. Dafür gilt es existierende Wachstumsmodelle weiter zu entwickeln und den spezifischen Gegebenheiten im Gebirgswald anzupassen. In Abhängigkeit von den Voraussetzungen verschiedener Untersuchungsgebiete und den Zielvorstellungen stehen bereits einige geeignete Waldwachstumsmodelle zur Verfügung, z.B. Rammig (2005), Bugmann (1996), Wehrli et al. (2005).

Forschungsbedarf zur Verbesserung der Aussagekraft und zur Verfeinerung der Methoden von Risikoanalysen besteht in den unterschiedlichsten Wissenschaftsbereichen:

Auf dem Gebiet der Gebirgswaldforschung gilt es zukünftig zu klären, welchen Einfluss Waldstruktur und Walddynamik unter verschiedenen Standortfaktoren auf die Eintretenswahrscheinlichkeit von Lawinen und damit auf das Risiko haben. Aufgabe der Waldforschung ist es, Fragen zu klären wie „*Was passiert in einem Schutzwald wirklich, wenn wir nicht eingreifen?*“ (Brang et al. 2004) und die Kenntnisse über die Bremswirkung des Waldes bei Lawinnenniedergängen zu vertiefen (Margreth 2004). Für Überlegungen zu zukünftigen Risikoentwicklungen und Planungen von Waldpflege sowie Lawinenschutzmaßnahmen wäre eine Abschätzung von Eintretenswahrscheinlichkeiten verschiedener Waldveränderungen oder Störereignisse bedeutend.

Fragen, wie *Inwieweit wird die Gefährlichkeit einer Lawine durch mitgerissene Stämme erhöht?* und *Wie kann dies im Rahmen einer Risikoanalyse berücksichtigt werden?*, sind zu klären. Daraus ergeben sich Forschungsschwerpunkte im Bereich der Ingenieurwissenschaften zu Verletzlichkeiten von Personen, Gebäuden und Infrastruktur (Hollenstein et al. 2002).

Die Berücksichtigung externer Effekte bei der Kostenabschätzung von risikoreduzierenden Maßnahmen führt zum Problem der Monetarisierung von Umweltleistungen. Abschätzungen sind oft mit großen Unsicherheiten verbunden, liefern aber wertvolle Hinweise für umfassendere Risikoanalysen und sollten Inhalt zukünftiger Forschung sein.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

„Weihnachtsbescherung für Uri – Reicher Ägypter möchte in Andermatt eine Ferienanlage bauen“, verheißt der Titel eines Beitrags in der Südostschweizer Zeitung (Bachmann 2005). Eine dichtere Besiedlung, zunehmender Verkehr und sich wandelnde Ansprüche in Beruf und Freizeit, wie das aktuelle Beispiel der Gemeinde Andermatt zeigt, erfordern neue übergeordnete und vernetzte Strategien im Umgang mit Naturgefahren zur Verbesserung der Sicherheit im Alpenraum. Den methodischen Rahmen solcher Strategien bildet heute das Risikokzept, eingebettet in ein integrales Risikomanagement (PLANAT 2005). Die Risikoanalyse, als Element des Risikokzeptes, dient der objektiven Ermittlung der Risikogrößen (Borter 1999a).

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigte sich mit der Integration des Lawinenschutzwaldes in das Verfahren der Risikoanalyse (nach Wilhelm 1997; Borter 1999a). Anhand einer Fallstudie zum Bannwald von Andermatt wurde das Risiko für ein 300jähriges Lawinenereignis unter verschiedenen Waldzustandsszenarien berechnet. Beim heutigen Waldzustand, ohne die existenten bautechnischen Lawinenschutzmaßnahmen zu berücksichtigen, besteht für die Gemeinde Andermatt ein Risiko von rund 500.000,00 CHF/a. Durch ein Windwurfereignis im unteren Hangbereich würde das Risiko nur geringfügig ansteigen; bei einer Ausdehnung der waldfreien Fläche in obere Hanglagen würde es sich dagegen mehr als verdoppeln. Eine vollumfängliche Zerstörung des Bannwaldes hätte einen Anstieg des Risikos auf rund 3 Mio. CHF/a zur Folge. Aus der Gegenüberstellung der ermittelten Risiken können wertvolle Schlussfolgerungen für ein zukünftiges risikobasiertes Schutzwaldmanagement abgeleitet werden:

- Die nachgewiesene positionsabhängige Schutzwirkung des Waldes erlaubt den qualitativ sowie quantitativ zielgerichteten Einsatz von Mitteln für die Waldpflege. Durch Ausscheiden von Waldpflegezonen unterschiedlicher Priorität können lokale risikobasierte Waldpflegepläne erstellt werden.
- Es wird eine Maßeinheit (CHF/a) zur Gegenüberstellung und ökonomischen Bewertung verschiedenster Maßnahmen im Lawinenschutz geschaffen. Durch Kosten-Nutzen-Analysen oder Kosten-Wirksamkeits-Analysen können Aufforstungs- und Waldpflegeprojekte mit Projekten aus dem bautechnischen Lawinenschutz und anderen Bereichen verglichen werden.

- Risikobasierte Kartierungsansätze unterstützen den effizienten Einsatz öffentlicher Ressourcen für walddpolitische Ziele und fördern die gerechte Verteilung von Subventionen.
- Der Vergleich der Szenarien „ohne Wald“ und „mit Wald“ verdeutlicht die herausragende Bedeutung des Bannwaldes für die Gemeinde Andermatt. Solche Gegenüberstellungen helfen bei der monetären Bewertung der Schutzleistung des Waldes.

Risikobasierte Schutzwaldstrategien können auf allen Ebenen, lokal, kantonale und bundesweit, die politische Entscheidungsfindung unterstützen.

Rückblickend auf die Durchführung der GIS-basierten Risikoanalyse gestaltete sich diese als gut strukturierte, einfach nachvollziehbare Methode zur Ermittlung des Risikos für den Naturgefahrenprozess Lawine. Die Anwendung eines Geographischen Informationssystems (GIS) unterstützte den Arbeitsprozess maßgeblich; die Verknüpfung von geographischer mit sachlicher Information erlaubte eine ortsbezogene Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.

Die Kartierung der Waldstrukturen anhand des digitalen Orthophotos, lieferte wertvolle Hinweise zur Modellierung der Lawinenanrissgefährdung im Wald und für die Entwicklung der Waldzustandsszenarien. Die verschiedenen Waldzustände ließen sich durch die Verwendung des rechnergestützten Lawinenmodellierungs-Systems AVAL-2D und des darin integrierten 2-dimensionalen numerischen Simulationsmodells VS-2D (Gruber 1998) einfach abbilden; die resultierenden Risikoveränderungen konnten schnell ermittelt werden.

Eine geplante Darstellung unterschiedlicher Waldstrukturen durch Variation der Reibungsparameter μ und ξ war nach der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse nicht möglich. Eine gründliche Evaluation und der Vergleich mit realen Lawinenereignissen unter besonderer Berücksichtigung des Schutzwaldes sind Möglichkeiten, dieses Problem zu bearbeiten. Durch die Integration von AVAL-2D (Gruber 1998) können zukünftige Veränderungen der Waldfläche in Risikoanalysen für den Naturgefahrenprozess Lawine berücksichtigt und wichtige Hinweise zu resultierenden Risikoveränderungen abgeleitet werden.

Zukünftig gilt es das Verfahren der Risikoanalyse konsequent anzuwenden, damit verbundene Unsicherheiten zu reduzieren und eine einheitliche umfassende Datenbasis zu

schaffen. Bestehende Instrumente müssen verfeinert und neue Methoden entwickelt werden, um einheitliche Standards zur Bestimmung des Risikos in Bezug auf alle Gefahrenprozesse definieren zu können. Der interdisziplinäre Charakter von Risikoanalysen verlangt die Zusammenarbeit von Experten verschiedenster Wissensgebiete und die Kooperation auf allen politischen Ebenen.

Die Abkehr von gefahrenorientierten zu risikobasierten Bewertungs- und Managementstrategien im Umgang mit Naturgefahren erfordert auch neue Konzepte im Schutzwaldmanagement. Der Gebirgswald als effiziente biologische Schutzmaßnahme schützt Personen, Siedlungen und Infrastruktur vor Naturgefahren und hat in der Schweiz einen herausragenden Stellenwert. Durch Studien wie die vorliegende Masterarbeit werden Lösungsansätze skizziert und wichtige Hinweise zur Erarbeitung risikobasierter Schutzwaldmanagementkonzepte gegeben.

Literaturverzeichnis

- Ahrens, W. (2001):** Analyse der Waldentwicklung in Naturwaldreservaten auf Basis digitaler Orthobilder. Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät, Albert Ludwigs Universität, Freiburg i. Brsg.: 143S.
- Amt für Forst- und Jagdwesen (1995):** Waldbauprojekt Urseren – Technischer Bericht Kostenvoranschlag. Projekt-Nummer 411.3-UR-0003/00, Land- und Forstwirtschaftsdirektion, Kanton Uri: 23S.
- Amt für Lawinenverbau und Meliorationen Uri (1974):** Gurschen – West, generelles Projekt 1972, Wannelen – Stinkertal. Bauherr: Einwohner- und Bürgergemeinde Andermatt, Projekt: Nr. 454 Kanton.
- Amt für Lawinenverbau Uri (1986):** Technischer Bericht: Lawinenverbauung Gurschen-West, 6. Teilprojekt. Bauherr: Einwohner- und Bürgergemeinde Andermatt, Projekt: Nr. 454-6 Kanton, Nr. 66 Bund.
- Bachmann, U. (2005):** Weihnachtsbescherung für Uri – Reicher Ägypter möchte in Andermatt eine Ferienanlage bauen. *Südschweizer Zeitung*, Dienstag, 20.12.2005: 10.
- Barbolini, M.; Gruber, U.; Keylock, C.J.; Naaim, M.; Savi, F. (2000):** Application of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites. In: *Cold Regions Science and Technology*, 31: 133-149.
- Bartelt, P.; Salm, B.; Gruber, U. (1999):** Calculating dens-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. In: *The Journal of Glaciology*, 45: 242-254.
- Bebi, P. (2000):** Erfassung von Strukturen im Gebirgswald als Beurteilungsgrundlage ausgewählter Waldwirkungen. Dissertation, Eidg. Technische Hochschule Zürich) Beiheft zur Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen, 90: 128S.
- Bebi, P.; Ammann, W.; Rhyner, J.; Gret-Regamy, A. (2004):** Risikobasierte Schutzwaldstrategie. In: *Forum für Wissen 2004*: 79-86.
- Bebi, P.; Kienast, F.; Schönenberger, W. (2001):** Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests. dynamics and protective function. In: *Forest Ecology and Management*, 145: 3-14.

- Berger, F.; Rey, F. (2004):** Mountain Protection Forests against Natural Hazards and Risks: New French Developments by Integrating Forest in Risk Zoning. In: *Natural Hazards*, 33: 395-404.
- BFF/EISLF (1984):** Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Forstwesen/Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Bern: 21S.
- Bieger, T.; Bischof, L.; Wittmer, A. (2003):** Beitrag zur strukturellen & regionalökonomischen Entwicklung der Forstwirtschaft in Berggebieten: Effizienz und Effektivität von Schutzwäldern. Institut für Öffentliche Dienstleistungen und Tourismus, Universität St. Gallen: 75S.
- Bohnenblust, H.; Troxler, C. (1987):** Risk analysis - Is it a useful tool for the politician in making decisions on avalanche safety? In: *Avalanche Formation, Movement and Effects (Proceeding of the Davos Symposium, September 1986)*, IAHS Publication no.162: 653-664.
- Bolli, T. (2006):** Risikomanagement als Schweizer Kulturgut. Tages-Anzeiger, Dienstag, 11.04.2006: 10.
- Borter, P. (1999a):** Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren/Methode. Umwelt-Materialien Nr. 107/I, Naturgefahren, BUWAL, Bern: 115S.
- Borter, P. (1999b):** Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren/Fallbeispiele und Daten. Umwelt-Materialien Nr. 107/II, Naturgefahren, BUWAL, Bern: 129S.
- Brändli, U.-B.; Herold, A. (1999):** Schutz vor Naturgefahren. In: *Schweizerisches Landesforstinventar, Methoden und Modelle der Zweitaufnahme 1993-1995*. Birnmensdorf Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- Brang, P. (2001):** Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the European Alps. In: *Forest Ecology and Management*, 145: 107-119.
- Brang, P.; Duc, P. (2002):** Zu wenig Verjüngung im Schweizer Gebirgs-Fichtenwald: Nachweis mit einem neuen Modellansatz. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 153: 219-227.

- Brang, P.; Schönenberger, W.; Bachofen, H.; Zingg, A.; Wehrli, A. (2004):** Schutzwalddynamik unter Störungen und Eingriffen: Auf dem Weg zu einer systemischen Sicht. In: *Forum für Wissen 2004*: 55-66.
- Brassel, P.; Brändli, U.-B. (Red.) (1999):** Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Bern, Stuttgart, Wien, Haupt: 442S.
- Bratschi, D. (2002):** Aspekte des Risiko-Managements im Wald. Nachdiplomkurs Risiko und Sicherheit. ETH Zürich und Lausanne, HSG St. Gallen, 21S.
- Brünig, E.; Mayer, H. (1980):** Waldbauliche Terminologie: Fachwörter der forstlichen Produktion. IUFRO-Gruppe Ökosysteme, Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur Wien: 207S.
- Bugmann, H. (1996):** A simplified forest model to study species composition along climate gradients. In: *Ecology*, 77 (7): 2055-2074.
- Burkhard, A.; Salm, B. (1992):** Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit d_0 zur Berechnung von Fließlawinen. Interner Bericht Nr. 668, Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF, Davos.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2003):** Waldbau B und C (Komponenten Nr. 411.2 und 411.3). In: *Kreisschreiben Nr. 8 vom 31.07.2002*. Bern, Eidg. Forstdirektion, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2004a):** Projekt Schutzwaldhinweiskarte CH: SilvaProtec-CH. Informationsblatt 1 für die KOK vom 4./5. Mai 2004. URL: http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/forstdirektion_f/ngf_naturgefahren/ngf30_projekte/silvaprotec_nl_1_kok_f.pdf (Stand 14.03.2006).
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2004b):** Projekt Schutzwaldhinweiskarte CH: SilvaProtec-CH. Informationsblatt 2 für die KOK vom 21./22. September 04. URL: http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/forstdirektion_f/ngf_naturgefahren/ngf30_projekte/silvaprotec_nl_2_kok_f.pdf (Stand 14.03.2006).

- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2004c):** effor2 - Leistungsorientierte Subventionspolitik im Bereich des WaG. Detailbericht, Dezember 2004. URL: http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/forstdirektion/wh_waldundholz/wh30_projekte/wh30_projektbersicht/wh30_effor2/detailbericht.pdf (Stand 22.05.2006).
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2005):** Projekt Schutzwaldhinweiskarte CH: SilvaProtec-CH. Informationsblatt 3 – Mai 2005. URL: http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/forstdirektion_f/ngf_naturgefahren/ngf30_projekte/silvaprotect_nl_3_kok_f.pdf (Stand 14.03.2006).
- BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2006):** Projekt Schutzwaldhinweiskarte CH: SilvaProtec-CH. Informationsblatt 4 – März 2006. URL: http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/forstdirektion/ng_naturgefahren/ng30_projekte/silvaprotect_nl_4_kok.pdf (Stand 22.05.2006).
- Dorren, L.K.A.; Berger, F.; Imeson, A.C.; Maier, B.; Rey, F. (2004):** Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. In: *Forest Ecology and Management*, 195: 165-176.
- Draeger, U. (2005):** Die Not als Lehrmeisterin. In: *Umwelt (Naturgefahren)*, 2: 48-51.
- Duc, P.; Brändli, U.-B.; Brassel, P. (2004):** Der Schutzwald im zweiten Schweizerischen Landesforstinventar (LFI2). In: *Forum für Wissen 2004*: 7-13.
- Ellenberg, H. & Klötzli, F. (1972):** Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. In: *Mitteilungen Schweiz. Anstalt Forstliches Versuchswesen*, 48 (4): 589-930.
- Elsasser, P.; Küpker, M. (2002):** Zur ökonomischen Bewertung der biologischen Vielfalt im Wald. In: *"Biologische Vielfalt mit der Land- und Forstwirtschaft?"*, Schriftenreihe des BMVEL "Angewandte Wissenschaft", 494: 221-228.
- Faber, M.H.; Stewart, M.G. (2003):** Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion. In: *Reliability Engineering and System Safety*, 80: 173-184.
- Föhn, P. (1993):** Lawinen - kurzfristige Gefahrenbeurteilung (Prognose). In: *Naturgefahren, Forum für Wissen, WSL*, 1993.

- Frehner, M.; Wasser, B.; Schwitter, R. (2005):** Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Vollzug Umwelt; Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern: 564S.
- Frey, R.L.; Staehelin-Witt, E.; Blöchliger, H. (1991):** Mit Ökonomie zur Ökologie. Analyse und Lösungen des Umweltproblems aus ökonomischer Sicht. Wirtschaftswissenschaftliches Zentrum WWZ der Universität Basel, Helbig & Lichtenhain.
- Frey, W. (1999):** The Urseren valley and the Bannwald of Andermatt. In: *Excursion guide for the post-workshop excursion, International Workshop "Structure of Mountain Forests" in Davos, Sept. 6-10, 1999: 9.*
- Frutiger, H. (1971):** Lawinen „Im Boden“ Andermatt. Auftraggeber Forstdienst Uri, Amt für Lawinenverbau und Meliorationen, Gutachten 71.32. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos.
- Fuchs, S.; McAlpin, M.C. (2005):** The net benefit of public expenditures on avalanche defence structures in the municipality of Davos, Switzerland. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5: 319-330.
- Gächter, M.; Bart, R. (2002):** Risikoanalyse und Kostenwirksamkeit bei der Massnahmenplanung - Beispiel Diesbach. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 153 (7): 268-273.
- Grassi, G.; Minotta, G.; Giannini, R.; Bagnaresi, U. (2003):** The structural dynamics of managed uneven-aged conifer stands in the Italian eastern Alps. In: *Forest Ecology and Management*, 185: 225-237.
- Grêt-Regamey, A. (2003):** Spatially explicit valuation of ecosystem services in the Alps as a support tool for regional decision making. Ph.D-Proposal.
- Grêt-Regamey, A.; Bebi, P.; Bishop, I.D.; Schmid, W. (2005):** Linking GIS-based models to value ecosystem services in an Alpine region. Skript eingereicht.
- Grêt-Regamey, A.; Straub, D. (2006):** Accommodating uncertainties in avalanche risk assessment by linking Bayesian Network to GIS. Skript eingereicht.
- Grimm, V.; Wissel, C. (1997):** Babel, or the ecological stability discussion: an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. In: *Oecologia*, 109 (3): 323-334.

- Gruber, U. (1998):** Einsatz numerischer Simulationsmethoden in der Lawinenkartierung. Dissertation, mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Zürich: 161S.
- Gruber, U. (2001):** Using GIS for avalanche hazard mapping in Switzerland. In: *Proceedings of the 2001 ESRI International User Conference, San Diego, USA*. Online im Internet. URL: <http://gis.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap964/p964.htm> (Stand 29.03.2006).
- Gruber, U.; Bartelt, P. (2005):** Snow Avalanche Hazard Modelling of Large Areas using Shallow Water Numerical Methods and GIS. Skript eingereicht.
- Gruber, U.; Bartelt, P.; Margreth, S. (1999):** Anleitung zur Berechnung von Fließlawinen. In: *Neue Berechnungsmethoden der Lawinengefahrenkartierung*. Kursunterlagen, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos, Teil III.
- Gruber, U.; Margreth, S. (2001):** Winter 1999: a valuable test of the avalanche-hazard mapping procedure in Switzerland. In: *Annals of Glaciology*, 32: 328-332.
- Gubler, H.; Rychetnik, J. (1991):** Effects of forest near the timberline on avalanche formation. In: *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas (Proceeding of the Vienna Symposium, August 1991)*. IAHS Publication, 205: 19-38.
- Heinimann, H.R.; Hollenstein, K.; Kienholz, H.; Krummenacher, B.; Mani, P. (1998):** Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. BUWAL, Bern: 248S.
- Hilber, C. (1998):** Auswirkungen staatlicher Massnahmen auf den Bodenpreis – eine theoretische und empirische Analyse der Kapitalisierung. Rüegger, Chur, Zürich: 286S.
- Hollenstein, K. (1997):** Analyse, Bewertung und Management von Naturrisiken. Dissertation ETH Zürich, vdf, Hochschul-Verlag: 220S.
- Hollenstein, K.; Bieri, O.; Stückelberger, J. (2002):** Modellierung der Vulnerability von Schadenobjekten gegenüber Naturgefahrenprozessen. ETH Zürich Forstliches Ingenieurwesen + BUWAL: 107S.
- Kleppmann, W. (2003):** Taschenbuch-Versuchsplanung, Praxisreihe Qualitätswissen. 3. überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien: 296S.

- Kulakowski, D.; Bebi, P. (2004):** Range of Variability of unmanaged subalpine forests. In: *Forum für Wissen 2004*: 47-54.
- Lardelli C. (2003):** Dynamik und Stabilität von Lawinenschutzwäldern: Eine Luftbild- und GIS-gestützte Analyse. Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich: 106S.
- Löwenstein, W. (1995):** Die monetäre Bewertung der Schutzfunktion des Waldes vor Lawinen und Rutschungen in Hinterstein (Allgäu). In: *Bergen, V.; Löwenstein, W.; Pfister, G. (Hrsg.) (1995): Studien zur monetären Bewertung von externen Effekten der Forst- und Holzwirtschaft, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, Frankfurt am Main, Sauerländer, 85S.*: 117-177.
- Maggioni, M.; Gruber, U. (2003):** The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. In: *Cold Regions Science and Technology*, 37: 407-419.
- Mahrer, F. (1976):** Abgrenzungsformen zur Erfassung der Waldfläche im Schweizerischen Landesforstinventar (LFI). In: *Berichte der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)*, 167: 29-53.
- Margreth, S. (1999):** Zonenplanung, Lawinengefahrenkartierung und numerische Modelle – eine Übersicht. In: *Neue Berechnungsmethoden der Lawinengefahrenkartierung*. Kursunterlagen, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos, Teil II.
- Margreth, S. (2004):** Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. In: *Forum für Wissen 2004*: 21-26.
- Marx, J. (1992):** Avalanche Defence and Afforestation in the Urserental. In: *Schutzwald und Lawinenverbau im Gotthardgebiet, Exkursionsführer für die IUFRO Exkursion vom 8.-10. Sept. 1992*: 31-33.
- Marx, J. (2005):** Mündliche Mitteilung.
- Mayer, H.; Ott, E. (1991):** Gebirgswaldbau Schutzwaldpflege. 2. Auflage; Fischer, Stuttgart, New York: 587S.
- Meyer-Grass, M.; Imbeck, H. (1985):** Waldlawinen: Anleitung für die Meldung von Waldlawinen. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos.

- Meyer-Grass, M.; Schneebeli, M. (1992):** Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneebedingungen. In: *Interpraevent 1992 – Bern*: 443-455.
- Motta, R.; Haudemand, J.-C. (2000):** Protective Forests and Silvicultural Stability: An Example of Planning in the Aosta Valley. In: *Mountain Research and Development*, 20 (2): 180-187.
- Munter, W. (2003):** 3x3 Lawinen – Risikomanagement im Wintersport. 3. Auflage; Pohl & Schellhammer, Garmisch-Partenkirchen: 223S.
- Oechslin, K. (1986):** Zur Geschichte des Lawinenverbaues und der Wiederbewaldung im Urserental. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 7: 588-593.
- Ott, E.; Frehner, M.; Frey, H.-U.; Lüscher, P. (1997):** Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Haupt; Bern, Stuttgart, Wien: 288S.
- Perzl, F. (2005):** Beurteilung der Lawinen-Schutzwirkung des Waldes. BFW-Praxisinformation 8: 27-31.
- Pfister, R. (1997):** Modellierung von Lawinenanrissen im Wald. Projektarbeit, Nachdiplomkurs in Angewandter Statistik ETH Zürich: 20S.
- PLANAT (2005):** Strategie Naturgefahren Schweiz – Synthesebericht. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Biel: 81S.
- Rammig, A. (2005):** Disturbance in mountain forests: Analysing, modelling and understanding successional processes after blowdown events. Dissertation, ETH Zürich.
- Renn, O. (1991):** Risikokommunikation: Bedingungen und Probleme eines rationalen Diskurses über die Akzeptabilität von Risiken. In: *Schneider, J. (Hrsg.) (1993): Risiko und Sicherheit technischer Systeme*: 192-209.
- Rütter, H.; Müller, H.; Guhl, D.; Stettler, J. (1995):** Tourismus im Kanton Bern – Wertschöpfungsstudie. Berner Studien zu Freizeit und Tourismus, 34. Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus der Universität Bern: 261S.
- SAFE (1986):** Forsteinrichtungsbegriffe. Schweizerischer Arbeitskreis für Forsteinrichtung.
- Salm, B. (1978):** Snow forces on Forest Plants. In: *Proceedings IUFRO Seminar Mountain Forests and Avalanches, Davos, 1978*: 157-181.

- Salm, B. (1987):** Avalanche formation, movement and effects. In: Proceedings of the symposium org. by the Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research on behalf of the Swiss Department of the Interior, 14-19 September 1986. IAHS Press, Institute of Hydrology Wallingford, 162: 686S.
- Salm, B. (1993):** Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. In: *Annals of Glaciology*, 18: 221-226.
- Salm, B.; Burkhard, A.; Gubler, H.U. (1990):** Berechnung von Fließlawinen. Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Mitteilungen des Eidgenössischen Institutes für Schnee und Lawinenforschung, Davos, 47: 37S.
- Schärer, W. (2004):** Der Schutzwald und seine Bedeutung in der Waldpolitik des Bundes. In: *Forum für Wissen 2004*: 87-90.
- Schneebeli, M.; Bebi, P. (2004):** Snow and Avalanche Control. In: *Encyclopedia of Forest Science / Hydrology*: 397-402.
- Schneider, J. (1996):** Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen: Grundwissen für Ingenieure. 2. Auflage, vdf Hochschulverlag AG, Zürich: 188S.
- SLF, (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung) (2005):** Leitfaden zur Risikobeurteilung und Massnahmenplanung bei Naturgefahren dargestellt am Beispiel Lawinen. Entwurf, unveröffentlicht.
- Sovilla, B.; Bartelt, P. (2005):** Observations and modeling of snow avalanche entrainment. In: *Natural Hazards*, 2: 169-179.
- Stöckli, V.; Pfister, R.; Frey, W. (1997):** Erforschung der Wechselwirkung zwischen Schutzwald und Lawinen. In: *Schweizer Wald*, 11: 14-21.
- Straub, D. (2003):** Natural hazards risk assessment using Bayesian networks. ICOS-SAR 05.
- Turner, K.; Paavola, J.; Cooper, P.; Farber, S.; Jessamy, V.; Georgiou, S. (2003):** Valuing nature: lessons learned and future research directions. In: *Ecological Economics*, 46: 493-510.
- Turner, R.K.; Adger, W.N.; Brouwer, R. (1998):** Ecosystem services value, research needs, and policy relevance: a commentary. In: *Ecological Economics*, 25: 61-65.
- Urban, R. (2001):** Erfassung der Schutzleistungen von Lawinenschutzmaßnahmen im Raume Davos. Diplomarbeit, ETH-Zürich: 69S.

- WaG:** Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG) vom 4. Oktober 1991 (Stand am 6. April 2004).
- WAP-CH:** Waldprogramm der Schweiz (WAP-CH), Handlungsprogramm 2004-2015. In: *Schriftenreihe Umwelt*, 363, Bern, BUWAL 2004.
- Weck-Hannemann, H. (1994):** Was ist der Wald uns wert? Eine Einschätzung aus ökonomischer Sicht. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 145 (2): 95-110.
- Wehrli, A.; Schönenberger, W.; Brang, P. (2003):** Long-term development of protection forests: Combining models of forest dynamics with models of natural hazards. In: *European Tropical Forest research Network Newsletter*, 38: 20-24.
- Wehrli, A.; Zingg, A.; Bugmann, H.; Huth, A. (2005):** Using a forest patch model to predict the dynamics of stand structure in Swiss mountain forests. In: *Forest Ecology and Management*, 205: 149-167.
- White, P.S.; Picket, S.T.A. (1985):** The ecology of natural disturbance and patch dynamics: an introduction. In: *Picket, S.T.A.; White, P.S (Hrsg.): The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. New York, Academic Press: 3-16.
- Wilhelm, C. (1997):** Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmaßnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung. Mitt. Eidgenöss. Inst. Schnee- und Lawinenforschung Nr. 54: 309S.
- Wilhelm, C. (1999):** Naturgefahren und Sicherheit der Bevölkerung im Gebirge - oder: Von der Schicksalsgemeinschaft zur Risikogesellschaft. In: *Forum für Wissen 1999*, 2: 1-9.
- Wilhelm, C.; Bründl, M.; Ammann, W. (2001):** Vom Umgang mit dem Risiko im Berggebiet. In: *2. Alpenreport*, Bern: 102-106.

Anhang

Anhangverzeichnis

Anhang 1:	Werte für die Schadempfindlichkeit der Gebäudestruktur (S_{St} bzw. S_{est}) in Abhängigkeit von der Objektart und der zugehörigen Gebäudeklasse (GK).	125
Anhang 2:	Werte die für Schadempfindlichkeit des Gebäudeinhalts (S_{Ih}) in Abhängigkeit von der Objektart und der zugehörigen Gebäudeklasse (GK).	125
Anhang 3:	Werte für die Letalität (λ) von Personen in Abhängigkeit von der Objektart und der zugehörigen Gebäudeklasse.	126
Anhang 4:	Angaben für Strukturwerte (W_{St}) und Inhaltswerte (W_{Ih}) in Abhängigkeit von der Objektart.	126
Anhang 5:	Anzahl anwesender Personen in einem Gebäude (N_p) in Abhängigkeit von der Objektart.	127
Anhang 6:	arc macro language (aml) Programm zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit in Wald (Bebi 2000).	128
Anhang 7:	arc macro language (aml) Programm zur Berechnung des Deckungsgrades als Input-GRID zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit (Bebi 2000).	129
Anhang 8:	arc macro language (aml) Programm zur Berechnung der Lückenlänge als Input-GRID zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit (Bebi 2000).	130
Anhang 9:	Richtwerte für d_0^* für $\psi_{0m} = 28^\circ$, Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre.	132
Anhang 10:	Auszug aus der Legende der Landeskarte der Schweiz 1:25.000.	133
Anhang 11:	Digitalisierte Bestandskarte vom Bannwald von Andermatt	134
Anhang 12:	Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario I: "mit Wald - mit Lawinenverbauung"	135
Anhang 13:	Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario II: "mit Wald - ohne Lawinenverbauung"	136
Anhang 14:	Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario I: "Wald mit kleiner Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung“	137
Anhang 15:	Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario IV: "Wald mit großer Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung“	138
Anhang 16:	Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario V: "ohne Wald"	139

Anhang 1: Werte für die Schadempfindlichkeit der Gebäudestruktur (S_{St} bzw. S_{est}) in Abhängigkeit von der Objektart und der zugehörigen Gebäudeklasse (GK).

Objektart	Gebäudeklasse	Schadempfindlichkeit Struktur	
		Mittlere Intensität	Starke Intensität
Stall	1	1,00	1,00
Lager/Garage	2	0,80	1,00
Einfamilienhaus	3	0,50	1,00
Mehrfamilienhaus	3	0,50	1,00
Öffentliches Gebäu-	3	0,50	1,00
Hotel/Restaurant	3	0,50	1,00
Gewerbebaute	3	0,50	1,00
Kirche	4	0,30	1,00

Quelle: Borter 1999b, S.125

Anhang 2: Werte die für Schadempfindlichkeit des Gebäudeinhalts (S_{Ih}) in Abhängigkeit von der Objektart und der zugehörigen Gebäudeklasse (GK).

Objektart	Gebäudeklasse	Schadempfindlichkeit Inhalt	
		Mittlere Intensität	Starke Intensität
Stall	1	0,50	1,00
Lager/Garage	2	0,50	1,00
Einfamilienhaus	3	0,50	1,00
Mehrfamilienhaus	3	0,50	1,00
Öffentliches Gebäu-	3	0,50	1,00
Hotel/Restaurant	3	0,50	1,00
Gewerbebaute	3	0,50	1,00
Kirche	4	0,90	1,00

Quelle: Borter 1999b, S.121

Anhang 3: Werte für die Letalität (λ) von Personen in Abhängigkeit von der Objektart und der zugehörigen Gebäudeklasse.

Objektart	Gebäudeklasse	Letalität λ (Todesfallwahrscheinlichkeit)	
		Mittlere Intensität	Starke Intensität
Stall	1	0,20	0,50
Lager/Garage	2	0,20	0,50
Einfamilienhaus	3	0,20	0,50
Mehrfamilienhaus	3	0,20	0,50
Öffentliches Gebäu-	3	0,20	0,50
Hotel/Restaurant	3	0,20	0,50
Gewerbebaute	3	0,20	0,50
Kirche	4	0,20	0,50

Quelle: Borter 1999b, S.117

Anhang 4: Angaben für Strukturwerte (W_{St}) und Inhaltswerte (W_{In}) in Abhängigkeit von der Objektart.

Objektart	Strukturwerte W_{St} [CHF]	Inhaltswerte W_{In} [CHF]
Stall	300.000,00	75.000,00
Lager/Garage	50.000,00	12.500,00
Einfamilienhaus	500.000,00	125.000,00
Mehrfamilienhaus	800.000,00	200.000,00
Öffentliches Gebäu-	1.000.000,00	250.000,00
Hotel/Restaurant	1.000.000,00	250.000,00
Gewerbebaute	1.000.000,00	250.000,00
Kirche	1.200.000,00	300.000,00

Quelle: nach Borter 1999b

Anhang 5: Anzahl anwesender Personen in einem Gebäude (N_p) in Abhängigkeit von der Objektart.

Objektart	Anzahl anwesender Personen N_p	Aufenthalt in Stunden/Tag
Stall	1	2
Lager/Garage	1	2
Einfamilienhaus	2,4	20
Mehrfamilienhaus	4,8	20
Öffentliches Gebäude	20	8
Hotel/Restaurant	20	14
Gewerbebaute	6,8	10
Kirche	20	1

Quelle: nach Borter 1999b

Anhang 6: arc macro language (aml) Programm zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit in Wald (Bebi 2000).

```
/*aml zum Plotten von Lawinen nur im engeren Untersuchungsgebiet

/*&args mod expo

grid
display 9999 2
/*display 1040
/*../plots/law
&type variabeln

&type Einstellungen
mapunits meters
pageunits cm
mapextent 687000 164000 689500 166000
pagesize 20 25.1
maplimits 1 2 19.84 25.05
mapscale 23000
mapposition LL LL
&type dgr

/*Lawinenmodellierung
&type Modell

/* Modell mit Variablen:
/*Hangneigung, Gesamtkronenprojektion, lueckenbreite
lawine4 = -5.7473 + 0.1583 * slo5 - 0.0535 * dec + maxluc * 0.1011
gridpaint lawine4 # linear nowrap gray

ex = exp (lawine4)
ex1 = 1 + (exp (lawine4))
lawine5 = ex / ex1 * 100
kill ex
kill ex1

&type Formel
&if [exists lawine5-grid] &then
&sys arc kill lawine5

&type Neigung<30 nicht lawinengefährlich
if (slo5 lt 25) lawine6 = 0
else if (slo5 lt 30 and lawine5 gt 20) lawine6 = 20
else lawine6 = lawine5
endif

kill lawrec
&type reclass mit e00.tab
lawrec = reclass (lawine6n, e00.tab)

nodata = 1
kill law0
law0 = con (isnull (lawrec), 0, lawrec)
kill lawif
```

```
if (%wald% == 60 and law0 lt 1) lawif = 1
else lawif = law0
endif

&type lasat
lasat = ( %wald% * lawif * 0.8 / 100) + 0.4

kill laval
gridpaint %ho% # linear nowrap gray
hil = hillshade (%ho%, 300, 40)
hil5 = resample (hil, 5)
hilm = focalmean (hil5, rectangle, 6, 6)
laval = hilm / 256 * 100
&type laval = Höhenmodell
gridpaint laval # linear nowrap gray
unten dunkel: laval5

kill hil
kill hil5
kill hilm
kill wald80
wald80 = %wald% * 1.4
```

Anhang 7: arc macro language (aml) Programm zur Berechnung des Deckungsgrades als Input-GRID zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit (Bebi 2000).

```
/*Berechnung des Deckungsgrades

grid
display 9999 2

mapunits meters
pageunits cm
mapextent 687000 164000 689500 166000
pagesize 21 29.6
maplimits 1 1 20.1 23.4
mapscale 25000
mapposition cen cen

&s sd9

/*cellsize 5
gridpaint sd9
if (sd9 == 1) schluss = 95
else if (sd9 == 2) schluss = 79
else if (sd9 == 3) schluss = 59
else if (sd9 == 4) schluss = 34
else if (sd9 == 5) schluss = 0
endif

/*Deckungsgrad auf einer Fläche von 40 * 40 metern
dec = focalmean (schluss, rectangle, 8, 8)
gridpaint dec
q
```

Anhang 8: arc macro language (aml) Programm zur Berechnung der Lückenlänge als Input-GRID zur Berechnung der Lawinenanrisswahrscheinlichkeit (Bebi 2000).

```
/* aml zur Berechnung der Lückenlänge für jeden Pixel von 5m

grid
display 9999 2

/*&end

mapunits meters
pageunits cm
mapextent 687000 164000 689500 166000
pagesize 21 29.6
maplimits 1 1 20.1 23.4
mapscale 25000
mapposition cen cen

&s ho = dhm_int
&s sd9 = sd9

/*Berechnung des Lückengrids
&if [exists lu10n-grid] &then
&sys arc kill lu10n
if (sd9 == 5) luck = 1
else luck = 0
endif

lucke = con (isnull (luck), 0, luck)
lucpol = gridpoly (lucke)

/*Höhenlinien ausschneiden
lines = contour (dhm_int, interval, 5)
&type intersect
q
intersect lines lucpol lineluc line

arcedit
ec lineluc
ef arc
select grid-code gt 0
put lu
q

&type info
/* lu = Liniencoverage in 5 m abstand nur in Lucken und neben dem Wald
(Maximal/*lücke = 50 m)
additem lu.aat lu.aat lang 4 5 F 2
info
ARC
SELECT LU.AAT
CALCULATE LANG = LENGTH
RESELECT LANG GT 50
CALCULATE LANG = 50
Q STOP

&type Berechnung der Lückenbreite
/*Berechnung der Lückenbreite
```

```
/*grid

&type lu5
&if [exists lu5n-grid] &then
&sys arc kill lu5n
LU5 = linestats (lu, lang, 5, max, 5)
LU5N = con (isnull (lu5), 0, lu5)
kill lu5

&type lu10
&if [exists lu10n-grid] &then
&sys arc kill lu10n
LU10 = linestats (lu, lang, 5, max, 10)
LU10R = lu10 - 5
LU10N = con (isnull (lu10r), 0, lu10r)
kill lu10
kill lu10r

&type lu20
&if [exists lu20n-grid] &then
&sys arc kill lu20n
LU20 = linestats (lu, lang, 5, max, 20)
LU20R = lu20 - 15
LU20N = con (isnull (lu20r), 0, lu20r)
kill lu20
kill lu20r

&type lu30
&if [exists lu30n-grid] &then
&sys arc kill lu30n
LU30 = linestats (lu, lang, 5, max, 30)
LU30R = lu30 - 25
LU30N = con (isnull (lu30r) , 0, lu30r)
kill lu30
kill lu30r

LUMAX = max (lu5n, lu10n, lu20n, lu30n)
LUMAX40 = con (lumax gt 40, 40, lumax)
kill lumax
gridpaint lumax40

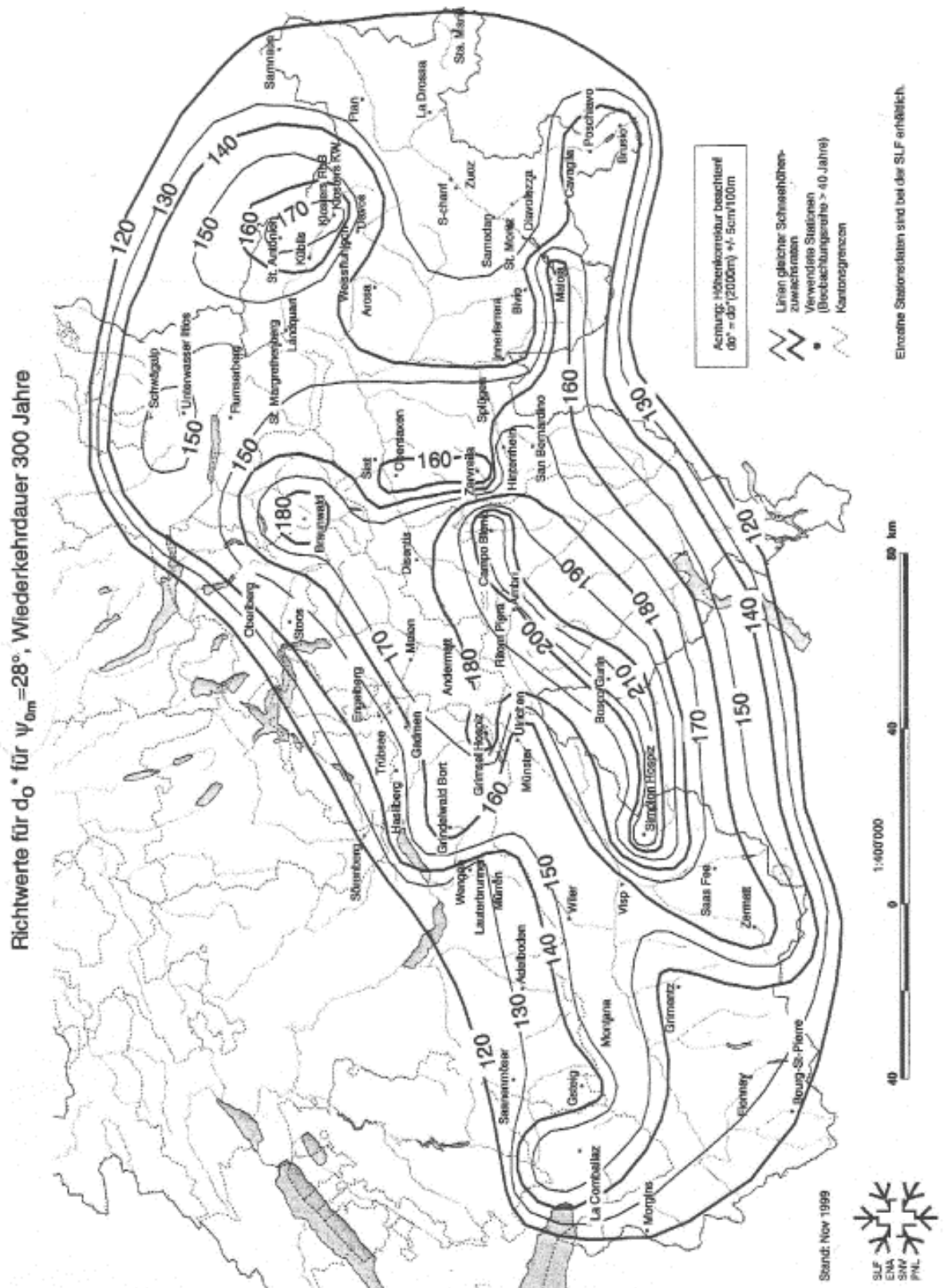
lu40foc = focalmax (lumax40, rectangle, 3, 3)
kill lumax40

/*Flächen ausserhalb Lücken haben eine dem Typ angepasste Minestlücken-
/*breite
gridpaint sd9
kill styp
if (sd9 == 1) styp = 0
else if (sd9 == 2) styp = 2.5
else if (sd9 == 3) styp = 5
else if (sd9 == 4) styp = 10
else if (sd9 == 5) styp = 10
else styp = 0
endif

/*Randeffekt ausschalten
smin = focalmin (styp, rectangle, 3, 3)

/*maxluc = maximum von styp und lu40foc
maxluc = max (styp, lu40foc)
```

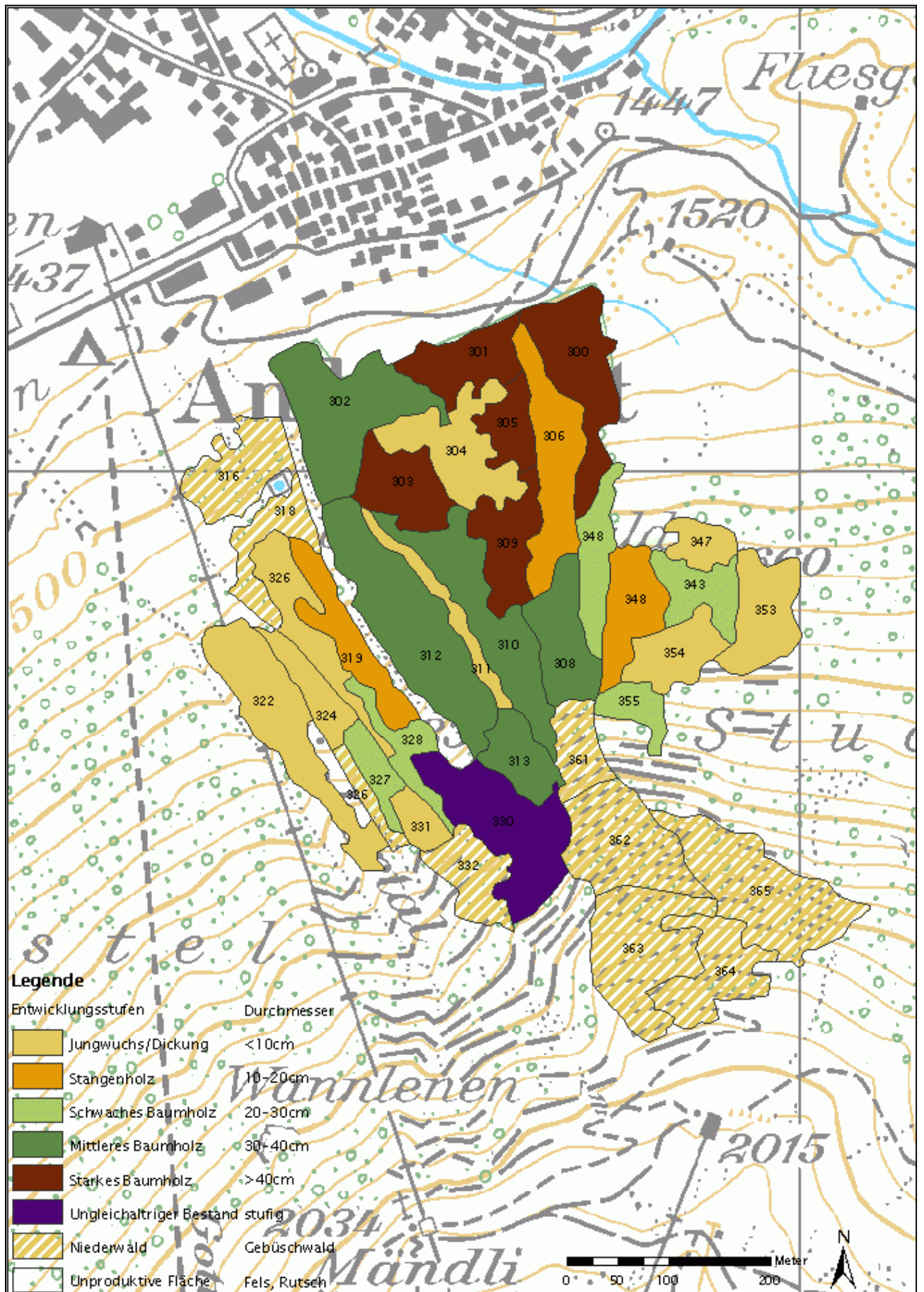
Anhang 9: Richtwerte für d_0^* für $\psi_{0m} = 28^\circ$, Wiederkehrdauer T = 300 Jahre.



Anhang 10: Auszug aus der Legende der Landeskarte der Schweiz 1:25.000.

Gewässer (in der Karte blau)	Gelände	Einzelstrukturen (in der Karte schwarz)	Vegetation (in der Karte grün)	Grenzen (in der Karte schwarz)
Quelle, Bach	Höhenkurven	Haus	Wald, geschlossener Rand	Landesgrenze mit Grenzzeichen und Nummer
Wasserfall	Zählkurven	Buine	Wald, lockerer Rand	Kantonsgrenze mit Grenzstein
Trockenrinne (schwarz)	Zwischenkurve	Abgelegener Gasthof	Offener Wald	Bereichsgrenze mit Grenzstein
Bachverkopfung (schwarz)	Die Äquidistanz der Höhenkurven beträgt im Jura und im Mittelland 10 m, in den Alpen und im Tessin 20 m, jene der Zwischenkurven 5 bzw. 10 m. Die Zählkurven haben einheitlich 100 m vertikalen Abstand. Die Farbe der Höhenkurven kennzeichnet den Boden: Braun = Gelände mit Vegetation Schwarz = Geröll und Fels Blau = Eis, Firn oder Röhrenkurven im See	Haus mit grosser Einfahrt	Einzelbaum/Baumgruppe	Gemeindegrenze mit Grenzstein
Fluss, Altwasser	Senke (blau)	Treibhaus	Gebüsch	Nationalparksgränze (blau)
Flussverkopfung, Wehr (schwarz)	Doline (blau)	Schreibergarten	Hecke	
Sumpf (blau), Tiefland (blau)	Erdbebung (blau)	Kirche	Obstgarten	
See, Ufer	Steinschichtung (schwarz)	Kapelle	Äbten (schwarz)	
unbestimmtes Ufer	Einschnitt (blau)	Friedhof	Baumreihe	
Hafen, Ufermauer (schwarz)	Damm (blau)	Bildstock, Wegkreuz		
Aufläuf (schwarz)	Erdschlipf (blau/schwarz)	Küchlein		
Schiffstation (schwarz)	Kiesgrube (blau/schwarz)	Turm		
Straßenschild (blau)	Lehmgrube (blau)	Hochkamin		
Stammmauer (schwarz)	Steinbruch (schwarz)	Schloss, Burg		
See mit stark wechselndem Wasserstand	Fels, Geröll (schwarz)	Aussichtsturm		
Wasserstand	Gletscher (blau)	Legertank		
Druckleitung einfach	Moräne (schwarz)	Radlesende		
Druckleitung mehrfach		Antennenanlage klein, gross		
Weiter, Teich		Campingplatz		
Brunnen		Deckmal		
Zisterne offen		Platz		
Zisterne gedeckt		Sportplatz, Stadion		
Abwasserreinigungsanlage (schwarz/blau)		Schlesensand		
Schwimmbad (schwarz/blau)		Sprungschanze		
Reservoir (schwarz/blau)		Mauer		
Wasserturm (schwarz/blau)		Trockenmauer		
Elektrizitätswerk mit Schalthalle (schwarz)		Lautsprecherbau		
Hochspannungsleitung mit Mast		Höhle, Grotte		

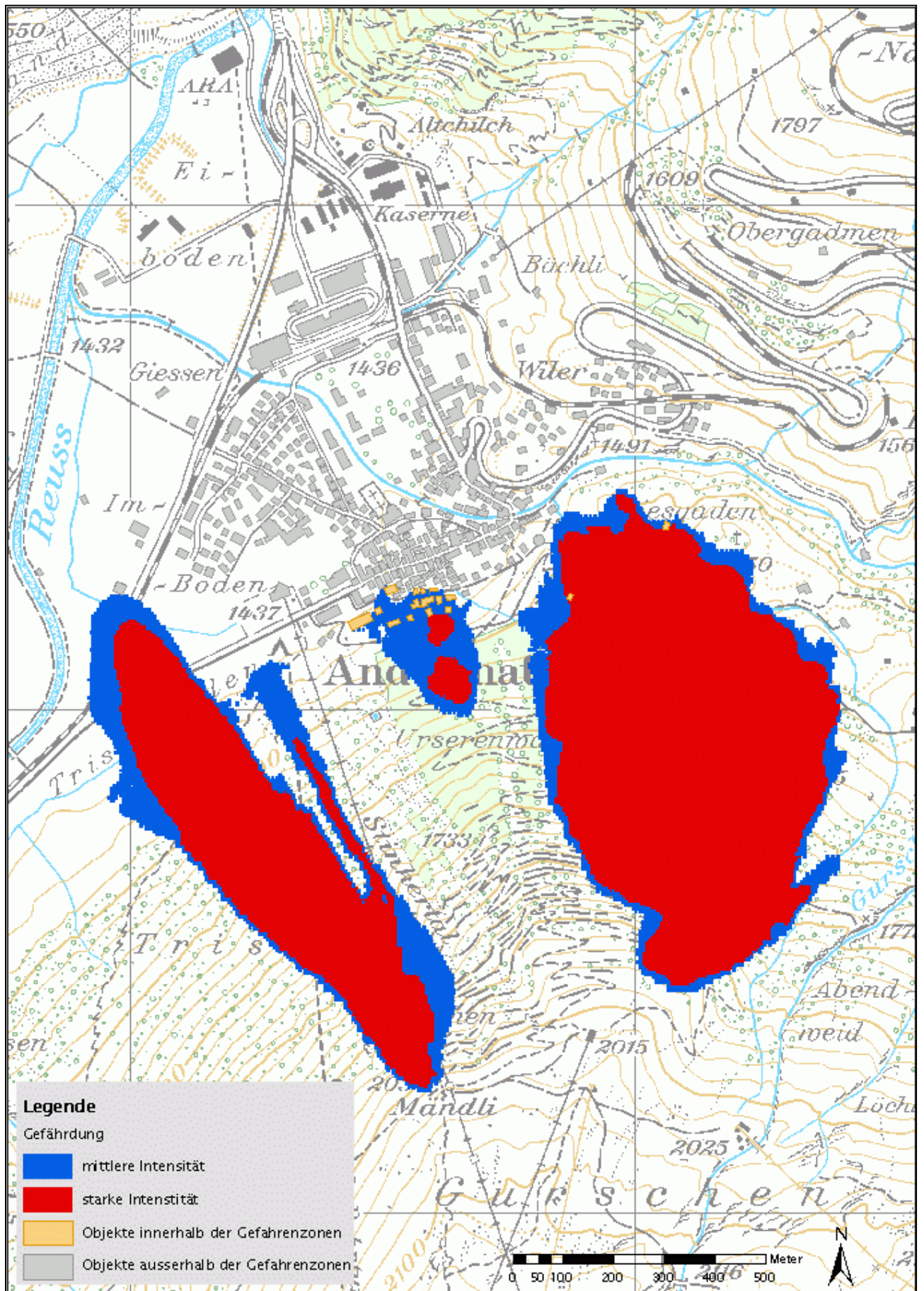
Eine vollständige, farbige Zeichenerklärung erhalten Sie gratis bei jeder Verkaufsstelle.
 Nous trouver la version française de cette légende sur les feuilles de la Suisse occidentale et (en couleur) sur le dépliant «Signes conventionnés» que vous obtiendrez gratuitement auprès de nos délégués officiels.
 La versione italiana di questa leggenda si trova sui fogli del Ticino e della valle del Grigioni italiano, nonché (e colori) nei pieghevola «Segni convenzionati», distribuito gratuito.



Anhang 11: Digitalisierte Bestandeskarte vom Bannwald von Andermatt

Vorlage: Waldbauprojekt Ursern, Bestandeskarte 1994, Gurschen 1:5.000

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landkarte der Schweiz: (c) Bundesamt für Landestopographie



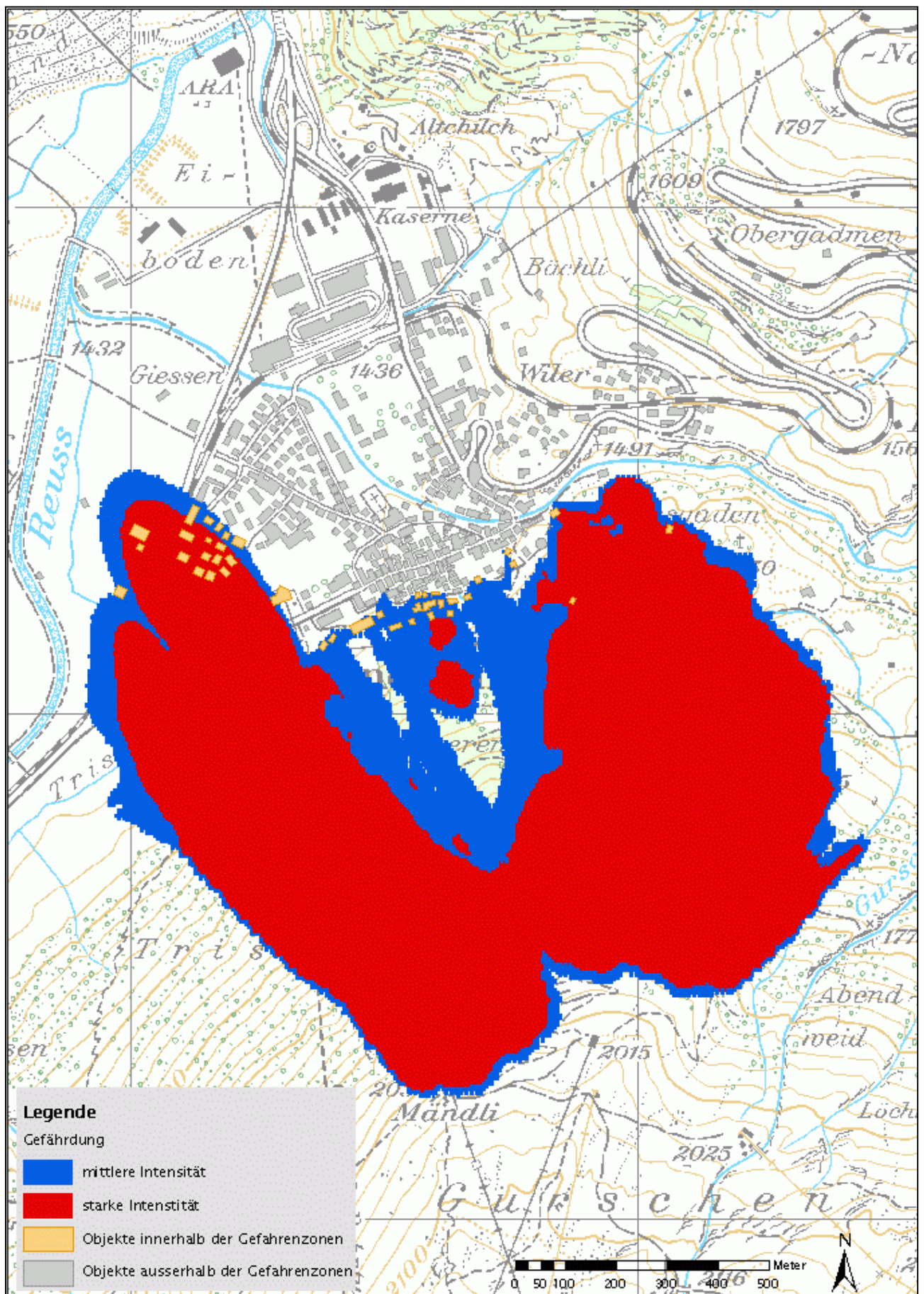
Anhang 12: Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario I: "mit Wald - mit Lawinenverbauung"

mittlere Intensität: Druckwirkung $< 30\text{kN/m}^2$

starke Intensität: Druckwirkung $> 30\text{kN/m}^2$

Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landkarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie



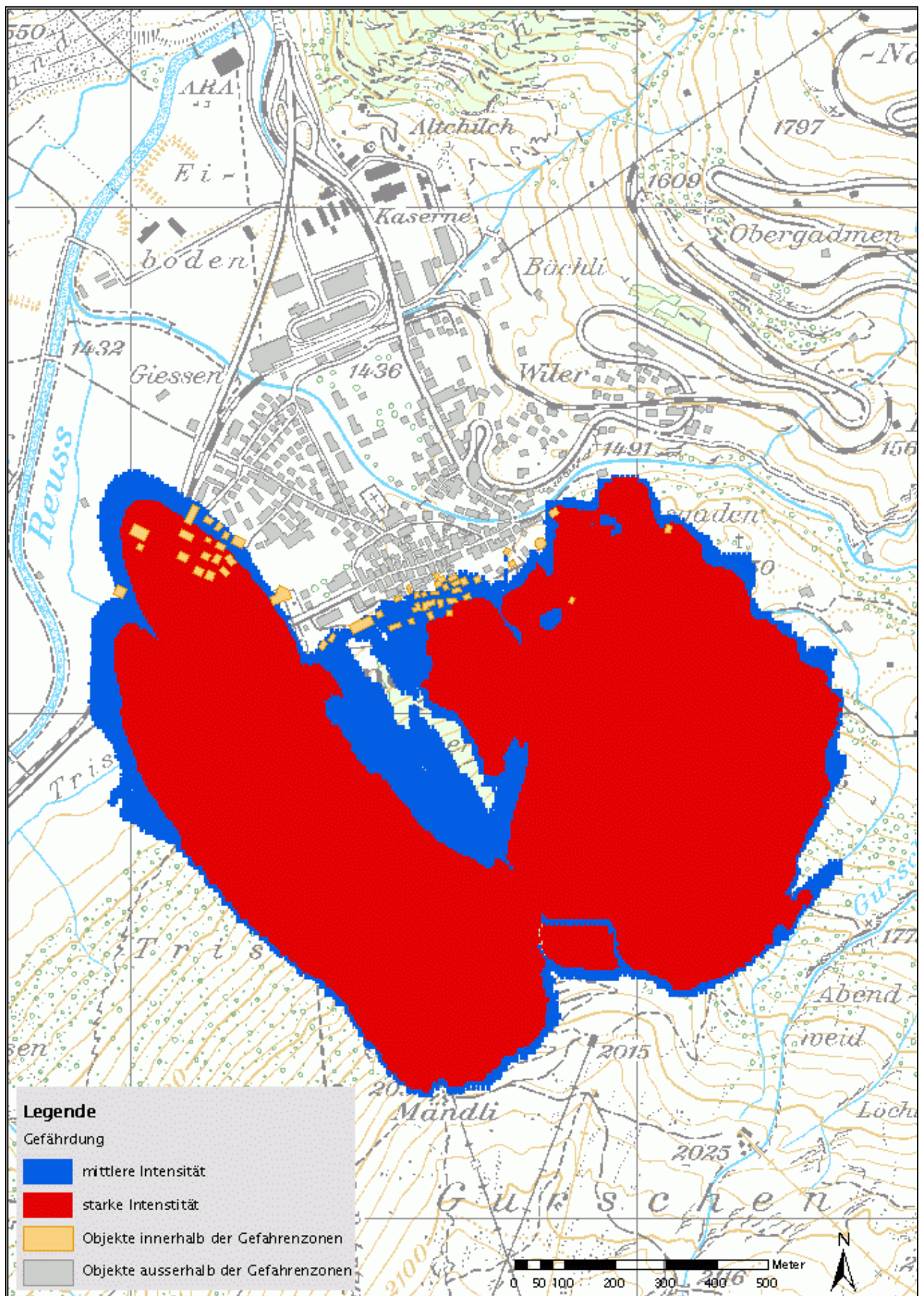
Anhang 13: Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario II: "mit Wald - ohne Lawinenverbauung"

mittlere Intensität: Druckwirkung < 30kN/m²

starke Intensität: Druckwirkung > 30kN/m²

Wiederkehrdauer T = 300 Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie



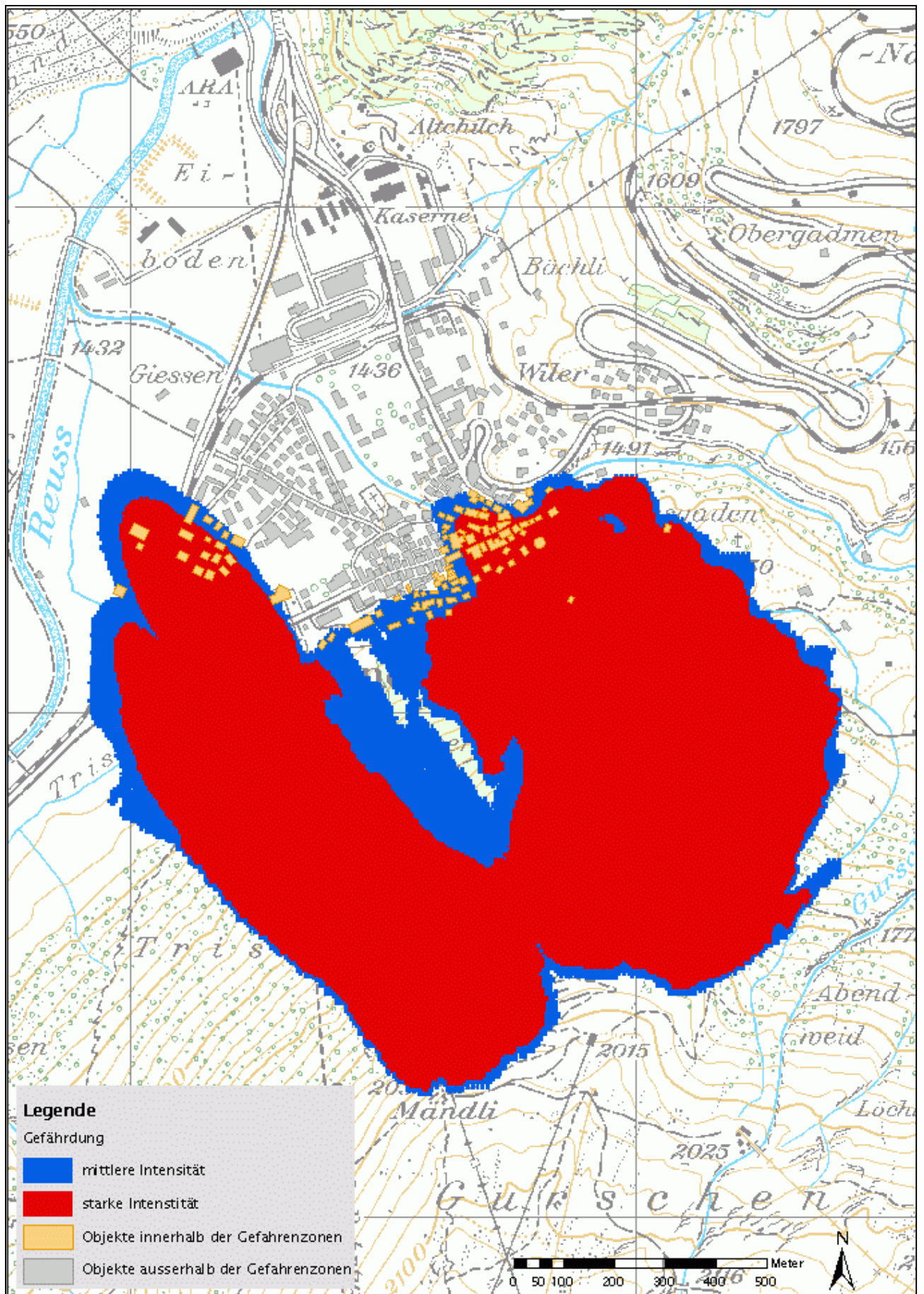
Anhang 14: Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario I: "Wald mit kleiner Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung"

mittlere Intensität: Druckwirkung $<30\text{kN/m}^2$

starke Intensität: Druckwirkung $>30\text{kN/m}^2$

Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

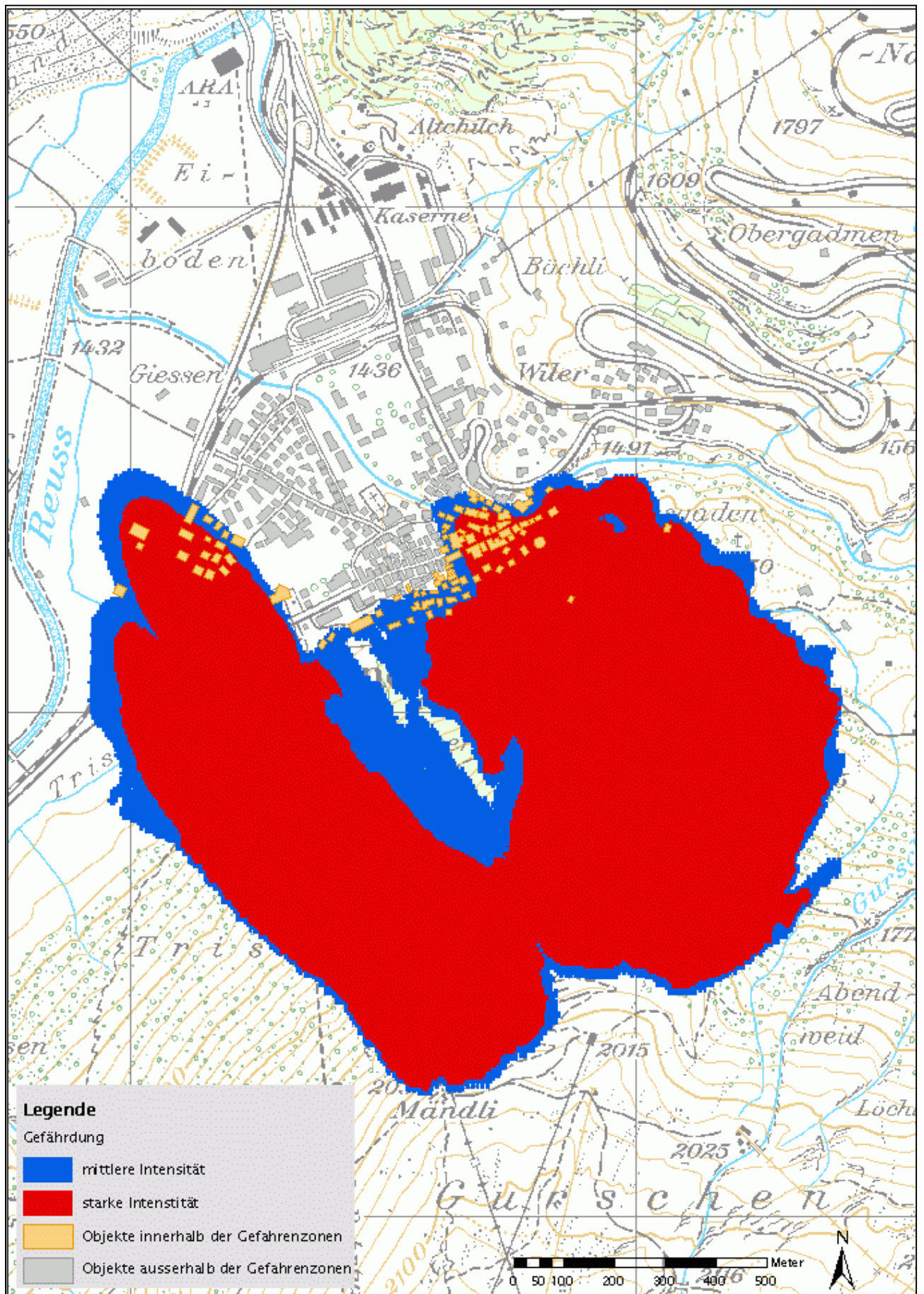


Anhang 15: Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario IV: "Wald mit großer Windwurffläche – ohne Lawinenverbauung"

mittlere Intensität: Druckwirkung < 30kN/m²

starke Intensität: Druckwirkung > 30kN/m²

Wiederkehrdauer T = 300 Jahre



Anhang 16: Objektartenkarte x Intensitätskarte Szenario V: "ohne Wald"

mittlere Intensität: Druckwirkung $< 30\text{kN/m}^2$

starke Intensität: Druckwirkung $> 30\text{kN/m}^2$

Wiederkehrdauer $T = 300$ Jahre

Hintergrund: Digitale Daten aus der Landeskarte der Schweiz: © Bundesamt für Landestopographie

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Masterarbeit zum Thema

**Der Lawinenschutzwald in GIS-basierten Risikoanalysen –
Untersuchung einer Fallstudie:
„Der Bannwald von Andermatt“**

vollkommen selbständig und nur unter Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur angefertigt habe.

Die Verbindung mit Betrieben, staatlichen Organen oder Einrichtungen usw. wurde nur in den in der Arbeit genannten Fällen im Einverständnis mit dem Betreuer aufgenommen.

Dresden, den

.....
Unterschrift