

UNI  
BASEL

Universität Basel

Departement Umweltwissenschaften

Geographisches Institut

Abteilung Physiogeographie und Umweltwandel

# Waldflächenveränderungen im Schweizerischen Nationalpark zwischen 1899 und 2008



**Masterarbeit**

Von

Samuel Berger

Scherpfenweg 1

3506 Grosshöchstetten

031 711 30 89

samuel.berger@stud.unibas.ch

**Leitung**

Prof. Dr. Nikolaus J. Kuhn

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird versucht, Waldflächenveränderungen vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels über einen Zeitraum von 109 Jahren im Schweizerischen Nationalpark sichtbar zu machen. Anhand von alten Siegfriedkarten (Topografischer Atlas der Schweiz), mit Zeitständen um 1899 und 1938 und mit der Landeskarte der Schweiz, Zeitstände 1973 und 2008, werden mithilfe eines Geographischen Informationssystems (ArcGIS, Version 10.0) Waldflächen digitalisiert. Anhand von Höhenmodellen und deren Derivate werden Faktoren wie Höhe über Meer, Hangneigung und Hangausrichtung in Zusammenhang mit der räumlichen Verbreitung von Waldflächen gesetzt. Durch Einbezug verschiedener Karten kann die Geologie, Geomorphologie, Bedeckung, Substrat und Vegetation mitberücksichtigt werden.

Da der Schweizerische Nationalpark seit dessen Gründung im Jahre 1914 keinen direkten anthropogenen Einflüssen mehr ausgesetzt war, wird angenommen, dass sich die Waldfläche sowohl flächenmässig wie auch in grössere Höhen ausdehnt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass anfänglich ein starker Waldeinwuchs stattfindet, der ehemalige alpwirtschaftlich genutzte Flächen wiederbesiedelt und später ein Abflachen des Anstiegs und der Fläche zu verzeichnen ist.

Die Resultate zeigen, dass sich die Waldfläche über den Gesamtzeitraum um 1497 ha zugenommen und um 93 Meter in die Höhe ausgedehnt hat. Eine Ausnahme bildet die Waldfläche um 1973, die geringfügig kleiner ist als 1938, höchstwahrscheinlich aufgrund der Umstellung der Methodik bei der Kartenherstellung. Mit zunehmender Höhe nimmt die Waldfläche ab, mit der Zeit breitet sich der Wald in höheren Lagen stärker aus, die Peaks verschieben sich im Laufe der Zeit in grössere Höhen. Dies sind mögliche Anzeichen des Klimawandels als Ursache für die veränderte Verbreitung des Waldes. Die grössten Zunahmen finden sich auf Nord- und Westhängen, dies ist höchstwahrscheinlich wegen der häufigen alpwirtschaftlich Nutzung auf Südhängen, die das Ansiedeln von Waldflächen durch den regelmässigen Düngeeintrag noch Jahrzehnte nach der Aufgabe behindern. Im Waldgrenzbereich, zwischen 2200 und 2400 m ü. M. finden sich die grössten Zunahmen spezifisch auf Südwesthängen. Diese Umkehr der Verteilung von tieferen zu höheren Lagen scheint im alpinen Raum typisch, eine kausale Erklärung wurde aber noch nicht gefunden. Oberhalb der Baumgrenze ist die Verteilung der Ausrichtung mit 11 bis 13% pro Klasse ausgeglichen.

Die grössten Zunahmen bezüglich Hangneigung finden sich auf 15-25° Neigung, die Verteilung ist aber nur 2% höher als in den Klassen 2-15 und 25-35°, eine generelle Aussage kann hier nur insofern gemacht werden, als dass ab 38° Neigung die Bedingungen für die Etablierung von Bäumen und Wäldern nicht mehr geeignet scheint. Im Waldgrenzbereich

befinden sich die grössten Zunahmen ebenfalls 15-25 und 2-15° Neigung, auffallend ist die äusserst kleine Zunahme auf Hängen mit 0-2° Neigung, wahrscheinlich behindert hier der regelmässig angelieferte Hangschutt in flachen Bereichen (Hangfuss) ein Ansiedeln von Bäumen. Über der Baumgrenze befindet sich der grössten Flächenanteil der Neigung auf 25-35 und 35-45° Neigung, einer weiteren Besiedlung dieser Bereiche sind also Grenzen gesetzt.

Bei der Analyse der fünf grössten Zunahmen im Waldgrenzbereich lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen: Die rasche Zunahme in den ersten zwei Perioden mit einem Abflachen der Zunahme in der letzten Periode sind, von der Fläche 1 abgesehen, bei allen Zunahmen zu sehen und lassen sich durch die Forst- und Waldgeschichte relativ gut dokumentieren. Die Zunahmen befinden sich vor allem auf Südwest- und Westhängen, mit Hangneigungen von 2-15 und 15-25°, auf lockerem, karbonatreichem, teils dolomitischen Untergrund, auf ehemaligen alpinen Wiesen und Matten. Das Resultat lässt sich gut mit vorhandener Literatur belegen. Einerseits besiedeln Bergföhren als Pionierpflanzen präferiert lockeren, zum Teil noch geomorphologisch aktiven Untergrund, andererseits nutzten Bergamasker Schafhirten bis ins 20 Jahrhundert Alpweiden extensiv, das heisst, dass der Einfluss des damaligen Düngeeintrages nicht mehr allzu hoch sein dürfte.

Die Analyse der Verteilung der Faktoren oberhalb der Baumgrenze auf 2400 bis 2600 m. ü. M. brachte folgendes zu Tage: „Hänge mit Neigung zwischen 25-45° und relativ gleichmässiger Ausrichtung, ein Substrat mit Lockermaterial und hohem Karbonatanteil, auf geomorphologisch aktiven Flächen wie Terrassen, Schutt, Sackungen, verschiedenen Denudationsflächen, teilweise von Grasheiden bewachsen.“ Die Resultate zeigen, dass für die Besiedlung gewisse negative Faktoren dazukommen, generell aber die Bedingungen für die Besiedlung, auch aufgrund der Verteilung des Reliefs, kein „summit syndrome“ festzustellen ist. Diese Resultate lassen die Aussage zu, dass sich aufgrund des Klimawandels im SNP auch in Zukunft der Waldgrenzbereich in höhere Lagen ausbreiten wird.

Die Hauptkomponentenanalyse im Waldgrenzbereich brauchte fünf Hauptkomponenten um das 95% Vertrauensniveau zu bestimmen, sehr hohe Korrelationen ergeben die Waldfläche mit Bedeckung, Substrat mit Neigung, Ausrichtung mit Vegetation und Neigung mit Ausrichtung. Diese Ergebnisse lassen aufgrund der relativ grossen Verteilung der einzelnen Hauptkomponenten kaum Schlüsse zu über die dominierenden Faktoren, welche eine Ansiedlung von Bäumen, respektive Wald, ermöglichen.

Mithilfe der offen und geschlossenen Waldflächenkartierungen in der letzten Untersuchungsperiode konnte Einwuchs von echtem Aufwärtsschreiten getrennt werden: Einwuchs zeigt sich bis in Höhen von 2300 m ü. M., echtes Aufwärtsschreiten ist vor allem

im Höhenband von 2200-2250 zu finden. Ab 2250 ist kein Einwuchs mehr festzustellen, jedoch hatte der Waldgrenzbereich dann am stärksten zugenommen, dies ist ein starkes Indiz für Klimawandel als Ursache des Anstiegs in der Fläche.

## Vorwort

Im Rahmen dieser Masterarbeit konnte ich Aspekte meiner Bachelorarbeit „Waldflächenveränderungen in der Gemeinde Trub zwischen 1899 und 2005“ aufgreifen und vertieft analysieren. Der ausserordentlich hohe Privatwaldbesitz und dessen starke Fragmentierung, beispielsweise lagen damals praktisch keine Forststatistiken vor, verhinderte eine Analyse von landschaftsbildenden Faktoren wie Hangneigung, Ausrichtung, Geologie, und Geomorphologie. Die Motivation lag nun darin, ein Gebiet zu finden, welches über einen ähnlichen Zeitraum keinem direkten Einfluss durch den Menschen ausgesetzt war. Das Gebiet des Schweizerischen Nationalparks eignet sich dafür hervorragend: Einerseits kann direkter anthropogener Einfluss seit der Parkgründung im Jahre 1914 ausgeschlossen werden, andererseits wird und wurde schon viel Forschungsarbeit im Nationalparkgebiet geleistet, auf welche ich mich berufen konnte.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich im Laufe dieser Masterarbeit unterstützt haben:

Prof. Dr. N. J. Kuhn, der mich bei der Auswahl des Untersuchungsgebietes ermutigte und mich stets mit hilfreichen Anmerkungen unterstützte.

Dr. Rudolf Haller, der mir als Verantwortlicher des GIS-Servers uneingeschränkten Zugang zu digitalen Daten gewährte und als Ansprechpartner etliche Telefonate mit mir führte.

Harald Hikel, der mir als Doktorand Physiogeographie wertvolle Hinweise bezüglich der GIS-Analyse geben konnte.

Stefan Neudeck, der mir als GIS-Entwickler bei Swisstopo und Experte älterer Kartenwerke die Kartengenauigkeit erläutern konnte.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinem Vater bedanken, welcher die Arbeit zur Korrektur durchgelesen hat und allen weiteren Personen, die in gewisser Weise zu dieser Arbeit beigetragen haben.

<b>Inhalt</b>	V
<b>Zusammenfassung</b>	I
<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	XI
<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	XIV
<b>Verzeichnis der Karten</b>	XV
<b>1. Einleitung</b>	1
1.1 Forschungsfragen und Hypothesen	2
1.2 Theoretische Definitionen	3
1.2.1 <i>Begriffe</i>	3
1.2.2 <i>Waldgrenze</i>	3
1.2.3 <i>Baumgrenze und Waldgrenzbereich</i>	4
1.2.4 <i>Krummholzgrenze und Krummholzbereich</i>	4
1.2.5 <i>Bauminselfn oberhalb des Krummholzbereichs</i>	6
1.2.6 <i>Andere Grenzen wie das „summit syndrome“</i>	6
<b>2. Stand der Forschung</b>	7
2.1 Entwicklung der Waldgrenzforschung im Laufe der Zeit	7
2.2 Jüngere Forschung	8
2.2.1 <i>Klimatischer Waldgrenzbereich</i>	8
2.2.2 <i>Anthropogener Waldgrenzbereich</i>	8
2.2.3 <i>Einfluss von Prozessen auf lokaler Ebene</i>	9
2.2.4 <i>Zusammenfassung der wichtigsten Faktoren</i>	11

<b>3. Untersuchungsgebiet</b>	12
3.1 Geographische Lage	12
3.2 Geomorphologie und Geologie	13
3.3 Klima und Massenerhebungseffekt	16
3.4 Klimawandel	16
3.5 Klimatisches Baumwachstum	17
3.6 Forst- und Waldgeschichte	18
3.6.1 <i>Bevölkerungsentwicklung</i>	18
3.6.2 <i>Siedlungsentwicklung</i>	19
3.6.3 <i>Alpwirtschaft und Landwirtschaft</i>	19
3.6.4 <i>Arten des Holzbedarfs</i>	19
3.6.4.1 Rodungen	20
3.6.4.2 Rodungen für die Alp- und Landwirtschaft	20
3.6.4.3 Köhlerei	21
3.6.4.4 Kalkbrennerei	21
3.6.4.5 Bergbau	22
3.6.4.6 Holzbedarf der Saline Hall und des Tirols	22
3.6.4.7 Holzbedarf der Dorfbevölkerung ausserhalb des SNP	23
3.6.5 <i>Zusammenfassung der Forst- und Waldgeschichte</i>	23

<b>4. Methodik</b>	24
4.1 Methodologie und Datengrundlagen	24
4.1.1 <i>Siegfriedkarte, Zeitstände 1899 und 1938</i>	24
4.1.2 <i>Landeskarte der Schweiz, Zeitstände 1973 und 2008</i>	25
4.2 Waldausscheidung	25
4.2.1 <i>Topografischer Atlas der Schweiz, 1899/1938</i>	25
4.2.2 <i>Landeskarte der Schweiz, 1973/2008</i>	25
4.2.2.1 Geschlossener Wald	26
4.2.2.2 Offener Wald	26
4.2.2.3 Waldrand	26
4.2.3 <i>Waldausscheidungskriterien bei beiden Kartenwerken</i>	26
4.2.4 <i>Waldausscheidung bei Karten des SNP</i>	26
4.2.5 <i>Vorstossende Baumgrenze (Bauminseln)</i>	27
4.3 Analyse von Höhe, Ausrichtung und Neigung	27
4.4 Analyse der Morphodynamik	27
4.5 Analyse des geologischen Untergrundes	28
4.6 Analyse von sonstigen landschaftsbildenden Elementen	28
4.7 Vorgehen	28
4.7.1 <i>Waldflächenveränderungen, Zu- und Abnahmen</i>	28
4.7.2 <i>Höhenbänder</i>	29
4.7.3 <i>Hangneigung (Slope)</i>	29

4.7.4 Hangausrichtung (Aspect)	30
4.7.5 Vorgehen bei der Analyse von weiteren Faktoren	30
4.7.6 Hauptkomponentenanalyse (Principle Component Analysis PCA)	30

## 5. Ergebnisse

5.1 Veränderung der Gesamtwaldfläche im Laufe der Zeit	33
5.2 Zunahmen und Abnahmen	33
5.3 Waldflächen in Abhängigkeit der Höhenlage	48
5.4 Waldflächen in Abhängigkeit der Hangausrichtung	51
5.5 Waldflächen in Abhängigkeit der Hangneigung	52
5.6 Einwuchs	54
5.7 Oberste Standorte des Waldgrenzbereichs	56
5.8 Waldflächenveränderungen im Waldgrenzbereich	56
5.8.1 Analyse der fünf grössten Zunahmen zwischen 1899 und 2008 im Waldgrenzbereich zwischen 2200 und 2400 m ü. M.	59
5.8.2 Gruppierung der Faktoren der fünf grössten Zunahmen	62
5.8.3 Analyse der grössten Abnahmen im Waldgrenzbereich	66
5.8.4 Hauptkomponentenanalyse (PCA)	66
5.8.5 Verschneidung der Faktoren der Waldflächenzunahme	67
5.9 Verteilung der Faktoren oberhalb Baumgrenze	68
5.10 Zusammenfassung der Ergebnisse	69

<b>6. Diskussion</b>	71
6.1 Datengrundlage	71
6.1.2 <i>Validierung des zentralen Ergebnisses</i>	72
6.1.3 <i>Analyse von Höhe über Meer, Ausrichtung und Neigung</i>	72
6.1.4 <i>Klassifizierung bei Daten des SNP</i>	73
6.2 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	73
6.2.1 <i>Ergebnisse über den Gesamtzeitraum zwischen 2000 und 2400</i>	73
6.2.2 <i>Klimasignal</i>	74
6.2.2.1 <i>Potentielle Waldgrenze (klimatische Waldgrenze)</i>	74
6.2.3 <i>Waldflächen in Abhängigkeit der Hangausrichtung</i>	75
6.2.4 <i>Waldflächen in Abhängigkeit der Hangneigung</i>	75
6.2.5 <i>Waldflächenveränderungen im Waldgrenzbereich</i>	76
6.2.6 <i>Analyse der grössten Abnahmen im Waldgrenzbereich</i>	77
6.2.7 <i>Analyse der fünf grössten Zunahmen zwischen 1899 und 2008 im Waldgrenzbereich zwischen 2200 und 2400 m ü. M.</i>	77
6.2.8 <i>Gruppierung der Faktoren der fünf grössten Zunahmen</i>	80
6.2.9 <i>Hauptkomponentenanalyse (PCA)</i>	82
6.2.10 <i>Verschneidung der Faktoren der Waldflächenzunahme</i>	82
6.2.11 <i>Verteilung der Faktoren oberhalb Baumgrenze</i>	83
6.2.12 <i>Einwuchs</i>	84
6.3 Einordnung der Ergebnisse in die aktuelle Forschung	84

6.4 Weiterführende Überlegungen und Ausblick	86
6.4.1 Auswirkungen <i>auf globaler Ebene</i>	87
6.5 Kritik	88
<b>7. Fazit</b>	89
<b>8. Literaturverzeichnis</b>	90

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Wälder im SNP: Fuorcla Murter, Blick Richtung Munt la Schera	I
Abbildung 2: Vegetationsgrenzen: Piz Laschadurella, Blick von Fuorcla Murter nach Nordost	3
Abbildung 3: Waldgrenzbereich: Blick vom Val da Stabelchod nach Murteras da Stabelchod	4
Abbildung 4: Krummholzbereich (Kampfzone): Linke Talseite des Val dal Botsch	5
Abbildung 5: Alpine Matten: Übergang vom Val dal Botsch ins Val da Stabelchod	5
Abbildung 6: Summit Syndrome am Beispiel des Piz Laschadurella	6
Abbildung 7: Schweizerkarte mit Kanton Graubünden und Untersuchungsgebiet SNP	12
Abbildung 8: Untersuchungsgebiet Schweizerischer Nationalpark (ohne Seenplateau Macun)	12
Abbildung 9: Historische Grenzen des SNP	13
Abbildung 10: Girlandenrasen: Oberhalb des God Margunet	15
Abbildung 11: 10-jähriges Mittel der Temperaturen auf der Alp Buffalora	17
Abbildung 12: 30-jähriges Mittel der Temperaturen auf der Alp Buffalora	17
Abbildung 13: Anzahl Tage pro Jahr mit durchschnittlich $\geq 6.5^{\circ}$ C	18
Abbildung 14: Windrose mit Hangneigungsrichtungen	30
Abbildung 15: Punktwolke im Raum	31
Abbildung 16: 1. Hauptkomponente	31
Abbildung 17: 2. Hauptkomponente	31
Abbildung 18: Zunahme der Waldfläche über die drei Zeiträume	48
Abbildung 19: Summenkurve der Waldflächenzunahmen über die drei Zeiträume	48
Abbildung 20: Relative Flächenverteilung nach 50 m Höhenintervall	49

Abbildung 21: Summenkurve relative Zunahmen mit der Höhe	49
Abbildung 22: Abnahme der Waldfläche über die drei Zeiträume	50
Abbildung 23: Nettozunahmen über die drei Zeiträume	50
Abbildung 24: Waldflächenzunahme nach Ausrichtung	51
Abbildung 25: Waldflächenabnahme nach Ausrichtung	51
Abbildung 26: Flächenverteilung in Prozent der Gesamtfläche	51
Abbildung 27: Relative Waldflächenzunahme nach Ausrichtung	51
Abbildung 28: Relative Waldflächenabnahme nach Ausrichtung	51
Abbildung 29: Relative Nettowaldflächenveränderungen nach Ausrichtung	52
Abbildung 30: Waldflächenzunahme nach Hangneigung	52
Abbildung 31: Waldflächenabnahme nach Hangneigung	52
Abbildung 32: Rel. Verteilung der Hangneigungsklassen im gesamten Einzugsgebiet	53
Abbildung 33: Rel. Waldflächenzunahme nach Hangneigung	53
Abbildung 34: Rel. Waldflächenabnahme nach Hangneigung	53
Abbildung 35: Relative Waldflächenveränderungen nach Hangneigung	53
Abbildung 36: Einwuchs von Waldflächen von 1973 bis 2008 in Abhängigkeit der Höhe	54
Abbildung 37: Rel. Einwuchs von Waldflächen von 1973 / 2008 in Abh. der Höhe	54
Abbildung 38: Nettozunahmen von 1973 bis 2008 ohne Einwuchs	55
Abbildung 39: Relative Nettozunahme ohne Einwuchs	55
Abbildung 40: Oberste Standorte des Waldgrenzbereichs im Laufe der Zeit	56
Abbildung 41: Zunahmen im Waldgrenzbereich zwischen 2200 und 2400 m ü. M.	57

Abbildung 42: Abnahme im Waldgrenzbereich über die drei Zeiträume	57
Abbildung 43: Nettozunahme von 2200 bis 2400 m ü. M.	58
Abbildung 44: Relative Nettozunahmen zwischen 2200 und 2400 m ü. M.	58
Abbildung 45: Prozentuale Verteilung der häufigsten geomorphologischen Klassen	63
Abbildung 46: Prozentuale Verteilung der häufigsten Bedeckungsklassen	63
Abbildung 47: Prozentuale Verteilung der häufigsten drei Vegetationsklassen	64
Abbildung 48: Prozentuale Verteilung der häufigsten Substratklassen	64
Abbildung 49: Prozentuale Verteilung der häufigsten geologischen Einheiten	64
Abbildung 50: Prozentuale Flächenausrichtung	65
Abbildung 51: Prozentuale Flächen nach Neigung	65
Abbildung 52: Verteilung der häufigsten Substratklassen [%]	68
Abbildung 53: Verteilung der häufigsten geologischen Klassen [%]	68
Abbildung 54: Verteilung der häufigsten Vegetationsklassen [%]	68
Abbildung 55: Verteilung der häufigsten Bedeckungsklassen [%]	68
Abbildung 56: Prozentuale Verteilung der Hangausrichtung	69
Abbildung 57: Prozentuale Verteilung der Hangneigung	69
Abbildung 58: Oberste, gemittelte Baumstandorte mit pot. Baumgrenze	74

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Klassifizierung der Hangneigungsrichtung nach Oelkers (1984)	30
Tabelle 2: Veränderung der Waldfläche über den gesamten Höhenbereich	33
Tabelle 3: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme	59
Tabelle 4: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme	60
Tabelle 5: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme	60
Tabelle 6: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme	61
Tabelle 7: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme	62
Tabelle 8: Waldflächenabnahmen auf der rechten Talseite des Val Trupchun	66
Tabelle 9: Hauptkomponentenanalyse der Zunahmen von 1899 bis 2008 im Bereich 2200 bis 2400 m ü. M.	66
Tabelle 10: Unterschiedliche Flächenzunahmen	72

## **Verzeichnis der Karten**

Karte 1: Waldflächenveränderungen im SNP zwischen 1899 und 1938	34
Karte 2: Waldflächenveränderungen im SNP zwischen 1938 und 1973	35
Karte 3: Waldflächenveränderungen im SNP zwischen 1973 und 2008	36
Karte 4: Waldflächenveränderungen im Waldgrenzbereich zwischen 1899 und 2008	37
Karte 5: Die fünf grössten Zunahmen im Waldgrenzbereich zwischen 1899 und 2008	38
Karte 6: Waldflächenabnahme im Val Trupchun zwischen 1899 und 2008	39
Karte 7: Morphodynamik mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008	40
Karte 8: Geologie mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008	41
Karte 9: Substrat mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008	42
Karte 10: Vegetation mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008	43
Karte 11: Bedeckung mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008	44
Karte 12: Einwuchs und echtes Aufwärtsschreiten zwischen 1973 und 2008	45
Karte 13: Waldflächenabnahme von 1938 bis 1973 im Vergleich mit Luftbild 1988	46
Karte 14: Waldflächenabnahme von 1938 bis 1973 im Vergleich mit Luftbild 1988	47

## 1. Einleitung

Eine der auffallendsten Vegetationsgrenzen der Alpen, der Übergangsbereich von Wald zu Bäumen, zu Krummholz, ist bei angemessenem Abstand dazu, deutlich zu sehen. Wandert man beispielsweise auf der einen Talseite des Val Trupchun (Schweizerischer Nationalpark) könnten höchstwahrscheinlich die meisten Menschen die Waldgrenze als eine mehr oder weniger scharfe Linie abgrenzen. Versucht man andererseits die Waldgrenze auf der Talseite zu bestimmen, auf der man sich gerade befindet, ist dies schon deutlich schwieriger. Die Baumbestände lichten sich, der Bestockungsgrad nimmt ab, der oberste Baum ist noch zu erkennen, der oberste Baumkrüppel wird unter Umständen nur noch von einem Botaniker erkannt.

Dieses Beispiel soll verdeutlichen, wie schwierig es ist, die Wald- oder Baumgrenze exakt zu definieren und zu bestimmen.

Die höchstgelegenen Waldhabitate der Alpen sind räumlich sehr dynamisch, Bäume wachsen beispielsweise verstärkt in Lücken ein, die nahe der Waldgrenze liegen, der Wald kann sich auf gewissen Standorten in die Höhe ausbreiten, auf andern nicht (*Motta & Nola 2001, Paulsen et al. 2000, Körner 2003.*) Die Gründe dafür sind lokal sehr unterschiedlich, auf kleinerem Massstab sollten jedoch gewisse Trends erkennbar werden.

Eine mögliche Ursache für Waldgrenzverschiebungen ist der Klimawandel. Alpine Waldgrenzen sind global gesehen durch klimatische Faktoren determiniert (*Körner 2003, Körner & Paulsen 2004*) und reagieren sensibel auf erhöhte Temperaturen (*Theurillat & Guisan 2001*). Der globale Temperaturanstieg ist in den Schweizer Alpen besonders ausgeprägt. Beniston et al. 2003 konnte zeigen, dass der Temperaturanstieg im letzten Jahrhundert in den Europäischen Alpen über 2°C beträgt, also deutlich mehr als der globale Anstieg um ca. 0.7°C (*Beniston et al. 2003*). Gehrig- Fasel et al. 2007 untersuchten die Ursachen von Waldgrenzverschiebungen in den Schweizer Alpen mit besonderem Augenmerk auf Klimawandel und Landnutzungsänderungen. Der Beobachtungszeitraum von 1985 bis 1997 lies bei dieser Untersuchung wenig Rückschlüsse auf einen möglichen Einfluss des Klimawandels zu, die Aufgabe der Landnutzung wurde als Hauptgrund identifiziert (*Gehrig-Fasel et al. 2007*). Bei dieser Studie ist anzumerken, dass insbesondere Wälder in höheren Lagen, eine verzögerte Reaktion auf Temperaturschwankungen zeigen (*Camarero & Gutierrez 2004*). Eine allenfalls sichtbare Waldgrenzverschiebung über einen Zeitraum von ca. 100 Jahren, würde wegen Trägheit, bzw. verzögerter Reaktion von höchstgelegenen Wäldern auf Klimaveränderungen, das Klima in der „Vergangenheit“ repräsentieren (*Heiri et al. 2006*). In unserem Fall würde die aktuelle Waldfläche etwa die Klimaverhältnisse zwischen 1900 und 1950 darstellen, welche auch schon anthropogen

beeinflusst sind, d.h. ca.  $0.75^{\circ}\text{C}$  über dem Mittel liegen (*Albrecht et al.* 2002). Die alpine Waldgrenze eignet sich dank dessen starker Resilienz gegenüber Umweltfaktoren als besonders guter Indikator für Klimaschwankungen. Sie reagiert zwar zeitlich versetzt auf den Klimawandel, aber nicht auf kurzzeitige Klimaschwankungen, sofern sie nicht anthropogen oder durch Extremereignisse beeinflusst wird (*Körner* 2012).

Hier setzt nun meine Arbeit an: Der grosse Vorteil beim Untersuchungsgebiet „Schweizerischer Nationalpark“ (Abk. SNP) ist das Ausschliessen von direkten anthropogenen Störungen in den Kernbereichen seit der Parkgründung im Jahre 1914. Indirekte anthropogene Einflüsse, wie bspw. die relativ hohe Huftierdichte, haben den Sukzessionsverlauf ausgewählter Bergföhrenflächen im Nationalpark nur minimal gestört (*Krüsi & Moser* 2000), allenfalls hätte die deutliche Zunahme an Phanerogamenarten auf intensiv beästen Flächen eventuell einen Einfluss auf die Sukzession (*Schütz et al.* 2000). Des Weiteren könnte auch ein Vergleich der verschiedenen Bereiche, welche im Laufe der Zeit den Nationalpark räumlich erweitert haben, analysiert und verglichen werden (*Haller* 2011).

## 1.1 Forschungsfragen und Hypothesen

Gibt es im Schweizerischen Nationalpark Waldflächen, die sich seit 1899 in höhere Lagen ausgebreitet haben und weder einer Landnutzungsaufgabe, noch rezenten morphodynamischen Prozessen, sowie Feuer oder anderen Störungen (z.B. Wildverbiss, Beweidungsdruck) zuzuschreiben sind? Wie stark ist die Zunahme oder gegebenenfalls eine Abnahme der Waldgrenzfläche? Sind gewisse Muster erkennbar im Zusammenhang mit Hangneigung, Exposition und geologischem Untergrund? Lassen sich gegebenenfalls gewisse Waldgrenzflächen dem Klimawandel zuordnen?

1. Hypothese: „Vor dem Hintergrund des Klimawandels und da der direkte anthropogene Einfluss in den Kernbereichen des SNP seit dessen Gründung im Jahre 1914 ausgeschlossen werden kann, sollte sowohl ein Anstieg der Waldfläche, als auch ein Aufwärtsschreiten des Waldgrenzbereichs in grössere Höhen, stattfinden.“

2. Hypothese: „Da der Waldgrenzbereich verzögert auf Klimaschwankungen reagiert und nach einer Nutzungsaufgabe erstmals Einwuchs der grösste Anteil der Waldflächenzunahme ausmacht, sollte die Waldfläche am Anfang am stärksten zunehmen und gegen Ende des Untersuchungszeitraumes am schwächsten.“

## 1.2 Theoretische Definitionen

Im folgenden Kapitel werden zunächst kurz die wichtigsten Begriffe erläutert und in einem zweiten Schritt den aktuellen Stand der Forschung beschrieben.

### 1.2.1 Begriffe

Im Gebiet des SNP finden sich häufig Flurnamen mit rätoromanischen Begriffen, die wichtigsten nun kurz aufgeführt (*Parolini* 1995):

God	Wald
Piz	Berg (Nunataker)
Munt	Berg (abgerundet, von Gletscher abgeschliffen)
Plan	Ebene
Val	Tal

### 1.2.2 Waldgrenze

Global betrachtet tritt eine Waldgrenze dort ein, wo eine Existenz von Bäumen aufgrund zu hoher oder zu niedriger Temperaturen und Strahlung, zu hoher oder zu niedriger Feuchte, ungenügendem Nährstoffhaushalt und/oder Versalzung des Bodens, verunmöglicht wird (*Körner* 2012). In der Waldgrenzforschung finden sich verschiedene Definitionen des Begriffs „Waldgrenze“, unter anderem wird eine Wuchshöhe von 2-8 Metern, ein durchschnittlicher Maximalabstand zwischen den Bäumen von 30 Metern genannt (*Holtmeier* 2000). In der vorliegenden Arbeit bezeichnet die Waldgrenze die Linie, welche am obersten Rand des geschlossenen Waldes gezogen werden kann. Auf die Unterschiede zur Ausscheidung von offenem und geschlossenem Wald wird unter Kapitel 4.2.2 eingegangen (Abb. 2).



Abb. 2: Vegetationsgrenzen: Piz Laschadurella, Blick von Fuorcla Murter nach Nordost (S. Berger, 03.09.2012)

### 1.2.3 Baumgrenze und Waldgrenzbereich

Die Baumgrenze markiert die oberste Linie von Einzelbäumen oder Baumgruppen, die eine Wuchshöhe von mind. 3 Metern haben. Der Waldgrenzbereich umfasst die Waldgrenze (engl. timber line, forest line) und die Baumgrenze (engl. timberline, tree line) (*Holtmeier 2000*).

Im Waldgrenzbereich, in der Höhe über dem geschlossenem Wald, typischerweise mit Einzelbäumen und Baumgruppen mit einem Abstand von mehr als 30 Metern, ist die Konkurrenz um Wärme (Strahlung) und Niederschlag (Feuchte), besonders gross, so dass sich der Baumbestand lichten muss (Abb. 3). In einem geschlossenen Wald mit hohem Kronenschluss sind die Bodentemperaturen deutlich kleiner als beim offenen Wald, ebenso verhält es sich mit dem Niederschlag, im Speziellen in Form von Schnee, der beim Abschmelzen mehr Feuchte in den Boden bringt (*Körner 2012*). Die Baumgrenze deckt sich mit der Definition des offenen Waldes, wobei bei der Baumgrenze grundsätzlich auch Baumgruppen miteinbezogen werden, die sich eventuell schon im Krummholzbereich befinden (*Körner 2012*). Ist ein Hangbereich nicht durch Murgang, Bodenfließen, Lavinare oder andere Prozesse gestört, ist der Waldgrenzbereich in den Alpen mit 0 bis 50 Metern Ausbreitung in der Höhe generell schmal (*Burga & Perret 2001*).



Abb. 3: Waldgrenzbereich: Blick vom Val da Stabelchod nach Murteras da Stabelchod (S. Berger, 29.06.2012)

### 1.2.4 Krummholzgrenze und Krummholzbereich

In noch grösserer Höhe, über der Baumgrenze, befindet sich der Krummholzbereich, an dessen oberer Linie sich die Krummholzgrenze befindet. In dieser Zone finden sich fast nur noch krüpplige, nicht aufrechte Wuchsformen (Abb. 4). Dies sind unter anderem Bäume, beispielsweise die Legföhre, eine krüpplige Form der Bergföhre, oder Sträucher mit meist weniger als 3 Metern Wuchshöhe (*Holtmeier 2000*). Diese Adaption hin zu kleineren Wuchsformen hat vor allem mit Wärmemangel zu tun: Der Wuchs ist grundsätzlich näher bei der wärmenden, bodennahen Luftschicht, starke Winde haben weniger Hebelwirkung und es

kann sich mehr Schnee akkumulieren, der dann kleinräumig den Wasserhaushalt positiv beeinflusst und eine isolierende Wirkung vor Kälte mit sich bringt (*Holtmeier&Broll 2007*). Dabei ist anzumerken, dass Staunässe im Krummholzbereich äusserst selten grossflächig auftritt, da die Hangneigung in alpinen Bereichen mit zunehmender Höhe zunimmt (*Paulsen&Körner 2001*).



Abb. 4: Krummholzbereich (Kampfzone): Linke Talseite des Val dal Botsch (S. Berger, 29.06.2012)

Oberhalb der Krummholzgrenze befinden sich typischerweise alpine Matten, eine Art Bergtundra. Die Vegetation setzt sich aus Gräsern (Seggen, Girlandenrasen), Zwergsträuchern und Polstergewächsen zusammen, mit einer Wuchshöhe von meist unter 30 cm (Abb. 5). Durch die kleinere Wuchsform können die Pflanzen von der bodennahen Luftschicht, die sich in dieser Höhenlage relativ stark erwärmt, optimal profitieren. Des Weiteren werden sie im Winter vollständig von Schnee bedeckt und sind so vor Kälte und Trockenstress geschützt. (*Landolt 2003*).



Abb. 5: Alpine Matten: Übergang vom Val dal Botsch ins Val da Stabelchod (S. Berger, 29.06.2012)

### 1.2.5 Bauminselfn oberhalb des Krummholzbereichs (engl. Outpost treeline)

Gelegentlich sind auch oberhalb der Krummholzgrenze Baumindividuen anzutreffen, die sich in äusserst günstigen Vegetationsperioden in geschützten Bereichen, zum Beispiel zwischen Steinblöcken und in Felsnischen ansiedeln können (Körner 2012). Diese Wuchsformen sind meistens kleinwüchsig und krüppelig. Eine solche vorstossende Baumgrenze, sichtbar als Bauminselfn, steht in keinem Zusammenhang mit der eigentlichen Baumgrenze (das Wort „vorstossend“ ist in diesem Zusammenhang irreführend) und bedingt auch kein Nachzug der Baum- oder Waldgrenze (Körner 2012).

### 1.2.6 Andere Grenzen wie das „summit syndrome“

Bei Betrachtung eines vegetationslosen Berggipfels, mit einer Baumgrenze etwas unterhalb des Gipfels, kann nicht unbedingt von einer Grenze im Sinne einer klimatischen Baumgrenze gesprochen werden. Ungenügendes Substrat, starke Winde, zu grosse Hangneigung - generell Faktoren, die eine erfolgreiche Ansiedlung von Bäumen verhindern – beschreiben das „summit syndrome“ („Gipfel Syndrom“), welches unabhängig der Höhenlage vorkommen kann. Am Piz Laschadurella, gegen den Gipfel, verhindert die starke Hangneigung sowie der felsige Untergrund eine Besiedelung durch Bäume vorerst (Abb. 6). Es ist also nötig, dass mehrere hundert Meter Gelände oberhalb der Baumgrenze vorhanden ist, welches potentiell von Bäumen besiedelt werden kann, dass von einer (klimatischen) Baumgrenze gesprochen werden kann (Körner 2012).



Abb. 6: Summit Syndrome am Beispiel des Piz Laschadurella (S. Berger, 03.09.2012)

## 2. Stand der Forschung

Im Folgenden werde ich eine Übersicht über wichtige Arbeiten im Zusammenhang mit Waldgrenzverschiebungen im alpinen Raum skizzieren. Der Term Waldgrenzverschiebungen schliesst Wald- und Baumgrenze mit ein, was durchaus legitim ist, da sich die Baumgrenze meist nicht weiter als 50 Meter von der Waldgrenze befindet (*Holtmeier 2000*).

2.1 Entwicklung der Waldgrenzforschung im Laufe der Zeit (falls nicht anders vermerkt: *Körner 2012*)

Die Obergrenze des Waldgrenzbereichs haben Forscher seit jeher fasziniert. Schon Alexander von Humboldt hatte 1807 eine globale Karte gezeichnet, über die geographische Ausdehnung von Pflanzen, die auch eine globale Waldgrenze mit Höhenangaben und geographischer Breite miteinbezieht (*Humboldt & Bonpland 1807*). Humboldt hatte mit seiner globalen Karte eigentlich schon weit vorgegriffen und den Rahmen für die zahlreichen nachfolgenden Arbeiten gegeben.

Die Forschung entwickelte sich, einfach ausgedrückt, in folgende Richtung: In einer frühen Phase zu Beginn des 20. Jahrhunderts war die Phänomenologie im Sinne von geographisch-räumlichen Mustern (wo gibt es Bäume, wo Wald, wo nicht) von Interesse. Genannt werden können in diesem Zusammenhang Arbeiten von Schröter und Däniker (*Schröter 1918; Schröter 1926; Däniker 1923*). Obwohl Däniker über praktisch keine Daten verfügte und er nur Vergleiche und Mutmassungen anstellte, war ihm klar, dass Wärme ein entscheidender limitierender Faktor auf grossem Massstab sein muss. Ab 1930 setzte eine neue Richtung mit einer Vielzahl an Arbeiten auf kleinem Massstab ein. Der Fokus war nun auf physiologische Merkmale gerichtet und man kam beispielsweise auf die irrtümliche Annahme, dass Trockenheit in Wintermonaten der entscheidende limitierende Faktor sei. Genährt wurde die experimentelle Waldgrenzbereichsforschung durch starke Lawinenniedergänge in den Jahren 1951-1954. Die hohe Frequenz und das Ausmass der Störungen in Form von Lawinen, Muren und Rufen wurde vor allem auf fehlende Waldflächen sowie auf den schlechten Zustand der Hochgebirgswälder durch die starke Nutzung der Alpen (Alpwirtschaft, Forstwesen, Bergbau) zurückgeführt (*Holtmeier 2000*). Ab 1940 entwickelte sich nun eine neue Richtung, die als biogeographisch bezeichnet werden kann. Carl Troll verglich biogeographische Daten aus aller Welt und stellte den Fokus wieder auf die globale Ebene (*Troll 1973*). Arbeiten von Hermes und Lauer, letzterer hat auch klimatologische Daten miteinbezogen, entwickelten diesen vergleichenden Ansatz weiter (*Hermes 1955; Lauer 1985*). Mit einer Synthesearbeit von Tranquillini 1979, basierend auf empirischen Daten aus Europa, konnten beispielsweise Photosynthetische Aktivität und Kälteresistenz als nicht kritische, nicht limitierende Faktoren auf diesem Massstab

ausgeschieden werden (*Tranquillini* 1979). Dieser vergleichende Ansatz mit dem Anspruch, Waldgrenzveränderungen auf grösserer Ebene (zum Beispiel für die Alpen), erklären zu können, wurde bis ins 21. Jahrhundert nicht mehr verfolgt. Die ökophysiologische sowie die geographische Richtung existierten nebeneinander, wurden selten verknüpft, was zu einer gewissen Ratlosigkeit führte, welche Faktoren auf welchen Ebenen nun entscheidend sind.

## 2.2. Jüngere Forschung

Im Folgenden wird der aktuelle Forschungsstand auf die verschiedenen Schwerpunkte der einzelnen Arbeiten aufgeteilt.

### 2.2.1 Klimatischer Waldgrenzbereich

Auf globaler Skala breitet sich der Wald gemäss Körner (2003) bis zur durchschnittlichen mittleren Temperaturisotherme von 5.5 bis 7.5°C aus (*Körner* 2003). Vor dem Hintergrund der globalen Klimaerwärmung wird von verschiedener Seite von einem Ansteigen des Waldgrenzbereichs ausgegangen (*Holtmeier* 2009; *Paulsen, Weber & Körner* 2000; *Walther et al.* 2005; *Zimmermann et al.* 2006). Zimmermann et al. (2006) haben mithilfe mathematischer Modelle verschiedene Klimaszenarien skizziert, eines davon mit einem Temperaturanstieg von bis zu 3.3° C bis im Jahr 2080, das einen theoretischen Waldgrenzanstieg von ca. 680 Höhenmeter voraussagt. Dabei wurde von einer durchschnittlichen Abnahme der Jahrestemperatur von 0.5° C pro 100 Höhenmeter ausgegangen (*Zimmermann et al.* 2006). Bei diesem Resultat muss aber berücksichtigt werden, dass ein Ansteigen des Waldgrenzbereichs infolge günstigeren Klimas immer zeitlich versetzt geschieht. Des Weiteren ändert sich anfänglich oftmals die Phänologie und das Wachstum, erst später folgt eine räumliche Verschiebung in höhere Lagen (*Holtmeier et al.* 2008; *Slaymaker & Embleton-Hamann* 2009; *Van der Meer et al.* 2004). Paulsen et al. (2000) streichen bei ihrer Arbeit mit Chronosequenzen von Baumringanalysen bis anfangs 19. Jahrhundert heraus, dass die aktuelle Baumgrenze ein Resultat der vergangenen Klimaverhältnisse ist (*Paulsen et al.* 2000). Dieses konservative Verhalten des Waldgrenzbereichs konnte auch in der Arbeit von Burga (1988) während des Holozäns nachgewiesen werden (*Burga* 1988).

### 2.2.2 Anthropogener Waldgrenzbereich

Seit Jahrhunderten wurde in vielen Regionen der Alpen Landwirtschaft betrieben, welche einen starken Einfluss auf die Verbreitung des Waldgrenzbereichs hatte (*Albrecht et al.* 2002; *Dirnböck et al.* 2003; siehe auch Kapitel Wald/Forstgeschichte). Das Vieh sömmerte beispielsweise auf günstigen, nicht allzu steilen Lagen oberhalb der Waldgrenze, zum Teil

auch im Waldgrenzbereich (Waldweideprinzip) (*Sachteleben* 1995). Wald wurde mitunter auch gerodet, was den Waldgrenzbereich nach unten verschob (*Holtmeier* 2003). Der anhaltende Strukturwandel in alpinen Regionen, welcher schon Mitte des 19. Jahrhunderts einsetzte, hatte zur Folge, dass viele ehemals genutzte Alpweiden aufgegeben wurden und ein natürlicher Einwuchs stattfindet (*Mather & Fairbairn* 2000). Räumlich gesehen werden dabei Lücken schneller zuwachsen als sich der Wald gegen oben ausbreitet. Diese Tendenz wurde in vielen Arbeiten gezeigt (*Gehrig-Fasel et al.* 2007; *Gellrich & Zimmermann* 2007; *Holtmeier & Broll* 2007; *Albrecht* 2007; *Tasser et al.* 2007.)

In der Arbeit von *Gehrig-Fasel et al.* (2007) wurde mit einem sogenannten „moving window“ Algorithmus versucht, lateraler Einwuchs von Baumgrenzverschiebungen höherer Lagen abzugrenzen. Dabei wurde gezeigt, dass in den Schweizer Alpen in Höhenlagen zwischen 1650 und 2450 m ü. M. zu 90% natürlicher Einwuchs stattfindet und nur zu 10% Baumgrenzverschiebung in höhere Lagen. In einem Höhenband von 300 m unterhalb der Baumgrenze wurde natürlicher Einwuchs als Hauptfaktor identifiziert, und nur ca. 4 % wurde über der Baumgrenze als Baumgrenzverschiebung ausgemacht (*Gehrig-Fasel et al.* 2007). Bei dieser Arbeit ist allerdings zu erwähnen, dass der Untersuchungszeitraum von 1985 bis 1997 äusserst kurz ist.

### 2.2.3 Einfluss von Prozessen auf lokaler Ebene

In diesem Kapitel sollen kurz die Schwerpunkte der Waldgrenzforschung auf grösserem Massstab beleuchtet werden. Insbesondere positive und negative Auswirkungen des Klimawandels auf den Waldgrenzbereich stehen im Fokus des Interesses. Im Folgenden werde ich mich aber hauptsächlich auf morphodynamische Prozesse im Zusammenhang mit dem Klimawandel konzentrieren, der Miteinbezug von biologischen Aspekten auf Massstab von Einzelbäumen würde den Rahmen dieser Masterarbeit sprengen.

**Schmelzender Permafrost** destabilisiert Hänge und erhöht die Erosion von potentiellen Waldstandorten, beeinflusst das Voranschreiten des Waldgrenzbereiches also negativ, wie in der Arbeit von *Burga und Perret* (2001) anhand von sechs Untersuchungsgebieten mit Kartierungen, paläoökologischen Analysen und Dendrochronologie gezeigt wurde (*Burga & Perret* 2001).

Frühere Schneeschmelze in einem trocken werdenden Klima senkt das Risiko von **Pilzbefall**. Andererseits bringt eine frühe Schneeschmelze mit sich, dass junge Triebe spätem Frost und Dürre ausgesetzt sind (*Holtmeier & Broll* 2005).

**-Boden:** Ungenügende Bodenfeuchte in trockenen Klimaten sowie auf durchlässigem Untergrund kann ungünstige Bedingungen für die Verbreitung von Samen und Wachstum von Trieben hervorrufen (*Holtmeier & Broll 2007*). Andererseits kann abschmelzender Permafrost eine Vermoorung des Bodens auslösen, Haftwurzeln sterben ab und Bäume werden instabil. Dieser Prozess der Bodenvermoorung kann sogar zu einem Rückschreiten des Waldgrenzbereichs führen (*Crawford et al. 2003*). Für den Waldgrenzbereich ist generell aber kein typischer Boden zu finden (*Körner 2003*).

**-Wind:** Über dem Waldgrenzbereich sind Triebe generell höheren Windgeschwindigkeiten ausgesetzt. Permanente starke Winde drücken den Waldgrenzbereich tendenziell nach unten, beziehungsweise verhindern ein Baumwachstum oder ermöglichen nur krüppelige Formen. Deflation und Abrasion mit Partikeln, unter anderem auch Schneekristallen, sowie Trockenheit durch Frost, wirken gegen ein erfolgreiches Ansiedeln. Kann ein Trieb mithilfe von Wind isolierenden Schnee akkumulieren und wird das Klima günstiger, können sich kleinwüchsige Formen anpassen und zu aufrechten Bäumen heranwachsen (*Holtmeier 1985; Holtmeier & Broll 2007; Kullmann 2005*).

**-Topographie:** Die Topographie stellt den einzigen Faktor dar, der, abgesehen von gelegentlichen morphodynamischen Prozessen, über lange Zeiträume relativ konstant bleibt. In alpinen Lagen sind die topographischen Verhältnisse sehr unterschiedlich. In Tälern mit steilen Flanken reagiert der Waldgrenzbereich beispielsweise anders auf den Klimawandel als auf einer schwach geneigten Terrasse. In solch für die Ausbreitung des Waldgrenzbereichs eher ungünstigen Lagen kann der Klimawandel einen negativen Einfluss haben, in dem die Frequenz und Auswirkung von Störungen wie Lawenniedergänge, instabiler Hangschutt, Bodenflüssen zunehmen. Jedoch können sich auch auf steilen Flanken ohne Bodenbedeckung Pionierpflanzen ansiedeln, die ein späteres Einwachsen von Bäumen ermöglichen (*Gamache & Payette 2005*).

**-Ausrichtung:** Gemäss Paulsen und Körner (2001) hat die Hangausrichtung im Waldgrenzbereich in den Schweizer Alpen keinen direkten Effekt auf den Waldgrenzbereich. Allerdings hat die Ausrichtung einen Einfluss auf die Vegetationsperiode sowie auf die Schneeschicht. Dies hat eine grössere Fragmentierung auf Nordhängen zur Folge (*Paulsen & Körner 2001*).

**-Baumwachstum:** Waldgrenzverschiebung in höhere Lagen ist grundsätzlich nicht mit erhöhten Wachstumsraten von einzelnen Bäumen oder mit der Ausbildung von Krummholz zu aufrechten Bäumen verbunden. Das Bestehen von jungen Trieben und damit eine erfolgreiche Verjüngung im Waldgrenzbereich ist entscheidend für das Voranschreiten in höhere Lagen (*Holtmeier 1993; Smith et al. 2003*). Die Überlebensrate von Samen unmittelbar nach der Keimung ist im Waldgrenzbereich tendenziell gering (*Holtmeier & Broll*

2007). Jedoch streicht Paulsen et al. (2000) heraus, dass die Samenverbreitung im Waldgrenzbereich und über die Baumgrenze hinaus, kein limitierender Faktor darstellt, da fast überall in diesem Bereich Samen gefunden werden können. Bei zukünftig günstigerem Klima könnten die Samen dann keimen (*Paulsen et al. 2007*). Generell geschieht der Prozess der Verschiebung in höhere Lagen „pulsweise“. Das heisst, dass mehrere aufeinanderfolgende Warmphasen, vor allem im Sommer, das erfolgreiche Ansiedeln von jungen Trieben und längerfristig jungen Bäumen voraussetzen (*Körner 1995*).

Unter wärmeren klimatischen Bedingungen könnte feuchterer Schnee ein Risiko für eine Pilzinfektion der Nadelbäume darstellen. Es scheint, dass nicht die Länge der schneefreien Periode entscheidend für die Ausbildung junger Bäume, sondern dass im Frühling genügend Wärme vorhanden ist, dass der Schnee rasch abschmilzt und das Wasser relativ gut abfließt (*Weih 2000; Karlsson & Weih 2001*).

Obwohl mildere Winter grundsätzlich die Mortalität von jungen Trieben senken, sind diese damit erhöhten Tau- und Gefrierprozessen ausgesetzt (*Kullman 2007*). Das heisst, dass Schnee im Frühjahr durchaus auch eine isolierende Schutzwirkung vor wiederkehrender Kälte haben kann. Somit kann nach mehrerer warmen Sommern ein zu frühes Auftauen zu Frostschäden und einem Absterben von Trieben führen (*Gross et al. 1991; Perkins et al. 1991*).

#### 2.2.4 Zusammenfassung der wichtigsten Faktoren

Nun wurden in vorangegangenen Kapiteln kurz die verschiedenen Faktoren skizziert, welche die Lage des Waldgrenzbereichs beeinflussen. Leider ist es nicht möglich, alle diese Faktoren zu berücksichtigen, da dazu mehrjährige Feldexperimente nötig wären und dies den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Im weiteren Verlauf der Arbeit werde ich mich vor allem auf folgende Faktoren konzentrieren, welche in der Arbeit von Burga und Perret (2001) für sechs verschiedene Gebiete in den östlichen und südlichen Schweizer Alpen als wichtige, bestimmende Faktoren herausgearbeitet wurden (*Burga und Perret 2001*):

- Höhenlage über Meer, - 100 Tage pro Jahr über 6.5° C, - Extremereignisse, - Exposition,
- Wasserverfügbarkeit und anthropogener Einfluss.

### 3. Untersuchungsgebiet

Das folgende Kapitel gewährt einen kurzen Überblick über das Untersuchungsgebiet. Dabei wird insbesondere auf die geographische Lage, Geomorphologie und Geologie, sowie Klima und Vegetation eingegangen.

#### 3.1 Geographische Lage

Der Schweizerische Nationalpark SNP liegt in den Engadiner Alpen im Kanton Graubünden (Abb. 7 und 8). Seine heutige Fläche von ca. 170 km<sup>2</sup> verbindet das Ober- und Unterengadin, er liegt auf den Gemeindegebieten von Zernez, S-chanf, Valchava, Scuol und Lavin. Vom tiefsten Punkt auf 1374 erstreckt er sich bis auf eine Höhe von 3173, mit einer mittleren Höhenlage von 2300 m ü. M. (Zoller 1995).

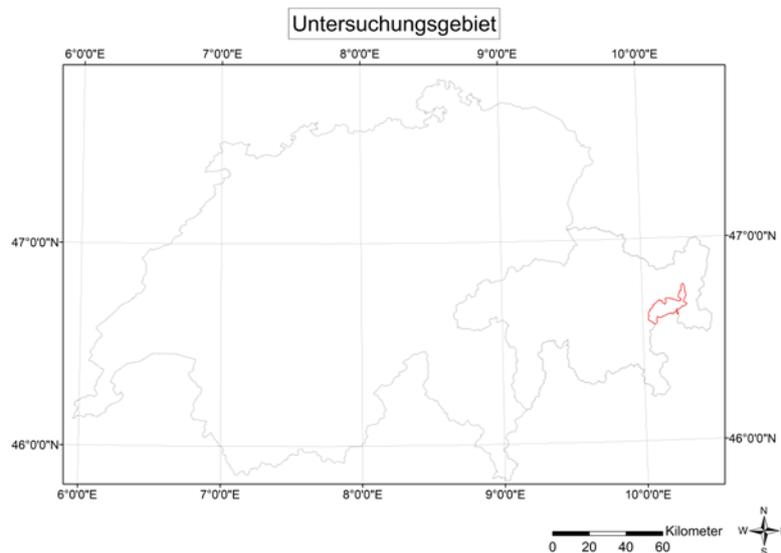


Abb. 7: Schweizerkarte mit Kanton Graubünden und Untersuchungsgebiet SNP (Daten © Server SNP)

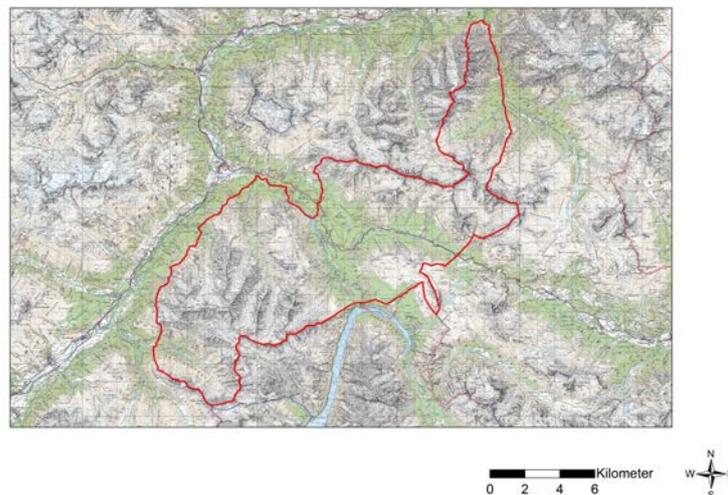


Abb. 8: Untersuchungsgebiet Schweizerischer Nationalpark (ohne Seenplateau Macun) (Daten © Server SNP)

Eine räumliche Besonderheit stellen die Parkgrenzen dar, die im Laufe der Zeit erweitert wurden. Die Kernbereiche, die seit 1911, respektive 1914 zum Nationalpark gehören, machen den Hauptteil des Untersuchungsgebietes aus (Abb. 9).

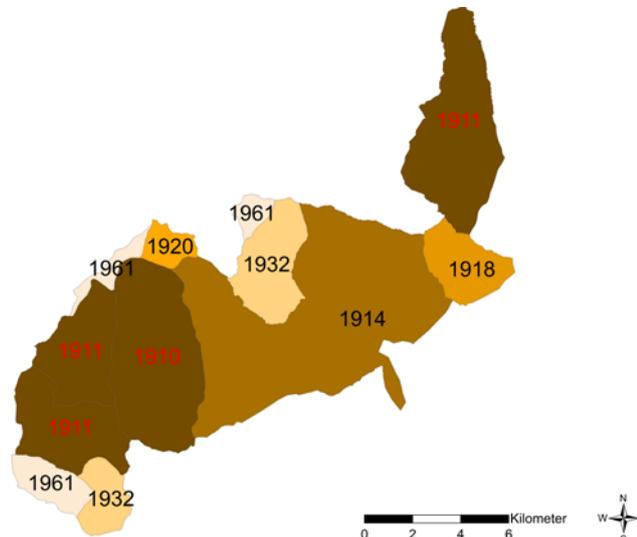


Abb. 9: Historische Grenzen des SNP (Daten © Server SNP)

### 3.2 Geomorphologie und Geologie

Die zwei geowissenschaftlichen Disziplinen Geomorphologie und Geologie werden zusammengefasst betrachtet, da es aufgrund des Einflusses der Geologie auf die Geomorphologie wenig Sinn macht, diese zu trennen.

Geologisch, sowie auch morphologisch, zählt der SNP zu den Ostalpen, dessen Relief grundsätzlich älter ist als das der Westalpen (*Trümpy et al. 1997*). Auffallend sind im SNP ausgedehnte Bereiche, in welchen die Berggipfel annähernd gleich hoch sind, sog. Gipffluren. Eine ganze Reihe von Berggipfeln befindet sich bspw. auf der Höhenstufe um 3100 m ü. M. (siehe Anhang). Obwohl die Gipfelhöhen im SNP niedriger sind als in der umgebenden Alpenlandschaft, ist die mittlere Höhenlage aufgrund hochgelegener Täler mit 2300 m ü. M. relativ hoch. Die übergeordnete Reliefenergie, damit gemeint der mittlere Höhenunterschied zwischen Berg und Tal, ist für alpine Verhältnisse relativ gering. Ausnahme ist dabei der Nordabfall der Lischana- und Pisocgruppe von knapp 2000 m (*Trümpy et al. 1997*).

Über die Entstehung der Engadiner Täler ist generell wenig bekannt, doch eine auffallende, gut dokumentierte tektonische Besonderheit bildet die Engadiner Linie, welche entlang des Inntals zwischen Maloja/Zernez und Ardez/Pfunds (Tirol) verläuft. Diese Störungsfläche, eine Seitenverschiebung mit gleichzeitiger Abschiebung, trennt grob das Kristallin von den

karbonathaltigen Oberostalpinen Decken, entstanden ist diese vermutlich im späten Oligozän, frühen Miozän vor 20 bis 30 Mio. Jahren. Die Mächtigkeit der Abschiebung beträgt bis zu 4000 m, somit wird der Dolomit nach unten verschoben und befindet sich heute neben dem Gneis. Erkennbar ist die Grenze als deutlicher Wechsel in Geländeform und Bewuchs (*Froitzheim 2004*).

Im Pleistozän war das Untersuchungsgebiet von Gletschern bedeckt. Die Gletscherschneegrenzen (Isolinien zwischen Eisbildung und –abschmelzen) befanden sich zwischen 1600 und 1800 m ü. M. Nunataks kamen in den höchstgelegenen Bereichen vor. Vermutlich während der „Riss“-Eiszeit, der vorletzten Eiszeit vor ca. 150'000 Jahren, kam es zur glazialen Übertiefung der Engadiner Täler. In der „Würm“-Eiszeit, der letzten Eiszeit vor ca. 110'000-12'000 Jahren, wurden länger zurückliegende Geländeformen durch das abermalige Vorschreiten der Gletscher stark überprägt. Das Eis, vom Oberengadin kommend, staute sich zwischen Zernez und Susch, erreichte den Ofenpass und drang bis in den Vinschgau (A) vor. In den Seitentälern (beispielsweise Val da Fuorn, Val S-Charl, Val Plavna) wurden zum Teil Granitblöcke aus dem Berninamassiv hinterlassen. Allgemein wurden damals grossflächig Hangpartien abgerundet, jedoch nur bis 2600 m im Oberengadin und 2400 m im Unterengadin. Oberhalb dieser Grenzen sind klar abgrenzbare Grate erhalten. In den Nährgebieten der kleineren Gletscher der Seitentäler, konnten sich typische Kare (Felsnischen) ausbilden, so unter anderem im Val Nügli, Val Sassa und Val Müschauns zu sehen. Durch glaziale Erosion entstanden Rundhöcker, welche vor allem auf kristallinem Untergrund zu sehen sind. Die jungen Schluchten, beispielsweise Clemgia, Ova da Varusch und Spöl sind durch subglaziale Abflussrinnen entstanden (*Bach et al. 1976*). Im Prozess ähnlich sind randglaziale Schmelzwasserrinnen, welche die Trockentäler Champsech und Champlönch schufen. Grössere Moränenwälle aus dem glazialen Höchststand vor ca. 20'000 Jahren, sind nicht deutlich zu sehen. Dagegen sind die Moränen der kleineren Gletscher der Seitentäler deutlich erkennbar, so zum Beispiel am Ausgang des Val Nügli und Val da l'Acqua, welche erst Ende der „Würm“-Eiszeit bei Schneegrenzen um 2100 und 2600 m entstanden. Auch die Genese von Trockenschutthalden und Schuttkegel fällt in diese Zeit, als der auftauende Permafrost die noch vegetationsfreien Hänge in Bewegung brachte. Durch morphodynamische Prozesse wie Steinschlag und Lawinen werden diese Gletscherschutthänge auch heute noch geprägt (*Trümpy et al. 1997*).

Langzeitliche, alte Formen wie beispielsweise eiszeitliche Rundhöcker südlich der Alp Buffalora, Moorböden und tiefgründige Böden fallen allgemein auf Silikatgestein an. Generell ist die Landschaftsdynamik auf silikatischem Untergrund von eher konservativem Charakter, so sind Hänge mit gering aktiver Solifluktion und meist bewachsene Lavinare zu sehen. Demgegenüber steht der Dolomit, der intensivere geomorphologische Prozesse auslöst. So

sind unbewachsene Felspartien, kahle Schuttfluren und generell grossflächige Bodenerosion meist auf dolomitischem Untergrund zu finden (*Trümpy et al. 1997*).

Weitere, für die intensive Materialverlagerung typische Reliefeinheiten, sind Blockgletscher und Solifluktionenformen, welche an ständigen oder temporären Bodenfrost gebunden sind. Blockgletscher, ein Gestein- und Eisgemisch, geschützt durch Auflageschutt, sind bspw. im Val Sassa und Val da l'Acqua zu sehen. Solifluktion, das Abgleiten der aufgetauten Oberbodenschicht über dem Permafrost, tritt häufig als Girlandenrasen oberhalb der Waldgrenze auf (*Furrer 1986*) (Abb. 10).



Abb. 10: Girlandenrasen: Oberhalb des God Margunet (S. Berger, 28.06.2012)

Das **Bodenfliessen**, damit gemeint eine flächenhaft wirkende Solifluktionsform, vermag oberhalb der Waldgrenze die Vegetationsdecke aufzureissen und Bodenerosion einzuleiten. Auf den daraus entstehenden kahlen Flächen kann sich die Vegetation nur sehr langsam wieder entwickeln. Auf geringmächtigen Böden, vor allem auf Dolomitschutt, ist Bodenfliessen vielfach anzutreffen. Im Zuge des Klimawandels könnte sich die Frostgrenze in höhere Lagen verschieben, das heisst, dass eine Verschiebung des heute verstärkt anzutreffende Bodenfliessen hin zu Murgängen möglich wäre (*Lüscher 2004*).

Lawinenzüge, sogenannte **Lavinare**, sind Schneisen, in denen häufige Lawinenniedergänge zu beobachten sind. Nicht selten erfahren Lavinare in jedem Winter Lawinenniedergänge: Schneemassen sammeln sich in höheren, breiten Bereichen - z.B. auf Schutthalden unterhalb von Gipfeln - um dann auf dem vorgegebenen Weg der Lavinare in Richtung Talboden zu stürzen (*Trümpy et al. 1997*). Das Auftreten von Lavinaren hängt oft mit dem Gesteinsuntergrund und sekundär auch mit der Vegetation zusammen. Im Parkgebiet sind schuttbedeckte Lavinare meist auf Dolomit anzutreffen, auf silikatischem Untergrund ist dies eher selten der Fall. Im Übrigen sind Lavinare je nach Häufigkeit von Lawineneignissen mit

Krautschicht oder mit Legföhren bedeckt. Obwohl der Anteil an Lavinaren am gesamten Parkgebiet relativ klein ist, beeinflussen sie die Gebirgslandschaft stark (*Gamper 1986*).

**Murgänge** treten im Parkgebiet meist dort auf, wo sich wassergesättigtes Lockermaterial sammeln kann. Auf offenen Flächen werden häufig Lavinare als Abflusrrinnen benutzt, im Wald folgen Murgänge den Bachrinnen. Das kleinräumige Auftreten von Murgängen (auch Rüfenen) genannt, ist beispielsweise auch häufig auf Schuttkegel zu sehen, welche von mehreren Murgängen durchzogen sind.

Das auf Dolomit anstehende Val Tantermozza und Val Cluozza, bieten günstige Bedingungen für Nachschub an verwittertem Lockermaterial und Schlammfracht und sind häufig von Murgängen betroffen (*Trümpy et al. 1997*).

### 3.3 Klima und Massenerhebungseffekt

Im Untersuchungsgebiet herrscht ein inneralpines Trockenklima, das charakterisiert ist durch Jahresniederschläge in der collin-montanen Stufe von 850 mm, die mit steigender Meereshöhe eher schwach zunehmen (zum Beispiel Alp Stabelchod, 2440 m ü. M., Jahresniederschlag 1270 mm). Die Tage mit Niederschlag sind mit unter 120 gering, ebenso die Bewölkung, Nebelhäufigkeit und Luftfeuchtigkeit. Im Winter sind tiefe Temperaturen möglich, (das kälteste Monatsmittel beträgt bis  $-10^{\circ}\text{C}$ ) und generell grosse Jahresschwankungen (mittlere Schwankung von 18 bis  $21^{\circ}\text{C}$ ) (*Zoller 1995*). Die hohe Globalstrahlung und hohen Tagesmaxima sind vor allem mit dem Massenerhebungseffekt zu erklären. Dieser Effekt beschreibt die Erhebung der „Massen“ der umliegenden Berge von der Ebene. Je grösser und höher diese Massen, desto eher sind die inneren, zentralen Bereiche eines Gebirges bezüglich Temperatur und Strahlung bevorzugt gegenüber der Front des Gebirges. Dies hat zur Folge, dass Vegetationsgrenzen, und damit auch die Wald- und Baumgrenze, inneralpin höher liegen. Im inneralpinen Gebiet des SNP befindet sich die Baumgrenze auf ca. 2350, in den Nordalpen auf ca. 1600 bis 1800 m ü. M. (*Ellenberg 1963; Körner 2003*).

### 3.4 Klimawandel

Die Temperaturzunahme im Untersuchungszeitraum von 1899 bis 2008 betrug insgesamt  $2.8^{\circ}\text{C}$ , das heisst, das jährliche Mittel von 1917 ( $-1.5^{\circ}\text{C}$ ) bis 2008 ( $+1.3^{\circ}\text{C}$ ) (*MeteoSchweiz 2012*). Die Zunahme im 10-jährigen Mittel beträgt dann nur noch  $1.1^{\circ}\text{C}$  (Abb. 11), im 30-jährigen Mittel noch  $0.8^{\circ}\text{C}$ , der Trend einer Zunahme ist erkennbar (Abb. 12). Alle Daten stammen von der Klimastation auf der Alp Buffalora, oberhalb des Ofenpasses auf 2038 m ü. M. direkt neben der Parkgrenze. Klimadaten von weiter entlegenen Stationen zu berücksichtigen, die meist wesentlich tiefer gelegen sind, ergibt wenig Sinn. Leider konnte

beim 30-jährigen Mittel die 30-jährigen Standardperioden (1901-1930, 1931-1960, 1961-1990) der World Meteorological Organisation (WMO) nicht berücksichtigt werden, da die Messungen auf der Alp Buffalora erst 1917 beginnen (*Meteoschweiz* 2012).

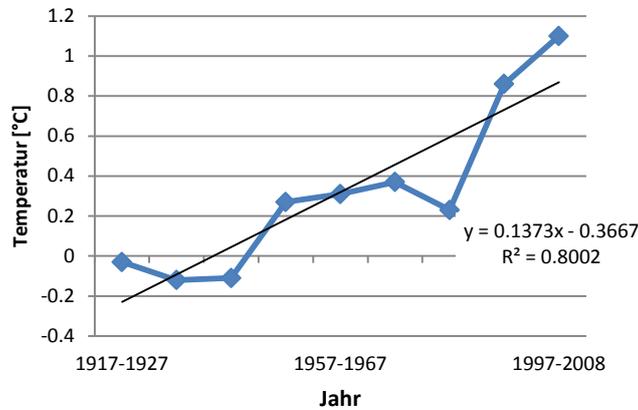


Abb. 11: 10-jähriges Mittel der Temperaturen auf der Alp Buffalora. (Daten © MeteoSchweiz)

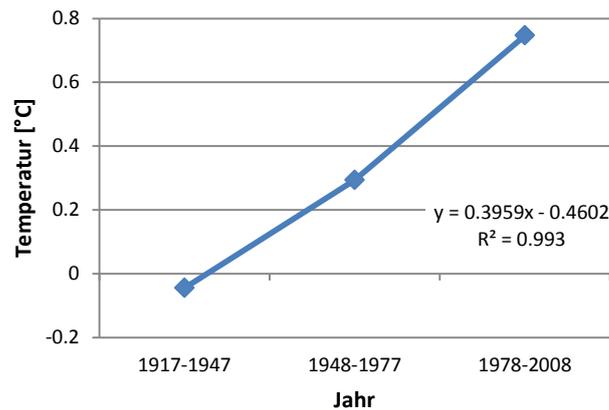


Abb. 12: 30-jähriges Mittel der Temperaturen auf der Alp Buffalora. (Daten © MeteoSchweiz)

### Klimatisches Baumwachstum

Die Bedingungen, welche für das Baumwachstum global und klimatisch gesehen, erforderlich sind (100 Tage  $\geq 6.5^\circ\text{C}$ ), werden von der Station Buffalora dargestellt. Mit der Anzahl durchschnittlicher Tagestemperaturen über  $6.5^\circ\text{C}$  pro Jahr, ist ersichtlich, dass seit 1959 die Bedingungen für Baumwachstum gegeben sind (*Körner* 2012) (Abb. 13). Nur im Jahre 1962 war der Wert mit 93 etwas unter den 100 Tagen pro Jahr mit  $\geq 6.5^\circ\text{C}$ . (Rote Linie bei 100 Tagen) (*MeteoSchweiz* 2012).

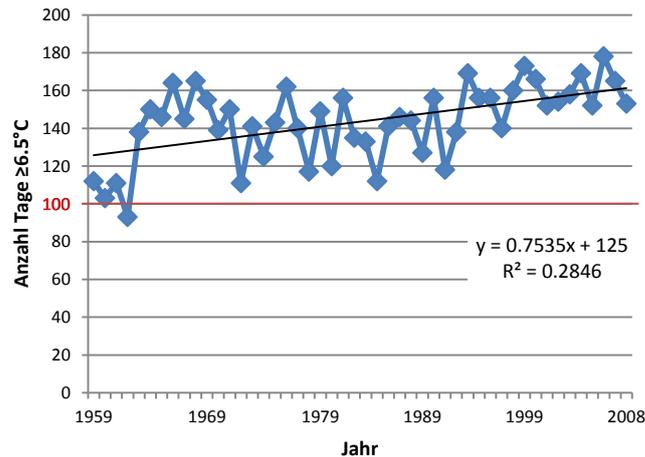


Abb. 13: Anzahl Tage pro Jahr mit durchschnittlich  $\geq 6.5^\circ\text{C}$  (Daten © MeteoSchweiz).

### 3.6 Forst- und Waldgeschichte

Dieses Kapitel wird so genannt, weil der Wald im SNP anfänglich als Forst genutzt wurde und später, spätestens seit der Nationalparkgründung, als Wald sich selbst überlassen wurde.

#### 3.6.1 Bevölkerungsentwicklung

Die Nutzung der Wälder hängt direkt mit der Bevölkerungszahl zusammen. Je grösser die Bevölkerungszahl, desto höher der Nutzungsdruck (*Parolini* 1995). Im Folgenden wird nun kurz die Bevölkerungsentwicklung ab dem 1300. Jahrhundert auf dem Gebiet des heutigen Nationalparks aufgezeigt.

Um das Jahr 1300 blieb die Bevölkerungszahl, nach vorangegangener räumlicher Ausbreitung, relativ stabil. Ein Wachstum setzte um das 15. Jahrhundert ein, mit einer Kulmination Ende 16. Jahrhundert, die später wahrscheinlich nie mehr überschritten wurde. Die Bevölkerung im Unterengadin betrug vor 1600 ca. 7400 Personen (*Rösch* 1805), nach Hungersnöten, Typhus, Pest und Kriegswirren um 1630 nahm diese Zahl abermals ab, um anfangs 18. Jahrhunderts auf relativ hohem Niveau zu stagnieren (*Mathieu* 1987). Ab 1850 setzte wiederum ein Bevölkerungsrückgang ein und Ende des Jahrhunderts lebten nur noch ca. 5700 Personen in der Region. Dieser Rückgang ist hauptsächlich auf die starke Auswanderung zurückzuführen (*Mathieu* 1980). Während des 19. Jahrhunderts begann wieder eine Erholung der Bevölkerungszahl, mit Höhepunkt vor Ausbruch des 1. Weltkrieges, später stabilisierte sich die Zahl bis ungefähr im Jahr 1950. Der danach

einsetzende Tourismus bescherte den Zentren in Unter- und Oberengadin einen Bevölkerungszuwachs, während kleinere landwirtschaftlich geprägte Gemeinden bis heute gegen Abwanderung und Überalterung kämpfen (*Parolini* 1995).

### 3.6.2 Siedlungsentwicklung

Eng verknüpft mit der Bevölkerungsentwicklung ist die Siedlungsentwicklung. Die Konzentration der Siedlungen innerhalb der Dorfgrenzen setzte sich nach einer Zeit der Extensivierung um 1400 bis ins 17. Jahrhundert fort. Etliche Siedlungen ausserhalb des Dorfes wurden verlassen um später als Maiensäss zu dienen. Im Gegensatz zu anderen alpinen Regionen wurde die Maiensässwirtschaft im Engadin nur marginal betrieben (*Bundi* 1989), der Grossteil der landwirtschaftlichen Infrastruktur befand sich im Dorf. Das Errichten von Mauern um die Holzhäuser ab dem 17. Jahrhundert ging mit einem starken Aufschwung der Kalkbrennerei einher, was wiederum einen bedeutenden Holzbedarf zur Folge hatte (siehe Kapitel 3.6.4.4) (*Mathieu* 1987). Auslöser dieser Entwicklung waren vermutlich die katastrophalen Dorfbrände, ausgelöst durch kriegerische Auseinandersetzungen zwischen 1499 und 1622, welche fast alle Gebäude zerstörten (*Wieser* 1991).

### 3.6.3 Alpwirtschaft und Landwirtschaft

Eine gemischtwirtschaftliche Landwirtschaftsstruktur, mit Viehwirtschaft und Ackerbau, war vom 14. bis ins 20. Jahrhundert üblich. Ab dem 14. Jahrhundert begann eine Verlagerung bei der Viehhaltung von Schafen zu Grossvieh, ab dem 16. Jahrhundert war die Milchwirtschaft eine bedeutende Einnahmequelle. Durch neue, aufkommende Bewässerungstechniken fanden eine Intensivierung der Weidewirtschaft im Tal und eine Extensivierung der Alpwirtschaft statt. Die Kulmination der Weidenutzung dank der neuen Bewässerungstechnik wurde Ende 16. Jahrhundert erreicht. Nach den erwähnten Kriegswirren während des 17. und zu Beginn des 18. Jahrhunderts wurde der Viehbestand dezimiert und es folgte eine Extensivierung der Landwirtschaft. Zu Beginn des 18. bis zum 20. Jahrhunderts wurden zahllose Alpflächen an Bergamasker Schafhirten verpachtet (*Mathieu* 1987).

### 3.6.4 Arten des Holzbedarfs

Im Spätmittelalter und in der frühen Neuzeit war der Wald ein wichtiger Rohstoff- und Energielieferant. Im Untersuchungsgebiet des heutigen SNP war hauptsächlich die Brennholzwirtschaft von grosser Bedeutung. Die Hauptakteure waren die Bergbaubetriebe, die tirolische Salzstätte Hall und die Landwirtschaft (*Parolini* 1995).

Im Folgenden soll nun kurz die verschiedenen Arten der Holznutzung aus Sicht der Verbraucher aufgeführt werden.

#### 3.6.4.1 Rodungen

Eine Rodung hat grundsätzlich zum Zweck, eine Waldfläche in eine anderweitig nutzbare Fläche zu bringen. Einerseits wurde mit der Methode des „Schwemmens“ gerodet, des Entfernens der Rinde eines Baumes, sodass dieser verdorrt und die Räumung erleichtert. Andererseits wurden Waldbestände mittels Brandrodung gezielt angezündet, eine kostengünstige, weitverbreitete Methode. Gerodet wurde vor allem zur Gewinnung von Boden für die Land- beziehungsweise Alpwirtschaft und zu einem geringeren Teil zur Errichtung von Infrastruktur wie Siedlungen und Verkehrswege. Die Rodungen fanden mehrheitlich in flachen Partien im Wald, sowie im Waldgrenzbereich statt (*Parolini* 1995).

#### 3.6.4.2 Rodungen für die Alp- und Landwirtschaft

Die Holznutzung der Einzelhöfe, Kleinsiedlungen und Alpen orientierte sich am Prinzip des kleinstmöglichen Aufwands. Somit wurden Wälder in nächster Umgebung der Siedlungen sehr stark genutzt, oftmals übernutzt. Das Ziel war primär, die Weide- und Wieseflächen auszudehnen und diente sekundär der direkten Holznutzung (*Parolini* 1995).

Vor dem 15. Jahrhundert wurde kaum gerodet, die zum einen natürlich vorhandenen zum anderen schon seit längerem genutzten Weiden oberhalb der Waldgrenze konnten mit geringem Aufwand genutzt werden. Im 15. Jahrhundert, mit dem Bevölkerungswachstum und der zunehmenden Knappheit an Alpweiden, wurden Rodungen von Waldflächen für die Alpwirtschaft bedeutender, sodass von einem eigentlichen „Kampf um jeden Weideplatz“ gesprochen werden kann (*Bundi* 1989, 104).

Im 18. Jahrhundert kam es zu einer weiteren, kleinräumigen Ausdehnung der Weiden zu Lasten des Waldes. Etliche Alpweiden gingen pachtweise an Bergamasker Schafhirte. Da die Flächen meist über Jahrzehnte verpachtet wurden und die Bestockungsdichte relativ hoch war, sorgten die Bergamasker Hirten selbstständig für günstige Bedingungen, das heisst, sie vergrösserten kleinräumig die Weiden durch Rodung. Auch die Einheimischen begannen nun zu roden, die Weideverpachtung wurde als einträgliches Geschäft entdeckt und konkurrierte bisweilen mit der Kahlschlagwirtschaft (*Grabherr, Gottfried & Pauli* 1994).

Die neu gerodeten Flächen wurden aber nicht nur zu Weidezwecken, sie wurden auch als Wiesen und in geringem Masse als Acker genutzt. Dabei trat ein in dieser peripheren Region gewisses Muster auf: Zu Zeiten mit hoher Besiedlung setzte eine Verdrängungskette des Waldes zur Weide, Weide zur Wiese, und Wiese zum Acker ein. Flurnamen, Dokumente und Terrassenackerfluren belegen den Ackerbau in Lagen bis 1900 m ü. M. (*Braun-Blanquet* 1917).

Mit der Extensivierung der Landwirtschaft im 18. Jahrhundert, verlor der Ackerbau in den relativ hohen Lagen des heutigen SNP rasch seine Bedeutung. Die Verdrängung zeigte nun in die umgekehrte Richtung, sodass aus Acker zuerst Wiese und dann Weide wurde. Dies soll jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass Holz nach wie vor ein existenzieller Rohstoff für die Bevölkerung war.

#### 3.6.4.3 Köhlerei

Spuren von Kohlenmeilern sind im Untersuchungsgebiet an vielen Orten durch eine starke Konzentration von Holzkohleresten sichtbar. Kohlplätze sind auf verschiedene Waldgebiete verstreut, wobei sie in der Nähe von Verhüttungsanlagen konzentriert auftreten. Über die Holz mengen, welche durch die Köhlerei im Laufe der Zeit verbraucht wurden, ist wenig bekannt. Man kann aber davon ausgehen, dass die Mengen, beziehungsweise die Intensität der Köhlerei, einhergeht mit der wirtschaftlichen Konjunktur, sowie mit der Bevölkerungsentwicklung (*Radkau & Schäfer 1987*).

Mitte des 19. Jahrhundert entwickelte sich durch den aufkommenden Tourismus eine stärkere Nachfrage nach Brennmaterial in Form von Holzkohle. Durch die Einführung der Steinkohle Ende 19. Jahrhunderts und später des elektrischen Stromes, wurde die Köhlerei aber zunehmend konkurrenziert (*Radkau & Schäfer 1987*).

#### 3.6.4.4 Kalkbrennerei

Ab dem 17. Jahrhundert war Kalk als Mörtel für die Ummauerung der Gebäude ein wichtiger Baustoff. Mörtel wurde im Gebiet der Unterengadiner Dolomiten aus Dolomit und anderen kalkhaltigen Gesteinen gewonnen, davon zeugen Überreste von kuppelförmigen Kalköfen. Die Kulmination der Kalkbrennerei im 17. Jahrhundert hatte grossen Einfluss auf den Brennholzbedarf. Diese gesteigerte Nachfrage trat in Konkurrenz zu anderen Nutzungsformen und so wurde der Holzbedarf für die Kalkbrennerei auf wenige Orte beschränkt, zudem durfte kaum noch Kalk exportiert werden (*Schorta 1982*). Über die Brennholzmenge, welche für die Kalkbrennerei benutzt wurde, ist leider nichts bekannt, jedoch ist anzunehmen, dass dieses Gewerbe in unmittelbarer Nähe der Kalköfen eine sehr intensive Holznutzung bedingte (*Parolini 1995*).

#### 3.6.4.5 Bergbau

Holz, beziehungsweise Holzkohle, war bei der Metallproduktion ein unentbehrlicher Rohstoff und so war der Bergbau eng mit der Waldnutzung verknüpft. Grosse Mengen von Holzkohle wurden benötigt, um das Schmelzen und Verarbeiten von Eisen, Blei und Silber zu ermöglichen. Auch direkt in den Gruben bei der Erzgewinnung wurde Holz benötigt: Die Auskleidung der Stollen mit Holz, Holzschienen für Stollenhunde und Holzrinnen und –röhren zeugen davon (*Radkau & Schäfer 1987*).

Im Gebiet des heutigen Nationalparks wurden Bergbautätigkeiten erstmals anfangs 14. Jahrhundert erwähnt (*Pelet 1989*). Am Ofenpass wurde intensiv im Bergbau gearbeitet, der Höhepunkt war im späten 15. Jahrhundert erreicht. Der Niedergang des traditionellen Bergbaus wurde Ende des 17. Jahrhunderts eingeleitet, als die hochwertigere Steinkohle die traditionelle Holzkohle verdrängte und der arbeitsintensive Bergbau durch technische Vorschritte und günstigere Produktionsbedingungen im Tal zunehmend unrentabel wurde (*Schläpfer 1960*).

#### 3.6.4.6 Holzbedarf der Saline Hall und des Tirols

Vom 13. Jahrhundert bis im Jahre 1967 wurde in Hall im Tirol Salz abgebaut (*Pfandler 1983*). Mit Hilfe sogenannter Sinkwerke wurde das abgebaute, verunreinigte Salz im Wasser aufgelöst, die so entstandene Sole wurde dann durch Verdampfung in den Salzhütten zu reinem Salz extrahiert. Der Absatz des Salzes war durch die Vormachstellung der Saline Hall in der Schweiz gesichert, die Produktionsmenge verlief während der erwähnten Zeitspanne relativ stabil, mit einem Höhepunkt der Produktion im 16. Jahrhundert (*Kaiser 1992*).

Bis ins späte 19. Jahrhundert, als die Steinkohlefeuerung eingeführt wurde, war die Holzbeschaffung eine der grössten Herausforderungen in Hall. Benötigt wurde das Holz aus verschiedenen Gründen, hauptsächlich aber zur Befuerung der Salzpflanzen und zur Erwärmung des Trockenraumes. In der Anfangsphase der Saline holzte man in der nächsten Umgebung der Saline, dieser Vorrat war jedoch schnell erschöpft und die Holzbeschaffung musste sich bereits Ende 13. Jahrhunderts ausdehnen. Im Fluss Inn fand man einen geeigneten Transportweg, über den nun Holz vom Engadin bis nach Hall transportiert wurde, die Engadiner Wälder dienten nun als Brennholzlager der Saline Hall. Die Holzknappheit der Städte Innsbruck und Wien während der Industrialisierung trugen dazu bei, dass mitunter selbst junge Waldbestände im SNP geschlagen wurden. Zu Beginn des 18. Jahrhunderts sank die Salzproduktion und damit der Holzschlag langsam, im späten 19. Jahrhundert wurde auf Steinkohle umgestellt. Im Jahr 1967 stellte die Saline ihren Betrieb aus Konkurrenzgründen ein (*Parolini 1995*).

#### 3.6.4.7 Holzbedarf der Dorfbevölkerung ausserhalb des SNP

Bis ins 20. Jahrhundert war das Holz für die von der Landwirtschaft abhängige Bevölkerung von grösster Bedeutung. Obgleich in ihrer Effizienz verbesserter Holzöfen und Holzherde um 1900 gegenüber 1800, betrug der durchschnittliche Brennholzverbrauch ca. 14 m<sup>3</sup> pro Haushalt pro Jahr (*Parolini* 1995). Wie sich der Holzbedarf konkret in den einzelnen Regionen, beziehungsweise Tälern des Nationalparks ab dem 19. Jahrhundert entwickelte, wird im Diskussionsteil vor dem Hintergrund der fünf grössten Zunahmen diskutiert.

#### 3.6.5 Zusammenfassung der Forst- und Waldgeschichte

Das starke Bevölkerungswachstum ab dem 15. kulminierte im 16. Jahrhundert, Weideflächen und Holz wurden intensiv genutzt, Waldflächen wurden gerodet und zurückgedrängt. Die Kriegswirren im 17. Jahrhundert und damit verbundenen Hungersnöte, sowie Typhus und Pest, hatten einen starken Bevölkerungsschwund zur Folge. Die geringe Wirtschaftlichkeit und weit verbreitete Armut bewirkten eine Abwanderung und eine Extensivierung der Landwirtschaft. Der Holzbedarf für die Kalkbrennereien hatte ihren Höhepunkt im 17. Jahrhundert und wurde im 19. Jahrhundert aufgrund der negativen Auswirkungen auf die Umwelt teilweise bis vollständig verboten. Die Saline Hall verlor im 18. Jahrhundert an Bedeutung und somit schwand auch der Brennholzbedarf rasch. Der Bergbau, der zeitweilen grosse Mengen an Brennholz benötigte, wurde mit dem Aufkommen von Steinkohle Ende 17. Jahrhunderts bedeutungslos. Bis ins 20. Jahrhundert wurden viele ehemalige Alpflächen an Bergamasker Schafhirte verpachtet.

Der anthropogene Einfluss schwand also schon vor dem Schutzstatus als Nationalpark. Die letzte grössere Nutzung des SNP durch Bergamasker Schafhirte, die auf zahlreichen Alpflächen sömmeren, verhinderten aber zumindest partiell ein Einwuchs des Waldes.

## 4. Methodik

### 4.1 Methodologie und Datengrundlagen

Die quantitative Erfassung der Waldflächenveränderungen im Zeitraum von über 100 Jahren sollte folgende Kriterien erfüllen: Flächenhafte und vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebietes, detaillierte räumliche Auflösung, die eine Übertragung auf ein Meterraster ermöglichen. Sind diese Kriterien erfüllt, sind die Voraussetzungen für das Erstellen einer Karte im regionalen Massstab mit hoher räumlicher Auflösung gegeben (Albertz 2009).

Die Veränderung der Waldfläche wird während des gesamten Untersuchungszeitraums von 1899 bis 2008 analysiert. Aufgrund der relativ grossen Zeitspanne kommen auch unterschiedliche Datengrundlagen zum Tragen. Einerseits werden Kartenblätter des Topografischen Atlas der Schweiz (Siegfriedkarte), sowie der digitalen Landeskarte im Massstab 1:50'000 benützt. Die Tatsache, dass Siegfriedkarten im Alpenraum nur im Massstab 1:50'000 produziert wurden, bedingt auch die Beschränkung auf 1:50'000 Karten für alle Zeitstände, um eine gewisse Vergleichbarkeit zu bewahren. Andererseits stehen auch Rohdaten des Schweizerischen Nationalparks zur Verfügung, unter anderem digitale Höhenmodelle, Vektordaten mit ehemaligen Parkgrenzen, geologischem Untergrund und Morphodynamik. Die Datengrundlagen werden im Folgenden kurz erläutert.

#### 4.1.1 Siegfriedkarte (Topografischer Atlas der Schweiz), Zeitstände 1899 und 1938

Für die ersten zwei Zeitstände, um 1899 und 1938, werden Kartenblätter des Topographischen Atlas der Schweiz benutzt. Dieses Kartenwerk wurde unter der Führung von Oberst Hermann Siegfried von 1870 bis 1949 herausgegeben, die Karten werden umgangssprachlich häufig als Siegfriedkarten bezeichnet. Die Kartenblätter liegen im Massstab 1:25'000 für den Jura, Mittelland und Südtessin vor, für den Alpenraum ist der Massstab vor allem aufgrund der erschwerten Aufnahmebedingungen im Gelände auf 1:50'000 beschränkt. Die Siegfriedkarten basieren auf Messtischaufnahmen, eine relativ aufwändige Feldmethode, die mit längeren Aufenthalten im Gelände, auch im Hochgebirge, verbunden ist. Das Resultat war zu dieser Zeit weltweit einmalig: Künstlerisch gestaltete Felszeichnungen, relativ genaue Höhenkurven im Hochgebirge (Äquidistanz von 30 m), mit einer Genauigkeit bis vier Metern. Reproduziert wurde zuerst mit lithografischen Mitteln, ab 1910 dann mit dem Kupferstichverfahren, welche beide die Basis für den Druck lieferten. Ursprünglich wurde der Wald, sowie Felszeichnung und Schrift mit schwarz, Höhenkurven braun und Gewässer blau gedruckt. Später, nach 1938, wurde dann der Wald grün eingezeichnet. Mittlere Abweichungen durften in der Projektion nicht mehr als 35 Meter betragen (Klöti 2006).

#### 4.1.2 Landeskarte der Schweiz, Zeitstände 1973 und 2008

Ab 1938 wurde die Siegfriedkarte schrittweise durch die neue Landeskarte der Schweiz abgelöst. Datengrundlage sind Luftbilder, die durch photogrammetrische Bearbeitung zu Orthophotos gefertigt werden, die wiederum als Grundlage für die Karteninterpretation dienen. Die Genauigkeit verbesserte sich mit diesem Verfahren bei 1:50'000 Karten auf 15 Meter, wobei 1:50'000 Karten durch Generalisierung von 1:25'000 Karten entstehen. Kartenblätter mit Massstab 1:25'000 konnten ab 1952 für die gesamte Schweiz realisiert werden (*Swisstopo* 2008).

Der Zeitstand 1973 ist als TIFF vorhanden, ab 1992 wurden Karten im sog. Vektorformat (Shapefiles) der digitalen Landeskarte hergestellt. Die Vektor50 Karte besteht aus zwölf thematischen Ebenen, Waldflächen gehören zu den Primärflächen, welche den Perimeter lückenlos ausfüllen (*Swisstopo* 2007).

### 4.2 Waldausscheidung

#### 4.2.1 Topografischer Atlas der Schweiz, Siegfriedkarte, 1899/1938

Ausgeschieden wurden Wälder mit offenen und geschlossenen, scharfen Waldgrenzen. Scharfe Waldgrenzen sind jedoch häufig nur in bewirtschafteten Gebieten sichtbar, im Nationalpark sind solche klaren Waldgrenzen praktisch nirgends zu finden. Kriterien, welche einen offenen von einem geschlossenen Wald unterscheiden würden, wurden nicht festgelegt. Offene Waldflächen konnten insofern von Nichtwald unterschieden werden, als dass Baumgruppen, die mehr als 30 m weit entfernt sind, separat ausgeschieden werden (*Neudeck* 2012: Email).

#### 4.2.2 Landeskarte der Schweiz, 1973/2008

Die Landeskarte der Schweiz mit Zeitstand 1973 unterscheidet zwischen offenem und geschlossenem Wald, daher kann dies auch so digitalisiert werden. Die Kriterien für die Waldausscheidung mithilfe von Luftbildern/Orthophotos sind folgende (*Swisstopo* 2008; *Neudeck* 2012: Email):

#### 4.2.2.1 Geschlossener Wald

- mindestens drei Meter hohe Bäume, die mit ihren Kronen mehr als die Hälfte (>60%) des Bodens bedecken.

#### 4.2.2.2 Offener Wald

- mindestens 3 m hohe Bäume
- weit auseinander stehende Bäume, erlaubt Nutzung des Geländes z. B. als Weide
- Baumkronen bedecken weniger als 50 % des Bodens
- die grünen Signaturen stehen symbolisch für mehrere Bäume.

#### 4.2.2.3 Waldrand

- Durchgezogene Linie: abrupter Wechsel vom offenen Gelände zu Wald
- lockere Grenze: Langsam lichter werdender Baumbestand -> Grenze oft nicht eindeutig festlegbar.

#### 4.2.3 Waldausscheidungskriterien bei beiden Kartenwerken

Die Frage stellt sich nun, wie man offenen Wald von „Nichtwald“ beim Digitalisieren auf der Karte unterscheidet. Die Kartenungenauigkeit bei 1:50'000 Karten beträgt ca. 10 bis max. 15 Meter. Einzelbaumsignaturen, die als Kringel oder Punkte dargestellt werden, lassen in Realität nicht auf Einzelbäume schliessen (*Schmied* 2012: Email). Da Baumkringel, die symbolisch für mehrere Bäume stehen (1 bis 3 Bäume), beziehungsweise die einzelnen Bäume einer Baumgruppe zueinander auch einen Abstand von 10 bis 15 m haben, wird nun als Kriterium der Abstand von einzelnen, grünen Baumkringeln mit mehr als 30 m definiert. Das heisst, dass Baumgruppen mit Abstand grösser 30 m zueinander als einzelne Baumgruppen ausgeschieden werden, Baumgruppen, die einen Abstand zueinander haben, der weniger als 30 m beträgt, als offener Wald.

#### 4.2.4 Waldausscheidung bei Karten des SNP

Auf dem Server des SNP sind verschiedenste Karten digital vorhanden, unter anderem auch Vegetationskarten mit spezieller Berücksichtigung der Waldausscheidung. Um eine Vereinheitlichung mit älteren Karten zu erreichen, wurde auf den Einbezug von Waldausscheidungskarten des SNP verzichtet. Die Karten des SNP, die sich grundsätzlich

auch nach den Kriterien von Swisstopo orientieren, aber „Wald“ anhand von Bestockungsdichten (Klassen 0-20, 20-50, 50-100%) unterscheiden, wurden nicht miteinbezogen. Das Attribut „Wald“ wird bei dieser Waldausscheidungskarte des SNP bereits ab Bestockungsdichten von 0-20% ausgeschieden.

Bei dieser Arbeit ist also beim Miteinbezug aller Zeitstände nur die Betrachtung des Waldgrenzbereichs möglich. Wenn bei Analysen über die ersten zwei Perioden Wald oder Waldfläche erwähnt wird, ist damit immer der Waldgrenzbereich gemeint. Über den letzten Untersuchungszeitraum von 1973 bis 2008 ist eine Unterscheidung von offenem Wald zu geschlossenem Wald, beziehungsweise Waldgrenzbereich und von Wald- zu Baumgrenze möglich.

#### 4.2.5 Vorstossende Baumgrenze (Bauminseln) oberhalb des Krummholzbereichs (engl. Outpost treeline)

Die gelegentlichen „Exkursionen“ von Einzelbäumen während günstigen Jahren werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da dies Bäume oftmals krüppelig sind und das Kriterium für Baum auf der 1:50'000 Karte nicht erfüllt (siehe Kapitel 4.2.2). Ein Fehler durch den Einbezug dieser vorstossenden Baumgrenze kann also ausgeschlossen werden.

#### 4.3 Analyse von Höhe, Ausrichtung und Neigung

Zur Generierung der Höhenbänder (50 m Intervall), der Hangausrichtungs- und Hangneigungsraaster wurde ein Rastermodell mit 4 Meter Auflösung benutzt.

#### 4.4 Analyse der Morphodynamik

Bezüglich der Morphodynamik werden folgende Attribute aus der Datenbank des Schweizerischen Nationalparks näher betrachtet (Falls nicht anders vermerkt sind alle Attributklassen aus dem Shapefile MAIN\_SNP\_GEO.gmk25\_prozesse):

- Alluvionen, junge Schwemmböden von Flüssen und/oder Gletschern, -
  - Bergsturzablagerungen, - Blockgletscher, - Denudationsflächen in Lockermaterial, -
  - Denudationstrichter in Fels, - Felsbänder und Felswände, - Girlandenböden, - Hanganriss, -
  - Karrenfelder, - Karstflächen, - Moränenwall, - Schuttkegel/Sturzhalden, - Schwemmfächer, -
  - Solifluktsströme, - Waldbrandflächen, - morphodynamisch inaktive Gebiete im Wald, -
  - morphodynamisch inaktive Gebüschgürtel, Wiesen und alpine Matten.
- Mulden und Kuppen mit dem Shapefile MAIN\_SNP\_GEO.gmk25\_kuppmuld

- Murgänge und Terrassen mit dem Linienshapefile MAIN\_SNP\_GEO.gmk25\_linienformen

Terrassen werden nach Trümpy (1997) nicht als durch Gletscher oder Flüsse entstandene Abstufungen im Gelände verstanden, sondern eher kleinräumig, als eine Vertiefung der lokalen Erosionsbasis, zum Beispiel durch Anlieferung von erodiertem Material (*Trümpy 1997.*)

#### 4.5 Analyse des geologischen Untergrundes

- Schutt und Blockströme, verkitteter Schotter und Moränen, sowie verschiedene geologische Formationen mit dem Shapefile MAIN\_SNP\_GEO.geological\_map

Eine Analyse des Bodens wird nicht gemacht, da es kaum einen Bodentyp gibt der spezifisch dem Waldgrenzbereich zugeordnet werden kann (*Holtmeier & Broll 2007*).

#### 4.6 Analyse von sonstigen landschaftsbildenden Elementen

- Auengebiete mit dem Shapefile MAIN\_GR.INV\_AUE

- Dolinen, Felstürme, Quellnässe mit Punktshapefile MAIN\_SNP\_GEO.gmk25\_punktformen

- Wald, Moore, Rasen, Rohböden/Extremstandorte mit der jeweiligen Artzusammensetzung mit Shapefile MAIN\_SNP\_BOTANY.Habitalp

#### 4.7 Vorgehen

Karten mit Waldflächenveränderungen werden mit dem Softwareprogramm ArcGIS Version 10 des führenden Herstellers ESRI erstellt. ArcGIS erlaubt georeferenziertes, digitalisiertes Arbeiten mit Kartenmaterial auf grossem und kleinem Massstab (*Mummenthey 2012*). Für einen Kartenvergleich mit einer noch nicht digitalisierten Siegfriedkarte aus dem Jahre 1899 und einer aktuellen topographischen Karte ist ArcGIS die nützlichste Methode, weil Waldflächenveränderungen digital sichtbar und räumlich messbar gemacht werden können. In allen Karten wird das Schweizer Koordinatensystem CH1903\_LV95 verwendet.

##### 4.7.1 Waldflächenveränderungen, Zu- und Abnahmen

In einem ersten Schritt werden die Zeitstände von 1899 und 1938 digitalisiert, da die Datengrundlagen für diese Zeitstände sehr ähnlich sind. Nachdem die Waldflächen digitalisiert sind, kann mit den Funktionen „Clip“ und „Erase“ Karten mit Waldflächenzu- und

abnahmen generiert werden. Dieser Schritt wird dann jeweils für die Zeitstände 1973 und 2008, sowie auch für den Gesamtzeitraum von 1899 bis 2008 gemacht. Für den Arbeitsschritt des Digitalisierens wird im Massstab 1:3'000 gearbeitet.

#### 4.7.2 Höhenbänder

Um das Voranschreiten des Waldes in die Höhe zu dokumentieren, werden Höhenbänder generiert. Aus dem Höhenmodell (Rasterdatei) mit 4m Auflösung werden mit Hilfe des Tools „Contour“ Höhenlinien, in einem zweiten Schritt, mit „Raster to Polygon“, Höhenbänder erstellt. Die Höhenbänder, mit 50 m Intervall, erstrecken sich von 2000 bis an die Baumgrenze um 2400 m ü. M.. Der Fokus liegt auf dieser Höhenstufe, weil sich einerseits über 80% des SNP über 2000 m ü. M. befinden und andererseits gewisse anthropogene Störungen, beispielsweise durch die Ofenpassstrasse, somit ausgeschlossen werden können. Die Höhenbänder können nun mit Waldflächen der verschiedenen Zeitstände verschnitten werden.

Die folgenden Derivate Hangneigung und Hangausrichtung werden aus einem Hangneigungsmodell mit 4 Metern Auflösung generiert.

#### 4.7.3 Hangneigung (Slope)

Das Hangneigungs raster, ein Derivat des Höhenmodells, wird im Hochgebirge nach Zepp & Müller in sieben Hangneigungsklassen unterteilt (*Zepp & Müller 1999*):

Neigung in °

0 – 2	nicht, bis sehr schwach geneigt
2 – 15	schwach geneigt
15 – 25	mittel geneigt
25 – 35	stark geneigt
35 – 45	sehr stark geneigt
45 – 60	steil
>60	sehr steil

Mithilfe dieser Hangneigungsklassen kann der Einfluss der Hangneigung auf eine zu- oder abnehmende Waldfläche untersucht werden.

#### 4.7.4 Hangausrichtung (Aspect)

Die Hangausrichtung wird nach Oelkers in acht Klassen unterteilt (Tab. 1) (Oelkers 1984). Eine Windrose mit Gradangaben und Ausrichtung dient dabei der Veranschaulichung (Abb.13):

Tab. 1: Klassifizierung der Hangneigungsrichtung nach Oelkers (1984).

Klasse	Hangneigungsausrichtung°	Bezeichnung	Symbol
1	0	Flach	0
2	337.5 – 22.5	Nord	N
3	22.5 – 67.5	Nordost	NE
4	67.5 – 112.5	Ost	E
5	112.5 – 157.5	Südost	SE
6	157.5 – 202.5	Süd	S
7	202.5 – 247.5	Südwest	SW
8	247.5 – 292.5	West	W
9	292.5 – 337.5	Nordwest	NW



Abb. 14: Windrose mit Hangneigungsrichtungen (Daten © www.arosacam.com/wetterlexikon)

#### 4.7.5 Vorgehen bei der Analyse von weiteren Faktoren

Bei der Analyse der Morphodynamik, Geologie und sonstigen landschaftsbildenden Elementen wird gleich vorgegangen wie bei den vorangegangenen Arbeitsschritten. Bei Rasterdaten ersetzt „Extract by Mask“ das Tool „Clip“ bei Shapefiles.

#### 4.7.6 Hauptkomponentenanalyse (Principle Component Analysis (PCA)) (falls nicht anders vermerkt: (Dunteman 1989))

Die statistische Methode PCA (auch Hauptkomponentenanalyse) wurde ursprünglich dazu entwickelt, um redundante Daten zu entfernen. Des Weiteren kann PCA aber auch eine statistische Korrelation zwischen Datensätzen herstellen. Dabei wird die räumliche Ausprägung unkorrelierter Rasterdaten vom Inputrasterband zu einem neuen Rasterband transformiert, in dem die Achsen eines Scatterplots im Raum, zum Beispiel vom ersten

Attribut, mit der Achse des zweiten, dritten und so weiter. Attributs berechnet und in ein Verhältnis zueinander gestellt wird. Die folgende Abbildung soll der Erklärung dienen, wie PCA funktioniert:

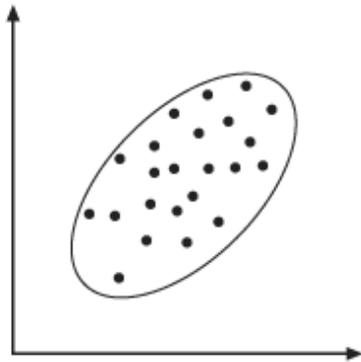


Abb. 15: Punktwolke im Raum

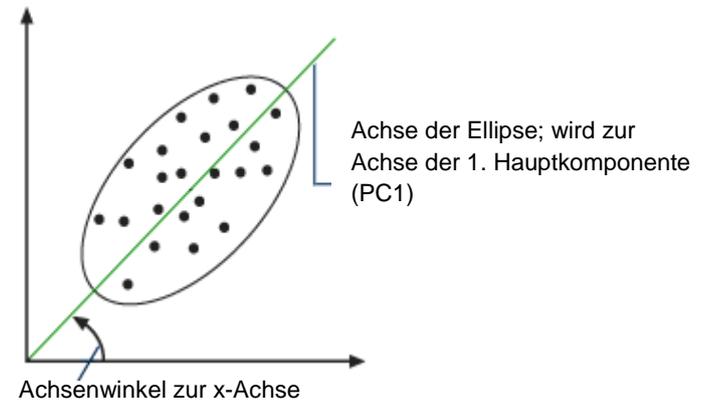


Abb. 16: 1. Hauptkomponente

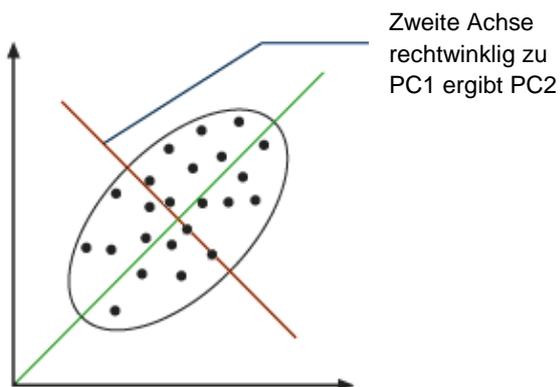


Abb. 17: 2. Hauptkomponente

Im 1. Schritt werden die Daten in einem Scatterplot dargestellt und eine Ellipse wird gezeichnet, die alle Punkte umschließt (Abb. 15).

Im 2. Schritt wird die Achse der Ellipse bestimmt, die zur X-Achse der ersten Hauptkomponente (PC1) wird. PC1 stellt als längster Transekt, der durch die Ellipse gezogen werden kann, auch die grösste Varianz dar. Die Richtung von PC1 stellt den Eigenvektor dar und deren Grösse den Eigenwert. Der Achsenwinkel der X-Achse zu PC1 ist der Winkel der Rotation der für die Transformation gebraucht wird (Abb. 16).

Im 3. Schritt wird eine Linie im rechten Winkel zu PC1 berechnet. Diese Achse stellt die Hauptkomponente PC2 dar und ist gleichzeitig die neue Y-Achse des Scatterplots. Diese Achse stellt nun die grösste Varianz dar, die durch PC1 nicht beschrieben wird (Abb. 17).

Mithilfe der Eigenvektoren, Eigenwerte und der berechneten Kovarianz der Inputmatrix des Rasterbandes wird eine lineare Formel generiert, welche die Verschiebung und Rotation der Achsen beschreibt. Diese Formel wird angewandt um jede einzelne Zelle relativ zu den Achsen zu berechnen.

Ein gängiges Beispiel für Datenredundanz ist ein Rasterdatensatz, welcher Höhe über Meer, Hangausrichtung und Hangneigung beinhaltet. Da Hangneigung und Hangausrichtung normalerweise von der Höhe abhängen, kann ein grosser Teil der Varianz im Einzugsgebiet schon nur mit der Höhe erklärt werden.

Das Resultat einer PCA ist ein Rasterdatensatz mit der gleichen Anzahl an Rasterbändern wie die Ausgangskomponenten, das heisst, ein Rasterband pro Achse respektive Komponente im Raum. Die erste Hauptkomponente wird die grösste Varianz haben, die zweite wird die zweit grösste Varianz der ersten berechnen und so weiter. Vielfach erklären die ersten drei bis vier Komponenten schon 95% der Varianz, beziehungsweise Streuung. Die restlichen Komponenten könnten als redundant betrachtet und ausgelassen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit dient die Hauptkomponentenanalyse vor allem dazu, Faktoren darzustellen, die im Waldgrenzbereich für die Zunahme der Waldfläche wichtig sind.

## 5. Ergebnisse

Im Folgenden werden nun Karten, Grafiken und Tabellen dargestellt, die mit GIS generiert wurden. Aus Platzgründen können nicht alle Karten dargestellt werden und es wird an dieser Stelle auf den Anhang verwiesen.

### 5.1 Veränderung der Gesamtwaldfläche im Laufe der Zeit

Auf Tabelle 2. ist die Gesamtwaldfläche über die vier Zeitstände ersichtlich. Dabei ist anzumerken, dass zuerst Gesamtwaldflächen über alle Höhenstufen berechnet (Tab. 2) und nicht, wie im Folgenden auf 2000 bis 2400 m ü. M. beschränkt wurden. Auffallend ist die starke Zunahme von 1899-1938, die leichte Abnahme von 1938-1973 und die relativ geringe Zunahme von 1938 bis 2008 (Tab. 2, Karten 1, 2 und 3).

Tab. 2: Veränderung der Waldfläche über den gesamten Höhenbereich

Jahr	1899	1938	1973	2008
Gesamtwaldfläche [ha]	2645	4083	3976	4142

### 5.2 Zunahmen und Abnahmen

Die Waldfläche im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks hat sich also von 1899 bis ins Jahr 2008 um über 1497 ha vergrössert. Dies entspricht über einem Drittel der aktuellen Waldfläche, die um die 4142 ha beträgt. Im Folgenden werden nun die Zu- und Abnahmen der drei Untersuchungsperioden in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren analysiert und dargestellt.

Zu-/Abnahmen 99-38

Zu-/Abnahmen 38-73

Zu-/Abnahmen 73-08

Waldgrenzbereich 2200-2400 99-08

## 5 grössten Zunahmen

Abnahme Trupchun

## Morphodynamik

Geologie

Substrate

## Vegetation

Bedeckung

Einwuchs, echtes Aufwärtsschreiten

## Kartenungenauigkeiten 13

Kartenungenauigkeit 14

### 5.3 Waldflächen in Abhängigkeit der Höhenlage

Auf Abbildung 18 ist die Waldflächenzunahme über die drei Zeiträume ersichtlich. Auffallend sind die nachlassenden Zunahmen mit der Zeit und die Annäherung der verschiedenen Kurven mit zunehmender Höhe. Dabei fällt auf, dass die grössten Zunahmen auf einer Höhe zwischen 2100 und 2200 m ü. M. erfolgten (Abb. 18, Karten 1, 2 und 3).

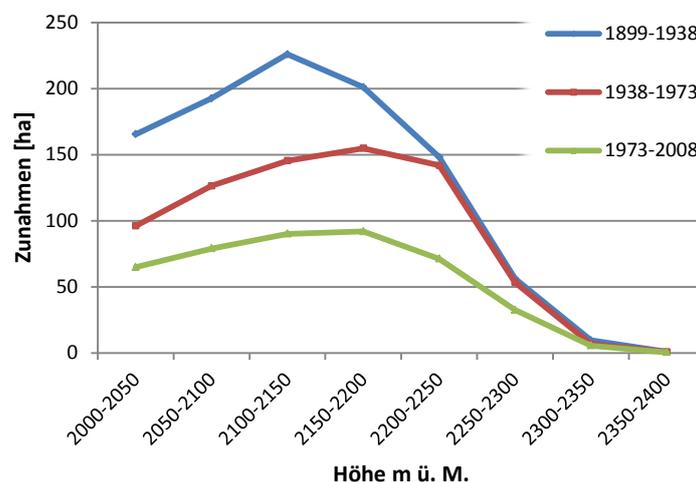


Abb. 18: Zunahme der Waldfläche über die drei Zeiträume

Auf folgender Grafik ist eine Summenkurve der Waldflächenzunahme ersichtlich. Eine Verschiebung der Zunahmen in grössere Höhen mit der Zeit ist ersichtlich (Linien verschieben sich gegen rechts, Abb. 19).

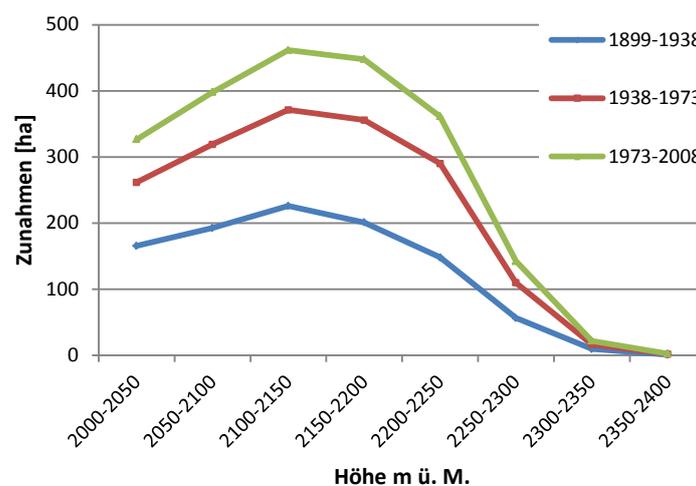


Abb. 19: Summenkurve der Waldflächenzunahmen über die drei Zeiträume

Die folgende Abbildung mit relativen Zunahmen zeigt eine Verschiebung der stärksten Zunahmen in höhere Lagen gegenüber den absoluten Summenkurven. Der Peak verschiebt sich unter der Berücksichtigung der Flächenverteilung pro Höhenband von 2100-2150 zum Höhenband 2150-2200 (Abb. 20, 21).

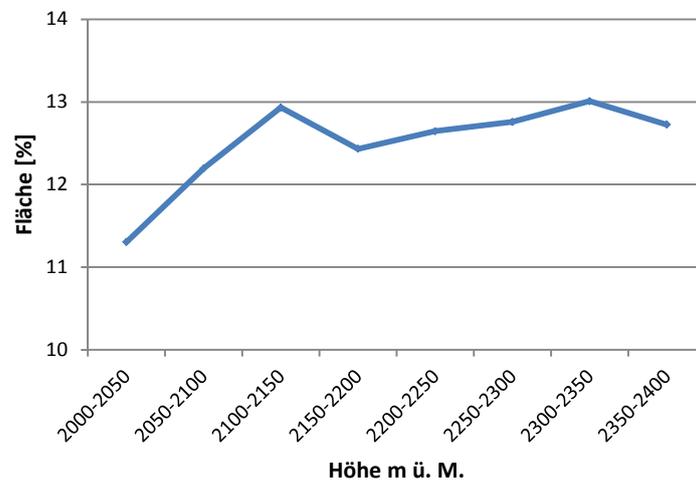


Abb. 20: Relative Flächenverteilung nach 50 m Höhenintervall

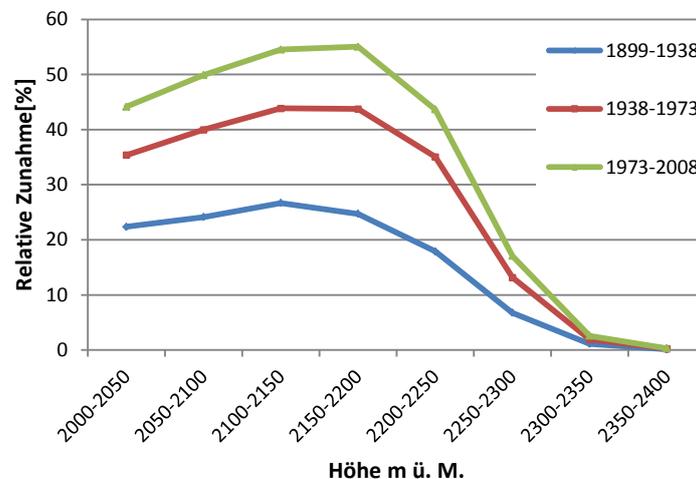


Abb. 21: Summenkurve relative Zunahmen mit der Höhe

Auch bei der Abnahme sind interessante Muster zu erkennen. Die Abnahmen im Zeitraum 1938-1973 sind auf der Höhenstufe 2000 bis 2250 m ü. M. mit ca. 70 ha pro Intervall jeweils ähnlich. Bei der Abnahme von 1973-2008 ist ein Anstieg der Abnahme bis 2200 festzustellen, nur im Zeitraum 1973-2008 ist die Abnahme mit der Höhe relativ konstant (Abb. 22).

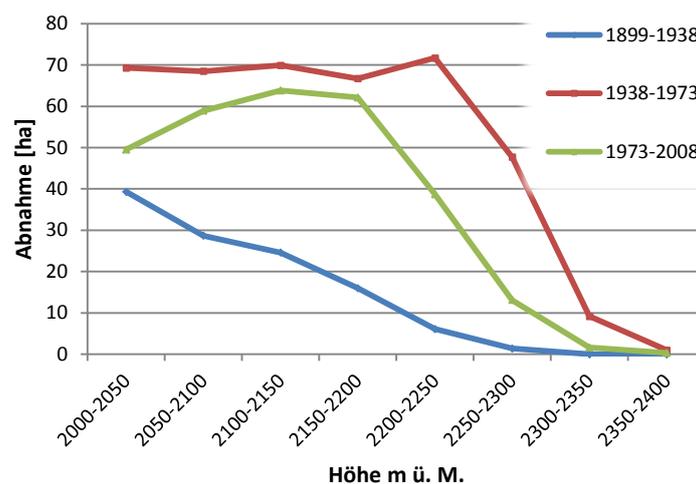


Abb. 22: Abnahme der Waldfläche über die drei Zeiträume

Bei folgender Abbildung der Nettozunahmen, ist eine Verschiebung des Peaks von 2100-2150 im ersten (1899-1938) über 2150-2200 im zweiten (1938-1973) bis 2200-2250 im dritten Zeitraum (1973-2008) ersichtlich (Abb. 23).

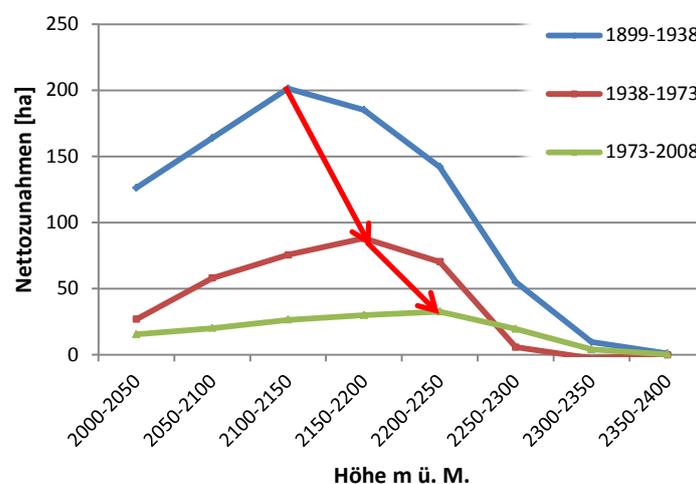


Abb. 23: Nettozunahmen über die drei Zeiträume

### 5.4 Waldflächenveränderungen in Abhängigkeit der Hangausrichtung

Im Folgenden werden Resultate gezeigt, welche die Waldflächenveränderungen über alle drei Zeiträume in Abhängigkeit der Hangausrichtung darstellen.

Auffallend ist die starke Zunahme in Nordost- / Westlagen und die schwache Zunahme auf Südhängen. Bei der Analyse der Abnahmen sieht das Muster ähnlich aus. Wenn man nun die relative Verteilung der Ausrichtung betrachtet (Abb. 24), verändert sich der Eindruck, dass Zu- und Abnahmen verstärkt in Nordost- und Westlagen auftreten, wesentlich (Abb. 25).

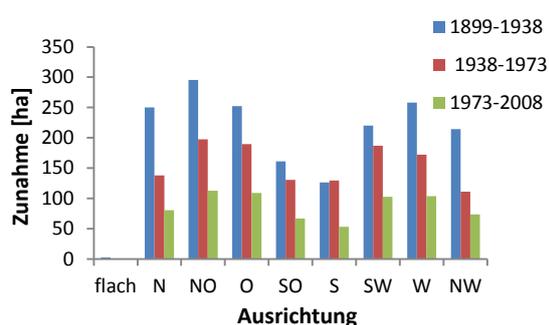


Abb. 24: Waldflächenzunahme nach Ausrichtung

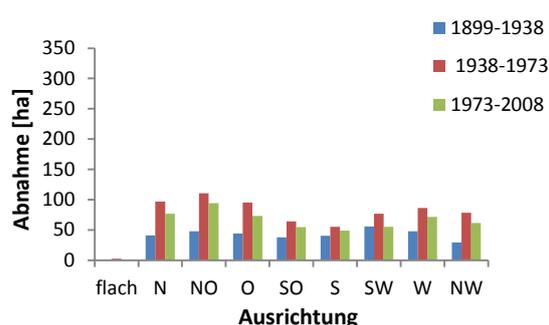


Abb. 25: Waldflächenabnahme nach Ausrichtung

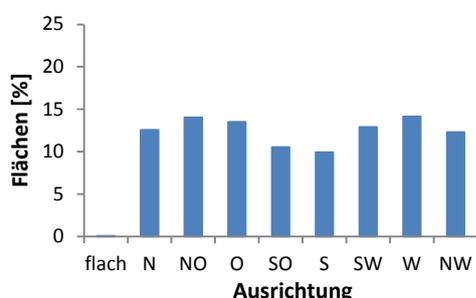


Abb. 26: Flächenverteilung in Prozent der Gesamtfläche

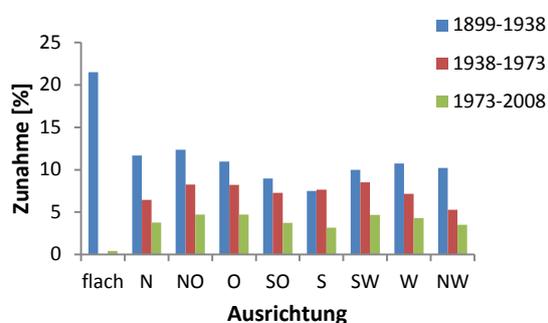


Abb. 27: Relative Waldflächenzunahme nach Ausrichtung

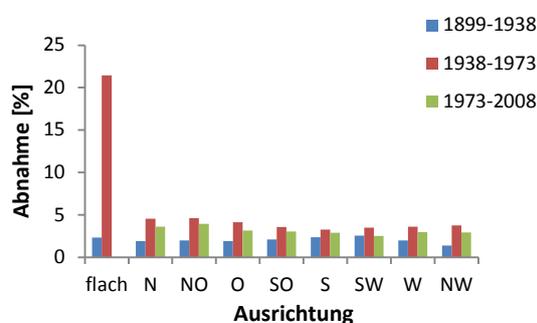


Abb. 28: Relative Waldflächenabnahme nach Ausrichtung

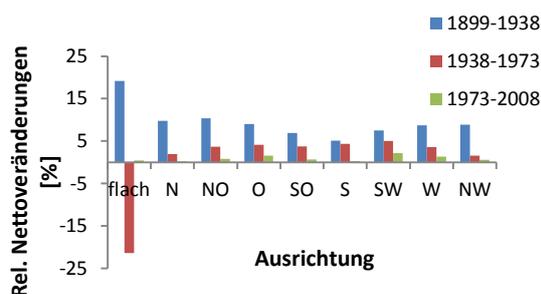


Abb. 29: Relative Nettowaldflächenveränderungen nach Ausrichtung

Die Zunahmen werden durch die Berücksichtigung der relativen Verteilung der Hanglagen geglättet, der Trend, dass stärkere Zunahmen eher in Nordost- und Westlagen stattfinden, bleibt aber gleich. Auffallend ist die starke relative Zunahme von 1899-1938, sowie die starke relative Abnahme von 1938-1973 im flachen Bereich. Bei den relativen Nettowaldflächenveränderungen nach Ausrichtung (Abb. 29) sind die höchsten Nettozunahmen auf Südwest- und Westlagen zu finden.

### 5.5 Waldflächenveränderungen in Abhängigkeit der Hangneigung

Im Folgenden werden Resultate gezeigt, welche die Waldflächenveränderungen in Abhängigkeit der Hangneigung darstellen.

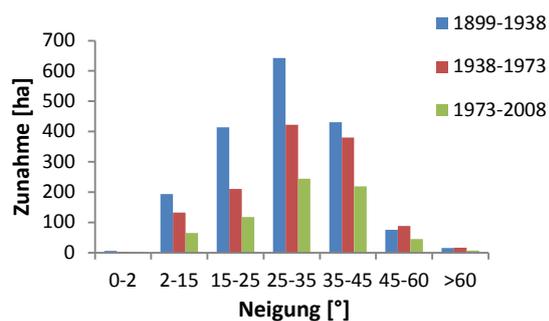


Abb. 30: Waldflächenzunahme nach Hangneigung

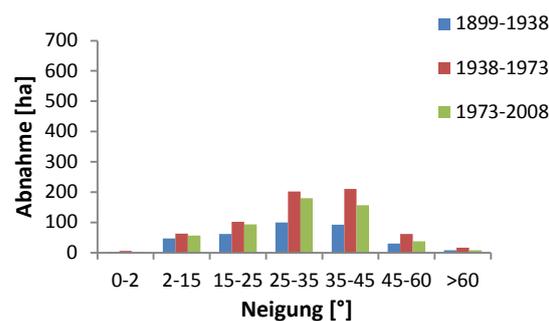


Abb. 31: Waldflächenabnahme nach Hangneigung

Auffallend ist die starke Konzentration der Zunahmen im Bereich 25-35° Neigung über alle drei Zeiträume (Abb. 30). Die grössten Abnahmen befinden sich ebenfalls im Bereich 25-35° Neigung (Abb. 31), diese Verteilung ist abermals mit der relativen Verteilung der Gesamtfläche in den verschiedenen Hangneigungsklassen zu erklären (Abb. 32).

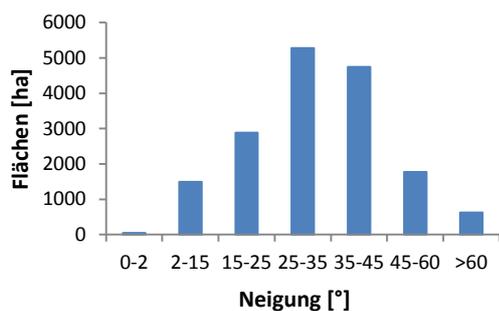


Abb. 32: Relative Verteilung der Hangneigungsklassen im gesamten Einzugsgebiet

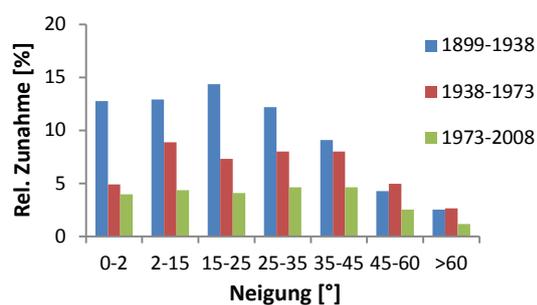


Abb. 33: Rel. Waldflächenzunahme nach Hangneigung

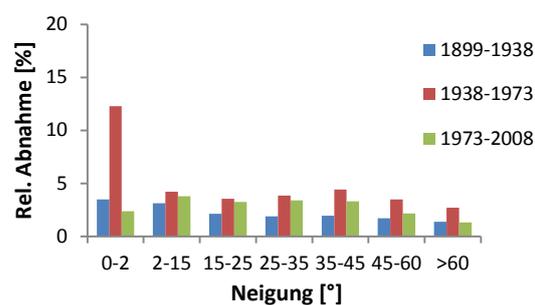


Abb. 34: Rel. Waldflächenabnahme nach Hangneigung

Bei Betrachtung der relativen Verteilung der Zunahmen ist eine Verschiebung der grössten Zunahme von der Hangneigungsklasse 25-35° zu 15-25° festzustellen (Abb. 33). Abgesehen von den grossen Abnahmen in der Klasse 0-2° im Zeitraum 1938-1973 ist eine schwächer werdende Zunahme mit zunehmender Hangneigung festzustellen (Abb. 34).

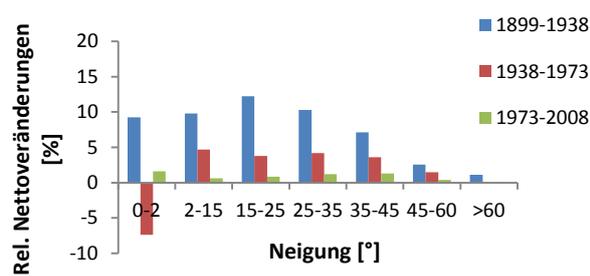


Abb. 35: Relative Waldflächenveränderungen nach Hangneigung

## 5.6 Einwuchs

Der natürliche Einwuchs kann, wie erwähnt, aus kartografischen Gründen nur für den Zeitstand 1973 bis 2008 dargestellt werden. Dabei wurde die Fläche des offenen Waldes von 1973 von der Fläche des geschlossenen Waldes 2008 subtrahiert umso die Fläche des Einwuchs darzustellen (Abb. 36). Es wurde im Folgenden keine weiteren Analysen bezüglich Neigung, Ausrichtung und so weiter gemacht, weil der Einwuchs vor allem in tieferen Höhenlagen stattfindet und dies nicht das Hauptinteresse dieser Arbeit darstellt (Karte 11).

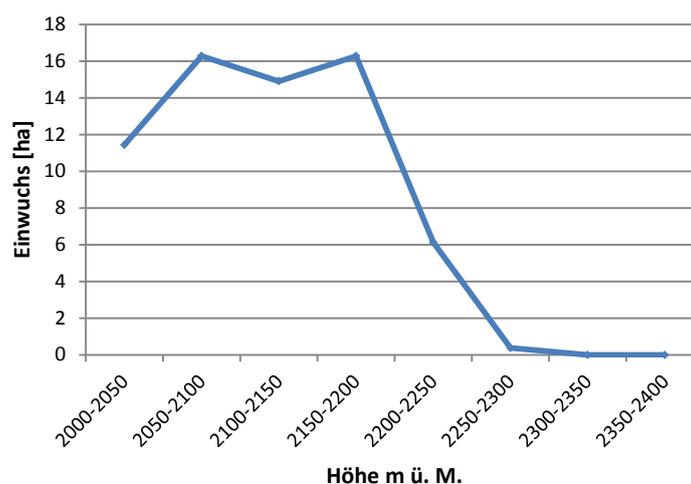


Abb. 36: Einwuchs von Waldflächen von 1973 bis 2008 in Abhängigkeit der Höhe

Zu sehen ist nun ein Einwuchs in tieferen Höhenlagen, der über 2200 m ü. M. stark abflacht. Auch der relative Einwuchs, in Abhängigkeit der Flächenverteilung pro Höhenband, ändert das Bild kaum (Abb. 37).

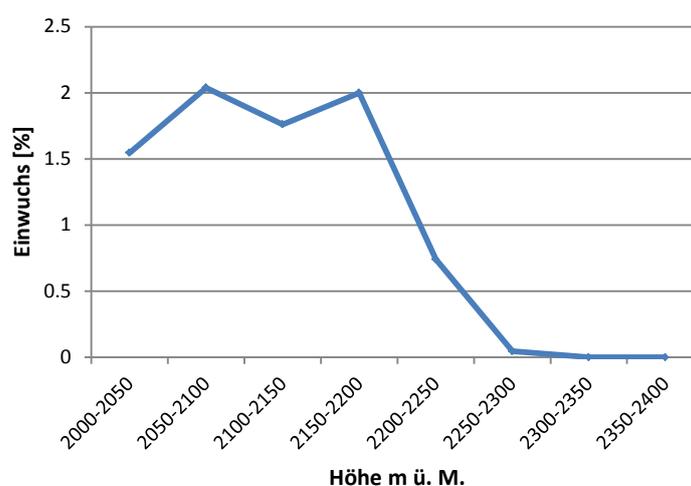


Abb. 37: Relativer Einwuchs von Waldflächen von 1973 bis 2008 in Abhängigkeit der Höhe

Mit den Angaben über den Einwuchs kann nun „echtes“ Aufwärtsschreiten des Waldes dargestellt werden, indem der Einwuchs von der Nettozunahme subtrahiert wird. Auffallend ist die starke Konzentration der Zunahme um den Bereich 2200-2250 m ü. M. (Abb. 38) Der Anteil des natürlichen Einwuchses ist bei diesem Zeitpunkt, der vor 59 Jahren (seit Parkgründung 1914) begann, sehr klein. Die Zunahme in tieferen Lagen beträgt im Maximum 16 ha im Höhenband 2150-2200 m ü. M. und generell in Lagen unter 2200 m ü. M. 58 ha. Im Waldgrenzbereich ist die Zunahme des Einwuchs erwartungsgemäss mit 6.5 ha äusserst klein.

Auch die relative Verteilung, in Abhängigkeit der Flächenverteilung pro Höhenband, ändert kaum etwas am Bild (Abb. 39).

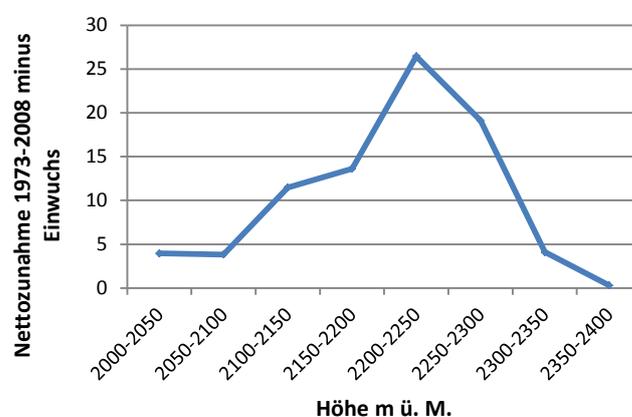


Abb. 38: Nettozunahmen von 1973 bis 2008 ohne Einwuchs

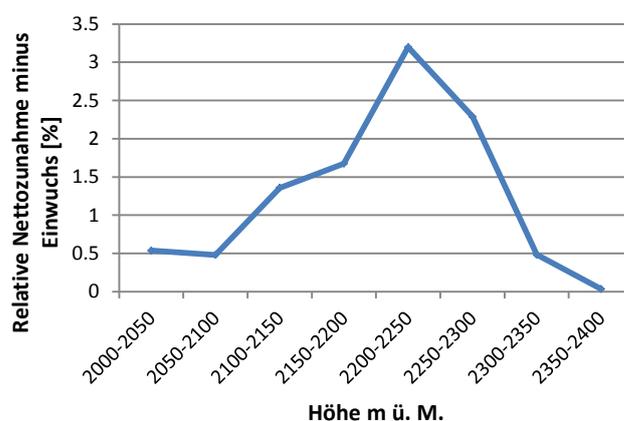


Abb. 39: Relative Nettozunahme ohne Einwuchs

### 5.7 Oberste Standorte des Waldgrenzbereichs

Auf Abbildung 40 sind die gemittelten, obersten Standorte des Waldgrenzbereichs ersichtlich. Diese obersten Standorte, häufig als Baumgrüppchen von zwei bis vier Individuen vorhanden, haben sich über den Gesamtzeitraum um 94 Meter in die Höhe verschoben.

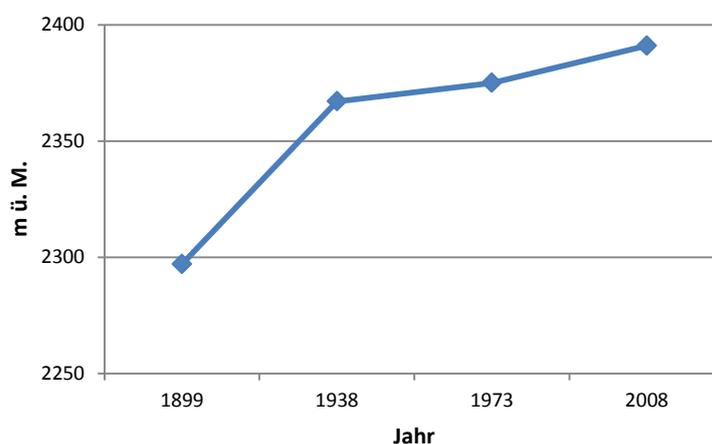


Abb. 40: Oberste Standorte des Waldgrenzbereichs im Laufe der Zeit

### 5.8 Waldflächenveränderungen im Waldgrenzbereich

Im Folgenden werden Resultate bezüglich des Waldgrenzbereichs gezeigt. Der Bereich wurde von 2200 bis 2400 m ü. M. definiert, also ein grösserer Bereich als die einzelnen Höhenbänder mit 50 m Intervall. Dies wurde einerseits so gemacht, weil auf dem Waldgrenzbereich in dieser Arbeit ein spezielles Augenmerk liegt und aufgrund der bisherigen Ergebnisse sich der Wald ab 2200 m ü. M. zu lichten beginnt, andererseits um gewisse kartografische Fehler in relativ hoher 50 m Auflösung zu minimieren.

Auf Abbildung 41, sowie Karte 4 ist die Zunahme des Waldgrenzbereichs, also der offenen und geschlossenen Waldfläche zu sehen.

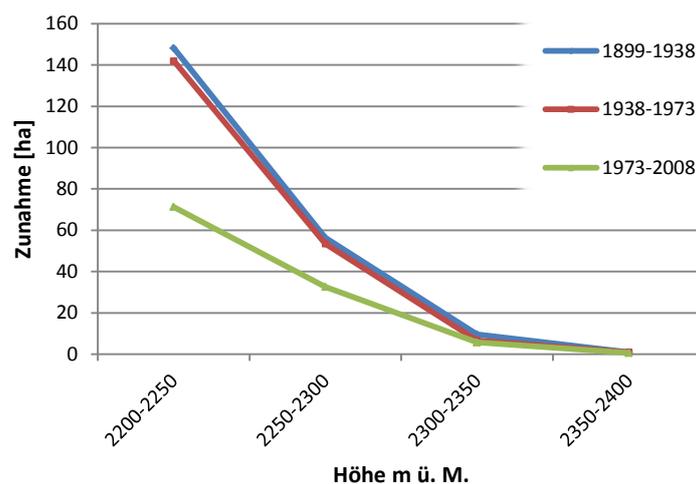


Abb. 41: Zunahmen im Waldgrenzbereich zwischen 2200 und 2400 m ü. M.

Dabei fällt auf, dass die Waldflächen über die zwei ersten Zeiträume (1899-1938 und 1938-1973) nahezu gleich stark zugenommen hat. Im dritten Zeitraum (1973 bis 2008) hat der Wald dann deutlich schwächer zugenommen.

Wenn man nun die Abnahmen über die drei Zeiträume beachtet, fällt auf, dass die Abnahmen im Zeitraum 1938-1973 deutlich höher sind (Abb. 42).

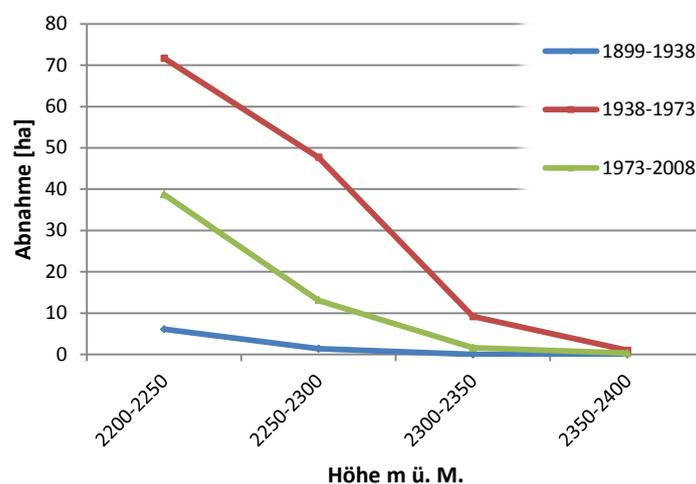


Abb. 42: Abnahme im Waldgrenzbereich über die drei Zeiträume

Dennoch sieht das folgende Bild mit der Nettozunahme und relativen Nettozunahme, dass sich der Waldgrenzbereich mit der Zeit kontinuierlich vergrößert hat (Abb. 43). Dabei ist zu erwähnen, dass in diesem Fall die Berücksichtigung der Flächenverteilung der Höhenbänder das Ergebnis nicht wesentlich beeinflusst (Abb. 44). Auffallend ist auch, dass die Waldfläche im Zeitraum 1938-1973 in der Höhe 2300-2350 sogar eine Abnahme um 2.5 ha erfährt.

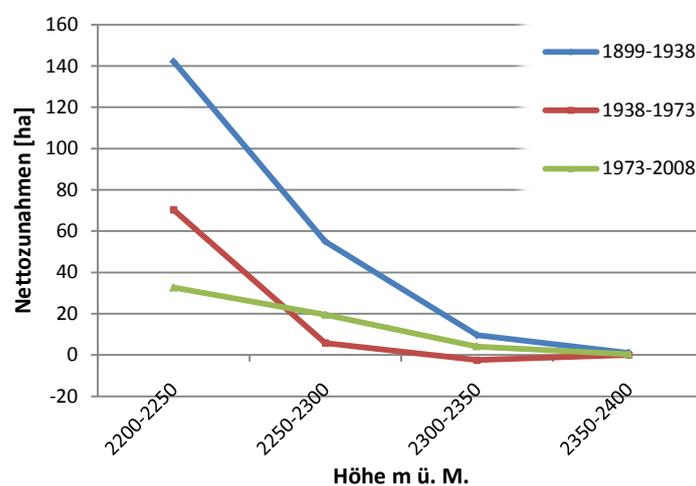


Abb. 43: Nettozunahme von 2200 bis 2400 m ü. M.

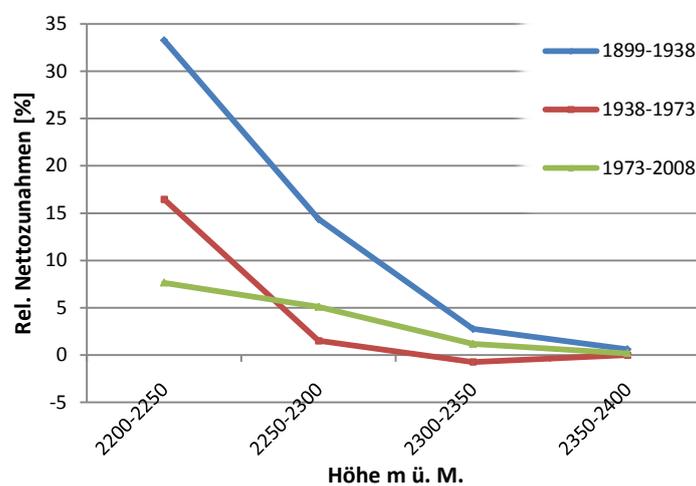


Abb. 44: Relative Nettozunahmen zwischen 2200 und 2400 m ü. M.

### 5.8.1 Analyse der fünf grössten Zunahmen zwischen 1899 und 2008 im Waldgrenzbereich zwischen 2200 und 2400 m ü. M.

Die folgende Gruppierung von Waldflächenzunahmen musste in der Fläche als Kriterium nicht zusammenhängend sein, weil eine zusammenhängende Waldfläche aufgrund Kartungenauigkeiten ein relativ willkürliches und ungünstiges Kriterium darstellen würde. Daher wurde bei der Gruppierung auf landschaftsbildende Elemente wie Hänge, Hangausrichtung, Kuppen und Mulden geachtet. Die Beschränkung auf die fünf grössten Zunahmen wurde gemacht um mögliche Fehler bei der Kartierung, beziehungsweise bei der Digitalisierung zu minimieren.

Im Folgenden werden nun stichwortartig die fünf grössten Zunahmen seit 1899 dargestellt und im Anschluss zusammengefasst (Karte 5).

#### Fläche 1.

Nationalparkgebiet seit 1914, um den Munt la Schera

Ausdehnung 2008: 37.1 ha

Tab. 3: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme

Jahr	1899-1938	1938-1973	1973-2008	1899-2008
1. Fläche [%]	41.1	43.7	15.2	100

**Geologischer Untergrund:** Verschiedene Dolomite, unter anderem Vallatscha, Turettas und Parai-Alba Dolomit.

**Substrat:** Vor allem Lockermaterial mit mehr als 60% Karbonatanteil (89%).

**Geomorphologie:** Terrassen (45%) und Moränen (6%).

**Bedeckung:** Flächen befinden sich zum einen auf ehemaligen Wiesen und alpinen Matten (55%), zum andern auf ehemaligen Gebüschgürteln (41%).

**Vegetation:** Bergföhren (50%), Legföhren (31%) und Grasheide (14%).

**Ausrichtung:** Hauptsächlich nach Südwest (45%), Süd (20%), West (12%) und Südost (10%).

**Hangneigung:** Die meisten Flächen befinden sich in einer Hanglänge von 15-25% (48%), 25-35% (31%) und 2-15% (15%).

## Fläche 2.

Nationalparkgebiet seit 1914 im Val dal Botsch und Val Stabelchod

Ausdehnung 2008: 19.5 ha

Tab. 4: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme

Jahr	1899-1938	1938-1973	1973-2008	1899-2008
2. Fläche [%]	39.8	44.8	15.4	100

**Geologischer Untergrund:** Rauwacke aus Raibler Formation.

**Substrat:** Lockermaterial, mit über 60% Karbonatanteil (100%).

**Geomorphologie:** Allgemein glazial geprägte Oberflächenformen. Terrassen und Schutt (35% der Gesamtfläche), Moränen (30%).

**Bedeckung:** Flächen befinden zu einem grossen Teil auf ehemaligen Wiesen und alpinen Matten(54%). Zu einem geringen Teil (13%), auch Solifluktionsformen und Schuttkegel vorhanden.

**Vegetation:** Auf 48% der Flächen Bergföhren, auf 27% Grasheide (offener Wald) und auf 24% Legföhren.

**Ausrichtung:** Hauptsächlich nach Südwest (36%), West (26%) und Süd (20%).

**Hangneigung:** Die meisten Flächen befinden sich in einer Hanglänge von 25-35% (49% der Gesamtfläche), 15-25% (33%) und 35-45% (14%).

## Fläche 3.

Nationalparkgebiet seit 1911 im Val Minger

Ausdehnung 2008: 13.4 ha

Tab. 5: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme

Jahr	1899-1938	1938-1973	1973-2008	1899-2008
3. Fläche [%]	61.5	27.8	10.7	100

**Geologischer Untergrund:** Verschiedene Dolomite aus der Raibler Formation.

**Substrat:** Lockermaterial mit mehr als 60% Karbonatanteil.

**Geomorphologie:** Terrassen (55%) und Moränenwälle (42%)

**Bedeckung:** Flächen befinden sich zum einen auf ehemaligen Gebüschgürteln (50%) auf ehemaligen Girlandenböden (17%) und Schwemmfächer (15%).

**Vegetation:** Vor allem Legföhren (52%) und Grasheide (38%).

**Ausrichtung:** Nach Südost (29%) Nordwest (18%), Ost (17%), Nord (13%) und Süd (8%).

**Hangneigung:** 35-45% (28%), 25-35% (27%), 15-25% (22%), 2-15% (21%).

#### Fläche 4.

Nationalpark seit 1932 im Gebiet Murteras da Grimmels

Ausdehnung 2008: 12.8 ha

Tab. 6: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme

Jahr	1899-1938	1938-1973	1973-2008	1899-2008
4. Fläche [%]	70.1	21.7	8.2	100

**Geologischer Untergrund:** Dolomiten, vor allem aus der Raibler Formation.

**Substrat:** Lockermaterial mit mehr als 60% Karbonatanteil.

**Geomorphologie:** Terrassen (65%)

**Bedeckung:** Flächen befinden sich zum einen auf ehemaligen Gebüschgürteln (35%), auf inaktiven Bereichen im Wald (28%), auf Denudationsflächen (17%) und auf ehemaligen inaktiven Wiesen und alpinen Matten (9%).

**Vegetation:** Grasheide (33%), Bergföhren/Arven (26%), reine Bergföhren (21%) und Legföhren (16%).

**Ausrichtung:** Südwest (50%), West (33%), Südost (7%) und Süd (6%).

**Hangneigung:** 25-35% (45%), 15-25% (33%) und 35-45% (15%).

## Fläche 5.

Nationalparkgebiet seit 1920 im Nordhang des Piz Terza bei Falcun

Ausdehnung 2008: 4.0 ha

Tab. 7: Prozentuale Verteilung der Gesamtzunahme

Jahr	1899-1938	1938-1973	1973-2008	1899-2008
5. Fläche [%]	17.6	2.8	79.7	100

**Geologischer Untergrund:** Diavel Formation, Wechsel von dünnplattigen und grobgebankten Kalken.

**Substrat:** Zu 85% Lockermaterial mit über 60% Karbonatanteil, die restlichen Flächen nicht denfierbar.

**Geomorphologie:** Zum grössten Teil Kalkschutt (91%) und Terrassen (9%).

**Bedeckung:** Flächen befinden sich vollständig auf inaktiven Bereichen mit ehemaligen Wiesen und alpinen Matten.

**Vegetation:** Grasheiden (97%).

**Ausrichtung:** Hauptsächlich nach Nord (55%), Nordost (27%) und Ost (8%).

**Hangneigung:** Die meisten Flächen befinden sich in einer Hanglänge von 25-35% (30%), 15-25% (27%) gefolgt von 35-45% (23%).

### 5.8.2 Gruppierung der Faktoren der fünf grössten Zunahmen

Die Gruppierung der einzelnen Flächenzunahmen erlaubt eine Abstufung, welche Klassen der Faktoren jeweils am häufigsten auf allen fünf Flächenzunahmen vorkommen.

**Geologischer Untergrund:** Drei Flächen befinden sich auf dolomitischem Untergrund, eine auf nicht näher definierbarem kalkigem Untergrund, sowie ein auf Rauwacke. Alle fünf Flächen befinden sich also auf verschiedenen Arten von Kalkstein.

**Substrat:** Alle Flächen befinden sich zu mind. 85% auf Lockermaterial mit über 60% Karbonatanteil.

**Geomorphologie:** Hauptsächlich Terrassen (Abb. 45), wobei die Klasse Terrassen zusammengefasst wird mit „Terrassen-,Erosionsraender,-kegel, Bergsturz-/Blockschutt“ was

eine klare Abgrenzung von Terrassen zu anderen geomorphologischen Erscheinungen verunmöglicht. Dabei ist aber auf das Kapitel Methodik zu verweisen, die Klasse „Terrassen-, Erosionsraender,-kegel, Bergsturz-/Blockschutt“ ist eher als eine kleinräumige Vertiefung der lokalen Erosionsbasis zu betrachten, zum Beispiel durch Anlieferung von erodiertem Material (Trümpy 1997).

**Bedeckung:** Die meisten Flächen befinden sich vor allem auf ehemaligen alpinen Wiesen und alpinen Matten (64%) (Abb. 46).

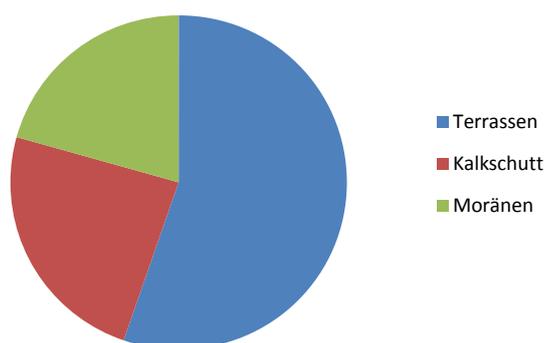


Abb. 45: Prozentuale Verteilung der häufigsten geomorphologischen Klassen

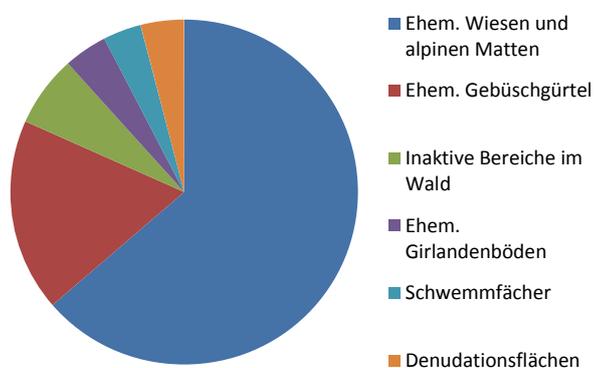


Abb. 46: Prozentuale Verteilung der häufigsten Bedeckungsklassen

**Vegetation:** Die meisten Flächen befinden sich auf offenem Wald, sowie in Legföhren und Bergföhrenbeständen (Abb. 47).

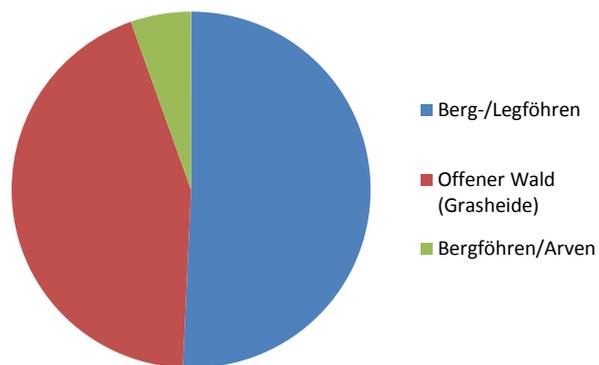


Abb. 47: Prozentuale Verteilung der häufigsten drei Vegetationsklassen



Abb. 48: Prozentuale Verteilung der häufigsten Substratklassen

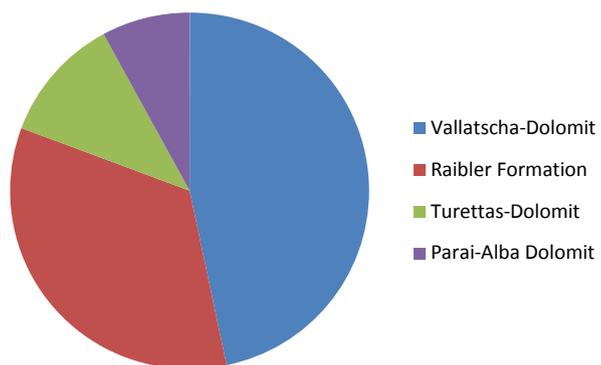


Abb. 49: Prozentuale Verteilung der häufigsten geologischen Einheiten

**Ausrichtung:** Hauptsächlich nach Südwest (Abb. 50).

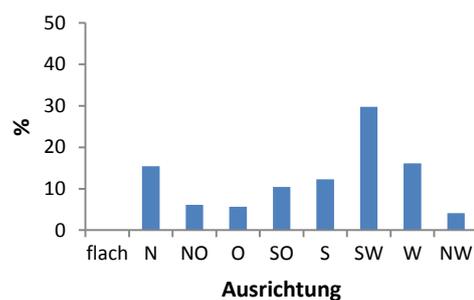


Abb. 50: Prozentuale Flächenausrichtung

**Hangneigung:** Flächenzunahme vor allem im Neigungsbereich zwischen 2-15 und 15-25° (Abb. 51).

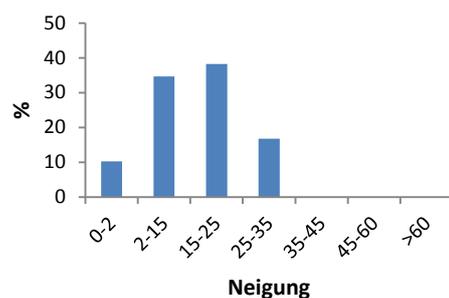


Abb. 51: Prozentuale Flächen nach Neigung

Nun lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen: Die Zunahmen befinden sich vor allem auf Südwest und Westhängen, mit Hangneigungen von 2-15 und 15-25°, auf lockerem, karbonatreichem, teils dolomitischen Untergrund, auf ehemaligen alpinen Wiesen und Matten.

### 5.8.3 Analyse der grössten Abnahmen

Die mit Abstand grösste Abnahme im Waldgrenzbereich befindet sich auf der rechten Talseite des Val Trupchun, die erst 1961 als Nationalparkgebiet ausgeschieden wurde. Der Wald hat während des Untersuchungszeitraumes folgendermassen abgenommen (Tab. 8, Karte 6).

Tab. 8: Waldflächenabnahmen auf der rechten Talseite des Val Trupchun.

Jahr	1899-1938	1938-1973	1973-2008	1899-2008
Abnahme [ha]	1.2	3.8	4.0	8.9
Abnahme [%]	13	43	44	100

### 5.8.4 Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis (PCA))

Die folgende Tabelle zeigt die Hauptkomponentenanalyse der Zunahmen von 1899 bis 2008 im Waldgrenzökoton im Bereich 2200 bis 2400 m ü. M.. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass fünf Hauptkomponenten benötigt werden, um das 95%-Vertrauensniveau zu bestimmen. Die Werte auf der rechten Seite der Tabelle zeigen, dass Bedeckung (0.6), Vegetation (0.65) und Geologie (0.46) gut mit der Zunahme der Waldfläche korreliert. Sehr hohe Werte ergeben beispielsweise die Korrelation von Waldfläche mit Bedeckung (0.97), Substrat mit Neigung (1.0), Ausrichtung mit Vegetation (0.98) und Neigung mit Ausrichtung (1.0). Da die Höhe über Meer als gegeben betrachtet wurde, sind Ausrichtung und Hangneigung redundant, was aus der Tabelle gut ersichtlich ist.

Tab. 9: Hauptkomponentenanalyse der Zunahmen von 1899 bis 2008 im Bereich 2200 bis 2400 m ü. M.

PCA	Kumulative Varianz %	Inputparameter	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
PC1	68.74	Waldfläche	-0.086	0.161	0.147	-0.093	0.966	-0.043	-0.039
PC2	70.13	Substrat	0.037	-0.057	0.048	-0.015	0.042	-0.035	0.995
PC3	78.87	Geologie	0.457	-0.792	-0.328	0.057	0.225	-0.010	-0.056
PC4	90.66	Vegetation	0.646	0.037	0.737	-0.169	-0.078	0.039	-0.055
PC5	95.16	Bedeckung	0.599	0.582	-0.546	0.010	0.044	0.038	0.037
PC6	97.41	Ausrichtung	0.072	0.062	0.166	0.979	0.064	-0.020	0.004
PC7	99.03	Neigung	-0.044	-0.026	0.0	0.022	0.048	0.997	0.034

### 5.8.5 Verschneidung der Faktoren der Waldflächenzunahme im Waldgrenzbereich

Eine weitere Möglichkeit, die verschiedenen Faktoren zu ordnen, wird durch die Berücksichtigung der jeweils erst- und zweithäufigsten Klasse der jeweiligen Faktoren erreicht. Dabei sieht die Verteilung wie folgt aus:

- **Substrat:** Klasse „Lockermaterial mit >66% Karbonatanteil“ (95%) und „Lockermaterial mit 33-66% Verrucano und 33-66% Karbonatanteil“ (4%), beide machen über 99% des Gesamtanteils aus.
- **Geologie:** Klasse „Terrassen-, Erosionsränder, -kegel, Bergsturz-/Blockschutt“ (48%) und „mit Wall“ (15%), beide machen 64% des Gesamtanteil aus.
- **Vegetation:** Klasse „Bergföhrenwald über Karbonatgestein“ (33%) und „Grasheiden über Karbonatgestein“ (29%), beide machen 61% des Gesamtanteils aus.
- **Bedeckung:** Klasse „inaktive Gebüschgürtel“ (40%) und „inaktive Bereiche im Wald“ (33%), beide machen 73% des Gesamtanteils aus.
- **Ausrichtung:** Klasse Südwest (37%) und West (17%), beide machen 53% des Gesamtanteils aus.
- **Neigung:** Klasse 25-35° (37%) und 15-25° (37%) machen beide 74% des Gesamtanteils aus.

Verschneidet man nun die jeweils erst- und zweithäufigste Klasse der jeweiligen Faktoren, ergibt sich ein Wert von 11%, das heisst, dass auf 11% der Waldflächenzunahme die erst- und zweithäufigste Klasse der jeweiligen Faktoren vorkommen. Dieser Wert ist relativ klein, jedoch könnte man nun diejenigen Faktoren weglassen, deren Verteilung der Klassen am gleichmässigsten auftritt, demnach Hangneigung und Vegetation. Wird dies gemacht, steigt der Wert auf über 51%. Auf Grund dieser Analyse kann nun eine Kaskade von Faktoren generiert werden, die für die räumliche Ausbreitung von Wald im Waldgrenzbereich günstige Bedingungen darstellen. Dies wären folglich:

„Ein Substrat mit Lockermaterial mit hohem Karbonatanteil, auf geomorphologisch relativ jungen Flächen wie Terrassen und Erosionsränder, die mit Gebüsch und Einzelbäumen bewachsen sind und sich auf Hängen mit 15-35° Neigung befinden.“

### 5.9 Verteilung der Faktoren oberhalb der Baumgrenze zwischen 2400 und 2600 m ü. M.

Für die Verbreitung des Waldgrenzbereichs in Zukunft, sowohl flächenmässig, wie auch in der Höhe, ist entscheidend, ob die herausgearbeiteten günstigen Standortfaktoren auch in höheren, potentiell zu besiedelnden Höhen vorzufinden sind. Vor diesem Hintergrund werden nun die verschiedenen Faktoren von der Baumgrenze ab 2400 bis 2600 m ü. M. untersucht.

**Substrat:** Mehr als 65% der Flächen gründen auf Lockermaterial mit über 66% Karbonatanteil, der restliche Anteil ist leider nicht definierbar (Abb. 52).

**Geologie:** Der grösste Anteil ist nicht definierbar, gefolgt von Terrassen, Schutt und Sackungen (Abb. 53).

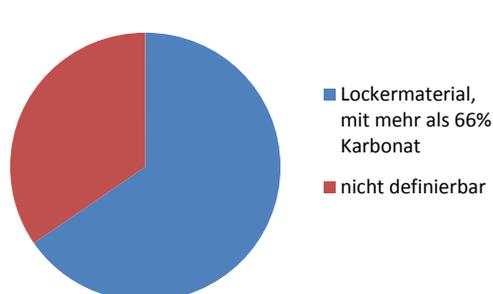


Abb. 52: Verteilung häufigste Substratklassen [%]

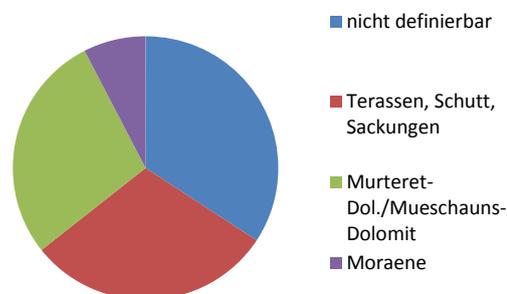


Abb. 53: Verteilung häufigste geol. Klassen [%]

**Vegetation:** „Fels, Schutt und Kiesalluvionen“ machen zusammen mit „Grasheiden über Karbonatgestein“ 92% der Flächen aus (Abb. 54).

**Bedeckung:** Verschiedene Denudationsflächen und -trichter, zusammen mit glazial geprägten Oberflächen machen 69% der Verteilung aus (Abb. 55).

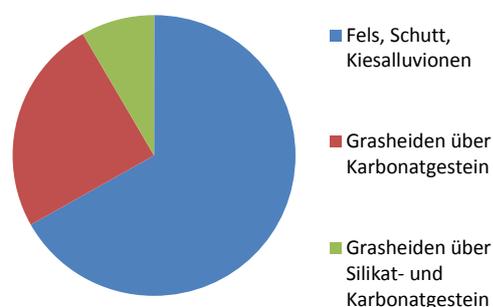


Abb. 54: Verteilung häufigster Vegetationskl. [%]

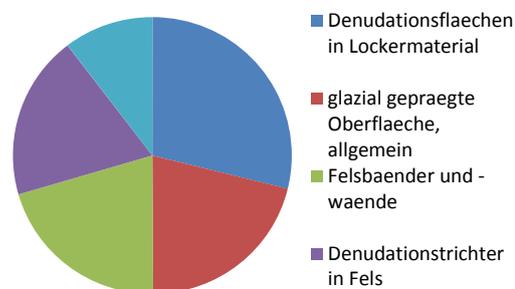


Abb. 55: Verteilung häufigster Bedeckungskl. [%]

**Hangausrichtung:** Eine relativ gleichmässige Verteilung ist zu erkennen, von 11 bis 13% (Abb. 56).

**Hangneigung:** Eine Konzentration auf die Neigungsklassen 25-35 und 35-45 Grad (Abb. 57).

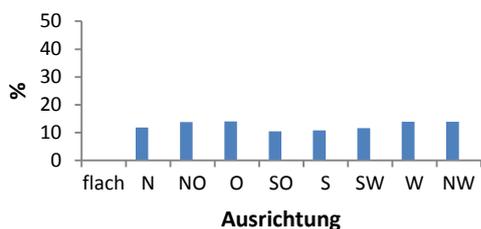


Abb. 56: Prozentuale Verteilung der Hangausrichtung

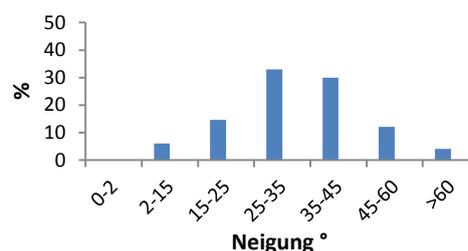


Abb. 57: Prozentuale Verteilung der Hangneigung

Diese Verteilung der Faktoren zusammengefasst ergibt in groben Zügen folgendes Bild dieses Höhenbereiches:

„Ein Substrat mit Lockermaterial und hohem Karbonatanteil, auf geomorphologisch aktiven Flächen wie Terrassen, Schutt, Sackungen, verschiedenen Denudationsflächen, teilweise von Grasheiden bewachsen, auf Hängen mit Neigung zwischen 25-45° und relativ gleichmässiger Ausrichtung.“

### 5.10 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Waldfläche hat über den Gesamtzeitraum von 1899 bis 2008 um 1497 ha zugenommen, was ungefähr einem Drittel der aktuellen Waldfläche entspricht. Die obersten, gemittelten Waldgrenzbereiche befinden sich heute 93 Meter höher, sind also von 2297 im Jahre 1899 auf 2391 im Jahre 2008 gestiegen. Mit zunehmender Höhe nimmt die Waldfläche ab, mit der Zeit breitet sich der Wald in höheren Lagen stärker aus. Eine Ausnahme bildet die Waldfläche um 1973, die geringfügig kleiner ist als 1938. Die grössten Zunahmen finden sich auf Nord- und Westhängen, im Waldgrenzbereich spezifisch auf Südwesthängen und oberhalb der Baumgrenze ist die Verteilung der Ausrichtung mit 11 bis 13% pro Klasse ausgeglichen. Die grössten Zunahmen bezüglich Hangneigung finden sich auf 2-15, 15-25 und 25-35°, im Waldgrenzbereich auf 2-15 und 15-25, über der Baumgrenze befindet sich der grössten Flächenanteil der Neigung auf 25-35 und 35-45°.

Bei der Analyse der fünf grössten Zunahmen im Waldgrenzbereich lassen sich folgende Aussagen zusammenfassen: Die Zunahmen befinden sich vor allem auf Südwest und Westhängen, mit Hangneigungen von 2-15 und 15-25°, auf lockerem, karbonatreichem, teils dolomitischen Untergrund, auf ehemaligen alpinen Wiesen und Matten.

Die Analyse der Verteilung der Faktoren oberhalb der Baumgrenze auf 2400 bis 2600 m. ü. M. brachte folgendes zu Tage: „Ein Substrat mit Lockermaterial und hohem Karbonatanteil, auf geomorphologisch aktiven Flächen wie Terrassen, Schutt, Sackungen, verschiedenen Denudationsflächen, teilweise von Grasheiden bewachsen, auf Hängen mit Neigung zwischen 25-45° und relativ gleichmässiger Ausrichtung.“

Die Hauptkomponentenanalyse brauchte fünf Hauptkomponenten um das 95%-Vertrauensniveau zu bestimmen. Sehr hohe Korrelationen ergeben die Waldfläche mit Bedeckung, Substrat mit Neigung, Ausrichtung mit Vegetation und Neigung mit Ausrichtung.

Mithilfe der offen und geschlossenen Waldflächenkartierungen in der letzten Untersuchungsperiode konnte Einwuchs von echtem Aufwärtsschreiten getrennt werden: Einwuchs zeigt sich bis in Höhen von 2300 m ü. M., echtes Aufwärtsschreiten ist vor allem im Höhenband von 2200-2250 zu finden.

## 6. Diskussion

In folgenden Kapiteln wird kurz die Datengrundlage, sowie die Methodik kritisch betrachtet. Darauf folgt eine Interpretation und Diskussion der Ergebnisse, eine Einordnung der Ergebnisse in der aktuellen Forschung und eine kritische Betrachtung der Arbeit.

### 6.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage dienten alte Siegfriedkarten, die zur Zeit der Aufnahme für das Alpengebiet nur im Massstab 1:50'000 vorlagen. Als „Vegetation“ im Feld kartiert, wurde damals nur Wald oder Nicht-Wald, ohne genaue Aufnahmekriterien (*Siegfried 1888*). Der Begriff „Wald“ verändert sich mit der Zeit, vor allem vor dem Hintergrund der Nutzung des Waldes. Beispielsweise galten mehr oder weniger produktive Flächen wie die Waldweide anfangs des Untersuchungszeitraumes nicht als Wald. Reuthölzer galten als Gebüsche, da sie im damaligen Waldverständnis nicht die Funktion eines Waldbereiches hatten. Waldflächen wurden also bei der Erstellung von Siegfriedkarten generell unterschätzt (*Gerber 1989*). Diese Unschärfe bei der Waldausscheidung im Feld beträgt bis zu 35 Metern. Bei der Landeskarte der Schweiz wird von einer Genauigkeit von 15 m ausgegangen, zusammen könnten die Ergebnisse bisweilen im ungünstigsten Fall 50 Meter vom realen Wert abweichen. Dabei ist aber zu bemerken, dass das Schweizerische Kartenwesen zur Zeit von Hermann Siegfried zu einem der besten der Welt gehörte und die Abweichungen in Realität oft wenige Meter betragen (*Höhener 1995*). Eine höhere Auflösung der Karten hätte diesen Fehler reduziert. Waldflächen auf Siegfriedkarten mit statistischen Methoden (unter anderem Fuzzy Logic, General Linear Model (GLM)) zu digitalisieren, wurde im Rahmen einer Doktorarbeit an der WSL versucht. Das Ergebnis war, dass auch mit hohem, prozeduralem Aufwand keine verlässlichen Resultate generiert werden konnten (*Leyk 2005; Boesch 2012: Email*). Das Fehlen von zuverlässigen Aufnahmemethoden zur Digitalisierung ist vermutlich auch der Grund, warum bis heute anhand von Siegfriedkarten kaum Forschung betrieben wird. Somit musste ich auf die heutigen Waldausscheidungskriterien der Swisstopo zurückgreifen, sofern dies möglich war. Das Kriterium Wuchshöhe über drei Meter wird bei der Aufnahmemethode von Siegfriedkarten beispielsweise nicht erwähnt, jedoch die Abstände zwischen einzelnen Baumgruppen. Die Bezeichnung Legföhre/Bergföhre, beziehungsweise Baum und Gebüsch werden aber auf den Instruktionen von 1888 erwähnt, man könnte also davon ausgehen, dass als Wald oder Baum auch tatsächlich Wälder/Bäume gezeichnet wurden und nicht Gebüsche. Ab welcher Wuchshöhe aber beispielsweise eine Föhre als Baum gezeichnet wurde, ist leider nicht nachvollziehbar. Beim Digitalisierungsprozess entstehen also gewisse Fehler (*Siegfried 1888*).

Der Einbezug von zwei verschiedenen Kartenwerken mit unterschiedlichen Aufnahmemethoden, beziehungsweise Auswertungsverfahren (Luftbilder ab Zeitstand 1973),

hat dazu auch beigetragen, dass die Vergleichbarkeit der Daten reduziert wird. Leider sind nur kleine Ausschnitte von Luftbildern für den SNP vorhanden, sodass nur exemplarisch ein Vergleich von Luftbildern von 1988 mit der Abnahme von Waldflächen über den Zeitraum 1938 bis 1973 gemacht werden kann. Auf den Luftbildern ist zum Teil Wald zu sehen, wo eigentlich eine Abnahme, beziehungsweise, kein Wald sein sollte (Karte 13). Andererseits sind auf gewissen Luftbildern auch tatsächliche vegetationslose Flächen zu erkennen, die mit den abnehmenden Waldflächen übereinstimmen (Karte 14). Leider kann dabei nicht anhand von Luftbildern verifiziert werden, ob auf diesen Flächen schon vor 1938 kein Wald gewesen ist, oder ob tatsächlich, aufgrund der Siegfriedkarte, eine Waldflächenabnahme stattgefunden hatte.

### 6.1.2 Validierung des zentralen Ergebnisses

An dieser Stelle wird nochmals erwähnt, dass die Waldausscheidungskriterien, mit welchen ich gearbeitet habe, sich an den Kriterien des Bundesamtes für Landestopografie Swisstopo orientieren. Im Vergleich mit den Kriterien der SNP-Daten (Zoller-Karte) ergibt sich verfälschtes Bild (Tab. 10).

Tab. 10: Unterschiedliche Flächenzunahmen

	Mit Waldausscheidung Swisstopo [ha]	Mit Waldausscheidung SNP [ha]
Gesamtwaldfläche 2008	4142	5641

Wenn man nun aber nur die Bestockungsdichten 50-100% betrachtet, ergibt sich mit 4634 ha ein klareres Resultat, beziehungsweise beträgt die Abweichung nur noch 492 ha.

### 6.1.3 Analyse von Höhe über Meer, Ausrichtung und Neigung

Zur Generierung der Höhenbänder (50 m Intervall), der Hangausrichtungs- und Hangneigungsraster wurde, wie erwähnt, ein Rastermodell mit 4 Meter Auflösung benutzt. Diese Auflösung ist für ein Einzugsgebiet von über 170 km<sup>2</sup> relativ scharf, für die kleinräumige Analyse von Baumgruppen wäre evtl. aber eine bessere Auflösung nötig gewesen, welche mir aber nicht zur Verfügung stand.

#### 6.1.4 Klassifizierung bei Daten des SNP

Die Klassifizierung bei manchen Datensätzen des Nationalparkes ist nicht immer nachvollziehbar: Beispielsweise wird unter Vegetation, neben Klassen wie „Bergföhre“, „Bergföhren / Arven“ eine Klasse „offener Wald“ ausgedehnt. Dabei kommen Bergföhren gerade im Waldgrenzbereich, also im offenen Wald, häufig vor. Des Weiteren kommen unter Bedeckung die Klassen „Gebüschgürtel“ oder „Girlandenböden“ vor, meiner Meinung nach eher eine Klasse für Vegetation, respektive Boden. Weiter wird unter Geologie eine Klasse folgendermassen beschrieben: „Terrassen-,Erosionsränder,-kegel, Bergsturz-/Blockschutt.“ Betrachtet man nun die Definition nach Trümpy, erscheint die Beschreibung sinnvoll: Terrassen werden als kleinräumige Vertiefung der Erosionsbasis, zum Beispiel durch Anlieferung von erodiertem Material betrachtet (siehe Methodikkapitel) (Trümpy 1997). Im Hinblick, dass meine Daten künftig auf dem GIS-Server des SNP verwaltet werden und um die Vergleichbarkeit zu wahren, habe ich die verschiedenen Klassen nur äusserst geringfügig verändert, beispielsweise wurde die Klasse mit „Terrassen-,Erosionsränder,-kegel, Bergsturz-/Blockschutt“ zu „Terrassen“ zusammengefasst.

### 6.2 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

#### 6.2.1 Ergebnisse über den Gesamtzeitraum zwischen 2000 und 2400 m ü. M.

Der Wald hat sich, in seiner Fläche wie auch mit zunehmender Höhenlage, im Laufe des gesamten Untersuchungszeitraums stark ausgedehnt. Auffallend ist die schwache Abnahme der Waldfläche von 1938 bis 1973, dies ist vermutlich auf die veränderten Aufnahmemethoden zurückzuführen. Ab 1952 wurden die Siegfriedkarten durch die neue Landeskarte der Schweiz abgelöst, dabei standen nun erstmals Luftbilder (Orthophotos) zur Verfügung. Dabei löst die neue, präzisere Methode der Photogrammetrie die Messtischaufnahmen bei der Siegfriedkarte ab. Diese Umstellung zu einer neuen Aufnahmemethode bedingt höchstwahrscheinlich die Abnahme der Waldfläche von 1938 bis 1973 (siehe Kartenungenauigkeiten). Dabei ist auf gewissen Flächen eine Abnahme zu sehen, wo im Vergleich mit Luftbildern keine ist (Karte 13 und 14). Ein weiteres Indiz für die Umstellung bei der Methodik als Hauptursache der Abnahme, ist die gleichmässige Abnahme von jeweils 70 ha pro 50 m Höhenintervall (Abb. 22).

Grundsätzlich ist bei allen Grafiken mit Zunahmen, eine Zunahme der Waldfläche mit der Zeit und mit der Höhe festzustellen. Die Zunahmen sind, wie erwartet, mit zunehmender Höhe abnehmend, da sich der Wald ab einer gewissen Höhe, in diesem Fall ab 2200 m ü. M., lichtet. Bei der Grafik mit den Nettozunahmen ist eine Verschiebung des Peaks mit der

Zeit in grössere Höhen zu sehen (Abb. 23). Dies könnte ein Indiz für Klimawandel sein, der den Wald, wie erwartet, in höhere Lagen verschiebt.

Ein auffallendes, räumliches Muster ist die Konzentration der Zunahmen im Bereich zwischen 2100 und 2200 m ü. M. (Abb. 20, 21, 23). Vermutlich sind diese Zunahmen durch rasches Einwachsen nach der Aufgabe von ehemaligen Alpweiden zu erklären und durch zugewachsene Lawinenzüge auf der Alp Minger (Haller 2012: Gespräch). Der tatsächliche Einwuchs zwischen 1973 und 2008 ist auf der Abbildung 37 und 38 zu sehen, auch dort im Bereich zwischen 2050 und 2200. Es ist anzunehmen, dass dieses räumliche Muster auch für die ersten zwei Zeitstände ähnlich aussieht.

## 6.2.2 Klimasignal

### 6.2.2.1 Potentielle Waldgrenze (klimatische Waldgrenze)

Der Waldgrenzbereich reagiert auf erhöhte Durchschnittstemperaturen grundsätzlich mit einem Anstieg in grössere Höhen, sofern gewisse Bedingungen, insbesondere die 100 Tage mit mind. 6.5°C durchschnittlicher Tagestemperatur (siehe Einleitung, Klima), gegeben sind (Paulser, Weber & Körner 2000). Aufgrund der Annahme von Ch.Körner, dass die Baumgrenze im Alpenraum analog einer mittleren Temperaturerhöhung von 0.3 Kelvin um 50 Höhenmeter steigt, konnte folgende Abbildung hergestellt werden (Abb. 58).

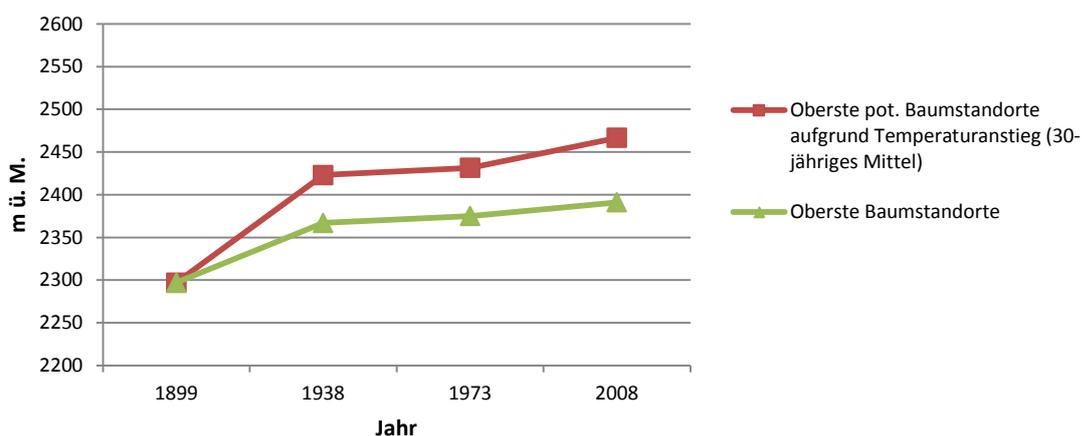


Abb. 58: Oberste, gemittelte Baumstandorte mit pot. Baumgrenze (klimatische Baumgrenze)

Die obersten Baumstandorte haben also ihr „klimatisches Potential“ noch nicht erreicht. Dies ist jedoch auch nicht weiter erstaunlich, viele Autoren haben diese verspätete Reaktion, unter anderem mit Pollenanalysen, untersucht (Burga 1988; Peterson 1998; Körner 2003.)

### 6.2.3 Waldflächenveränderungen in Abhängigkeit der Hangausrichtung zwischen 2000 - 2400 m ü. M.

Betrachtet man die Zunahmen, fällt auf, dass die grössten Zunahmen auf Hängen mit Ausrichtung gegen Nordost und West ausfallen (Abb. 23). Wenn man nun aber die Verteilung der Flächen relativ zur Gesamtfläche berücksichtigt (Abb. 25), sieht das Muster vor allem im flachen Bereich deutlich anders aus: In der ersten Periode von 1899 bis 1938 setzte ein rascher Einwuchs ein, vor allem auf dem Grund des heutigen Stausees Ova Spin. In der Abbildung 27 ist eine starke Abnahme der Waldfläche in der zweiten Periode von 1938 bis 1973 im flachen Bereich zu erkennen, dies ist höchstwahrscheinlich auf die Errichtung des Stausees um 1964 zurückzuführen (Gaudenz 2012: Email). Klammert man die flachen Bereiche aus, bewegen sich die Waldflächenveränderungen in Abhängigkeit der Hangausrichtung und der Zeit von 7.5% (S) bis 12.5% (NO). Bemerkenswert ist jedoch, dass speziell auf Südhängen am wenigsten Waldflächenzunahme zu verzeichnen ist, andererseits auf Nordost- und Westhängen am meisten. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnte die Tatsache sein, dass in den Alpen auf Südhängen vorwiegend Weideland betrieben wurde, und Südhänge auch für die forstwirtschaftliche Nutzung erschlossen wurden (Paulsen & Körner 2001). Ein anderer, genereller Aspekt wird von Stage & Salas (2007) aufgeworfen: In niederen Lagen eines Gebirges liegt der Hauptanteil der Waldfläche auf Nord- und Nordwesthängen (mit einem Minimum auf Südhängen), in höheren Lagen, im Waldgrenzbereich, ist die Verteilung umgekehrt (Stage & Salas 2007; Roise & Betters 1981). Die Ursachen für diese Verteilung werden leider nicht diskutiert, die Erkenntnis könnte allenfalls mit dem Befund von Paulsen & Körner (2001), (siehe oben) zusammenhängen. Auf Westhängen ergibt sich wegen genereller Westwindrichtung grundsätzlich mehr Niederschlag, dies könnte im Zusammenhang mit dem dolomitischen, karbonathaltigen Gestein ein wichtiger Faktor für das Baumwachstum sein (Holtmeier & Broll 2007).

### 6.2.4 Waldflächenveränderungen in Abhängigkeit der Hangneigung zw. 2000 - 2400 m ü. M.

Die Waldflächenveränderungen zeigen eine starke Konzentration im Bereich 25-35° Hangneigung (Abb. 29). Dies ist schlicht auf die relative Verteilung des Hangneigungsbereichs von 25-35° zurückzuführen, welcher relativ zum gesamten Einzugsgebiet die grösste Fläche in Anspruch nimmt (Abb. 31).

Die relativen Zunahmen zeigen eine Konzentration der Zunahmen im Bereich von 15-25° Hangneigung (Abb. 32), dies ist auch bei der relativen Nettowaldflächenveränderung nach Hangneigung der Fall (Abb. 34). Auffallend auch hier die Abnahme im Bereich 0-2°

Hangneigung von 1938 bis 1973, welche hauptsächlich auf die Errichtung des Stausees zurückzuführen ist (Gaudenz 2012: Email).

Über die Ursachen der geringer werdenden Zunahmen mit zunehmender Hangneigung und die Konzentration der Zunahmen im Bereich 15-25° kann wiederum spekuliert werden: Mit zunehmender Hangneigung sinkt die Bodenmächtigkeit und die Kapazität des Bodens, Wasser zurückzuhalten (Stueve et al. 2007). Der Boden kann eher austrocknen, Hangzugwasser kann Wasser und Nährstoffe abführen und es kann zu Bodenerosion kommen (Scheffer und Schachtschabel 2010). Die Konzentration im Bereich 15-25° Hangneigung scheint für das Baumwachstum ideal zu sein: Feuchte, Wärmehaushalt und Bodenmächtigkeit sind mögliche Faktoren, die ein erhöhtes Baumwachstum in diesem Bereich erlauben (Batllori et al. 2009; Brown 1994). Dabei ist allerdings zu erwähnen, dass der Bereich 15-25° nur mit ca. 2% über dem Wert der Bereiche 2-15° und 25-35° liegt, eine generelle Aussage ist wohl nur insofern machbar, als dass ab 35° Neigung ein Baumwachstum stark eingeschränkt bis verunmöglicht wird (Brown 1994).

Da die Flächen mit Hangneigung 15-25° relativ zum gesamten Einzugsgebiet mit knapp 2900 ha am dritthäufigsten vertreten sind, ist davon auszugehen, dass diese Flächen, vor dem Hintergrund des Klimawandels in Zukunft eine Ansiedlung von Bäumen und später eventuell auch Wald, erfahren werden. (Abb. 31).

Da mit zunehmender Höhe grössere Hangneigungen auftreten, im Untersuchungsgebiet befinden sich 46% der Hänge oberhalb der Baumgrenze zwischen 2400 und 2600 m ü. M. auf Neigungen mit über 35° (siehe Kapitel 5.8), ist der Anstieg der Waldgrenze eingeschränkt.

#### 6.2.5 Waldflächenveränderungen im Waldgrenzbereich

Im Bereich zwischen 2200 und 2400 m ü. M. ist die Zunahme der ersten beiden Zeitstände, welche praktisch gleich hoch sind, auffallend. Vergleicht man weiter die Abnahmen, ist wiederum eine hohe Abnahme von 1938 bis 1973 augenfällig. Diese Tatsache ist höchstwahrscheinlich auf die erwähnte Umstellung in der Methodik zurückzuführen. Ein verändertes Störungsregime aufgrund des Klimawandels als Ursache für dieses Muster wäre grundsätzlich möglich, jedoch kann dies durch die Forschung im SNP nicht bestätigt werden (Haller 2012: Gespräch) und wäre aufgrund der schieren Grösse des Einzugsgebietes auch wenig wahrscheinlich. Dabei ist zu erwähnen, dass die gut untersuchte Waldbrandfläche bei Il Fuorn nur bis 2140 m ü. M. reicht, mit einer Ausdehnung von ca. 10 ha, und somit in dieser Grafik nicht erfasst wird (Stäheli et al. 2006). Bei Betrachtung der Netto- und relativen Nettozunahme ist dann die höhere Zunahme in der letzten Periode von 1973 bis 2008 ab

dem Bereich 2250-2300 m ü. M. zu erwähnen. Vergleicht man nun den Waldeinwuchs ab 1973, ist erkennbar, dass ab der Höhe 2250 m ü. M. praktisch kaum mehr Waldeinwuchs stattfindet. Dass ab diesem Bereich der Wald stärker zugenommen hat als in der vorherigen Periode, und gleichzeitig Einwuchs praktisch nicht mehr in Frage kommt, ist ein Indiz für Klimawandel als Ursache des Anstiegs in der Fläche und in der Höhe.

#### 6.2.6 Analyse der grössten Abnahmen im Waldgrenzbereich

Auf der rechten Talseite des Val Trupchun, am Eingang des SNP im Gebiet der Wälder Malogetta und Purcher befinden sich die grössten Abnahmen über den Gesamtzeitraum. Dieses Gebiet wurde erst 1961 als Nationalpark ausgeschieden. Aus den Waldwirtschaftsplänen ist folgendes in Erfahrung zu bringen: Die Alp Purcher, welche sich gerade unterhalb der grössten Abnahmen am Eingang des SNP befindet, wurde noch bis 1960 beweidet. Durch diese Nutzung wurden die höherliegenden Wälder Malogetta und Purcher übernutzt. Im Forstbericht von 1941 wird explizit erwähnt, dass die Beweidung mit Schafen dem Wald, vor allem hinsichtlich dessen Verjüngung, grossen Schaden zufügt und dass besonders im oberen Teil des Waldes die Beweidung so intensiv ist, dass ein Rückgang des Waldes zu befürchten wäre (*FJB Trupchun* 1941).

Weiter ist das Gebiet durchsetzt mit Lavinaren, aber nur 11% der Abnahme befindet sich auf Lavinaren, ein Zeichen dafür, dass diese Störung in diesem Bereich zu einem geringen Teil ein Waldwachstum eingeschränkt, eventuell, durch die regelmässigen Lawinnengänge, sogar Waldfläche reduziert haben.

Für die Abnahme nach Ausscheidung des Gebietes in den SNP kommt der negative Einfluss des Rothirsches in diesem Gebiet als mögliche Ursache in Frage: Rothirsche sind ab 1960 häufig und in grosser Zahl auf der rechten Talseite des Val Trupchun anzutreffen (*Haller* 2012: Gespräch). Dass hohe Wildtierbestände, vor allem Hirsche, einen negativen Einfluss auf die Entwicklung der Vegetation, insbesondere des Waldes haben, wurde im SNP festgestellt (*Schütz et al.* 2000).

#### 6.2.7 Analyse der fünf grössten Zunahmen zwischen 1899 und 2008 im Waldgrenzbereich zwischen 2200 und 2400 m ü. M.

Im Folgenden soll kurz diskutiert werden, welche möglichen Gründe für die Zunahme im jeweiligen Gebiet eine Rolle spielen. Dabei wird der Fokus auf die Waldbewirtschaftung unmittelbar vor dem Schutzstatus, bzw. vor Etablierung des Gebietes als Nationalpark eingegangen.

- Auf **Fläche 1**, rund um den Munt la Schera, vor allem am Südhang des Val dal Spöl sind leider keine waldwirtschaftlichen Aufzeichnungen verfügbar. Von Parolini ist aber bekannt, dass auf der gegenüberliegenden Seite des Val dal Spöl bis ins 20. Jahrhundert Köhlerei betrieben wurde. Aus dem Gemeindecarchiv Zernez (*GA Zernez 1882*) ist bekannt, dass bis in den unteren Bereich des Val Praspöls bei Plan Praspöl und zum Teil auch nach der Gründung des Nationalparks, Holzfrevel betrieben wurde. Auch Brunies kam 1906 zum Schluss, dass Bäume, auf Brusthöhe gefällt, in Bereichen ohne Alpwirtschaft dem Holzfrevel zum Opfer fielen (*Brunies 1906*). Auf den erwähnten Flächen sind aber keine grösseren Zu- oder Abnahmen zu verzeichnen, daher hielt sich die Holznutzung wohl insgesamt in Grenzen.

Die Zunahmen über die ersten zwei Perioden sind ähnlich wie bei der Fläche 2 relativ gleichmässig (41 und 44 %), während die letzte Periode nur noch einen kleinen Anteil von 15% an der Gesamtzunahme aufweist. Der geringfügig höhere Anteil in der zweiten Periode hängt wahrscheinlich mit dem Holzfrevel und der Köhlerei zusammen, das heisst, dass sich der Wald erst in der zweiten Periode (1938-1973) richtig erholen konnte und aufgrund der ausgesetzten Nutzung wohl stärker einwachsen konnte. Von diesem Prozess abgesehen, bestätigt sich der Trend der Zunahme im Gesamtuntersuchungsgebiet: Die rasche Zunahme in den ersten zwei Perioden mit einem Abflachen der Zunahme in der letzten Periode. Gestützt wird dieses Erkenntnis durch die Studie von Schütz, Krüsi & Edwards (2000), die am Munt la Schera den Sukzessionsverlauf des Bergföhrenwaldes untersucht haben und zum Schluss kamen, dass weder die erhöhte Dichte von Huftieren (bis zu 40 Tiere auf 100 ha), noch das Lawinenereignis von 1996 einen wesentlichen Einfluss auf den Bergföhrenbestand hatten (*Schütz, Krüsi & Edwards 2000*).

- Auf **Fläche 2** im Gebiet Val dal Botsch und Val Stabelchod wurde im Jahre 1850 letztmals eine Schlagbewilligung ausgeteilt (*GA Zernez 1863*). Diese Bewilligung beschränkte sich jedoch nur auf flache Partien und war mit Massnahmen zur Verhinderung von Erosion und Rufenbildung verknüpft. So mussten beispielsweise Wälder der 1. Schutzklasse, sogenannte „Bergabhänge“ und ein ca. 70 Meter breiter Streifen entlang der Wege geschont werden (*GA Zernez 1910*). Die Beschränkung auf flache Partien mit gleichzeitiger Schonung der steileren Bereiche spiegelt sich in der Analyse der Hangneigung nieder: Knapp die Hälfte der Zunahme befindet sich auf einer Hanglage von 25-35°.

Die Wälder in diesem Gebiet wurden selektiv genutzt, Kahlschläge fanden zu dieser Zeit keine mehr statt. Dokumentiert wird dies unter anderem durch den Gemeinde- und Revierförster, welche um 1855 mit der Schlagholzzeichnung, das heisst der Anzeichnung von Einzelbäumen zum Schlag, beschäftigt waren. Des Weiteren wird in der Untersuchung

über die Entwicklungsdynamik von aufrechten Bergföhrenbeständen in diesem Gebiet von Schlegel (1985) festgestellt, dass Kollektive der gleichen Altersklasse (120-130 Jahre) lokal nur sehr begrenzt anzutreffen sind und die Bestände nur um die 0.5 ha betragen. Dabei handelt es sich um die nachgewachsenen Bestände nach der letzten Holzschlagperiode in den Jahren 1855-61 (*Schlegel* 1985).

Die Zunahmen über die ersten zwei Perioden sind relativ gleichmässig (40 und 45 %), während die letzte Periode nur noch einen kleinen Anteil von 15% an der Gesamtzunahme aufweist. Auf dieser Fläche bestätigt sich der Trend der Zunahme im Gesamtuntersuchungsgebiet: Die rasche Zunahme in den ersten zwei Perioden mit einem Abflachen der Zunahme in der letzten Periode. Leider kann in diesem Zusammenhang keine direkte Aussage über das Einwachsen gemacht werden, jedoch weisen die Beobachtungen von Schlegel (1985) darauf hin, dass das Einwachsen eine plausible Ursache für die Konzentration der Zunahmen auf die ersten beiden Perioden sein könnte.

- Über die **Fläche 3** im Val Mingèr sind ausser der Angabe von partiellen Bauholznutzungen keine grösseren Holznutzungen bekannt. Jedoch ist davon auszugehen, dass in der Zeitspanne vor 1900 vor allem Legföhren, als Brennholz genutzt wurden. Ab dem 20. Jahrhundert sind dann Forstberichte der Gemeinde Scuol vorhanden, die in Mingèr und Foraz von einer jährlichen Holznutzung von 119 m<sup>3</sup> pro Hektare zwischen 1897 und 1911 ausgeht. Dies entspricht ungefähr der Hälfte des 1957 ermittelten jährlichen Zuwachses (255 m<sup>3</sup>/ha) und deutet darauf hin, dass die Waldfläche netto zugenommen hat. Auch nach Errichtung des Nationalparks wurde in Mingèr bis 1937 Holz genutzt, jährlich ca. 143 m<sup>3</sup>/ha als Kompensationsmassnahme für die wirtschaftliche Einbusse der Gemeinde. Diese historischen Angaben decken sich nicht mit meinen Ergebnissen, dass die Zunahmen vor allem in der ersten Periode von 1899 bis 1938 stattfanden (62% der Zunahmen über den Gesamtzeitraum in der ersten Periode). Grössere Abnahmen sind im Val Mingèr gemäss meinen Angaben keine zu beobachten (*Parolini* 1995). Unklar bleibt, wo genau der Wald noch genutzt wurde. In diesem Zusammenhang erwähnt Parolini, dass zwischen 1902 und 1904 auf einer Länge von 1.8 km Wege gebaut und/oder ausgebessert wurden, hauptsächlich entlang des Baches im Val Mingèr. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass ab dem 20. Jahrhundert keine Legföhren im Waldgrenzbereich mehr, sondern Bauholz in geringeren Höhenlagen, entlang des Bachbettes, genutzt wurde. Somit würde diese Nutzung in meiner Analyse des Waldgrenzbereichs (2200 – 2400 m ü.M.) nicht mehr berücksichtigt werden.

- Auf **Fläche 4**, im Gebiet Murteras da Grimmels, das erst 1932 zum Nationalparkgebiet erklärt wurde, erstellte man 1921 einen Nutzungsplan, aufgrund dessen in den kommenden

Jahren bis zur Integration in den Nationalpark eine Holzmenge von über 3500 m<sup>3</sup> genutzt werden sollte. Dabei ist davon auszugehen, dass höchstwahrscheinlich weniger Holz genutzt wurde, als im Nutzungsplan vorgesehen war. So erwähnt Forstingenieur Campell 1924, dass der Absatz des gefällten Brennholzes immer mehr Mühe bereiten würde. Ein weiterer Hinweis, dass die Mengen im Nutzungsplan anfänglich nicht erreicht werden konnten, ergibt sich aus der Tatsache, dass die Gemeinde Zernez in den 20er Jahren den Brennholzabsatz subventionieren musste (GA Zernez 1924). Dokumentiert wurden diese Nutzungen auf einer Höhe um 2300 m ü. M., dabei wurde auf eine gute Durchmischung der verschiedenen Baumarten geachtet. Nun könnte man annehmen, dass aufgrund der Nutzung in dieser Höhenlage, eine Abnahme festzustellen wäre, dies ist aufgrund meiner Ergebnisse jedoch nicht der Fall. Die Art der Holznutzung liefert hier eine mögliche Erklärung: Genutzt wurden nur Holzlose, damit ist die Entnahme von Einzelbäumen im Sinne einer Dauerbewaldung gemeint (Hilf 2003). Bei Betrachtung der Verteilung der Zunahmen fällt auf, dass der Hauptanteil (70%) in der ersten Periode stattfand, also noch vor der Ausscheidung des Gebietes als Teil des Nationalparks. Dieses Ergebnis wird gestützt durch die Angaben, dass die Nutzung durch Entnahme von Einzelbäumen (Holzlose) erfolgte.

- Auf **Fläche 5** am Nordhang des Piz Terza bei Falcun wurden im Jahre 1891 grössere Durchforstungen ausgeführt (GA Zernez 1876). Auch nach der Aufnahme in den Nationalpark 1920 behielt sich die Gemeinde ein Holznutzungsrecht vor, jedoch waren die obersten Arven- und Lärchengürtel aus Schutzgründen davon ausgenommen. Die Gemeinde erhoffte sich damals, den Wald bei Falcun noch weiter nutzen zu können, die Lärchenbestände entwickelten sich aber relativ langsam, höchstwahrscheinlich weil dieser Wald auf einer ehemaligen Brandfläche entstand und weil der Boden als „sehr mageren Humuskarbonatboden“ beschrieben wird (GA Zernez 1891). Diese Feststellung deckt sich mit meiner Analyse des Substrates, 85% ist Lockermaterial mit über 60% Karbonatanteil. Zu bemerken ist allerdings, dass diese Fläche mit einer Zunahme von nur 4 ha im Vergleich zur Ausdehnung der anderen 4 Flächen relativ klein und die Aussagekraft deswegen beschränkt ist.

#### 6.2.8 Gruppierung der Faktoren über die gesamten fünf Flächen

In diesem Kapitel soll die Diskussion zu den einzelnen Faktoren wiederaufgenommen werden und speziell für den Waldgrenzbereich diskutiert werden.

Alle fünf Flächen zeigen, mit Ausnahme der ersten Fläche, die eine geringfügig stärkere Zunahme von 2.5 % in der zweiten Periode aufweist, ein rasche Zunahme in den ersten zwei Perioden mit einem Abflachen der Zunahme in der letzten Periode. Die fünf grössten Zunahmen bestätigen also den Trend, der sich im gesamten Untersuchungsgebiet zeigt.

Alle fünf Flächen befinden sich auf **karbonathaltigem Untergrund**. Dies ist nicht weiter erstaunlich, da sich der mit Abstand grösste Teil des Untersuchungsgebietes auf kalziumreichem Ausgangsgestein befindet. Die Analyse des geologischen Untergrundes deckt sich mit der Analyse des Substrates (95% der Flächen auf Lockermaterial mit über 60% Karbonatanteil) und mit der Geomorphologie (hauptsächlich Geomorphologisch aktive Flächen wie Terrassen-, Erosionsränder, -kegel, Bergsturz-/Blockschutt zu 55%, und Kalkschutt und Moränen zu jeweils 24 und 21%).

Als **Vegetation** ist hauptsächlich Bergföhre (*Pinus mugo*) zu finden, da *Pinus mugo* eine Pionierart darstellt, die sich häufig auf Erdwällen, Schuttkegeln und Moränen ansiedelt (*Batllori et al. 2009; Burga & Perret 2001*). Ferner finden sich die häufigsten Zunahmen (über 60%) auf ehemaligen Wiesen und alpinen Matten, am zweithäufigsten auf ehemals offenem Wald, dies könnte ein Hinweis auf das starke Einwachsen in den ersten zwei Untersuchungsperioden sein.

Die häufigsten Zunahmen befinden sich vor allem auf **Südwest- und Südhängen**, welche als Bereich mit der häufigsten Zunahme im Waldgrenzbereich typisch zu sein scheinen (*Stage & Sallas 2009; Roise & Betters 1981*, siehe Kapitel Waldgrenzverschiebungen Hangneigung). Weiter könnten die Zunahmen damit zusammenhängen, dass auf Südhängen die Vegetationsdauer länger anhält und die Strahlungsbilanz günstiger ist. Auf Westhängen ergibt sich, wie schon erwähnt, wegen genereller Westwindrichtung grundsätzlich mehr Niederschlag, jedoch ist Körner (2012) der Ansicht, dass der Faktor Wasser, beziehungsweise Niederschlag, kein Schlüsselfaktor bei der Etablierung einer Baumgrenze ist, im Gegenteil, „je trockener das Klima, desto höher die Baumgrenze“ (*Körner 2012*). Niederschläge in zentralalpinen Lagen sind gemäss Turner 1970 und Lauscher 1976 ab 2000 m ü. M. aufwärts grösser (*Turner 1970; Lauscher 1976*).

Allenfalls könnte Wintertrockenheit auf Nord-, Nordosthängen, speziell im Waldgrenzbereich, der weniger gut vor Witterung geschützt ist als geschlossener Wald, die jungen Triebe negativ beeinflussen, ein Faktor, der am ehesten bei kontinental geprägtem, alpinen Klima auftritt, was in unserem Fall gegeben ist (*Körner 2012*).

Die häufigsten Zunahmen bezüglich **Hangneigung** finden sich zwischen **15-25° und 2-15°** (38, respektive 35%). Aus diesem Resultat eine generelle Favorisierung der Bäume auf einen spezifischen Hangneigungsbereich abzuleiten, ist schwierig, eher markiert der Übergang von 25-35° zu 35-45° eine Schwellenneigung, ab welcher kaum noch Baumwachstum möglich ist (siehe S. 62). Interessanterweise ist die Flächenzunahme im flachen Bereich (0-2° Neigung) sehr klein, dies könnte unter Umständen dadurch bedingt sein, dass sich flache Bereiche im alpinen Gebirge meist am Hangfuss befinden, in Bereichen, in denen regelmässig relativ viel Hangschutt angeliefert wird (*Resler 2006*).

### 6.2.9 Hauptkomponentenanalyse (PCA)

Die Hauptkomponentenanalyse (PCA) stellt nur eine statistische Korrelation im Raum her, PCA soll also nicht suggerieren, dass eine kausale Gewichtung der einzelnen Parameter möglich ist und kann keine Antwort auf die Frage geben, aus welchem Grund nun der Wald auf einem beliebigen Standort zu- oder abgenommen. Die PCA benötigt fünf Hauptkomponenten, um auf das 95% Vertrauensniveau zu gelangen, dies ist relativ viel, meistens genügen zwei bis drei Komponenten (*Dunteman* 1989). Daraus folgt, dass die ersten fünf Komponenten ähnlich wichtig sind. Dennoch gibt PCA einen Anhaltspunkt, welche Faktoren vorrangig betrachtet werden können. Die Analyse von Waldfläche mit Bedeckung ( $r=0.97$ ) scheint den wichtigsten statistischen Zusammenhang zu generieren, auch doppelseitig, das heisst, die Korrelation von Bedeckung mit Waldfläche ist mit  $r=0.6$  zwar kleiner, sodass aber immer noch von einer relativ hohen Korrelation gesprochen werden kann. Nun könnte man die PCA für den gesamten Bereich 2200 bis 2400 m ü. M. mit der Analyse der fünf grössten Zunahmen vergleichen. Dabei fällt auf, dass offensichtliche Zusammenhänge bei der Analyse der fünf grössten Zunahmen, zum Beispiel der Zusammenhang zwischen Substrat und Geologie mit der PCA nicht erklärt werden können.

### 6.2.10 Verschneidung der Faktoren der Waldflächenzunahme im Waldgrenzbereich

Einflussfaktoren wie Bedeckung, Vegetation, Geologie und Substrat werden nicht umfassend diskutiert, da bei der Analyse der jeweiligen Ursachen der Massstab oftmals auf dem Einzelbaum liegt, beziehungsweise liegen muss, um den Faktor entsprechend erläutern zu können. Als Ergänzung zur PCA fungiert die Verschneidung der erst- und zweithäufigsten Klasse der jeweiligen Faktoren des Waldflächenzuwachses im Waldgrenzbereich. Mittels Analyse der erst- und zweithäufigsten Klassen der jeweiligen Faktoren wird versucht, gewisse günstige Standortbedingungen herauszuarbeiten. Der ermittelte Wert von 11% ist äusserst klein, dies deutet daraufhin, dass die verschiedenen Faktoren, beziehungsweise deren Verteilung der Klassen, vorerst kaum eine Aussage über gewisse Gunstflächen zulassen. Mit dem Entfernen der Faktoren mit gleichmässigsten Klassen (Vegetation und Hangneigung), sieht das Bild dann etwas konkreter aus, der Wert steigt auf 51%. Dies erklärt nun also auf der Hälfte der Waldflächenzunahme Klassen, die am erst- und zweithäufigsten räumlich miteinander vorkommen oder erklärt eine Hierarchie der verschiedenen Faktoren auf 51% der Flächenzunahmen. Dieser Wert soll nicht suggerieren, dass Vegetation und Hangneigung keinen Einfluss auf die räumliche Ausbreitung der Waldgrenze haben, im Gegenteil: Bei der PCA wird ein Korrelationskoeffizient von Vegetation mit Wald (einseitig) von 0.65 erreicht. Durch diese Beschränkung können aber günstige Standortbedingungen generiert werden.

### 6.2.11 Verteilung der Faktoren oberhalb der Baumgrenze zwischen 2400 und 2600 m ü. M.

Trotz der geringen Aussagekraft bei der Analyse der jeweiligen Faktoren wird ein Blick in höhere, zukünftige Waldgebiete gemacht. Dabei entsteht, vereinfacht, folgendes Bild:

„Ein Substrat mit Lockermaterial und hohem Karbonatanteil, auf geomorphologisch aktiven Flächen wie Terrassen, Schutt, Sackungen, verschiedenen Denudationsflächen, teilweise von Grasheiden bewachsen, auf Hängen mit Neigung zwischen 25-45° und relativ gleichmässiger Ausrichtung.“

Im Vergleich zu den Gunstlagen im Waldgrenzbereich und vor dem Hintergrund eines weitergehenden Aufwärtsschreitens des Waldes in der Zukunft sieht die Verteilung der Klassen der jeweiligen Faktoren zumindest nicht ungünstig aus: Als Pionierpflanze ist *Pinus mugo* (als aufrechte Bergföhre oder krüppelige Legföhre) auf morphologisch aktiven Untergrund gewöhnt, ein hoher Karbonatanteil des lockeren Substrates scheint auch kein negativer Faktor darzustellen. Grasheiden können die Startbedingungen für ein erfolgreiches Besiedeln wesentlich verbessern, vor allem indem die Gras- oder Krautschicht aufkommende Triebe vor allzu starker Witterung schützt und die mikroklimatischen Bedingungen bedeutend verbessern (*Körner* 2003). Das Phänomen der zunehmend steiler werdenden Hänge mit der Höhe ist hinlänglich bekannt (*Holtmeier* 2000), die grösste Verteilung liegt bei 25-35°, jedoch sind knapp die Hälfte (46%) der Flächen über 35°, der Schwellenwert für Baumwachstum beträgt 38° (*Brown* 1994). Dies könnte beim künftigen Vorwärtsschreiten ein negativer Standortfaktor darstellen.

Die relativ detaillierte Analyse der Faktoren Geologie, Geomorphologie, Vegetation, Bedeckung, sowie Substrat und das ernüchternde Ergebnis zeigen, dass der Massstab bei diesen Untersuchungen nicht adäquat ausgewählt wurde. In der Diskussion um den „richtigen“ Massstab zur Erforschung der Schlüsselfaktoren im Waldgrenzbereich herrscht nach wie vor Unklarheit. So gelangen viele Forscher zu Schlussfolgerungen wie „everything matters“ (*Körner* 2012). Meine Ergebnisse tendieren nun leider auch in diese Richtung, insbesondere die obengenannten Analysen. Um eine Differenzierung, beziehungsweise Hierarchie der Einflussfaktoren zu bewerkstelligen, wären detaillierte, längerfristige Felduntersuchungen nötig, die auch von verschiedenen Autoren gefordert werden (*Callaghan et al.* 2002; *Crawford et al.* 2003; *Bachelet & Neilson* 2000; *Holtmeier & Broll* 2007).

### 6.2.12 Einwuchs

Der geringe Einwuchs, sowohl unterhalb als auch oberhalb des Waldgrenzbereichs, deckt sich mit meiner Hypothese und dem Ergebnis, dass zu Beginn der gesamten Untersuchungsperiode ein starker Anstieg der Waldfläche zu beobachten ist, der dann von einem Abflachen der Zunahmen abgelöst wird. Einwuchs scheint nach knapp 60 Jahren (seit der Parkgründung 1914) unterhalb des Waldgrenzbereiches keine grössere Rolle mehr zu spielen, nur 59 ha werden als Einwuchs ausgeschieden. Die Verteilung des „echten“ Aufwärtsschreiten (Nettozunahme, Einwuchs davon abgezogen) der Walfläche ist interessant: Offenbar hat jener Wald, der „echtem“ Aufwärtsschreiten zugeschrieben werden kann, in der Fläche unterhalb der Waldgrenze (33 ha) weniger stark zugenommen als innerhalb der Waldgrenze (50 ha). Dieser Effekt ist nicht damit zu erklären, dass in der Höhenstufe des Waldgrenzbereichs mehr Fläche vorhanden wäre, wie die Abbildung 19 zeigt, sondern damit, dass die Nettozunahme (ohne Einwuchs) von 1973 bis 2008 gesamthaft im Waldgrenzbereich stärker war (Abb. 55, 56).

### 6.3 Einordnung der Ergebnisse in die aktuelle Forschung

Im folgenden Kapitel sollen die Ergebnisse vor dem Hintergrund der aktuellen Forschung diskutiert werden.

Der Hauptfaktor für Waldflächenveränderungen weltweit stellt der anthropogene Einfluss dar (Körner 2012). In den Schweizer Alpen ist dieser Prozess, der mit der Industrialisierung Mitte des 19. Jahrhunderts startete, vor allem auf die Aufgabe von Wiese- und Weideland zurückzuführen (Surber et al. 1973, Mather & Fairbairn 2000). Durch die Aufgabe der über Jahrhunderte stark genutzten alpinen Gebiete, hat die Waldfläche in der Schweiz in den letzten 150 Jahren um ca. 30% zugenommen (Brändli 2000).

In der Arbeit von Gehrig-Fasel et al. (2007) wurde die Baumgrenzlinie über einen Zeitraum von 12 Jahren untersucht, und dabei versucht, Klimawandel von Landnutzungswandel abzugrenzen (siehe Kapitel 2.2). Dies ist jedoch mit nur einer Untersuchungsperiode über nur 12 Jahre und einem Untersuchungsgebiet, das die ganze alpine Stufe der Schweiz abdeckt, äusserst schwierig. Eines der Hauptresultate meiner Arbeit ist der Anstieg des mittleren Waldgrenzbereichs von 2297 m ü. M. im Jahre 1899 auf über 2391 m ü. M. im Jahre 2008, ein Gesamtanstieg von über 94 Metern. In der Arbeit von Gehrig-Fasel et al. (2007) wird in einem Zeitraum von 12 Jahren (1985-1997) einen mittleren Anstieg von über 28 Metern postuliert. Dabei wurden über 90 % der neuen Flächen dem Einwuchs infolge Nutzungsaufgabe zugeschrieben (Gehrig-Fasel 2007). Daraus könnte man ableiten, dass

sich im gesamten Alpenraum die Waldflächen hauptsächlich aufgrund des Einwuchses ausbreiten. Im Vergleich mit meinen Daten, die einen mittleren Anstieg von 16 Metern in der letzten Periode (1973 bis 2008) zeigen (im Vergleich zum gemittelten Gesamtanstieg von 94 Meter, leider kann ich aus erwähnten kartografischen Gründen den Einwuchs für die ersten beiden Perioden nicht darstellen), scheint die Situation in den Alpen heutzutage ähnlich der Situation im Nationalpark in den ersten Jahrzehnten nach dessen Gründung. Vergleicht man nun die Resultate der letzten Arealstatistik des Bundes, kommt man zu einem ähnlichen Schluss: Über 80% der Waldflächenzunahmen von 1983 bis 2007 entstanden in Höhen zwischen 2000 und 2400 m ü. M., also in Bereichen der Alpsommerung und höheren landwirtschaftlichen Bergzonen. Über 60% der Zunahmen beschränken sich auf Hänge mit mehr als 50% Neigung, auf welchen auch die Nutzungsaufgabe mit über 9% am grössten ist (BFS 2012).

Ein mit 50 Jahren deutlich längerer Zeithorizont wird von Dullinger et al. (2004) in einem Modell zur Darstellung der räumlichen Verteilung von Bäumen an der Baumgrenze angewendet. Dadurch wird versucht, mögliche Fehler zu vermeiden, vor allem vor dem Hintergrund, dass das Wachstum von jungen Trieben und das Überleben von Samen im Waldgrenzbereich stark eingeschränkt ist und ein Voranschreiten in grössere Höhen oft pulsartig, alle 10-12 Jahre, geschieht (Dullinger et al. 2004). Ein Schritt weiter geht Ch. Körner, der einen Untersuchungszeitraum von 50 Jahren als zu kurz betrachtet und davon ausgeht, dass ein heutiger Waldgrenzbereich auf das Klima vor mindestens 50, eher 100 Jahren, reagiert (Körner 2012). Hier setzt nun meine Arbeit an und könnte eine Lücke schliessen: Die Eröffnung der Kernbereiche des Nationalparks geht auf das Jahr 1914 zurück, direkter anthropogener Einfluss kann seither ausgeschlossen werden. Da sich Bäume im Waldgrenzbereich pulsartig verbreiten, das heisst auf gute Vegetationsperioden angewiesen sind, die alle 7 bis 12 Jahre stattfinden (Holtmeier 2000) ist der Untersuchungszeitraum dieser Arbeit von 109 Jahren wesentlich geeigneter. Des Weiteren wurde in einer globalen Metaanalyse zur Baumgrendynamik von Harsch et al. (2009) gezeigt, dass Baumgrenzen auf den Klimawandel zeitlich versetzt reagieren, typischerweise aber nur um einige Jahrzehnte (Harsch et al. 2009). Ein „echtes“ Aufwärtsschreiten der Baumgrenze scheint in Abständen von 35 Jahren also plausibel. Auch Gehrig-Fasel et al. kritisieren, dass für eine effektive Abgrenzung des Klimawandels vom Landnutzungswandel längere Zeithorizonte nötig sind, ein Umstand der auch von Holtmeier & Broll (2005) bestätigt wird (Holtmeier & Broll 2005).

Ein weiterer Kritikpunkt ist die methodische Beschränkung auf Kartenmaterial. Mit Feldbegehungen hätten beispielsweise Baumringanalysen über das Alter der Bäume Auskunft gegeben, mittels Bodenproben hätte etwaiger, auftauender Permafrost untersucht sowie die Bodenfeuchte in versch. Hanglagen, beziehungsweise Ausrichtung gemessen

werden können. Ein Einbezug solcher Feldarbeiten würde den Rahmen einer Masterarbeit jedoch sprengen.

#### 6.4 Weiterführende Überlegungen und Ausblick

Rückkoppelungsmechanismen, ausgelöst durch höherschreitende Waldgrenzbereiche, wie etwa den Einfluss auf räumliche Strukturen im Waldgrenzbereich, sind wahrscheinlich ebenso wesentlich für die räumliche Verbreitung von Wald und Bäumen wie die Klimaerwärmung an sich. Waldgrenzverschiebungen beeinflussen das regionale und lokale Klima, die Mineralisation, Pedogenese, Tierpopulationen und Biodiversität (*Brun & Moen 2003; Holtmeier 2003; Sjögersten & Wookey 2005; IPCC 2007*). Im Folgenden werden möglich Effekte einer künftigen Waldgrenzverschiebung auf verschiedene Faktoren diskutiert. Diese Überlegungen sind äusserst spekulativ und beinhalten noch ungenügend verstandene Zusammenhänge und Wechselwirkungen.

Ein Anstieg der Temperaturen und Niederschläge (höherer Dampfdruck bei höheren Temperaturen) könnte in Wechselwirkung mit dem Anstieg in die Höhe im Waldgrenzbereich folgende Auswirkungen haben:

Höhere Schneemengen könnten die isolierende und stabilisierende Wirkung für junge Triebe im Waldgrenzbereich verbessern. Junge Triebe können in Gesellschaft mit Büschen und mit Unterstützung des Windes mehr Schnee akkumulieren. Der Schnee würde generell wegen grösserer Menge länger liegen bleiben, obwohl das Klima wärmer wird. Diese isolierende Schicht würde die Bodentemperatur erhöhen, ein entscheidender Faktor für die Ausbildung von jungen Trieben. Durch die längere Schneebedeckung würde aber die Vegetationsperiode verkürzt, dieser Effekt stellt eine negative Rückkoppelung dar (*Holtmeier & Broll 2007*). Auf gut drainierten, eher trockenen Standorten, wie dies im SNP der Fall ist, sollte der negative Effekt der verminderten Vegetationsperiode aber durch die gute Ausgangslage im Frühjahr wettgemacht werden: Die relativ dicke Schneedecke wird im Frühling rasch entwässert (besonders auf südexponierten Hängen), gefolgt von relativ schnellen Temperaturerhöhungen. Der negative Effekt von Frost-Tauprozessen kann somit minimiert werden. Es scheint, als sei die Qualität des Bodens auf trockenen Standorten, vor allem Wärme und Feuchte, eher für das Baumwachstum entscheidend als die Länge der Vegetationsperiode (*Weih 2000; Karlsson & Weih 2001*).

Höhere Wintertemperaturen reduzieren zwar die Mortalität von Keimlingen (*Kullmann 2007*), erhöhen aber die Gefahr von Frost-Tauprozessen, welche für die Etablierung von jungen Trieben, äusserst schädlich sind. Durch die höhere Schneemenge könnte dieser Effekt aber wiederum kompensiert werden, insbesondere wenn der Wechsel zu wärmeren

Temperaturen im Frühling schnell geschieht und der Standort gut drainiert ist (*Gross et al. 1991; Perkins et al. 1991*).

Mit zunehmender Temperaturerhöhung ist in Zukunft mit abschmelzendem Permafrost und dadurch mit einer Abnahme der Stabilität von Hängen und zunehmender Erosion zu rechnen. Morphologisch aktive Bereiche werden zunehmen und potentielle Waldstandorte negativ beeinflussen. Ab 2400 Meter nimmt im SNP die Hangneigung zu, durch den Klimawandel, respektive durch die erhöhte morphologische Aktivität wird längerfristig (>10'000 Jahre) eine Glättung des Reliefs stattfinden und die Reliefenergie abnehmen. Somit würden wieder mehr potentielle Flächen geschaffen, auf denen sich Wald ansiedeln könnte.

#### 6.4.1 Auswirkungen auf globaler Ebene

Auf der Nordhalbkugel könnte die Klimaerwärmung ein Voranschreiten der borealen Nadelwälder einige hundert Kilometer in die Tundra bewirken. Dies könnte regional die Oberflächenrauigkeit erhöhen und die Albedo reduzieren (*Foley et al. 1994, Holtmeier & Broll 2007*). Weiter würde die Nettoprimärproduktion (NPP) gesteigert, mehr CO<sub>2</sub> wird in Biomasse (Wald und Boden) eingelagert und könnte somit die terrestrische Kohlenstoffsенke erhöhen, zumindest solange als neue Waldflächen entstehen. Dass die kommerzielle Holzproduktion von diesem Voranschreiten wesentlich profitieren könnte, scheint unwahrscheinlich, da auch im polaren Waldgrenzbereich die Bäume zeitlich versetzt auf den Klimawandel reagieren und für eine kommerzielle Nutzung zu langsam wachsen (*Grace et al. 2002*).

Höherschreitende alpine Waldgrenzbereiche könnten ihre Schutzwirkung vor Lawinen, Murgängen und Erosion verbessern und der Bevölkerung in den Tälern mehr Schutz bieten. Ein wesentlicher Effekt auf die Albedo und die Kohlenstoffsенke ist jedoch nicht zu erwarten, da mit zunehmender Höhe, die steiler werdenden Hänge wenig Fläche bieten im Vergleich mit der polaren Tundra (*Holtmeier & Broll 2007*).

### 6.5 Kritik

Die methodische Beschränkung auf Kartenmaterial ist einer der Hauptkritikpunkte meiner Arbeit. Mit Feldbegehungen hätten beispielsweise Baumringanalysen über das Alter der Bäume Auskunft gegeben, mittels Bodenproben hätte etwaiger, auftauender Permafrost untersucht sowie die Bodenfeuchte in verschiedenen Hanglagen, beziehungsweise Ausrichtung gemessen werden können. Mittels Klimastationen auf unterschiedlichen Flächen und Höhen (leider hat bei meiner Arbeit nur die Alp Buffalora ältere Klimadaten liefern können) hätten Windmessungen und Modellierungen durchgeführt werden und etwaige windgeschützte Bereiche ausgeschieden werden können. Eine weitergehende Analyse, mit Einbezug obengenannter Faktoren mit Fokus auf Einwuchs, respektive echtes Aufwärtsschreiten, hätten die Analysen präzisiert und vervollständigt. Durch solche feinskaligen Feldanalysen hätten gewisse Annahmen wie beispielweise die Gunstlage für Bäume auf 15-25° überprüft werden können. Des Weiteren hätte auch die Niederschlagsentwicklung betrachtet werden können, leider fehlten auch dabei konsistente Datensätze. Ein Einbezug solcher Feldarbeiten würde den Rahmen einer Masterarbeit jedoch sprengen. Allerdings ist es fraglich, ob solche Analysen zu Erkenntnisgewinn über den Waldgrenzbereich geführt hätten, da lokal extrem viele Faktoren ein Baum- oder Waldwachstum beeinflussen und sich Forscher schon öfters mit dem Resultat „everything matters“ abfinden mussten (*Körner* 2012). Es ist also für die Generierung von allgemeinen Aussagen, welche Faktoren den Waldgrenzbereich wie beeinflussen, entscheidend, wie der Massstab eines Untersuchungsgebietes gewählt wird, um zu Resultaten zu gelangen, die mit anderen Untersuchungen vergleichbar sind.

## 7. Fazit

Diese Arbeit hatte zum Ziel, die Waldgrenzveränderungen im Schweizerischen Nationalpark über eine Zeitspanne von 1899 bis 2008 darzustellen. Es konnte sowohl ein Anstieg der Waldfläche als auch ein Aufwärtsschreiten in grössere Höhen festgestellt und somit die 1. Hypothese bestätigt werden. Als Hauptursache für diesen Prozess ist die Ausscheidung des Untersuchungsgebietes als Nationalpark zu nennen. Seit dessen Gründung im Jahre 1914 konnte der Wald auf ehemals alpwirtschaftlich genutzten Wiesen und Weiden einwachsen. Der Prozess des Einwuchses hatte aber, aufgrund der marginalen Nutzungen vor der Eröffnung des Parkes, besonders auf steilen und schwer zugänglichen Lagen schon vor der Nationalparkgründung begonnen. Dennoch ist eine starke Zunahme der Waldfläche in der ersten Periode feststellbar, ein Prozess der höchstwahrscheinlich auf das rasche Einwachsen nach der Nutzungsaufgabe zurückzuführen ist. Des Weiteren ist eine abflachende Zunahme in den weiteren zwei Perioden zu verzeichnen, ein Prozess der zumindest beim letzten Zeitstand auf den Klimawandel zurückzuführen ist, da Einwuchs ausgeschlossen werden kann. Somit kann auch die 2. Hypothese bestätigt werden.

Sicherlich wäre es vor dem Hintergrund des Klimawandels wichtig, in Zukunft auf eher kleinem Massstab (grosses Einzugsgebiet) zu forschen und sich nicht zu stark auf kleinräumige Faktoren zu fokussieren, die den Effekt des Klimawandels verwässern können. Die lokalen Schlüsselfaktoren für das Verständnis der Waldgrendynamik sind trotz grosser Forschungstätigkeit immer noch unklar. Auch meine Resultate, abgesehen von Höhe, Hangneigung und Hangausrichtung, lassen nur bedingt Schlussfolgerungen über Schlüsselfaktoren zu, die PCA war dabei wenig hilfreich.

Eine in der Fläche und in der Höhe sich ausdehnende Waldfläche ist im SNP auch in Zukunft zu erwarten. Unter anderem durch den Effekt der Massenerhebung, der geringen Reliefenergie und der noch weithinaufreichenden Vegetation steht einem künftigen Waldgrenzanstieg im Schweizerischen Nationalpark generell nichts im Wege. Auch in den übrigen Alpen könnte ein Waldgrenzanstieg in den nächsten Jahrzehnten vermehrt zu beobachten sein. Zwar ist bis jetzt nur Einwuchs mit marginalen Anstiegen in die Höhe nachgewiesen, durch die fortwährende Abnahme der Bewirtschaftung der Alpen ist eine Zunahme jedoch wahrscheinlich.

## 8. Literaturverzeichnis

### Buch

- Albertz J. (2009) *Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. WBG, Darmstadt, S. 34-79
- Bach R. und 18 Mitautoren (1976) *Durch den Schweizerischen Nationalpark*. Bund für Naturschutz, Basel, S. 23-45
- Blume H. P., Brümmer G.W., Horn R., Kandeler E., Kögle-Knabner I., Kretschmar R., Stahr K., Wilke B. M. (2010) *Scheffer/Schachtschabel – Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 506-517
- Braun-Blanquet J. (1917) *Die Föhrenregion der Zentralalpentäler, insbesondere Graubündens in ihrer Bedeutung für die Florengeschichte*. Genf, S. 22-28
- Broll G. & Keplin B. (2005) *Mountain ecosystems: studies in treeline ecology*. Springer, Berlin, S. 203-219
- Bundi M. (1989) *Zur Besiedlungs- und Wirtschaftsgeschichte Graubündens im Mittelalter*. Calven Verlag, Chur, S. 13-693
- Ellenberg H. (1963) *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in kausaler, dynamischer und historischer Sicht*. Eugen Ulmer, Stuttgart, S. 46-53
- Hilf R. B. (2003) *Wald und Weidwerk in Geschichte und Gegenwart*. Aula Verlag, Wiebelsheim, S. 21-198
- Höhener H. P. (1995) *Zur Geschichte der Kartendokumentation in der Schweiz*. Perthes Verlag, Gotha, S. 1-10
- Humboldt A. von & Bonpland A. (1807) *Ideen zu einer Geographie der Pflanzen nebst einem Naturgemälde der Tropenländer*. Cotta Verlag, Tübingen, S. 13-14
- Körner Ch. (2003) *Alpine Plant Life - Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. 2nd Edition, Springer, Berlin, S. 289-312
- Körner Ch. (2012) *Alpine Treelines – Functional Ecology of the Global High Elevational Tree Limit*. Springer, Berlin. S. 1-190
- Landolt E. (2012) *Unsere Alpenflora*. SAC Schweizer Alpenclub, Bern, S. 1-314
- Lauscher F. (1976) *Weltweite Typen der Höhenabhängigkeit des Niederschlags*. Verlag Wetter und Leben, Wien, S. 80-90

Mathieu J. (1987) *Bauern und Bären. Eine Geschichte des Unterengadins von 1605 bis 1800*. Octopus Verlag, Chur, S. 314-358

Pfandler G. (1983) *Tirol Lexikon. Ein Nachschlagewerk über Menschen und Orte des Bundeslandes Tirol*. Studienverlag GmbH, Innsbruck, S. 45-98

Radkau J. & Schäfer I. (1987) *Holz. Ein Naturstoff in der Technikgeschichte*. Rowohlt Taschenbuch, Reinbeck bei Hamburg, S. 10-312

Stöcklin J., Bosshardt A., Klaus G., Rudmann-Mauerer K., Fischer M. (2007) *Landnutzung und biologische Vielfalt in den Alpen. Thematische Synthese zum Forschungsbericht 2 „Land-und Forstwirtschaft im alpinen Lebensraum“ des Nationalen Forschungsprogramms NFP 48 „Landschaften und Lebensräume der Alpen“ des Schweizerischen Nationalfonds SNF*, vdf-Hochschulverlag AG, Zürich, S.57-60

Tranquillini W. (1979) *Physiological ecology of the alpine timberline. Tree existence at high altitude with special reference to the European Alps*. Springer, Berlin, S. 46-72

Wieser C. (1991) *Zuoz. Geschichte und Gegenwart*. Paul Haupt Verlag, Bern, S. 12-97

### Schriftenreihen

Albrecht C., Baccini P., Branzini A., Beniston M., Bugmann H., Bürki T., Fankhauser S., Fischlin A., Fuhrer J., Gonseth Y., Güsewell S., Hohmann R., Janssen J., Joos J., Kagi W., Keuerleber-Burk D. K., Künzli N., Oglesby L., Previdoli P., Schädler B., Stocker T. (2002) *Das Klima ändert – auch in der Schweiz*. In: Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC) (Hrsg.): *Die wichtigsten Ergebnisse des dritten Wissensstandsberichts des IPCC aus der Sicht der Schweiz*, Bern, Bd. 3: S. 23-44

Brändli U. B. (2000) *Waldzunahme in der Schweiz – gestern und morgen*. In: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL (Hrsg.) *Informationsblatt Forschungsbereich Landschaft*, 45: S. 1-4

Braun-Blanquet J. (1917) *Die Föhrenregion der Zentralalpentäler, insbesondere Graubündens, in ihrer Bedeutung für die Florengeschichte*. In: Société Générale d'Imprimerie (Hrsg.): *Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, 98: S. 22-28

Dunteman G. H. (1989) *Principal Component Analysis*. In: Sage University Paper series on Quantitative Applications in the Social Sciences (Hrsg.): *Quantitative Applications in the Social Sciences*, 69: S. 5-87

- Haller R. M. (2011) Integratives Geoinformationsmanagement in der Schutzgebietsforschung. Räumliche Genauigkeit als Schlüsselement des Wissenstransfers. In: *Nationalparkforschung in der Schweiz* 95: S. 34-73
- Hermes K. (1955) Die Lage der oberen Waldgrenze in den Gebirgen der Erde und ihr Abstand zur Schneegrenze. In: *Kölner geographische Arbeiten*, 5: S. 18-23
- Holtmeier F. K. (2000) Die Höhengrenze der Gebirgswälder. In: *Arbeiten aus dem Institut für Landschaftsökologie, Westfälische Wilhelms-Universität*, 8: S. 25-253
- Holtmeier F. K. (2009) Mountain timberlines. Ecology, patchiness and dynamics. In: *Advances in Global Change Research*, 36: S. 29-335
- Kuennecke, B.H. (2008) Temperate Forest Biomes. In: Greenwood Press (Hrsg.): *Greenwood Guides to Biomes of the World*. London, S. 53-61
- Parolini J. D. (1995) Zur Geschichte der Waldnutzung im Gebiet des heutigen Schweizerischen Nationalparks. In: *Nationalparkforschung in der Schweiz* 87: S. 19-195
- Rösch M. (1805) Nachtrag zu den Fragmenten über das Unterengadin. In: *Der Neue Sammler, gemeinnütziges Archiv für Bünden*, 2. Ökonomische Gesellschaft (Hrsg.), Chur, S. 351-370
- Schröter C. (1926) Die wissenschaftliche Erforschung des Schweizerischen Nationalparkes. *Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft von Graubünden*, 64: S. 23-42
- Schröter C. (1918) Über die Flora des Nationalparkgebietes im Unterengadin. In: *Aus dem Jahrbuch des Schweizer Alpenclub*, 52, Bern, S. 11-219
- Schütz M., Krüsi B. O., Edwards P. J. (2000) Sucession research in the Swiss National Park. In: *Nationalparkforschung in der Schweiz*, 89: S.131, S.147, S.251. S.254)
- Surber E., Amiet R., Kobert H. (1973) Das Brachlandproblem in der Schweiz. In: Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (Hrsg.): *Berichte*, Birmensdorf, S. 12-19
- Trümpy R., Schmid S. M., Conti P., Froitzheim N. (1997) Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:50'000 des Schweizerischen Nationalparks. In: *Nationalparkforschung in der Schweiz*, 87: S. 7-29
- Zimmermann N. E., Bolliger J., Gehrig-Fasel J., Guisan A., Kienast F., Lischke H., Rickebusch S., Wohlgemuth T. (2006) Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? In: *Forum für Wissen*, S. 63-71

Zoller H. (1995) Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks – Erläuterungen. In: *Nationalparkforschung in der Schweiz*, 85: S. 5-17

### **Zeitschriftenartikel**

Bachelet D. & Neilson R. P. (2000) Biome redistribution under climate change. *USDA Forest Service General Technical Report*, 59: S. 18-44

Batllori E., Julio J., Camarero J., Ninot J. M., Gutiérrez E. (2009) Seedling recruitment, survival and facilitation in alpine *Pinus uncinata* tree line ecotones. Implications and potential responses to climate warming. *Global Ecology and Biogeography*, 18: S. 460–472

Beniston M. (2003) Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Climatic Change* 59: S. 5-3

Brown D. G. (1994) Predicting vegetation types at treeline using topography and biophysical disturbance variables. *Journal of Vegetation Science*, 5: S. 641-656

Burga C. (1988) Swiss vegetation history during the last 18'000 years. *New Phytology*, 110: S. 581-602

Bruun H. & Moen J. (2003) Nested communities of alpine plants on isolated mountains: relative importance of colonization and extinction. *Journal of Biogeography*, 30: S. 297-303

Callaghan T. V., Werkman B. R., Crawford R. M. M. (2002) The tundra-taiga interface and its dynamics: concepts and applications. *Ambio Special Report*, 12: S. 6-14.

Camarero J.J. & Gutierrez E. (2004) Pace and pattern of recent tree line dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climate Change* 63: S. 181-200

Crawford R. M. M., Jeffrey C. E., Rees W. G. (2003) Paludification and forest retreat in northern oceanic environments. *Annals of Botany*, 91: S. 213-226

Dirnböck T., Dullinger S., Grabherr G. (2003) A regional impact assessment of climate and land use change on alpine vegetation. *Journal of Biogeography*, 30: S. 401-418

Dullinger S., Dirnböck T., Grabherr G. (2004) Modelling climate change-driven tree line shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. *Journal of Ecology*, 92: S. 241-252

Foley J. A., Kutzbach J. E., Coe M. T., Levis S. (1994) Feedbacks between climate and boreal forests during the Holocene. *Nature*, 371: S. 52-54

- Froitzheim N. (2004) Der Deckenbau der Alpen und die Engadiner Linie. *Cratschla - Informationen aus dem Schweizerischen Nationalpark*, 2: S. 3-5
- Gamache I. & Payette S. (2005) Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada. *Journal of Biogeography*, 32: S. 849-862
- Gamper M. (1986) Morphochronologische Untersuchungen an Solifluktionsszungen, Moränen und Schwemmkegeln in den Schweizer Alpen. *Physische Geographie – Universität Zürich*, 17, S. 1-115
- Gehrig-Fasel J., Guisan A., Zimmermann N. E. (2007) Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate Change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science* 18: S. 571-582
- Gellrich M. & Zimmermann N. E. (2007) Investigating the regional-scale pattern of agricultural land abandonment in the Swiss mountains: A spatial statistical modelling approach. *Landscape and Urban Planning*, 79: S. 65–76
- Grabherr G., Gottfried M., Pauli H. (1994) Climate effects on mountain plants. *Nature* 369: S. 448
- Grace J., Beringer F., Nagy F. (2002) Impacts of climate change on the tree line. *Annals of Botany*, 90: S. 537-544
- Harsch M. A., Hulme Ph. E., McGlone M. S., Duncan R. P. (2009) Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12: S. 1040–1049
- Heiri C., Bugmann H., Tinner W., Heiri O., Lischke H. (2006) A model-based reconstruction of Holocene treeline dynamics in the Central Swiss Alps. *Journal of Ecology*, 94: S. 206–216
- Holtmeier F. K. (1993) Der Einfluss der generativen und vegetativen Verjüngung auf das Verbreitungsmuster der Bäume und die ökologische Dynamik im Waldgrenzbereich. Beobachtungen und Untersuchungen in Hochgebirgen Nordamerikas und den Alpen. *Geoökodynamik*, 14: S. 153-182
- Holtmeier F. K. (1985) Die klimatische Waldgrenze – Linie oder Übergangssaum (Ökoton)? Ein Diskussionsbeitrag unter besonderer Berücksichtigung der Waldgrenze in den mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel. *Erdkunde*, 39: S. 271-285
- Holtmeier F. K., Broll G., Mütterthies A., Anschlag K. (2003) Regeneration in the treeline ecotone: Northern Finnish Lapland. *Fennia*, 181: S. 103-128

- Holtmeier F. K. & Broll G. (2005) Sensivity and response of the northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography*, 14: S. 395-410
- Karlson P. S. & Weih M. (2001) Soil temperatures near the distribution limit of the mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*): Implications for seedling nitrogen economy and survival. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 33: S. 88-92
- Körner Ch. & Paulsen J. (2004) A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography* 31: S. 713–732
- Körner Ch. (1995) Towards a better experimental basis for upscaling plant responses to elevated CO<sub>2</sub> and climate warming. *Plant, Cell, Environment*, 18: S. 1101-1110
- Kullman L. (2007) Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973-2005: implications for tree line theory and climate change ecology. *Journal of Ecology*, 95: S. 41-52
- Kullman L. (2005) Wind-conditioned 20th century decline of birch treeline vegetation in the Swedish Scandes. *Arctic*, 58: S. 286-294
- Lüscher P. (2004) Vielseitige Nationalparkböden. *Cratschla - Informationen aus dem Schweizerischen Nationalpark*, 2: S. 6-9
- Mather A. S. & Fairbairn J. (2000) From floods to reforestation: The Forest Transition in Switzerland. *Environmental History*, 6: S. 399-421
- Motta R & Nola P. (2001) Growth trends and dynamics in sub-alpine forest stands in the Varaita Valley (Piedmont, Italy) and their relationship with human activities and global change. *Journal of Vegetation Science*, 12: S. 219–230.
- Paulsen J. & Körner Ch. (2001) GIS-analysis of tree-line elevation in the Swiss Alps suggests no exposure effect. *Journal of Vegetation Science* 12: S. 817-824
- Paulsen J., Weber U. M., Körner Ch. (2000) Tree growth near treeline: abrupt or gradual reduction with Altitude? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 32: Nr. 1: S. 14-20
- Pelet P. J. (1989) Ruiner la végétation ou sauvgarder la nature: La ferrière de Champex au 14e siècle. *Revue Suisse d'Histoire*, 3: S. 30-44
- Perkins T. B., Adams G. T., Klein R. M. (1991) Desiccation or freezing? Mechanisms of winter injury to red spruce foliage. *American Journal of Botany*, 78: S. 1207-1217

- Resler L. M. (2006) Geomorphic Controls of Spatial Pattern and Process at Alpine Treeline. *The Professional Geographer*, 58: S. 124–138
- Roise J. P. & Betters D. R. (1981) Notes: An Aspect Transformation with Regard to Elevation for Site Productivity Models. *Forest Science*, 27: S. 483-486
- Schlegel J. & Leibundgut H. (1985) Waldbauliche Untersuchungen der Legföhrenbestände. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 136: S. 945-955
- Sjogerseten S. & Wookey P.A. (2005) The role of soil organic matter quality and physical environment for nitrogen mineralization at the forest-tundra ecotone in Fennoscandia. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 37: S. 118-126.
- Smith W. K., Germino M. J., Hancock T., Johnson E. & D. M. (2003) Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines. *Tree Physiology*, 23: S. 1101-1112
- Stage A. R. & Salas Ch. (2007) Interactions of Elevation, Aspect, and Slope in Models of Forest Species Composition and Productivity. *Forest Science*, 53: 486-492
- Stäheli M., Finsinger W., Tinner W., Allgöwer B. (2006) Wildfire history and fire ecology of the Swiss National Park (Central Alps): New evidence from charcoal, pollen and plant macrofossils. *The Holocene*, 16(6): S. 805-817
- Stueve K. M., Cerney D. L., Rochefort R. M., Kurth L. L. (2009) Post-fire tree establishment patterns at the alpine treeline ecotone: Mount Rainier National Park, Washington, USA. *Journal of Vegetation Science*, 20: S. 107–120
- Tasser E., Walde J., Tappeiner U., Teutsch A., Nogglner W. (2007) Land-use changes and natural reforestation in the Eastern Central Alps. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: S. 115–129
- Theurillat J.P. & Guisan A. (2001) Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review. *Climatic Change*, 50: S. 77-109.
- Troll C. (1973) The upper timberlines in different climatic zones. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 5: S. 3-18
- Van der Meer M., Hagedorn F., Schweingruber F. H., Rigling A., Moiseev P. A. (2004) Dynamik der alpinen Waldgrenze im südlichen Ural (Russland). *Erde* 135 (2): S. 151-174
- Weih M. (2000) Growth of mountain birch seedlings in early successional patches: A year-round perspective. *Plant Biology*, 23: S. 428-436

**Buchkapitel / Artikel aus einem Sammelband**

Brunies S. (1906) Die Flora des Ofengebietes (Sudost-Graubunden). In: *Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft von Graubunden* (Hrsg.), Buchdruckerei Hermann, Chur, 48: S. 12-326

Burga C.A. & Perret T. (2001) Monitoring of eastern and southern Swiss alpine timberline ecotones. In: Burga C.A. & A. Kratochwil (Hrsg): *Biomonitoring: general and applied aspects on regional and global scales*. Dordrecht Boston London, S. 179 –194 (=Task for vegetation science Bd. 35)

Furrer H. (1986) Falten, Felsen und Fliesszungen. In: *NaturMagazin draussen*, Schweizerischer Nationalpark, HB Verlags- und Vertriebs GmbH, Hamburg, 42: S. 36-45

Gross M., Rainer I., Tranquillini W. (1991) Über die Frostresistenz der Fichte mit besonderer Berücksichtigung der Zahl der Gefrierzyklen und der Geschwindigkeit der Temperaturänderung beim Frieren und Auftauen. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, Hamburg, 110: S. 207-217

Kaiser P. (1992) Das Wasser der Berge – Bedrohung un Nutzen für die Menschen. Notizen für eine Umweltgeschichte. In: *Die Entdeckung der Alpen*. Allgemeine Geschichtsforschende Gesellschaft der Schweiz (Hrsg.), 12: S. 54-107

Klöti T. (2006) Die Siegfriedkarte (1870 - 1949) als Landschaftsgedächtnis der Schweiz. In: Bracke W. (Hrsg.) *Margaritae cartographicae. Studia Lisette Danckaert diem natalem agentii oblata*. Brüssel, S. 289-294

Lauer W. (1985) Klimatische Grundzüge der Höhenstufung tropischer Gebirge. In: *Klimageographie*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft (Hrsg.), 612: S. 402-422

Oelkers K. H. (1984) Datenschlüssel Bodenkunde. Symbole für die automatische Datenverarbeitung bodenkundlicher Geländedaten. In: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und der Geologischen Landesämtern in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.), *Projekt "Neue Kommunikationswege in den Geowissenschaften mit Hilfe der ADV."* Hannover, S. 63-68

Peterson D. L. (1998) Climate, limiting factors and environmental change in high altitude forests of Western North America. In: Beniston M., Innes J. L. (Hrsg.) *The impact of climate variability in forests*, Heidelberg, S. 191-208

Sachteleben J. (1995) Waldweide und Naturschutz – Vorschläge für die naturschutzfachliche Beurteilung von Wald und Weide im bayrischen Alpenraum. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter Forstliches Jahrbuch*, Hamburg, 114: S. 375-387

Schläpfer D. (1960) Der Bergbau am Ofenpass (Pass dal Fuorn): Eine wirtschaftsgeographische Untersuchung im Unterengadin und seinen Nachbartälern. In.: *Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen des Schweizerischen Nationalparks*, 7, Liestal, S. 14-159

Schorta A. (1982) Tschantamints d'Engiadina bassa – Die Dorfrudungen des Unterengadins. Rechtsquellen des Kantons Graubünden, Serie B, Bd. 1, S. 21-692

Siegfried H. (1888) Instruktion für topographische Aufnahmen im Masstab 1:50'000. In: *Bundesgesetze betreffend das Eidgenössische Topographische Bureau und Instruktionen desselben*. Stämpflische Buchdruckerei, Bern, S. 26-40

Slaymaker O. & Embleton-Hamann Ch. (2009) Mountains. In: Slaymaker O., Spencer T., Embleton-Hamann Ch. (Hrsg.) *Geomorphology and global environmental change*. Cambridge, S. 37-70

Turner H. (1970) Grundzüge der Hochgebirgsklimatologie. In: Ladurner J., Purtscheler F., Reisigl H., Tratz E. (Hrsg.) *Die Welt der Alpen*. Innsbruck, Frankfurt, S. 170-182

Walter G. R., Beissner S., Pott R. (2005) Climate Change and high mountain vegetation shifts. In: Broll G., Keplin B. (Hrsg.) *Mountain ecosystems – studies in treeline ecology*, Springer, Berlin Heidelberg New York, S. 77-96

Zepp H. & Müller M. J. (1999) Landschaftsökologische Erfassungsstandarts. Ein Methodenbuch. In: Baume O., Alois M., Pohl J., Müller M. J. (Hrsg.) *Forschungen zur deutschen Landeskunde*, Bd. 244, Flensburg, S. 47-419

## **Broschüren**

BFS – Bundesamt für Statistik (Hrsg.) (2012) Landschaft Schweiz im Wandel. Die Waldausbreitung im Alpenraum, S. 1-4

Swisstopo – Bundesamt für Landestopografie (Hrsg.) (2008) Karten-Signaturen. Illustrierte Ergänzung zur Zeichenerklärung der Landeskarten (LK) der Schweiz.

Swisstopo – Bundesamt für Landestopografie (Hrsg.) (2007) VEKTOR25. Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz. Produkteinformationen.

## Internetquellen

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, Climap-Net, IDAWEB. URL: <http://www.meteosuisse.admin.ch/web/de/services/datenportal/idaweb.html>

[Zugriff: 04.12.2012]

Holtmeier F. K. & Broll G. (2007) Treeline advance – driving processes and adverse factors. In: *Landscape online. The Official Journal of the Internationale Association for Landscape Ecology*, S. 1-33 URL: <http://landscapeonline.de/archive/2007/1/index.html> [Zugriff: 09.10.2012]

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change 2007, Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability. URL: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg2/en/ch1s1-3-5-2.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch1s1-3-5-2.html) [Zugriff: 04.02.2013]

## Kartenmaterial

Eidgenössische Landestopographie (1973): Landeskarte der Schweiz 1:50'000, Blatt 5017 Oberengadin, Ausgabe 1973.

Eidgenössische Landestopographie, Swisstopo (2008): Landeskarte der Schweiz 1:50'000, Blatt 5017 Oberengadin, Ausgabe 2008.

Eidgenössische Landestopographie (1938): Topografischer Atlas der Schweiz 1:50'000, Blatt 421 Tarasp, 424 Zernez, 425 Scarl, 428 Scanfs, 429 Sta. Maria, Ausgabe 1938

Eidgenössische Landestopographie (1899): Topografischer Atlas der Schweiz 1:50'000, Blatt 421 Tarasp, 424 Zernez, 425 Scarl, 428 Scanfs, 429 Sta. Maria, Ausgabe 1895 (Tarasp und Zernez), und Ausgabe 1899 (Scarl, Scanfs, Sta. Maria).

Schweizerischer Nationalpark SNP, SNP Data Center, Schweizerischer Nationalpark, Schloss Planta-Wildenberg. [Zugriff Server: Vom 15.02.2012 bis 30.01.2013]

## Weitere Quellen

### *Universitäre Arbeiten, Dissertationen*

Däniker A. (1923) Biologische Studien über Baum- und Waldgrenze, insbesondere über die klimatischen Ursachen und deren Zusammenhänge. Inaugural-Dissertation, Universität Zürich, S. 12-102

Leyk S. (2005) Computing the Past – Utilizing Historical Data Sources for Map-Based Retrospective Landscape Research. Dissertation zur Erlangung der naturwissenschaftlichen Doktorwürde (Dr. sc. nat.) vorgelegt der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Zürich, Zürich, S. 44-49

Mathieu J. (1980) Eine Region am Rand: Das Unterengadin 1650 – 1800. Studien zur Ökonomie. Unveröffentlichte Lizentiatsarbeit an der Universität Bern.

#### *Auszüge aus Archiven*

Forstlicher Jahresbericht des Gemeinde-Forstbetriebes Trupchun (1941)

Gemeindearchiv Zernez (1882) Protocols cumischiun forestala 1876-1882.

Gemeindearchiv Zernez (1863) Documainta 1806-1863.

Gemeindearchiv Zernez (1910) Urkundenbuch der Gemeinde Zernez, Nr. 30

Gemeindearchiv Zernez (1924) Admin. forestala. diversa corrispondenza

Gemeindearchiv Zernez (1876) Protocols cumischiun forestala 1855-1876.

Gemeindearchiv Zernez (1891) God, Admin. forestala. diversa corrispondenza.

#### *Auszüge aus dem Emailverkehr (siehe Anhang)*

- Boesch R. (2012) Email vom 04. März 2012.
- Gaudenz J. (2012) Email vom 15. November 2012.
- Neudeck S. (2012). Email vom 22. März 2012.
- Schmied B. (2012) Email vom 22. März 2012.

## Anhang

### *Kopien der Emails (siehe Literaturverzeichnis)*

- Boesch R. (2012) Email vom 04. März 2012.
- Gaudenz J. (2012) Email vom 15. November 2012.
- Neudeck S. (2012). Email vom 22. März 2012.
- Schmied B. (2012) Email vom 22. März 2012.

### *Auswahl an Karten zur genaueren Betrachtung*

- Höhenmodell Schweizerischer Nationalpark, Auflösung 4m. (A6)
- Hangausrichtung Schweizerischer Nationalpark, Auflösung 4m. (A7)
- Hangneigung Schweizerischer Nationalpark, Auflösung 4m. (A8)
- Übersichtskarte SNP (pdf A3) (A9)

## Auszug Mailverkehr mit Herrn Neudeck am 22. März 2012

*Donnerstag, 22. März 2012 07:16*

Guten Morgen

Herzlichen Dank für die Infos/Rechnung! Wie sieht es nun mit der Abgrenzung offener Wald/Nichtwald aus? Ich hätte mal geschätzt, dass wenn einzelne Bäume bzw. Baumgruppen mehr als ca. 30m voneinander weg stehen, dass diese dann nicht zusammenhängend dargestellt werden? Um ihre Meinung wäre ich natürlich froh.

Vielen Dank und mit besten Grüßen

Samuel Berger

----- Message from Stefan.Neudeck@swisstopo.ch -----

Date: Thu, 22 Mar 2012 07:46:22 +0100

From: Neudeck Stefan LT <Stefan.Neudeck@swisstopo.ch>

Subject: AW: Kriterien Wald etc.

To: "samuel.berger@stud.unibas.ch" <samuel.berger@stud.unibas.ch>

Guten Morgen,

Das ist vermutlich auch nur mehr oder weniger gut zu schätzen. Ein paar Überlegungen vielleicht...

Das Kriterium ist der Anteil, den die Baumkronen über dem Boden bedecken. Wenn der (ungefähr) < 50% ist, dann offener Wald. Leider kann ich nicht sagen, welchen Durchmesser so eine "durchschnittliche" Baumkrone aufweist. Nun ist "Baumkrone" für Gebirgswälder, die ja überwiegend aus Fichten bestehen, gar nicht so ein glücklicher Begriff, da diese ja unten am breitesten sind (?) und nicht oben an der "Krone". Wenn ich mir hier so ein paar Bilder anschau, gehe ich mal davon aus, dass so ein Baum 20-25 oder 30m hoch ist, und die "Breite" etwa 1/4 davon, also fünf bis 7.5m. Den Grundriss nehmen wir als Kreis an. Dann bedeckt ein Baum von 5m Durchmesser knapp 20 qm. 50% Bedeckung wären das von 40 qm, was etwa dem Abstand (= Kronendurchmesser) von 7m entspräche. Man könnte also sagen, dass der Abstand zwischen Bäumen mit Kronen von 5m Durchmesser mindestens 7m betragen muss, damit man von offenem Wald sprechen kann. 25% Bedeckung sind aber auch offener Wald, dann ist man bei den relativ kleinen Bäumen schon bei 14m. Ich nehme daher an, dass Ihre Schätzung von 15-30m gar nicht so schlecht ist.

Freundliche Grüsse

S. Neudeck

**Auszug Mailverkehr mit Frau Schmied am 22. März 2012.**

*Donnerstag, 22. März 2012 09:37*

Guten Tag Frau Schmied

Herzlichen Dank! Im Speziellen würde mich auch bezüglich Wald interessieren, was Ringe, was genau Punkte bedeuten (innerhalb des offenen Waldes)?

Herzlichen Dank für Ihre Bemühungen!

-----Ursprüngliche Nachricht-----

Von: Samuel Berger [mailto:Samuel.Berger@stud.unibas.ch]

Gesendet: Donnerstag, 22. März 2012 11:25

An: Schmied Brigitte LT

Betreff: Siegfriedkarte

Sehr geehrter Herr Berger

Gemäss Alfred Gut sind Punkte und Ringel als Muster zu betrachten. Sie lassen nicht auf einzelne Bäume oder Büsche schliessen.

Im Alpenraum findet man offenen Wald bei der Baumgrenze, am Rand eines Gletschers (Seite die nicht eine scharfe Grenze eingerissen wurde), bei einem Auenwald (quasi auf einer Insel im Fluss stehender Wald, der immer wieder überschwemmt wird), Wald entlang eines Bergbaches, Wald unterhalb eines Felssturzgebietes ... Es kann auch bewirtschafteter Wald sein.

Ich schicke ihnen noch einen grösseren Ausschnitt der Zeichenerklärung. So haben Sie die Hecke auch dabei.

Mein Kollege Tom Klöti hat zu den Waldringeln vor kurzem für einen Text folgendes geschrieben:

"Im Kupferstich fand als einzige Neuerung die Mechanisierung der Schrift und Zahlen Eingang, während das Punzieren der Waldringel nur eine Erweiterung des bereits für einzelne Signaturen angewendeten Verfahrens bedeutete."

Weiter: Waldringel durch Punzieren ermöglichten eine Optimierung beim Kupferstich. Ich gehe nicht davon aus, dass dies eine inhaltliche Bedeutung haben.

Mit freundlichen Grüssen, Brigitte Schmied

**Auszug Mailverkehr mit Herrn Boesch am 04. März 2012.**

*Am 23.02.2012 um 10:30*

Guten Tag Herr Boesch

Ich bin Masterstudent an der Uni Basel und beschäftige mich im Rahmen meiner Masterarbeit mit der Digitalisierung von Waldflächen auf Siegfriedkarten im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks. Von Ruedi Haller bin ich auf eine Doktorarbeit von 2005 mit dem Titel "Computing the Past – Utilizing Historical Data Sources for Map-Based Retrospective Landscape Research" die Sie betreut haben, gestossen.

Meine Frage wäre jetzt: Gibt es Siegfriedkarten, die mit den in der Arbeit erwähnten Methoden/Modell digitalisiert wurden? Wenn ja, sind diese irgendwie zugänglich?

Mit freundlichen Grüssen

Samuel Berger

Samuel Berger  
Grienstrasse 101  
4055 Basel

----- Message from ruedi.boesch@wsl.ch -----  
Date: Sun, 4 Mar 2012 21:30:05 +0100  
From: Boesch Ruedi <ruedi.boesch@wsl.ch>  
Subject: Re: Siegfriedkarten  
To: samuel.berger@stud.unibas.ch

*Sonntag, 4. März 2012 21:30*

Grüezi Herr Berger,

Bei der Bearbeitung aller Siegfriedkarten-Blätter im Alpengebiet, welche ja nur als 1:50'000 vorliegen, hat es sich gezeigt, dass auch mit viel prozeduralem Aufwand kein brauchbare Trennung zwischen Wald, Fels und Schriften möglich ist. Die effektive Scan-Qualität vieler Blätter ist noch zusätzlich ein Problem.

Wir haben daher die Digitalisierung der Blätter 1:50000 nicht mehr weiter verfolgt.

Mit freundlichen Grüssen, Ruedi Boesch

**Auszug Mailverkehr mit Herrn Gaudenz am 15. November 2012.**

*Donnerstag, 15. November 2012 09:03*

Sehr geehrter Herr Berger.

Über Ihr Interesse am Nationalpark, dessen Umgebung und unserem Kraftwerk freue ich mich sehr.

Zur Beantwortung Ihrer Frage folgendes:

Der Baubeschluss für die Realisierung der Engadiner Kraftwerke AG wurde im Jahr 1962 gefällt. Im Jahr 1970 gingen die Engadiner Kraftwerke offiziell in Betrieb. Innerhalb dieser 8 Jahre wurden alle Bauten des Kraftwerkes errichtet. Für die Anlagen in Ova Spin ist von einer Bauzeit von ca. 5 Jahren auszugehen, somit begann der Bau der Anlagen in der Grössenordnung 1964 und wurde im 1969 abgeschlossen.

Für weitere Fragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Ich verweise Sie aber auch auf unsere, leider nicht ganz aktuelle, Homepage [www.engadin-strom.ch](http://www.engadin-strom.ch)

Mit freundlichen Grüssen

Jachen Gaudenz

*Donnerstag, 15. November 2012 11:29*

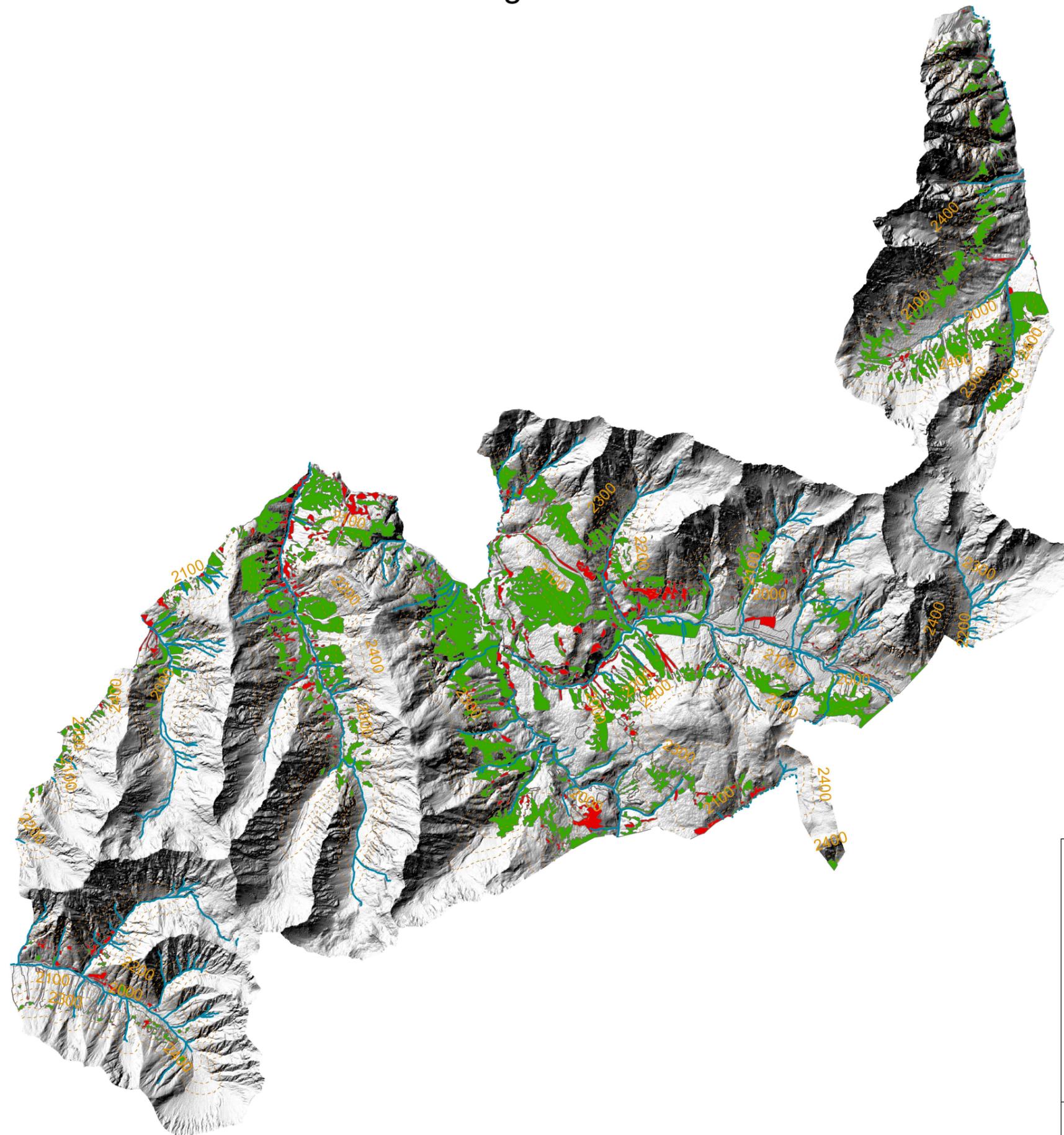
Sehr geehrter Herr Gaudenz

Mit Ihrer Antwort ist mir sehr gedient, herzlichen Dank!

Mit besten Grüssen

Samuel Berger

# Karte 1: Waldflächenveränderungen im SNP zwischen 1899 und 1938



## Legende

-  Gewässernetz
-  Höhenlinien
-  Zunahme 99\_38
-  Abnahme 99\_38

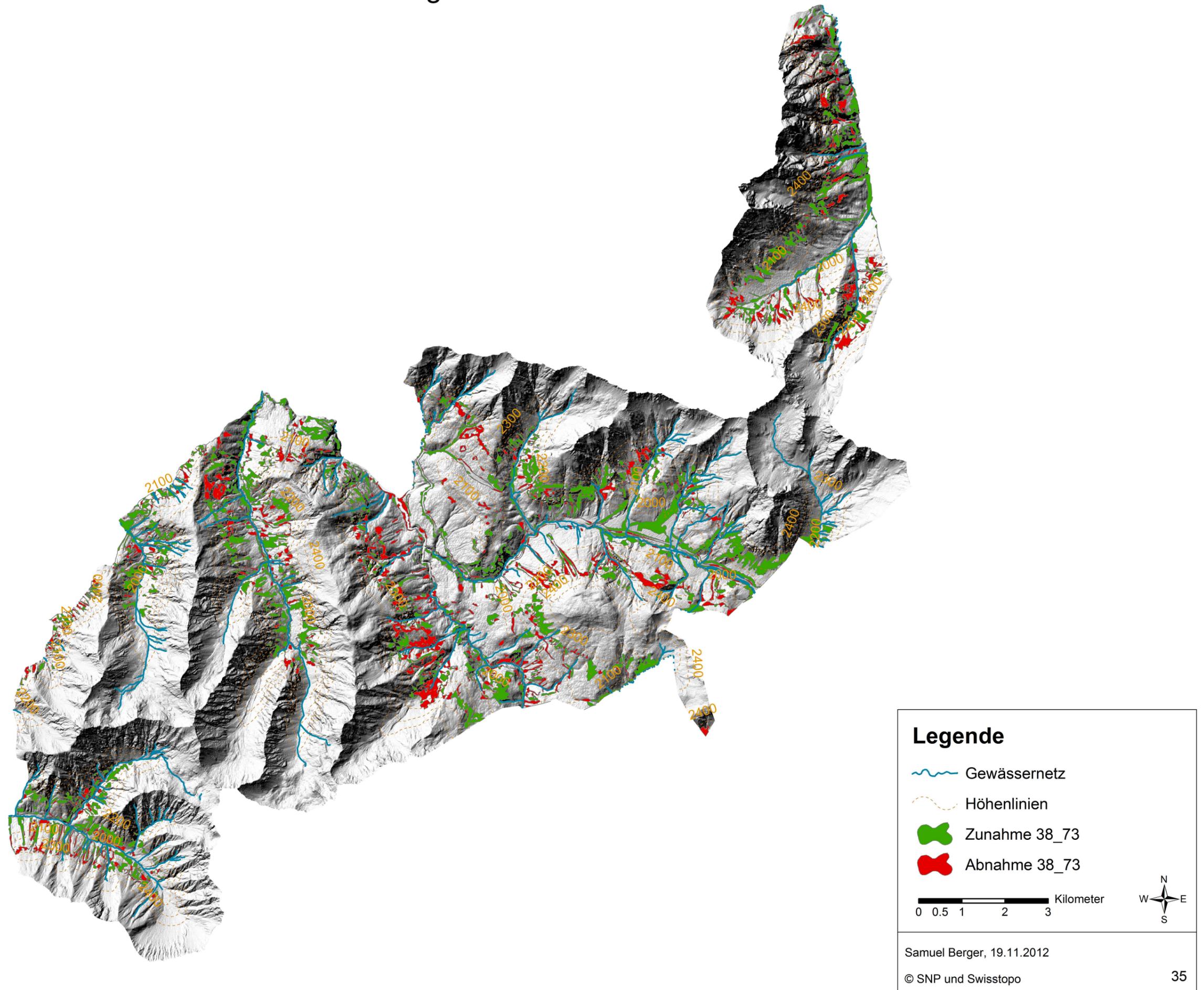
0 0.5 1 2 3 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

## Karte 2: Waldflächenveränderungen im SNP zwischen 1938 und 1973



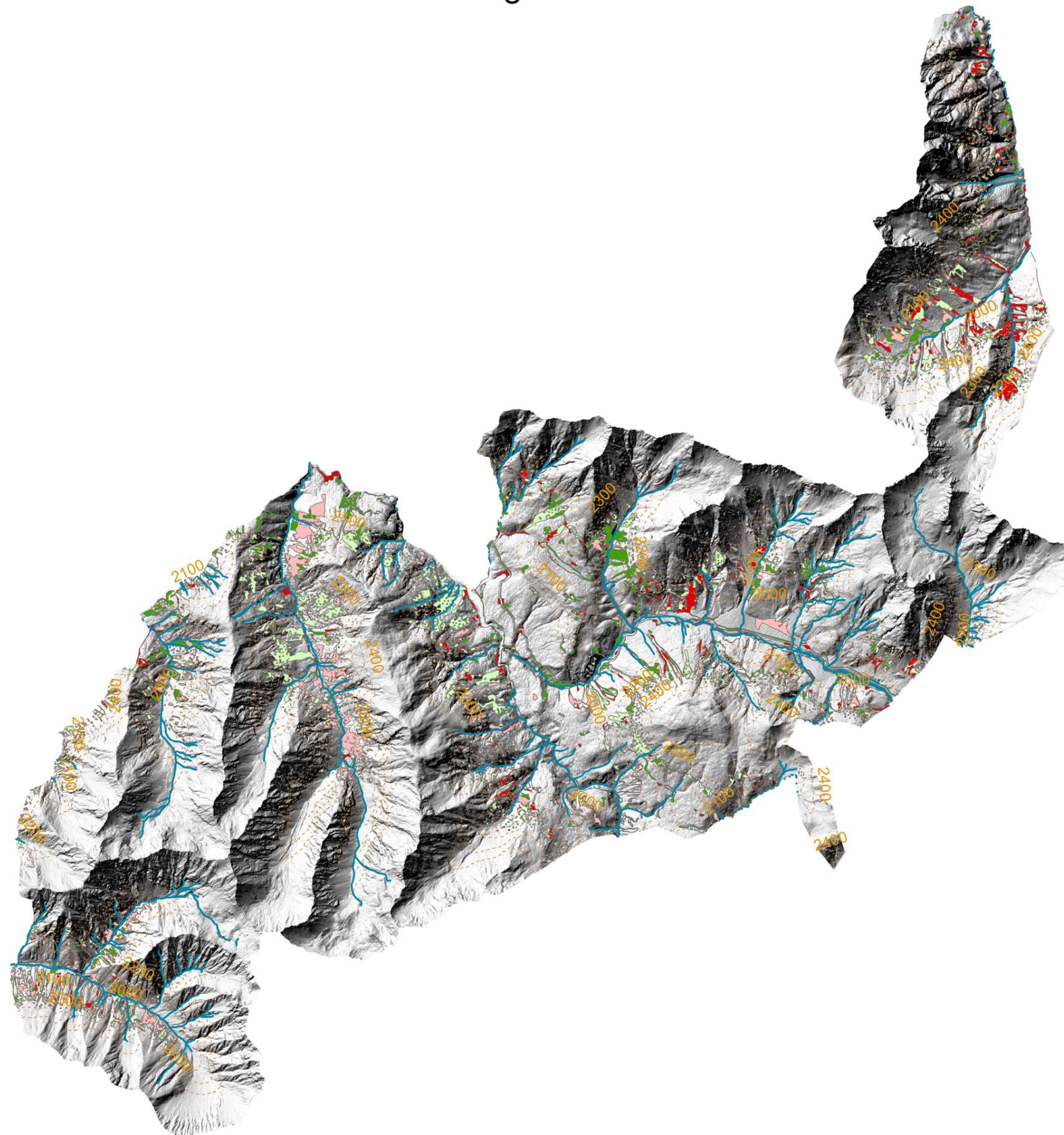
### Legende

-  Gewässernetz
  -  Höhenlinien
  -  Zunahme 38\_73
  -  Abnahme 38\_73
- 0 0.5 1 2 3 Kilometer
- N  
W — E  
S

Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 3: Waldflächenveränderungen im SNP zwischen 1973 und 2008



### Legende

-  Gewässernetz
-  Höhenlinien
-  Zunahme 73\_08 offen
-  Abnahme 73\_08 offen
-  Zunahme 73\_08 geschlossen
-  Abnahme 73\_08 geschlossen

0 0.5 1 2 3 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 4: Waldflächenveränderungen im Waldgrenzbereich zwischen 1899 und 2008



**Legende**

-  Gewässernetz
-  Höhenlinien
-  Zunahmen Waldgrenzbereich
-  Abnahmen Waldgrenzbereich

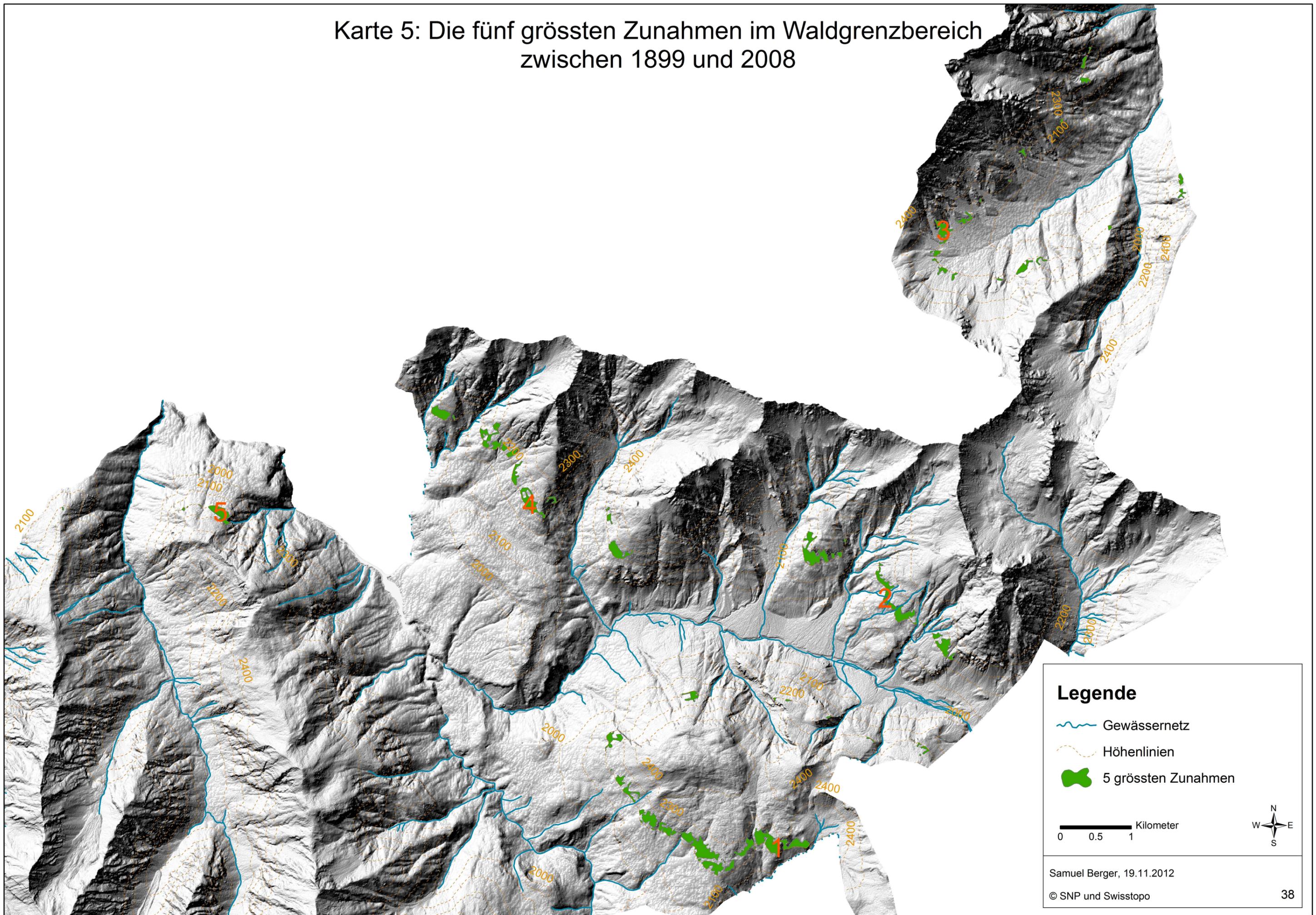
0 0.5 1 2 3 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 5: Die fünf grössten Zunahmen im Waldgrenzbereich zwischen 1899 und 2008



**Legende**

-  Gewässernetz
-  Höhenlinien
-  5 grössten Zunahmen

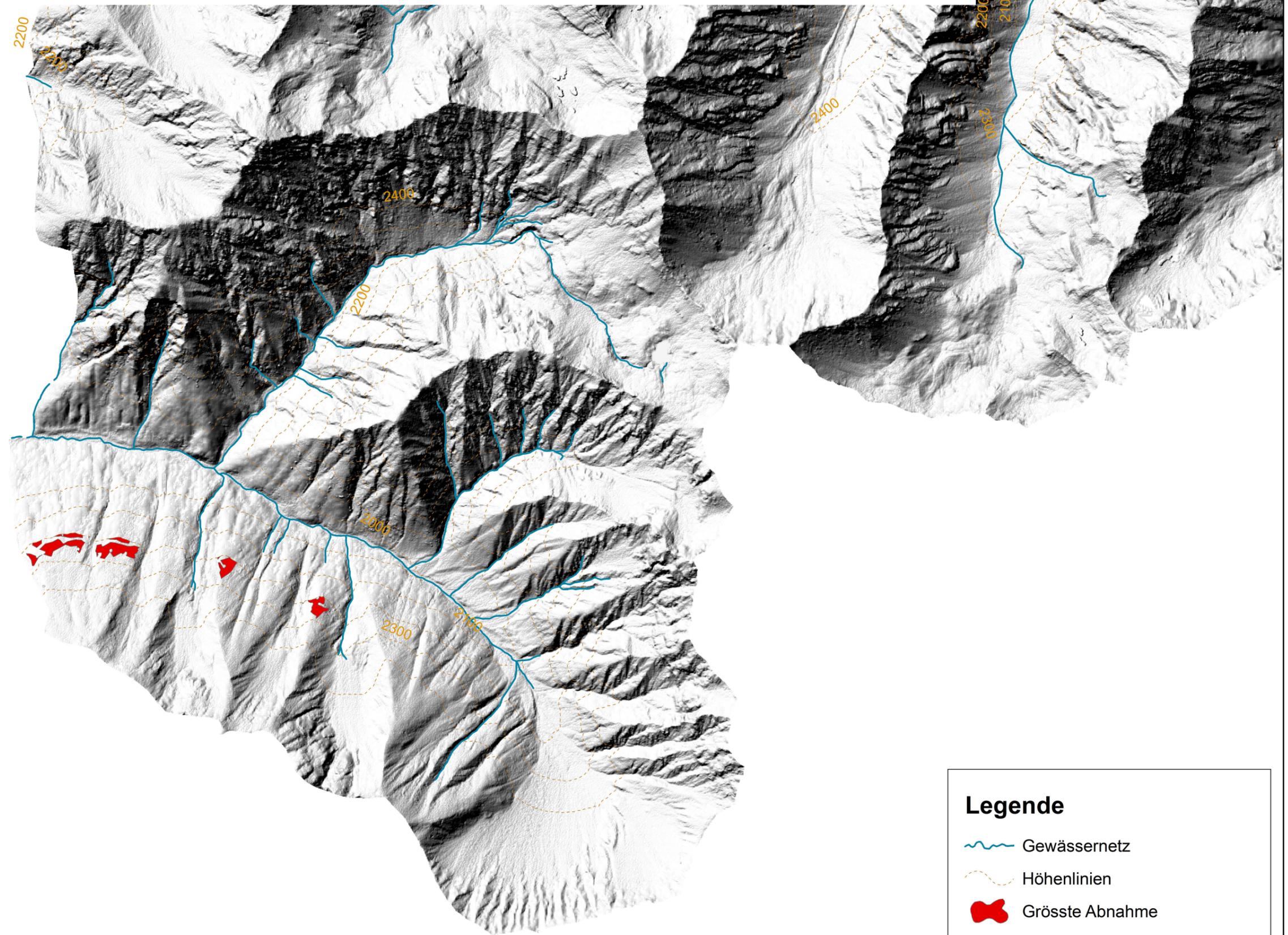
0 0.5 1 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 6: Waldflächenabnahme im Val Trupchun zwischen 1899 und 2008



### Legende

-  Gewässernetz
-  Höhenlinien
-  Grösste Abnahme

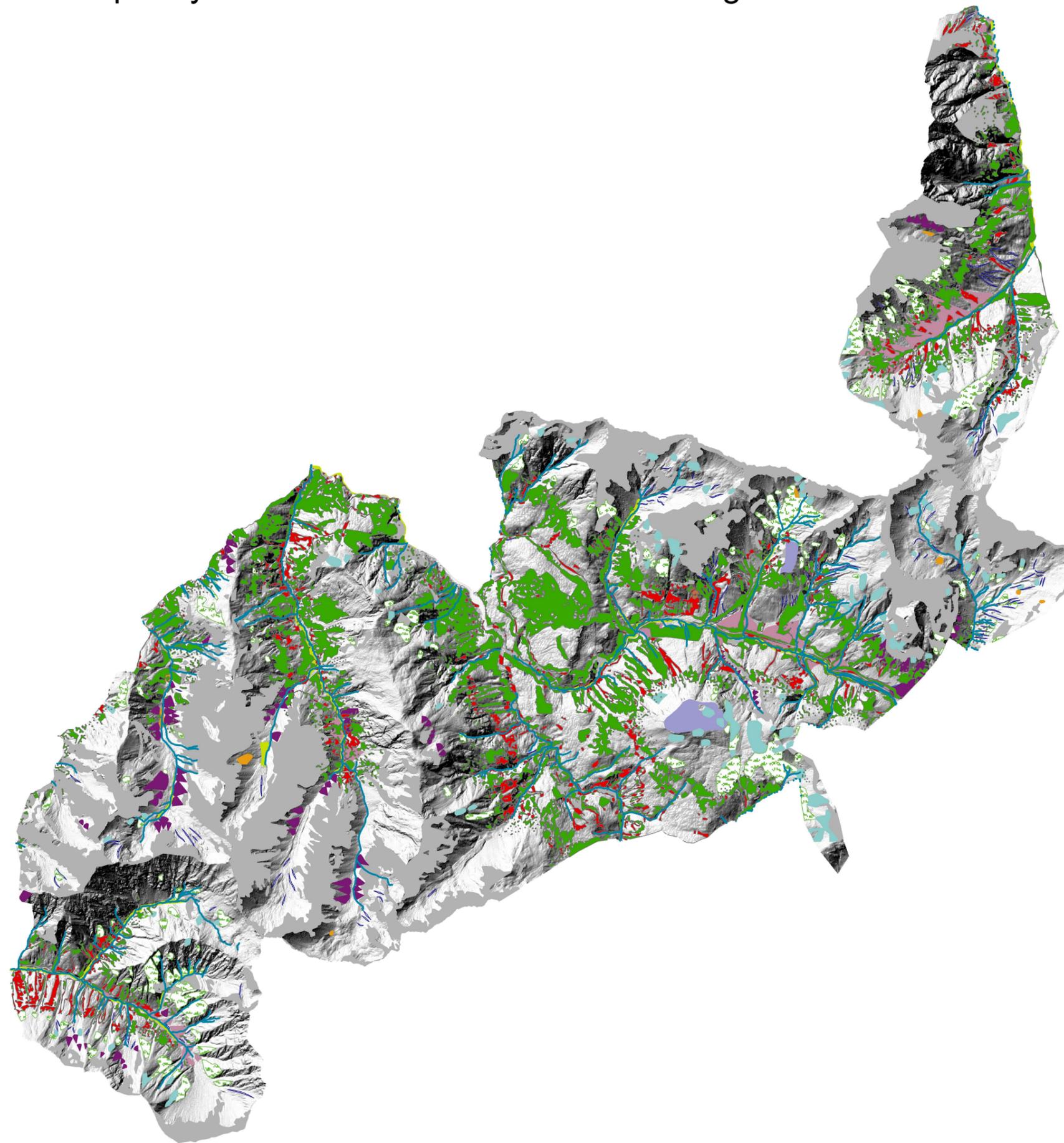
0 0.5 1 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

# Karte 7: Morphodynamik mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008



## Legende

-  Gewässernetz
-  Gesamtzunahmen 99\_08
-  Gesamtabnahmen 99\_08
-  Alluvione
-  Bergsturzaflagerungen
-  Felsbaender und -waende
-  Girlandenboeden
-  Karrenfelder
-  Moraenenwall
-  Schuttkegel / Sturzhalde
-  Schwemmfächer
-  Soliflukstrome
-  Waldbrandflaeche

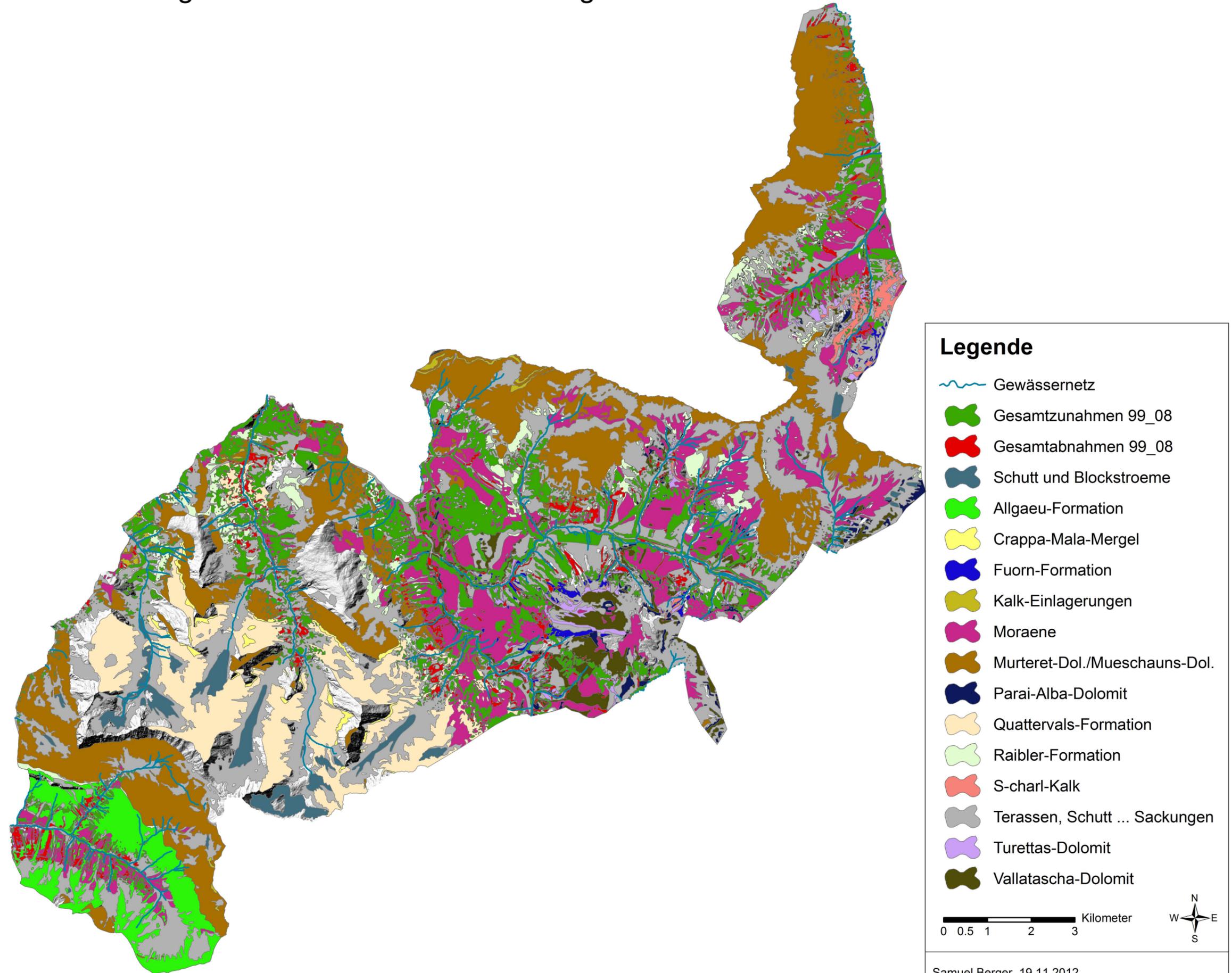
0 0.5 1 2 3 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

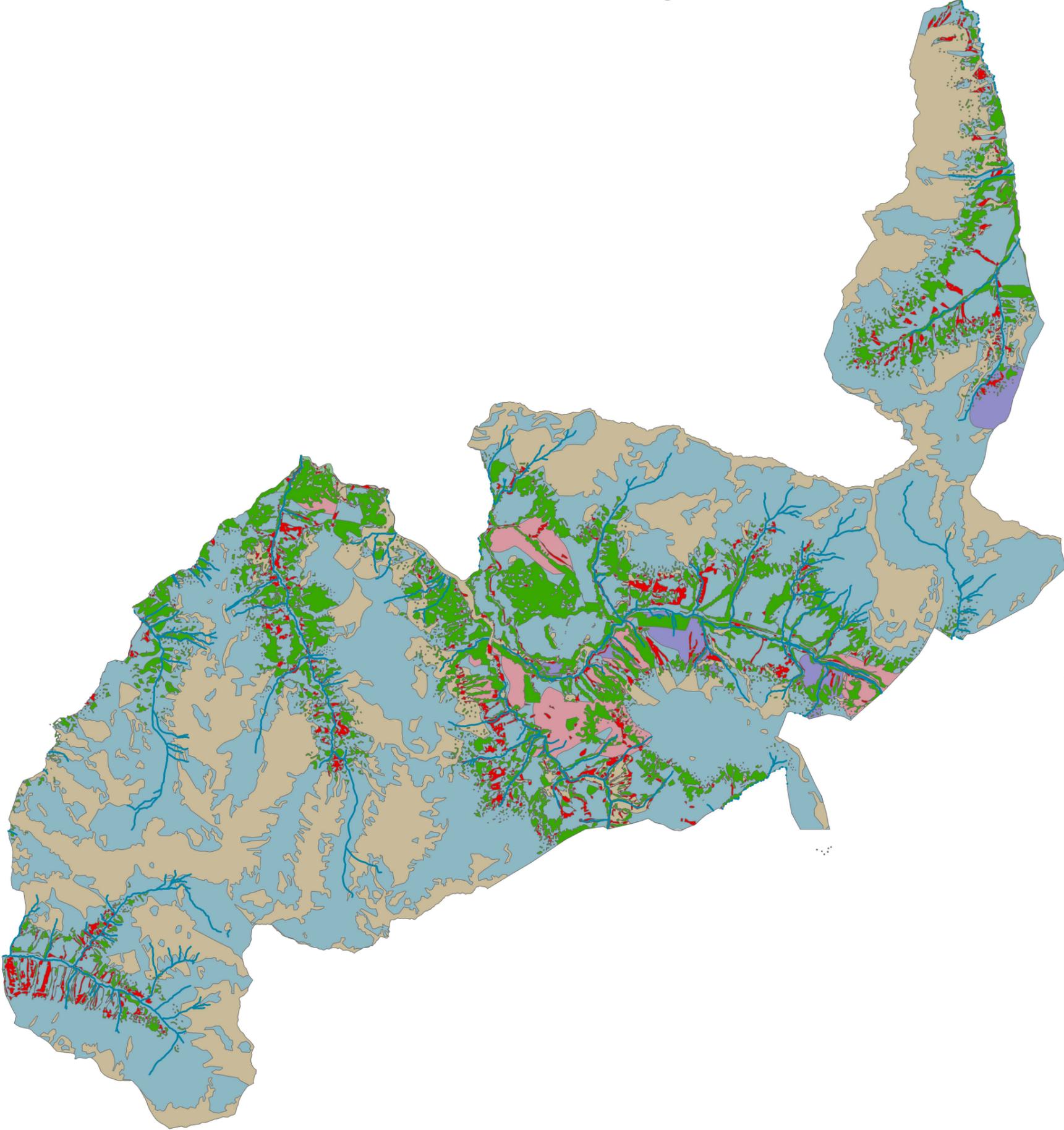
Karte 8: Geologie mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 9: Substrat mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008

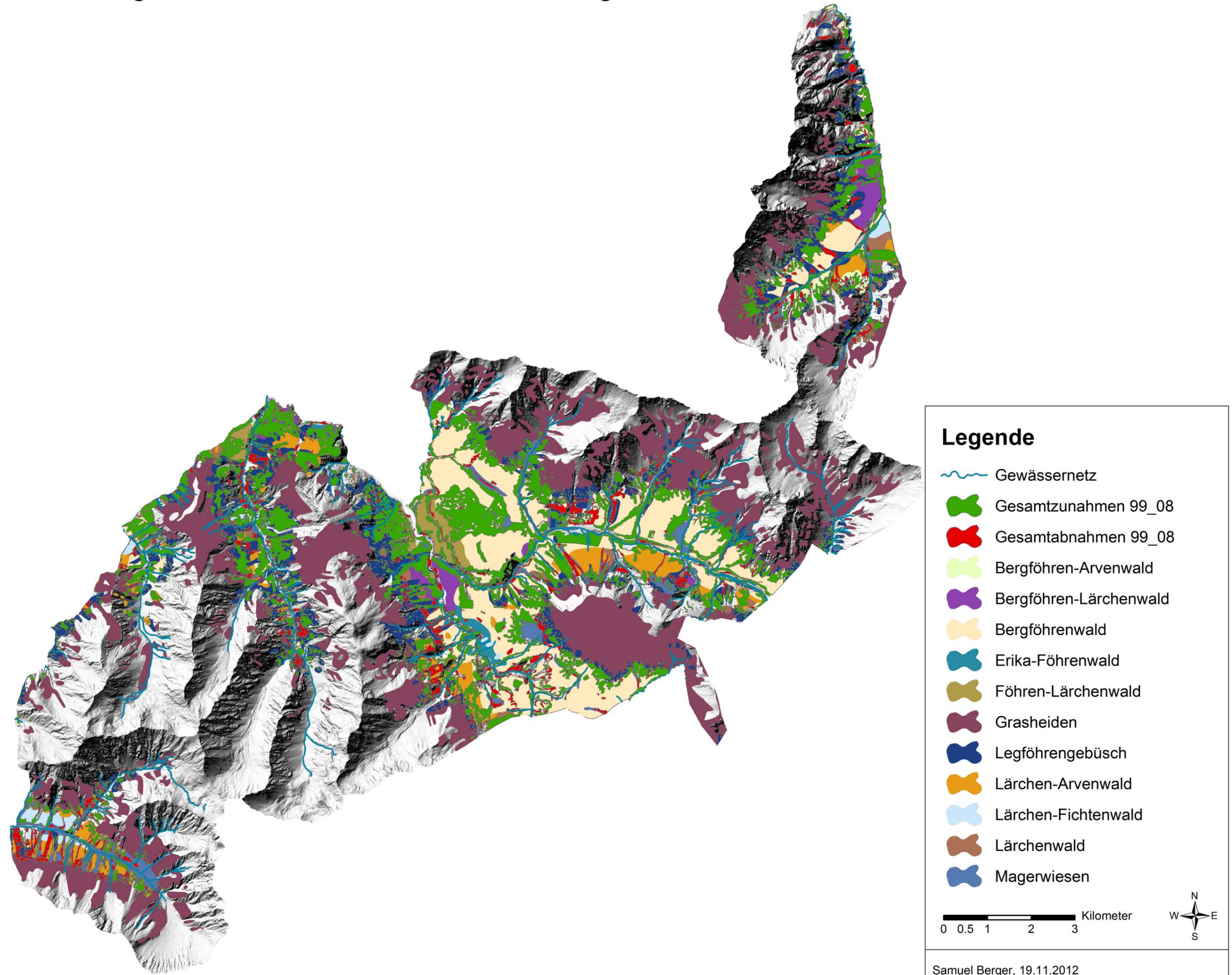


**Legende**

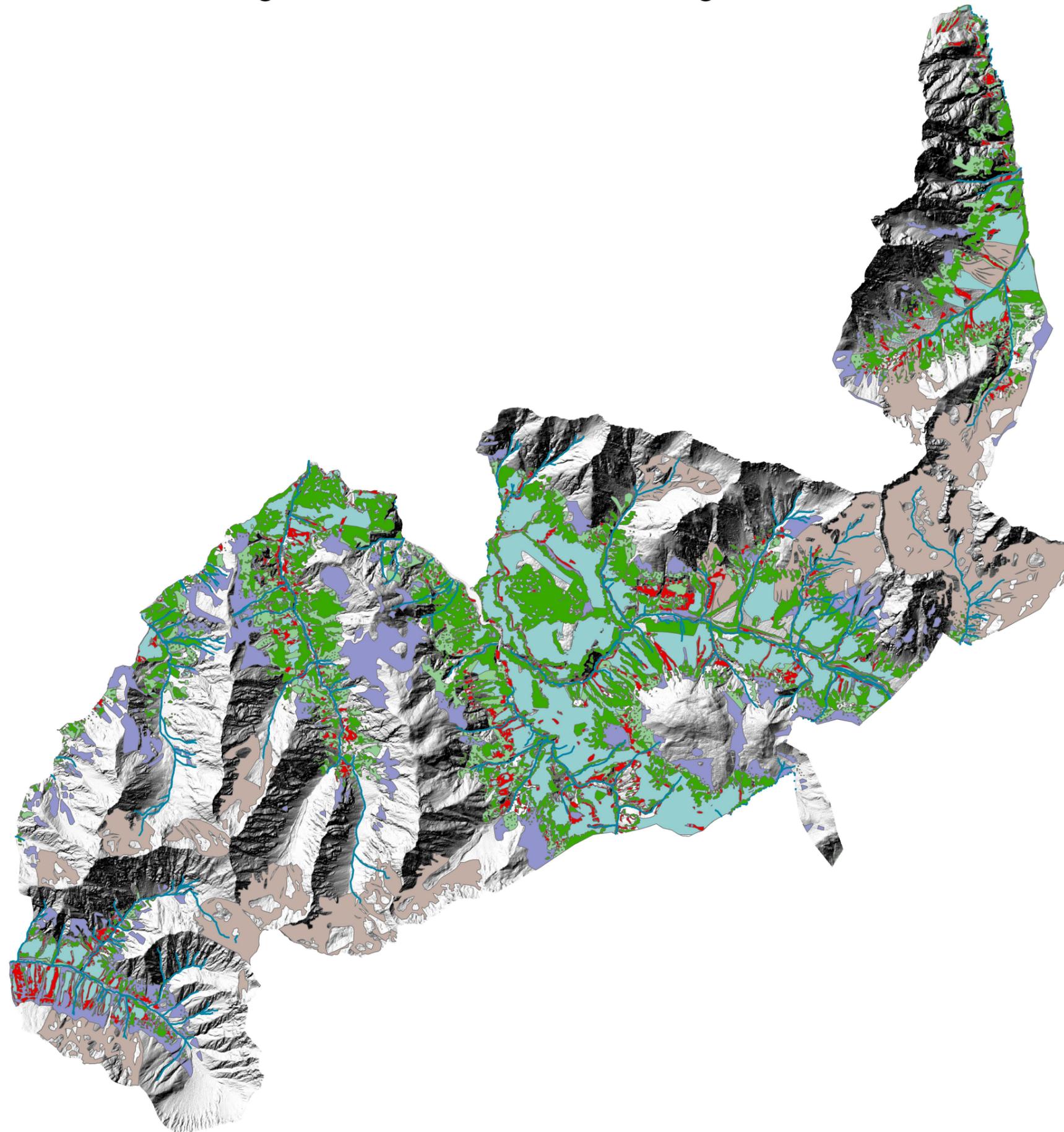
- Gewässernetz
- Gesamtzunahmen 99\_08
- Gesamtabnahmen 99\_08
- Lockermaterial > 66% Verrucano
- Lockermaterial, Karb./Ver. 50/50
- Lockermaterial > 66% Karbonat
- Lockermaterial, v.a. Kristallin
- nicht definierbar

0 0.5 1 2 3 Kilometer

Karte 10: Vegetation mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008



Karte 11: Bedeckung mit Waldflächenveränderungen zwischen 1899 und 2008



### Legende

-  Gewässernetz
-  Gesamtzunahmen 99\_08
-  Gesamtabnahmen 99\_08
-  glazial geprägte Oberfläche
-  inaktive Bereiche im Wald
-  inaktive Gebueschguertel
-  inaktive Wiesen, alpine Matten

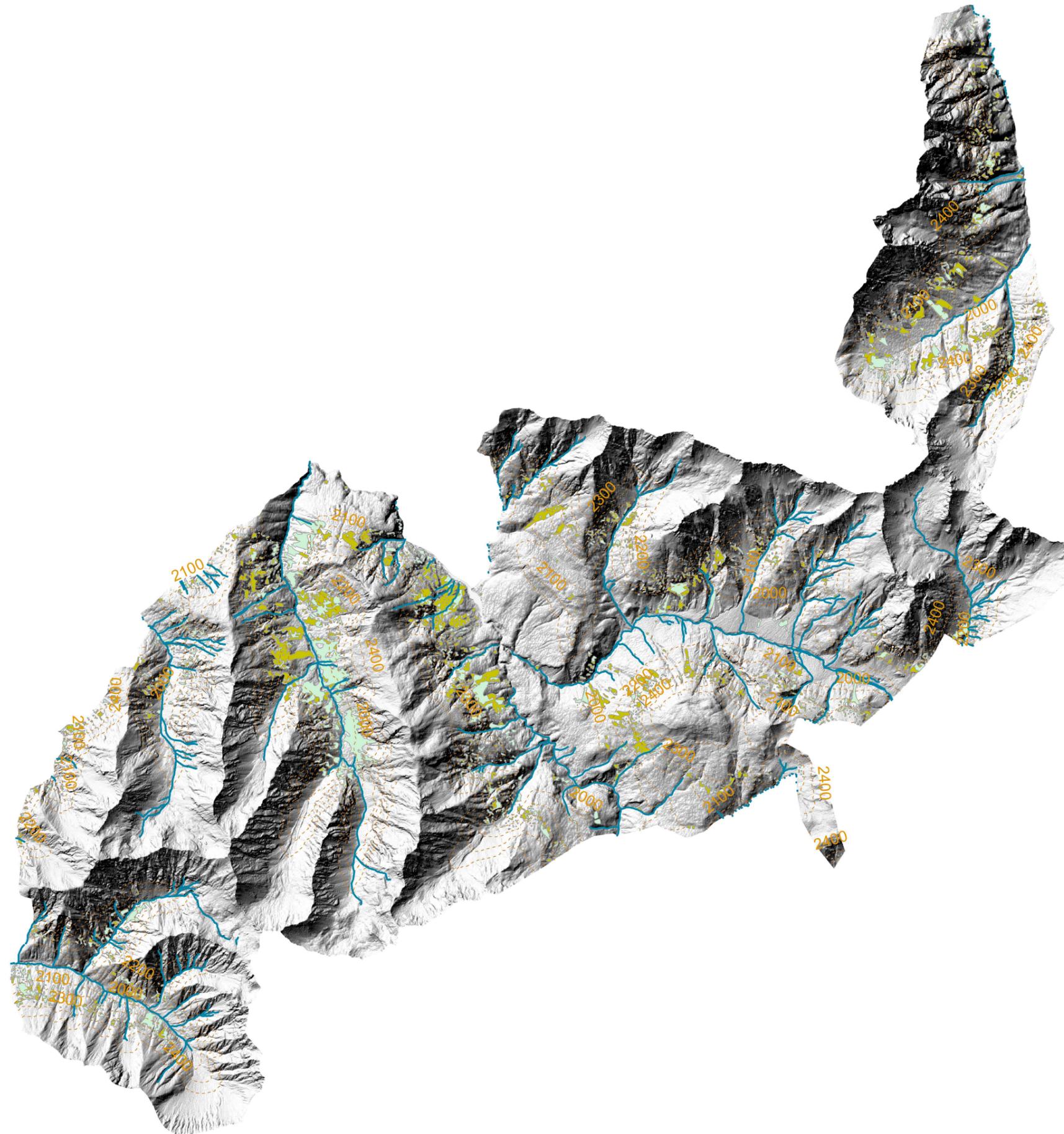
0 0.5 1 2 3 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 12: Einwuchs und echtes Aufwärtsschreiten zwischen 1973 und 2008



### Legende

-  Gewässernetz
-  Höhenlinien
-  Echtes Aufwärtsschreiten
-  Einwuchs 73\_08

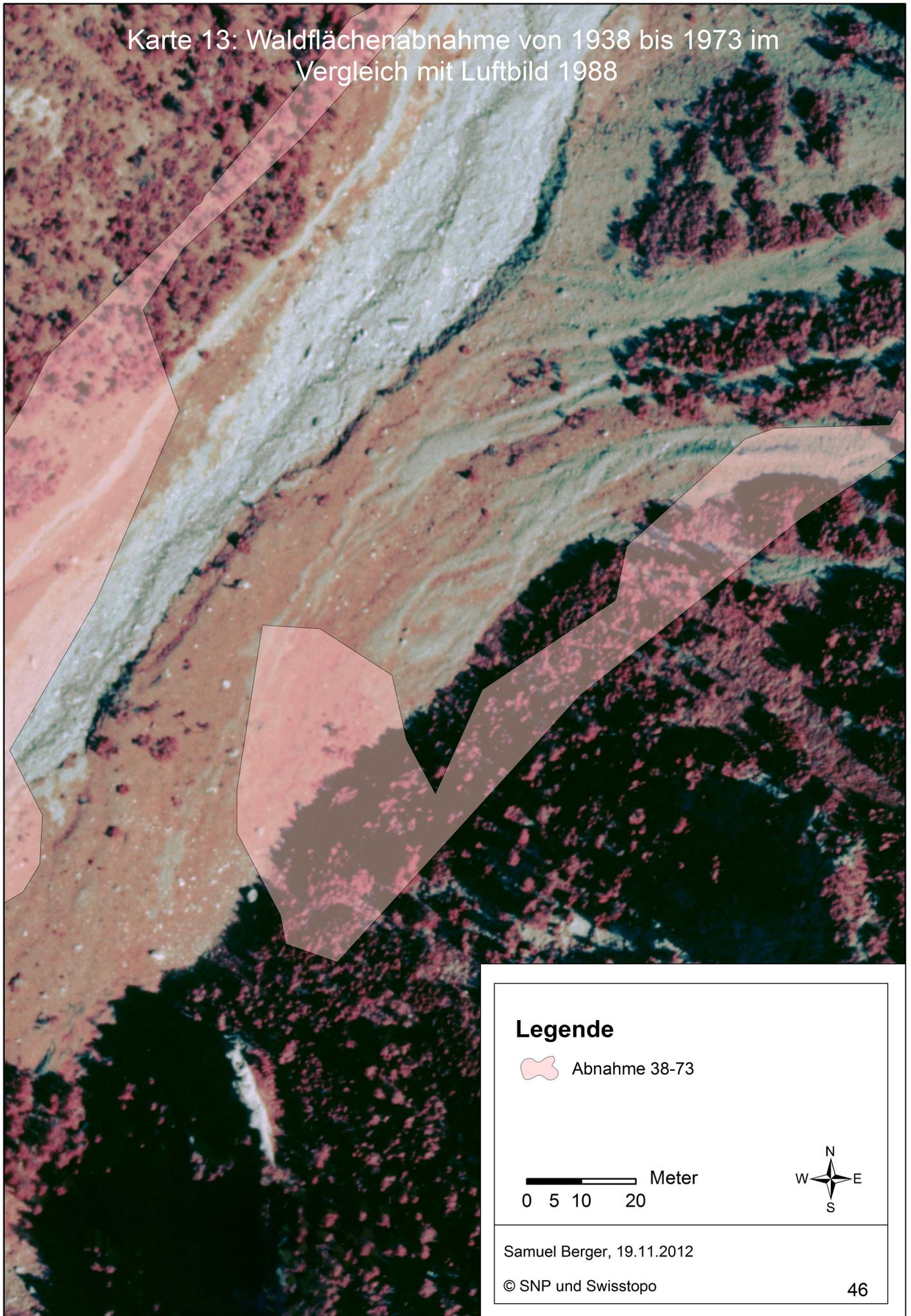
0 0.5 1 2 3 Kilometer



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 13: Waldflächenabnahme von 1938 bis 1973 im Vergleich mit Luftbild 1988



**Legende**

 Abnahme 38-73

 Meter  
0 5 10 20



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo

Karte 14: Waldflächenabnahme von 1938 bis 1973 im Vergleich mit Luftbild 1988



### Legende

 Abnahme 38-73

 Meter  
0 5 10 20



Samuel Berger, 19.11.2012

© SNP und Swisstopo