

MB
841

Geographisches
Institut
MB Universität
Zürich

841

Marianne Rüeegsegger

Entscheidungsunterstützung im Waldbrandmanagement mit GIS

Strategien und ausgewählte Beispiele



Diplomarbeit
am Geographischen Institut der
Universität Zürich-Irchel

Betreuung:
Dr. B. Allgöwer,
Prof. Dr. K. Brassel

Januar 1996

1112236

84-1

1950

AM

1950

... ..
... ..
... ..



Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist eine von mehreren Arbeiten, die am Geographischen Institut der Universität Zürich-Irchel zum Thema Waldbrand durchgeführt werden.

Die Waldbrandforschung am Geographischen Institut hat ihren Ursprung im Schweizerischen Nationalpark. Da dort aufgrund der Gesetzgebung jeder Eingriff ins Ökosystem begründet und bewilligt werden muss, der Nationalpark aber auch touristischen Ansprüchen genügen soll, ist ein angepasstes Waldbrandmanagement für dieses Gebiet besonders wichtig. Damit das Ökosystem des Nationalparks nicht zu stark belastet wird, sollen dort keine Forschungsmethoden entwickelt werden, sondern nur bereits getestete verwendet werden.

Die Suche nach einem Untersuchungsgebiet und möglichen PartnerInnen in der Waldbrandforschung führte in den Kanton Tessin. Gute Kontakte und eine längerfristige Zusammenarbeit entstanden mit der Sottostazione Sud delle Alpi in Bellinzona, welche schon seit längerer Zeit Daten über Waldbrände erhebt.

Unterdessen wurde das Waldbrand-Projekt des Geographischen Instituts sogar in ein internationales Forschungsprogramm (MINERVE II) eingebettet.

Folgenden Personen möchte ich an dieser Stelle für ihre Unterstützung herzlich danken:

- Dr. B. Allgöwer für die Betreuung und die moralische Unterstützung während der gesamten Arbeit
- R. Schöning für die guten Ratschläge und die angenehme Zusammenarbeit
- D. Ryser für die wertvollen Auskünfte
- M. Conedera und M. Marcozzi für die Starthilfe und die Bereitstellung der Daten
- A. Bachmann, der mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite stand
- Prof. Dr. K. Brassel und E. Rüeegsegger für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit
- S. Harvey für die Zusammenarbeit
- und natürlich den unzähligen Personen, die mich während der Arbeit immer wieder motiviert haben.

6. Januar 1996

Marianne Rüeegsegger

1870

1871

1872

1873

1874

1875

1876

1877

1878

1879

1880

1881

1882

1883

1884

1885

1886

1887

Zusammenfassung

Für alle Regionen der Erde, in denen häufig Waldbrände vorkommen, wird ein angepasstes Waldbrandmanagement benötigt. Da dieses sehr viele Komponenten berücksichtigen muss, sollten die EntscheidungsträgerInnen bei der Entscheidungsfindung durch Computer unterstützt werden. Dazu eignet sich, wie in der Arbeit dargelegt, die Kombination von Entscheidungsunterstützendem System und Geographischem Informationssystem besser als ein Expertensystem. Der Einsatz des Geographischen Informationssystems wird anhand der Ausscheidung von Prioritätszonen in der Waldbrandbekämpfung illustriert. Sie sollen zeigen, wo im Falle eines Feuers zuerst eingegriffen werden muss und wo noch zugewartet werden kann. Da Waldbrände sehr stark von der Jahreszeit abhängig sind, werden Prioritätszonen für drei Waldbrandsaisons ermittelt.

In der Schweiz sind Waldbrände nur auf der Alpensüdseite häufig, da nur dort das Klima und die Vegetation für Waldbrände günstig sind. Es werden dort deshalb schon seit längerer Zeit, während ungefähr den letzten hundert Jahren, Daten zu diesen Ereignissen gesammelt (CONEDERA 1993). Diese wurden in dieser Arbeit qualitativ ausgewertet, um einen Überblick über jene Faktoren, die das Auftreten und das Verhalten von Feuern bestimmen, zu erhalten. Dabei ergab sich, dass Klima, Vegetation und Topographie sehr wichtig sind. Ausserdem wurde festgestellt, dass Waldbrände mit natürlichen Ursachen auf der Alpensüdseite sehr selten sind.

Zur Bestimmung der Prioritätszonen für die Waldbrandbekämpfung wurde das Schadenpotential der gefährdeten Objekte anhand der Waldbrandgeschichte und der Feuerausbreitung berechnet. Zwei verschiedene Ansätze zur Ausscheidung der Prioritätszonen waren notwendig, da es Objekte - wie z.B. Häuser - gibt, die in jedem Fall vor Feuer geschützt werden müssen und nur die Ausbreitungsrate des Feuers bestimmt, wie lange mit der Feuerbekämpfung zugewartet werden kann. Daher wurde das Schadenpotential für diese Objekte anhand der modellierten Feuerausbreitung berechnet. Da in der Regel Gebiete, die in der Vergangenheit häufig gebrannt haben, auch in Zukunft häufiger brennen werden - wie z.B. Kastanienniederwald - wurde in diesen Gebieten zur Bestimmung des Schadenpotentials die Waldbrandgeschichte verwendet.

Die gesammelten Waldbranddaten wurden benutzt, um im Malcantone mit einem Geographischen Informationssystem anhand der Waldbrandgeschichte Gebiete mit hohem Schadenpotential auszuscheiden. Dazu wurden die Anteile der verbrannten Fläche an der Fläche den Topographie- und Vegetationsklassen und der schützenswerten Objekte während der letzten 25 Jahre berechnet. Die Informationen über die geographische Lage der vor Feuer zu schützenden Objekte (Schutzwald, Aufforstungen und erosionsgefährdete Gebiete) stammen aus Expertengesprächen.

Um das Schadenpotential von Siedlungen, Strassen und kulturellen Objekten zu bestimmen, wurde die Feuerausbreitung mit SPARKS modelliert (SCHÖNING 1996). Dazu wurde die von SCHÖNING (1996) entwickelte Methode zur Modellierung der Rückwärtsausbreitung verwendet. Damit liess sich die Zeit berechnen, welche ein Feuer braucht, um ein gefährdetes Objekt zu erreichen, indem die Feuerausbreitung vom gefährdeten Objekt aus modelliert wurde.

Das Schadenpotential der Waldbrandgeschichte und der Feuerausbreitung wurde

addiert und neu klassiert. Daraus resultierten die Prioritätszonen für die Waldbrandbekämpfung.

Mit der Berechnung des Schadenpotentials wurde nur ein Teil der Aspekte, die für die Ausscheidung von Prioritätszonen wichtig wären, berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeit für das Entzünden eines Feuers in Abhängigkeit von Ort und Zeit, die Einsehbarkeit des Geländes und die Erreichbarkeit des Feuers sollten ebenfalls berücksichtigt werden. Einsehbarkeit und Erreichbarkeit sind wichtig, da Feuer in ihrer Anfangsphase sehr viel leichter zu bekämpfen sind.

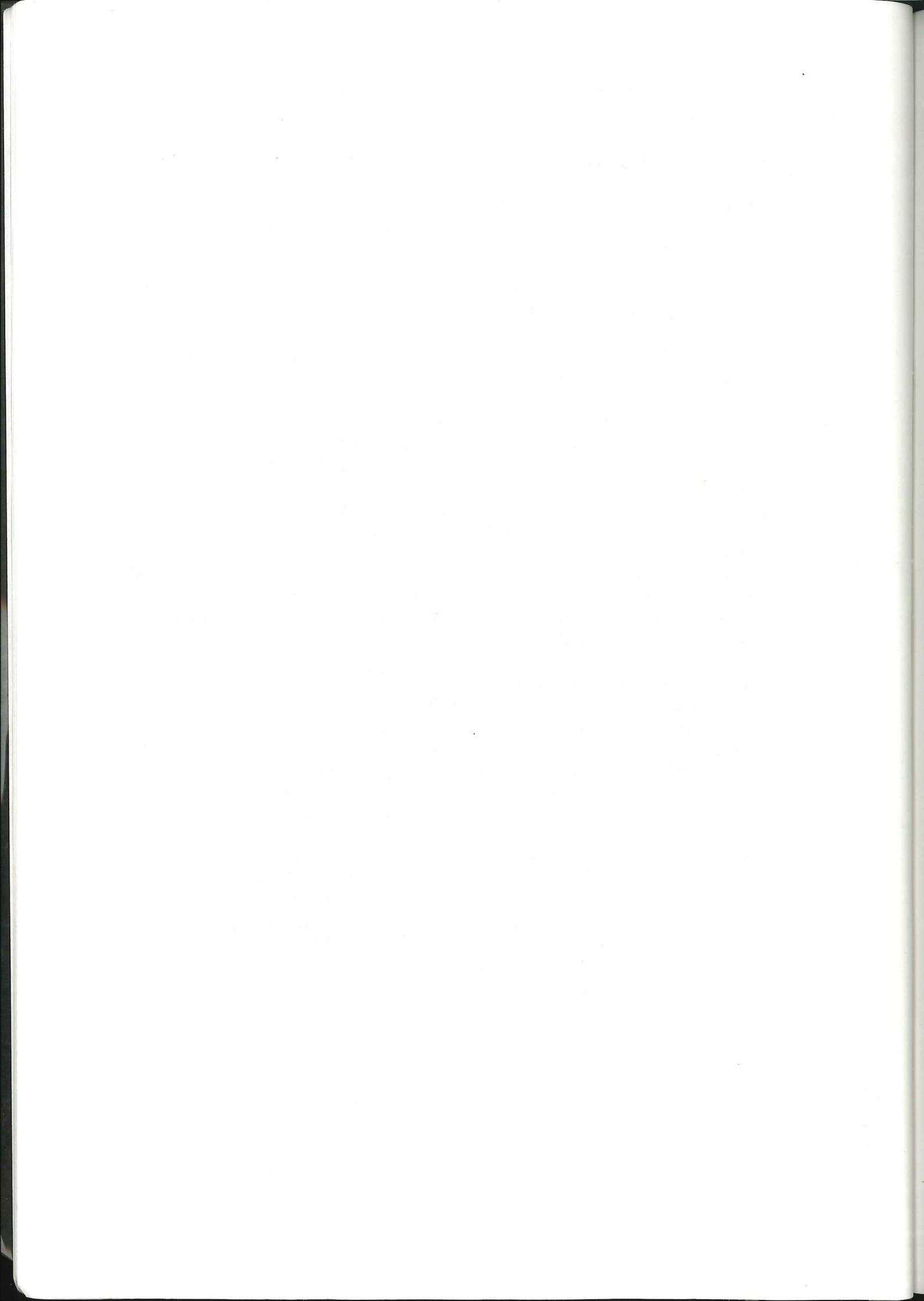
Im Verlaufe der Arbeit wurde festgestellt, dass zur Realisation eines Entscheidungsunterstützenden Systems noch sehr viele zusätzliche Daten und Modelle gebraucht werden und die bestehenden stark verbessert werden müssen.

Abbildungsverzeichnis

Fig. 1: Einbettung des Waldbrandmanagements in das natürliche und menschliche Umfeld	5
Fig. 2: Waldbrandmanagement Hierarchie	6
Fig. 3: "The least-cost-plus-loss (economic) theory"	7
Fig. 4: Schematische Darstellung eines Lauffeuers	12
Fig. 5: Tabelle der ORACLE-Datenbank	20
Fig. 6: Verknüpfung von Tabellen	20
Fig. 7: Architektur eines Entscheidungsunterstützenden Systems	21
Fig. 8: Erweiterte Architektur eines Entscheidungsunterstützenden Systems	22
Fig. 9: Erweiterte Architektur des Expertensystems	23
Fig. 10: Komponenten einer Wissensbasis	24
Fig. 11: Architektur eines GIS-basierten Expertensystems	24
Fig. 12: Lage des Untersuchungsgebiets nach Landeskarte 1 : 500'000 (reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	35
Fig. 13: Aufbau der Waldbranddatenbank mit Beginn der Erfassungszeit	38
Fig. 14: Rückwärtsausbreitung	42
Fig. 15: Vorgehen bei der Evaluation der Prioritätszonen	44
Fig. 16: Anteil der von Waldbrand betroffenen Fläche eines gefährdeten Objekts	48
Fig. 17: Berechnung des Gefahrencodes der Waldbrandgeschichte	56
Fig. 18: Bestimmung der Gefahrencodes der Rückwärtsausbreitung	57
Fig. 19: Anzahl Waldbrände auf der Alpensüdseite von 1895 - 1994 (nach Datenbank)	60
Fig. 20: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände im Malcantone (nach Datenbank)	61
Fig. 21: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	62
Fig. 22: Anzahl der Waldbrände nach Ursachen und Waldbrandsaison im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	64
Fig. 23: Anzahl der Waldbrände nach Ursachen und Waldbrandsaison auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	65
Fig. 24: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Exposition auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	66
Fig. 25: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	66
Fig. 26: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)	67
Fig. 27: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Exposition auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	68
Fig. 28: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	68

Fig. 29: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)	69
Fig. 30: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Höhe über Meer auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	70
Fig. 31: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Höhe über Meer im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	71
Fig. 32: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Höhe im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)	72
Fig. 33: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Höhe über Meer auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	73
Fig. 34: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Höhe über Meer im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	74
Fig. 35: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Höhe im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)	75
Fig. 36: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Hangneigung auf der Alpensüdseite (nach Datenbank)	76
Fig. 37: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	77
Fig. 38: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)	78
Fig. 39: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Hangneigung auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	79
Fig. 40: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)	80
Fig. 41: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)	81
Fig. 42: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Landnutzung im Malcantone von 1969 - 1993	82
Fig. 43: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Landnutzung auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993	82
Fig. 44: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Bestandestyp im Malcantone von 1969 - 1993	83
Fig. 45: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Bestandestyp auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993	84
Fig. 46: Verteilung der Anzahl der Waldbrände auf die Vegetationstypen von 1969 - 1993	85
Fig. 47: Verteilung der Fläche der Waldbrände auf die Vegetationstypen von 1969 - 1993	86
Fig. 48: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Exposition von 1969 - 1993	87
Fig. 49: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Höhenstufe von 1969 - 1993	88

Fig. 50: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Hangneigungsklasse von 1969 - 1993	89
Fig. 51: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Vegetationstypen von 1969 - 1993	90
Fig. 52: Klimadiagramm für den Kanton Tessin	91
Fig. 53: Mittlere Temperaturen um zwölf Uhr im Vergleich mit den Tagesmittelwerten	91
Fig. 54: Tagesmittelwerte der Luftfeuchtigkeit	92
Fig. 55: Luftfeuchtigkeit um zwölf Uhr	92
Fig. 56: Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit	93
Fig. 57: Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von Dezember bis Februar (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	96
Fig. 58: Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von März bis April (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	97
Fig. 59: Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von Mai bis November (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	98
Fig. 60: Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von Dezember bis Februar (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	100
Fig. 61: Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von März bis April (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	101
Fig. 62: Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von Mai bis November (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	102
Fig. 63: Prioritätszonen von Dezember bis Februar (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	104
Fig. 64: Prioritätszonen von März bis April (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	105
Fig. 65: Prioritätszonen von Mai bis November (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)	106



Tabellenverzeichnis

√ Tab. 1: Waldbrandgefahr in der Schweiz	15
Tab. 2: Expertensystem und Entscheidungsunterstützendes System im Vergleich	26
Tab. 3: Vergleich zwischen den Gemeinde-, Wald- und Waldbrandflächen	36
Tab. 4: Datensätze des GIS	39
∩ Tab. 5: Barrieren zur Berechnung der Rückwärtsausbreitung	50
∩ Tab. 6: Ausgangswert der Brandgutfeuchtigkeit (in Prozent)	51
∩ Tab. 7: Korrekturen für die Feuchtigkeiten des toten Brandguts (in Prozent)	52
Tab. 8: Korrekturwerte für die Höhe im Malcantone (in Prozent)	53
Tab. 9: Korrekturwerte für die Exposition im Malcantone (in Prozent)	53
Tab. 10: Schadenpotential mit den zugehörigen Gefahrencodes	58

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Inhaltsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Theorie	4
2.1 Waldbrandmanagement	4
2.1.1 Management-Theorien	5
2.1.2 Kontrolliertes Abbrennen	8
2.1.3 Heute verwendete Strategien im Waldbrandmanagement	9
2.1.4 Prioritätszonen	9
2.2 Phänomen Waldbrand	10
2.2.1 Allgemeines	10
2.2.2 Waldbrandtypen	11
2.2.3 Verbrennungsprozess	11
2.2.4 Verlauf eines Waldbrandes	12
2.2.5 Barrieren in der Feuerausbreitung	12
2.2.6 Brandgut	13
2.2.7 Brandgutfeuchtigkeit	13
2.2.8 Waldbrandgefahr	14
2.2.9 Feuerökologie	16
2.2.10 Waldbrandsaison	18
2.3 Computersysteme	18
2.3.1 Geographische Informationssysteme (GIS)	18
2.3.2 ORACLE-Datenbank	19
2.3.3 Entscheidungsunterstützendes System (Decision Support System)	20
2.3.4 Expertensystem (Expert System)	22
2.3.5 Vergleich von Expertensystem und Entscheidungsunterstützendem System und ihre Anwendung im Waldbrandmanagement	27
2.4 GIS und Waldbrandmanagement	29
3 Untersuchungsgebiet, Datengrundlagen und Modelle	31
3.1 Waldbrände im Tessin	31
3.1.1 Waldwirtschaft	31
3.1.2 Besitzverhältnisse	33
3.1.3 Waldbrandmanagement	33
3.1.4 Bekämpfung	34
3.2 Das Untersuchungsgebiet Malcantone	34
3.3 Datenlage im Tessin	37
3.3.1 Die Waldbranddatenbank	37
3.3.2 Datensätze des Geographischen Informationssystems	39
3.3.3 Datenverwaltung im GIS	39

3.4 Applikation SPARKS	40
3.4.1 Rückwärtsgerichtete Brandausbreitung (Rückwärtsausbreitung)	41
3.4.2 Brandgutmodell	42
4 Vorgehen	43
4.1 Auswertung der Waldbrandgeschichte	44
4.1.1 Expertenbefragung	44
4.1.2 Auswertungen der Waldbranddatenbank	45
4.1.3 Auswertung mit Hilfe des GIS	47
4.1.4 Berechnung des Schadenpotentials nach einem modifizierten Ansatz von VEGA-GARCIA (1993)	48
4.2 Berechnung der Rückwärtsausbreitung	50
4.2.1 Erzeugen von Barrieren in der Feuerausbreitung	50
4.2.2 Modellierung der Feuchtigkeit von totem Brandgut nach dem FIRE BEHAVIOR FIELD REFERENCE GUIDE	50
4.2.3 Berechnung des Schadenpotentials mittels Rückwärtsausbreitung	53
4.3 Gefahrencodes	54
4.3.1 Gefahrencodes der Brandgeschichte	55
4.3.2 Gefahrencodes der Feuerausbreitung	56
4.4 Einteilung in Prioritätszonen	58
5 Resultate	59
5.1 Bestimmung der feuerrelevanten Parameter anhand der Waldbrandgeschichte	59
5.1.1 Entwicklung der Waldbrandhäufigkeit von 1895 - 1994	60
5.1.2 Verteilung nach Monaten	61
5.1.3 Waldbrandsaison	63
5.1.4 Waldbrandursachen	63
5.1.5 Exposition	65
5.1.6 Höhenstufen	69
5.1.7 Hangneigung	75
5.1.8 Landnutzung und Vegetation	81
5.2 Auswertungen der Waldbrandgeschichte zur Bestimmung des Schadenpotentials	87
5.2.1 Exposition	87
5.2.2 Höhenstufen	87
5.2.3 Hangneigung	88
5.2.4 Vegetation	89
5.3 Auswertung der Meteodatenbank	90
5.3.1 Klimadiagramm	90
5.3.2 Temperaturen	91
5.3.3 Luftfeuchtigkeit	92
5.3.4 Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit	92
5.4 Modellierung der Feuerausbreitung	93
5.5 Schadenpotentiale	94
5.5.1 Schadenpotential der Waldbrandgeschichte	94
5.5.2 Schadenpotential der Feuerausbreitung	99
5.5.3 Prioritätszonen	103
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	107

Literaturverzeichnis

Anhang

Glossar

4.1 Grundlagen

- 4.1.1 Historische Brandausbreitung
- 4.1.2 Brandrisikomodell

4.2 Vorgehen

4.2.1 Auswertung der Waldbrandgefahr

- 4.2.1.1 Expertenbefragung
- 4.2.1.2 Risikofaktoren
- 4.2.1.3 Auswertung
- 4.2.1.4 Bewertung

4.2.2 Vorgehen

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Hintergrund dieser Arbeit ist eine Klausurtagung, die im Schweizerischen Nationalpark zum Thema Waldbrand in Zernez stattgefunden hat.

Aufgrund seiner Geschichte ist der Nationalpark stark feuergefährdet. Da es sich beim Nationalpark nicht um eine ursprüngliche Naturlandschaft, sondern um eine ehemals stark genutzte, teilweise übernutzte, Kulturlandschaft handelt, ist er stark waldbrandgefährdet. Zeitweise waren die Wälder fast vollständig abgeholzt. Die Folge der intensiven Nutzung sind Bestände, die den ursprünglich vorhandenen nicht mehr entsprechen und die an die natürlich vorkommenden Waldbrände nicht angepasst sind. Nach der Aufgabe der Nutzung sammelte sich immer mehr Totholz an, welches für die Entstehung von Feuern wesentlich ist. Zur Vermeidung von grossen Waldbränden sollten die Wälder daher bewirtschaftet werden. Da die Region nun unter Schutz steht, darf dies jedoch nicht mehr geschehen.

Das Klima im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks ist kontinental und kann mit der Alpensüdseite verglichen werden. Die Vegetation ist, wie dort, sehr feuerbegünstigend. Sie besteht hauptsächlich aus Arven und Föhren, die auf trockenen Kalkschuttböden wurzeln. Letztere fördern durch ihren hohen Gehalt an torfähnlichen Humusstoffen Erdfeuer. Sowohl Arven als auch Föhren enthalten ätherische Öle, die feuerbegünstigend wirken. Die Waldbrandsaison, d.h. dann, wenn die Bedingungen für Feuer am günstigsten sind, liegt im Herbst (SCHEURER et al. 1991).

Innerhalb des Nationalparks sind die Nordhänge weniger gefährdet, weil nicht nur dank der weniger intensiven Sonneneinstrahlung die Bodenfeuchtigkeit grösser ist, sondern weil auch hier weniger Totholz herumliegt.

KÖTZLI (in SCHEURER et al. 1991) vergleicht die Bergföhrenwälder des Nationalparks mit Wäldern in Finnland. Daraus schliesst er, dass die Wälder des Nationalparks in einem natürlichen Zyklus alle fünf bis sieben Jahre kleinflächig, alle 250 - 300 Jahre grossflächig, abbrennen würden. Die Bestände sind einerseits feuerfördernd durch die ätherischen Öle in der Nadelstreu und in den lebenden Bäumen, andererseits feuertolerant, da Bergföhren Tiefwurzler sind und eine dicke Borke haben. Das bedeutet, dass es häufig brennen kann, aber bei der vorherrschenden tiefen Intensität an den Bäumen keine Schäden entstehen.

Da die Wälder des Nationalparks seit langem nicht mehr gebrannt haben, hat sich sehr viel Totholz angesammelt, und weniger feuerangepasste Arten wie Arve, Lärche und Fichte sind in den Nationalpark eingewandert.

Zur relativ kleinen Gefahr, dass ein Feuer durch Blitz entfacht wird, kommt heute die viel grössere Gefahr hinzu, dass von der vielbefahrenen Ofenpassstrasse aus ein Brand entstehen könnte. Weitere Gefahren gehen von den Parkgrenzen aus, indem Feuer aus anliegenden Gebieten auf den Nationalpark übergreifen könnten. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Brand auf diese Art verursacht wird, ist sogar grösser, als dass Brände im Park selbst entstehen, da im Nationalpark das Entfachen von Feuern und das Verlassen der Wege untersagt sind (SCHEURER et al. 1991).

1.2 Zielsetzung

Obwohl also im Nationalpark ein sehr grosses Bedürfnis besteht, die Waldbrandproblematik in den Griff zu bekommen, fehlen bis heute die dazu notwendigen Datengrundlagen: Bisher hat es nur selten gebrannt und aufgrund seines Schutzstatus' soll er möglichst wenig gestört werden. Es wurde daher nach einem Gebiet in der Schweiz gesucht, welches ähnliche Probleme zu bewältigen hat und in welchem die Methoden getestet werden können. In der Schweiz treten hauptsächlich auf der Alpensüdseite Waldbrände auf, daher ist dort auch das grösste Interesse an diesem Thema und eine gute Datengrundlage vorhanden. Aus diesen Gründen bietet sich das Tessin, neben dem Schweizerischen Nationalpark, zur Waldbrandforschung an. In Zusammenarbeit mit der Sottostazione Sud delle Alpi (FNP SdA, Bellinzona), der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL, Birmensdorf) - die sich schon seit längerer Zeit mit der Waldbrandproblematik befasst - wurde daher das Untersuchungsgebiet Malcantone ausgewählt.

In allen Regionen, wo Waldbrand häufig vorkommt, muss entschieden werden, wie, bzw. ob überhaupt, ein Feuer bekämpft werden soll. Da diese Entscheidungen in einem grösseren Zusammenhang stehen, müssen Strategien und Richtlinien entwickelt werden. Das daraus resultierende Waldbrandmanagement muss alle Komponenten, die zur Entscheidungsfindung benötigt werden, berücksichtigen. Da diese sehr zahlreich sind, ist der Mensch schnell überfordert. Daher wurde immer wieder der Wunsch geäussert, die Entscheidungsträger mit Computern zu unterstützen.

Dazu bieten sich hauptsächlich zwei Systeme an: Ein Expertensystem und ein Entscheidungsunterstützendes System. Weil Waldbrand eine räumliche Problematik ist, liegt es nahe, ergänzend ein Geographisches Informationssystem (GIS) zur Lösung der räumlichen Fragestellungen zu verwenden. In beiden erwähnten Systemen ist dies möglich.

Die Schwerpunkte und Ziele der Arbeit sollten so weit wie möglich auf die Bedürfnisse der Betroffenen abgestimmt werden. Dazu wurde das Gespräch mit Fachleuten gesucht. Die beiden Experten G. Corti (Kreisförster) und D. Ryser (Feuerwehrkommandant, Malcantone) sind sich einig, dass für sie einer der wichtigsten Aspekte das Waldbrandrisiko sei, d.h. wie gross die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Waldbrands an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit ist. Ebenso wichtig sei es, die Folgen eines Waldbrandes abschätzen zu können. Dabei interessieren die Risikojahre, in denen Feuer besonders häufig sind, und Gebiete, in denen es lange nicht mehr gebrannt hat, besonders, da hier die Erfahrungswerte fehlen und so die Auswirkungen eines Feuers nicht vorhersagbar sind. Solche Gebiete tendieren durch das lange Ausbleiben von Feuer auch zu einer kritischen Ansammlung von Brandgut, was später zu sehr ausgedehnten Bränden führen kann.

Für äusserst schwierig halten Corti und Ryser die Entscheidungsfindung auch an Krisentagen, an denen mehrere Brände gleichzeitig auftreten können. Besonders dann muss die Bekämpfung optimal organisiert werden. Die Experten müssen Entscheide über das Vorgehen zur Waldbrandbekämpfung treffen. Sie bestimmen letztlich, an welchem Ort zuerst und auf welche Art eingegriffen wird. Dazu müssen ihnen unter anderem die Lage von Siedlungen und Strassen bekannt sein.

Ziel dieser Arbeit sollen der Vergleich von Expertensystem und Entscheidungsunterstützendem System und ihre Einsetzbarkeit im Waldbrandmanagement sowie die Ausscheidung von Prioritätszonen für die Waldbrandbekämpfung und ihre Darstellung in Form von Karten sein. Dazu soll ein Geographisches Informationssystem verwendet werden.

betriebs- und einschulungs-
maßnahmen, Weiterentwicklung
des Betriebsrates und
des Betriebsausschusses
und des Betriebsrates

2 Theorie

2.1 Waldbrandmanagement

In allen Regionen der Welt, in denen Waldbrände vorkommen, wird man mit dem Problem konfrontiert, wie man bei einem Auftreten vorgehen soll. Jede Aktion, die vor, während oder nach einem Feuer durchgeführt werden soll, muss sorgfältig geplant und auf die Landnutzung, bzw. die Waldwirtschaft, abgestimmt werden. Jegliche Planung, die in Zusammenhang mit Waldbrand vorgenommen wird, gehört zum Waldbrandmanagement (*fire management*).

Für ein optimales Management sind genaue Kenntnisse der für das Feuerverhalten wesentlichen Parameter und der Waldbrandgeschichte einer Gegend notwendig. Ebenfalls wichtig ist, dass Pläne erstellt werden, gemäss welchen man vor, während und nach einem Brand vorgeht.

CHANDLER (1983) definiert "fire management" wie folgt:

"All activities required for the protection of burnable forest values from fire and the use of fire to meet land management goals and objectives." (LANLEY 1986, S. 47)

Eine präzisere Definition von "wildland fire management" gibt SIMARD (1976):

"The application of management, physical, and ecological principles to the management of the wildland fire process so as to render the impact of wildland fire on the natural resource base, the ecosystem, and the environment consistent with the goals of the managing organization.

Wildland fire management includes the traditional fire control related activities (suppression, detection, etc.) as well as broader relationships between fire and wildland management, such as prescribed fire and fuel management." (SIMARD 1976, S. 1)

Er streicht, im Unterschied zu CHANDLER (1983), die übergeordneten Nutzungsziele der für das betroffene Gebiet zuständigen Organisation heraus, welche durch ein angepasstes Management erreicht werden sollen.

Diese übergeordneten Nutzungsziele werden von den LandbesitzerInnen, bzw. den zuständigen Behörden, definiert. Die Art der Bewirtschaftungsform - und damit auch die Einstellung gegenüber Waldbränden - wird stark von ihnen bestimmt. Soll z.B. kurzfristig höchster Profit aus dem vorhandenen Holz geschlagen werden, wird ein Waldbrand unter allen Umständen unterdrückt. Handelt es sich dagegen um einen Nationalpark, so soll möglichst wenig in den natürlichen Kreislauf eingegriffen werden, da es das Ziel ist, eine ursprüngliche Landschaft zu erhalten oder wiederherzustellen.

2.1.1 Management-Theorien

Die Einbettung des Waldbrandmanagements in einen weiteren Zusammenhang kann wie folgt dargestellt werden:

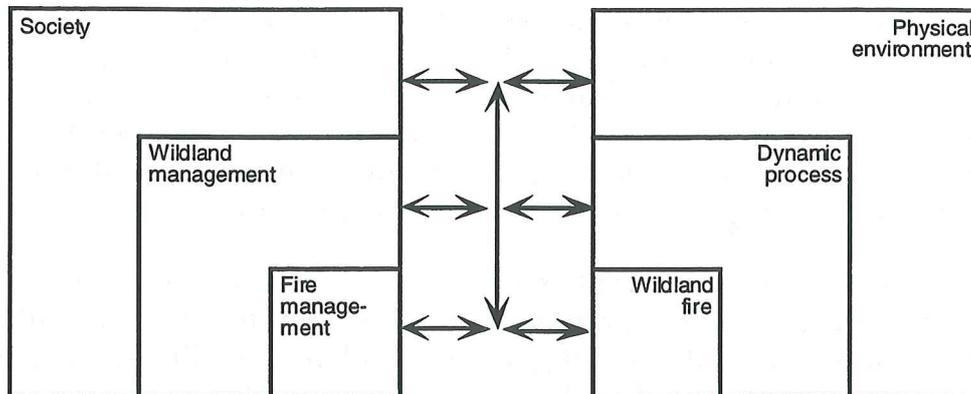


Fig. 1: Einbettung des Waldbrandmanagements in das natürliche und menschliche Umfeld (SIMARD 1977)

Die Gesellschaft (*society*) bestimmt mit ihren Vorstellungen, wie eine natürliche Landschaft aussehen soll, in einem hohen Masse, wie diese bewirtschaftet wird (*wildland management*). Dies wiederum hat einen direkten Einfluss auf das Vorgehen bei Waldbränden (*fire management*). Analog dazu bestimmt die physische Umgebung (*physical environment*) die dynamischen Prozesse in der Natur (*dynamic process*) und als einen davon auch die Waldbrände (*wildland fire*).

Waldbrandmanagement setzt sich aus vielen verschiedenen Komponenten zusammen. Alle Aspekte müssen berücksichtigt werden, sowohl die Folgen eines Auftretens, als auch diejenigen, welche durch die Abwesenheit des Feuers entstehen.

Die Hauptkomponenten können wie folgt aufgedgliedert werden (SIMARD 1977) (Fig. 2):

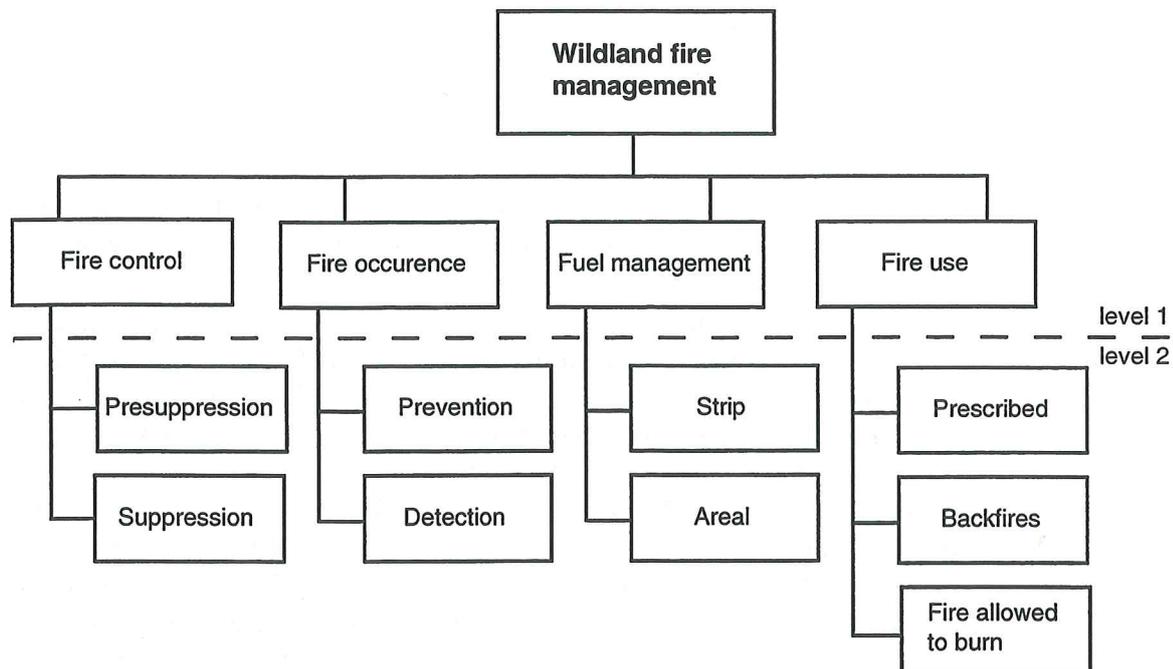


Fig. 2: Waldbrandmanagement Hierarchie (SIMARD 1977)

- Feuerkontrolle (*fire control*):
Sie betrifft die Planung der Bekämpfung sowohl vor, als auch während eines Brandereignisses. Unter Waldbrandbekämpfung (*suppression*) versteht man das, was während eines Brandes zu seiner Unterdrückung unternommen wird, unter Brandschutzmassnahmen (*presuppression*) alles, was zur Unterdrückung von Feuern vor deren Auftreten geschieht.
- Feuerauftreten (*fire occurrence*):
Zur Waldbrandverhütung (*fire prevention*) gehören alle Handlungen, die das Ausbrechen eines Brandes verhindern sollen. Entdecken und Lokalisieren (*fire detection*) umfassen alle Methoden, die gebraucht werden, um Feuer aufzuspüren (Kontrollgänge, Infrarot-Luftbilder, etc.).
- Brandgut-Management (*fuel management*):
Vorkehrungen, um das Entzünden von Feuern zu verhindern, sind ausserordentlich wichtig. Es wird sowohl flächenhaft als auch linienhaft vorgegangen: So wird einerseits mit kontrolliertem Abbrennen (*prescribed burning*) (Kap. 2.1.2) die Brandgutmenge reduziert, (*areal fuel management*) und andererseits werden Schneisen in den Wald geschlagen, über die das Feuer nicht hinwegspringen kann und in der Folge ausbrennt; totes Material entlang von Strassen und Eisenbahnlinien wird weggeräumt, um hier das Risiko eines Brandausbruchs herabzusetzen (*strip fuel management*).
- Nutzung des Feuers (*fire use*):
Unter die Thematik der Verwendung des Feuer fallen die kontrollierten Feuer (*prescribed fires*), die Gegenfeuer (*backfires*) und bestehende Feuer, welche brennen dürfen, da von ihnen keine unmittelbare Gefahr ausgeht (*fires allowed to burn*).

Zur Erstellung eines Management-Plans bestehen nach (SIMARD 1976) zwei Ansätze:

- Praktischer Ansatz (*practical approach*)
- ökonomischer Ansatz (*economic approach*)

Praktischer Ansatz

In den USA wurde 1920 das Konzept der jährlich maximal tolerierbaren verbrannten Fläche (*acceptable annual area burned*) definiert. Dies bedeutet, dass jedes Jahr nur ein bestimmter Prozentsatz der geschützten Waldfläche abbrennen darf, üblicherweise 0.1%. Dies ist allerdings ein willkürlicher Wert und beruht allein auf Erfahrungen.

1935 führte der US Forest Service dann die "10 o'clock policy" ein. Diese besagt, dass Feuer, welche bis zehn Uhr morgens nicht unter Kontrolle gebracht werden konnten, auch während des restlichen Tages unkontrollierbar bleiben. Es werden also alle Kräfte während der Nacht und am frühen Morgen zur Bekämpfung eingesetzt. Diese Richtlinie ist bis heute in Gebrauch.

Dieser Ansatz weist jedoch grosse Mängel auf. Der grösste ist, dass keine der Auswirkungen effektiv messbar ist und alles nur auf Faustregeln beruht. Ebenfalls werden wichtige Aspekte vernachlässigt, nirgends wird z.B. über den Wert der verbrannten Ressourcen gesprochen, weder in ökonomischer, noch in ökologischer Hinsicht. Um diesem Problem zu begegnen, wurde der folgende Ansatz entwickelt.

Ökonomischer Ansatz

Die hier meistgenannte Theorie ist die "least-cost-plus-loss theory". Sie beruht auf dem Prinzip, dass ein Optimum zwischen den zur Bekämpfung verbrauchten Mitteln und den durch das Feuer verursachten Verlusten gefunden werden soll. Dies wird durch die untenstehende Graphik veranschaulicht (Fig. 3).

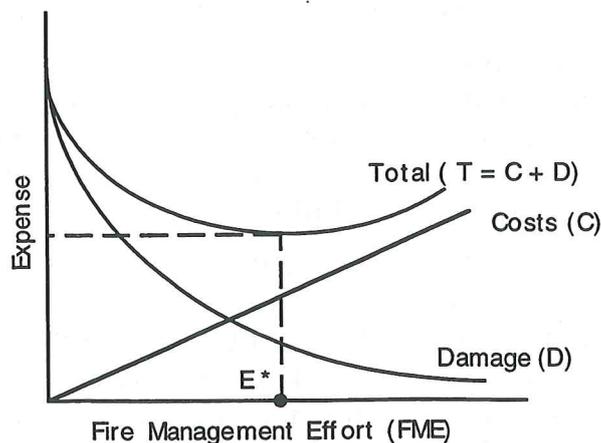


Fig. 3: "The least-cost-plus-loss (economic) theory"
(SIMARD 1976)

Bei E^* ist das Optimum zwischen Kosten und Nutzen der Feuerbekämpfung erreicht.

Hauptkritikpunkt dieses Ansatzes ist jedoch, dass es sehr schwierig ist, immaterielle Werte mit materiellen zu vergleichen. Wie soll zum Beispiel der Verlust der Attraktivität einer Landschaft kurz nach einem Feuer gemessen werden?

2.1.2 Kontrolliertes Abbrennen

Eine heute sehr verbreitete Massnahme im Waldbrandmanagement ist kontrolliertes Abbrennen (*prescribed burning*). Es findet weltweit eine immer grössere Beachtung. Dabei werden künstlich Feuer entfacht, die vorwiegend dazu dienen sollen, das Brandgut zu reduzieren, damit keine grösseren Brände mehr entstehen können. Dadurch soll ein natürlicher Vorgang unter kontrollierten Bedingungen nachgeahmt werden.

In Gebieten, in denen Waldbrand häufig ist, stellt er einen wichtigen Faktor der Sukzession dar: Bestimmte Pflanzen (sog. Pyrophyten) können sich sogar nur dann vermehren, wenn ein Waldbrand stattgefunden hat. Fehlt dieser, degradiert einerseits die Vegetation, da bestimmte Pflanzenarten sich nicht mehr vermehren können, andererseits sammelt sich immer mehr Brandgut an, welches einem späteren Feuer sehr viel Nahrung bietet und so dessen Intensität enorm steigert. Diese wiederum bewirkt grosse Schäden an der Vegetation, ja sie kann sogar zu einem totalen Verbrennen der Humusschicht führen, sodass die betroffene Fläche für lange Zeit unbewachsen bleibt und der Boden als Folge davon erodiert.

Brennt es in einem Gebiet jedoch häufiger, so brennt es jeweils weniger intensiv und meistens sind kleinere Flächen betroffen, denn in einem erst vor kürzerer Zeit schon abgebrannten Gebiet findet ein weiteres Feuer noch nicht genügend Brandgut. Wiederholen sich derartige Brände während Jahrhunderten, entsteht ein mosaikartiger Wald mit Beständen verschiedenen Alters (Kap. 2.2.9).

Diese Mosaikstruktur wurde jedoch im Laufe der Zeit durch den Menschen zerstört. In den USA beispielsweise wurde besonders anfangs dieses Jahrhunderts massiv in den natürlichen Kreislauf eingegriffen. Dadurch entstanden Schäden, mit deren Auswirkungen man heute konfrontiert wird. So erklärt man sich auch das riesige Ausmass der Yellowstone Feuer von 1988. Auch wenn dies ein Jahr mit ausserordentlich vielen und heftigen Waldbränden war, nimmt man doch an, dass in einem natürlich zusammengesetzten Wald die Schäden wesentlich kleiner gewesen wären.

Daher erhielt die Idee, Wald ganz gezielt abzubrennen, um die ursprüngliche Mosaikstruktur wiederherzustellen, immer mehr Anhänger. Die Feuer werden dann entfacht, wenn sie zwar brennen, jedoch nicht unkontrollierbar werden können. So wird in einem genau definierten Gebiet Wald abgebrannt und damit das Risiko für einen Grossbrand verkleinert.

Dieses Vorgehen wird heute u.a. in den USA in den Nationalparks häufig angewendet. Die Flächen sind hier gross genug und meistens relativ flach, und es hat keine Siedlungen in unmittelbarer Nachbarschaft, was in der Schweiz jedoch nirgends der Fall ist und somit ein solches Waldbrandmanagement schwierig oder sogar unmöglich wird. Auch in den USA ist der Einsatz von kontrolliertem Abbrennen umstritten. Neben den hohen Rauchemissionen spielen auch emotionale Aspekte eine grosse Rolle. Während Jahrzehnten wurde der Bevölkerung eingeprägt, dass Waldbrände eine Gefahr für Mensch und Natur darstellten und sie unter allen Umständen verhindert werden müssten. Durch Werbeaktionen - Smokey, der Bär wurde als Symbol geprägt - wird nach wie vor den Touristen eingeschärft, dass keine Feuer entstehen dürfen. Daher wird es von der Öffentlichkeit kaum akzeptiert, wenn von offizieller Seite der Wald absichtlich angezündet wird.

Kontrollierte Feuer sind nicht nur solche, die absichtlich zur Brandgutreduktion entfacht wurden, sondern auch solche mit natürlicher (oder auch menschlicher) Ursache, die man so einschätzt, dass man sie bis zu einem bestimmten Punkt ohne Gefahr brennen lassen kann. Diese Feuer werden ständig überwacht, damit zu kritischen Zeitpunkten eingegriffen werden kann. Das Gegenstück dazu bilden die "wildfires", die mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln bekämpft werden.

2.1.3 Heute verwendete Strategien im Waldbrandmanagement

Die folgenden Strategien finden heute die grösste Verbreitung (AGEE 1978):

- totales Bekämpfen des Feuers
- Feuerbekämpfung mit zusätzlicher Brandgutbewirtschaftung
Unter Brandgutbewirtschaftung versteht man das Reduzieren von Brandgut durch Anzünden oder Herausschleifen.
- kontrolliertes Abbrennen mit Feuerbekämpfung
- natürliche Feuer mit Feuerbekämpfung
Natürliche Feuer sind Brände, die nicht unter kontrollierten Bedingungen entzündet wurden.
- Feuerbekämpfung, kontrolliertes Abbrennen und natürliche Feuer
- kein Management

Heute werden weltweit hauptsächlich die Strategien zwei bis fünf angewendet, in der Schweiz bisher jedoch nur die erste.

2.1.4 Prioritätszonen

Ein Hilfsmittel für ein gezieltes Vorgehen im Waldbrandmanagement sind Prioritätszonen. Prioritätszonen sind Gebiete, die anhand ihrer Waldbrandgefahr und ihres Schadenpotentials zu Zonen mit gleich hoher Priorität in der Waldbrandbekämpfung zusammengefasst werden können. Das Schadenpotential ist der mutmasslich durch ein zukünftiges Feuer verursachte Schaden.

Mit Informationen zur Waldbrandgefahr und dem Schadenpotential können die Infrastruktur und die Ressourcen zur Brandbekämpfung schon im voraus im Gelände optimal verteilt werden. Zudem lassen sich die Prioritäten in der Bekämpfung festlegen: Insbesondere können so Gebiete mit hohem Schadenpotential besser geschützt werden. Die Bekämpfung lässt sich also vor und während eines Waldbrandes besser planen.

Zu Gebieten mit hohem Schadenpotential werden z.B. Siedlungen, Strassen, kulturell wichtige Objekte, Schutzwald, erosionsgefährdete Gebiete und Aufforstungen gezählt. Empfindliche Ökosysteme, Tierhabitats (beide nur schwer zu lokalisieren) und landwirtschaftliche Gebiete können ebenfalls dazugerechnet werden. Ins Gewicht fällt auch die sogenannte Rotation, das heisst die Zeitspanne, die zwischen zwei Waldbrandereignissen am gleichen Ort vergeht. Ist die Rotation gross, kann sich die Vegetation zwischen zwei Ereignissen unter Umständen nicht mehr erholen und degradiert.

Gebiete mit hoher Waldbrandgefahr lassen sich einerseits von ihrer Brandgeschichte, andererseits von ihrer geographischen Lage und ihrer Vegetationsbedeckung, bzw. ihrem Brandgut ableiten. Generell nimmt man an, dass ein Gebiet, welches schon häufig gebrannt hat, auch in Zukunft oft brennen

wird. Die eigentlich kritischen Gebiete sind jedoch jene, welche sehr selten, oder seit Menschengedenken noch nie gebrannt haben. Ihr Brandverhalten ist gänzlich unbekannt und daher auch schlecht abzuschätzen.

Das Feuerverhalten ist ein weiterer sehr wichtiger Punkt in der Abschätzung der Waldbrandgefahr: Es ist wichtig zu wissen, wo sich das Feuer schneller und wo langsamer ausbreitet, um am richtigen Ort zuerst eingreifen zu können. Neben dem Brandgut hat die Topographie auf die Feuerausbreitung einen starken Einfluss. So brennen steile Gebiete schneller als flache, da das Feuer hangaufwärts das Brandgut, welches vor der Flammenfront liegt, erhitzt und austrocknet (Kap. 2.2.4).

Ebenfalls beeinflusst wird das Waldbrandverhalten von Klima und Wetter. So wirken hohe Temperaturen und wenige Niederschläge auf Waldbrände fördernd. Entscheidend für das Feuerverhalten sind jedoch Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

Interessant sind auch die anthropogenen Einflüsse auf die Waldbrandgefahr. Hier spielt vor allem Brandstiftung oder Fahrlässigkeit bei der Entstehung von Feuern eine Rolle. So sind gut zugängliche Regionen, wie solche in Strassen- und Siedlungsnähe, stärker feuergefährdet als abgelegene Gebiete.

Alle diese bei der Einteilung in Prioritätszonen zu beachtenden Parameter müssen nun richtig gewichtet werden. Sie gruppieren das Untersuchungsgebiet in Zonen mit unterschiedlicher Priorität in der Waldbrandbekämpfung.

2.2 Phänomen Waldbrand

2.2.1 Allgemeines

Damit ein Feuer sich entzünden kann, braucht es Sauerstoff, Brandgut und Wärme.

Verbrennt Holz, reagieren Zellulose, Lignin und Mineralstoffe mit dem Sauerstoff. Dabei werden Kohlendioxid, Wasserdampf und Wärme freigesetzt.

Erhitzt sich das Brandgut bis zur Entzündung, verdampfen Wasser und andere flüchtige Stoffe wie Harz. Anschliessend verändert sich die chemische Struktur des Brandguts. Dabei entstehen entflammbare Gase, Wasser, Kohle und Asche, ihre Mengenverhältnisse sind von der Temperatur des Feuers abhängig (FULLER 1991).

2.2.2 Waldbrandtypen

Nach SCHÖNING (1996) können Waldbrände in verschiedenen Typen auftreten, die häufig ineinander übergehen:

- Lauf- oder Bodenfeuer

Meist die Ausgangsform der Waldbrände. Sie breiten sich in der Streu-, Kraut- und Strauchschicht aus, mit grösster Geschwindigkeit hangaufwärts und in Windrichtung. Dies ist die häufigste Form der Waldbrände.

- Kronenfeuer

Lauffeuer können bei genügend hoher Intensität in den Kronenraum übergehen und sich dort ausbreiten (VAN WAGNER 1977). Es wird zwischen passiven, aktiven und unabhängigen Kronenfeuern unterschieden. Passive Kronenfeuer werden dauernd vom Lauffeuer entzündet, während aktive Kronenfeuer nur auf die Wärmezufuhr vom Lauffeuer angewiesen sind. Im seltenen Fall eines unabhängigen Kronenfeuers eilt dieses der Flammenfront des Lauffeuers voraus und kann durch herabfallende Gluten seinerseits Lauffeuer auslösen (JECKLIN 1993).

- Flugfeuer

Durch konvektive Strömungen können von Lauf- oder Kronenfeuern Teile des Brandguts durch die Luft getragen werden und neue Feuer starten. Dies ermöglicht ein Überspringen von Hindernissen und ist daher von grosser Wichtigkeit.

- Erd- oder Stockfeuer

Meistens durch Lauffeuer entzündet, breiten sie sich unterirdisch im organischen Material aus (ALBINI 1992). Da sie häufig nur glimmen und sich dabei fast kein Rauch entwickelt, sind sie schwer erkennbar und können im Extremfall sogar Monate später an einem anderen Ort wieder als Lauffeuer in Erscheinung treten.

2.2.3 Verbrennungsprozess

Bei der Erwärmung der Oberfläche einer Brandgutpartikel werden Bestandteile davon durch die Hitzeeinwirkung in Gase umgewandelt. Diese können dabei entzündet werden. Die Geschwindigkeit und die Intensität des Verbrennungsprozesses hängen vom Feuchtigkeitsgehalt, der chemischen Zusammensetzung und der Geometrie der Brandgutpartikel ab.

Erhöhter Feuchtigkeitsgehalt einer Brandgutpartikel verzögert die Entzündung, da nasses Brandgut mehr Energie absorbiert. Zusätzlich verdünnt der Wasserdampf nach der Entzündung das Gasgemisch und reduziert so die Entflammbarkeit.

Die Erlöschungsfeuchtigkeit ist der maximale Wassergehalt, bei welchem das Brandgut unter Flammenbildung noch verbrennen kann. Bei totem Brandgut liegt dieser zwischen 25% und 40%, bei lebendem zwischen 120% und 160% der Trockenmasse.

Die chemische Zusammensetzung des Brandguts beeinflusst das Gasgemisch, welches bei der Verbrennung entsteht.

Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis beeinflusst als geometrischer Parameter die Entzündungsgeschwindigkeit und die Brenndauer einer Brandgutpartikel. Je grösser das Verhältnis, desto mehr Wärme kann von der

Partikel absorbiert werden und desto mehr Gase treten aus. Dadurch wird die Verbrennungsgeschwindigkeit erhöht.

Ebenfalls von Bedeutung ist die Packungsdichte des Brandguts. Bei zu niedriger Dichte wird der Wärmefluss unterbrochen, sodass sich ein Feuer nicht mehr ausbreiten kann. Bei zu hoher Dichte dagegen fehlt der Sauerstoff.

Nach dem Entzünden wird die freigesetzte Energie durch Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung und Massentransport (Transport von brennendem Material durch die Luft) auf die umgebenden Partikel übertragen (ALBINI 1992 in SCHÖNING 1996).

2.2.4 Verlauf eines Waldbrandes

Ein Brandgutpartikel wird durch eine Wärmequelle entzündet. Bei der anschliessenden Entzündung von benachbarten Partikeln nimmt die Flammenlänge zu. Durch die erhöhte Wärmestrahlung wird weiteres Brandgut entzündet und dadurch die Ausbreitung des Feuers beschleunigt. Man spricht hier von der ersten Beschleunigungsphase, die wenige Minuten dauert. Ist das Material im Zentrum des Feuers verbrannt, kann dort Luft eindringen. Dadurch sinkt die Temperatur der Flammen, und die Ausbreitungsgeschwindigkeit nimmt in flachem Gelände ab. Ist es jedoch steil oder weht ein Wind, folgt die zweite Beschleunigungsphase. Sie dauert zwischen fünf Minuten und mehr als einer Stunde. Durch Wind und Hangneigung werden die Flammen geneigt. Dadurch ist an der Flammenfront eine grössere Fläche des Brandguts der Wärmestrahlung ausgesetzt. Das Feuer befindet sich nun in einem Gleichgewichtszustand, solange sich Brandgut, Wind, Gelände und Feuchtigkeit nicht verändern (SCHÖNING 1996).

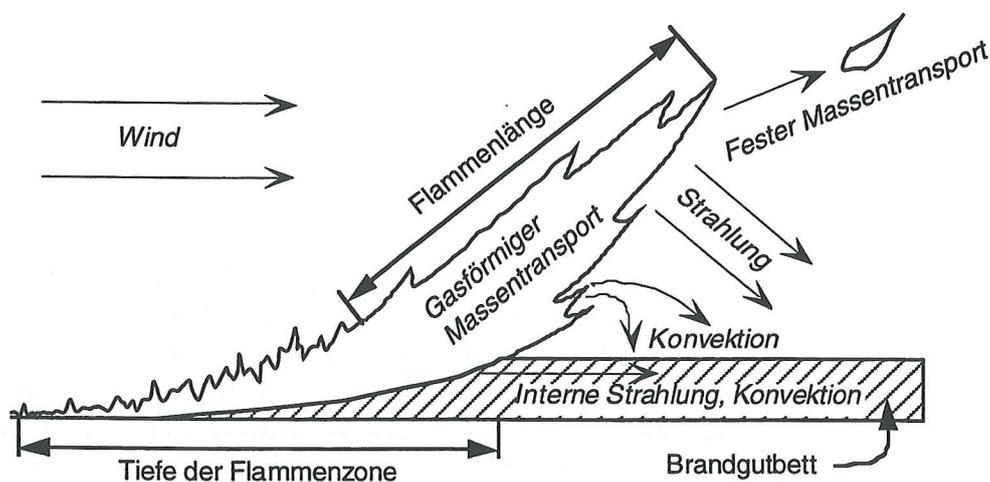


Fig. 4: Schematische Darstellung eines Lauffeuers (CHANDLER 1983 in SCHÖNING 1996)

2.2.5 Barrieren in der Feuerausbreitung

Objekte, auf denen sich kein Brandgut befindet, haben eine hemmende Wirkung auf die Feuerausbreitung. Solche Hindernisse werden auch Barrieren genannt. Typisch dafür sind Strassen, Flüsse, Felsen oder Feuerschneisen. Ob das Feuer ein Hindernis überqueren kann, hängt vom Verhältnis der Flammenlänge zur Hindernisbreite ab. Eine genügend grosse Flammenlänge lässt das Feuer ein Hindernis überspringen.

2.2.6 Brandgut

Als Brandgut (*fuel*) wird totes oder lebendes, brennbares Material bezeichnet. Es wird wie folgt unterteilt (LANLY 1986):

- Brandgut im Boden (*ground fuel*)
Alles brennbare Material unterhalb der Streuschicht, einschliesslich Rohhumus, Holzstücke im Boden und Wurzeln. Unterstützt Erdfeuer ohne Flamme.
- Bodennahe Brandgut (*surface fuel*)
Lose Streu auf dem Waldboden, normalerweise bestehend aus abgefallenen Blättern und Nadeln, Zweigen, Borke, Zapfen und kleinen Ästen, die noch nicht genug verwest sind, um ihre Identität zu verlieren. Daneben auch Gras, Sträucher und Bäume kleiner als 1.2 m, grössere Äste, Fallholz, Baumstrünke, Keimlinge und krautige Pflanzen vermischt mit der Streu, oder teilweise die Streu ersetzend.
- Brandgut über dem Boden (*aerial fuel*)
Stehendes Brandgut im Wald, das nicht in direktem Kontakt mit dem Boden ist. Besteht hauptsächlich aus Laub, Zweigen, Ästen, Stämmen und Rinde, sowie Bäume und Sträucher mehr als 1.5 m ab Grund.

Weiter wird zwischen totem und lebendem Brandgut unterschieden (HARVEY 1996):

- Totes Brandgut (drei Durchmesserklassen, Brandgut mit Durchmesser):
 - < 0.6 cm
 - 0.6 cm bis < 2.5 cm
 - 2.5 cm bis < 7.5 cm
- Lebendes Brandgut:
 - krautig (*herbaceous*)
 - verholzt (*woody*)

2.2.7 Brandgutfeuchtigkeit

Unter Brandgutfeuchtigkeit versteht man den Wassergehalt einer Brandgutpartikel. Sie wird in Gewichtsprozenten der ofentrockenen Brandgutpartikel angegeben und wird sowohl für totes als auch lebendes Brandgut bestimmt. Üblicherweise liegt sie zwischen 30% und 60% für totes, zwischen 80% und 250% für lebendes Material. Sie verändert sich jedoch mit der Grösse der Brandgutpartikel: Je kleiner die Partikel, desto schneller trocknet sie aus (FULLER 1991).

Da die Brandgutfeuchtigkeit von der Luftfeuchtigkeit, der Temperatur, der Einstrahlung und dem Wind abhängig ist, variiert sie mit der Tages- und der Jahreszeit. Am Tag ist die Brandgutfeuchtigkeit wesentlich tiefer als in der Nacht. Die Schwankungen über das Jahr sind lokal stark unterschiedlich und wetterabhängig.

Um die Brandgutfeuchtigkeit aus der Tages- und der Jahreszeit, der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Beschattung und der Topographie herleiten zu können, bestehen Tabellen (NAT. WILDFIRE COORDINATING GROUP 1992) (Kap. 4.6).

2.2.8 Waldbrandgefahr

Waldbrandgefahr ist ein Oberbegriff für alles, was in Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit eines Brandausbruchs steht, er wird z.T. aber auch für die möglichen Auswirkungen eines Feuers verwendet. Die FAO definiert die Waldbrandgefahr (*fire danger*) wie folgt:

"The resultant often expressed as an index of both constant and variable danger factors affecting the inception, spread, and difficulty of control of fires and the damage they cause." (LANLY 1986 S. 42)

Der Begriff sollte jedoch, da er so unpräzise ist, eigentlich vermieden und durch andere, genauere, ersetzt werden.

In dieser Arbeit wird der Begriff Waldbrandgefahr einerseits für die Wahrscheinlichkeit des Entzündens (*fire risk*), andererseits für die Gefahr, die von vorhandenem Brandgut, der herrschenden Witterung und der Topographie (*fire hazard*) herrührt, verwendet.

Viele verschiedene Faktoren beeinflussen die Brandgefahr. Neben Topographie und Vegetation sind vor allem Klima und Witterung bestimmend. Die Angaben der Tabelle 1 nach (JECKLIN 1993, WINKLER 1971) beziehen sich auf die Alpen.

	sehr grosse Gefahr	grosse Gefahr	mässige Gefahr	geringe Gefahr
Tageszeit	<ul style="list-style-type: none"> • 12-16 Uhr 	<ul style="list-style-type: none"> • 10-18 Uhr 		
Jahreszeit	<ul style="list-style-type: none"> • Mitte März bis Mai • In schneefreien Lagen zw. Dezember und Mai 	<ul style="list-style-type: none"> • Juni, Juli (Gefahr für Katastrophe am grössten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Erste Märzhälfte, Mai 	<ul style="list-style-type: none"> • August bis September
Wind	<ul style="list-style-type: none"> • Stärke 2-5 (Beaufort) • Föhn 			
Klima	<ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte <15% • Luftfeuchte <50% • hohe Tagestemperaturen • lange Trockenperioden (3-4 Wochen) 		<ul style="list-style-type: none"> • Bodenfeuchte >15% • Luftfeuchte >50% 	<ul style="list-style-type: none"> • Boden während 6-7 Monaten schneebedeckt • keine Trockenperioden
Geländeform	<ul style="list-style-type: none"> • Runsen • Mulden • Felswände (Entstehen von Aufwind) 			<ul style="list-style-type: none"> • Kreten • Geländekanten
Exposition	<ul style="list-style-type: none"> • Süd (Sonne) 			<ul style="list-style-type: none"> • Nord (Schatten)
Bodenart	<ul style="list-style-type: none"> • Kiesböden • Schotterböden • tiefgründige Kalkschuttböden 			<ul style="list-style-type: none"> • Lehm-, Torfböden
Waldzustand	<ul style="list-style-type: none"> • Nadelholzkulturen, jüngere Nadelholzbestände bis ca. 40 Jahre, sehr dichtstehend • mit Heidekraut oder mit Gras durchsetzte Fichten-, Föhren- und Legföhrenbestände • keine Laubholzbeimischung • viel trockenes, abgestorbenes Material • hoher Anteil an brennbarem Pflanzenmaterial • schlechte Zugänglichkeit zu den Beständen • trockene, sandige Standorte 	<ul style="list-style-type: none"> • mittelalte Nadelholzbestände, mit trockenem oder abgestorbenem Material • stufige Nadelwälder mit Unterwuchs • Nadelholzkulturen mit wenig dürrem Material am Boden • eingeschränkte Zugänglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelalte Nadelholzbestände mit beigemischem Laubholz • Niederwald auf trockenen Standorten • bei Vergrasung und Verkrautung im Winter/Frühjahr höhere Gefährdung 	<ul style="list-style-type: none"> • Nadel- und Laubholz ohne oder nur mit geringer Bodenvegetation • Laubholzunterstand im Sommer • Feuchtestandorte • gute Zugänglichkeit
Bestandesalter	<ul style="list-style-type: none"> • 25-30 Jahre • Altholz 			<ul style="list-style-type: none"> • mittelalte Bestände • dichte Bestände
Baumart	<ul style="list-style-type: none"> • Waldföhre (<i>Pinus silvestris</i>) • Legföhre (<i>Pinus Mugo Turras s. str.</i>) • aufrechte Bergföhre (<i>Pinus montana</i>) • Arve (<i>Pinus Cembra</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fichte (<i>Picea</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Weisstanne (<i>Abies alba</i>) • Lärche (<i>Larix</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Laubbäume

Tab. 1: Waldbrandgefahr in der Schweiz (JECKLIN 1993, WINKLER 1971)

2.2.9 Feuerökologie

Die Feuerökologie befasst sich sowohl mit den positiven, als auch mit den negativen Auswirkungen der Waldbrände auf das Ökosystem. Sie ist für das Waldbrandmanagement wichtig, da das Feuer wesentliche Einflüsse auf die Vegetationsdynamik hat.

Waldbrände sind ein Teil der natürlichen Vegetationsdynamik in einigen Regionen der Erde. Wird die Natur sich selbst überlassen, ergibt sich ein Gleichgewicht, in dem der Wald periodisch teilweise (relativ kleinräumig) abbrennt, während der überwiegende Teil nicht betroffen wird. Brennt also während Jahrhunderten immer wieder ein neues Stück Wald ab, so entsteht ein Mosaik aus Beständen verschiedenen Alters. Da in kürzlich abgebrannten Gebieten kein Brandgut mehr vorhanden ist, wirken diese automatisch als Ausbreitungshindernisse. Das Feuer verlöscht, sobald es auf ein solches Gebiet stösst. So entstehen selten so grosse und verheerende Waldbrände, wie die Yellowstone Fires 1988. Ein so grosses Feuer ist nur unter dafür günstigen Wetterbedingungen, nach langen Trockenperioden und bei genügend Brandgut möglich (DE GOLIA 1989).

Die Feuergeschichte zeigt, dass in verschiedenen Waldtypen Waldbrände mit unterschiedlicher Frequenz vorkommen. Die Intervalle zwischen den Feuern reichen von 50 bis 2000 Jahren (DE GOLIA 1989).

Innerhalb der Sukzession sind Brände sehr wichtig, da sie Nährstoffe freisetzen; die Asche liefert Mineralstoffe und erhöht den pH-Wert des Bodens. Der Boden gewinnt durch ein Feuer jedoch nicht nur Nährstoffe, sondern verliert auch einen gewissen Anteil davon, der in die Luft übergeht oder ausgewaschen wird. Der verbleibende Rest wird durch die Pflanzen aufgenommen und erst später durch die Streu wieder in den Boden eingebracht. Der Nährstoffgehalt des Bodens ist daher kurz nach einer Wiederbewaldung deutlich gesenkt (DELARZE 1992).

Andererseits schaffen Feuer gute Lichtverhältnisse, da Lücken in der Bestockung entstehen. Viele Pflanzen können erst aufkommen, wenn sie genügend Licht haben, was in einem geschlossenen Wald nicht der Fall ist. Nach einem Waldbrand kommt wieder genügend Licht auf den Boden und ermöglicht so das Keimen bestimmter Arten. Die Artenvielfalt kurz nach einem Feuer ist erhöht (WINKLER 1971). Laut einer Studie der Universität Lausanne (DELARZE 1992) kommen nach einem Feuer zwar sehr viel mehr Pflanzenarten auf als in den unbetreffenen Gebieten, die jedoch rasch wieder verschwinden. Nach fünfzehn Jahren ist die Artenvielfalt sogar kleiner als vor dem Brand. Das führt zu einer Dominanz feuerresistenter Arten wie der Kastanie (*Castanea*), die sich nach einem Brand explosionsartig ausbreitet. Deren Streu bildet zudem einen guten Nährboden für spätere Feuer, da sie viele ätherische Öle enthält.

Für das Ausmass der Schädigung ist wichtig, in welcher Jahreszeit ein Brand auftritt. Feuer im Frühling sind für Flora und Fauna günstiger als Herbstfeuer, die am Ende des Entwicklungszyklus stattfinden und dank tieferer Brandgutfeuchtigkeit zu intensiveren Feuer ausarten können.

Da während des letzten Jahrhunderts in den USA und vielen anderen Ländern der Erde alle Feuer systematisch so schnell wie möglich gelöscht wurden, wurde

das oben beschriebene natürliche Gleichgewicht gestört. Die während eines Ereignisses abgebrannten Gebiete wurden immer kleiner und die Brandgutmenge in den übrigen immer grösser, was sehr ausgedehnte Feuer von einer hohen Intensität ermöglichte, die unkontrollierbar wurden (z.B. Yellowstone 1988). Hohe Intensität bedingt, dass bei einem Bodenfeuer nicht nur Pflanzen, sondern bei Temperaturen über 450° C auch die Humusschicht verbrennen (SCHEURER et al. 1991) oder die Bodenstruktur verändert wird. Durch das Verbrennen der organischen Kittsubstanzen geht der Boden aus der günstigen Krümelstruktur in die schlechtere Einzelkornstruktur über. Die obersten Bodenschichten werden durch die Hitze vorübergehend sterilisiert (WINKLER 1971). Als Folge davon werden Böden für Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte unfruchtbar oder erodieren. Waldbrände mit tiefer Intensität dagegen schaffen gute Nährstoff- und Lichtverhältnisse und fördern die Mutationsraten und den Keimungsvorgang bestimmter Arten. Sie reduzieren auch Baumkrankheiten und Insektenbefall.

Neben der Intensität spielen jedoch auch die Art des Feuers und seine Temperatur eine entscheidende Rolle: Während bei einem Kronenfeuer v.a. die grossen Bäume betroffen sind und kaum eine Überlebenschance haben, leidet der Boden mit der ihn bedeckenden Vegetation weniger. Bei einem Bodenfeuer ist es genau umgekehrt: Die ausgewachsenen Bäume tragen wenig Schaden davon, während die niederen Bäume und die Bodenvegetation verbrennen.

Sind die Feuer zu grossflächig, wird die Wiederbesiedlung mit Pflanzen schwierig, da deren Samen weite Distanzen zurücklegen müssen. Gewicht und Aerodynamik der Samen sind daher häufig für die Artenzusammensetzung der wiederbesiedelnden Pflanzen ausschlaggebend. Die durch Tiere bestäubten Pflanzen sind den durch Wind bestäubten Pflanzen gegenüber benachteiligt, da die für Tiere wichtigen Biotope durch das Feuer weiträumig zerstört werden (CHANDLER 1983).

Nicht zu unterschätzen sind die Schäden, die durch die Bekämpfung entstehen. Je intensiver bekämpft werden muss, desto grösser sind die negativen Einflüsse auf das Ökosystem. Schneisenschlag, der sowohl als vorbeugende Massnahme als auch bei der direkten Bekämpfung praktiziert wird, bewirkt häufig grössere Schäden am Ökosystem als das Feuer selbst. Dies trifft besonders für Schneisen zu, die mit Bulldozern und ähnlichen Mitteln hergestellt werden. Neben dem Verlust des Holzes und einer Bodenverdichtung wird das Landschaftsbild stark beeinträchtigt.

Um derartige Schäden zu vermeiden, kann mit Löschwasserzusätzen gearbeitet werden, die aber ihrerseits ein neues Problem schaffen. Der Boden kann im Extremfall vergiftet werden, in jedem Fall aber wird der pH-Wert deutlich über eine mehr oder weniger lange Zeit (je nach Produkt) heraufgesetzt. Der Hauptbestandteil der in der Schweiz angebotenen Löschwasserzusätze ist Ammonium. Dieses wirkt wie ein Düngemittel auf den Waldboden und in den Gewässern. In letzteren kann es in hohen Konzentrationen für Fische tödlich sein. Aus diesen Gründen werden solche Zusätze auf der Alpensüdseite nicht verwendet. Von den BefürworterInnen dieser Bekämpfungsmethode wird der negative Einfluss allerdings als sehr klein und vorübergehend bezeichnet.

Die Bekämpfungsmethoden müssen also von Fall zu Fall sorgfältig ausgewählt werden, indem man ihre verschiedenen Vor- und Nachteile gegeneinander abwägt.

2.2.10 Waldbrandsaison

Die wechselnde Witterung bewirkt eine stark jahreszeitliche Abhängigkeit der Waldbrände. Veränderungen in der Lufttemperatur, in der Einstrahlung, im Niederschlag, in der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit nehmen unmittelbar Einfluss auf das Feuerverhalten. Während bei niedrigen Temperaturen und starkem Niederschlag kaum Feuer entstehen oder sich ausbreiten können, sind Trockenperioden mit hohen Temperaturen und hohen Windgeschwindigkeiten für einen Waldbrand ideal. Die Windrichtung wird von der lokal vorherrschenden Geländeform stark beeinflusst. Je nach der Ausrichtung der Täler bläst der Wind ungehindert oder verliert seine Kraft an dazwischenliegenden Objekten.

Daneben haben die Wetterverhältnisse auch über das Brandgut einen indirekten Einfluss auf das Brandverhalten. Erhöhte Sonneneinstrahlung und Temperaturen bewirken eine Austrocknung des toten Brandguts, verstärkter Niederschlag dagegen eine Erhöhung seiner Feuchtigkeit. Ist die Brandgutfeuchtigkeit hoch, brennt ein Feuer nur sehr schlecht, ist sie dagegen tief, brennt es gut.

Neben den natürlichen Einflüssen spielen auch anthropogene eine Rolle. So befinden sich bei schönem Wetter mehr Leute im Freien und erhöhen dadurch das Risiko eines Brandausbruchs.

Durch diese Einflüsse entsteht eine starke Abhängigkeit des Auftretens der Waldbrände von der Jahreszeit. Es ist daher sinnvoll, eine Einteilung der Waldbrände aufgrund ihres zeitlichen Auftretens vorzunehmen und zwar so, dass die Zeitabschnitte mit einer ähnlichen Charakteristik im Waldbrandauftreten zusammengefasst werden. So wird eine variable Anzahl sogenannter Waldbrandsaisons (*fire seasons*) gebildet. Unter Waldbrandsaisons werden hier Zeitabschnitte eines Jahres mit ähnlichem Verhaltensmuster im Waldbrandauftreten verstanden. Nach der Definition von LANLEY (1986) werden diejenigen Zeiten als Waldbrandsaisons bezeichnet, in welchen das Auftreten und das Verhalten von Feuern, sowie die dadurch entstandenen Schäden, eine Überwachung der Waldbrände erfordern.

2.3 Computersysteme

Um das Waldbrandmanagement effizient gestalten zu können, sollen die Entscheidungsträger von Computern unterstützt werden. Die folgenden Systeme, die in den folgenden Kapiteln erläutert werden, bieten sich dazu an: Geographisches Informationssystem (GIS), Expertensystem und Entscheidungsunterstützendes System.

2.3.1 Geographische Informationssysteme (GIS)

Geographische Informationssysteme (GIS) sind nach BILL (1991) rechnergestützte Systeme, die aus Hardware, Software, Daten und Anwendungen bestehen. Sie dienen dazu, raumbezogene Daten zu speichern und zu analysieren, sowie alphanumerisch und graphisch zu repräsentieren. GIS bestehen aus zwei Hauptkomponenten, nämlich einer topologischen Datenbank für räumliche Daten (Geometrie der Objekte und ihre Beziehungen zu Nachbarobjekten) und einer Attribut-Datenbank (beschreibende Informationen).

Es bestehen in einem GIS zwei Möglichkeiten, die Geometriedaten zu repräsentieren: Vektor- oder Rasterformat. Vektordaten enthalten Informationen über durch Linien begrenzte, Rasterdaten über flächenhafte Elemente. Die Datengrundstruktur im ersten Fall sind Linien und Knoten, im zweiten Pixel. Der Vorteil der Vektordaten liegt in den kleinen Datenmengen, der Nachteil in den hohen Erfassungszeiten. Rasterdaten dagegen weisen typischerweise grosse Datenmengen auf, haben dafür aber kurze Erfassungszeiten (BILL 1991).

Die Geometriedaten werden durch eine Reihe von Attributdaten ergänzt, die in der Datenbank abgespeichert sind. Diese enthält z.B. für ein Polygon Informationen über die Länge seines Perimeters, die Grösse seiner Fläche und eine interne Nummer zur Identifikation. Um das geometrische Element genauer zu beschreiben, können der Datenbank weitere Attribute hinzugefügt werden.

ARC/INFO

Für die vorliegende Arbeit wird die GIS-Software ARC/INFO der Firma ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.) verwendet. Der Geometrieteil wird als ARC bezeichnet, der Datenbankteil heisst INFO.

ARC/INFO besteht aus verschiedenen Modulen. Die folgenden werden für diese Arbeit verwendet:

- ARC
topologische Datenbank
- INFO
relationale Datenbank
- AML (ARC Macro Language)
Interne Makro-Programmiersprache
- ARCEDIT
Erfassen und Editieren der Vektordaten
- GRID
Rastermodul
- ARCPLOT
Darstellen der Resultate

2.3.2 ORACLE-Datenbank

Eine Datenbank ist eine organisierte Sammlung von Informationen (SACHS 1986). Die ORACLE-Datenbank ist ein relationales Datenbankmanagement-System. Sie wird gebraucht, um Informationen zu organisieren, abzuspeichern, zu berechnen und zusammenzufügen. Die Abfragesprache ist SQL*Plus (Structural Query Language).

Eine relationale Datenbank setzt sich aus Tabellen zusammen. Jede Kolonne enthält Informationen über eine Kategorie. Es können sowohl Bezüge innerhalb einer Tabelle, als auch zwischen den Tabellen, hergestellt werden.

forest		
inumfo	vento	comcfo
1992010401	2	5342
1984042201	1	5652
1976033103	3	5293
1987071101		5831
1980112402	1	5612
1991122501	2	5332
1975071101	4	5489

Fig. 5: Tabelle der ORACLE-Datenbank

Die Werte können in verschiedenen Typen abgespeichert werden:

- char
Buchstaben, Nummern und weitere Zeichen bis zu 240 Zeichen
- number
Nummern und Dezimalpunkt. Berechnungen können durchgeführt werden.
- date
Datum und Tageszeit. Berechnungen können durchgeführt werden.
- long
Ähnlich wie char, kann aber bis zu 65535 Zeichen enthalten, dafür nicht für alle Berechnungen verwendet werden.

Die Tabellen der Datenbank werden untereinander durch Kolonnen (*columns*) verknüpft, die denselben Informationstyp enthalten.

forest		
inumfo	vento	comcfo
1992010401	2	5342
1984042201	1	5652
1976033103	3	5293
1987071101		5831
1980112402	1	5612
1991122501	2	5332
1975071101	4	5489

comune	
codice	stamet
5342	1
5831	2
5612	3
5489	2

Fig. 6: Verknüpfung von Tabellen

2.3.3 Entscheidungsunterstützendes System (*Decision Support System*)

Das Entscheidungsunterstützende System ist ein interaktives, computerbasiertes System, welches den AnwenderInnen hilft, Daten und Modelle zur Lösung von nicht- oder nur teilweise strukturierten Problemen zu gebrauchen. Es unterstützt also die Entscheidungsfindung. Dabei ist man sehr flexibel, da mit Hilfe der vom System angebotenen Daten, Algorithmen und Modellen ein eigener Lösungsweg gefunden werden kann.

Das Entscheidungsunterstützende System wird dort gebraucht, wo:

- Applikationen sehr datenintensiv sind
- die beeinflussenden Faktoren aus verschiedenen Fachrichtungen stammen
- eine bestehende Situation sich schnell ändert und
- viel Allgemeinwissen im Spiel ist.

Dabei steht nicht die Effizienz des Systems im Vordergrund, sondern die Qualität der Lösung und die BenutzerInnenfreundlichkeit, da es auch von computerun- gewohnten Leuten gebraucht wird.

Architektur

Die zentralen Komponenten des Entscheidungsunterstützenden Systems sind Modelbase (*modelbase* oder *model subsystem*), Datenbank (*database* oder *data subsystem*) und BenutzerInnenschnittstelle (*dialog subsystem*).

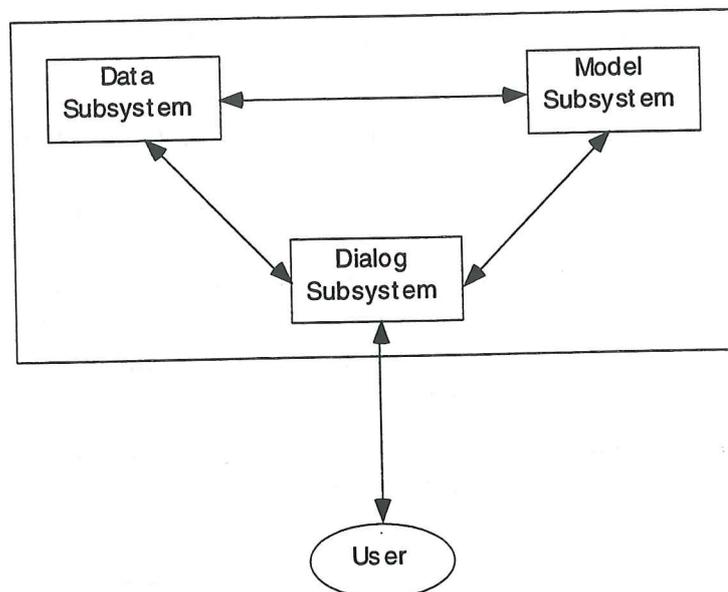


Fig. 7: Architektur eines Entscheidungsunterstützenden Systems (FORD 1985)

Mit der Modelbase werden vor allem zeitlich dynamische Prozesse modelliert. Dazu werden genau definierte, also mathematische Modelle und Algorithmen, verwendet. Diese können sowohl für sich alleine stehen oder auch mit anderen verknüpft werden. Ferner sollte die Möglichkeit bestehen, externe Modelle beizuziehen und neue - quantitative und qualitative - zu kreieren.

Die Funktionen der Datenbank sind:

- Datenextraktion
- Verwaltung vieler verschiedener Datentypen (wie z.B. Zeitserien, gemessene und experimentell ermittelte Daten), sowie deren logische Verknüpfungen
- Kombination verschiedener Datenquellen

Ebenfalls in jedem Entscheidungsunterstützenden System enthalten ist eine BenutzerInnenoberfläche (*user interface*). Zusätzlich können - je nach AutorIn - eine Wissensbasis (*knowledge base*) oder gar ein Expertensystem darin integriert werden (Kap. 2.3.4). Das Expertensystem übernimmt in diesem Fall die Lösung

eines genau definierten Teilproblems; die Lösung des Hauptproblems wird aber nach wie vor dem Menschen überlassen.

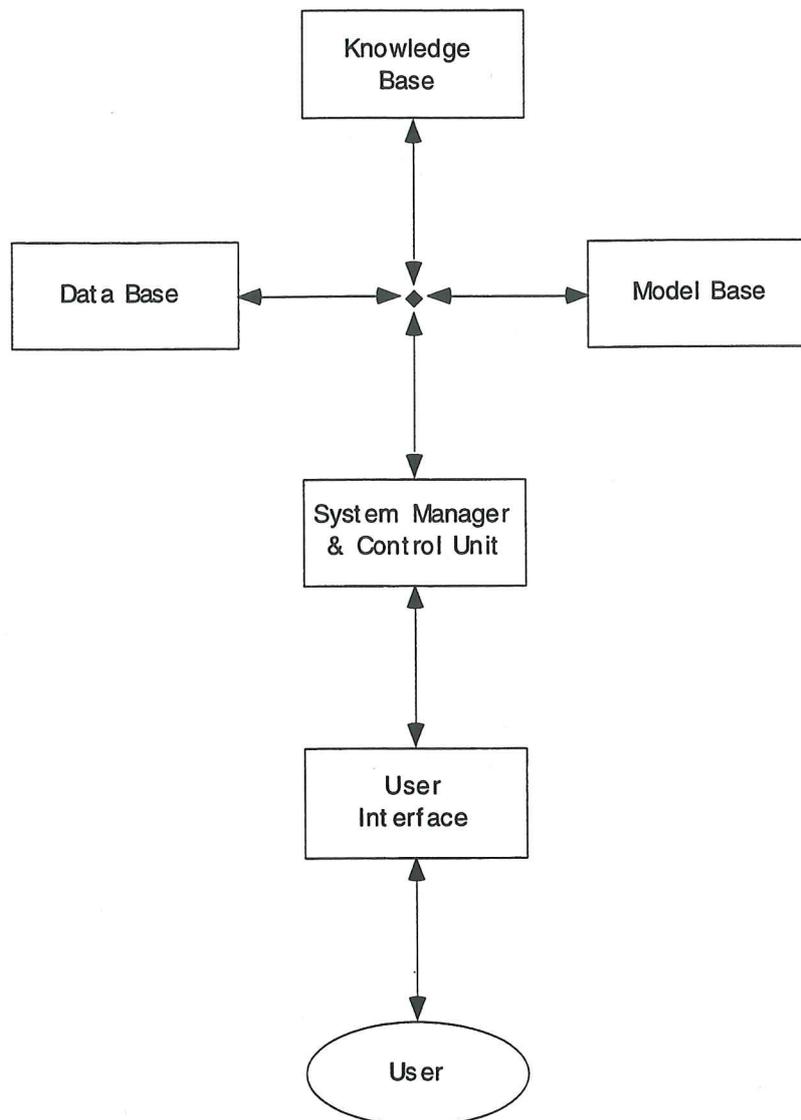


Fig. 8: Erweiterte Architektur eines Entscheidungsunterstützenden Systems (GUARISO 1989)

2.3.4 Expertensystem (*Expert System*)

Das Expertensystem ist ein problemlösendes Computerprogramm, welches für die Bewältigung eines eng definierten Problems sehr effizient ist. Sein Ziel ist es, ExpertenInnen zu klonen, d.h. ihr Wissen und die Art der Problemlösung möglichst gut zu imitieren. Es wird also versucht, den menschlichen Denkprozess zu simulieren. Expertensysteme fallen deshalb in den Bereich der künstlichen Intelligenz (*Artificial Intelligence*).

Das Expertensystem kommt zum Einsatz, wenn zu einem Problem nur ungenaue Daten oder qualitative, bzw. heuristische, Modelle bestehen. Zur Lösung dieser Art von Problemen werden von ExpertInnen häufig nur Faustregeln und Intuition gebraucht. Eine Modellierung mit Algorithmen ist also nicht möglich.

Soll ein Expertensystem erstellt werden, muss mindestens ein/e anerkannte/r Experte/in auf diesem Fachgebiet existieren. Das Fachwissen wird in sogenannten Fakten (*facts*) codiert, die dann mit Regeln (*rules*) untereinander verbunden werden. Die Regeln bilden so die logischen Verknüpfungen zwischen den Fakten. Dieses Vorgehen wird Wissensakquisition (*knowledge acquisition*) genannt.

Neben diesem ExpertInnenwissen benötigt das System zur Problemlösung aber auch aktuelle Informationen, die sich von Anwendung zu Anwendung ändern. Diese Informationen werden beim Lösungsprozess zum richtigen Zeitpunkt von den BenutzerInnen abgefragt.

Da das Expertensystem am Schluss selbst eine fertige Lösung präsentiert, muss es den Lösungsweg erklären können, da sonst eine Überprüfung der Qualität der Lösung nicht möglich ist.

Architektur

Das Expertensystem besteht aus Wissensbasis (*knowledge base*), einer problemlösenden Komponente (*inference engine*), Datenbank (*data base*) und BenutzerInnenoberfläche (*user interface*). Es kann zusätzlich ein Geographisches Informationssystem (GIS) integriert werden. Charakteristisch für das Expertensystem sind Wissensbasis und Problemlösende Komponente.

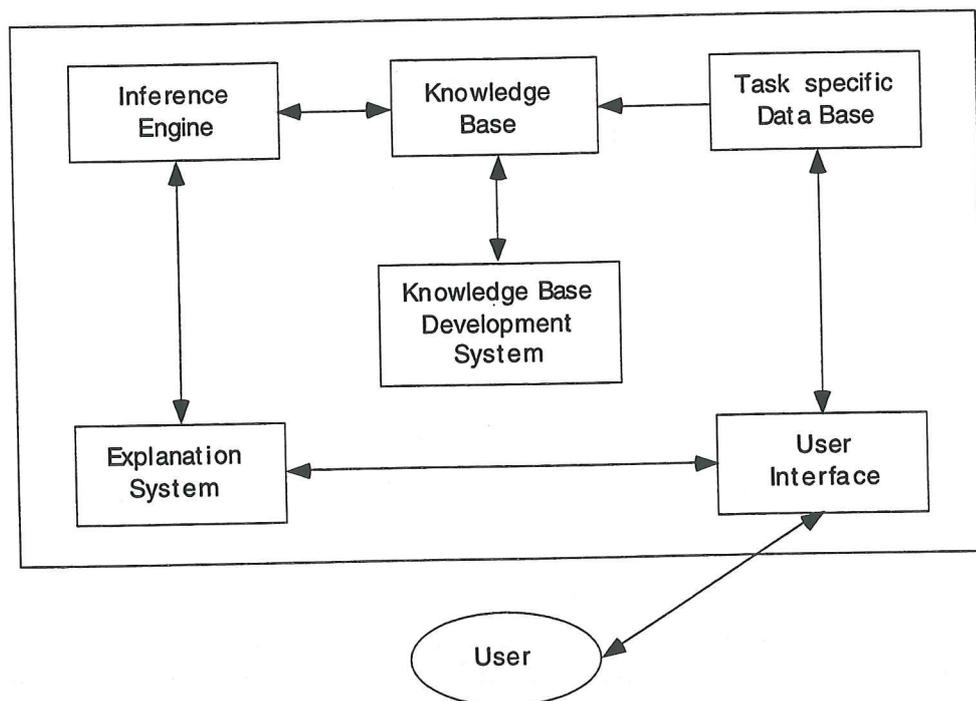


Fig. 9: Erweiterte Architektur des Expertensystems (FORD 1985)

In der Wissensbasis wird das vorhandene Wissen - wie vorher erwähnt - in Facts und Regeln abgespeichert. Nach wie vor die verbreitetste Art dazu sind wenn-dann-Regeln. Sie haben den Vorteil, dass sie einfach zu programmieren, jedoch sehr rechenintensiv sind.

Die Wissensbasis setzt sich beispielsweise aus folgenden Komponenten zusammen: Strategien (*planning policies*), Lösungsansatz der ExpertInnen (*expert approach*) und den Daten, die von den BenutzerInnen zusätzlich eingegeben werden (*user input*).

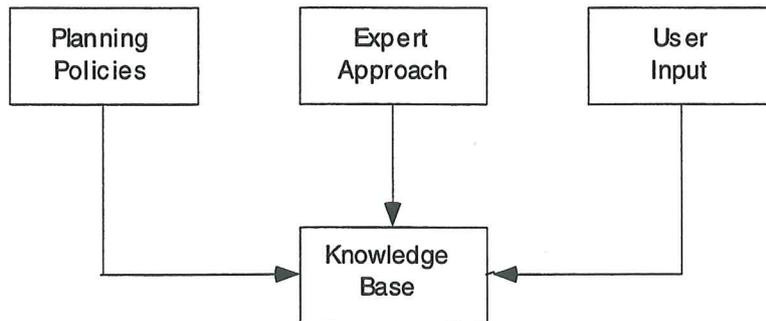


Fig. 10: Komponenten einer Wissensbasis (LU 1992)

Die problemlösende Komponente führt das logische Denken durch. Dazu ruft sie Daten von der Datenbank und der Wissensbasis ab. In der Wissensbasis sucht sie dafür die entsprechenden Fakten und Regeln, hängt sie logisch zusammen und bildet daraus, wenn möglich, neue Regeln. Diese werden dann anschliessend wieder in der Wissensbasis abgelegt.

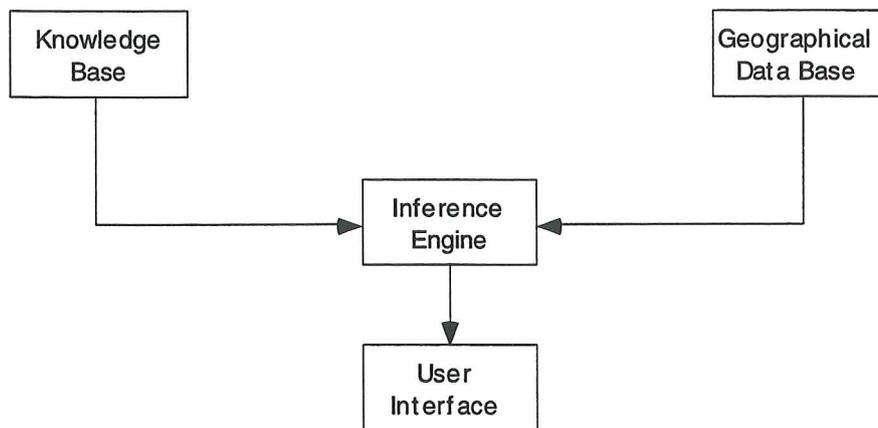


Fig. 11: Architektur eines GIS-basierten Expertensystems (LU 1992)

Die Abfrage der wenn-dann-Regeln erfolgt entweder durch Rückwärts- (*backward chaining*) oder Vorwärtsverkettungen (*forward chaining*). Das Rückwärtsverkettungen geht vom gewünschten Ziel aus und sucht so lange alle Regeln ab, bis es eine gefunden hat, für die alle wenn-Regeln wahr sind, oder aber alle Regeln untersucht sind und keine Antwort existiert.

Beim Vorwärtsverkettungen ist es genau umgekehrt: Die Suche beginnt bei den Daten und geht so lange, bis alle wenn-Regeln in einer Regel wahr sind und das Zielwort erreicht ist. Da hier die Gefahr besteht, dass die Suche ausufert, wird das Vorwärtsverkettungen häufig mit Rückwärtsverkettungen kombiniert, welches die Anzahl Zielwörter limitiert.

Bsp. 1:

Ziel = Strategie-1

Regel-7

wenn Schutzstatus = geschützt
Exposition = Südhang
Trockenperiode = 2 Wochen
dann Strategie-1 = löschen

Wichtig ist beim Expertensystem, dass Wissensbasis und Problemlösende Komponente physisch voneinander getrennt sind. Das bedeutet, dass es sehr einfach ist, neue Daten in die Wissensbasis einzubringen, da an ihren bestehenden Strukturen nichts geändert werden muss.

Tabelle 2 vergleicht Expertensystem und Entscheidungsunterstützendes System miteinander.

	Entscheidungsunterstützendes System	Expertensystem
Definition	<ul style="list-style-type: none"> - interaktives, computerbasiertes System, welches den BenutzerInnen hilft, Daten und Modelle zur Lösung von nicht oder semistrukturierten Problemen zu gebrauchen - enthält immer eine Modellbasis 	<ul style="list-style-type: none"> - problemlösendes Computerprogramm, welches in der Bewältigung eines eng definierten Problems sehr effizient ist und bestimmtes Wissen erfordert - gehört zur Künstlichen Intelligenz - Daten und Lösungsprozess sind physisch von einander getrennt - klonen der ExpertInnen
Art der Problemstellung	<ul style="list-style-type: none"> - un- oder nur semistrukturierte Probleme - Datenintensive Applikationen - mehr als ein Ziel soll zur gleichen Zeit erreicht werden - schnell ändernde Situationen - beeinflussende Faktoren stammen aus verschiedenen Fachrichtungen - braucht Allgemeinwissen 	<ul style="list-style-type: none"> - klar definiertes Problem - eng eingeschränktes Fachgebiet - komplexer Lösungsweg - Daten und Modelle sind heuristisch und/oder qualitativ - zur Problemlösung bestehen nur Faustregeln und Intuition, jedoch keine Algorithmen - einfache Beschreibung der Zusammenhänge, z.B. durch wenn-dann-Regeln
Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> - unterstützt die BenutzerInnen bei der Entscheidungsfindung in un- oder semistrukturierten Problemen - BenutzerInnen treffen Entscheidung anhand einfach zugänglicher Daten und Modelle - Qualität der Lösung ist wichtiger als die Effizienz des Systems - einfache, flexible Handhabung - Darstellung der Wirklichkeit durch Modelle und Algorithmen 	<ul style="list-style-type: none"> - ahmt ExpertIn nach - gibt Lösungsvorschlag anhand von ExpertInnenwissen - kommt auf gleiche Lösung wie ExpertInnen erklärt Lösungsweg - fragt BenutzerIn nach relevanten Informationen zurück
BenutzerInnen	Computerungewohnte Leute, die häufig an der Entwicklung beteiligt sind	Treffen selber keine Entscheidungen, sind wenig flexibel
Programmiersprachen	Traditionelle Programmiersprachen wie: <ul style="list-style-type: none"> - Pascal - C++ - Fortran 	Objektorientierte Programmiersprachen wie: <ul style="list-style-type: none"> - LISP - PROLOG
Architektur	Das Entscheidungsunterstützende System besteht mindestens aus einer Modellbasis, einer Datenbank und einer BenutzerInnenoberfläche. Es können zusätzlich Wissensbasis, Expertensystem und GIS integriert werden.	Das Expertensystem besteht aus Wissensbasis, Datenbank, Problemlösender Komponente und BenutzerInnenoberfläche. Die Wissensbasis und die problemlösende Komponente sind physisch voneinander getrennt, was ein einfaches Updaten der Wissensbasis möglich macht.
	Modellbasis <ul style="list-style-type: none"> - verwaltet die systemeigenen Modelle - Modelle sind zeitabhängig - Modelle können entweder für sich alleine stehen oder mit anderen verknüpft sein - es sollte die Möglichkeit bestehen, neue Modelle zu kreieren - Externe Modelle sollten integriert werden können 	Wissensbasis <ul style="list-style-type: none"> - Enthält codiertes ExpertInnenwissen - Vorhandenes Wissen, wird in Fakten und Regeln abgespeichert - Sollte lernfähig sein und automatisch ausgedehnt werden
	Datenbank <ul style="list-style-type: none"> - verwaltet sehr viele verschiedene Daten und Datentypen wie Zeitserien, gemessene und experimentell ermittelte Daten sowie deren logische Beziehungen - kombiniert verschiedene Datenquellen - extrahiert Daten 	Problemlösende Komponente <ul style="list-style-type: none"> - sucht die Wissensbasis nach passenden Fakten und Regeln ab, um sie zusammenzuhängen und daraus neue Regeln zu bilden - Abfrage der wenn-dann-Regeln durch Rückwärts- oder Vorwärtsverkettungen - führt räumliche Analysen und logisches Denken durch Vergleich und Benutzen der Wissensbasis und der Datenbank durch - ahmt die Art des Denkens der ExpertInnen nach - erklärt den Lösungsweg

Tab. 2 : Expertensystem und Entscheidungsunterstützendes System im Vergleich

2.3.5 Vergleich von Expertensystem und Entscheidungsunterstützendem System und ihre Anwendung im Waldbrandmanagement

Entwicklung

Alle in der Literatur erwähnten mehr oder weniger vollständigen Systeme, seien es Expertensystem oder Entscheidungsunterstützendes System, brauchen zur Umsetzung der Theorie in die Praxis unter Mitarbeit von mehreren Personen ungefähr ein Jahr (KOURTZ 1990). Dabei werden Kenntnisse der Theorie - Waldbrandthematik, Interviewtechniken für die Wissensakquisition und technische Kenntnisse von Expertensystemen, bzw. Entscheidungsunterstützenden Systemen - vorausgesetzt.

Tendenziell braucht ein funktionsfähiges Expertensystem zur Entwicklung mehr Zeit als ein Entscheidungsunterstützendes System, da dazu mehr Informationen vorhanden sein müssen. Zur Realisation braucht es Kenntnisse der benötigten Software, ihrer Programmiersprache, sowie der Interviewtechniken zur ExpertInnenbefragung. In einem Entscheidungsunterstützenden System dagegen kann mit einem in sich geschlossenen Teil begonnen werden, während der Rest der Entscheidungen immer noch vom Menschen getroffen wird. Später können weitere Teile einfach hinzugefügt werden, ohne dass die ganze Systemarchitektur wieder geändert werden muss. Die Modellierungen können mit der vertrauten Software und Programmiersprache vorgenommen werden.

Realisation

Es muss beachtet werden, dass es bis heute nur in einigen wenigen Fällen gelungen ist, Expertensysteme zu entwickeln, welche tatsächlich zuverlässige Lösungen liefern. Die Qualität der Resultate reicht in den wenigsten Fällen an die eines/r menschlichen Experten/in heran, da zu wenig über den Ablauf des menschlichen Denkens bekannt ist, um es mit Computern simulieren zu können.

Zeit

Bei Expertensystemen ist in der Regel nicht wichtig, wieviel Zeit zur Resultatfindung gebraucht wird. Normalerweise werden dazu eher Stunden als Sekunden benötigt. Soll bei einem Waldbrand entschieden werden, wie und mit welchen Ressourcen er bekämpft werden soll, ist ein System nötig, das sehr schnell eine Antwort erzeugt. Dies ist jedoch zur Zeit nicht möglich, allein für den bereits bestehenden Teil, das Feuerausbreitungsmodell SPARKS (SCHÖNING 1996) (Kap. 3.4), brauchen jetzt Dateneingabe und Berechnungen schon 5 - 10 min. Darin aber noch nicht enthaltene Informationen, wie Brandgut und Wind, müssten zusätzlich eingegeben werden, was nochmals Zeit braucht. Die Feuerausbreitung wäre aber nicht der einzige Teil des Expertensystems. Alle anderen Teile benötigten ebenfalls noch Rechenzeit, auch wenn dort die Daten nicht interaktiv eingegeben werden müssen, sondern von der Datenbank eingelesen werden könnten. Es ist also anzunehmen, dass vom Beginn der Berechnung bis zur Ausgabe der Lösung eine Zeitspanne zwischen einer halben und einer ganzen Stunde gebraucht würde. Bedenkt man nun, wie weit sich ein Feuer in dieser Zeit ausbreitet, ist dieses Verfahren viel zu langsam; die Resultate sind dann, wenn sie verfügbar wären, nicht mehr brauchbar. Der Einsatz eines Expertensystems ist also höchstens in der Planung und zum Training der Bekämpfung von Feuern (*presuppression activities*) sinnvoll.

Kosten

Ein weiterer Punkt, der gegen eine Lösung mit einem Expertensystem spricht, sind die Kosten. Um ein operationelles System zu entwickeln, braucht es eine spezielle Software. Je höher entwickelt diese ist und damit einfacher anwendbar für Laien wird, desto teurer wird sie. Speziell die anwenderInnenfreundlichen Expertensystem-Shells können extrem teuer sein.

Um ein Expertensystem zu entwickeln, braucht es Kenntnisse des speziellen Softwaretyps und der zugehörigen Programmiersprache. Die Einarbeitungszeit ist hoch. Durch die so zu den Grundkosten hinzukommenden Lohnkosten wird das Expertensystem zu einer sehr teuren Lösung.

ExpertInnen

Da das Waldbrandproblem nur einen kleinen Teil der Schweiz betrifft, gibt es hier auch nur wenige ExpertInnen. Es ist daher fraglich, ob aufgrund ihrer Aussagen überhaupt ein relevantes Expertensystem erzeugt werden kann. Eine Möglichkeit wäre, ExpertInnen aus anderen Ländern beizuziehen. Dabei besteht die Schwierigkeit, dass ihre Erfahrung auf anderen klimatischen, vegetationskundlichen, topographischen und politischen Verhältnissen beruhen. Ihr Wissen kann also nur bedingt auf die Verhältnisse in der Schweiz übertragen werden.

Benutzung

Es ist fraglich, ob ein Expertensystem, oder auch ein Entscheidungsunterstützendes System, ausser für die Schulung der Feuerwehrleute, überhaupt benutzt würde. Neben der kritischen Grundhaltung gegenüber Computern haben alle, die in irgend einem Zusammenhang mit Waldbrand zu tun haben, ihre eigene Art, an die bestehenden Probleme heranzugehen. So hat z.B. jeder Feuerwehrkommandant eine andere Vorstellung davon, wie ein Feuer am besten bekämpft werden soll. Der eine setzt sehr schnell Helikopter ein, der andere bekämpft lieber mit höherem personellen Aufwand, aber geringeren Kosten, das Feuer vom Boden aus, der dritte setzt im gleichen Fall vielleicht ein Gegenfeuer ein. Wahrscheinlich ist es auch einer der interessantesten Aspekte der Arbeit eines Feuerwehrkommandanten, die am besten geeignete Lösung zu suchen. Es ist daher anzunehmen, dass die wenigsten erfreut wären, wenn ein Computer ihnen ausgerechnet diesen Teil der Arbeit abnehmen würde.

Aufgrund der oben dargelegten Überlegungen wird das Schwergewicht vermehrt auf das Entscheidungsunterstützende System gelegt. Es bleibt jedoch die Möglichkeit, innerhalb eines Entscheidungsunterstützenden Systems auch ein Expertensystem für die Lösung eines genau definierten Problemkreises einzusetzen (z.B. für die Bekämpfung).

Die Hauptvorteile des Entscheidungsunterstützenden Systems gegenüber dem Expertensystem liegen in der grösseren Akzeptanz bei den AnwenderInnen dank der ihnen selbst überlassenen Entscheidungen, im einfacheren Aufbau und der Flexibilität der Architektur und in den geringeren Kosten.

Es findet eine Aufteilung der Probleme statt, in solche, die vom Computer sehr viel effizienter gelöst werden (z.B. Berechnungen von Algorithmen) und solche, die der Mensch besser lösen kann (z.B. Abschätzen, welches Brandgutmodell auf das Gebiet am ehesten zutrifft). Der Mensch bestimmt dabei die Vorgehensweise und benutzt den Computer nur dort, wo er ohne seine Hilfe nicht mehr weiter

kommt. So bleibt klar, wie eine Lösung gefunden wurde. Das Vertrauen in dieses Vorgehen ist daher sehr viel grösser als beim Expertensystem. Durch seinen modularen Aufbau ist es relativ einfach, neue Teile hinzuzufügen und bestehende abzuändern, bzw. zu ersetzen. Da vom Menschen ein Grossteil der Entscheidungen getroffen wird, kann mit einigen wenigen Modellen begonnen und später mit anderen ergänzt werden.

2.4 GIS und Waldbrandmanagement

Waldbrände sind ein ausgeprägt räumliches Phänomen. GIS ist eine geeignete Technologie, um räumliche Daten, wie sie im Waldbrandmanagement gebraucht werden, zu speichern, zu analysieren und darzustellen. Komplexe Karteninformationen und Attribute, z.B. Vegetationstypen, Brandgutmodelle, Wetter, Topographie, Landnutzungscharakteristiken und Feuerbekämpfungs-umgebung können in das GIS integriert und zur Vorhersage des Brandverhaltens benützt werden, sowie um Feuerbekämpfungsressourcen zu allozieren (HAMILTON 1989).

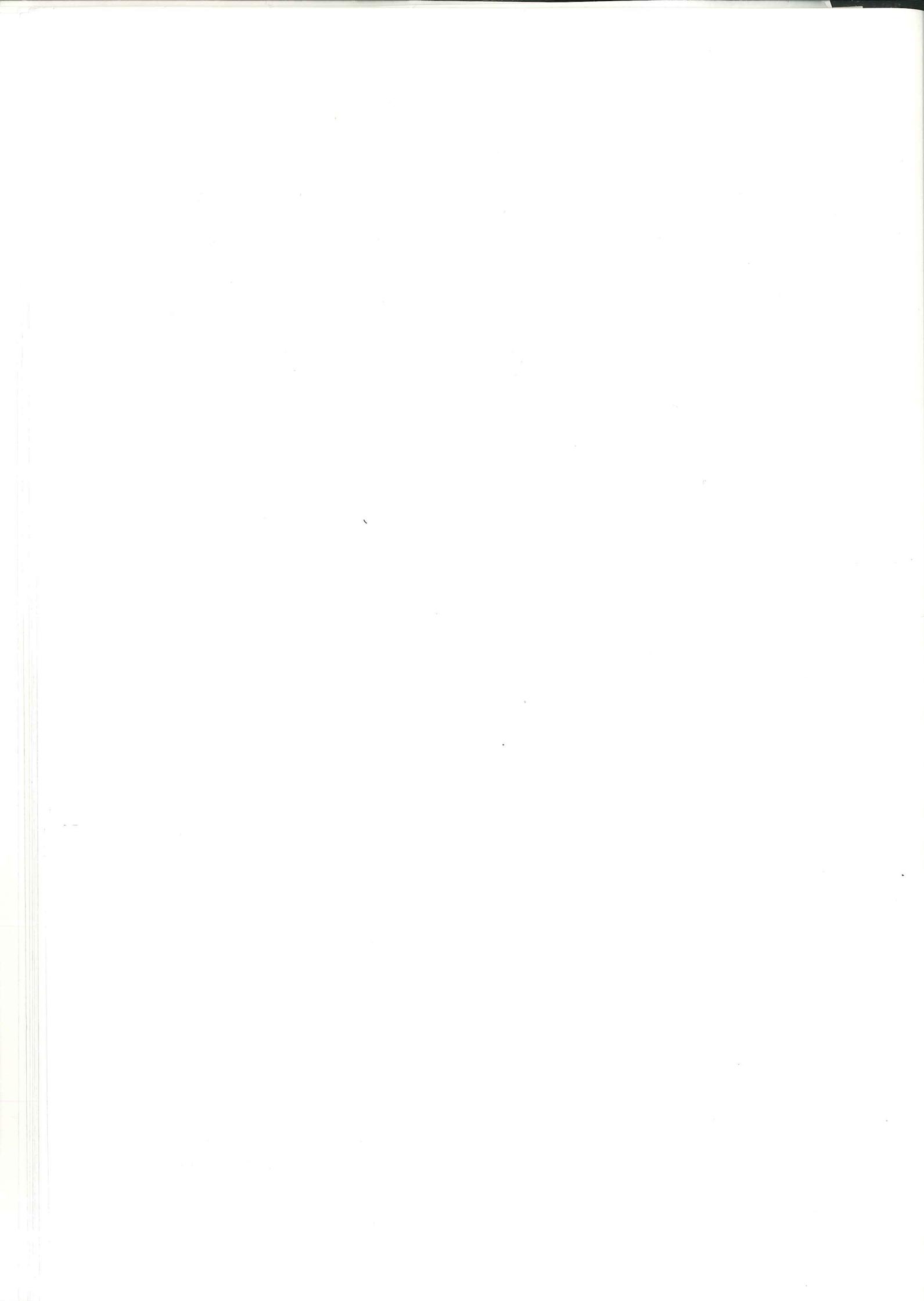
Auch das Management selbst ist vom Raum abhängig. Bis heute werden die meisten Pläne mit Hilfe von Karten erstellt. CHANDLER (1983) beschreibt die für die Planung im Waldbrandmanagement nötigen Daten:

- Karten
 - Feuerauftreten der letzten fünf Jahre mit Angaben zu Monat, Tageszeit, Ursache und Grösse
 - Feuergeschichte mit verbrannter Fläche, Jahr des Feuers und Intensität
 - Brandguttypen mit spezieller Kennzeichnung von Kahlschlaggebieten und Aufforstungen
 - Landeigentümer
 - Wasserläufe und Gebiete mit Erosionsgefahr
 - Strassenkarte mit Strassenbreite und -oberfläche, sowie Reisezeiten
 - Sichtbarkeitskarte von ausgewählten Punkten aus
- Umweltdaten
 - Brandgut: Historische Ausbreitungsraten der Feuer und Bekämpfbarkeit der Typen
 - Wetterdaten von allen erfassten Tagen an allen Stationen
 - Klimadaten: Langzeitmittelwerte
- Logistische Daten
 - Waldbrandmanagement-Personal mit Alter, Qualifikation und benötigter Ausbildung
 - externes Personal für Waldbrandmanagement
 - Ausrüstung: Menge, Art, letztes Kontrolldatum
 - Menge, Ort und Anschaffungsdatum der Vorräte
 - Mietverträge für zusätzliches Material
 - Quellen der Notfallvorräte
- Ökonomische Daten
 - Kosten und Produktivität des Personals und der Ausrüstung nach Hangneigungsklasse, Brandguttyp und Wetter.

Fast alle diese Daten sind räumlicher Ausprägung und müssen für das Management einander überlagert werden. Dies ist mit Karten und Tabellen, wie sie heute üblich sind, sehr mühsam. Die Daten müssen aus den verschiedenen Quellen zuerst zusammengesucht und anschliessend einander überlagert werden.

Viel einfacher ist dies jedoch, wenn alle benötigten Daten an einem einzigen Ort abgespeichert sind. Wegen der räumlichen Komponente und der integrierten Datenbank bietet sich dafür ein GIS an.

Das GIS lässt sich zudem in Expertensystemen und Entscheidungsunterstützenden Systemen gut einbinden. Es bestehen dazu viele unterschiedliche Ansätze in der Literatur (VEGA-GARCIA 1993, EFTRICHIDIS 1994, LEE 1989, CHOU 1991, CHOU 1992).



3 Untersuchungsgebiet, Datengrundlagen und Modelle

3.1 Waldbrände im Tessin

Waldbrände sind auf der Alpensüdseite ein Teil der Sukzession. Zwischen 1973 und 1992 ereigneten sich 51% der Waldbrände in der Schweiz (bzw. 87% der von Waldbrand betroffenen Fläche) auf der Alpensüdseite. Für das Tessin sind es für die gleiche Zeit 47% der Ereignisse (bzw. 83% der Fläche) (CONEDERA 1993). Dies sind ca. 90 Waldbrände pro Jahr, wobei davon die meisten flächenmässig nur sehr klein sind. Die durchschnittlich verbrannte Fläche ist 148 ha, die total verbrannte Fläche ca. 59 km² (Periode 1895 - 1994). Die Waldbrandsaison liegt schwerpunktmässig zwischen März und April, dann v.a. in Kastanienwäldern. Fichten- und Buchenwälder brennen tendenziell vermehrt im Sommer, machen aber nur einen kleinen Teil der Gesamtzahl der Tessiner Waldbrände aus.

Die ausgedehnten Kastanienwälder des Kantons Tessin sind speziell feueranfällig. Sie begünstigen Feuer durch ihr Laub, welches sich beim Abfallen so zusammenrollt, dass es locker übereinander liegt und so eine gute Sauerstoffzufuhr ermöglicht. Nicht nur das Laub, sondern auch die Fruchtbecher der Kastanien und ihre Wurzelstöcke im Niederwald brennen gut. Die am stärksten betroffenen Gebiete sind südexponierte Hänge der kollinen Stufe (unterhalb von 1000 m). Sie sind speziell trocken, und es liegt hier selten Schnee. Die hier herumliegende trockene Streu (Gras vom Vorjahr) begünstigt Waldbrände (CONEDERA 1993).

Die weitaus häufigste Waldbrandursache ist Brandstiftung. Vergleichsweise selten sind Feuer, die aus Versehen entfacht werden und solche mit natürlicher Ursache wie Blitzschlag. Laut RYSER (1994) sind nur zwei Prozent der Waldbrände natürlichen Ursprungs, und von den restlichen 98% sind weitere zwei bis drei Prozent auf ein Versehen zurückzuführen. Beim Rest handelt es sich um Brandstiftung. Die Erfahrung zeige, dass die BrandstifterInnen meistens in der Stadt wohnhaft seien. Es erstaunt deshalb wenig, dass daher die meisten Waldbrände in dichter besiedelten Gebieten stattfinden.

Seit die kantonale Umweltschutzverordnung in Kraft ist - sie verbietet aufgrund der Luftreinhaltebestimmungen das Verbrennen von Gartenabfällen im Freien - ist die Zahl der Waldbrände durch Unvorsichtigkeit stark zurückgegangen. Zudem ist die Bevölkerung stark auf das Problem Waldbrand sensibilisiert und meldet ein Auftreten sehr schnell, sodass in der Regel keine grösseren Feuer entstehen.

3.1.1 Waldwirtschaft

Viele der Wälder sind durch die über Jahrhunderte hinweg erfolgten menschlichen Eingriffe überaltert und weisen Bestände gleichen Alters auf. Zudem ging der für Naturwälder typische stufige Aufbau, welcher für Reichtum und Widerstandskraft des Ökosystems wichtig ist, verloren. Die besonders grosse ursprüngliche Vielfalt der Tessiner Wälder entstand dank der geographischen Lage. Dort, wo sich die Südabdachung des Alpenbogens verengt, besteht eine Überschneidungszone verschiedener tier- und pflanzengeographischer Einheiten. Durch die verschiedenartige Geologie entstand auch eine grosse Vielfalt an Böden. Zudem bewirken die extremen Höhenunterschiede (200 - 3000

m.ü.M.) die Ausbildung von höhenabhängigen Vegetationsgürteln, die sich an verschiedenen Orten überschneiden.

Der Naturzustand der Tessiner Wälder sähe wie folgt aus (COTTI 1989):

- 700 - 900 m.ü.M. (1/4 der Gesamtwaldfläche):
karbonatarme oder -freie Böden: Eichenmischwälder
karbonatreiche Böden: Steinbuche, Flaumeiche (*Quercus pupescens*) und Blumenesche (*Fraxinus Ornus* L.) (alle sonnenliebend)
- 800 - 900 m.ü.M. und 1500 - 1700 m.ü.M. (1/4 der Gesamtwaldfläche):
zuunterst Rotbuche (*fagus silvatica*), etwas höher Weisstanne (*Abies alba*) (schattige und feuchte Hänge), bei subkontinentalem Klima (Leventina und Bleniotal) Rottanne (*Picea*)
Im unteren Bereich der Nadelbaumzone dominiert die Rottanne, vereinzelt mit Weisstanne gemischt. Weiter oben findet man die Lärche (*Larix*), an Nordhängen mit Kontinentalklima auch die Arve (*Pinus Cembra*).

Heute weicht der Waldbestand jedoch - infolge menschlicher Eingriffe - häufig von diesem Naturzustand ab.

Vor ungefähr 6000 Jahren begann im Sottoceneri die Rodung der Eichen- und Eschenwälder. An Stelle von Wald entstanden Weiden, Äcker und Weinberge. Im restlichen Wald wurden jahrhundertealte Hoch- und Buchenwälder kahlgeschlagen. In den Laubwäldern wurde die Streu gesammelt und Stöcke ausgegraben. Die natürliche Verjüngung wurde durch Beweidung mit Ziegen verhindert. Fremde Baumarten, wie die Kastanie (*Castanea*), wurden eingeführt und Aufforstungen mit Weymouthsföhre (*Pinus Strobus* L.), Schwarzföhre (*Pinus nigra*), Douglasfichte (*Pseudotsuga*), kanadischer Pappel (*Populus gileadensis*), Roteiche (*Quercus rubra*) und Akazie (*Robinia*) bepflanzt. Diese Eingriffe betreffen hauptsächlich die Übergangszone zwischen den ebenen Gebieten und den Berghängen, bzw. den Bereich der oberen Baumgrenze. Die subalpinen und alpinen Wälder entsprechen weitgehend noch dem Naturzustand (COTTI 1989).

Nach der Aufgabe der Kastanienselven (Wälder, die der Kastaniengewinnung dienen) wurden die Wälder alle zehn Jahre geschlagen, und die Verjüngung fand nicht mehr durch Versamung, sondern, wie im Niederwald üblich, durch Stockausschlag statt. Diese Bewirtschaftungsart bewirkt eine hohe Waldbrandgefahr, da Stockausschläge sehr gut brennen. Tritt hier ein Waldbrand auf, verjüngt sich der Wald wieder durch Stockausschläge, und da nun mehr Licht vorhanden ist, kommt auch mehr Unterholz auf. So brennt es hier häufig, und es entsteht ein Zyklus, in dem eine sehr einseitige Vegetation aufkommt und der Wald zunehmend degradiert: Nur noch jene Pflanzen, die unmittelbar nach einem Feuer wieder ausschlagen können, sind noch in der Lage, sich zu vermehren (z.B. Kastanie). Andere Pflanzen, die erst in einem späteren Stadium der Sukzession auftreten (z.B. Eiche), verschwinden, wenn es ein paar Mal brennt, bevor sie sich vermehren können (RYSER 1994).

Kastanienselven dagegen bieten einen guten Feuerschutz, da hier nur wenig Unterholz besteht und sich daher das im Tessin häufige Lauffeuer nicht ausbreiten kann. Ebenfalls wenig Unterholz wächst unter Lärchen. Diese beiden Baumarten können also einen gewissen Schutz vor Feuern bieten (RYSER 1994).

In hoch gelegenen Gebieten wächst nur noch die Buche, welche schon bei einer sehr kurzen Hitzeeinwirkung abstirbt, da ihre Rinde kaum wärmeresistent ist. Trifft ein Waldbrand auf einen Buchenbestand, sterben bis 10 m von der Feuerfront entfernte Bäume ab. Da die Bäume selbst und ihre Streu dagegen kaum brennen, kann sich ein Feuer hier nicht ausbreiten (RYSER 1994).

Aus diesen Gründen sollte versucht werden, Kastanienselven zu erhalten und Niederwald wieder in Hochwald zurückzuführen, Aufforstungen sollten mit Kastanien oder Lärchen erfolgen und Buchenbestände sind möglichst vor Feuer zu schützen. Besonders gut brennende Baumarten, wie Fichten und Föhren, sollten vermieden werden.

RYSER (1994) schlägt vor, zwischen den Kastanienselven durch das Anpflanzen von schlecht entflammaren Baumarten Feuerschneisen herzustellen. Diese sollen aus feuerresistenten Arten (z.B. Eiche), unter denen beweidet wird, zusammengesetzt sein. So sollen sowohl für Kronen- wie für Bodenfeuer Begrenzungen erstellt werden, die sich harmonisch ins Landschaftsbild einfügen. Die heutige Gesetzgebung verbietet allerdings die Beweidung von Wäldern, sodass für einen Versuch erst noch Bewilligungen beantragt werden müssen.

3.1.2 Besitzverhältnisse

Im ganzen Kanton gibt es ca. 140'000 ha Wald, d.h. etwa die Hälfte der Kantonsfläche. Sie verteilt sich aber ungleichmässig: Der Anteil des Sottoceneri beträgt lediglich 17.5%. Insgesamt 78.8% der kantonalen Waldfläche sind in öffentlicher Hand (COTTI 1989). Der Privatwald konzentriert sich auf die ortsnahen Gebiete und ist deshalb stärker brandgefährdet. Die Erfahrung zeigt, dass Feuer vermehrt in siedlungsnahen Gebieten entfacht werden.

Die Besitzverhältnisse spielen jedoch nur eine untergeordnete Rolle für die Waldbrandthematik, da die Wälder in der Regel nicht versichert sind (zu kleiner Wert und zu häufige Waldbrände) und die Bekämpfungskosten gewöhnlich vom Umweltschutzdepartement des Kantons bezahlt werden.

3.1.3 Waldbrandmanagement

Es gibt im Tessin nur wenige Gebiete, die seit langem nicht mehr gebrannt haben und in denen die Vegetation daher degradiert. Es können sich so Arten behaupten, die in diesen Lagen normalerweise nicht vorherrschen würden. Ein Beispiel ist am Monte Caslano (südwestlich von Lugano) zu finden, der aber unter Naturschutz steht. Hier wird die Eiche (*Quercus*) von der Föhre (*pinus*) verdrängt. Die heute dort vorherrschende Vegetation soll nach Ansicht vieler erhalten werden. Ein Feuer ist dort also nicht erwünscht, auch wenn es einen Teil der natürlichen Sukzession darstellte.

Momentan werden in den meisten Fällen Feuer sofort mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln bekämpft. Besonders geachtet wird laut CORTI (in ALLENBACH 1990) auf den Schutz von Gebäuden, Jungwäldern und Forstprojekten. Wenn genügend Grundlagen für die zu treffenden Entscheidungen bereitgestellt würden, wäre jedoch ein differenzierteres Management möglich. Zu bedenken ist jedoch, dass es häufig sehr viel einfacher ist, in einem frühen Stadium Helikopter zu gebrauchen, als mit einem Dutzend Leute den Brand vom Boden aus zu bekämpfen (was sehr viel billiger, aber anstrengender ist). Bei der zweiten Methode können den positiven Aspekten des Feuers (Kap. 2.2.9), im Gegensatz zur ersten, Rechnung getragen werden.

Entscheidet man sich für ein Management, welches nicht in jedem Fall ein sofortiges Löschen vorsieht, muss grosser Wert auf Öffentlichkeitsarbeit gelegt werden. Die neue Politik muss der Bevölkerung zuerst wieder erläutert werden, nachdem Waldbrände jahrzehntelang nur Schlechtes bedeuteten.

3.1.4 Bekämpfung

Während früher die Gemeinden für die Bekämpfung verantwortlich waren, ist die Feuerwehr heute überregional organisiert. Zur Bekämpfung der Waldbrände wird vor allem die Gebirgsfeuerwehr eingesetzt. Wenn die 2000 Leute (im ganzen Kanton Tessin) nicht reichen, werden Truppen beigezogen. Die Reihenfolge der Alarmierung bei der Waldbrandbekämpfung: Feuerwehr - Bergfeuerwehr - Helikopter - Zivilschutz - Armee. Ausser bei feuchter Witterung zwischen Mai und November ist ständig ein Helikopter auf Pikett.

3.2 Das Untersuchungsgebiet Malcantone

Als Untersuchungsgebiet dieser Arbeit wurde nach Absprache mit der Sottostazione Sud delle Alpi (FNP) das Malcantone (Sottoceneri) ausgewählt, da hier einerseits Waldbrände häufig sind und andererseits sehr gute Kontakte zu den örtlichen Fachleuten bestehen. Speziell erwähnt seien hier der Feuerwehrkommandant, Herr D. Ryser, und der Kreisförster, Herr G. Corti.

Das Malcantone liegt westlich des Luganersees, grenzt im Süden und Westen an Italien und im Osten an den Luganersee. Es wird durch die Täler der Magliasina und der Lisora und von einem Teil des Vedeggiotales gebildet.

Das Malcantone mit total 26 Gemeinden wird in drei Distrikte unterteilt: Das Basso Malcantone (mit den Gemeinden Agno, Bioggio, Bosco Luganese, Caslano, Cimo, Magliaso, Neggio, Ponte Tresa, Vernate), das Medio Malcantone (Astano, Bedigliora, Croglio, Curio, Monteggio, Novaggio, Pura, Sessa) und das Alto Malcantone (Aranno, Arosio, Breno, Cademario, Fescoggia, Iseo, Migliaglia, Mugena Vezio). Das Basso Malcantone liegt auf durchschnittlich 420 m.ü.M., das Medio Malcantone auf 650 m.ü.M. und das Alto Malcantone auf 820 m.ü.M.. Die Hügelzüge werden von Kastanienwäldern, Reben, Wiesen und Weiden bedeckt (KNAPP 1905).

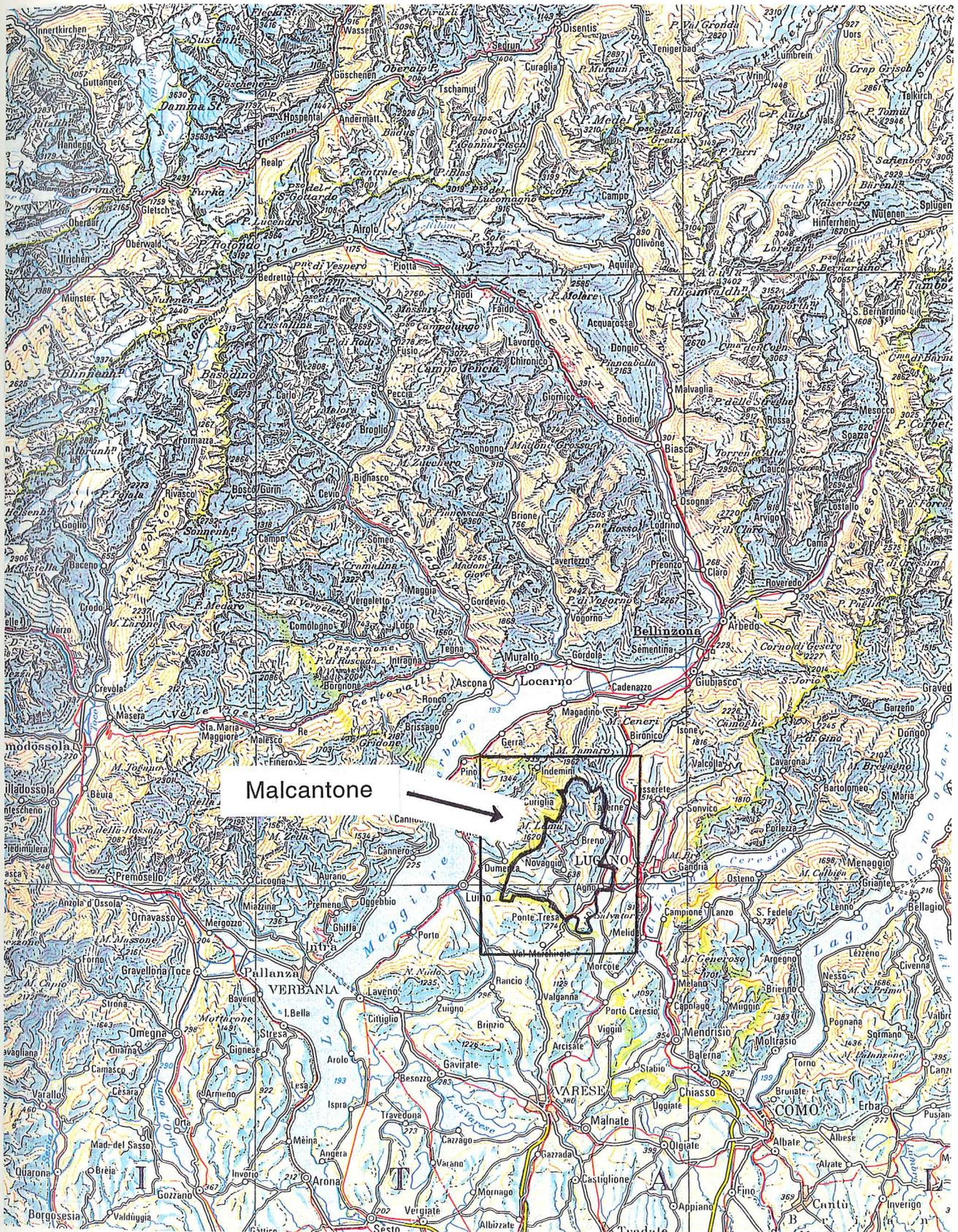


Fig. 12: Lage des Untersuchungsgebiets nach Landeskarte 1 : 500'000 (reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

Im Schweizer Lexikon (1991) wird das Malcantone wie folgt charakterisiert:

"...Die kristallinen insubrischen Felsen sind glazial überformt und enthalten in meist nichtabbauwürdigen Mengen Gold, Silber, Pyrit und Bleiglanz. Früher wurde allerdings v.a. in Sessa, Astano und Miglieglia Gold, 1823 - 1827 die Eisenmine auf dem Monte Torri ausgebeutet. Das traditionelle Einkommen basierte aber auf der Landwirtschaft; die höhergelegenen Gebiete alpinen Charakters kannten die Transhumanz, in der Ebene des Vedeggio errichteten die wohlhabenderen Familien Häuser, Rustici, legten Felder und Weinberge an. Im Malcantone gab es eine periodische Emigration nach Mittel- und Norditalien, Frankreich sowie ins schweizerische Mittelland; Bauarbeiter, Kalkbrenner oder Maurer waren die traditionellen Auswandererberufe. Seit der letzten Zwischenkriegszeit erfolgte die Erschliessung am Fusse der Berg- und Hügellzone und entlang den Hauptachsen, die ins mittlere Malcantone führen. Im oberen Tal scheint die Entvölkerung gebremst dank der bequemen Verbindung mit der Agglomeration Lugano und dem Tourismus..."

Die Fläche des Malcantone beträgt 7720 ha, davon sind 4562 ha (59.1%) Wald. Von dieser Fläche haben zwischen 1969 und 1993 885 ha (19.4%) mindestens einmal gebrannt.

Gemeinde	Fläche der Gemeinde (ha)	Bewaldete Fläche (ha)	Verbrannte Waldfläche (ha)	Anteil verbrannte Waldfläche (%)	Anteil bewaldete Fläche (%)
Agno	249	47	0.7	1.49	18.88
Aranno	252	213	15	7.04	84.52
Arosio	655	312	219	70.19	47.63
Astano	379	308	191	62.01	81.27
Bedigliora	248	162	5	3.09	65.32
Bioggio	303	61	0.4	0.66	20.13
Bosco Luganese	140	105	57	54.29	75.00
Breno	562	297	43	14.48	52.85
Cademario	407	307	16	5.21	75.43
Caslano	273	112	16	14.29	41.03
Cimo	86	65	8	12.31	75.58
Croglio	442	292	0.7	0.24	66.06
Curio	372	223	26	11.66	59.95
Fescoggia	245	192	8	4.17	78.37
Iseo	105	93	8	8.60	88.57
Magliaso	117	13	1	7.69	11.11
Miglieglia	512	344	97	28.20	67.19
Monteggio	336	154	4	2.60	45.83
Mugena	362	226	34	15.04	62.43
Neggio	89	55	2	3.64	61.80
Novaggio	432	304	65	21.38	70.37
Ponte Tresa	41	18	0	0.00	43.90
Pura	305	209	1	0.48	68.52
Sessa	289	168	16	9.52	58.13
Vernate	152	115	31	26.96	75.66
Vezio	367	167	20	11.98	45.50
Malcantone	7720	4562	884.8	19.40	59.09

Tab. 3: Vergleich zwischen Gemeinde-, Wald- und Waldbrandflächen

3.3 Datenlage im Tessin

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms "Klimaänderungen und Naturkatastrophen" (NFP 31) wurde von der Zweigstelle der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) im Tessin, der Sottostazione Sud delle Alpi in Bellinzona, eine Waldbranddatenbank (ORACLE) (JUD 1995) und ein Geographisches Informationssystem (ARC/INFO) (FRANK, 1994) erstellt. Sie umfassen das Tessin, einen Teil des Wallis (südlich des Simplons) und das Misox. Ziel ist, Aufschluss über die Einflüsse von Klimaveränderungen auf das Waldbrandauftreten zu erhalten (CONEDERA 1993).

3.3.1 Die Waldbranddatenbank

Im Zentrum der Datenbank stehen die Informationen des Forstdienstes über die Waldbrände selbst (CONEDERA 1993). Sie werden schon seit 1882 gesammelt und sind seither fast lückenlos vorhanden.

Bei einem Brand werden vom Forstdienst seit 1969 Protokolle ausgefüllt (Anhang X). Sie enthalten Angaben über:

- Gemeinde
- Koordinaten, meistens mit beiliegendem Ausschnitt aus der Landeskarte (ab 1969)
- Höhe
- Hangneigung und Exposition
- Datum und Zeit des Beginns und des Endes des Feuers
- Wochentag: Werk-, Sonn- oder Feiertag
- Art der betroffenen Fläche (Wald, Wiese oder unproduktives Land), wenn Wald betroffen ist, welcher Typ (Nadel- oder Laubwald) und welche Baumarten
- Feuertyp (Erd-, Boden- oder Kronenfeuer und Kombinationen davon)
- Schädigungen des Waldes durch das Feuer (unmittelbar danach und nach einer Vegetationsperiode)
- mit totem Material bedeckte Fläche
- Brannte die gleiche Fläche innerhalb von fünf oder zehn Jahren?
- Brandursache (unbekannt, Blitz, Brandstiftung, Fahrlässigkeit, Militär, Eisenbahn, Kurzschluss, etc.)
- Auswirkungen auf die Waldfunktion: ökonomisch, ökologisch, Schutz, Erholungs- und Landschaftswert
- Bekämpfung (wer war beteiligt, Wasserquellen für Helikopter, Erreichbarkeit, Effizienz der Löscharbeiten)

Weitere Informationen über die Waldbrände werden von der Feuerwehr erhoben. Sie umfassen Daten über (JUD 1995):

- Datum und Zeit der Alarmierung der Feuerwehr
- Datum und Zeit des Einrückens der Feuerwehr
- Datum und Zeit der Alarmierung des Forstdienstpiketts
- Datum und Zeit der Alarmierung von Helikoptern oder Flugzeugen
- Informationen über die Einsatzkräfte
- Einsatzart (Gegenfeuer, Einsatz von Helikoptern und Flugzeugen)
- Informationen über Einsatz von Helikoptern und Flugzeugen

- Gesamte Einsatzzeit der Feuerwehr
- Einsatz von Fahrzeugen und Geräten
- Einsatzkosten
- Zuverlässigkeit der Daten

Diese Daten stehen erst seit 1979 lückenlos zur Verfügung.

Ebenfalls in der Datenbank vorhanden sind die Meteodaten der SMA, die seit 1980 vollständig sind. Folgende Angaben sind darin enthalten (JUD 1995):

- Datum
- Temperatur um 12.00 Uhr
- Mittlere Tagestemperatur
- Luftfeuchtigkeit um 0.00 Uhr
- Luftfeuchtigkeit um 6.00 Uhr
- Luftfeuchtigkeit um 12.00 Uhr
- Luftfeuchtigkeit um 18.00 Uhr
- mittlere Luftfeuchtigkeit
- mittlere Windgeschwindigkeit
- Maximale Windgeschwindigkeit
- Relative Einstrahlung
- Globalstrahlung
- Niederschlag an den einzelnen Stationen
- Niederschlagsmittel aller vorhandenen Stationen.

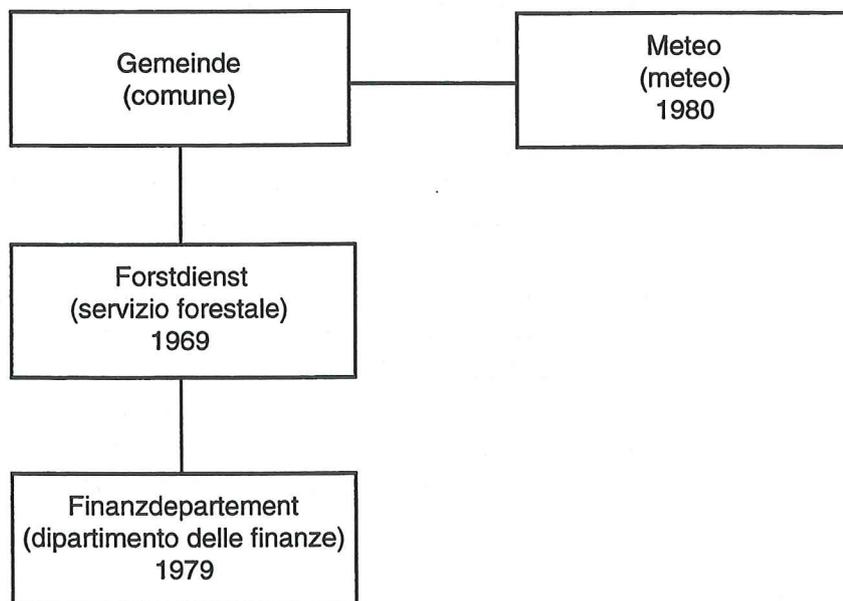


Fig. 13: Aufbau der Waldbranddatenbank mit Beginn der Erfassungszeit (CONEDERA 1993)

Zusätzlich werden alle sonst irgend in einer Form erhältlichen Angaben über die Waldbrände gesammelt, so z.B. Zeitungsartikel.

Bei der Benutzung der Daten stellt sich das Problem der Inkonsistenz, da die Daten z.T. lückenhaft sind und erst seit 1980 alle Daten erfasst werden.

3.3.2 Datensätze des Geographischen Informationssystems

Folgende Daten stehen für die Analysen mit dem GIS zur Verfügung (Tab. 4):

Daten	Beschreibung	Quelle
Waldbrandgeschichte	Waldbrandperimeter (1969 - 1993), die auf Deckpausen von Hand eingezeichnet und anschliessend digitalisiert wurden.	WSL (FRANK 1994), Landeskarte 1:25'000
Vegetation	Unterteilung in Vegetationsklassen: Nichtwald, Hangniederwald, Mittelwald, Hochwald, Kastanienselven, Auenwald, Pionierwald, Buchenjungwald, junge Pflanzungen, alte Pflanzungen	carta della vegetazione arborea (RYF 1992)
Verkehrswege	Strassennetz ohne Wanderwege, Eisenbahnlinie der Ponte Tresa-Bahn, Sessellift auf Monte Lema	Landeskarte 1:25'000
Siedlungsgebiete	Zusammenhängende Siedlungsgebiete	Landeskarte 1:25'000
Gewässer	Seen, Magliasina und Vedeggio	Landeskarte 1:25'000
Digitales Geländemodell	Zur Modellierung der Feuerausbreitung wurde das DHM25 verwendet, die restlichen Auswertungen wurden mit dem RIMINI gemacht.	DHM25 (Auflösung 25 m), RIMINI (Auflösung 250 m)
gefährdete Gebiete	Lage der erosionsgefährdeten Gebiete, der Aufforstungen und der Schutzwälder	Expertenangaben (RYSER 1995)

Tab. 4: Datensätze des GIS

Die Daten der Waldbrandgeschichte wurden am WSL wegen der Übersichtlichkeit nicht auf ein einziges Blatt gezeichnet, sondern auf mehrere aufgeteilt. Aus jedem dieser Blätter wurde ein Vektordatensatz erstellt. Daher bestehen verschiedene Datensätze mit Waldbrandperimetern, die später zu einem einzigen verknüpft wurden.

Während dem Zusammenfügen der Datensätze der einzelnen Kartenblätter zu einem einzigen, der alle Waldbrände enthält, wurden Fehler festgestellt. Die einen entstanden schon beim Kartieren (Waldbrände hören am Kartenrand einfach auf), die anderen beim Digitalisieren (falsche Zuordnungen und Fehler an den Kartenrändern) und beim Eintrag in die ORACLE-Datenbank. Die Fehler werden zur Zeit vom FNP in Bellinzona bereinigt (HAEGELI, pers. Mitt. 1995).

3.3.3 Datenverwaltung im GIS

Für die Datenverwaltung im GIS wurden zwei verschiedene Konzepte verwendet, die auf zwei unterschiedlichen Modulen der Software ARC/INFO beruhen.

Für Daten, die mit der Brandgeschichte in Zusammenhang stehen, wurde das Regions-Konzept (Vektordaten) gewählt (Anhang IX). Alle Daten, die man zur Berechnung der Feuerausbreitung benötigt, wurden als Rasterdaten verwaltet (Kap. 2.3.1). Da einige Daten für beide Auswertungen gebraucht wurden, wurden sie sowohl als Vektor- als auch als Rasterdaten abgespeichert (detaillierte Beschreibung im Anhang I).

Vektordaten

Die Daten der Waldbrandgeschichte sind als Regions abgelegt. Zur Erleichterung der Auswertungen der Brandgeschichte wurden alle übrigen Daten nach dem Digitalisieren ebenfalls in Regions umgewandelt und als neue Subklasse dem bestehenden Vektordatensatz mit den Waldbrandperimetern zugefügt.

Rasterdaten

Alle Daten, die zur Modellierung der Feuerausbreitung benötigt wurden sowie alle Resultate und Zwischenresultate der Prioritätszonen sind in Form von Rasterdaten abgelegt.

3.4 Applikation SPARKS

SPARKS modelliert das Feuerverhalten von Lauffeuern anhand des Rothermel-Modells für Rasterdatensätze. Es wurde von SCHÖNING (1996) auf ARC/INFO entwickelt. Es präsentiert sich in einer menügesteuerten BenutzerInnenoberfläche. Ihr liegen zwei AML-Scripts (Anhang III und SCHÖNING 1996) zugrunde. Das eine berechnet, basierend auf dem Rothermel-Modell, Intensitäts- und Ausbreitungsparameter für die Feuerfront eines Lauffeuers (ROTHERMEL 1972, ALBINI 1976), das andere die Ausbreitungszeit des Feuers (ANDERSON 1985, SCHÖNING 1996).

Folgende Grössen lassen sich mit dem Rothermel-Modell berechnen (SCHÖNING 1994):

- Hauptausbreitungsrichtung der Feuerfront [°]
- Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Hauptrichtung [m/s]
- Reaktionsintensität (Wärmefreisetzungsrate pro m² in der Flammenzone)
- Fireline intensity (Wärmefreisetzungsrate pro m der Feuerfront. Abhängig sind davon Flammenlänge, Bekämpfbarkeit und ökologische Auswirkungen.)
- durch Feuer freigesetzte Wärme

Die dazu nötigen Inputdaten sind (SCHÖNING 1994):

- Topographie
 - Hangneigung [°]
 - Exposition
- Wind
 - Richtung
 - Geschwindigkeit [m/s]
- Brandgutfeuchtigkeit [%]
 - totes Brandgut (für drei Durchmesserklassen):
 - < 0.6 cm
 - 0.6 cm bis < 2.5 cm
 - 2.5 cm bis < 7.5 cm
 - lebendes Brandgut
 - krautig
 - verholzt
- Brandgut (genauere Beschreibung in (HARVEY 1996))
 - Biomasse der Streu-, Kraut- und Strauchschicht für totes und lebendes Brandgut

- Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis für totes und lebendes Brandgut [m^{-1}]
- unterer Heizwert des Brandguts [KJ/kg]
- totaler Mineralgehalt der Brandgutpartikel (Anteil der Trockenmasse) [%]
- effektiver Mineralgehalt der Brandgutpartikel (Anteil der Trockenmasse) [%]
- Tiefe der Brandgutschicht [m]
- Dichte der Brandgutpartikel [kg/m^3]
- Erlöschungsfeuchtigkeit des toten Brandguts [%]
- Heizwert der pyrolysierten Gase [KJ/kg]
- charakteristischer Feuchtigkeitsgehalt [%]

Folgende mit dem Rothermel-Modell berechneten Resultate werden als Eingangsgrößen für die Ausbreitungsmodellierung gebraucht:

- Hauptausbreitungsrichtung der Feuerfront [$^\circ$]
- Ausbreitungsgeschwindigkeit in der Hauptrichtung [m/s]
- Flammenlänge [m]

Zusätzlich werden folgende Parameter benötigt:

- Barrieren
 - Lage
 - Verhältnis der Flammenlänge zur Barrierenbreite bei den Übersprungswahrscheinlichkeiten von 0.1 und 0.9
- Digitales Geländemodell

Daraus lassen sich untenstehende Grössen berechnen:

- Ausbreitungszeiten ([s] oder [min])
- maximale Ausbreitungszeit ([s] oder [min])
- Übersprungswahrscheinlichkeit
- Ausbreitungsrichtung der Feuerfront [$^\circ$]
- Ausbreitungsrate der Feuerfront [m/s]

3.4.1 Rückwärtsgerichtete Brandausbreitung (Rückwärtsausbreitung)

Als Spezialanwendung von SPARKS wurde hier die Rückwärtsausbreitung verwendet.

Für besonders gefährdete Objekte, bei denen in einem Brandfall in jedem Fall eingegriffen werden muss - z.B. weil Leben gefährdet sind -, sollte man wissen, wie sich ein Feuer ausbreitet. Damit kann festgestellt werden, wie lange das Feuer braucht, um das Objekt zu erreichen, bzw. ob es dieses überhaupt erreichen kann. Ist diese Zeit für alle gefährdeten Objekte bekannt, kann die Waldbrandbekämpfung gezielter vorgenommen werden.

Dazu wurde die Feuerausbreitung für jede Waldbrandsaison im SPARKS simuliert. Da die Ausgangspunkte zukünftiger Feuer jedoch nicht bekannt sind, musste eine Methode gefunden werden, um die kritischen Zonen rund um die gefährdeten Objekte zu bestimmen. Nach der Idee von SCHÖNING (1996) wird die Ausbreitung der Feuer in umgekehrter Wegrichtung simuliert, das heisst den Startpunkt der Feuer bilden nun Objekte, die nicht brennen sollten. Die Feuerausbreitung wurde nun von ihnen aus gerechnet. Diese Art der Simulation wurde im folgenden Rückwärtsausbreitung genannt. Um die Zeiten zu erhalten, die ein Feuer braucht, um von seinem Startpunkt aus einen Punkt x zu erreichen, muss der berechnete Vektor der Feuerausbreitungsrichtung um 180° gedreht werden (Kap. 4.4.2).

Bsp. 2:

Ausgangslage: Zwischen dem Feuer und einem Haus befindet sich ein Hügel. Der kürzeste Weg a vom Feuer zum Gipfel des Hügels ist gleich weit wie die kürzeste Verbindung b vom Gipfel zum Haus. Alle anderen Bedingungen sind konstant.

Das Feuer breitet sich am schnellsten auf dem steilsten Weg zum Gipfel des Hügels aus. Für die gleich grosse Entfernung zum Haus hinunter sucht es sich jedoch den Weg mit dem kleinsten Gefälle und braucht daher einiges länger (Kap. 2.2.4).

Bei der Simulation der Feuerausbreitung mit Startpunkt Haus zum tatsächlichen Ausgangspunkt des Feuers verhält es sich genau gleich; nur braucht es nun für die Strecke a länger als für die Strecke b .

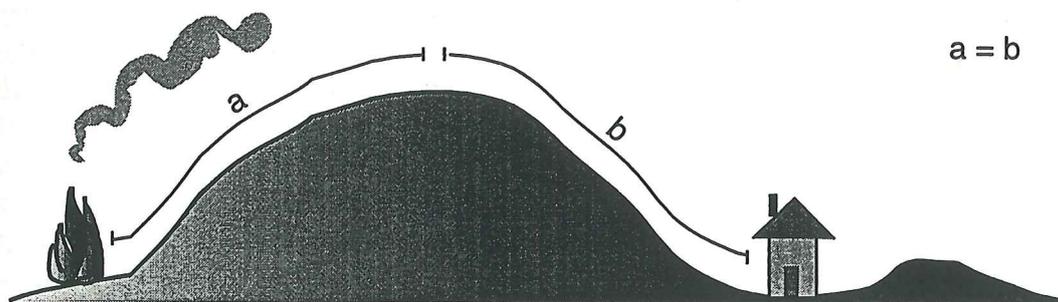


Fig. 14: Rückwärtsausbreitung

Wird die Feuerausbreitung nun ohne Veränderung der Richtung der maximalen Ausbreitung vorgenommen, ist die Ausbreitungszeit für die Strecke b kleiner als für die Strecke a . In Wirklichkeit ist dies jedoch, wie gezeigt, genau umgekehrt. Daher muss der Richtungsvektor der maximalen Ausbreitung um 180° gedreht werden.

3.4.2 Brandgutmodell

Die Daten für das Brandgutmodell, welches für die Berechnungen mit SPARKS benötigt wird, wurden von HARVEY (1996) im Malcantone erhoben. Anhand der Vegetationskarte (RYF 1992) setzte er dazu Stichproben im Kastanienwald, im reinen Nadelwald und in ehemaligen Waldbrandflächen, die nun vorwiegend von Farn und Ginster bewachsen sind. Nach statistischen Auswertungen wurden anschliessend die Resultate für die einzelnen Stichproben auf die gesamte, von ihnen repräsentierte, kartierte Fläche im Malcantone übertragen. Da nur für drei Vegetationstypen Daten erhoben wurden, bestehen nur Angaben für das Brandgut der Vegetationsklassen Kastanienselven, Kastanie, reiner Nadelwald und für die ehemaligen Waldbrandflächen. Für die anderen Vegetationstypen bestehen keine Angaben über das Brandgut.

4 Vorgehen

Zur Einteilung der Region Malcantone in Prioritätszonen (Gebiete, die anhand ihrer Waldbrandgefahr und ihres Schadenpotentials zu einer Zone mit gleich hoher Priorität in der Waldbrandbekämpfung zusammengefasst werden) für die Waldbrandbekämpfung wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet. Der eine basiert auf der Waldbrandgeschichte, der andere auf der Modellierung der Feuerausbreitung. Auf diese Weise wurde dem Umstand Rechnung getragen, dass es Objekte gibt, die durch ihre Waldbrandgeschichte ein hohes Schadenpotential aufweisen und andere, die unabhängig von der Brandgeschichte unbedingt vor Feuer geschützt werden müssen. Zur ersten Kategorie zählen erosionsgefährdete Gebiete, Schutzwald und Aufforstungen, sowie die Vegetations- und die Topographieklassen, zur zweiten Siedlungen, Strassen und kulturelle Objekte. Figur 15 zeigt schematisch das Vorgehen. Nach der getrennten Berechnung des Schadenpotentials wurden die beiden Ansätze einheitlich in Gefahrencodes skaliert (Kap. 4.3). Durch diese Skalierung war es möglich, die Schadenpotentiale aus den beiden Ansätzen zu addieren und so die gesuchten Prioritätszonen zu bilden (Kap. 4.4).

Die Erfahrung zeigt, dass in Gebieten, in denen es in der Vergangenheit häufig gebrannt hat die Vegetation zu degradieren beginnt und dadurch Feuer stark fördert. Die Wahrscheinlichkeit für einen erneuten Brandausbruch ist dort daher höher, und die Vegetation wird mit jedem neuen Feuer zunehmend geschädigt; ihr Schadenpotential ist erhöht. Um dieses zu bestimmen, wurde versucht, durch Auswertungen der Waldbranddatenbank des WSL und der Überlagerung der Waldbrandgeschichte mit Vegetation und Topographie, die Parameter zu bestimmen, die auf das Auftreten von Feuern den grössten Einfluss haben. Anschliessend wurde der Anteil der verbrannten an der gesamten Fläche des gefährdeten Objekts und der Vegetations-, bzw. der Topographiekategorie berechnet (Kap. 4.1.4). Die Informationen über Lage und Art der gefährdeten Objekte stammen aus Expertenbefragungen (Kap. 4.1.1).

Andere Objekte müssen in jedem Fall vor Feuer geschützt werden, so z.B. Siedlungsgebiete und Strassen. Hier spielt es nur eine untergeordnete Rolle, ob es in der Vergangenheit schon ein- oder mehrmals gebrannt hat, es kommt nur darauf an, wie lange ein Feuer vom Startpunkt aus braucht, um ein solches Objekt zu erreichen. Je kleiner diese Zeitspanne ist, desto schneller muss eingegriffen werden und desto höher ist auch sein Schadenpotential. Zur Berechnung dieses Schadenpotentials wurde die Feuerausbreitung mit der Methode der Rückwärtsausbreitung modelliert (Kap. 4.2.3).

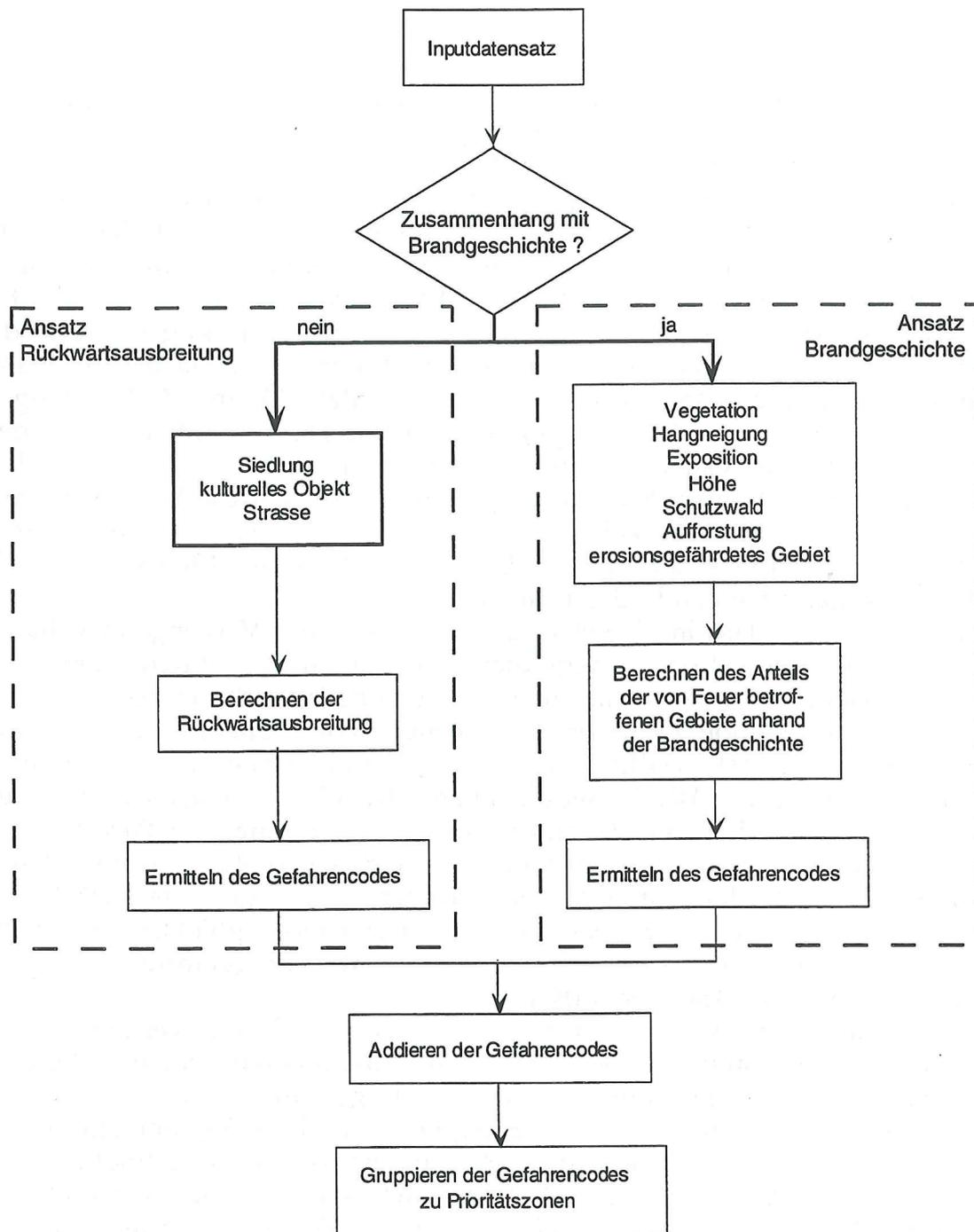


Fig. 15: Vorgehen bei der Evaluation der Prioritätszonen

4.1 Auswertung der Waldbrandgeschichte

4.1.1 Expertenbefragung

Expertenbefragungen wurden durchgeführt, um einerseits die Bedürfnisse der Experten im Waldbrandmanagement festzustellen, andererseits um Informationen über das Untersuchungsgebiet zu erhalten, die nicht der Literatur oder Karten zu entnehmen sind. Es sollten gefährdete Gebiete lokalisiert werden. Als Experte wirkte freundlicherweise Herr D. Ryser, der nicht nur über langjährige Erfahrung als Feuerwehrkommandant im Malcantone verfügt, sondern auch mit der Region im allgemeinen vertraut ist.

Die Befragungen fanden zu einem Teil als nicht standardisiertes Interview statt, zum anderen Teil schriftlich.

Die Resultate des Interviews dienten zur Festlegung der Ziele und Schwerpunkte dieser Arbeit. Ausserdem wurden sie zur Formulierung der Zielvorstellungen eines Entscheidungsunterstützenden Systems benutzt (Kap. 2.3.5).

Die Angaben aus der schriftlichen Befragung, in der Form von Karten, wurden digitalisiert und zur Bildung der Prioritätszonen, bzw. zu deren Überprüfung, verwendet.

Interview

Das Hauptinteresse bei der Befragung von Herrn Ryser galt Basisinformationen über das Problem Waldbrand im Tessin im allgemeinen und im Malcantone im speziellen. Im Zentrum stand die Frage, wie ein Feuerwehrkommandant bei der Entscheidungsfindung und der eigentlichen Brandbekämpfung vorgeht und welche Informationen ihm dabei zur Verfügung stehen, bzw. welche Vorschriften bei der Waldbrandbekämpfung zu beachten sind. Ausserdem interessierte, welche Verbesserungen am heutigen Management vorgenommen werden sollten und welche Informationen dazu fehlen. Daneben wurde nach der heutigen und der historischen Waldwirtschaft und deren Einfluss auf die Waldbrände gefragt.

Schriftliche Befragung

Herr Ryser (1995) wurde gebeten, verschiedene für die Waldbrandproblematik relevante Gebiete auf einer Karte einzuzichnen. Dabei handelte es sich um Gebiete, in denen nach Möglichkeit kein Waldbrand vorkommen sollte. Dazu zählten erosionsgefährdete Gebiete, Schutzwald, Aufforstungen und kulturelle Objekte, wie ausserhalb des Siedlungsgebietes liegende Kirchen und Kapellen. Ferner wurde nach touristischen Einrichtungen, Tierhabitaten und Naturschutzgebieten gefragt.

4.1.2 Auswertungen der Waldbranddatenbank

Um die Einteilung in die Waldbrandsaisons und in die Prioritätszonen vornehmen zu können, mussten die Parameter, welche das Auftreten von Waldbränden beeinflussen, bestimmt werden. Sie wurden aus Auswertungen der Waldbranddatenbank (JUD 1995) gewonnen. Die interessierenden Grössen waren Jahreszeit, Klima, Topographie, Vegetation und Brandursachen.

Diese Auswertungen betrafen einerseits den ganzen von der Datenbank erfassten Teil der Alpensüdseite, andererseits die Waldbrandflächen der Region Malcantone, deren Perimeter digital im GIS der WSL (FRANK 1994) vorhanden sind. Da diese nur für die Jahre 1969 - 1993 existieren, wurden die Auswertungen für die Alpensüdseite auch nur für diesen Zeitraum vorgenommen.

Die Daten für die Alpensüdseite konnten direkt der ORACLE-Datenbank entnommen werden. Die Daten für das Malcantone mussten mit Hilfe des GIS abgefragt werden, da nur jene Einträge der Datenbank für die Auswertungen verwendet werden sollten, deren Perimeter auch im GIS erfasst sind.

Es wurden keine statistische, sondern nur eine qualitative Auswertungen durchgeführt, bei der die Häufigkeitsverteilungen der Anzahl und der Flächen

der Waldbrände in Abhängigkeit eines weiteren Parameters (Monat, Topographie, Vegetation, Klima und Brandursachen) betrachtet wurden. Die Resultate der Auswertungen der Datenbank wurden anschliessend, ebenfalls qualitativ, mit denjenigen aus dem GIS (Kap. 4.1.3) verglichen.

Waldbrandsaison

Die Einteilung in Waldbrandsaisons erfolgte aufgrund der Verteilung der Waldbrände auf die Monate. Für alle zwölf Monate wurden die Waldbrandereignisse während des untersuchten Zeitraums aufsummiert. Monate mit ähnlichen Häufigkeiten im Waldbrandauftreten wurden jeweils zu einer Waldbrandsaison zusammengefasst. Analoge Überlegungen wurden mit den abgebrannten Flächen angestellt, und zwar zählte man jeweils die total während eines Monats brandgeschädigten Flächen zusammen und bildete aus Monaten mit ähnlich grossen Gesamtflächen eine Waldbrandsaison.

Exposition

Um die Summe der verbrannten Flächen und die der Anzahl Waldbrandereignisse in Abhängigkeit der Exposition zu bilden, wurde sie wie folgt klassiert:

- N (337°-22°)
- NE (22°-67°)
- E (67°-112°)
- SE (112°-157°)
- S (157°-202°)
- SW (202°-247°)
- W (247°-292°)
- NW (292°-337°)

Höhenstufen

In 100 m-Schritten wurde die Höhe ab 300 m.ü.M. bis 1800 m.ü.M. zu Höhenstufen klassiert. Anschliessend wurde die Anzahl der Waldbrandereignisse, bzw. die Summe der Waldbrandflächen, pro Höhenstufe ermittelt.

Hangneigung

Nach der Klassierung der Steigung von 0% - 100% in 10%-Schritten wurde für alle Hangneigungsklassen wie oben die Summe der Waldbrandereignisse und der Waldbrandflächen berechnet.

Waldbrandursachen

Bei den Waldbrandursachen wurde die Klassierung der WSL-Datenbank (Blitzschlag, Brandstiftung, Fahrlässigkeit, Militär, Eisenbahn, grenzüberschreitend, Kurzschluss, unbekannt, andere) übernommen und die Häufigkeiten der Waldbrände in den einzelnen Klassen bestimmt.

Landnutzung

Bei der Auswertung der Landnutzung wurde zwischen der groben Einteilung in die Klassen Wald, Weide und unproduktive Fläche unterschieden. Der Wald wurde in verschiedenen Bestandestypen gegliedert.

Bestandestypen:

- Sträucher
- Niederwald
- Kastanienselven
- Aufforstungen (Dickungen und Stangenhölzer)
- Laubhochwald
- Nadelhochwald

Klima

Zuverlässige Angaben über das Klima im Untersuchungsgebiet können nur gemacht werden, wenn genügend Messstationen zur Verfügung stehen. In der Meteodatenbank (WSL) sind jedoch nur die Werte von drei Stationen auf der ganzen Alpensüdseite vorhanden (Fig. 12). Die dem Malcantone davon am nächsten liegende befindet sich in Lugano auf ca. 330 m.ü.M.. Das Malcantone aber liegt auf durchschnittlich 600 m.ü.M.. Da die Werte von Lugano daher nicht als repräsentativ gelten können, wurden Mittelwerte der ganzen Alpensüdseite für die Auswertungen verwendet, um so die lokalen Verhältnissen bei den einzelnen Klimastationen auszugleichen. Dazu wurden sowohl für die Tagesmittelwerte, als auch für die Werte für zwölf Uhr, arithmetische Mittel gebildet.

Die Angaben über das Klima wurden im Zusammenhang mit der Evaluation der Prioritätszonen und der Feuerausbreitung ausgewertet (Kap. 4.2.2). Sie stammen aus der zur Waldbranddatenbank gehörigen Meteodatenbank. Diese enthält Einträge von 1980 bis 1992. Für jede Brandsaison mussten die typischen Witterungsbedingungen ermittelt werden, da für die Modellierung der Feuerausbreitung Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Windrichtung und Windgeschwindigkeit wichtig sind.

4.1.3 Auswertung mit Hilfe des GIS

Da nur für das Malcantone eine bereinigte Datengrundlage besteht, konnten nur für dieses Gebiet Auswertungen vorgenommen werden. Die Daten für den Rest der Alpensüdseite wurden noch nicht korrigiert.

Mit Hilfe der Waldbrandgeschichte aus dem GIS (FRANK 1994) wurden Aussagen über die Verteilungen der Anzahl und der Fläche der Waldbrände über die Monate, die Vegetation, den Baumbestand und die Topographie gemacht.

Der untersuchte Zeitraum reicht, analog zu den Untersuchungen aus der ORACLE-Datenbank, von 1969 bis 1993.

Waldbrandsaison und Topographie

Die Klasseneinteilung für die Waldbrandsaison, die Höhe, die Hangneigung und die Exposition wurde analog zu jener der Datenbank vorgenommen (Kap. 4.1.2). Danach wurde die Anzahl und die Fläche der Waldbrände in den einzelnen Topographieklassen aufsummiert und danach untereinander verglichen.

Vegetation

Als Grundlage diente die Vegetationskarte (RYF 1992).

Erfasst sind folgende Vegetationsklassen:

- Nichtwald
- Produktiver Niederwald
- Hangniederwald
- Mittelwald
- Hochwald
- Kastanienselven
- Auenwald
- Pionierwald
- Buchenjungwald
- Junge Pflanzungen
- Alte Pflanzungen

Die insgesamt pro Vegetationsklasse verbrannte Fläche wurde berechnet und anschliessend die Resultate für die verschiedenen Klassen untereinander verglichen.

4.1.4 Berechnung des Schadenpotentials nach einem modifizierten Ansatz von VEGA-GARCIA (1993)

Für die Einteilung in Prioritätszonen sollte festgestellt werden, zu wieviel Prozent die Waldbrände das gefährdete Objekt (Vegetation, Hangneigung, Exposition, Höhe, erosionsgefährdete Gebiete, Schutzwald oder Aufforstung) überlappen (VEGA-GARCIA 1993).

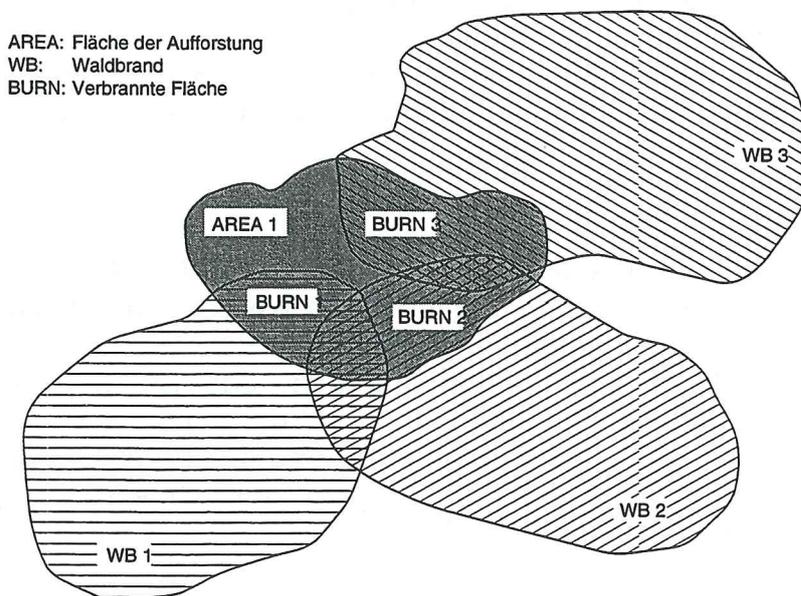


Fig. 16: Anteil der von Waldbrand betroffenen Fläche eines gefährdeten Objekts

Die Flächenanteile des Objekts (BURN), die während der untersuchten Zeit von Feuer betroffen waren, wurden aufsummiert. Diese Summe wurde durch die totale Fläche des Objekts (AREA) geteilt und ergab so den Anteil der von Feuer betroffenen Fläche des Objekts (B%).

$$B\% = (\sum \text{BURN} / \text{AREA}) * 100$$

Grundsätzlich können die Summen der verbrannten Waldflächen auch grösser als 100% sein, wenn diese über die Jahre hinweg häufig gebrannt haben.

Gefährdete Gebiete nach RYSER (1995)

Bei den erosionsgefährdeten Gebieten, dem Schutzwald und den Aufforstungen wurde das Verhältnis der von Waldbrand betroffenen zu der gesamten Fläche des Objekts für jedes gefährdete Gebiet einzeln berechnet.

Dazu wurde der Befehl REGIONXAREA (ARC/INFO) verwendet. Er berechnet die sich überlappenden Flächen (und den Prozentsatz der Überlappung) der Waldbrände und der gefährdeten Gebiete (Anhang IX).

Diese Berechnungen wurden für jede Waldbrandsaison separat vorgenommen. Da sie für jedes Waldbrandereignis und jedes gefährdete Gebiet einzeln gemacht wurden, erhielt man für jedes Gebiet mehrere Resultate, nämlich für jedes Ereignis eines. Um nun den gesamten von Waldbrand betroffenen Anteil eines gefährdeten Gebiets zu erhalten, mussten diese Resultate noch aufsummiert werden.

Pro Waldbrandsaison wurde je ein Vektordatensatz gebildet, der für die Waldbrände ein Attribut aufweist, welches Auskunft über den verbrannten Flächenanteil gibt. Für die Einteilung in die Gefahrencodes wurden die Vektordatensätze je in einen Rasterdatensatz umgewandelt (Kap. 4.3).

Vegetation und Topographie

Bei der Vegetation und der Topographie wurde etwas anders vorgegangen, da es nicht sinnvoll ist, wie bei den oben besprochenen Gebieten die Teilflächen der gleichen Vegetations- oder Topographiekategorie getrennt zu behandeln.

So wurden zuerst alle Flächen einer Vegetationsklasse zusammengezählt, ebenso ihre während einer Waldbrandsaison von Waldbrand betroffenen Flächen. Daraus wurde das Verhältnis zwischen der von Waldbrand betroffenen Fläche und der gesamten Fläche einer Vegetationsklasse berechnet (s.o.). Die betroffene Fläche wurde ebenfalls mit dem Befehl REGIONXAREA berechnet. Der Anteil der von Waldbrand betroffenen Fläche der Vegetationsklasse wurde der entsprechenden Vegetationsklasse in einem Attribut zugefügt.

Mit der Höhe, der Hangneigung und der Exposition wurde gleich verfahren wie mit der Vegetation, nachdem das digitale Geländemodell analog zu den Auswertungen aus der Waldbranddatenbank klassiert worden war (Kap. 4.1.3).

Um nur jene Gebiete zu berücksichtigen, in denen es auch brennen kann, wurden mit Hilfe des Vegetationsdatensatzes alle vegetationslosen Gebiete ausmaskiert.

Der Anteil der von Waldbrand betroffenen Fläche an der Topographiekategorie wurde für jede Klasse einzeln berechnet.

Aus den berechneten Prozentanteilen für die Hangneigung, die Exposition und die Höhe entstandene pro Waldbrandsaison je ein Rasterdatensatz. Dabei erhält jede Zelle den Prozentanteil zugeordnet, der ihrer Topographie-, bzw. Vegetationsklasse entspricht (Anhang IV). Die resultierenden Rasterdatensätze enthalten nun in jeder Zelle den Prozentsatz der in ihrer Topographie- oder Vegetationsklasse und ihrer Brandsaison verbrannten Fläche.

4.2 Berechnung der Rückwärtsausbreitung

4.2.1 Erzeugen von Barrieren in der Feuerausbreitung

Bei der Berechnung der Rückwärtsausbreitung mussten Barrieren in der Feuerausbreitung berücksichtigt werden. Je nach Objekt, von dem aus die Berechnung durchgeführt werden sollte, mussten andere Barrieren verwendet werden. Da die Rückwärtsausbreitung so berechnet wurde, als ob die Feuer von allen Objekten gleicher Klasse gleichzeitig beginnen würden, können sie andere Objekte ihrer Klasse gar nie erreichen. Dies liegt daran, dass die Flammenfronten an einem Ort aufeinander treffen und, falls der Raum ausgefüllt ist, dort "verlöschen". Daher ist es bei der Berechnung der Feuerausbreitung von Strassen aus z.B. nicht nötig, die Strassen auch als Barrieren zu benutzen.

Startpunkt des Feuers	Barrieren
Strassen	Siedlungen und Gewässer
Siedlungen	Strassen und Gewässer
kulturelle Objekte	Strassen, Siedlungen und Gewässer

Tab. 5: Barrieren zur Berechnung der Rückwärtsausbreitung

Zur Verwendung der Strassen und Gewässer als Barrieren wurden ihre Vektordatensätze mit einem Attribut für die Breite der Barrieren versehen, anhand dessen sie dann in die Barrierenrasterdatensätze umgewandelt wurden. Dies war notwendig, da die Breite der Barrieren zur Berechnung der Übersprungungswahrscheinlichkeit bei der Modellierung der Feuerausbreitung gebraucht wurde.

Wurden die Siedlungen als Barrieren gebraucht, erhalten sie alle einen einheitlichen Wert zugewiesen. Wie gross dieser ist, ist nicht wichtig, da es allein durch die räumliche Ausdehnung der Siedlungsgebiete für ein Feuer in den meisten Fällen unmöglich ist, diese zu überqueren.

4.2.2 Modellierung der Feuchtigkeit von totem Brandgut nach dem FIRE BEHAVIOR FIELD REFERENCE GUIDE

Das Feuerverhalten hängt stark von der Feuchtigkeit des Brandguts ab. Diese wiederum, speziell die des toten, ist von der Topographie abhängig. So sind nordexponierte Hänge feuchter als südexponierte, ebenso sind hoch gelegene Gebiete feuchter als tiefe. Die Topographie muss daher bei der Modellierung der Brandgutfeuchtigkeit berücksichtigt werden. Die Feuchtigkeit des toten Brandguts ändert sich nur sehr wenig mit der Hangneigung und wurde in diesen Modellierungen daher nicht berücksichtigt.

Bei der Modellierung der Feuchtigkeit des toten Brandguts wurde nach dem FIRE BEHAVIOR FIELD REFERENCE GUIDE (NAT. WILDFIRE COORDINATING GROUP 1992) vorgegangen. Es wurden dabei nur die Werte für die Zeit von 8.00 Uhr bis 19.59 Uhr berücksichtigt, da Feuer in der Nacht in der Regel nur sehr schwach brennen und daher für die Berechnung des Schadenpotentials unwichtig sind.

Die Brandgutfeuchtigkeit wurde nur für die Klasse des feinsten Brandguts (< 0.6 cm Durchmesser) modelliert. Das Resultat liess sich jedoch auch für die übrigen Klassen (0.6 - < 2.5 cm und 2.5 - < 7.5 cm Durchmesser, Kap. 3.4.2) übertragen, denn diese Vereinfachung ist möglich, da nur die feinsten Brandgutpartikel einen grossen Einfluss auf das Feuerverhalten haben.

Die Ausgangs- und Korrekturwerte für die Brandgutfeuchtigkeit wurden anhand von Luftfeuchtigkeit und Temperatur, beide für zwölf Uhr, den Brandgutfeuchtigkeitstabellen (Tab. 6 - Tab. 7) des FIRE BEHAVIOR FIELD REFERENCE GUIDE entnommen.

Für jede Zelle des digitalen Geländemodells (DHM25) wurde ein Korrekturwert für die Brandgutfeuchtigkeit, sowohl für die Exposition als auch für die Höhenstufe, berechnet. Um je einen Rasterdatensatz für die Brandgutfeuchtigkeit pro Waldbrandsaison zu erhalten, wurden die Korrekturwerte für die Exposition, die Höhe und die der Waldbrandsaison zu den Ausgangswerten der Brandgutfeuchtigkeit addiert (Anhang VII).

Die oben erwähnten Werte für die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit stammten aus den Daten der Meteodatenbank (WSL), und zwar ermittelte man für jede Waldbrandsaison die Mittelwerte aller Stationen für die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit um zwölf Uhr. Für den Gebrauch der Tabelle 6 zur Ermittlung des Ausgangswerts für die Brandgutfeuchtigkeit musste die Temperatur von °C in °F umgerechnet werden.

		Relative humidity (percent)																			
Temperature (°F)	0-4	5-9	10-14	15-19	20-24	25-29	30-34	35-39	40-44	45-49	50-54	55-59	60-64	65-69	70-74	75-79	80-84	85-89	90-94	95-99	100
10-29	1	2	2	3	4	5	5	6	7	8	8	8	9	9	10	11	12	12	13	13	14
30-49	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7	7	8	9	9	10	10	11	12	13	13	13
50-69	1	2	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	11	12	12	12	13
70-89	1	1	2	2	3	4	5	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	13
90-109	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	13
>109	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7	8	8	8	9	10	10	11	12	12	12

Tab. 6: Ausgangswert der Brandgutfeuchtigkeit (in Prozent) (NAT. WILDFIRE COORDINATING GROUP 1992)

Anhand der Tabelle 7 wurden Korrekturwerte für die Höhenlage abgeschätzt, die von der Waldbrandsaison unabhängig sind.

		May, June, July																	
		8.00-09.59			10.00-11.59			12.00-13.59			14.00-15.59			16.00-17.59			18.00-19.59		
aspect	slope in %	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A
N	0-30	2	3	4	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	2	3	4
N	>31	3	4	4	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	2	3	4	4
E	0-30	2	2	3	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	2	3	4	4
E	>31	1	2	2	0	0	1	0	0	1	1	1	2	2	3	4	4	5	6
S	0-30	2	3	3	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	2	3	3
S	>31	2	3	3	1	1	2	0	1	1	0	1	1	1	1	2	2	3	3
W	0-30	2	3	4	1	1	2	0	0	1	0	0	1	0	1	1	2	3	3
W	>31	4	5	6	2	3	4	1	1	2	0	0	1	0	0	1	1	2	2

A = 1000-2000 ft above site
 L = +/- 1000 ft of site location
 B = 1000-2000 ft below site

		February, March, April/August, September, October																	
		8.00-09.59			10.00-11.59			12.00-13.59			14.00-15.59			16.00-17.59			18.00-19.59		
aspect	slope in %	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A
N	0-30	3	4	5	1	2	3	1	1	2	1	1	2	1	2	3	3	4	5
N	>31	3	4	5	3	3	4	2	3	4	2	3	4	3	3	4	3	4	5
E	0-30	3	4	5	1	2	3	1	1	1	1	1	2	1	2	3	3	4	5
E	>31	3	3	4	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5	4	5	6
S	0-30	3	4	5	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5
S	>31	3	4	5	1	2	2	0	1	1	0	1	1	1	2	2	3	4	5
W	0-30	3	4	5	1	2	3	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	4	5
W	>31	4	5	6	3	4	5	1	2	3	1	1	1	1	1	1	3	3	4

A = 1000-2000 ft above site
 L = +/- 1000 ft of site location
 B = 1000-2000 ft below site

		November, December, January																	
		8.00-09.59			10.00-11.59			12.00-13.59			14.00-15.59			16.00-17.59			18.00-19.59		
aspect	slope in %	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A	B	L	A
N	0-30	4	5	6	3	4	5	2	3	4	2	3	4	3	4	5	4	5	6
N	>31	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6
E	0-30	4	5	6	3	4	4	2	3	3	2	3	3	3	4	5	4	5	6
E	>31	4	5	6	2	3	4	2	2	3	3	4	4	4	5	6	4	5	6
S	0-30	4	5	6	3	4	5	2	3	3	2	2	3	3	4	4	4	5	6
S	>31	4	5	6	2	3	3	1	1	2	1	1	2	2	3	3	4	5	6
W	0-30	4	5	6	3	4	5	2	3	3	2	3	3	3	4	4	4	5	6
W	>31	4	5	6	4	5	6	3	4	4	2	2	3	2	3	4	4	5	6

A = 1000-2000 ft above site
 L = +/- 1000 ft of site location
 B = 1000-2000 ft below site

Tab. 7: Korrekturen für die Feuchtigkeiten des toten Brandguts (in Prozent)
 (NAT. WILDFIRE COORDINATING GROUP 1992)

Für mittlere Höhenlagen konnte der Ausgangswert der Brandgutfeuchtigkeit ohne Korrektur übernommen werden, für Höhenlagen, die 1000 - 2000 ft (ca. 300 - 600 m) darunter, bzw. darüber liegen, wurde zu der Brandgutfeuchtigkeit 1% ab-, bzw. dazugezählt.

Höhe	Korrekturwert
< 1030 m.ü.M.	-1
1030 - 1630 m.ü.M.	0
> 1630 m.ü.M.	+1

Tab. 8: Korrekturwerte für die Höhe im Malcantone (in Prozent)

Die Korrekturfaktoren der Brandgutfeuchtigkeit für die Exposition verändern sich im Laufe des Jahres und wurden daher für jede Waldbrandsaison getrennt aus der Tabelle 7 abgeschätzt:

Exposition	Dezember-Februar	März-April	Mai-November
N	2	1	4
E	1	0	3
S	1	0	2
W	2	1	3

Tab. 9: Korrekturwerte für die Exposition im Malcantone (in Prozent)

Bsp. 3:

Die Feuchtigkeit eines Brandgutpartikels an einem nordexponierten Hang auf 1500 m.ü.M. soll für den 1. Mai um 14 Uhr ermittelt werden. Die Lufttemperatur beträgt 20 °C (54.5 °F), die relative Luftfeuchtigkeit 60%.

Ausgangswert (Tab. 6): 8%
 Korrekturwert Höhe (Tab. 8): +0%
 Korrekturwert Exposition (Tab. 9): +4%
 totale Brandgutfeuchte: 10%

4.2.3 Berechnung des Schadenpotentials mittels Rückwärtsausbreitung

Zur Berechnung des Schadenpotentials wurde die Rückwärtsausbreitung für die Siedlungsgebiete, die Strassen und die kulturell wertvollen Objekte für jede Waldbrandsaison berechnet (Anhang II). Die Feuerausbreitung wurde mit den beiden AML-Scripts, die die Grundlage des SPARKS bilden, modelliert (Anhang III und Kap. 3.4). Von allen möglichen Resultaten interessierte nur die Feuerausbreitung, d.h. die Zeit, die ein Feuer braucht, um den Weg vom Ausgangspunkt zu einem Punkt x zurückzulegen, sowie alle Zwischenresultate, die zu ihrer Berechnung benötigt wurden.

Das eine Script berechnet die maximale Ausbreitungsrate (*rate of maximum spread*), die Richtung der maximalen Ausbreitung (*direction of maximum spread*) und die Flammenlänge (*flamelength*) für jede Zelle im Rasterdatensatz. Das andere Script berechnet aus den Resultaten des ersten Scripts die Ausbreitungszeit des Feuers.

Grundsätzlich wurde bei der Rückwärtsausbreitung gleich vorgegangen wie bei der üblichen Berechnung der Feuerausbreitung. Mit dem ersten AML-Script wurden die maximale Ausbreitungsrate, die Richtung der maximalen

Ausbreitung und die Flammenlänge berechnet. Während die Ausbreitungsrate und die Flammenlänge unverändert als Input für das zweite Script verwendet werden konnten, musste die Richtung der maximalen Ausbreitung noch umgerechnet werden.

Die Richtung der maximalen Ausbreitung bezeichnet die Richtung, die das Feuer von der aktuellen Zelle aus wahrscheinlich einschlagen würde, um zur nächsten zu gelangen. Für die Rückwärtsausbreitung musste der Richtungsvektor der maximalen Ausbreitung nun um 180° gedreht werden (Kap. 3.4.1).

Die Berechnung der Rückwärtsausbreitung wurde einzeln für die Siedlungen, die Strassen und die kulturellen Objekte für jede Waldbrandsaison je einmal durchgeführt. Die Modellierung der Feuerausbreitung wurde so vorgenommen, dass sie bei allen Objekten derselben Klasse gleichzeitig beginnt. Es wurden also Feuer simuliert, die an allen Orten gleichzeitig entzündet wurden. Durch diese Art der Modellierung entstanden kleine Fehler, da die verschiedenen, gleichzeitig entzündeten Feuer einander beeinflussen. Genau genommen müsste die Rückwärtsausbreitung für jedes Objekt einzeln berechnet werden. Da dies aber mit enorm hohen Rechenzeiten verbunden wäre und die erreichte Genauigkeit zur Ausscheidung der Prioritätszonen genügt, wurde darauf verzichtet.

Jede erneute Berechnung der Feuerausbreitung führte zu einem anderen Resultat aufgrund einer für die Berechnung der Übersprungungswahrscheinlichkeit von Barrieren eingeführter Zufallsfunktion. Diese macht es möglich, dass ein Feuer ein Hindernis überspringen kann, auch wenn die dazu berechnete Wahrscheinlichkeit eigentlich zu klein ist. Diese Zufallsfunktion steht für all jene Faktoren, die im Modell nicht berücksichtigt werden können, aber trotzdem einen grossen Einfluss auf die Übersprungungswahrscheinlichkeit haben können (z.B. ein plötzlicher Windstoss).

Da die Resultate z.T. stark unterschiedlich waren, wurde die Feuerausbreitung für jeden gewünschten Rasterdatensatz 100 mal gerechnet. Daraus wurde für jede Zelle ein gewichtetes arithmetisches Mittel gebildet. Um die maximalen Abweichungen davon festzustellen, wurden zudem, ebenfalls für jede Zelle, der höchste und der tiefste Wert ermittelt (Anhang V).

4.3 Gefahrencodes

Damit die Resultate der Rückwärtsausbreitung und der Brandgeschichte überhaupt miteinander vergleichbar waren, mussten sie einheitlich skaliert werden. Dazu wurde der sogenannte Gefahrencode benutzt, mit seiner Hilfe fand schliesslich die Einteilung der Prioritätszonen statt.

Gebieten, welchen bei der Waldbrandbekämpfung eine höhere Priorität eingeräumt wird, sollte ein höherer Gefahrencode zugeordnet werden als solchen mit niedriger Priorität. Das genaue Vorgehen wird in Kap. 4.3.1 und 4.3.2 erläutert.

Sowohl für jeden Rasterdatensatz der Brandgeschichte (Vegetation, erosionsgefährdete Gebiete, Schutzwald, Aufforstungen), als auch der Rückwärtsausbreitung (Siedlungen, Strassen und kulturellen Objekten) wurden die Gefahrencodes separat berechnet. Sämtliche für eine Zelle berechneten Gefahrencodes (aus der Rückwärtsausbreitung und aus der Brandgeschichte)

wurden addiert und anschliessend erneut klassiert. Die entstandenen Klassen bildeten nun die gesuchten Prioritätszonen.

Die Gefahrencodes wiesen zu Beginn willkürlich festgelegte Werte auf, die dann so lange angepasst wurden, bis die Gewichtung zwischen den gefährdeten Objekten stimmt (Strassen sollen z.B. viel stärker gewichtet werden als die Topographie).

4.3.1 Gefahrencodes der Brandgeschichte

Der Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen an der gesamten Fläche der Vegetation, der Topographie, der erosionsgefährdeten Gebiete, des Schutzwaldes, sowie der Aufforstungen mussten codiert werden. Diese Codierung erfolgte mit einem empirisch ermittelten Faktor einzeln für jede dieser Kategorien.

$$G_I = B\% \cdot Y$$

wobei G_I der zu berechnende Gefahrencode, Y der empirisch ermittelte Korrekturfaktor und $B\%$ der Anteil der verbrannten an der totalen Fläche der Kategorienklasse ist (Fig. 17).

Für alle diese Auswertungen mit der Brandgeschichte wurde eine einheitliche Skala verwendet. Da die Topographie- und die Vegetationsklassen sehr grossflächig sind und die verbrannten Anteile damit klein, bewirkt diese Art der Skalierung, dass die Topographie und die Vegetation fast nur den tiefsten Wert für den Gefahrencode aufweisen. Dies ist jedoch ein erwünschter Effekt, da ein Vegetationstyp allein noch keine hohe Brandgefahr darstellt und auch keine grosse Schutzwürdigkeit besitzt.

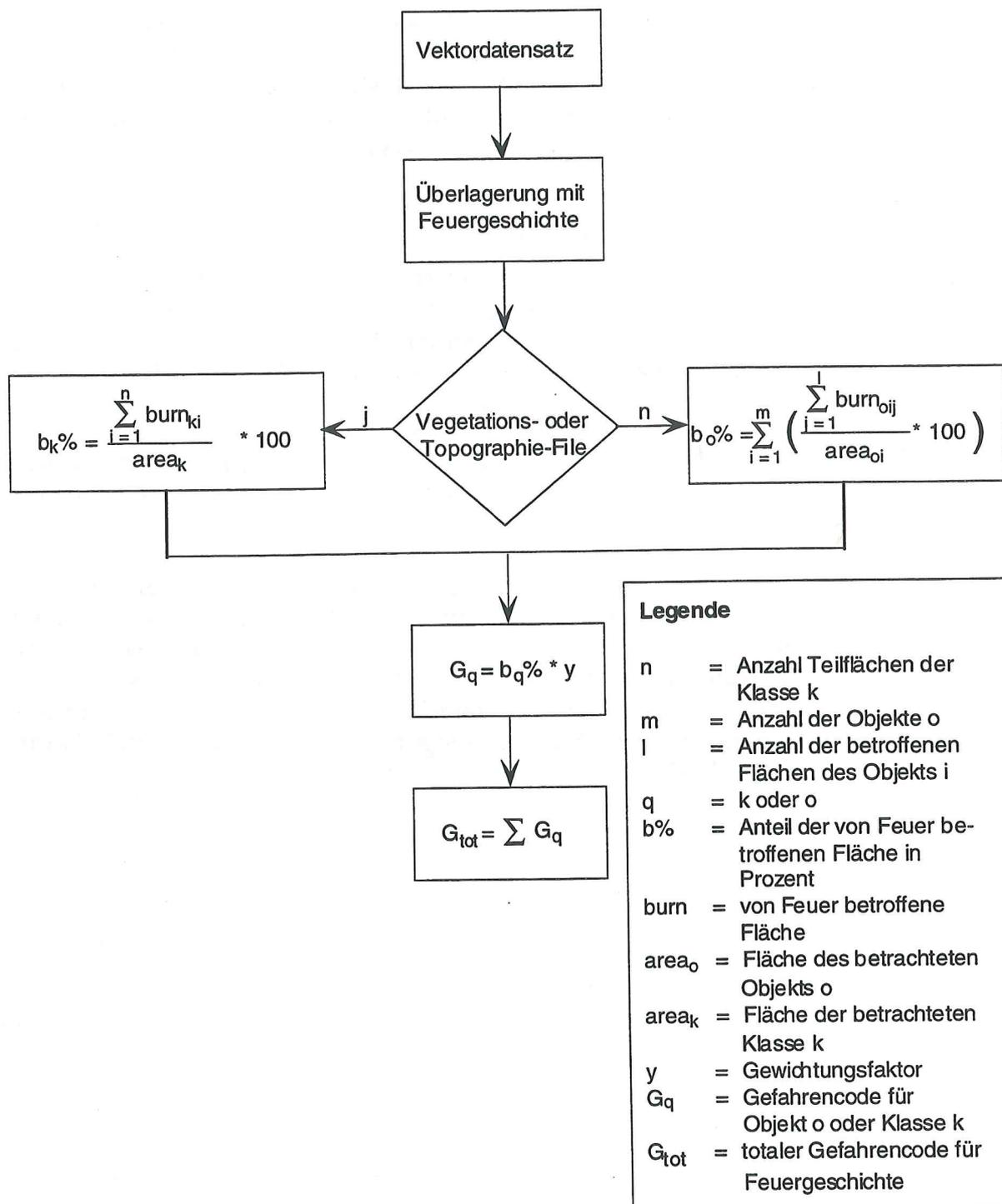


Fig. 17: Berechnung des Gefahrencodes der Waldbrandgeschichte

4.3.2 Gefahrencodes der Feuerausbreitung

Die Rasterdatensätze der Rückwärtsausbreitung wurden mit einer Exponentialfunktion, die aus der Literatur der Potentialmodelle in der Geographie stammt (SCHÖNING 1996), gewichtet (Anhang VI). Diese bewirkt, dass die langen Ausbreitungszeiten weniger stark gewichtet werden als die kurzen. Dies ist nötig, da es nach langer Brenndauer keine Rolle mehr spielt, wie lange das Feuer noch braucht, um an einen bestimmten Punkt zu gelangen; eine zuverlässige Modellierung ist nicht mehr möglich, da sich in dieser Zeit zu viele Faktoren ändern. Bei den kurzen Ausbreitungszeiten dagegen sind auch schon

kleine Änderungen in der Ausbreitungszeit für die Feuerbekämpfung von grösster Bedeutung.

Der Gefahrencode wurde einzeln für die Strassen, die Siedlungen und die kulturellen Objekte für jede Zelle des Datensatzes berechnet:

$$ACC = W * e^{(X * SPREAD)}$$

wobei ACC der zu berechnende Gefahrencode, X ein empirisch ermittelter Korrekturfaktor, SPREAD der Rasterdatensatz aus der Rückwärtsausbreitung und W der Gewichtungsfaktor des gefährdeten Objekts ist. Letzterer wurde in Abstimmung mit den Gefahrencodes aus der Brandgeschichte ermittelt.

Die Gefahrencodes für die Siedlungen, die Strassen und die kulturellen Objekte wurden pro Zelle aufsummiert (Anhang VI) und in einen neuen Rasterdatensatz geschrieben. Die Klassierung dieses Datensatzes konnte nun linear erfolgen.

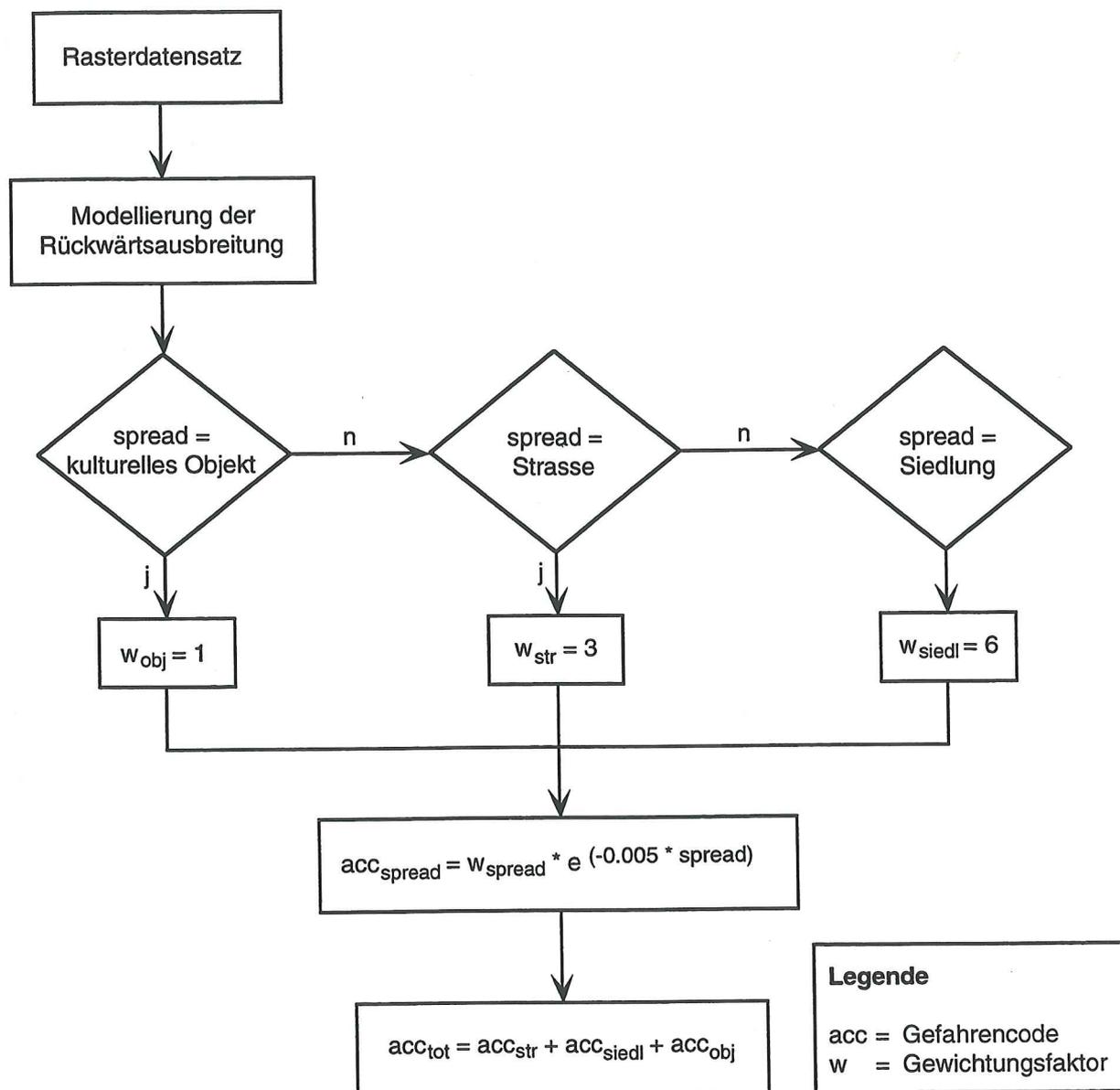


Fig. 18: Bestimmung der Gefahrencodes der Rückwärtsausbreitung

4.4 Einteilung in Prioritätszonen

Die Gefahrencodes der Rückwärtsausbreitung und der Brandgeschichte wurden für jede Waldbrandsaison addiert. Anhand der Grösse des Gefahrencodes wurden fünf Klassen gebildet und ihnen das zugehörige Schadenpotential (von sehr gering bis extrem) zugeordnet. Diese Klassen entsprechen nun den Prioritätszonen (Tab. 10).

Klasse	Gefahrencode	Schadenpotential
1	0.5 - 2.4	sehr gering
2	2.4 - 4.3	gering
3	4.3 - 6.2	mittel
4	6.2 - 8.1	hoch
5	8.1 - 10.0	extrem

Tab. 10: Schadenpotential mit den zugehörigen Gefahrencodes

5 Resultate

Um die das Waldbrandverhalten am stärksten beeinflussenden Parameter zu bestimmen, waren qualitative Auswertungen der Waldbrandgeschichte und des Klimas, sowie Expertenbefragungen notwendig. Aufgrund dieser Resultate wurden die gefährdeten Gebiete ausgeschieden.

Zur Bestimmung der Prioritätszonen für die verschiedenen Waldbrandsaisons wurde das Schadenpotential der gefährdeten Gebiete anhand der Brandgeschichte (erosionsgefährdete Gebiete, Schutzwald, Aufforstungen, Vegetation und Topographie) und anhand der Rückwärtsausbreitung (Siedlungen, Strassen, kulturelle Objekte) berechnet. Zur Berechnung des Schadenpotentials für erosionsgefährdete Gebiete, Schutzwald, Aufforstungen, Vegetation und Topographie waren Auswertungen der Waldbrandgeschichte notwendig: Dabei wurde der Anteil der betroffenen an der gesamten Fläche des gefährdeten Objekts bestimmt (Kap. 4.1.4). Die Resultate befinden sich im Anhang VIII.

Probleme bei der Auswertung der Daten entstanden durch die verschiedenen Erfassungszeiträume: Erst ab 1980 wurden auch die Meteodaten erfasst. Da in dieser Arbeit keine quantitativen, sondern nur qualitative Auswertungen gemacht werden, wurden die Daten der Meteodatenbank, nach einem Vergleich mit Werten aus der Literatur (AMBROSETTI 1978), trotzdem zur Interpretation der Auswertungen der Waldbranddatenbank und zur Berechnung der Brandgutfeuchtigkeit benutzt.

Auch die Daten zur Waldbrandgeschichte aus dem GIS konnten nicht ohne Vorbehalte verwendet werden. Beim Digitalisieren der Waldbrandperimeter entstanden Fehler, die für diese Arbeit zwar korrigiert wurden, jedoch ohne dabei auf die Originaldaten (Daten der Deckpausen) zurückzugreifen.

Auch in der Vegetationskarte (RYF 1992) wurden bei der Feldarbeit (Aufnahme der Brandgutdaten) von S. HARVEY (1996) Fehler festgestellt.

5.1 Bestimmung der feuerrelevanten Parameter anhand der Waldbrandgeschichte

Betrachtet wurden die Häufigkeitsverteilungen der Waldbrände in Abhängigkeit sowohl von der Waldbrandsaison, als auch der Vegetation, der Landnutzung und der Topographie. Dabei wurden die Verteilungen der durchschnittlich pro Waldbrand betroffenen Fläche, der Häufigkeit der Waldbrände und des Anteils der verbrannten Fläche ausgewertet. Die betroffenen Flächenanteile der Topographie- und der Vegetationsklassen wurden berechnet, ohne die effektiv vorhandene Fläche in einer Klasse zu berücksichtigen. Um eine Überprüfung der Resultate vornehmen zu können, wurden die qualitativen Auswertungen der Waldbrandgeschichte des Geographischen Informationssystem (GIS) mit den Auswertungen der Waldbranddatenbank des WSL für das Malcantone und mit den Auswertungen für den gesamten von der Waldbranddatenbank erfassten Teil der Alpensüdseite (Tessin, Misox, Wallis südlich des Simplons) verglichen. Der untersuchte Zeitraum reicht von 1969 bis 1993 (Kap. 4.1.2). Beim Vergleich der Resultate der Waldbranddatenbank mit denjenigen aus dem GIS entstanden jedoch Probleme, da sowohl die Einträge der Datenbank als auch die Angaben des GIS zum Teil fehlerhaft sind und andere Datengrundlagen haben. Die Daten des

GIS beziehen sich auf das digitale Geländemodell und die Vegetationskarte nach RYF (1992), die der Datenbank auf die Angaben des Forstdienstes.

In der Datenbank fehlen für einige Waldbrände sämtliche Einträge, für andere sind sie nur lückenhaft vorhanden, zum Teil sind sie falsch.

Ein weiteres Problem waren die verschiedenen Erfassungszeiträume der Daten. So wurden die Waldbrandperimeter, im Gegensatz zu den übrigen in der Datenbank enthaltenen Angaben des Forstdienstes erst seit 1969 erfasst. Alle Auswertungen, die mit dem GIS gemacht wurden, mussten sich also diesen Zeitraum beschränken.

Für die Auswertungen der Topographie mit dem GIS wurde das digitale Geländemodell RIMINI verwendet. Um mit der Waldbranddatenbank (FRANK 1994) vergleichbare Resultate zu erhalten, deren Informationen über die Topographie sich nur auf den Startpunkt des Feuers beziehen, wurde für die Exposition und die Höhenstufen jeweils der Mittelwert über die gesamte verbrannte Fläche gebildet. Die Angaben für die Höhe wurden auf den tiefsten Punkt des Feuers bezogen (Kap. 4.1.3).

5.1.1 Entwicklung der Waldbrandhäufigkeit von 1895 - 1994

Die Waldbrände auf der Alpensüdseite haben in den letzten hundert Jahren stetig zugenommen (Fig. 19). Ein Maximum liegt Mitte der sechziger bis anfangs der siebziger Jahre, ein weiteres Mitte bis Ende der achtziger Jahre, da die siebziger Jahre extrem trocken waren. Laut CORTI (in ALLENBACH 1990) ist dies jedoch nicht der einzige Grund für die hohe Anzahl der Feuer. Die häufig vorkommenden, früher gepflegt und genutzten Kastanienwälder (das Laub beispielsweise wurde zusammengerechnet) überliess man sich selber.

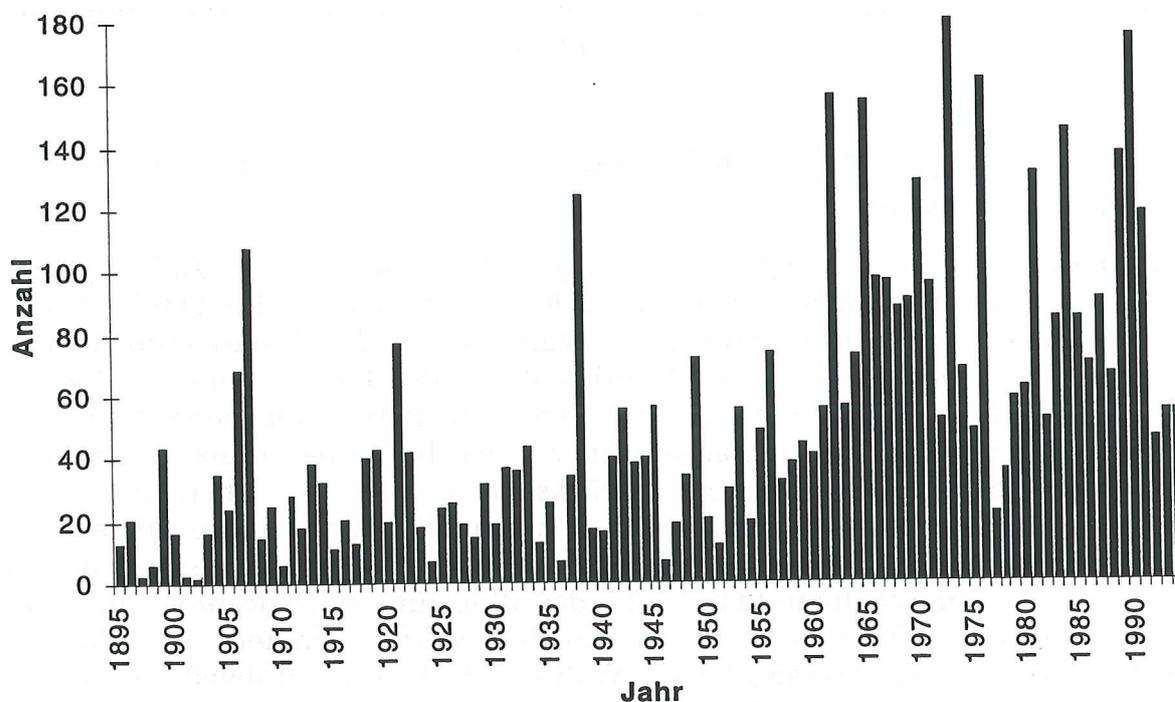


Fig. 19: Anzahl Waldbrände auf der Alpensüdseite von 1895 - 1994 (nach Datenbank)

5.1.2 Verteilung nach Monaten

Die Verteilung der Waldbrände über ein Jahr wurde zur Einteilung der Waldbrandsaisons benötigt und mit Hilfe der Waldbranddatenbank bestimmt (Kap. 4.1.2).

Am häufigsten und mit den grössten Flächen waren im Malcantone Feuer im März und im April. Auffällig ist, dass im März fast 40% der gesamten betroffenen Fläche verbrannt ist (Fig. 20).

Abweichungen im Verhalten des prozentualen Anteils der verbrannten Fläche und der prozentualen Anzahl der Waldbrände ergaben sich im Februar und im Dezember. Der Anteil der Anzahl war hier deutlich höher: Statt 13% waren es bei den Flächen nur 3% im Februar, im Dezember 13% gegenüber 8%. Die Waldbrandhäufigkeit im Januar war der im Februar und im Dezember ähnlich, die betroffene Fläche aber grösser.

Im untersuchten Zeitraum gab es im Malcantone im September keinen Waldbrand. Nur knapp 1% waren es in den Monaten Juli bis September. Im Zeitraum vom Mai bis November waren es insgesamt deutlich weniger Waldbrände (ca. 11%) als während dem Rest des Jahres.

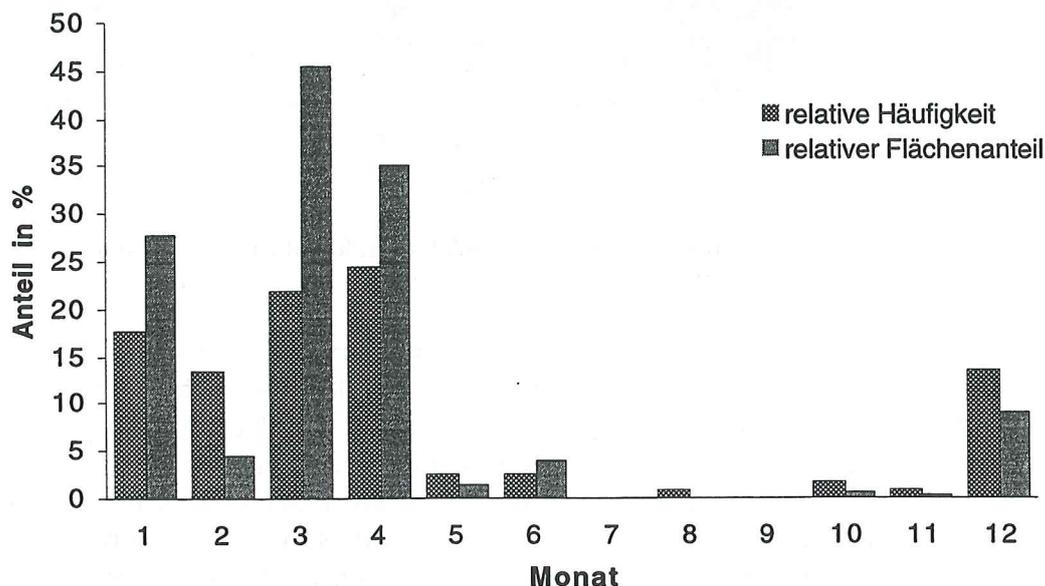


Fig. 20: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände im Malcantone (nach Datenbank)

Für die ganze Alpensüdseite erhält man aufgrund einer analogen graphischen Darstellung (Fig. 21) den Eindruck, dass die Waldbrände zur gleichen Jahreszeit gehäuft auftreten. Tatsächlich waren Waldbrände im März und April auf der Alpensüdseite am häufigsten: Die Anzahl der Ereignisse lag hier bei 20%. Etwas grösser war der Anteil bei der Fläche im März, im April lag er sogar bei fast 30%. Die Waldbrandhäufigkeit in den Wintermonaten Januar, Februar und Dezember (sowie August) lag bei ca. 10%. Im Januar war auch die verbrannte Fläche in dieser Grössenordnung, im Februar jedoch nur halb so gross, im Dezember dagegen betrug sie mehr als 15%.

Waldbrände im September waren auch auf der ganzen Alpensüdseite nur sehr selten. Nur wenig mehr Ereignisse fanden im Juni und Oktober statt. Im Mai, Juli und August waren die Feuer zwar einiges häufiger, die dabei verbrannten

Flächen jedoch etwa gleich gross wie in den anderen warmen Monaten. Im November lag zwar die Anzahl der Brände zwischen jener vom Oktober und jener vom Mai, doch verbrannte im November mehr Wald als in den anderen Monaten zusammengenommen.

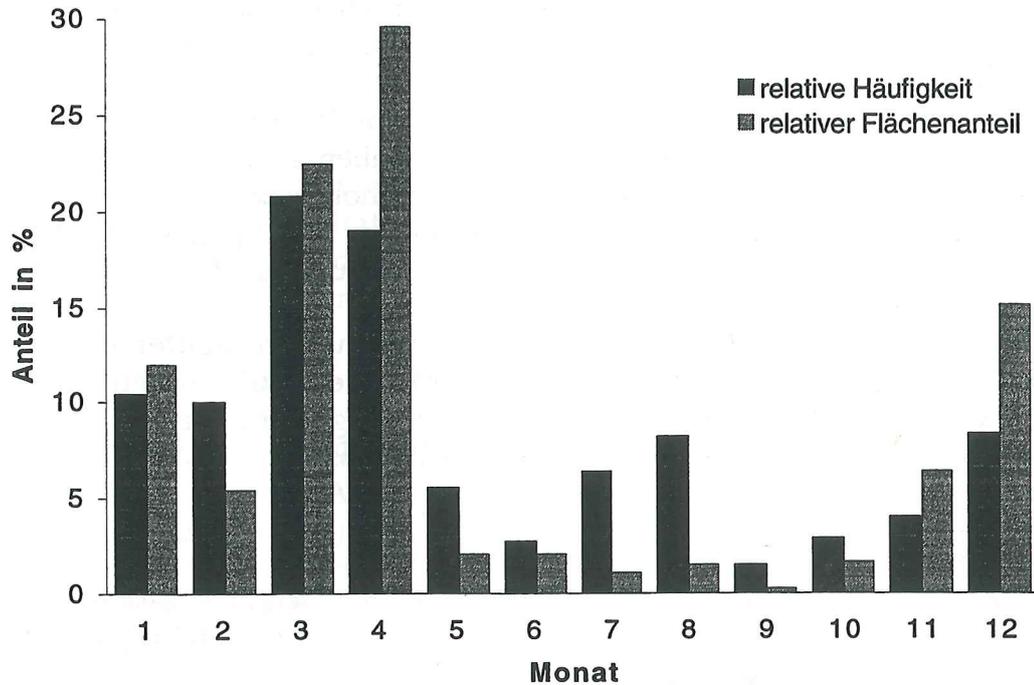


Fig. 21: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Beim Vergleich der Waldbrandereignisse im Malcantone mit jenen der Alpensüdseite fällt der gemeinsame Trend auf: Viele Waldbrände mit grosser betroffener Fläche im März und April, in Anzahl und Fläche weniger in den Wintermonaten Dezember bis Februar, sowie ein deutliches Tief zwischen Mai und November. Waldbrände im März und April sind besonders häufig, da die Winter auf der Alpensüdseite sehr trocken und schneearm sind und die Vegetationsperiode zu dieser Zeit gerade erst beginnt. Die Pflanzen haben zu dieser Zeit am wenigsten Wasser gespeichert und sind so leicht entzündbar. Zudem ist die Luftfeuchtigkeit, welche die Brandgutfeuchtigkeit beeinflusst, sehr tief (Fig. 55).

Dank des weitgehenden Fehlens des Niederschlags im Winter trocknet das tote Brandgut aus. Da auch keine Schneedecke liegt, ist ebenfalls die Zeit von Dezember bis Februar stark von Feuern betroffen.

Ein Unterschied zwischen dem Waldbrandauftreten im Malcantone und auf der Alpensüdseite besteht im Sommer: Während im Malcantone fast keine Feuer zu verzeichnen sind, ist ihre Anzahl auf der Alpensüdseite zur gleichen Zeit nicht zu vernachlässigen. Die grosse Anzahl Waldbrände auf der Alpensüdseite in den Ferienmonaten Juli und August sind vermutlich auf den zu dieser Zeit verstärkt auftretenden Tourismus zurückzuführen.

Eine kleine Verschiebung gibt es in den beiden Monaten mit dem grössten Waldbrandauftreten: Im Malcantone verbrannte im März der grösste Flächenanteil, auf der Alpensüdseite im April.

5.1.3 Waldbrandsaison

Anhand der Auswertungen aus der Verteilung der Waldbrände über ein Jahr wurde die Einteilung in drei Waldbrandsaisons vorgenommen:

- Dezember bis Februar
- März bis April
- Mai bis November

Bei der Einteilung der Waldbrandsaisons war der Februar der einzige Monat, der sich nicht eindeutig einordnen liess. Die Anzahl der Waldbrände zu dieser Zeit war der der Monate von Mai bis November ähnlich. Die im Februar auf der Alpensüdseite verbrannte Fläche war jedoch einiges grösser als die Fläche, die durchschnittlich zwischen Mai und November verbrannte. Aufgrund dieses Kriteriums sollte er zusammen mit Januar und Dezember eine Waldbrandsaison bilden.

5.1.4 Waldbrandursachen

Fast die Hälfte der Waldbrände im Malcantone entstanden durch Fahrlässigkeit, ein Viertel durch Brandstiftung (Fig. 22). Bei einem weiteren Viertel ist die Ursache nicht bekannt. Häufig handelte es sich dabei vermutlich um Brandstiftung. Es lässt sich keine saisonale Abhängigkeit erkennen.

Waldbrände mit natürlichen Ursachen fehlten im Malcantone ganz. Ebenso gab es keine Waldbrände durch Funkenflug der Eisenbahn oder durch Kurzschluss. Nur sehr wenige Feuer entstanden durch das Militär oder grenzüberschreitend von Italien her.

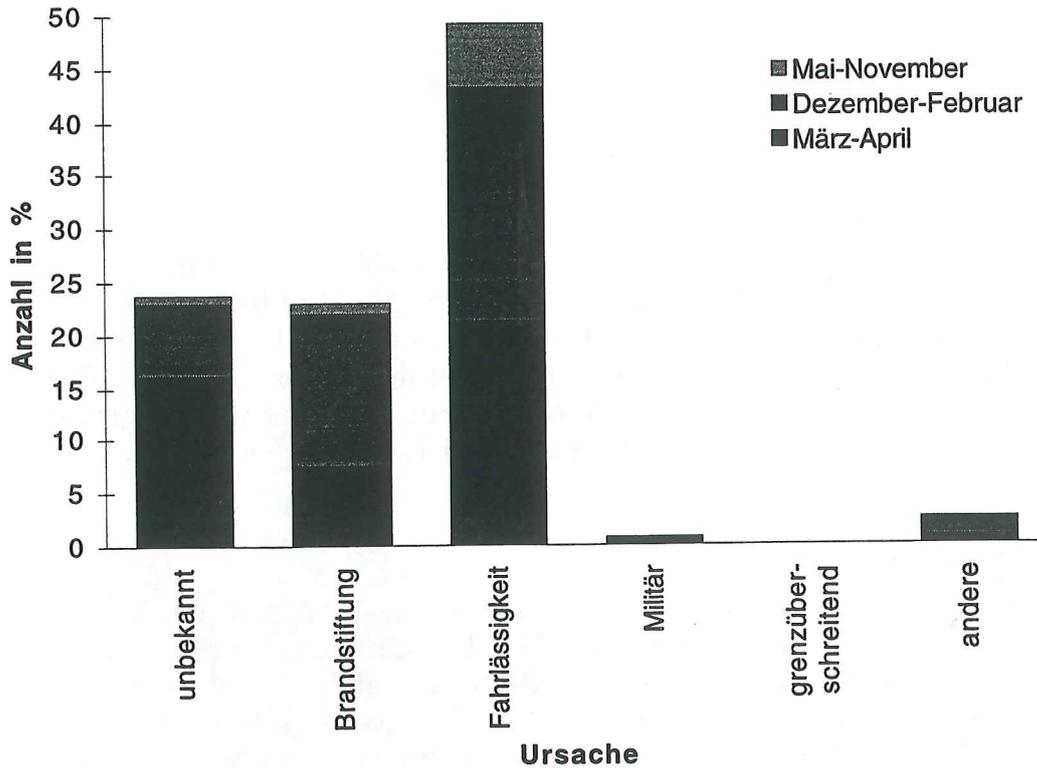


Fig. 22: Anzahl der Waldbrände nach Ursachen und Waldbrandsaison im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Auf der Alpensüdseite hatte ein Achtel der Waldbrände eine natürliche Ursache. Auffällig dabei ist die saisonale Verteilung: Die meisten Blitzschläge traten im Sommer auf (Fig. 23). Brandstiftung war weit weniger häufig als im Malcantone. Sehr viele Waldbrände waren unbekanntes Ursprungs. Etwa gleich häufig waren Feuer, die durch Fahrlässigkeit entstanden. Eisenbahnen verursachten fast fünf Prozent der Feuer.

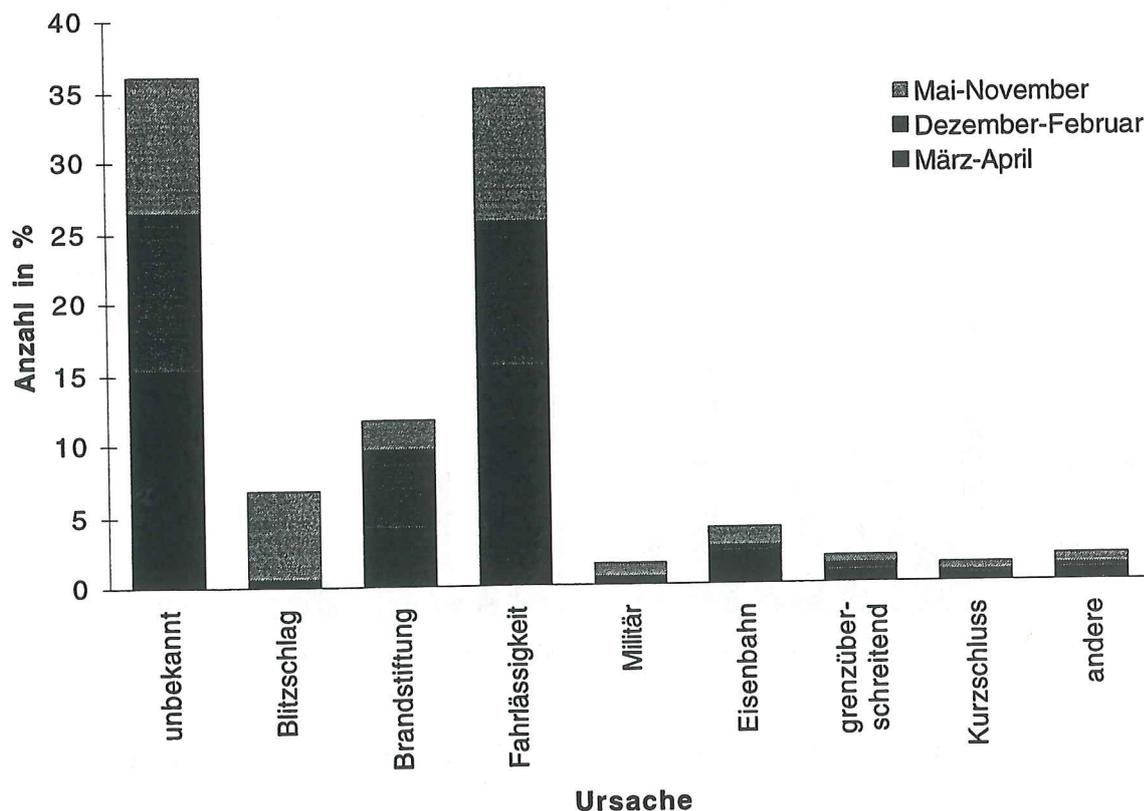


Fig. 23: Anzahl der Waldbrände nach Ursachen und Waldbrandsaison auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Vergleicht man die Waldbrandhäufigkeiten des Malcantone mit denjenigen der Alpensüdseite, so fällt auf, dass es im Malcantone keine Feuer durch Blitzschläge gab, auf der Alpensüdseite dagegen waren es ca. 7%. Die sehr geringe Anzahl Waldbrände mit natürlicher Ursache hängt mit der Verteilung der Blitzschläge über ein Jahr zusammen. In der Zeit, in der die grösste Waldbrandgefahr herrscht, treten fast keine Gewitter auf. Im Sommer, wenn Gewitter häufig sind, ist das Brandgut feucht und daher schwerer entflammbar, sodass nur wenige Feuer überhaupt entstehen können.

Man nimmt an, dass es sich beim grössten Teil der Waldbrände mit unbekannter Ursache um nicht nachweisbare Brandstiftung handele. Damit würden auf der Alpensüdseite 93%, im Malcantone sogar 100% der Feuer durch Menschen verursacht.

Die Anzahl der Waldbrände, die durch Fahrlässigkeit oder durch die Eisenbahn verursacht wurden, ist dank wiederholten Informationskampagnen und dem Bau von Mauern entlang der Bahngeleise in den letzten Jahren zurückgegangen. Interessant ist auch, dass es im Malcantone viel mehr Fälle von nachgewiesener Brandstiftung gab als auf der ganzen Alpensüdseite.

5.1.5 Exposition

Durchschnittlich pro Feuer betroffene Fläche nach Waldbrandsaison

Gemäss Datenbank waren auf der Alpensüdseite die Süd- und Südwestlagen am stärksten von Waldbränden betroffen (Fig. 24). Deutlich die kleinsten Flächen pro Waldbrand verbrannten in flachen Gebieten. Etwas weniger als im Durchschnitt verbrannte der Wald an West- und Nordhängen.

Nordwest-, Südwest- und Nordostlagen waren zwischen Dezember und Februar stärker betroffen als während des Rests des Jahres. In den Monaten Mai bis November traten die grössten Waldbrände an süd- und ostexponierten Hängen auf.

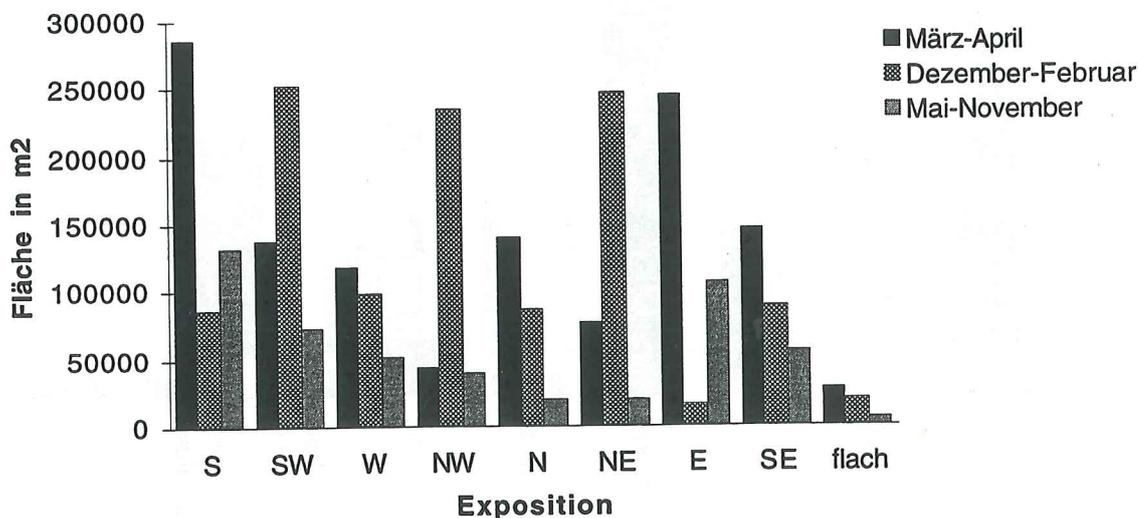


Fig. 24: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Exposition auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Im Malcantone waren laut Datenbank Süd- und Südostexpositionen am stärksten von Waldbränden betroffen (Fig. 25). Ebenfalls grosse Flächen verbrannten an allen nordost- und ostexponierten Hängen. An Nordhängen sowie in flachen Gebieten verbrannte keine, bzw. fast keine Fläche. Die grössten Flächen in West-, Südost- und Nordostlagen verbrannten im März oder April. Zwischen Dezember und Februar brannte es vor allem an Südhängen. Ost- und Südostlagen waren überdurchschnittlich von November bis Mai gefährdet.

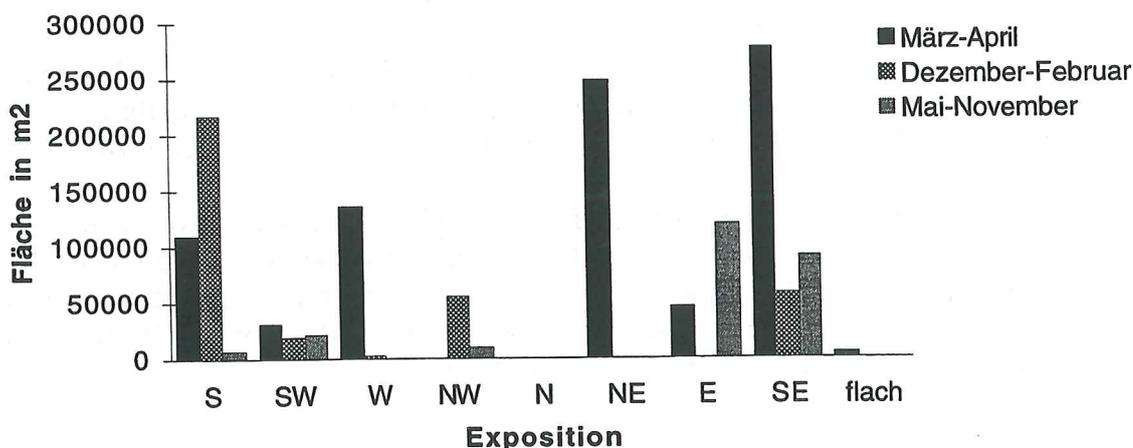


Fig. 25: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Gemäss GIS verbrannten weitaus die grössten Flächen in Süd- und Südostlagen (Fig. 26). West- und Ostlagen waren nur schwach von Waldbrand betroffen. Im

März und April, sowie zwischen Mai und November, verbrannte die grösste Fläche an südexponierten, etwas weniger an südostexponierten Hängen. Im März und im April verbrannte in südwestlichen Lagen ein Drittel der Fläche, die zur gleichen Zeit in Südlagen den Flammen zum Opfer fiel.

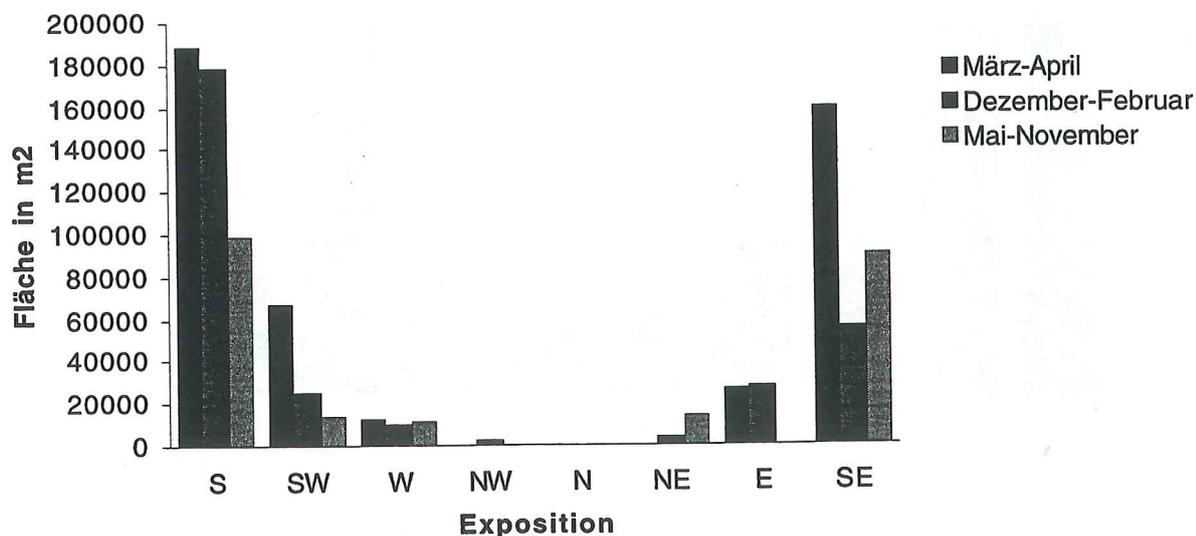


Fig. 26: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)

Die Grösse der Waldbrände und ihre Verteilung über die Expositionsklassen und die Waldbrandsaisons gemäss GIS und Datenbank waren ähnlich. Abweichungen bestanden hauptsächlich in den Nordost- und Westlagen zwischen März und April.

Für die durchschnittlich bei einem Feuer verbrannten Flächen spielt auf der Alpensüdseite die Südlage keine so starke Rolle wie im Malcantone.

Während Waldbrände im Malcantone in Nordlagen ganz fehlten, verbrannten auf der Alpensüdseite pro Brand fast die gleiche Fläche an nord- wie an westexponierten Hängen.

Die grossen Waldbrandflächen in südexponierten Lagen lassen sich auf die erhöhte Sonneneinstrahlung im Vergleich zu den anderen Lagen zurückführen. Dadurch sind sie viel trockener: Vegetation, Boden und Streuschicht enthalten weniger Wasser und sind dadurch leichter entzündbar. Nord- und westorientierte Hänge sind dank der kleinere Einstrahlung und der grösseren Niederschlagsmenge feuchter und daher weniger brandanfällig.

Vergleich der Anzahl mit der Fläche der Feuer

Auf der Alpensüdseite waren Feuer in allen Südlagen (Süd, Südwest und Südost) deutlich am häufigsten (Fig. 27). Auch die dabei verbrannte Fläche lag weit über dem Durchschnitt. An nord- und nordostexponierten Hängen sowie in flachen Gebieten waren Waldbrände relativ selten.

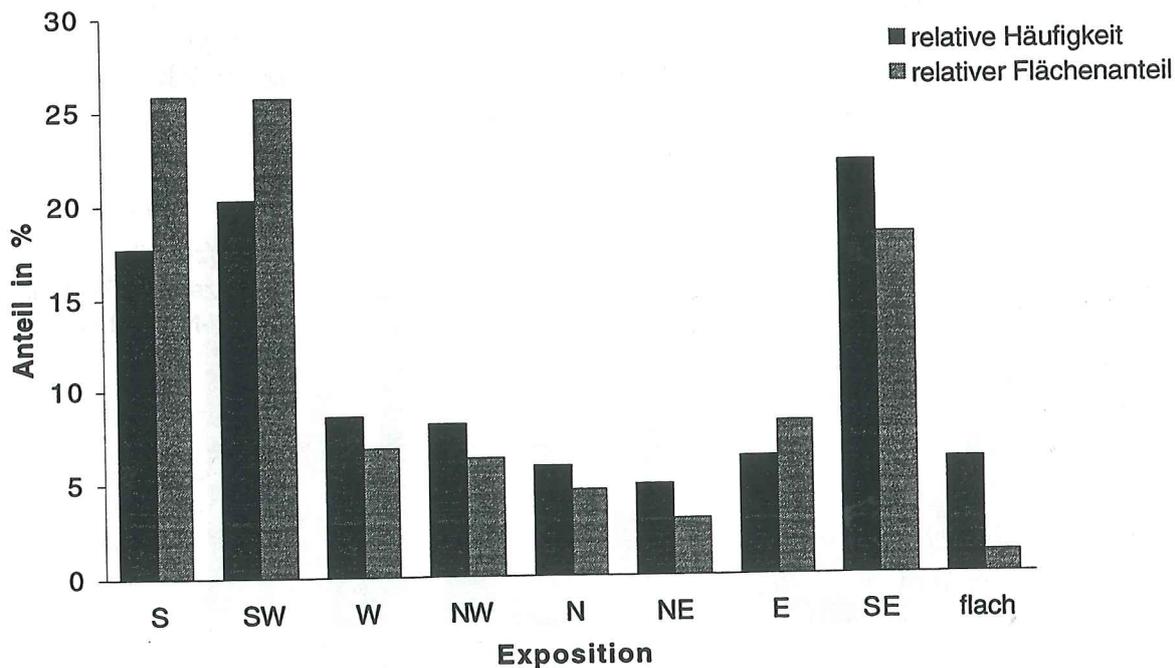


Fig. 27: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Exposition auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Im Malcantone traten die Waldbrände am häufigsten in Süd-, Südost und Südwestlagen auf (Fig. 28). An den süd- und den südwestexponierten Hängen verbrannte 75% der gesamten Fläche.

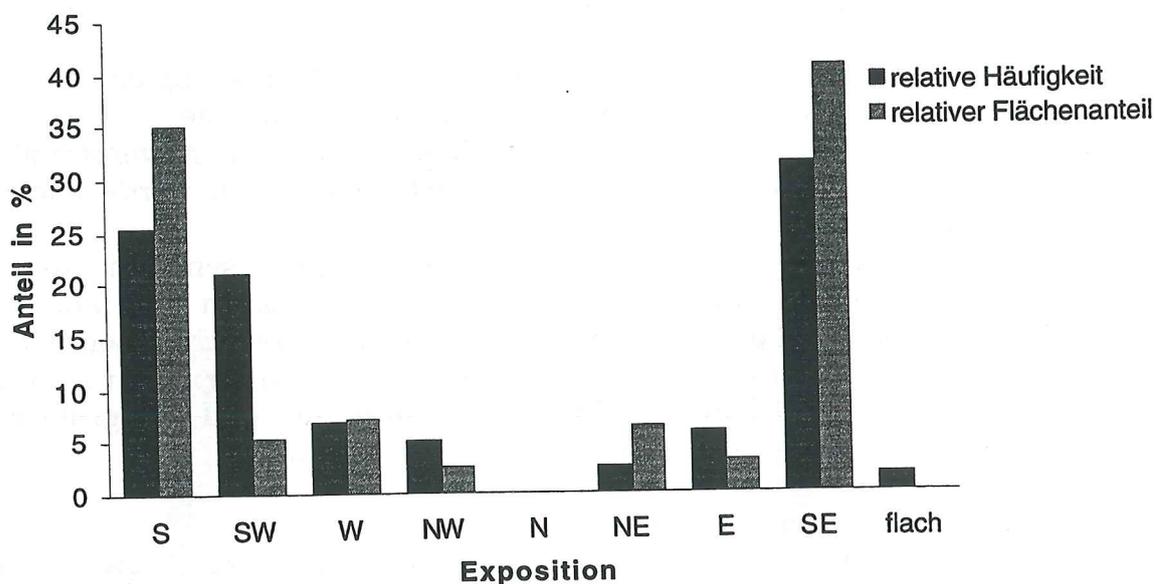


Fig. 28: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Gemäss GIS lagen etwa 58% der gesamten von Feuern betroffenen Flächen an Südhängen, weitere 30% in südostexponierten Lagen (Fig. 29). Die übrigen Gebiete waren nur schwach betroffen.

Die Anzahl der Waldbrände verteilt sich eher gleichmässig über mehrere Lagen: An süd- und südostexponierten Hängen waren es je ca. 30% der Feuer, in südwestlichen und östlichen Lagen je ungefähr 15%, Nordlagen waren gar nicht betroffen.

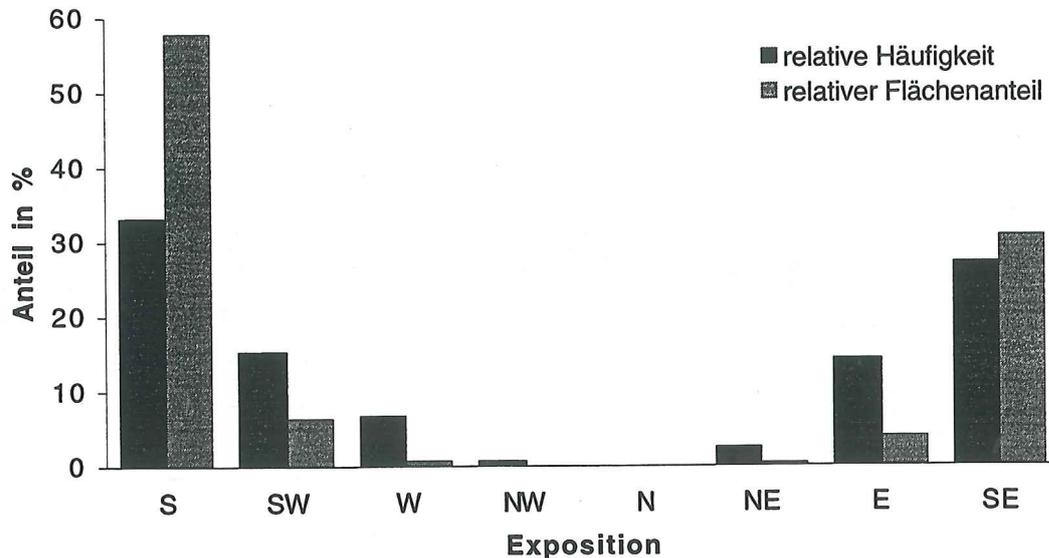


Fig. 29: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Exposition im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)

Beim Vergleich der Angaben für die Exposition ergab sich ein gemeinsamer Trend für die Auswertungen aus der Datenbank und aus dem GIS (Fig. 28 und Fig. 29). Grosse Abweichungen liessen sich nur beim Anteil der verbrannten Flächen in Südlagen (GIS: 58%, Datenbank: 35%) feststellen.

Einzig in den flachen Gebieten und an Nordhängen waren Unterschiede zwischen den Waldbrandereignissen im Malcantone und auf der Alpensüdseite festzustellen. In diesen Lagen wurden im Malcantone fast keine Ereignisse registriert. Vermutlich sind sie flächenmässig nur sehr schwach vertreten.

5.1.6 Höhenstufen

Durchschnittlich pro Feuer betroffene Fläche nach Waldbrandsaison

Auf der Alpensüdseite nahm die durchschnittliche Fläche pro Waldbrand zwischen 1969 und 1993 tendenziell bis auf 1000 m.ü.M. zu, danach für grössere Höhen in unregelmässigen Schritten wieder ab (Fig. 30). Dabei fällt auf, dass zwischen den relativen Maxima auf 1200 - 1300 m.ü.M., 1500 - 1600 m.ü.M. und 1700 - 1800 m.ü.M. jeweils wesentlich tiefere Werte lagen.

Im März und April war die pro Waldbrand im Durchschnitt verbrannte Fläche auf 1700 - 1800 m.ü.M. am grössten.

Drei der Spitzenwerte, die neben dem allgemeinen Trend auffallen, traten in den Wintermonaten auf. Zu diesen Zeiten waren auch die betroffenen Flächen über 1800 m.ü.M. überdurchschnittlich gross.

In den Sommer- und Herbstmonaten waren die Feuer in allen Höhenstufen im Durchschnitt jeweils von einer ähnlichen Ausdehnung.

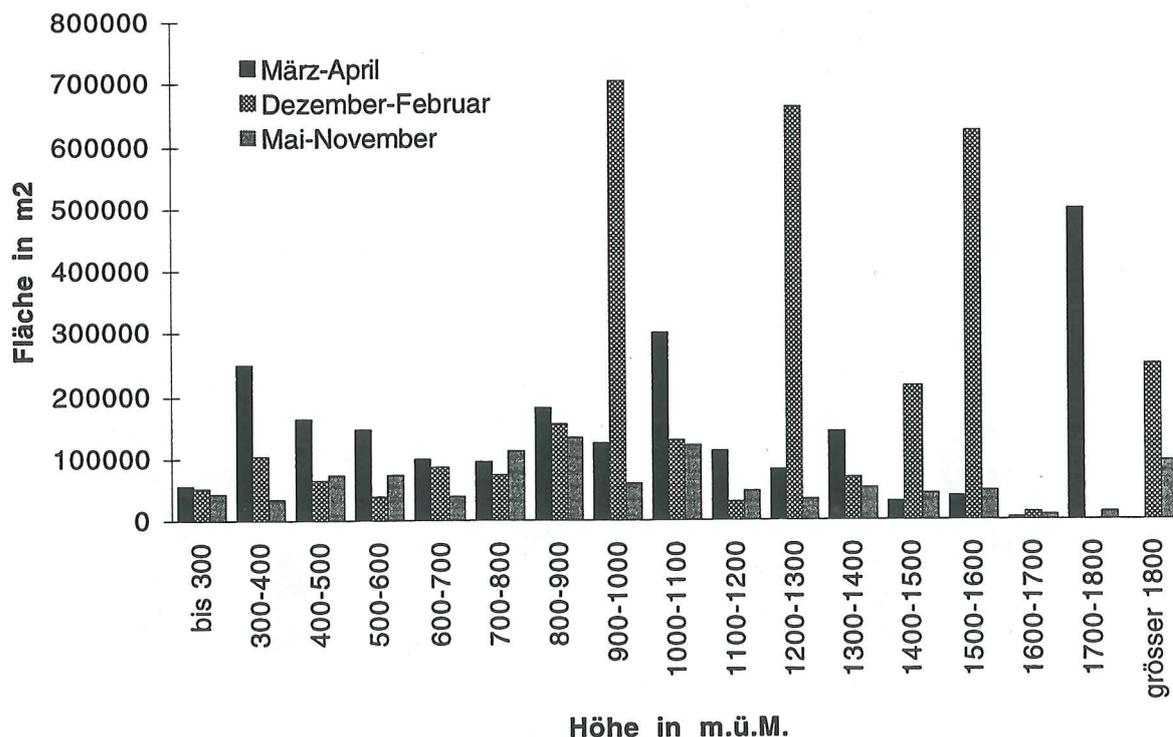


Fig. 30: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Höhe über Meer auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Auch im Malcantone nimmt die Ausdehnung pro Schadenereignis im Durchschnitt mit zunehmender Höhe zu. Sämtliche Spitzenwerte werden jedoch in den Monaten März und April erreicht, mit Ausnahme der Höhenstufe 1400 - 1500 m.ü.M., welche die flächenmässig grössten Waldbrände laut Datenbank in den Monaten Mai bis November verzeichnet. Nur durchschnittlich etwa halb so gross waren die verbrannten Flächen im gleichen Zeitraum auf den Höhen 1000 - 1100 m.ü.M. und zwischen 1300 und 1400 m.ü.M.. Auf den übrigen Höhenstufen fallen Feuer in diesen Höhen nicht ins Gewicht.

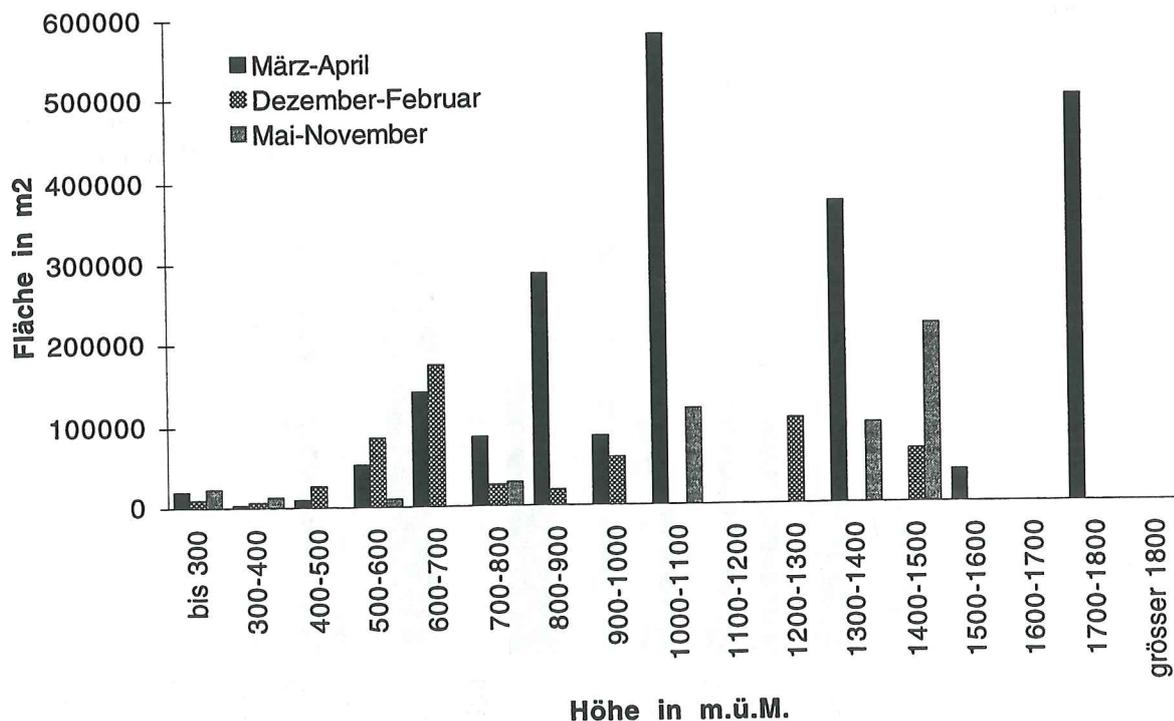


Fig. 31: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Höhe über Meer im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Auf der Alpensüdseite verbrannte die gleiche Fläche pro Waldbrand zwischen 1700 - 1800 m.ü.M. wie im Malcantone. Ebenfalls gemeinsam sind die kleinen Flächen, die auf der Höhe von 1100 m.ü.M. bis 1200 m.ü.M. und 1600 - 1700 m.ü.M. durchschnittlich verbrannten. Das Maximum auf der Alpensüdseite ist im Vergleich zum Malcantone um hundert Meter nach unten verschoben auf 900 - 1000 m.ü.M.. Bei der Verteilung über die verschiedenen Waldbrandsaisons lässt sich kein gemeinsamer Trend feststellen, mit Ausnahme der schon oben erwähnten Höhenstufe 1700 - 1800 m.ü.M.. Waldbrandsaison auf dieser Höhe ist der Frühling.

Gemäss GIS traten im März und April die grössten Waldbrände auf 700 - 800 m.ü.M., 900 - 1100 m.ü.M., 1200 - 1300 m.ü.M. und 1400 - 1500 m.ü.M. auf (Fig. 32). Die anderen Höhenlagen waren viel weniger betroffen. Von 1400 m.ü.M. bis 1600 m.ü.M. wurden nur noch zu dieser Jahreszeit Waldbrände registriert.

Im Durchschnitt viel kleinere Flächen verbrannten zwischen Dezember und Februar. Die am stärksten betroffene Höhenstufe liegt auf 600 - 700 m.ü.M.. Je etwa halb so gross waren die betroffenen Flächen in den Klassen 1000 - 1100 m.ü.M. und 1200 - 1300 m.ü.M..

Zwischen Mai und November waren die grössten Waldbrände auf 1000 - 1100 m.ü.M. und auf 1200 - 1300 m.ü.M. zu verzeichnen.

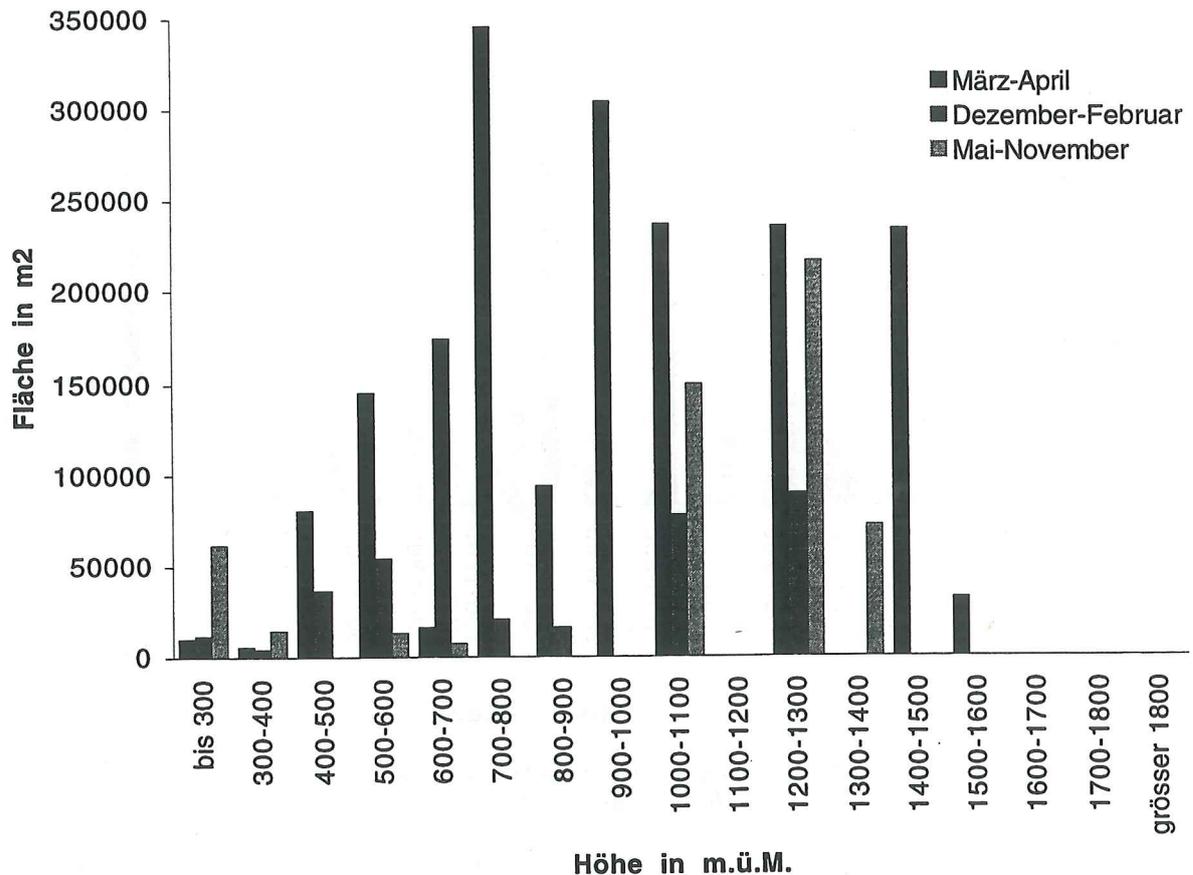


Fig. 32: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Höhe im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)

Auch für die Höhenstufen lässt sich ein gemeinsamer Trend zwischen den Auswertungen des GIS und der Datenbank feststellen, auch wenn grössere Unterschiede auffallen (Fig. 32 und Fig. 31). Bis 500 m und ab 800 m sind die Verteilungen aus dem GIS und der Datenbank einander sehr ähnlich.

Vergleich der Anzahl mit der Fläche der Feuer

Da mit zunehmender Höhe die Waldfläche abnimmt, stellt man auf der Alpensüdseite mit zunehmender Höhe (Fig. 33) eine ebenfalls abnehmende Tendenz der Waldbrandhäufigkeit und der dabei verbrannten Fläche fest. Auch der Einfluss der Menschen nimmt mit zunehmender Höhe ab. Siedlungsgebiete und Strassen, von wo aus die meisten Feuer beginnen, liegen hauptsächlich in tieferen Lagen. Der grösste betroffene Flächenanteil lag mit 17% auf einer Höhe von 300 - 400 m.ü.M., der grösste Anteil an der Anzahl mit knapp 16% auf 400 - 500 m.ü.M..

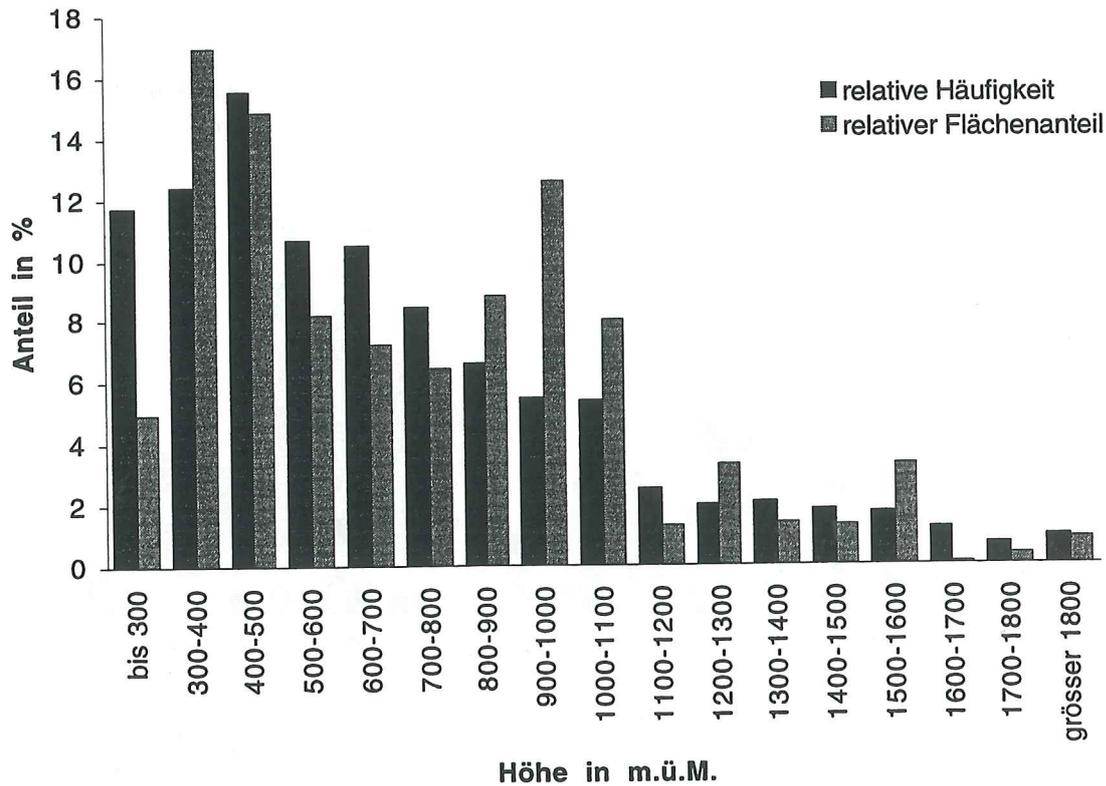


Fig. 33: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Höhe über Meer auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Waren Waldbrände im Malcantone gemäss Angaben der Datenbank in tiefen Lagen noch recht häufig, so verbrannte dort nur eine kleine Fläche (Fig. 34). Dies lässt sich mit fehlendem Brandgut in den tiefen Lagen erklären, da sich dort nämlich hauptsächlich Siedlungsgebiete befinden. Bei den wenigen vorkommenden Bränden kann wegen der guten Einsehbarkeit des Geländes und der ebenfalls guten Erreichbarkeit sehr früh bekämpft werden.

Zwischen 600 m.ü.M. und 700 m.ü.M. erreichten die betroffene Fläche bei 40% und die Anzahl der Brände ein Maximum mit 25%.

Die Verteilung - sowohl für die Anzahl als auch für die Fläche - ist bimodal. Ein schwaches sekundäres Maximum liegt zwischen 1300 m.ü.M. und 1400 m.ü.M..

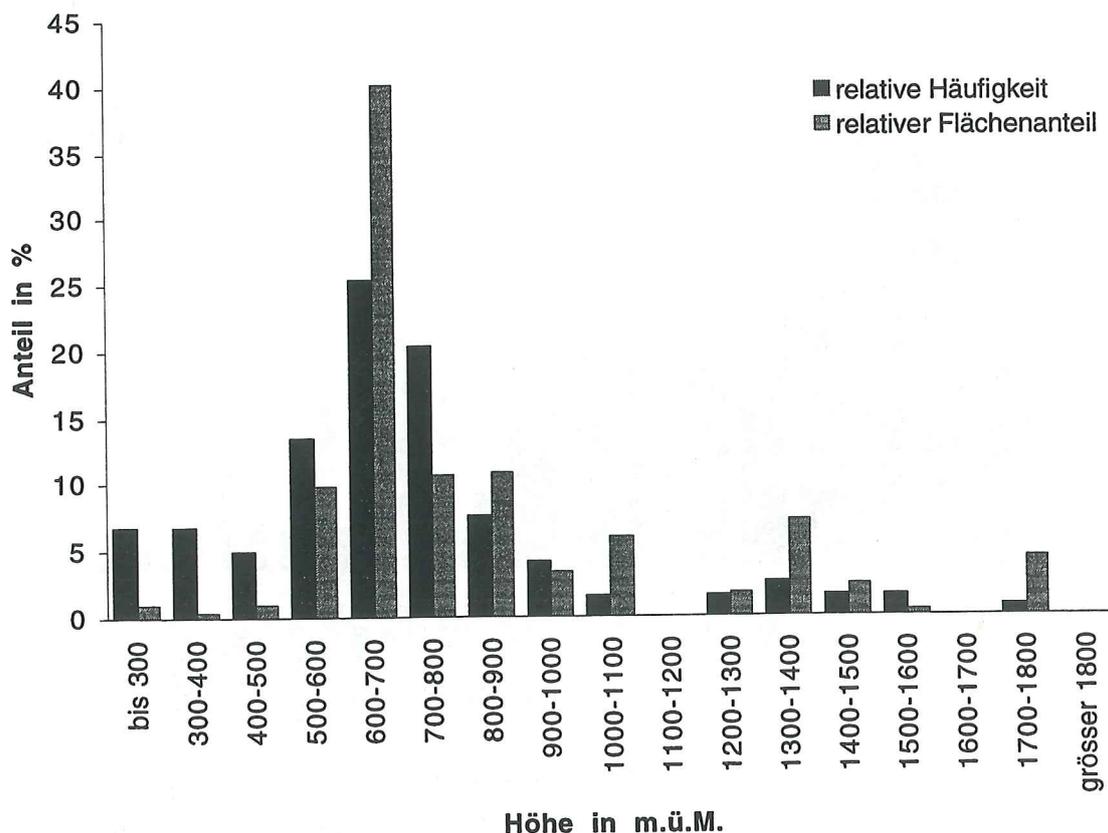


Fig. 34: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Höhe über Meer im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Im Malcantone fehlten, verglichen mit der Alpensüdseite, die häufigen Waldbrände in den tiefen Lagen. Sie konzentrierten sich primär auf eine Höhenstufe (600 - 700 m.ü.M.)

Auf 1100 - 1200 m.ü.M. und auf über 1600 m.ü.M. kamen gemäss GIS (Fig. 35) keine Waldbrände im Malcantone vor. Am häufigsten waren sie zwischen 500 - 600 m.ü.M.. Mit zunehmender Höhe nahm die Anzahl stetig ab. Zwar kamen Feuer unter 500 m.ü.M. vor, der Flächenanteil war dort jedoch sehr klein. Der grösste Anteil der Waldfläche verbrannte auf 700 - 800 m.ü.M. (ca. 24%). Um die 40% waren zwischen 500 m.ü.M. und 700 m.ü.M. betroffen.

Waldbrände kamen hauptsächlich zwischen 500 m.ü.M. und 800 m.ü.M. vor. In den übrigen Höhenlagen waren sie weit weniger häufig, und der Anteil der betroffenen Fläche war viel kleiner.

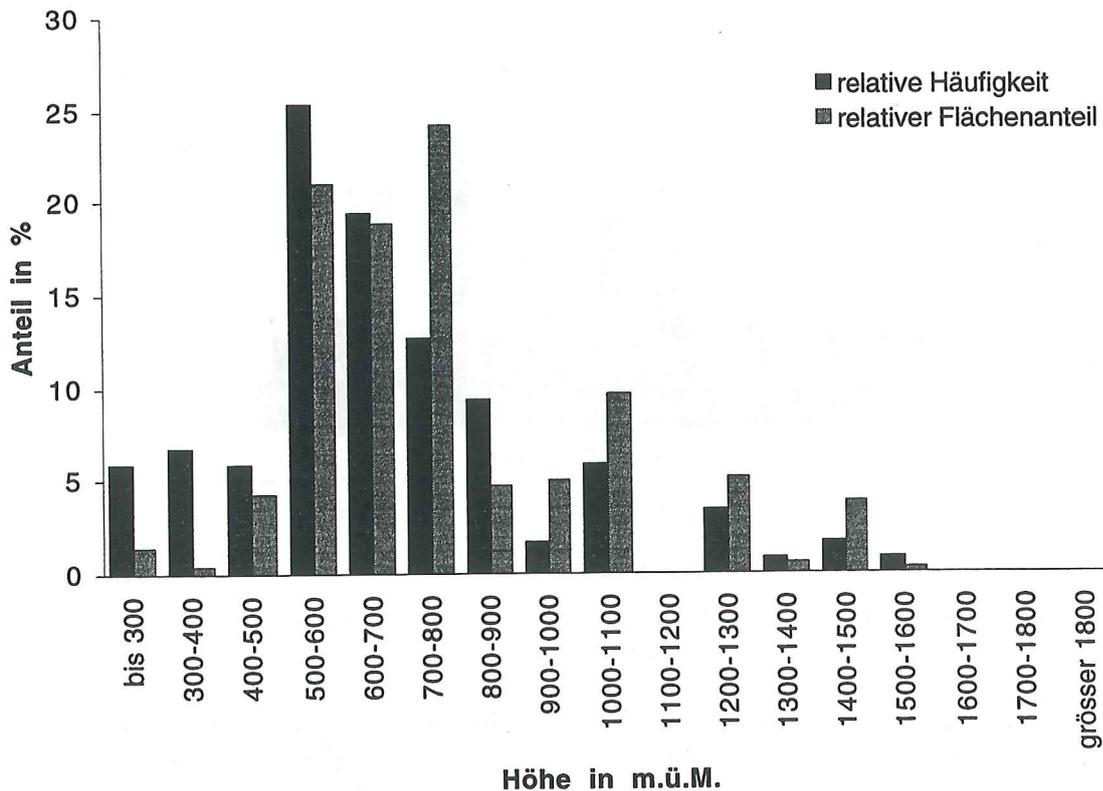


Fig. 35: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Höhe im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)

Die Auswertungen des GIS und der Datenbank erzeugen eine hohe Übereinstimmung. Einzig in Lagen über 1600 m.ü.M. wurden im GIS keine Waldbrände mehr erfasst. Es ist möglich, dass diese Lagen im Malcantone flächenmässig sehr klein sind. Die Verschiebung aller Maxima der Auswertungen aus dem GIS um 100 m nach unten, im Vergleich zu denen der Datenbank, ist möglicherweise auf die schlechte Auflösung des verwendeten Geländemodells (RIMINI) zurückzuführen.

5.1.7 Hangneigung

Durchschnittlich pro Feuer betroffene Fläche nach Waldbrandsaison

Auf der Alpensüdseite lässt sich keine ausgeprägt saisonale Verteilung der Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Hangneigung feststellen (Fig. 36). Es lässt sich jedoch eine Zunahme der verbrannten Fläche mit zunehmender Steigung erkennen. Die grössten Feuer brannten bei 70% - 80% Steigung. Obwohl sich Feuer in steilen Gebieten schneller ausbreiten als in flachen, nimmt in Gebieten mit sehr grosser Steigung die durchschnittlich betroffene Fläche ab. Dies ist dadurch bedingt, dass die gesamte Landfläche in diesen Hangneigungsklassen kleiner ist.

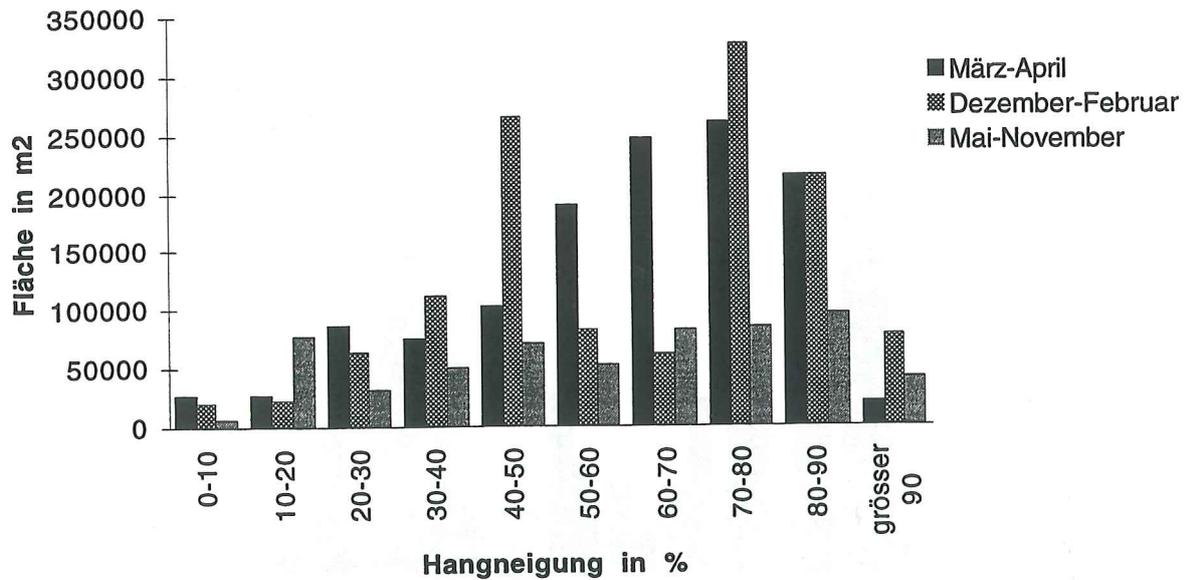


Fig. 36: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Hangneigung auf der Alpensüdseite (nach Datenbank)

Im Malcantone brannten im März und April (Fig. 37) die grössten Feuer bei einer Hangneigung von 50% bis 60% (Angaben der Datenbank). Sowohl in steileren, als auch in flacheren Gebieten nahm die durchschnittliche Ausdehnung der Waldbrände ab.

Zwischen Dezember und Februar gab es zwei Maxima, eines bei 40% - 50% das andere bei 60%-70%. Dazwischen lag ein markanter Einbruch.

Von Mai bis November verbrannte die durchschnittlich grösste Fläche pro Waldbrand eindeutig an Hängen mit 60% - 70% Steigung, für alle anderen Hangneigungen waren die betroffenen Flächen durchschnittlich sehr viel kleiner.

Nur von sehr kleinen Feuern betroffen waren sehr flache und sehr steile Gebiete: Steile Gebiete sind nur wenige vorhanden, in flachen brennen Feuer nur sehr schwach (Kap. 2.2.4).

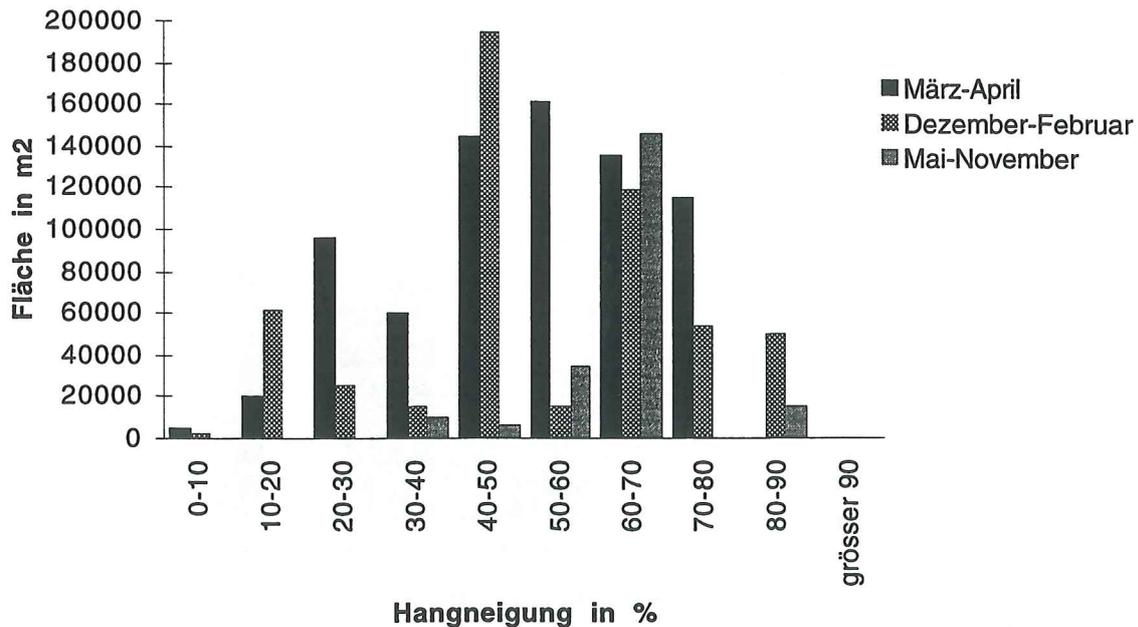


Fig. 37: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Gemeinsam sind dem Malcantone und der Alpensüdseite die grossen pro Waldbrand betroffenen Flächen zwischen 40% und 50% Hangneigung zwischen Dezember und Februar. Da in flachen Gebieten Feuer sich viel langsamer ausbreiten als in steilen, ist der Anteil der verbrannten Flächen in ebenen oder fast ebenen Gebieten klein.

Auf der Alpensüdseite verbrannten auch in den steilsten Gebieten noch grössere Flächen, im Malcantone fehlten Feuer dort jedoch ganz.

Im März und April traten, gemäss Auswertungen mit dem GIS, die grössten Waldbrände an Hängen mit 40 - 50% Steigung (ca. 340000 m²) auf (Fig. 38). Nur noch halb so viel verbrannte durchschnittlich zur gleichen Zeit in Gebieten mit 30 - 40% Neigung. Fast gleich grosse Flächen waren im Schnitt dort zwischen Dezember und Februar pro Brand betroffen.

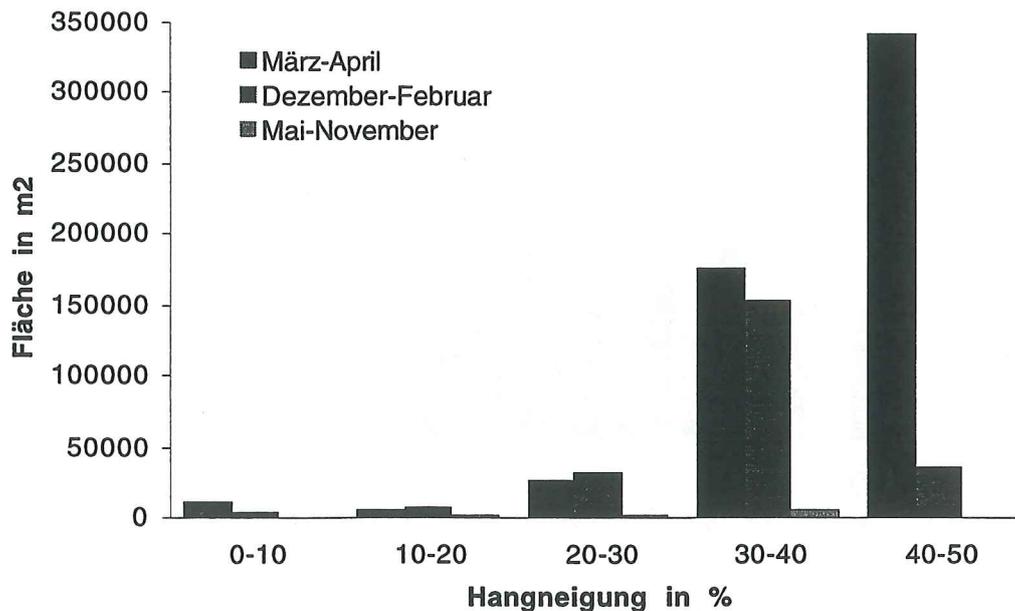


Fig. 38: Fläche pro Waldbrand in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)

In den steilsten Lagen des Malcantone wurden nur wenige Feuer erfasst. Dies hängt mit dem digitalen Geländemodell zusammen, welches für die Berechnung verwendet wurde. Das RIMINI hat eine sehr grobe Auflösung (250 m) und ist deshalb nicht in der Lage, steiles Gelände, das seine Neigung kleinräumig sehr stark verändert, richtig abzubilden. Die Gebiete mit grosser Steigung wurden daher alle einer Klasse mit kleinerer Steigung zugeordnet.

Vergleich der Anzahl mit der Fläche der Feuer

Die Häufigkeitsverteilungen von Fläche und Anzahl der Waldbrände auf der Alpensüdseite in Abhängigkeit der Hangneigung erinnern ebenfalls an eine Gaussverteilung (Fig. 39). Zusätzlich findet man ein relatives Maximum für flache Gebiete in der Anzahl der Waldbrände.

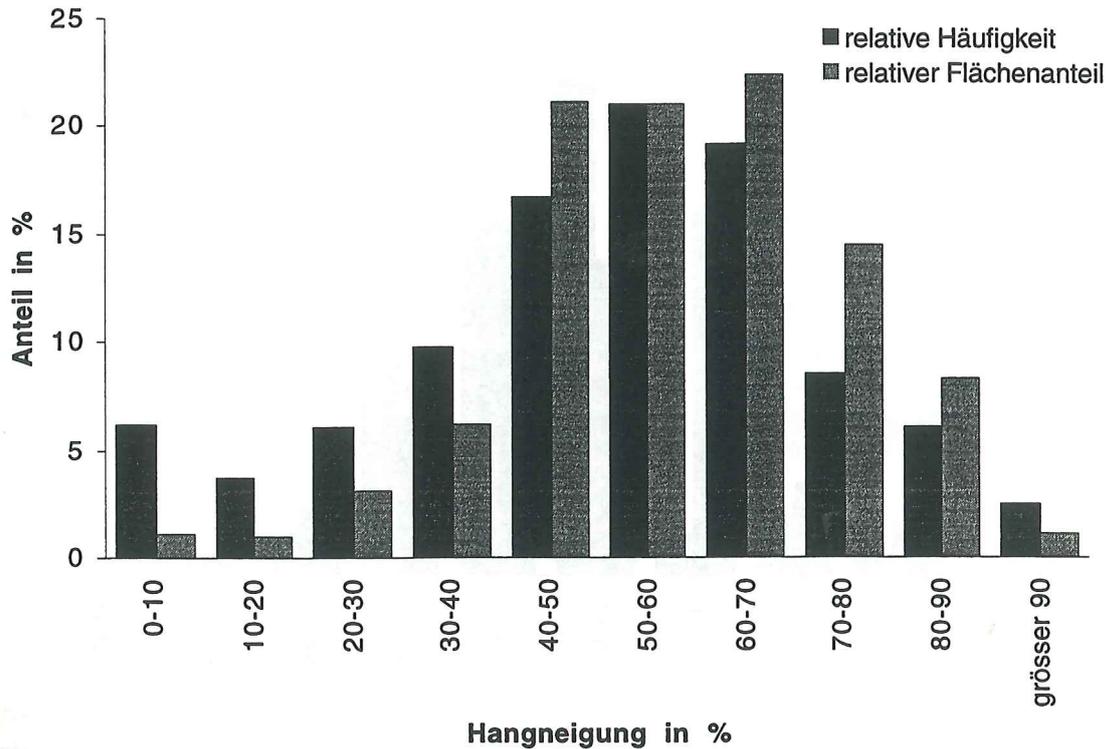


Fig. 39: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Hangneigung auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Die Anzahl der Waldbrände im Malcantone in Abhängigkeit von der Hangneigung (Fig. 40) scheint fast normalverteilt zu sein. Das Maximum liegt bei 50% - 60%. Auch die Verteilung der Fläche erinnert an eine Normalverteilung. Das Maximum ist hier gegenüber jenem der Anzahl leicht nach unten verschoben und liegt zwischen 40% - 50%.

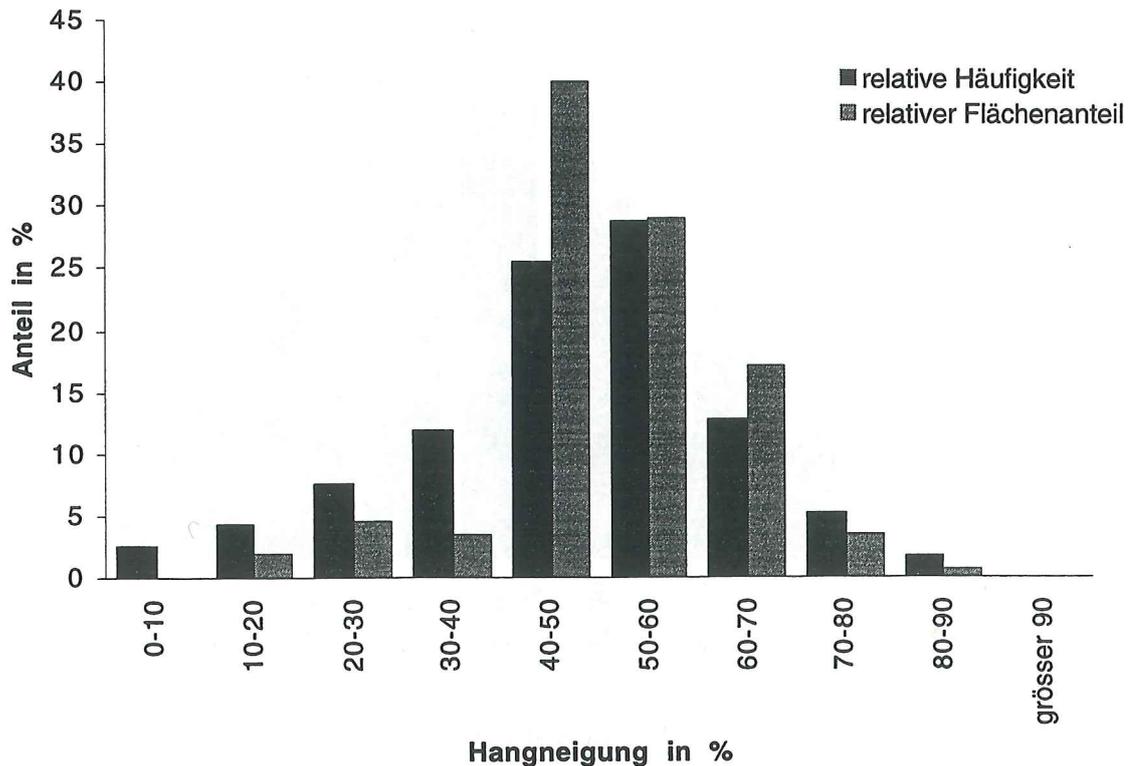


Fig. 40: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach Datenbank)

Die Form der Verteilungen sind im Malcantone und auf der Alpensüdseite sowohl für die Anzahl, als auch für die Flächen, sehr ähnlich. Die Maxima der Flächen dagegen sind leicht verschoben: Während das Maximum im Malcantone bei 40% - 50% ist, liegt es auf der Alpensüdseite bei 60% - 70%.

Die Auswertungen mit GIS zeigen, dass im Malcantone bis 20% Steigung nur ein sehr kleiner Anteil der Fläche verbrannt ist (Fig. 41). Auch bis 30% waren es noch weniger als 10% der gesamten betroffenen Fläche. Etwa 65% der Fläche verbrannten an den Hängen mit 30 - 40% Steigung, knapp 30% an Hängen mit 40% - 50% Neigung.

Betrachtet man dagegen die Anzahl der Feuer, so sieht man einen gleichmässigen Anstieg von 5% aller Feuer in Gebieten mit bis zu 10% Steigung auf ungefähr 40% der aufgetretenen Waldbrände in Gebieten bis 40% Steigung. Nur noch knapp 20% aller Ereignisse fanden an Hängen mit 40 - 50% Neigung statt.

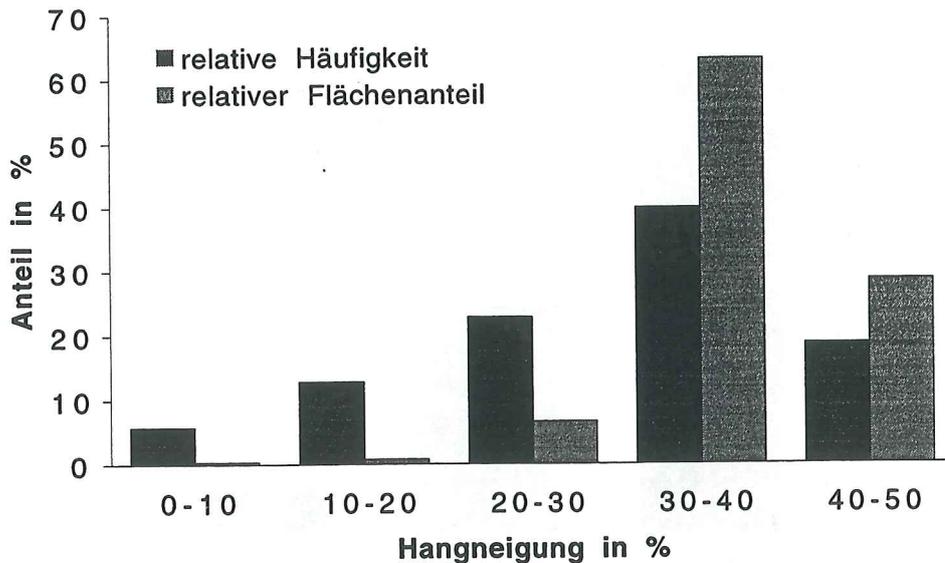


Fig. 41: Vergleich der Fläche mit der Anzahl der Waldbrände in Abhängigkeit der Hangneigung im Malcantone von 1969 - 1993 (nach GIS)

Ausser für die flachen Gebiete lassen sich keine Gemeinsamkeiten in der Verteilung der Waldbrände auf die Hangneigungsklassen aus GIS und Datenbank feststellen (Fig. 41 und Fig. 40). Dies lässt sich ebenfalls mit den Ungenauigkeiten, die durch die Verwendung des digitalen Geländemodells RIMINI entstehen, erklären (s.o.).

5.1.8 Landnutzung und Vegetation

Da die Angaben der Datenbank sich auf andere Grundlagen beziehen (Angaben des Forstdienstes) als die Daten des GIS (Vegetationskarte (RYF 1992)), sind die vorhandenen Daten nicht direkt miteinander vergleichbar. Zudem enthält die Datenbank Angaben über den Nutzungstyp, nicht aber über die vorherrschende Vegetation wie die Vegetationskarte. Damit keine Informationen verloren gingen, wurden die Brände sowohl in bezug auf die Landnutzung (Datenbank) als auch die Vegetation (GIS) ausgewertet, die Resultate jedoch nicht miteinander verglichen.

Landnutzung

Von den Landnutzungstypen (Datenbank) war der Wald mit einem Anteil von 63% an der im Malcantone verbrannten Fläche am stärksten betroffen (Fig. 42). Der Anteil von total verbrannter Weidefläche ist dank der geringere Ausdehnung des Weidelandes viel kleiner: Etwas mehr als ein Drittel der verbrannten Fläche war Weide. Kaum ins Gewicht fallen Feuer auf unproduktiven Flächen.

Fast die Hälfte des von Feuer betroffenen Waldes verbrannte von Dezember bis Februar. Zwischen Mai und November verbrannte dreimal mehr Weideland als Wald.

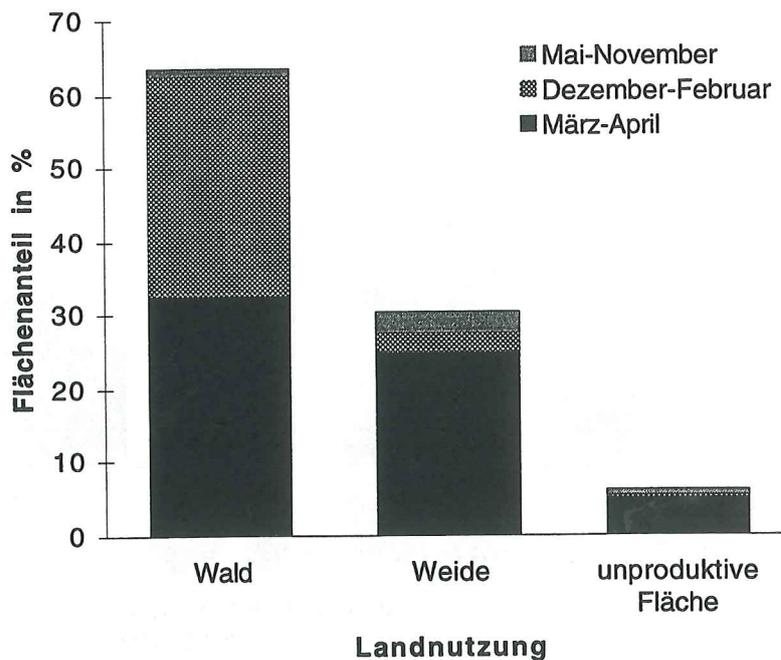


Fig. 42: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Landnutzung im Malcantone von 1969 - 1993

Auf der Alpensüdseite verbrannte etwas mehr als doppelt so viel Wald als Weide (Fig. 43). Der Anteil der unproduktiven Fläche an der verbrannten Fläche liegt bei 13%.

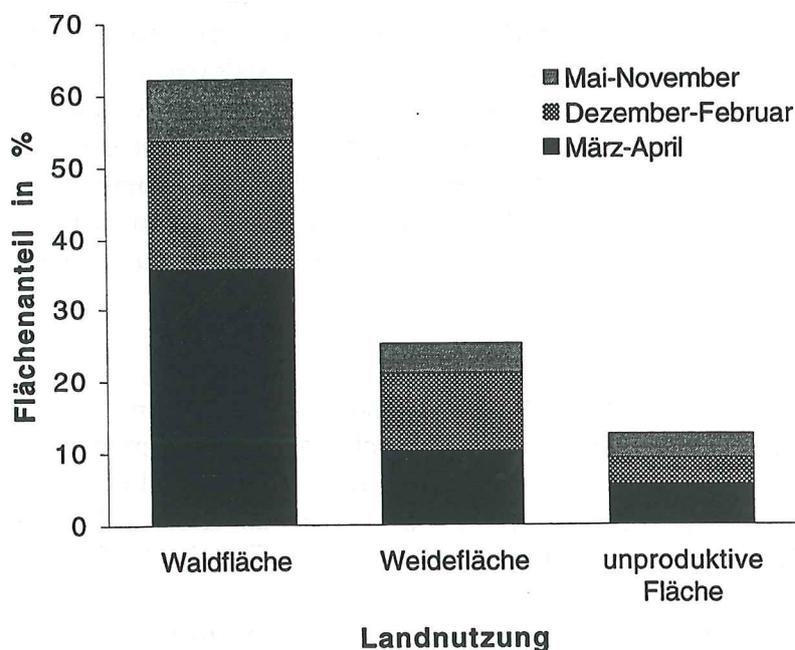


Fig. 43: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Landnutzung auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993

Im Malcantone und auf der Alpensüdseite war der Anteil des Waldes an der pro Jahr verbrannten Fläche etwa gleich. Auf der Alpensüdseite brannten prozentual

mehr unproduktive Flächen als im Malcantone, der Anteil der Weidefläche am gesamten Gebiet war dafür etwas kleiner.

Es gibt jedoch eine saisonale Verschiebung: Im Malcantone verbrannte im März und April etwa die gleich grosse Waldfläche wie zwischen Dezember und Februar. Fast alles Weideland dagegen war im März und April betroffen. Auf der Alpensüdseite verbrannte etwa gleich viel Weide zwischen März und April wie von Dezember bis Februar.

Über 70% des betroffenen Waldes im Malcantone war Niederwald (Fig. 44), der hauptsächlich aus Kastanien besteht. Mit den Selven zusammen waren fast 90% der verbrannten Fläche Kastanienwald. Auffällig ist, dass von Dezember bis Februar ungefähr gleich viel Wald verbrannte wie zwischen März und April, eine Tatsache, die sich auch aus Figur 42 herleiten lässt.

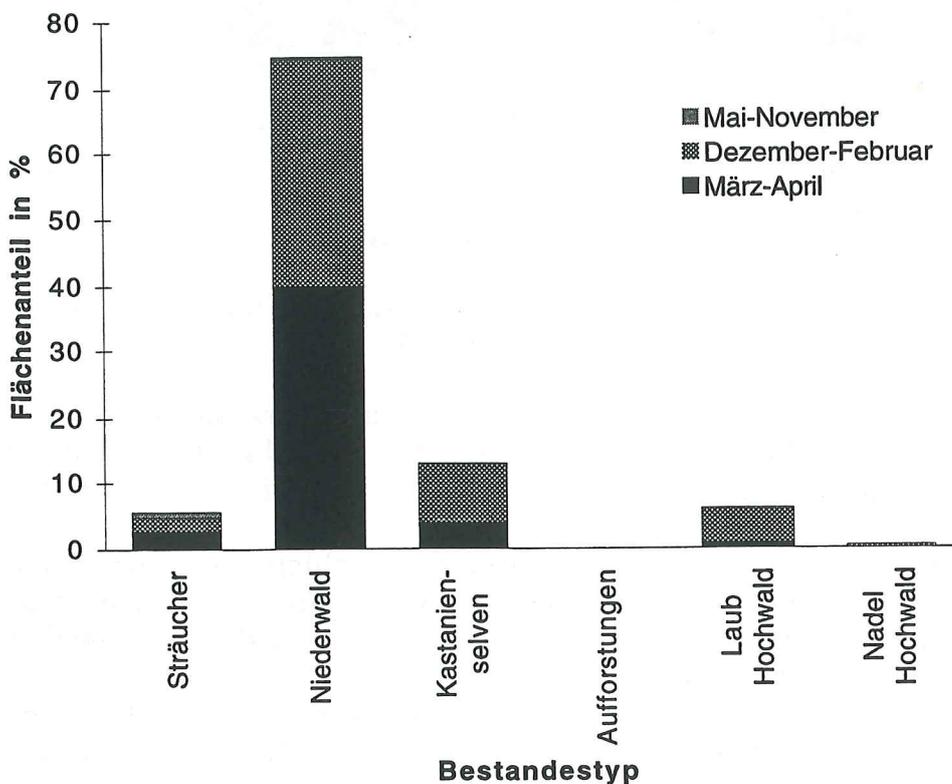


Fig. 44: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Bestandestyp im Malcantone von 1969 - 1993

Auch auf der Alpensüdseite verbrannte der grösste Flächenanteil im Niederwald (Fig. 45). Am zweitstärksten ist der Laubhochwald von Feuer betroffen. Ein ausgeprägt saisonaler Zusammenhang fehlt.

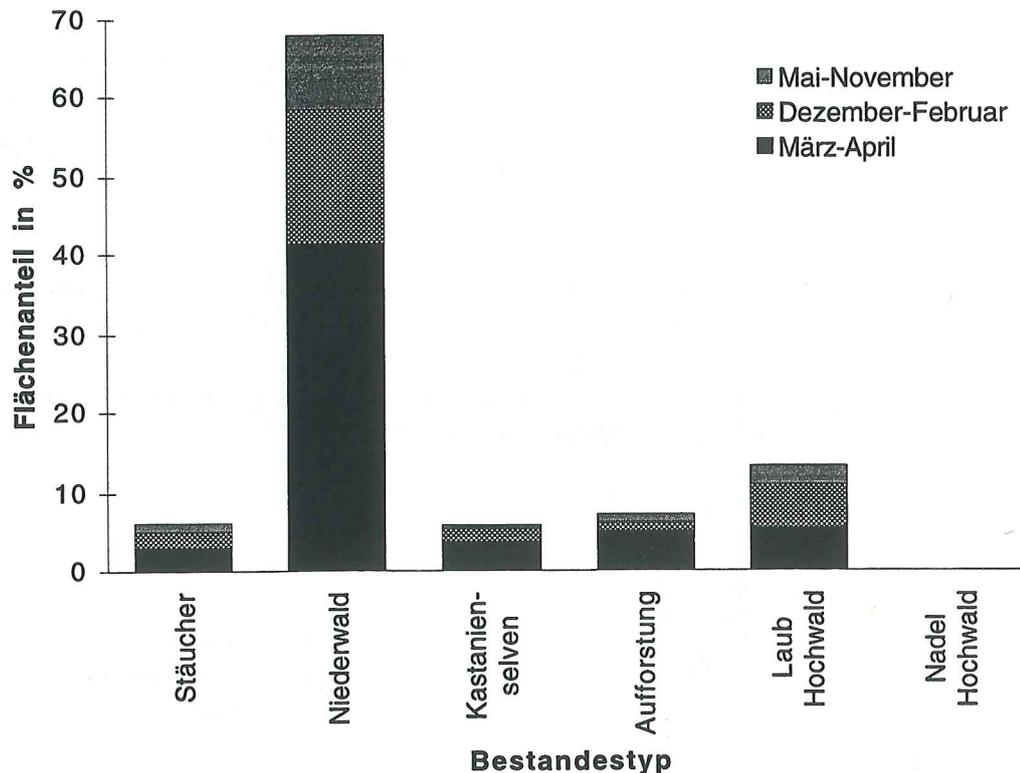


Fig. 45: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen nach Bestandestyp auf der Alpensüdseite von 1969 - 1993

Von allen Bestandestypen war der Niederwald am stärksten betroffen, der sich durch den feuerbegünstigenden Stockausschlag vermehrt. Der Niederwald der Alpensüdseite besteht zudem hauptsächlich aus Kastanien, deren Streu sehr gut brennt.

In Nadelhochwäldern dagegen ist die Streuschicht und die Menge des Unterholzes sehr klein. Lauffeuer, wie sie auf der ganzen Alpensüdseite typisch sind, können sich daher kaum ausbreiten. Der Anteil des Nadelwalds an der verbrannten Fläche ist daher sehr klein.

Im Gegensatz zur übrigen Alpensüdseite waren im Malcantone keine Aufforstungen von Waldbrand betroffen. Der Laubhochwald war auf der Alpensüdseite stärker, die Kastanienselven dagegen waren schwächer betroffen als im Malcantone.

Vegetation

Die Auswertungen aufgrund der Vegetationskarte mit dem GIS ergaben, dass Feuer in Nichtwald und in Kastanienwäldern von 1969 - 1993 am häufigsten waren (Fig. 46). Weit weniger häufig traten sie in Buchen-, reinen Laubwäldern und Kastanienselven auf. In Auenwäldern wurden keine Waldbrände registriert. Eine ausgeprägt saisonale Variation der Waldbrandereignisse fehlt.

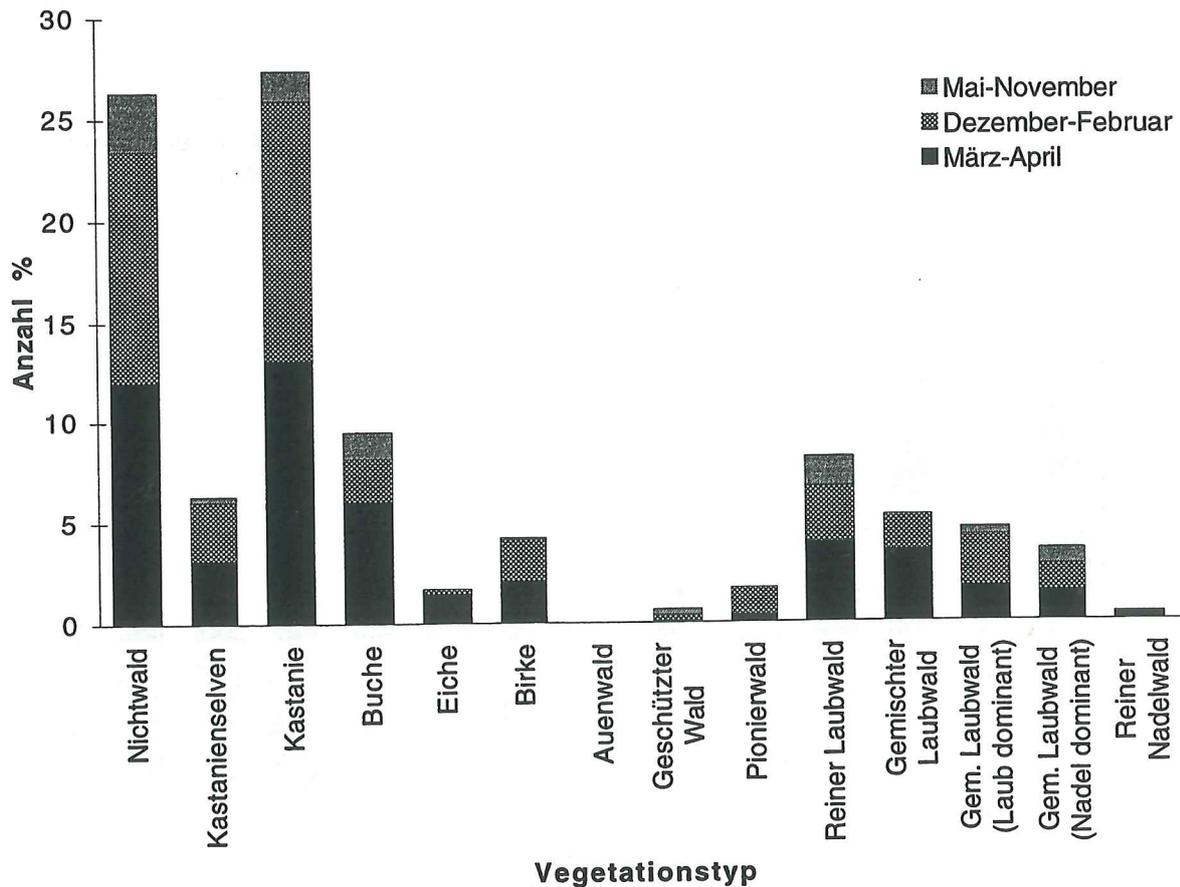


Fig. 46: Verteilung der Anzahl der Waldbrände auf die Vegetationstypen von 1969 - 1993

Die grössten Flächenanteile verbrannten im Nichtwald und in Kastanienwäldern (Fig. 47). Reiner Laubwald und Buchen waren ebenfalls noch häufig betroffen. Zwischen März und April verbrannte deutlich der grösste Anteil der betroffenen Fläche im Nichtwald.

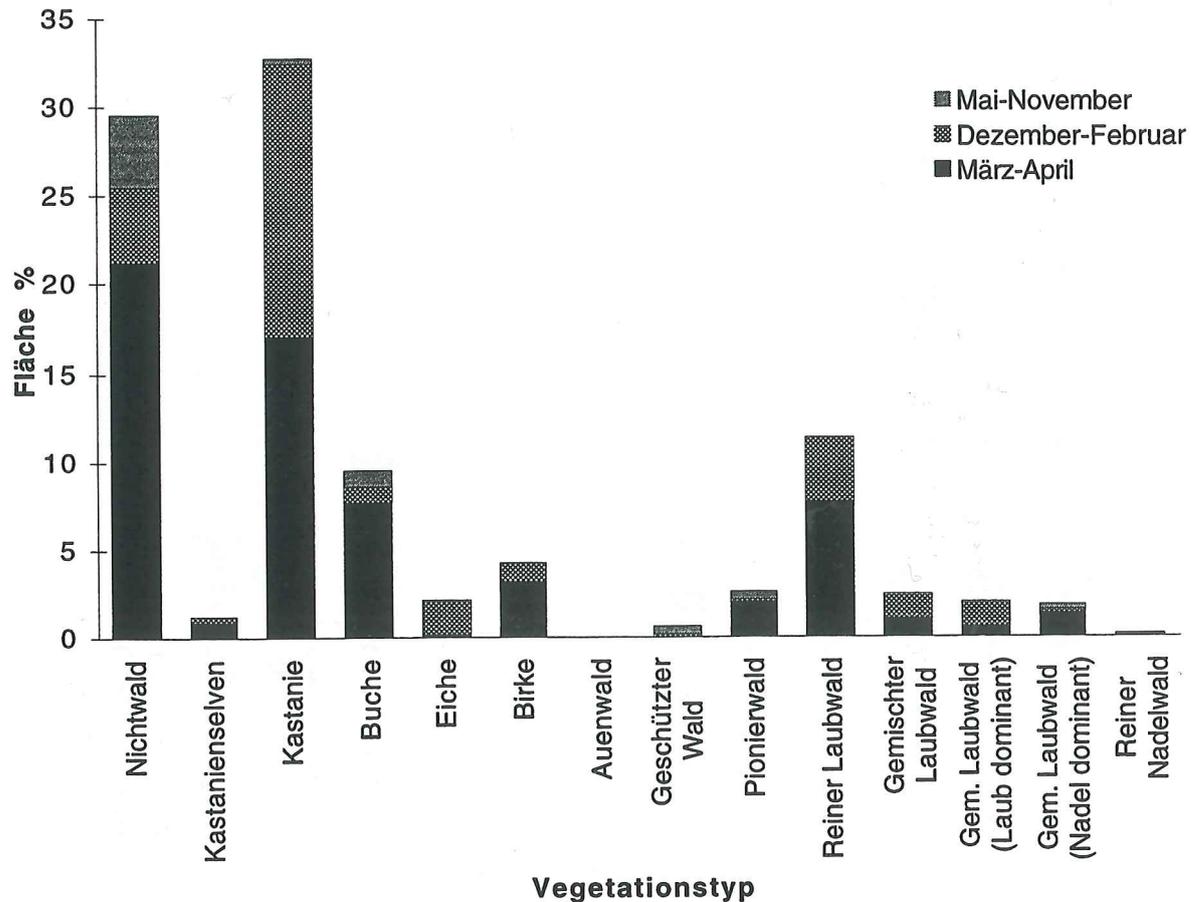


Fig. 47: Verteilung der Fläche der Waldbrände auf die Vegetationstypen von 1969 - 1993

Die beiden Häufigkeitsverteilungen von Fläche und der Anzahl der Waldbrände bezüglich der Vegetationstypen gleichen einander sehr stark. Die Werte für die Flächen im Nichtwald und im Kastanienwald waren etwas grösser, für die restlichen Vegetationstypen etwas kleiner als die Werte für die Anzahl.

Die Verteilung der Feuer auf die Vegetationstypen lässt sich gleich erklären wie die der Feuer in den Landnutzungstypen. Wiederum ist der Kastanienwald am stärksten betroffen.

Die Angaben über den Anteil der verbrannten Buchenwälder sind vermutlich mit Fehlern behaftet, ihre Streu sollte laut der Fachliteratur nicht brennen. Trotzdem sind Feuer in Buchenwäldern registriert worden.

5.2 Auswertungen der Waldbrandgeschichte zur Bestimmung des Schadenpotentials

Zur Einteilung in Prioritätszonen muss jeweils der Anteil der von Waldbrand betroffenen Fläche an der gesamten Fläche ihrer Klasse für sämtliche Klassen der Topographie und der Vegetation berechnet werden. Dies wurde für die Zeit von 1969 - 1993 vorgenommen.

5.2.1 Exposition

Etwas mehr als 80% aller Flächen in Südlagen waren in den letzten 25 Jahren von Waldbrand betroffen (Fig. 48), in Südostlagen waren es ca. 35%, in Südwestlagen knapp 10%, in Ostlagen knapp 5%. Nordwest-, west-, nord- und nordostexponierte Hänge weisen nur einen sehr kleinen Anteil an verbrannten Gebieten auf. Der hohe Anteil der betroffenen Flächen in allen Südlagen ist auf eine erhöhte Sonneneinstrahlung und die dadurch beschleunigte Austrocknung des Brandguts zurückzuführen.

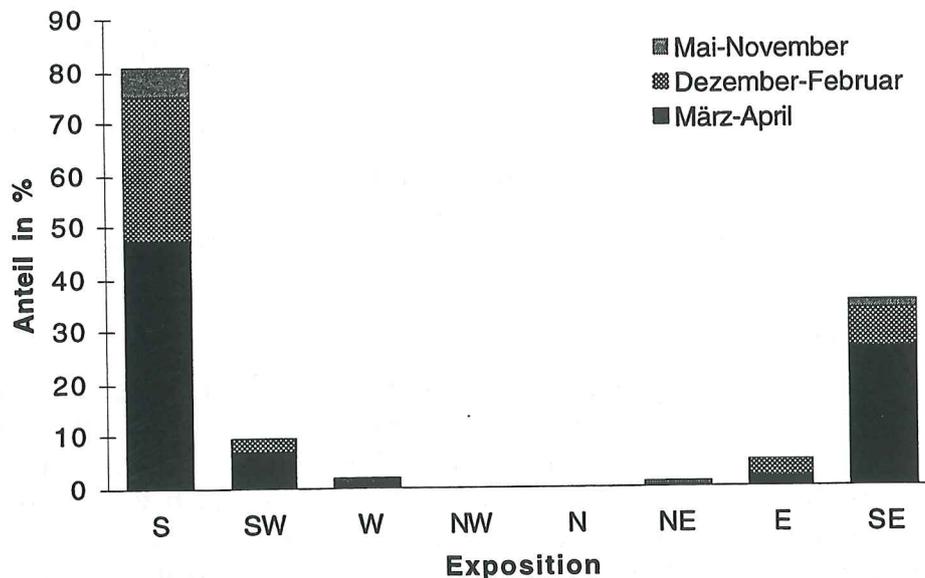


Fig. 48: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Exposition von 1969 - 1993

5.2.2 Höhenstufen

Vergleicht man den Anteil der verbrannten an der gesamten Fläche der Höhenstufen (Fig. 49), fällt auf, dass die Fläche, die zwischen 1400 m.ü.M. und 1500 m.ü.M. liegt, während einer Waldbrandsaison (März - April) zu mehr als 110% verbrannt ist. Ebenfalls in dieser Zeitspanne ist die Fläche auf 700 - 800 m.ü.M. zu fast 50% verbrannt. Die Höhenstufe von 600 - 700 m.ü.M. war dagegen hauptsächlich zwischen Dezember und Februar betroffen. Vermutlich sind die Flächen aller dieser Höhenstufen so klein, dass der grösste Teil ihrer Fläche bei sehr wenigen Feuern verbrannt ist.

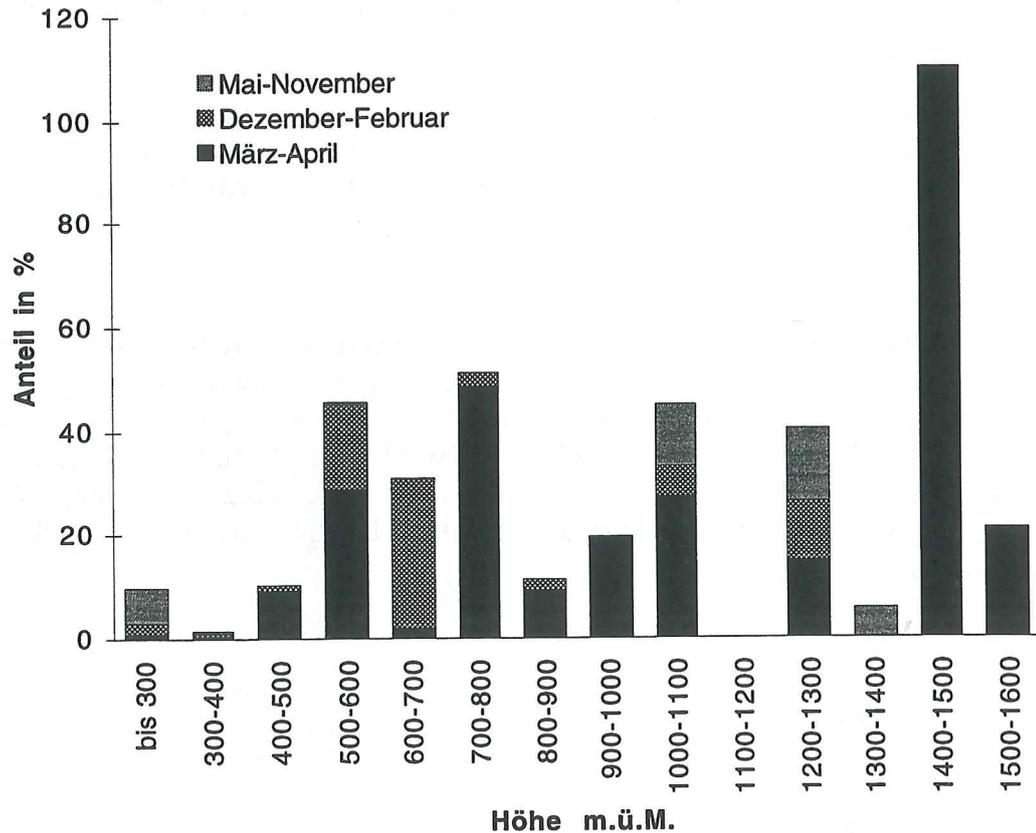


Fig. 49: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Höhenstufe von 1969 - 1993

5.2.3 Hangneigung

In Lagen mit 30 - 40% Steigung verbrannten 40% zwischen März und April (Fig. 50), von Dezember bis Februar 30% der Fläche. Ebenfalls 40% verbrannten im März und April in Lagen mit 40 - 50% Steigung. Die Konzentration der Waldbrände auf diese beiden Hangneigungsklassen lässt sich wiederum mit der Verwendung des Geländemodells RIMINI begründen: Die relativ kleinen Flächen mit sehr grossen Steigungen können wegen der groben Auflösung des Geländemodells (250 m) nicht korrekt abgebildet werden. Flachen Lagen dagegen sind im Malcantone stark besiedelt und weisen nur einen geringen Anteil an Vegetation (also auch Brandgut) auf: Feuer sind dort daher selten.

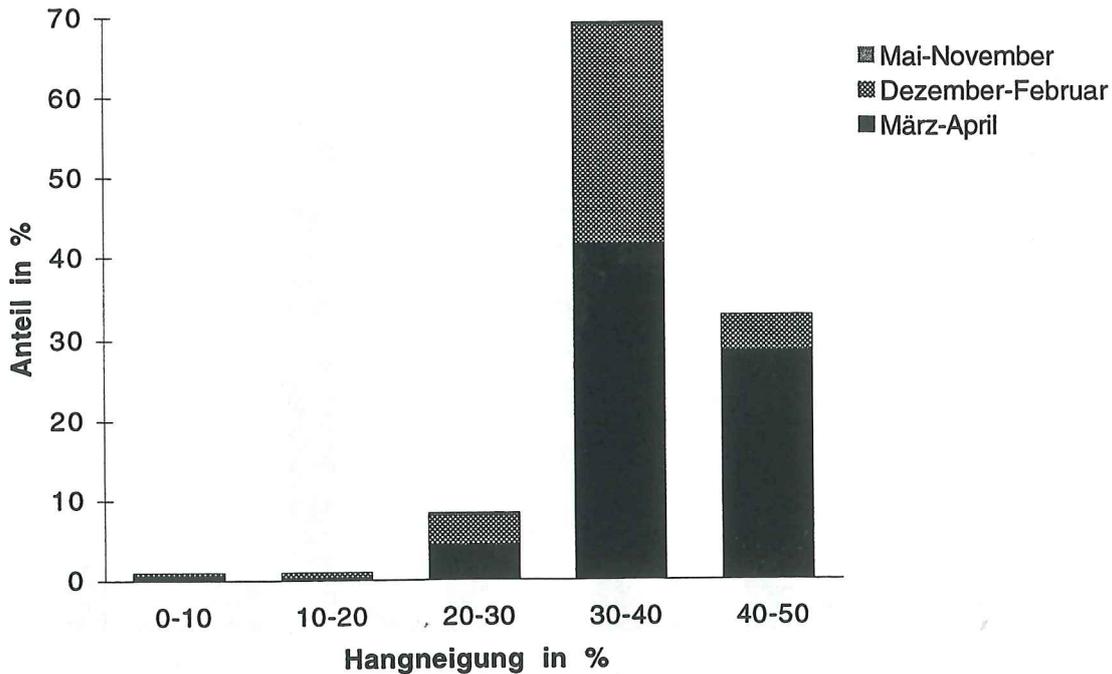


Fig. 50: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Hangneigungsklasse von 1969 - 1993

5.2.4 Vegetation

Abgesehen vom reinen Laubwald, dessen Fläche zu ungefähr 165% verbrannt ist (Fig. 51), bewegen sich die Anteile der verbrannten an den totalen Flächen der Vegetationstypen zwischen 10% und 25%. Der hohe Anteil des verbrannten Laubwalds ist auf seine kleine Gesamtfläche zurückzuführen: Bei Miglieglia z.B. liegt ein Stück reiner Laubwald, welches wiederholt gebrannt hat, der reine Laubwald bei Bedigliora ist zum grössten Teil während eines einzigen Waldbrands verbrannt. Da die gesamte Fläche des reinen Laubwalds jedoch nicht viel grösser als ist die Summe dieser beiden Teilflächen, wird die Summe der verbrannten Fläche grösser als die totale Fläche des Laubwalds.

Der Eichenwald war ausschliesslich zwischen Dezember und Februar betroffen, der geschützte Wald in der gleichen Zeit zu ungefähr 5%. Die restlichen 15% verbrannten zwischen Mai und Dezember. Ein überraschend kleiner Anteil der Kastanien und Kastanienselven ist im untersuchten Zeitraum verbrannt. Der Grund dafür ist die insgesamt sehr grosse mit Kastanienwäldern bewachsene Fläche.

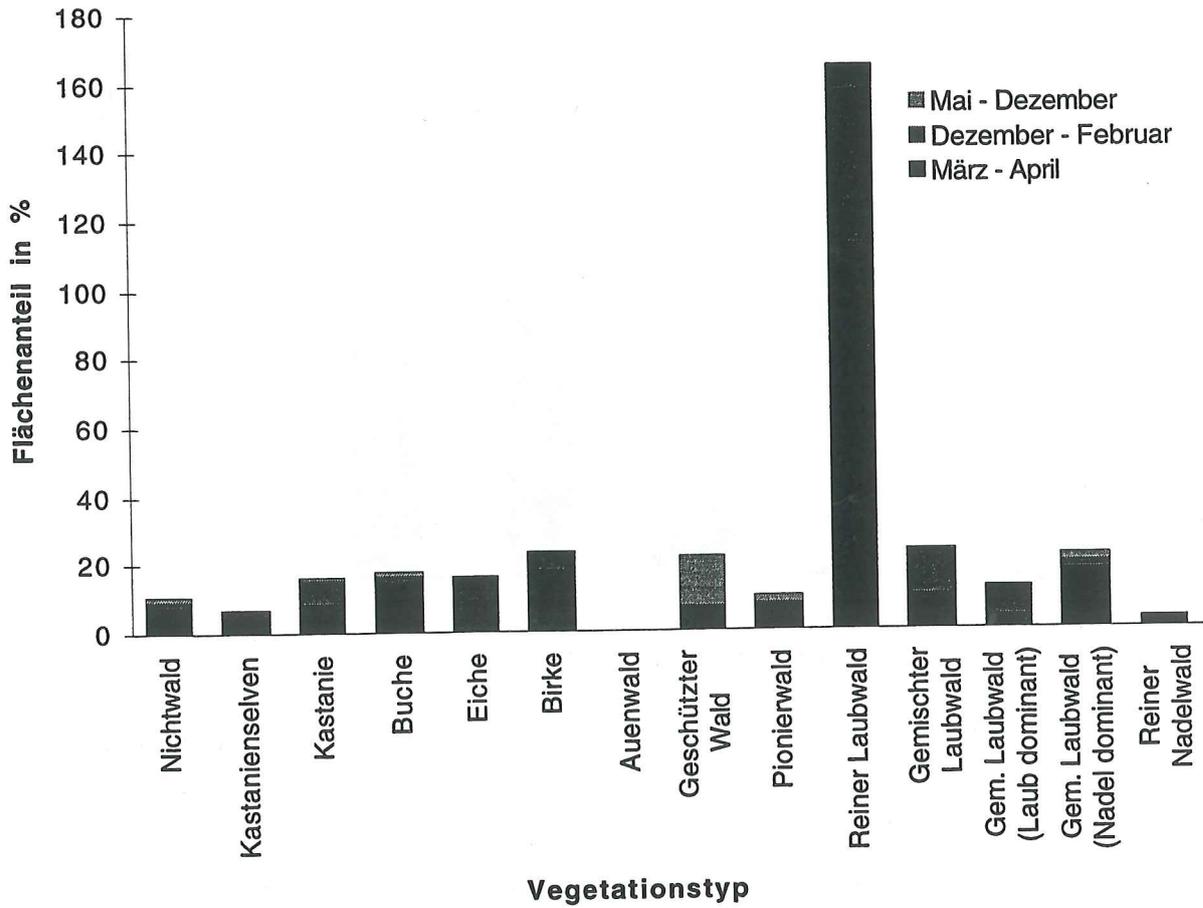


Fig. 51: Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Vegetationstypen von 1969 - 1993

5.3 Auswertung der Meteodatenbank

Die Wetterdaten stammen aus der zur Waldbranddatenbank gehörigen Meteodatenbank (FRANK 1994). Sie wurden als Input für die Feuerausbreitungsmodellierung, bzw. für die Modellierung der Brandgutfeuchtigkeit, gebraucht. Dazu wurden die Werte (wo vorhanden) für zwölf Uhr verwendet. Zudem sollten, anhand der Tagesmittelwerte, die typischen Wetterlagen der Alpensüdseite beschrieben werden.

Die Auswertungen beziehen sich auf das Tessin für die Zeit von 1980 - 1992.

5.3.1 Klimadiagramm

Die Wintermonate (November - Februar) sind im Tessin sehr trocken (Fig. 52). Der Mai ist der feuchteste Monat. Im Juli gehen die Niederschläge auf 47 mm zurück und steigen dann bis zum September wieder an, Frühling und Herbst sind die feuchtesten Jahreszeiten im Tessin.

Die Temperatur steigt vom Januar von durchschnittlich 4°C gleichmässig auf 21°C im Juli an und sinkt dann wieder gleichmässig.

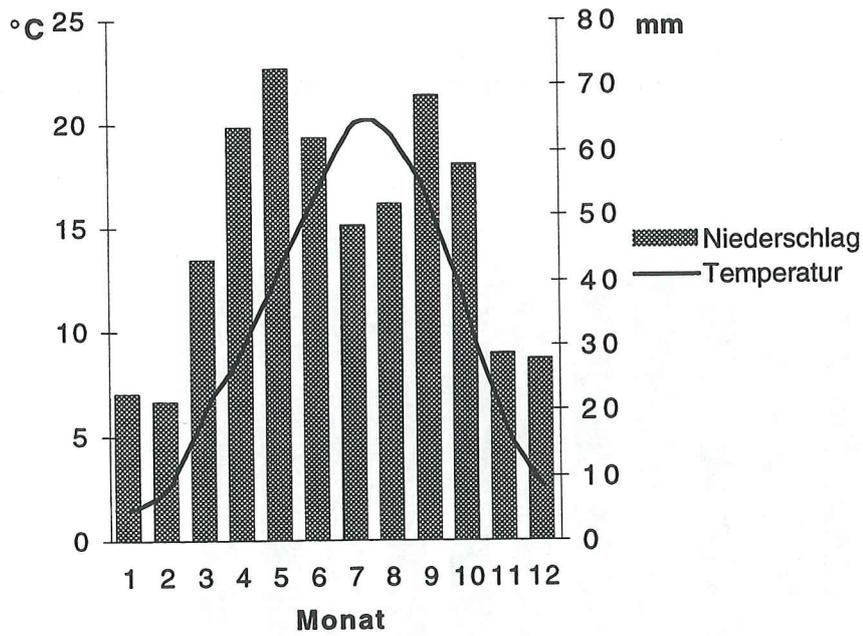


Fig. 52: Klimadiagramm für den Kanton Tessin

5.3.2 Temperaturen

Die Temperaturen um zwölf Uhr sind durchschnittlich um ca. 2 °C höher als die Tagesmittelwerte (Fig. 53).

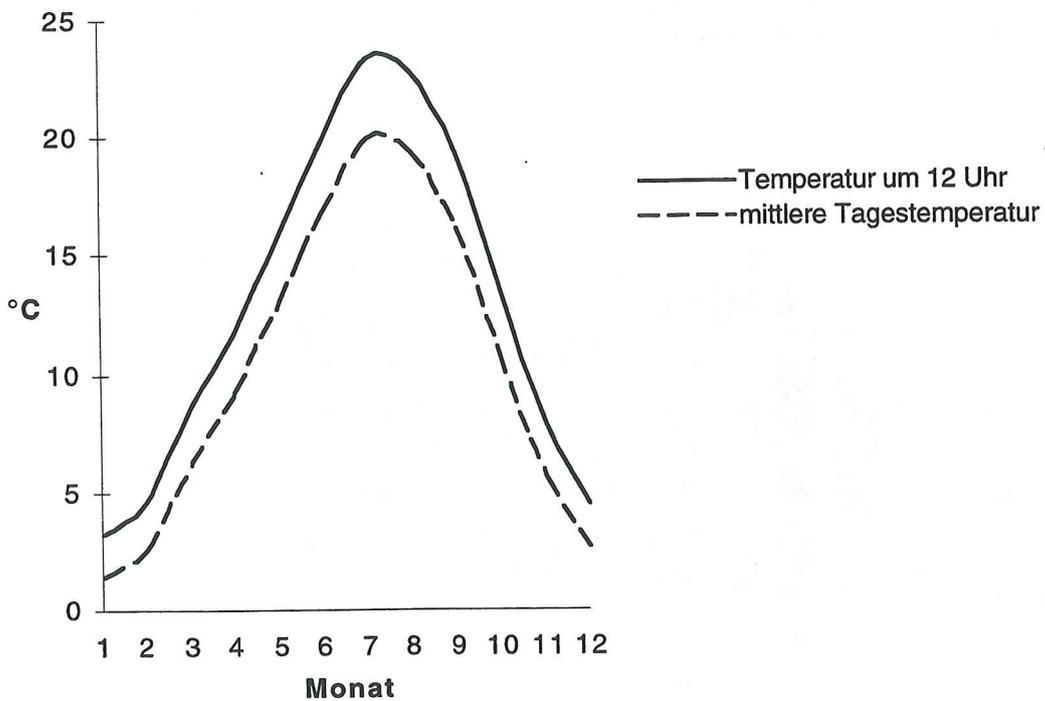


Fig. 53: Mittlere Temperaturen um zwölf Uhr im Vergleich mit den Tagesmittelwerten

5.3.3 Luftfeuchtigkeit

Die mittlere Luftfeuchtigkeit schwankt im Tessin im Laufe des Jahres nur gering (Fig. 54): Die tiefsten Werte (ca. 62%) liegen im März und April, die höchsten im Oktober (76%).

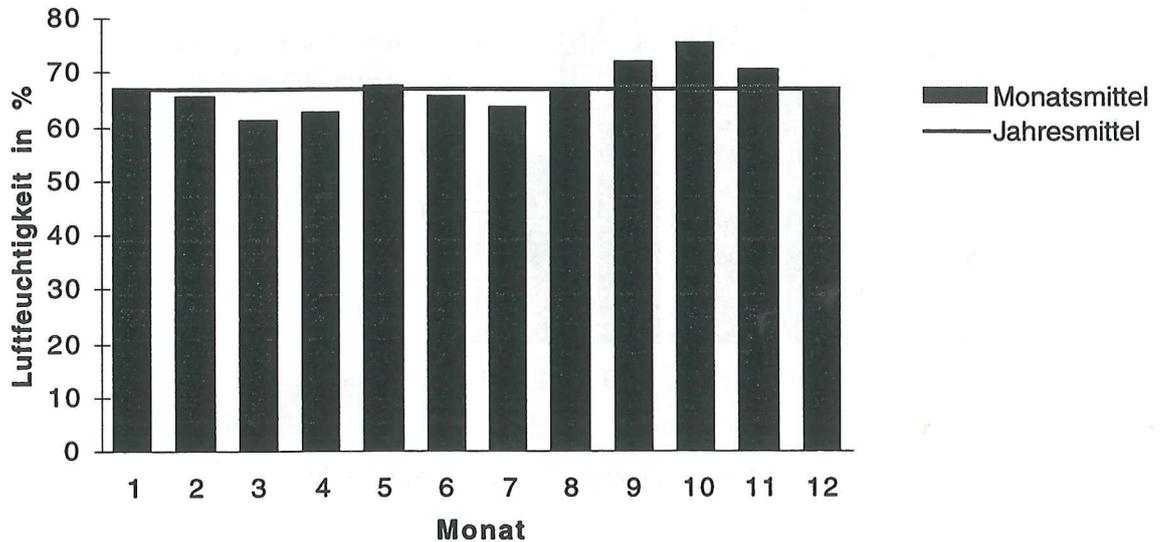


Fig. 54: Tagesmittelwerte der Luftfeuchtigkeit

Der Verlauf der Luftfeuchtigkeit um zwölf Uhr ist dem der mittleren Tagesluftfeuchtigkeit ähnlich (Fig. 55). Der Jahresmittelwert liegt um zwölf Uhr jedoch um etwa 3% tiefer. Entsprechend sind auch die Monatsmittelwerte etwas tiefer.

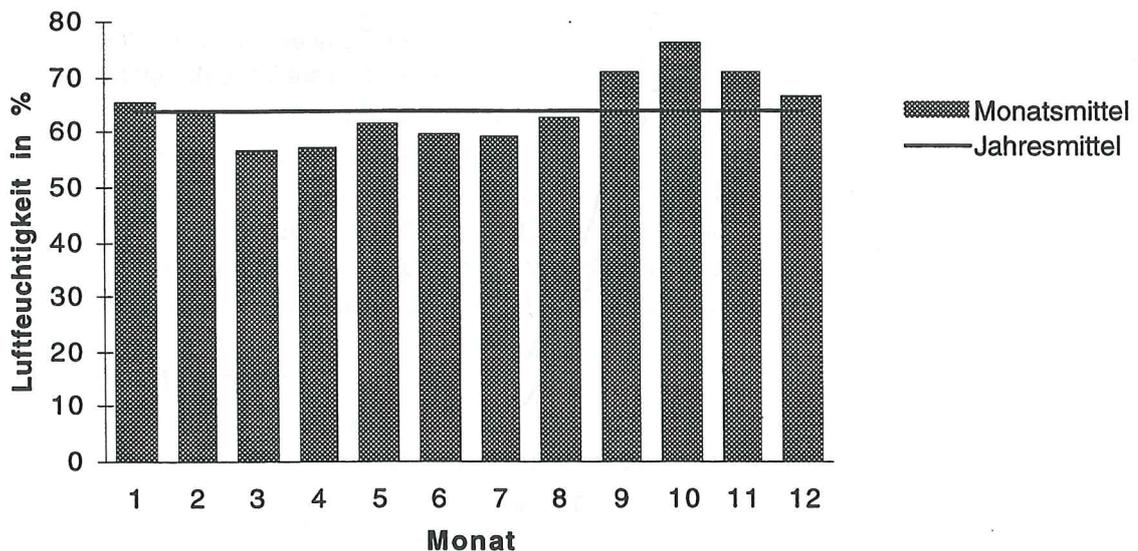


Fig. 55: Luftfeuchtigkeit um zwölf Uhr

5.3.4 Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit

Mit 1.7 m/s ist der Oktober der Monat mit den kleinsten durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten (Fig. 56). Im November, Januar und Februar ist sie nur leicht höher. Zwischen März und August liegt sie über 2.2 m/s.

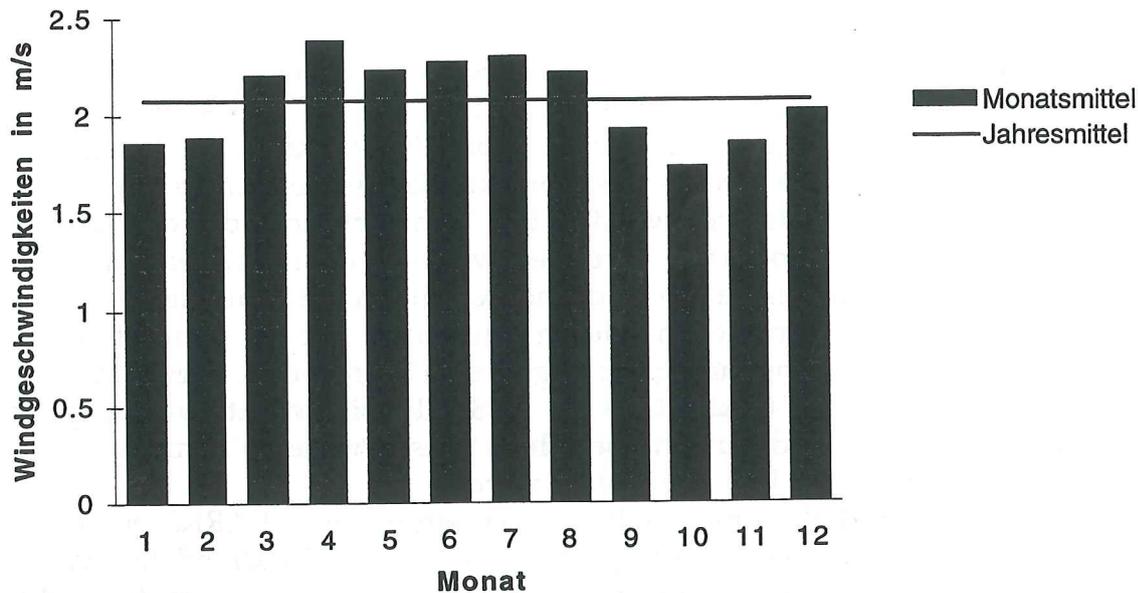


Fig. 56: Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit

5.4 Modellierung der Feuerausbreitung

Die Eingangsdaten zur Modellierung der Feuerausbreitung basieren auf Angaben aus der Literatur aus den USA (Brandgutfeuchtigkeit), auf Werten aus der Meteorodatenbank und auf der Arbeit von (HARVEY 1996) über Brandgut. Alle diese Daten sind unvollständig oder mit Fehlern behaftet.

Für den Gebrauch der Angaben aus der Literatur (NAT. WILDFIRE COORDINATING GROUP 1992) bestand das Problem, dass die Situation im Malcantone nur beschränkt mit der in den USA vergleichbar ist. Gerade für die Bestimmung der Brandgutfeuchtigkeit sind die lokalen Verhältnisse (Topographie und Vegetation) wichtig. Je nach Pflanzenart variiert der Wassergehalt, den sie speichern kann. Eine weitere Schwierigkeit ist, dass mit dem FIRE BEHAVIOR FIELD REFERENCE GUIDE (NAT. WILDFIRE COORDINATING GROUP 1992) nur an einer bestimmten Stelle für einen genau definierten Zeitpunkt über die Brandgutfeuchtigkeit Aussagen gemacht werden. Für diese Arbeit sollten jedoch Angaben für das ganze Malcantone und über die Zeitspanne von zwei bis sieben Monaten - also einer Waldbrandsaison - gemacht werden. Die Werte für die Feuchtigkeit des toten Brandguts wurden dabei anhand des digitalen Geländemodells und der Wetterdaten für zwölf Uhr grob abgeschätzt. Die Abschätzung der Werte für die Feuchtigkeit des lebenden Brandguts konnte noch weniger genau vorgenommen werden, da dazu in der verwendeten Literatur nur Richtwerte gegeben werden (NAT. WILDFIRE COORDINATING GROUP 1992).

Die Angaben über das Brandgut von (HARVEY 1996) beziehen sich nur auf drei Brandgutklassen, nämlich auf Kastanienniederwald und Kastanienselven, reinen Nadelwald und die Vegetation in ehemaligen Brandflächen. Für die ganze übrige Vegetation bestehen keine Angaben, d.h. bei der Berechnung der Feuerausbreitung wurden die Gebiete ohne Angaben zum Brandgut gleich wie vegetationslose Gebiete behandelt. Das bedeutet, dass sich ein Feuer dort nicht

ausbreiten konnte. Dadurch entstanden Grenzen für die Feuerausbreitung, die in Wirklichkeit gar nicht bestehen.

Zur Modellierung der Feuerausbreitung wurde der Tagesmittelwert für die Windgeschwindigkeit aus der Meteodatenbank berechnet. Dieser sollte korrigiert werden, da der Wind nahe an der Erdoberfläche durch Reibung stark abgeschwächt wird. Da die Grösse des Korrekturfaktors jedoch unbekannt ist, wurde der unkorrigierte Wert verwendet. Die Windrichtung, die der Literatur (AMBROSETTI 1978) entnommen wurde, wird in Wirklichkeit nahe der Erdoberfläche durch die Vegetation und andere Hindernisse laufend verändert, sodass Abweichungen von der mittleren Richtung, die verwendet wurde, entstehen. Eine weitere Ungenauigkeit ergab sich durch das Verwenden von Angaben aus der Literatur (AMBROSETTI 1978), die sich nicht auf die gleiche Periode wie jene der Meteodatenbank beziehen. Diese Probleme könnten nur mit dem Verwenden eines Windmodells gelöst werden.

Die Fehler bei der Modellierung der Feuerausbreitung mit SPARKS entstanden nicht nur durch die noch fehlende Implementation eines Windmodells, welches die lokalen Verhältnisse berücksichtigt, sondern auch dadurch, dass die Wetter- und Windverhältnisse sowie die Brandguteigenschaften über die Zeit nicht, wie angenommen wurde, konstant sind, sondern sich laufend verändern.

Eine weiterführende Diskussion von SPARKS befindet sich in (SCHÖNING 1996).

5.5 Schadenpotentiale

Zur Bestimmung der Schadenpotentiale, und damit der Prioritätszonen, wurden die Resultate der Feuerausbreitung und die der Waldbrandgeschichte gewichtet. Dazu wurden Gefahrencodes verwendet. Bei ihrer Zuweisung wurden Annahmen getroffen, die noch nicht überprüft wurden:

- Die Gewichtung der einzelnen Objekte (Schutzwald, erosionsgefährdete Gebiete, Aufforstungen, Vegetation, Topographie, kulturelle Objekte, Strassen und Siedlungen) wurde nach eigenem Ermessen festgesetzt und noch nicht mit Experten überprüft.
- Der Faktor, mit dem das Schadenpotential der Waldbrandgeschichte bestimmt wurde, hat bewirkt, dass die gefährdeten Objekte nur ein geringes Schadenpotential aufweisen.
- Die Exponentialfunktion und ihr Exponent wurden für die Berechnung des Gefahrencodes der Rückwärtsausbreitung nur qualitativ überprüft und noch nicht mit Experten verifiziert.

Auf eine inhaltliche Interpretation der Prioritätszonen wurde deshalb verzichtet.

5.5.1 Schadenpotential der Waldbrandgeschichte

Um den Einfluss des Schadenpotentials der Waldbrandgeschichte auf das totale Schadenpotential abschätzen zu können, wurde für die Darstellung des Schadenpotentials dieselbe Skala wie für die Einteilung in die Prioritätszonen benutzt.

Genauere Angaben über die Einteilung und Klassierung des Schadenpotentials finden sich im Anhang VIII.

Bei der Berechnung des Anteils der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der Topographieklassen entstanden Fehler, da das digitale Geländemodell DHM25 zu Beginn der Arbeit noch nicht erhältlich war und die Auswertungen der Waldbrandgeschichte deshalb noch mit dem Geländemodell RIMINI gemacht wurden, dessen Auflösung nur 250 m beträgt. Bei der Übertragung der Resultate auf das DHM25 sollten jedoch nur kleine Fehler entstanden sein, da das Gelände für die Berechnung der Anteile der verbrannten Fläche ohnehin klassiert wurde.

Nur ein Gebiet bei Astano hat, weil es erosionsgefährdet ist, zwischen Dezember und Februar ein geringes Schadenpotential (Fig. 57). Alle anderen Einflüsse (Topographie, Vegetation, Aufforstungen und Schutzwälder) sind nicht erkennbar.

In März und April haben erosionsgefährdete Gebiete, Schutzwald und Aufforstungen ein geringes Schadenpotential (Fig. 58). Hinzu kommen nun jedoch die Einflüsse der Vegetation (reiner Laubwald) und der Topographie. So ergibt sich für ein erosionsgefährdetes Gebiet bei Miglieglia ein mässiges Schadenpotential.

Zwischen Mai und November weist kein einziges Gebiet ein Schadenpotential auf (Fig. 59).



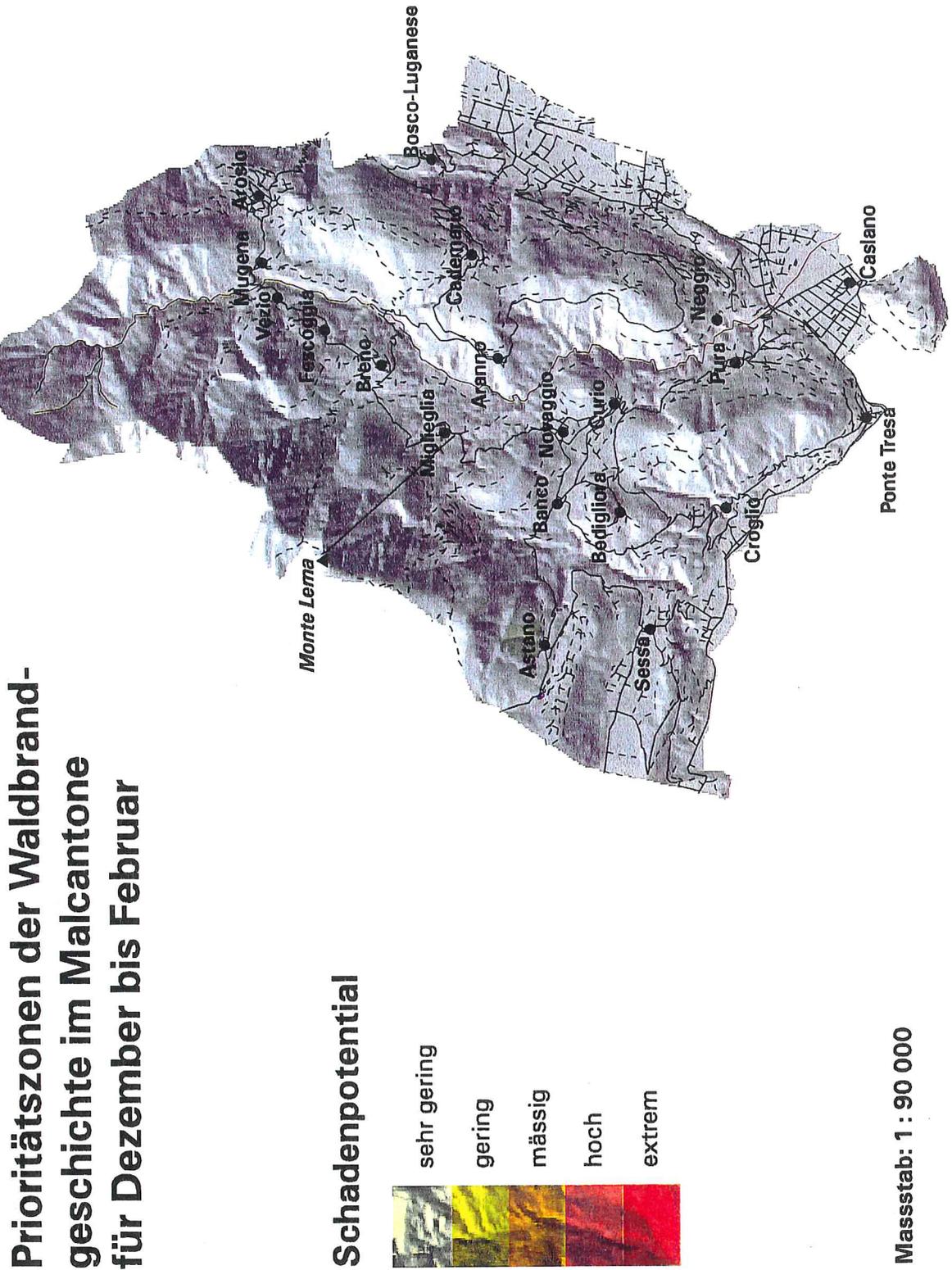
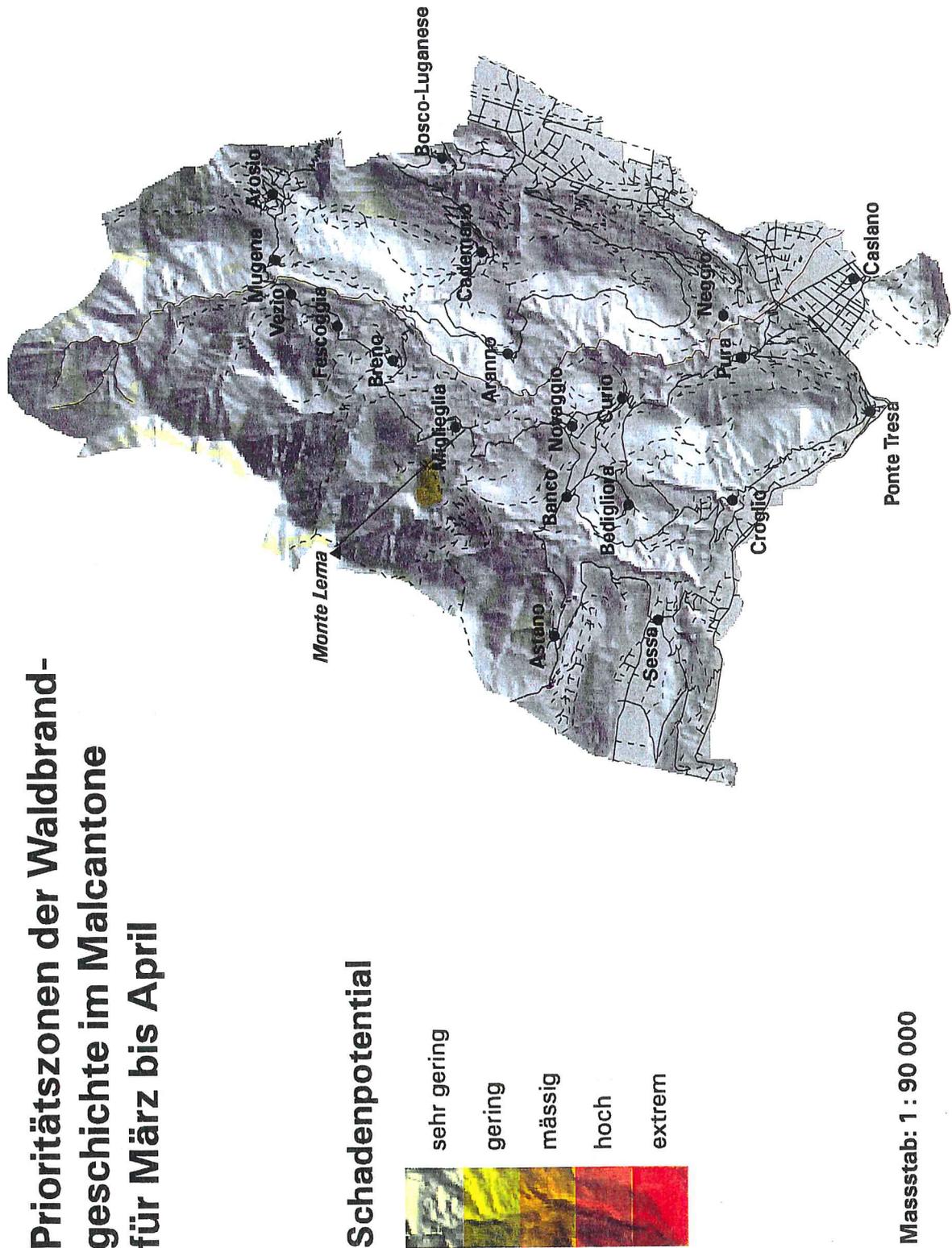
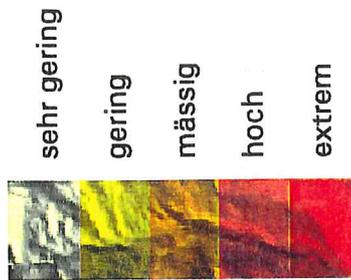


Fig. 57: Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von Dezember bis Februar (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

Prioritätszonen der Waldbrand- geschichte im Malcantone für März bis April



Schadenpotential



Masstab: 1 : 90 000

Fig. 58: Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von März bis April (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

Prioritätszonen der Waldbrandgeschichte im Malcantone für Mai bis November

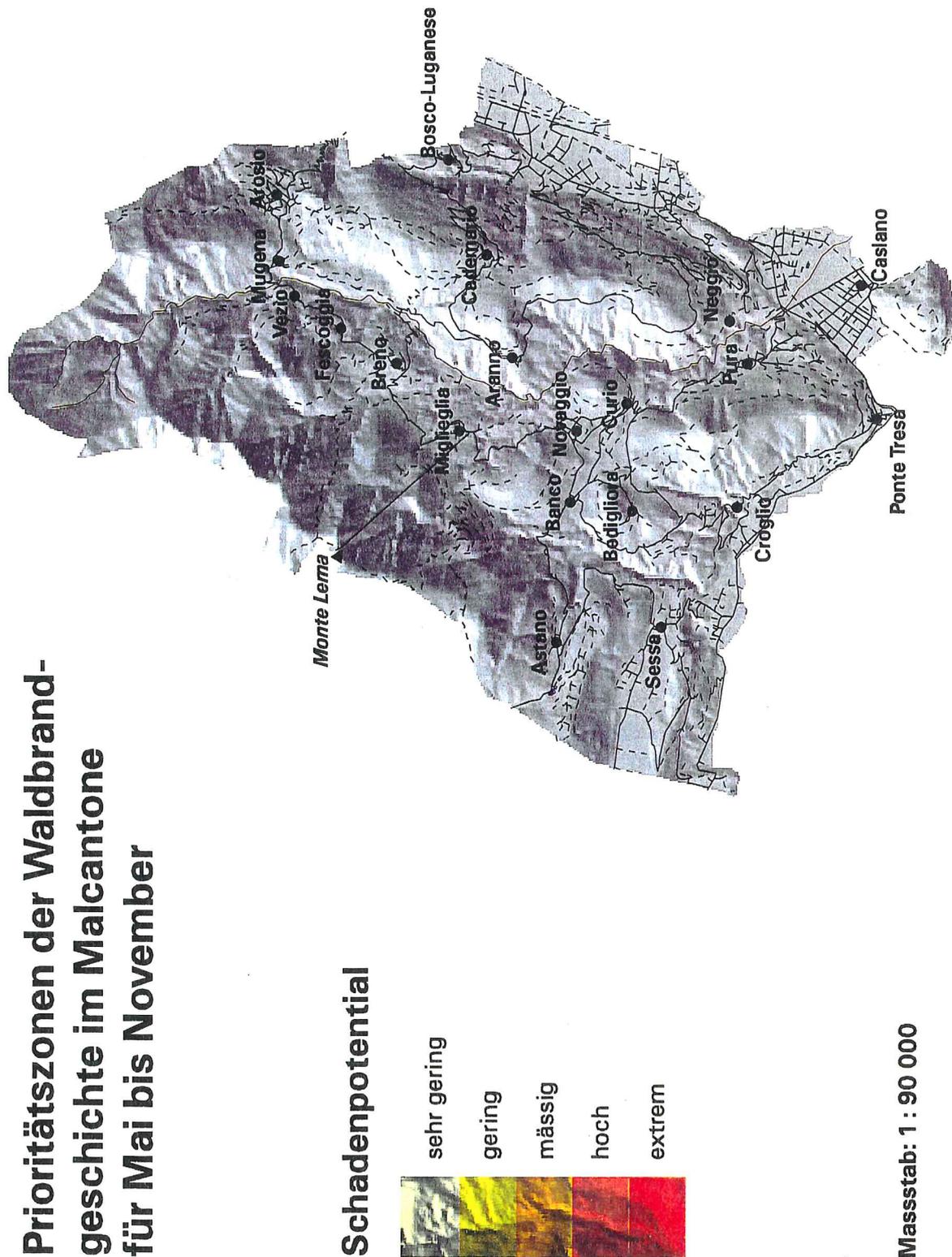


Fig. 59: Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von Mai bis November (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

5.5.2 Schadenpotential der Feuerausbreitung

Wie bei den Darstellungen des Schadenpotentials aus der Waldbrandgeschichte wurde hier die Skala für das Darstellen der Prioritätszonen verwendet.

Während des ganzen Jahres bestehen nur wenige Zonen mit extremem Schadenpotential, die immer in unmittelbarer Nachbarschaft von Strassen und Siedlungen liegen. Speziell dort, wo Strassen und Siedlungen sich überlagern, sind sie zu finden. Häufiger sind Zonen mit hohem Schadenpotential, die vorwiegend neben Strassen und angrenzend zu den Zonen mit extremem Schadenpotential liegen.

Mit zunehmender Entfernung von Strassen und Siedlungen nimmt das Schadenpotential über mittel zu gering bis mässig ab.

Dieses Verhalten hängt mit den hohen Gewichtungsfaktoren bei der Berechnung der Gefahrencodes mit der Exponentialfunktion zusammen: Alle Gebiete um Siedlungen und die meisten in der Nähe von Strassen weisen ein hohes bis extrem hohes Schadenpotential auf.

Grössere zusammenhängende Zonen mit extremem oder hohem Schadenpotential zwischen Dezember und Februar befinden sich zwischen Astano, Sessa und Bedigliora, sowie um Cademario (Fig. 60).

Im März und April werden Zonen (Fig. 61) mit hohem Schadenpotential gegenüber jenen von Dezember bis Februar ausgedehnter. Viele Zonen weisen nun das nächst höhere Schadenpotential auf. Diese Tendenz verstärkt sich mit zunehmender Distanz zu den Siedlungsgebieten.

Zwischen Mai und November (Fig. 62) haben die Zonen etwa die gleiche Lage und das gleiche Schadenpotential wie von Dezember bis Februar. An wenigen Orten sind sie etwas ausgedehnter oder zu ihrer Lage von Dezember bis Februar leicht verschoben.

Prioritätszonen der Rückwärtsausbreitung im Malcantone für Dezember bis Februar

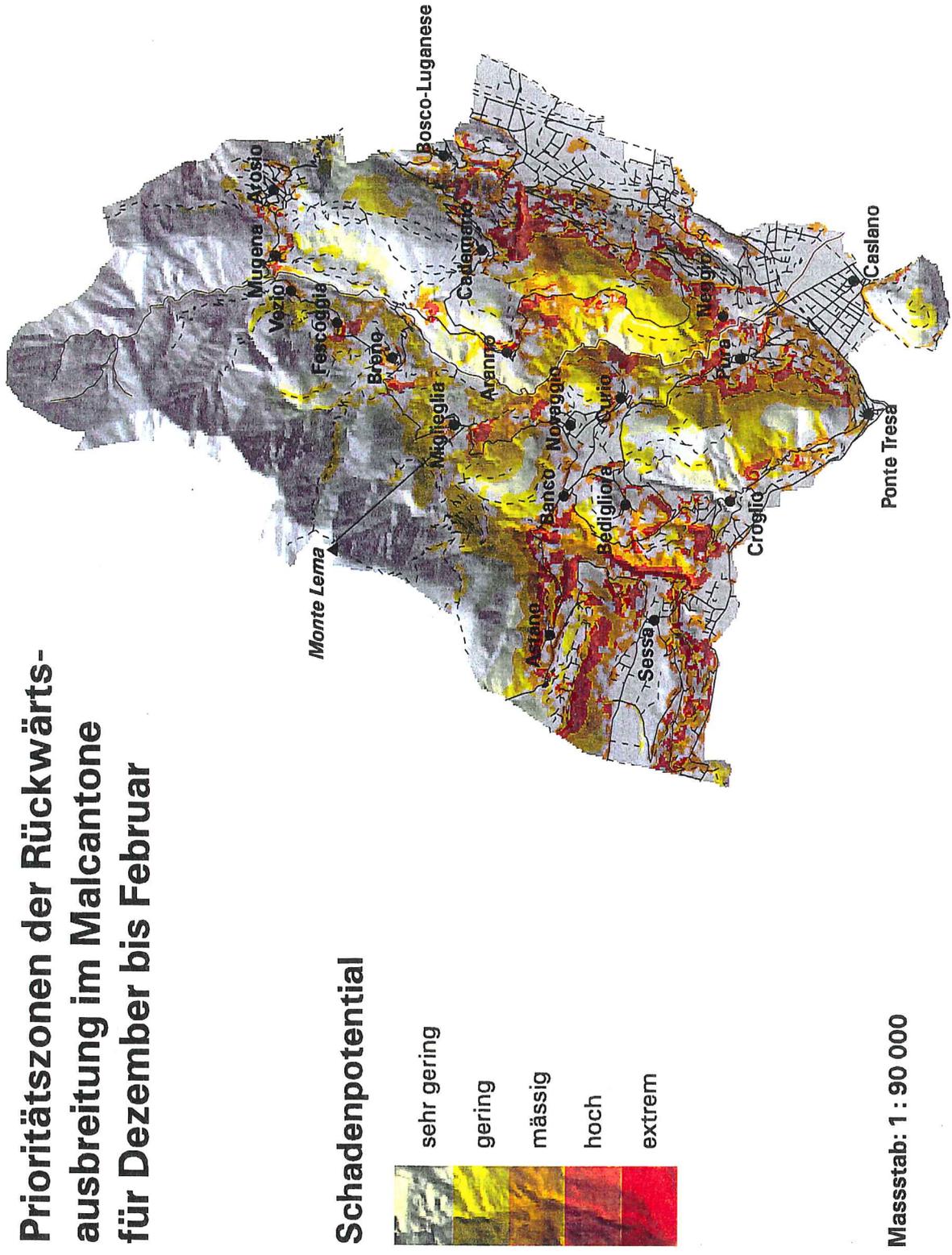


Fig. 60: Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von Dezember bis Februar (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

Prioritätszonen der Rückwärtsausbreitung im Malcantone für März bis April

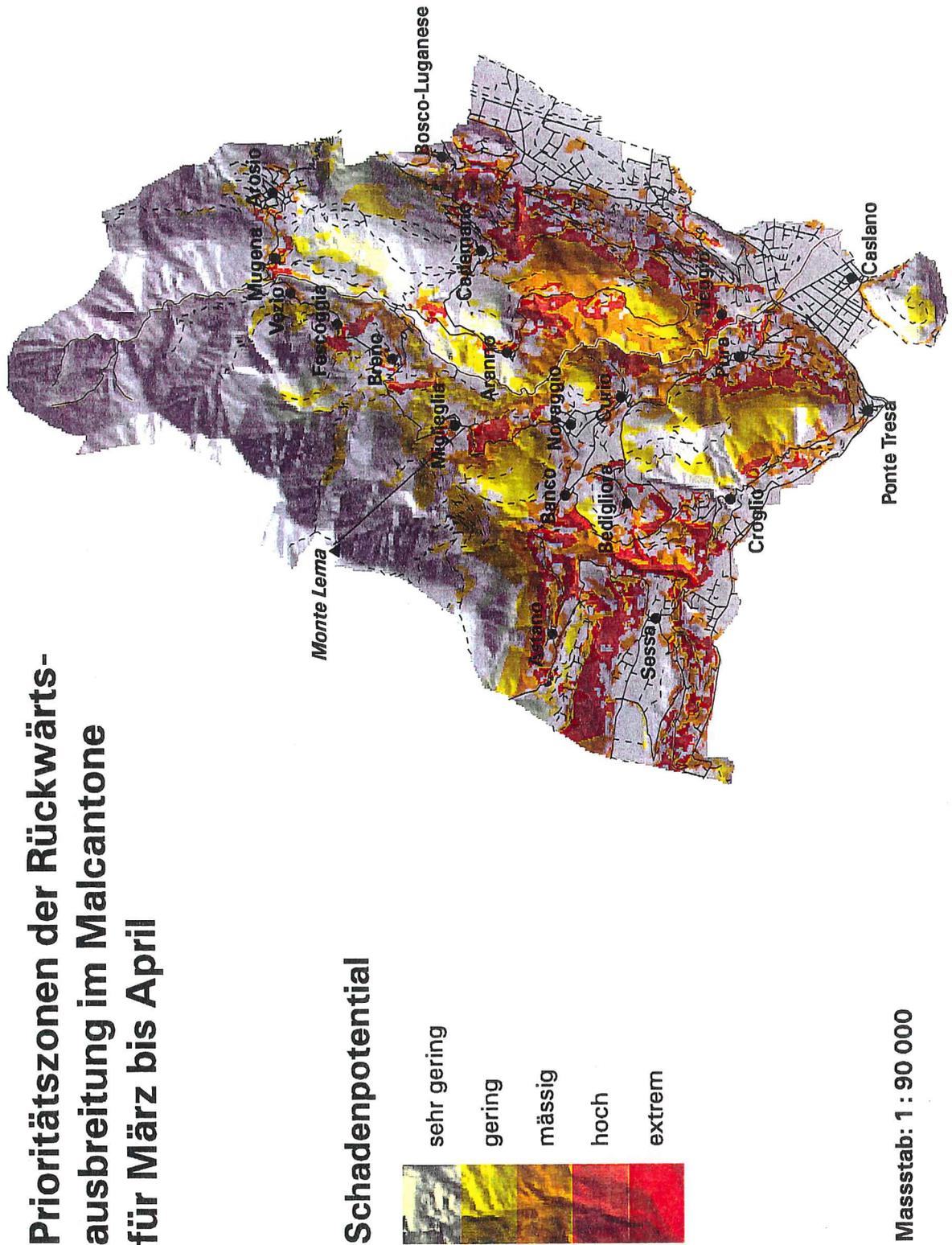


Fig. 61: Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von März bis April (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

Prioritätszonen der Rückwärtsausbreitung im Malcantone für Mai bis November

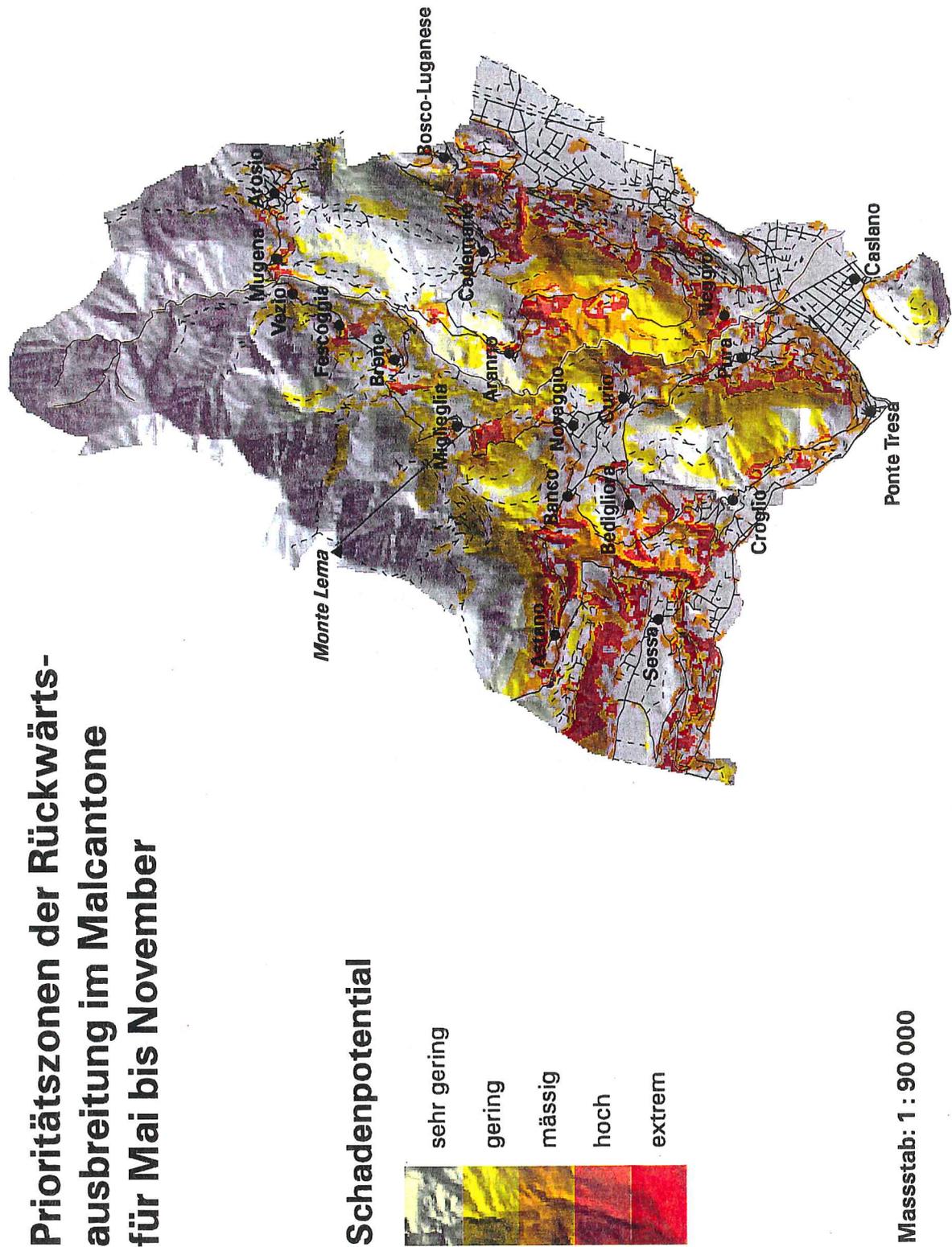


Fig. 62: Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von Mai bis November (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

5.5.3 Prioritätszonen

Dargestellt wird die Summe aus dem Schadenpotential der Waldbrandgeschichte und jenem der Feuerausbreitung. Das daraus resultierende Schadenpotential bestimmt die Zugehörigkeit zu den Prioritätszonen (Kap. 4.4).

Viel kleiner als erwartet sind die saisonalen Unterschiede. Besonders die Waldbrandsaisons Dezember bis Februar und Mai bis November unterscheiden sich kaum. Interessant ist dabei, dass von Mai bis November an einigen Orten ein höheres Schadenpotential besteht, als von Dezember bis Februar. Dies liegt vermutlich hauptsächlich an der angenommenen Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Bei der Modellierung der Feuerausbreitung entstanden schon bei leichten Veränderungen der Windrichtung und Windgeschwindigkeit grosse Unterschiede in der Geschwindigkeit und der Richtung der Feuerausbreitung. Der Einfluss der restlichen Parameter, die zur Berechnung der Feuerausbreitung benutzt wurden, ist viel kleiner. Daher sollte in der Berechnung der Feuerausbreitung mit SPARKS unbedingt ein Windmodell miteinbezogen werden, welches lokale Verhältnisse berücksichtigen kann und der Wirklichkeit eher gerecht wird.

Ein weiterer Grund für die kleinen saisonalen Unterschiede liegt in der Wahl der Gewichtungsfaktoren: Sie wurden so gewählt, dass das Schadenpotential der Waldbrandgeschichte auf das totale Schadenpotential nur einen sehr geringen Einfluss hat. Wird allein die Abhängigkeit des Schadenpotentials von der Waldbrandgeschichte betrachtet, so ist seine Abhängigkeit von der Waldbrandsaison noch deutlich sichtbar (Fig. 57 - Fig. 59).

Die Zonen mit extremem und hohem Schadenpotential von Dezember bis Februar (Fig. 63) vergrössern sich gegenüber den Resultaten aus der Feuerausbreitung. Der Einfluss der Schadenpotentiale aus der Waldbrandgeschichte ist jedoch nicht direkt erkennbar. Die grössten Zonen mit hohem oder extremem Schadenpotential liegen bei Cademario und zwischen Astano, Sessa und Bedigliora.

Zwischen Astano, Sessa und Bedigliora liegen im März und April Zonen mit fast durchwegs hohem oder extremem Schadenpotential (Fig. 64). Hohes Schadenpotential weisen auch die Gebiete um Curio, Pura und Neggio, sowie bei Migliaglia und bei Cademario auf.

Die Prioritätszonen von Mai bis November sind denen von Dezember bis Februar sehr ähnlich (Fig. 65): Um Cademario ist das Schadenpotential etwas kleiner, zwischen Astano, Bedigliora und Sessa etwas grösser.

Prioritätszonen im Malcantone für Dezember bis Februar

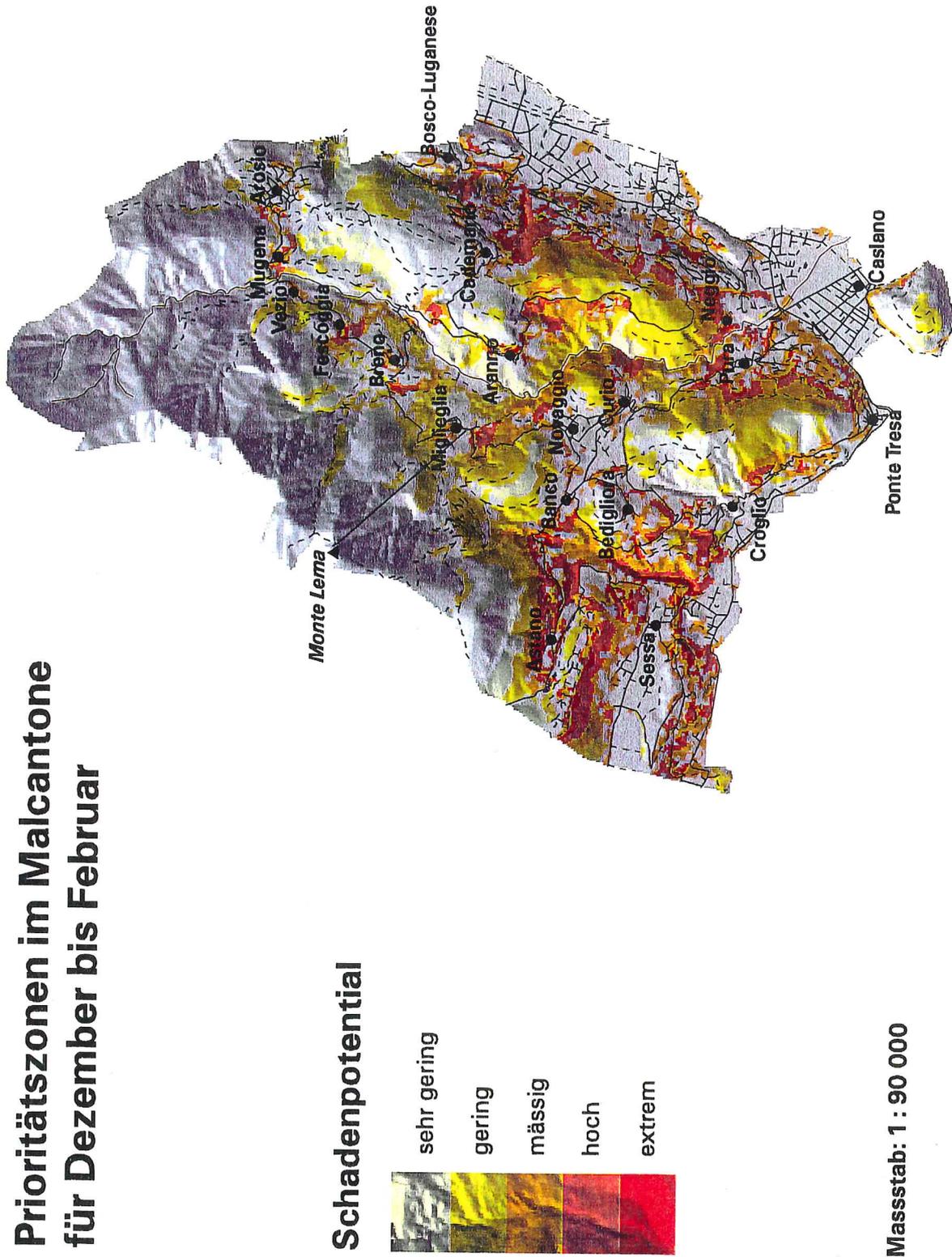


Fig. 63: Prioritätszonen von Dezember bis Februar (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

Prioritätszonen im Malcantone für März bis April

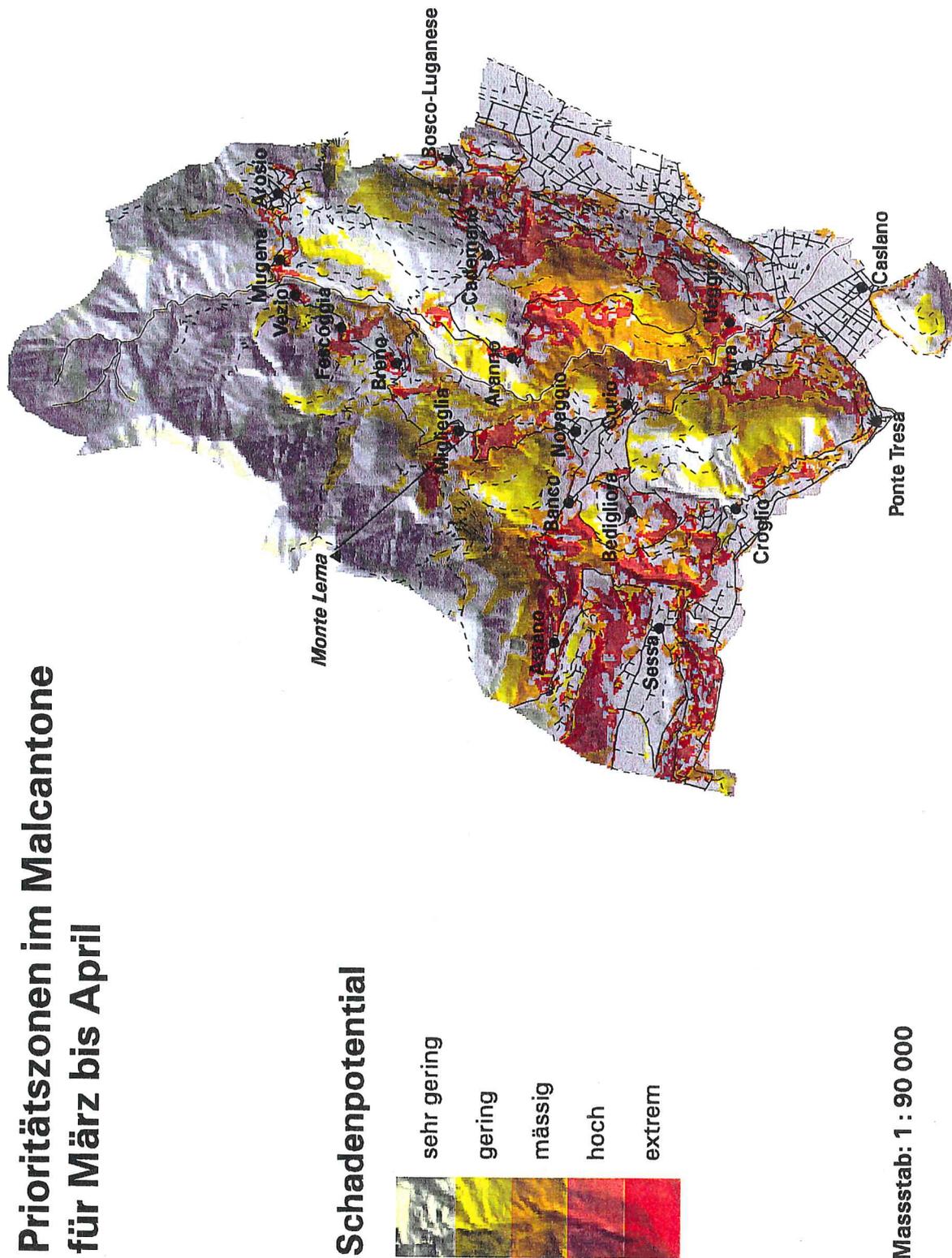


Fig. 64: Prioritätszonen von März bis April (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

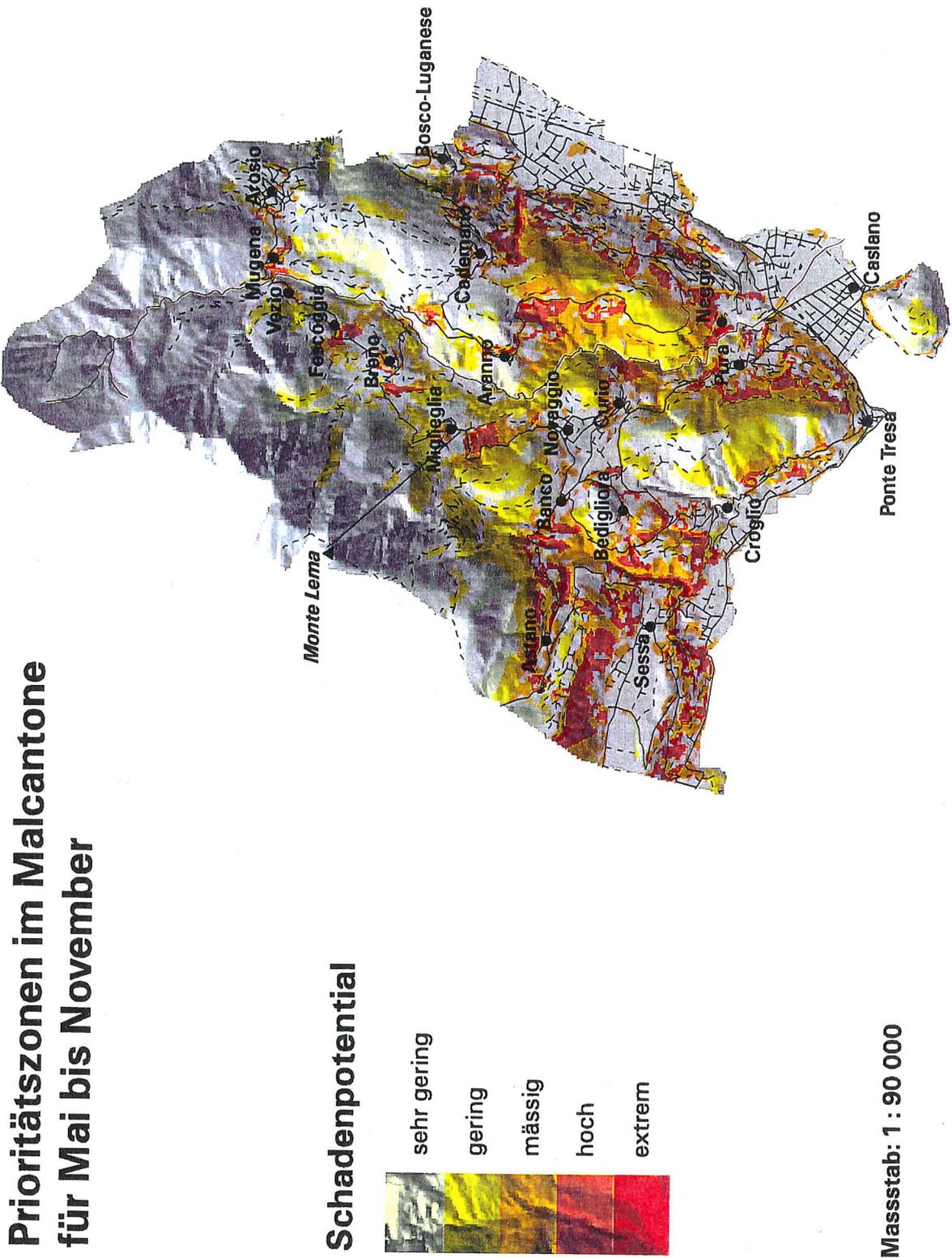


Fig. 65: Prioritätszonen von Mai bis November (Höhenmodell DHM25 © Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamts für Landestopographie vom 27.2.1996)

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, ein mögliches Vorgehen zur Unterstützung des Waldbrandmanagements durch Computer zu skizzieren. Die meisten Lösungsschritte wurden deshalb nur beispielhaft durchgeführt und nicht exakt berechnet. Sie sollten noch überprüft und vermehrt auf Literaturangaben und statistische Berechnungen abgestützt, sowie mit ExpertInnen besprochen werden. Das Gewicht wurde in dieser Arbeit auf die Integration eines GIS in ein Entscheidungsunterstützendes System im Waldbrandmanagement gelegt. Als Beispiel eines möglichen Einsatzes eines GIS wurden Prioritätszonen für die Waldbrandbekämpfung erstellt.

Die ursprüngliche Motivation dieser Arbeit war - wie eingangs erwähnt - ein Waldbrandmanagement-Konzept für den Schweizerischen Nationalpark. Aufgrund seiner besonderen Naturschutzfunktion dürfen Feuer nicht einfach bekämpft werden, sondern müssen einer ökologischen Bewertung unterzogen werden. Das Konzept der Ausscheidung von Prioritätszonen soll daher auch im Waldbrandmanagement des Schweizerischen Nationalparks Eingang finden und helfen, eine den ökologischen, ökonomischen und rechtlichen Besonderheiten des Parks angepasste Waldbrandstrategie zu entwickeln.

Es soll hier ausserdem kurz gezeigt werden, wie ein Entscheidungsunterstützendes System im Waldbrandmanagement aussehen könnte und welche Daten und Modelle zu seiner Verwirklichung notwendig wären, bzw. schon vorhanden sind.

- Modellbasis:
 - Feuerausbreitung (SPARKS)
 - Klima (insbesondere Wind)
 - Brandgut (SPARKS)
 - Brandgutfeuchtigkeit (SPARKS)
 - Geländemodell (DHM25)
 - Prioritätszonen (SPARKS)
 - Bekämpfungsstrategien
- Datenbank:
 - Klimadaten der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (teilweise in der Meteorologischen Datenbank des WSL erfasst)
 - Daten über erfolgte Brände (Waldbranddatenbank des WSL)
 - Bekämpfungsressourcen

Modellbasis

Die ganze Modellbasis könnte durch ein GIS abgedeckt werden. Zur Modellierung der Feuerausbreitung, der Prioritätszonen des Brandguts und der Brandgutfeuchtigkeit könnte das bereits bestehende SPARKS verwendet werden. Damit müsste unbedingt ein Windmodell verknüpft werden, da Windrichtung und Windgeschwindigkeit sehr stark vom Gelände und der Vegetationsbedeckung abhängig sind und sich laufend verändern.

Die Eigenschaften des Brandguts wurden von HARVEY (1996) im Malcantone erst für Kastanien, reinen Nadelwald und ehemaliger Waldbrandgebiete erhoben. Für den Rest des Untersuchungsgebiets bestehen noch keine

Informationen. Um die Feuerausbreitung korrekter modellieren zu können, müssten die fehlenden Daten noch erhoben werden.

Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung und Temperatur variieren in Abhängigkeit des Geländes sehr stark. Um eine zuverlässige Modellierung der Brandgutfeuchtigkeit vornehmen zu können, sollten also ein Klimamodell erstellt und die Eigenschaften des Geländes sowie die Witterung der letzten Woche berücksichtigt werden. Ebenfalls beeinflusst wird die Feuchtigkeit des toten Brandguts von der Art und dem Durchmesser des Brandguts.

Für die Einteilung in Prioritätszonen wurden in dieser Arbeit sehr viele Annahmen getroffen, die in einem weiteren Schritt noch verifiziert werden müssen. Dies gilt besonders für die Berechnung und Klassierung der Gefahrencodes zur Bestimmung des Schadenpotentials. Die Exponentialfunktion, die zur Berechnung der Gefahrencodes der Feuerausbreitung benützt wurde, stammt aus der Literatur der Potentialmodelle der Geographie (SCHÖNING 1996). Sie muss auf ihre Anwendbarkeit in der Modellierung der Feuerausbreitung getestet werden. Speziell der Exponent, mit dem die Feuerausbreitungszeit gewichtet wurde, sollte sorgfältig überprüft werden.

Auch der Faktor, mit dem die Gefahrencodes der gefährdeten Objekte der Waldbrandgeschichte berechnet wurden, muss anhand der Rangierung und Gewichtung der gefährdeten Objekte in Zusammenarbeit mit ExpertInnen überprüft werden. Ausserdem müssen alle Berechnungen, die bisher mit dem digitalen Geländemodell RIMINI gemacht wurden, mit dem DHM25 wiederholt werden.

Die aus dem Schadenpotential der Waldbrandgeschichte und demjenigen der Feuerausbreitung resultierenden Prioritätszonen sollten anschliessend ebenfalls mit ExpertInnen überprüft werden.

Die vorliegende Arbeit berücksichtigte nur einen Aspekt bei der Ausscheidung der Prioritätszonen, nämlich das Schadenpotential einzelner Objekte bei einem Feuer. Neben dem Schadenpotential spielen jedoch für die Zugehörigkeit zu einer Prioritätszone auch Gebiete mit einer hohen Brandgefahr und die Wahrscheinlichkeit für einen Brandausbruch an einem bestimmten Ort (Feuerrisiko) eine Rolle. Ebenfalls wichtig ist die Zeit, die zwischen dem Beginn eines Feuers und dem Einsetzen der Feuerbekämpfung verstreicht, da Feuer kurz nach dem Entzünden noch leicht bekämpfbar und die dabei entstandenen Schäden noch klein sind. Diese Zeitspanne wird durch die Einsehbarkeit des Geländes (wie gut sieht man ein Feuer von bestimmten Punkten aus) und der Erreichbarkeit (wie lange dauert es von der Entdeckung bis zum Beginn der Bekämpfung eines Feuers) bestimmt. All dies könnte mit einem GIS simuliert werden.

Bei der Berechnung des Schadenpotentials wurden zudem nicht alle schützenswerten Objekte miteinbezogen. Es fehlen zum Beispiel Tierhabitate, Gebiete mit besonders empfindlicher Vegetation, sowie Aspekte der Feuerökologie (Wiederholungsraten des Feuers an einem Ort und seine Intensität, die für das Ausmass der Schäden entscheidend ist).

Ebenfalls von grosser Wichtigkeit, und bisher nicht in die Arbeit miteinbezogen, ist die sehr umfangreiche Thematik der Waldbrandbekämpfung. Hier wäre die

Unterstützung des GIS mit einem Expertensystem gut vorstellbar. Dabei könnten die Faustregeln der Feuerwehrkommandanten, die in der Wissensbasis abgespeichert wären, dazu dienen, die ökologisch und ökonomisch sinnvollste Bekämpfungsstrategie zu finden.

Datenbank

Die Daten der Meteodatenbank des WSL beziehen sich auf drei Klimastationen, die gleichmässig auf den Kanton Tessin verteilt sind. Lokale Verhältnisse konnten deshalb nicht berücksichtigt werden, wären aber für die Vorhersage des Feuerverhaltens zentral. Keine Angaben wurden über die Windrichtung gemacht, die für das Feuerverhalten jedoch bestimmend ist. Die Klimadaten sollten also nicht nur in einer Datenbank abgespeichert, sondern auch als Modell verwendet werden können.

Die Einträge der Waldbranddatenbank (WSL) und die Perimeter der Waldbrände im GIS (WSL) wurden zur Ausscheidung der Prioritätszonen verwendet. Da sie aber noch fehlerhaft und unvollständig sind, müssen sie korrigiert und aktualisiert werden.

Angaben zu Bekämpfungsressourcen und wo im Gelände sie sich befinden, liegen heute noch keine in verwendbarer Form vor. Es wäre aber möglich, die benötigten Daten zusammenzustellen.



Literaturverzeichnis

- Agee, J. K. (1978). Alternative fire-management policies: methods for assessment. *Fire and fuel management in mediterranean-climate ecosystems: research priorities and programmes*. J. K. Agee. Paris, UNESCO. 11: 29-32.
- Ahlgren, I. F. and C. E. Ahlgren (1960). "Ecological effects of forest fires." *Botanical Review* 26: 483-533.
- Albini, F. A. (1976). Computer-based models of wildland fire behavior: a user's manual, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Albini, F. A. (1992). *Dynamics and modelling of vegetation fires: observations*. Dahlem workshop: fire in the environment: the ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires, Berlin, John Wiley & Sons, West Sussex.
- Allenbach, B. and R. Steinegger (1990). Wenn die Flammen den Schutzwald zerstören. *Tages Anzeiger*. Zürich.
- Ambrosetti, F. and E. Zenone (1978). "Regionale Klimabeschreibungen: Alpensüdseite." *Klimatologie der Schweiz* 19 (2. Teil).
- Anderson, H. E. (1985). *Moisture and fine fuel response*. Weather - The Drive Train Connecting the Solar Engine to Forest Ecosystems 8th Conference on Fire and Forest Meteorology, Detroit, Michigan, Society of American Foresters.
- Bill, R. and D. Fritsch (1991). *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. Karlsruhe, Wichmann.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L. and Williams, D. (1983). *Fire in forestry*, John Wiley & Sons, New York.
- Chou, Y. H. (1991). *Delineation of critical zones of fire danger*. 11th Conference on Fire and Forest Meteorology, Missoula, Montana, USA, Society of American Foresters.
- Chou, Y. H. (1992). "Management of wildfires with a geographical information system." *Int. J. Geographical Information Systems* 6 (2): 123-140.
- Conedera, M., Marcozzi, M. and Jud, B. (1993). "Banque de données sur les incendies de forêt au sud des alpes suisses." *Contribution of European Engineers to Reduction or Natural Disasters*, Lausanne, 165-171.
- Cotti, G. (1989). "Ein Gang durch die Tessiner Wälder." *SKA Bulletin* 89 (10): 33-35.

- de Golia, J. (1989). *FIRE. The story behind a force of nature*. Las Vegas, KC Publications, Inc., Las Vegas.
- de Lestard, J. P. G. (1978). *Priority zoning and resource valuation north of 60°*. International Fire Management Workshop, Edmonton, Alberta, Canada, Northern Forest Research Centre, Canadian Forestry Service.
- Delarze, R., Caldelari, D. and Hainard, P. (1992). "Effects of fire on forest dynamics in southern Switzerland." *Journal of Vegetation Science*, 3, 55-60.
- Eftrichidis, G., Xanthopoulos, G. and Varela, V. (1994). "A preparedness planning frame for forest fire prevention." *2nd Int. Conference on Forest Fire Research*, Coimbra, Portugal, 105-112.
- ESRI (1994). *The regions data model*. Redlands, CA, ESRI, Environmental Research Institute, Inc.
- Ford, F. N. (1985). Decision support systems and expert systems: a comparison. *Information and Management*. 8: 21-26.
- Frank, C., Wyder, E., Jud, B., Conedera, M. and Marcozzi, M. (1994). "Konzept zur Erfassung und Nachführung der WSL-Waldbrand-Datenbank der Sottostazione FNP mit GIS ArcInfo." *Interner Bericht*, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.
- Fuller, M. (1991). *Forest Fires*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- Gronlund, A., Xiang, W.-N. and Sox, H. (1994). "GIS, expert system technologies improve forest fire management techniques." *GIS World*, February, 32-36.
- Guariso, G. and H. Werthner (1989). *Environmental decision support systems*. Chinchester, Ellis Horwood limited.
- Hamilton, M. P., Salazar, L. A. and Palmer, K. E. (1989). "Geographic information systems: providing information for wildland fire planning." *Fire technology*, 25(1), 5-23.
- Harvey, S. (1994). Brandgutdaten in der Waldbrandmodellierung. *Geographisches Institut*. Zürich, Universität Zürich.
- Harvey, S. (1996). Brandgutdaten in der Waldbrandmodellierung. *Geographisches Institut*. Zürich, Universität Zürich Irchel.
- Jecklin, R. and T. Schöb (1993). *Waldbrandbekämpfung im Gebirge*. Chur, Verlag Bündner Wald.
- Johnson, L., Lumley, J. W., Humphreys, P., C., T. R., J., K. L. and Fox, J. (1984). *Decision support aspects of expert systems*

- Jud, B. (1995). Beschreibung der Attribute der Waldbranddatenbank. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL).
- Knapp, C. and M. Borel (1905). Malcantone. *Geographisches Lexikon der Schweiz*. V. Attinger. Neuenburg, Gebrüder Attinger. 3: 278.
- Kourtz, P. (1990). "Artificial intelligence: a new tool for forest management." *Canadian Journal of Forestry Research* 20: 428-437.
- Lanly, J. P. (1986). *Wildland fire management terminology*. Rome, Food and agriculture organization of the United Nations.
- Lee, B. S. and K. R. Anderson (1989). *A spatial analysis approach for forest fire preparedness planning*. 10th Conference on Fire and Forest Meteorology, Ottawa, Canada, Society of American Foresters.
- Lu, J. and W.-N. Xiang (1992). *A GIS-based expert system for land use regulation enforcement*. Urban and Regional Information Systems Association, Washington, D.C., URISA.
- National Wildfire Coordinating Group (1992). *Fire behavior field reference GUIDE*, United States Department of Agriculture.
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Ryf, F. (1992). Carta della vegetazione arborea. Taverne, Ingenieur- und Planungsbüro Francesco Ryf.
- Ryser, D. (1994). Allgemeines zum Waldbrandmanagement. pers. Mitteilung.
- Ryser, D. (1995). Gefährdete Zonen. pers. Mitteilung.
- Sachs, J., Baer, L., Kabcenell, D. and Stevens, L. (1986). *ORACLE SQL*Plus user's guide, Version 2.0*, Oracle Corporation, Belmont, CA.
- Scheurer, T., F. Klötzli, et al. (1991). *Waldbrand im Schweizerischen Nationalpark. Ergebnisse der Klausurtagung vom 2./3. Juli 1991*. Klausurtagung vom 2./3. Juli 1991, Schweizerischer Nationalpark, Wissenschaftliche Nationalparkkommission, Nationalparkdirektion.
- Schöning, R. (1994). Möglichkeiten der Modellierung der Waldbrandverhaltens mit GIS am Beispiel des Schweizerischen Nationalparks. *Geographisches Institut*. Zürich, Universität Zürich Irchel: 30.
- Schöning, R. (1996). Modellierung des potentiellen Waldbrandverhaltens mit einem Geographischen Informationssystem. *Geographisches Institut*. Zürich, Universität Zürich-Irchel.

Salazar, L. A. and C. V. Nilsson (1989). *Integrating geographic information systems into fire management*. 10th Conference on Fire and Forest Meteorology, Ottawa, Canada, Society of American Foresters.

Simard, A. J. (1976). *Wildland fire management: the economics of policy alternatives*, Department of Fisheries and Environment, Canadian Forestry Service.

Simard, A. J. (1977). *Wildland fire management: a systems approach*, Department of Fisheries and Environment, Canadian Forestry Service.

van Wagner, C. E. (1977). "Conditions for the start and spread of crown fires." *Canadian Journal of Forest Research* 7: 23-34.

van Wyngaarden, R. and T. Grimes (1989). *GIS applications in fire management*. 10th Conference on Fire and Forest Meteorology, Ottawa, Canada, Society of American Foresters.

Vega-Garcia, C., Woodward, P. M. und Lee, B. S. (1993). "Mapping risk of wildfires from human sources of ignition with a GIS." *Thirteenth annual ESRI users conference*, Palm Springs, 419-426.

Winkler, O. (1971). *Anleitung zur Verhütung und Bekämpfung von Waldbränden. Anleitung zur Verhütung und Bekämpfung von Waldbränden*. O. Winkler. Solothurn, Verlag der Forstwirtschaftlichen Zentralstelle der Schweiz: 7-23.

Malcantone. *Schweizer Lexikon* 1991. K. M. Zier. Horw/Luzern, Verlag Schweizer Lexikon. 4: 424-425.

Anhang

Anhang I

Datenverwaltung im GIS

Anhang II

Daten zur Berechnung der Feuerausbreitung

Anhang III

AML-Scripts zur Berechnung der Feuerausbreitung

Anhang IV

Erstellen der Rasterdatensätze mit dem Anteil der verbrannten Flächen

Anhang V

Berechnung der Feuerausbreitung

Anhang VI

Berechnung des Gefahrencodes der Rückwärtsausbreitung

Anhang VII

Modellierung der Brandgutfeuchtigkeit

Anhang VIII

Anteil der verbrannten Flächen der gefährdeten Objekte

Anteil der verbrannten Fläche der Topographie

Anteil der verbrannten Fläche der Vegetation

Gefahrencodes und Schadenpotential

Anhang IX

Regionen-Konzept in ARC/INFO

Anhang X

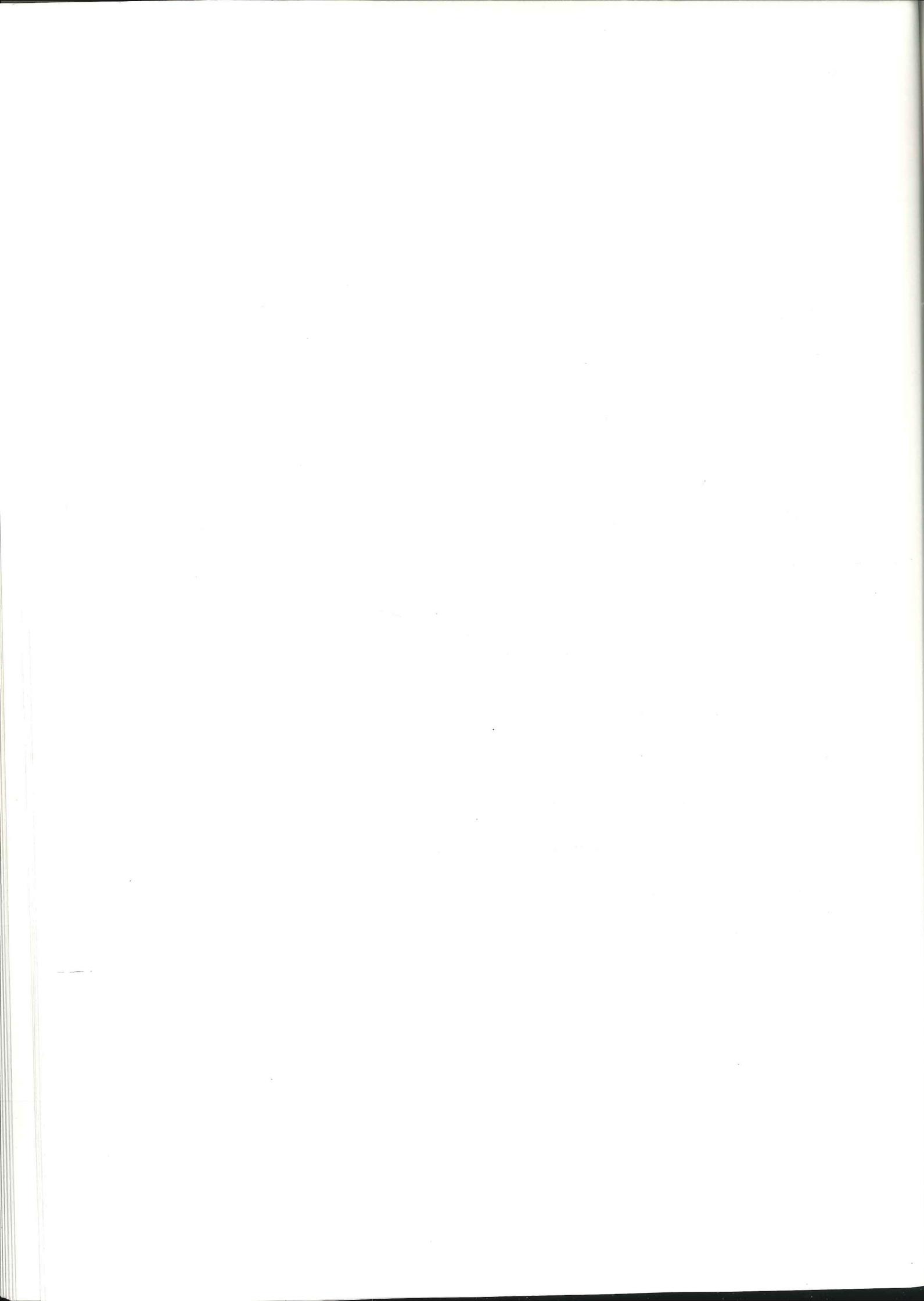
Waldbrandprotokoll des Forstdienstes im Tessin

Anhang XI

Interview mit Herrn D. Ryser

Anhang XII

Berechnung der Rückwärtsausbreitung



Anhang I

Datenverwaltung im GIS

Für die Datenverwaltung im GIS wurden zwei verschiedene Konzepte verwendet, die auf zwei unterschiedlichen Modulen der Software ARC/INFO beruhen.

Für die Daten, die mit der Brandgeschichte im Zusammenhang stehen, wurde das Regionen-Konzept (Vektordaten) gewählt (Anhang IX). Alle Daten, die zur Berechnung der Feuerausbreitung benötigt wurden, wurden als Rasterdaten im GRID verwaltet. Da einige Daten für beide Auswertungen gebraucht wurden, wurden sie sowohl als Vektor-, als auch als Rasterdaten abgespeichert.

Die Namen der Datensätze sind kursiv geschrieben.

Vektordaten

Die Daten der Waldbrandgeschichte wurden als Regionen abgelegt. Zur Erleichterung der Auswertungen der Brandgeschichte werden alle übrigen Daten nach dem Digitalisieren ebenfalls in Regionen umgewandelt und als neue Subklasse an den bestehenden Vektordatensatz mit den Waldbrandperimetern angefügt. Der so entstandene Vektordatensatz wurde *mal* genannt und enthält die folgenden Subklassen:

- *inumfo* Waldbrände mit eindeutiger Nummer, die zur Identifikation gegenüber der externen ORACLE Waldbranddatenbank dient (Daten des WSL)
- *season1* Waldbrände zwischen Dezember und Februar
- *season2* Waldbrände zwischen März und April
- *season3* Waldbrände zwischen Mai und November
- *veg* Vegetationskarte
- *art* Vegetationskarte (jedes Polygon ist eine Region)
- *bestand* Bestandeskarte
- *nutzung* Bestandeskarte (jedes Polygon ist eine Region)
- *zone* gefährdete Gebiete und Objekte nach den Angaben von RYSER (1995)

Wo nichts anderes vermerkt ist, bilden alle Polygone einer Subklasse, die derselben Klasse angehören, z.B. alle Polygone des gleichen Vegetationstyps, eine Region.

Bei den anderen Subklassen besteht jede Region nur aus einem einzigen Polygon. Je nach dem Ziel der Auswertung wurde die eine oder die andere Variante gewählt.

Basisdaten

- *grenzpoly* Gemeindegrenzen
- *see* Gewässer
- *siedl* Siedlungsgebiete und Campingplätze
- *verkehr* Verkehrswege
- *wveg* Vegetationskarte

Attributdaten

Zur Beschreibung des toten Brandguts für das Feuerausbreitungsmodell SPARKS wurde ein Attributdatensatz benötigt (HARVEY 1996).

- *brandgut.dat* Beschreibung des toten Brandguts für drei Vegetationsklassen (Kastanien, reiner Nadelwald und Vegetation in ehemaligen Waldbrandflächen) im Malcantone.

Rasterdaten

Alle Daten, die zur Modellierung der Feuerausbreitung benötigt wurden, sowie alle Resultate und Zwischenresultate der Prioritätszonen wurden in der Form von Rasterdaten abgelegt. Das bedingte, dass die meisten Vektordaten auch in Rasterformat vorliegen.

Basisdaten

- *dhm25_mal* DHM25 des Malcantone
- *asp_dhm_mal* Exposition, berechnet aus dem DHM25
- *slp_dhm_mal* Hangneigung, berechnet aus dem DHM25
- *haus_gr* Siedlungsgebiete
- *obj_gr* kulturelle Objekte
- *str_gr* Verkehrswege

Feuerausbreitung

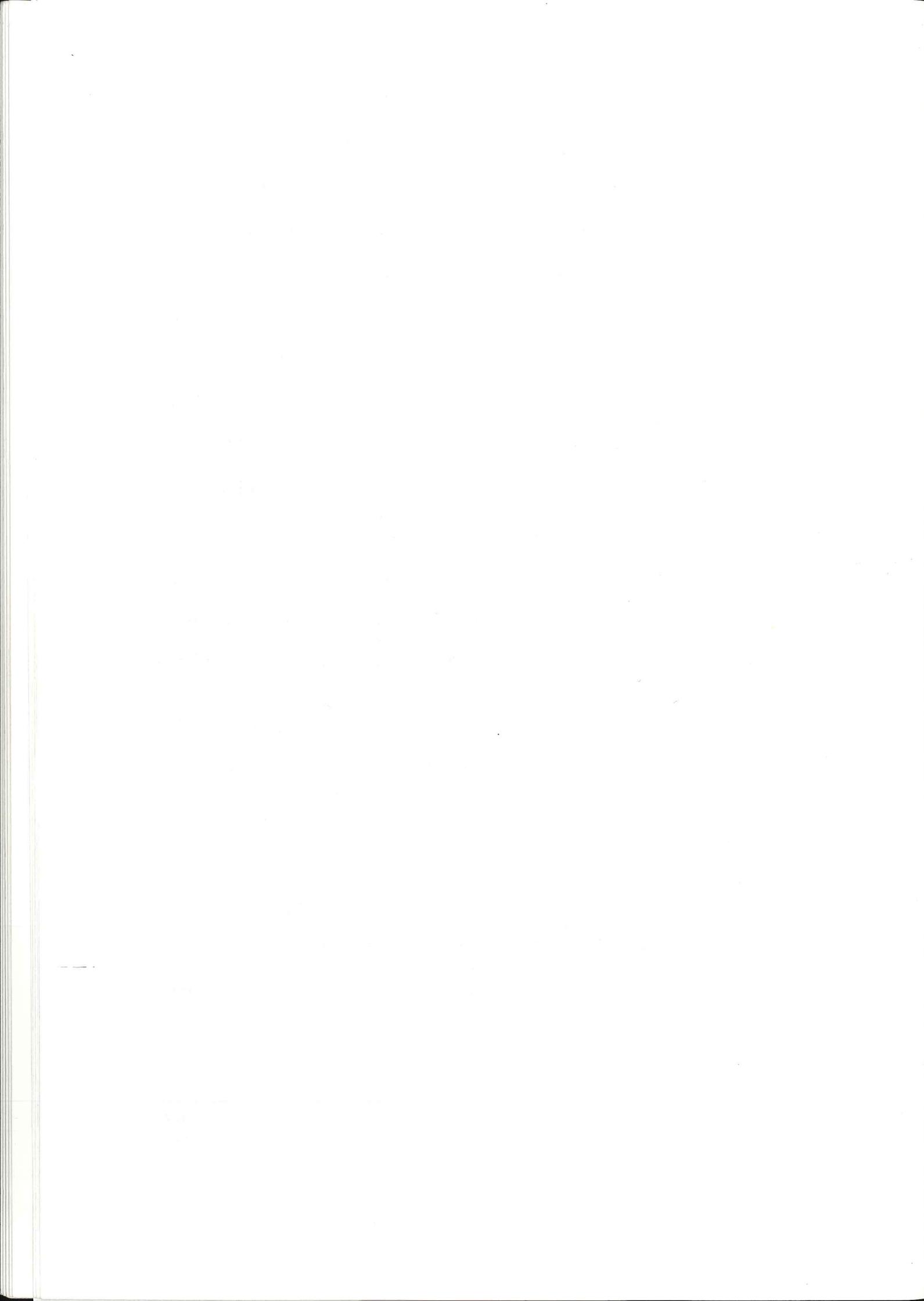
- *haus_buf* Gepuffertes *haus_gr*
- *obj_buf* Gepuffertes *obj_gr*
- *str_buf* Gepuffertes *str_gr*
- *str_barr* Strassen als Barrieren
- *str_flu_barr* Strassen und Gewässer als Barrieren
- *barr* Strassen, Gewässer und Siedlungen als Barrieren
- *fln1* Berechnete Flammenlänge für Dezember - Februar
- *fln2* Berechnete Flammenlänge für März - April
- *fln3* Berechnete Flammenlänge für Mai - November
- *r1* Berechnete Ausbreitungsrate für Dezember - Februar
- *r2* Berechnete Ausbreitungsrate für März - April
- *r3* Berechnete Ausbreitungsrate für Mai - November
- *b1* Berechnete Richtung der Rückwärtsausbreitung für Dezember - Februar
- *b2* Berechnete Richtung der Rückwärtsausbreitung für März - April
- *b3* Berechnete Richtung der Rückwärtsausbreitung für Mai - November

Brandgut

- *fuelelev* Höhenabhängige Korrektur der Brandgutfeuchtigkeit
- *moists1* Brandgutfeuchte für Waldbrandsaison Dezember - Februar
- *moists2* Brandgutfeuchte für Waldbrandsaison März - April
- *moists3* Brandgutfeuchte für Waldbrandsaison Mai - November
- *wtot_g* Brandgut

Resultate

- *haus_sprsk1* Rückwärtsausbreitung von Siedlungen aus gerechnet (Dezember - Februar)
- *haus_sprsk2* Rückwärtsausbreitung von Siedlungen aus gerechnet (März - April)
- *haus_sprsk3* Rückwärtsausbreitung von Siedlungen aus gerechnet (Mai - November)
- *str_sprs1* Rückwärtsausbreitung von Strassen aus gerechnet (Dezember - Februar)
- *str_sprs2* Rückwärtsausbreitung von Strassen aus gerechnet (März - April)
- *str_sprs3* Rückwärtsausbreitung von Strassen aus gerechnet (Mai - November)
- *obj_sprs1* Rückwärtsausbreitung von gefährdeten Objekten aus gerechnet (Dezember - Februar)
- *obj_sprs2* Rückwärtsausbreitung von gefährdeten Objekten aus gerechnet (März - April)
- *obj_sprs3* Rückwärtsausbreitung von gefährdeten Objekten aus gerechnet (Mai - November)
- *access1* Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von Dezember - Februar
- *access2* Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von März - April
- *access3* Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung von Mai - November
- *rytos1* Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von Dezember - Februar
- *rytos2* Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von März - April
- *rytos3* Schadenpotential der Waldbrandgeschichte von Mai - November
- *gefcodes1* Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung und der Waldbrandgeschichte von Dezember - Februar
- *gefcodes2* Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung und der Waldbrandgeschichte von März - April
- *gefcodes3* Schadenpotential der Rückwärtsausbreitung und der Waldbrandgeschichte von Mai - November
- *gc1* Zu Prioritätszonen klassiertes Schadenpotential von Dezember - Februar
- *gc2* Zu Prioritätszonen klassiertes Schadenpotential von März - April
- *gc3* Zu Prioritätszonen klassiertes Schadenpotential von Mai - November



Anhang II

Daten zur Berechnung der Feuerausbreitung

Die Namen der Datensätze sind kursiv gedruckt.

Brandgut

Für die Angaben des Brandguts wurden die Brandgutmodelle von HARVEY (1996) verwendet. Sie bestehen aus einem Rasterdatensatz (*wtot_g*) und einem INFO File (*brandgut.dat*).

Brandgutfeuchtigkeit

Die Feuchtigkeit des toten Brandguts wurde in Abhängigkeit des Reliefs berechnet (Kap. 4.6). Die resultierenden Brandgutfeuchtigkeitsdatensätze für die drei Waldbrandsaisons (*moists1*, *moists2* und *moists3*) wurden für die drei Brandgutdurchmesserklassen (< 0.6 cm, 0.6 - < 2.5 cm, 2.5 - < 7.5 cm) verwendet (Kap. 2.3).

Die Werte für die Feuchtigkeit des lebenden Brandguts wurden der Literatur (GROUP 1992) entnommen (Kap. 4.6). Für das krautige und das verholzte Brandgut wurden dieselben Werte verwendet. Der Waldbrandsaison mit den trockensten Bedingungen wurden vom Durchschnittswert (200%) für die Brandgutfeuchtigkeit der mittleren Waldbrandsaison 50% abgezählt, für die feuchtere 50% dazugezählt. Da im Tessin keine extreme jahreszeitliche Schwankung in der Luftfeuchtigkeit besteht, wurden nicht die Extremwerte aus der Literatur (+/- 100%) verwendet.

Waldbrandsaison	Brandgutfeuchte
Dezember-Februar	200%
März-April	150%
Mai-November	250%

Tab. 1: Typische Brandgutfeuchtigkeiten nach Waldbrandsaison

Wind

Die typischen Windgeschwindigkeiten (um zwölf Uhr) für jede Waldbrandsaison werden der Meteodatenbank des WSL entnommen.

Waldbrandsaison	Windgeschwindigkeit
Dezember-Februar	1.9 m/s
März-April	2.3 m/s
Mai-November	2.1 m/s

Tab. 2: Mittlere Windgeschwindigkeiten um zwölf Uhr nach Waldbrandsaison

Leider liegen in der Meteodatenbank des WSL keine Angaben über die Windrichtungen vor, sodass auf die Literatur der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (SMA) (AMBROSETTI 1978) ausgewichen werden musste, die nicht für dieselbe Zeitspanne wie die Meteodatenbank des WSL (JUD 1995) erhoben wurden, sondern von 1965 bis 1967. Dazu bestehen nur Angaben für eine Station, nämlich Locarno-Monti. Daraus wurde der Mittelwert aus den

Werten von 10 Uhr und 13.30 Uhr für jeden der Monate Januar, April und Juli gebildet, die je eine Waldbrandsaison repräsentieren (AMBROSETTI 1978 S. 401).

Waldbrandsaison	Windrichtung
Dezember-Februar	310 °
März-April	0 °
Mai-November	10 °

Tab. 3: Typische Windrichtungen um zwölf Uhr nach Waldbrandsaison in Abweichung von Nord

Startpunkt des Feuers

Da streng genommen das Feuer nicht direkt auf der Strasse, bzw. in den Siedlungsgebieten beginnen kann, mussten der Rasterdatensatz für die Siedlungen, der für die Strassen und derjenige mit den kulturellen Objekten gebuffert werden (*haus_buf*, *str_buf* und *obj_buf*). So beginnen die Feuer unmittelbar neben der Strasse oder der Siedlung und nicht darauf zu brennen.

Barrieren

Bei der Feuerausbreitung mussten auch die Barrieren berücksichtigt werden. Sie wurden in Form von Rasterdatensätzen in die Modellierung einbezogen.

Startpunkt des Feuers	Barrierengrid
Siedlungen	Strassen und Gewässer
Strassen	Siedlungen und Gewässer
kulturelle Objekte	Siedlungen, Strassen und Gewässer

Tab. 4: Barrierenrasterdatensätze

Das zur Berechnung der Übersprungungswahrscheinlichkeit einer Barriere benötigte Verhältnis der Flammenlänge zu der Hindernisbreite wurde empirisch ermittelt und für alle Berechnungen konstant gelassen:

Wahrscheinlichkeit	fln/b
0.1	0.9
0.9	2.5

Tab. 5: Wahrscheinlichkeiten des Überschreitens der Barrieren in Abhängigkeit des Verhältnisses Flammenlänge zu Hindernisbreite (fln/b)

Topographie

Zur Berechnung der Feuerausbreitung wurden Informationen über die Hangneigung (*slp_dhm_mal*) und die Exposition (*asp_dhm_mal*) benötigt. Diese wurden aus dem digitalen Geländemodell DHM25 (*dhm25_mal*) berechnet.

Anhang III

AML-Scripts zur Berechnung der Feuerausbreitung

Die vollständigen Scripts befinden sich in SCHÖNING (1996). Hier wird lediglich die Syntax der Befehle angegeben.

Berechnung der Ausbreitungsparameter (*rothermel.aml*)

```
USAGE: ROTHERMEL GRID <TEXT <text_file> | <fuel_grid> <info_file>
      <m_d1> <m_d2> <m_d3> <m_lh> <m_lw> <slp> <asp> <wsp> <wdr>
      {ros} {sdr} {fln} {fli} {fzd} {ir} {hpa} {efw}
      {csv} {btm} {hsk} {gma} {xi} {ph_s} {ph_w}
      {nm_d} {nm_l} {bmo} {mx_l} {tau}>
USAGE: ROTHERMEL VAR <prefix>
USAGE: ROTHERMEL LIST_I/O <input_list_var> <output_list_var>
USAGE: ROTHERMEL DESCRIBE_I/O <prefix>
USAGE: ROTHERMEL PICK_INPUT <prefix>
USAGE: ROTHERMEL HELP
```

Berechnung der Feuerausbreitung (*firespread.aml*)

```
Usage: FIRESREAD <fire_source> <rate_of_max_spread>
      <direction_of_max_spread> <effective_windspeed>
      {BARRIER <barrier> <flamlength> <rat_0.1> <rat_0.9>}
      {dtm}
      {fire_spread} {SEC | MIN} {max_time}
      {prob_crossing} {fireline_spread_direction}
      {angular_difference} {fireline_rate_of_spread}
      {horizontal_factor_table}
```



Anhang IV

Erstellen der Rasterdatensätze mit dem Anteil der verbrannten Flächen

```
/*
/* topo_perc.aml          mr 27/10/95
/*
/* GRID
/* Berechnen von saisonalen Grids mit Anteil der verbrannten Flaeche an der
/* Flaeche der Hoehenstufen, Expositions- und Hangneigungsklassen im
/* gesamten Malcantone.
/*
setcell 20
setwindow maxof

/* Hangneigung

&do

docell
  if (slp_dhm_mal ge 0 & slp_dhm_mal le 9) slp_percs2 = 0.7
  else if (slp_dhm_mal gt 9 & slp_dhm_mal le 18) slp_percs2 = 0.3
  else if (slp_dhm_mal gt 18 & slp_dhm_mal le 27) slp_percs2 = 4.4
  else if (slp_dhm_mal gt 27 & slp_dhm_mal le 36) slp_percs2 = 41.8
  else if (slp_dhm_mal gt 36 & slp_dhm_mal le 45) slp_percs2 = 28.4
  else if (slp_dhm_mal gt 45 & slp_dhm_mal le 54) slp_percs2 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 54 & slp_dhm_mal le 63) slp_percs2 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 63 & slp_dhm_mal le 72) slp_percs2 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 72 & slp_dhm_mal le 81) slp_percs2 = 0
  else slp_percs2 = 0
endif
end

docell
  if (slp_dhm_mal ge 0 & slp_dhm_mal le 9) slp_percs1 = 0.3
  else if (slp_dhm_mal gt 9 & slp_dhm_mal le 18) slp_percs1 = 0.7
  else if (slp_dhm_mal gt 18 & slp_dhm_mal le 27) slp_percs1 = 3.6
  else if (slp_dhm_mal gt 27 & slp_dhm_mal le 36) slp_percs1 = 27.3
  else if (slp_dhm_mal gt 36 & slp_dhm_mal le 45) slp_percs1 = 4.5
  else if (slp_dhm_mal gt 45 & slp_dhm_mal le 54) slp_percs1 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 54 & slp_dhm_mal le 63) slp_percs1 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 63 & slp_dhm_mal le 72) slp_percs1 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 72 & slp_dhm_mal le 81) slp_percs1 = 0
  else slp_percs1 = 0
endif
end

docell
  if (slp_dhm_mal ge 0 & slp_dhm_mal le 9) slp_percs3 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 9 & slp_dhm_mal le 18) slp_percs3 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 18 & slp_dhm_mal le 27) slp_percs3 = 0.1
  else if (slp_dhm_mal gt 27 & slp_dhm_mal le 36) slp_percs3 = 0.3
  else if (slp_dhm_mal gt 36 & slp_dhm_mal le 45) slp_percs3 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 45 & slp_dhm_mal le 54) slp_percs3 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 54 & slp_dhm_mal le 63) slp_percs3 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 63 & slp_dhm_mal le 72) slp_percs3 = 0
  else if (slp_dhm_mal gt 72 & slp_dhm_mal le 81) slp_percs3 = 0
  else slp_percs3 = 0
endif
end
```

Anhang IV

/* Exposition

docell

```
if (asp_dhm_mal gt 157 & asp_dhm_mal le 202) asp_percs2 = 47
  else if (asp_dhm_mal gt 202 & asp_dhm_mal le 247) asp_percs2 = 7.0
  else if (asp_dhm_mal gt 247 & asp_dhm_mal le 292) asp_percs2 = 0.8
  else if (asp_dhm_mal gt 292 & asp_dhm_mal le 337) asp_percs2 = 0
  else if (asp_dhm_mal gt 337 & asp_dhm_mal le 360) asp_percs2 = 0
  else if (asp_dhm_mal ge 0 & asp_dhm_mal le 22) asp_percs2 = 0
  else if (asp_dhm_mal gt 22 & asp_dhm_mal le 67) asp_percs2 = 0
  else if (asp_dhm_mal gt 67 & asp_dhm_mal le 112) asp_percs2 = 1.8
  else asp_percs2 = 26.5
endif
end
```

docell

```
if (asp_dhm_mal gt 157 & asp_dhm_mal le 202) asp_percs1 = 27.7
  else if (asp_dhm_mal gt 202 & asp_dhm_mal le 247) asp_percs1 = 2.6
  else if (asp_dhm_mal gt 247 & asp_dhm_mal le 292) asp_percs1 = 0.9
  else if (asp_dhm_mal gt 292 & asp_dhm_mal le 337) asp_percs1 = 0.1
  else if (asp_dhm_mal gt 337 & asp_dhm_mal le 360) asp_percs1 = 0
  else if (asp_dhm_mal ge 0 & asp_dhm_mal le 22) asp_percs1 = 0
  else if (asp_dhm_mal gt 22 & asp_dhm_mal le 67) asp_percs1 = 0.4
  else if (asp_dhm_mal gt 67 & asp_dhm_mal le 112) asp_percs1 = 3.5
  else asp_percs1 = 7
endif
end
```

docell

```
if (asp_dhm_mal gt 157 & asp_dhm_mal le 202) asp_percs3 = 5.9
  else if (asp_dhm_mal gt 202 & asp_dhm_mal le 247) asp_percs3 = 0.3
  else if (asp_dhm_mal gt 247 & asp_dhm_mal le 292) asp_percs3 = 0.3
  else if (asp_dhm_mal gt 292 & asp_dhm_mal le 337) asp_percs3 = 0
  else if (asp_dhm_mal gt 337 & asp_dhm_mal le 360) asp_percs3 = 0
  else if (asp_dhm_mal ge 0 & asp_dhm_mal le 22) asp_percs3 = 0
  else if (asp_dhm_mal gt 22 & asp_dhm_mal le 67) asp_percs3 = 0.7
  else if (asp_dhm_mal gt 67 & asp_dhm_mal le 112) asp_percs3 = 0
  else asp_percs3 = 1.8
endif
end
```

/* Hoehenstufen

docell

```
if (dhm25_mal ge 0 & dhm25_mal le 300) elev_percs2 = 1.1
  else if (dhm25_mal ge 300 & dhm25_mal le 400) elev_percs2 = 0.6
  else if (dhm25_mal ge 400 & dhm25_mal le 500) elev_percs2 = 9.5
  else if (dhm25_mal ge 500 & dhm25_mal le 600) elev_percs2 = 28.8
  else if (dhm25_mal ge 600 & dhm25_mal le 700) elev_percs2 = 2.2
  else if (dhm25_mal ge 700 & dhm25_mal le 800) elev_percs2 = 48.7
  else if (dhm25_mal ge 800 & dhm25_mal le 900) elev_percs2 = 9.4
  else if (dhm25_mal ge 900 & dhm25_mal le 1000) elev_percs2 = 19.7
  else if (dhm25_mal ge 1000 & dhm25_mal le 1100) elev_percs2 = 27.4
  else if (dhm25_mal ge 1100 & dhm25_mal le 1200) elev_percs2 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1200 & dhm25_mal le 1300) elev_percs2 = 15.1
  else if (dhm25_mal ge 1300 & dhm25_mal le 1400) elev_percs2 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1400 & dhm25_mal le 1500) elev_percs2 = 110.4
  else if (dhm25_mal ge 1500 & dhm25_mal le 1600) elev_percs2 = 21.4
  else if (dhm25_mal ge 1600 & dhm25_mal le 1700) elev_percs2 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1700 & dhm25_mal le 1800) elev_percs2 = 0
  else elev_percs2 = 0
endif
```

end

docell

```
if (dhm25_mal ge 0 & dhm25_mal le 300) elev_percs1 = 2.0
  else if (dhm25_mal ge 300 & dhm25_mal le 400) elev_percs1 = 0.2
  else if (dhm25_mal ge 400 & dhm25_mal le 500) elev_percs1 = 0.7
  else if (dhm25_mal ge 500 & dhm25_mal le 600) elev_percs1 = 16.4
  else if (dhm25_mal ge 600 & dhm25_mal le 700) elev_percs1 = 28.6
  else if (dhm25_mal ge 700 & dhm25_mal le 800) elev_percs1 = 2.5
  else if (dhm25_mal ge 800 & dhm25_mal le 900) elev_percs1 = 2.0
  else if (dhm25_mal ge 900 & dhm25_mal le 1000) elev_percs1 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1000 & dhm25_mal le 1100) elev_percs1 = 6.0
  else if (dhm25_mal ge 1100 & dhm25_mal le 1200) elev_percs1 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1200 & dhm25_mal le 1300) elev_percs1 = 11.4
  else if (dhm25_mal ge 1300 & dhm25_mal le 1400) elev_percs1 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1400 & dhm25_mal le 1500) elev_percs1 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1500 & dhm25_mal le 1600) elev_percs1 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1600 & dhm25_mal le 1700) elev_percs1 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1700 & dhm25_mal le 1800) elev_percs1 = 0
  else elev_percs1 = 0
```

endif

end

docell

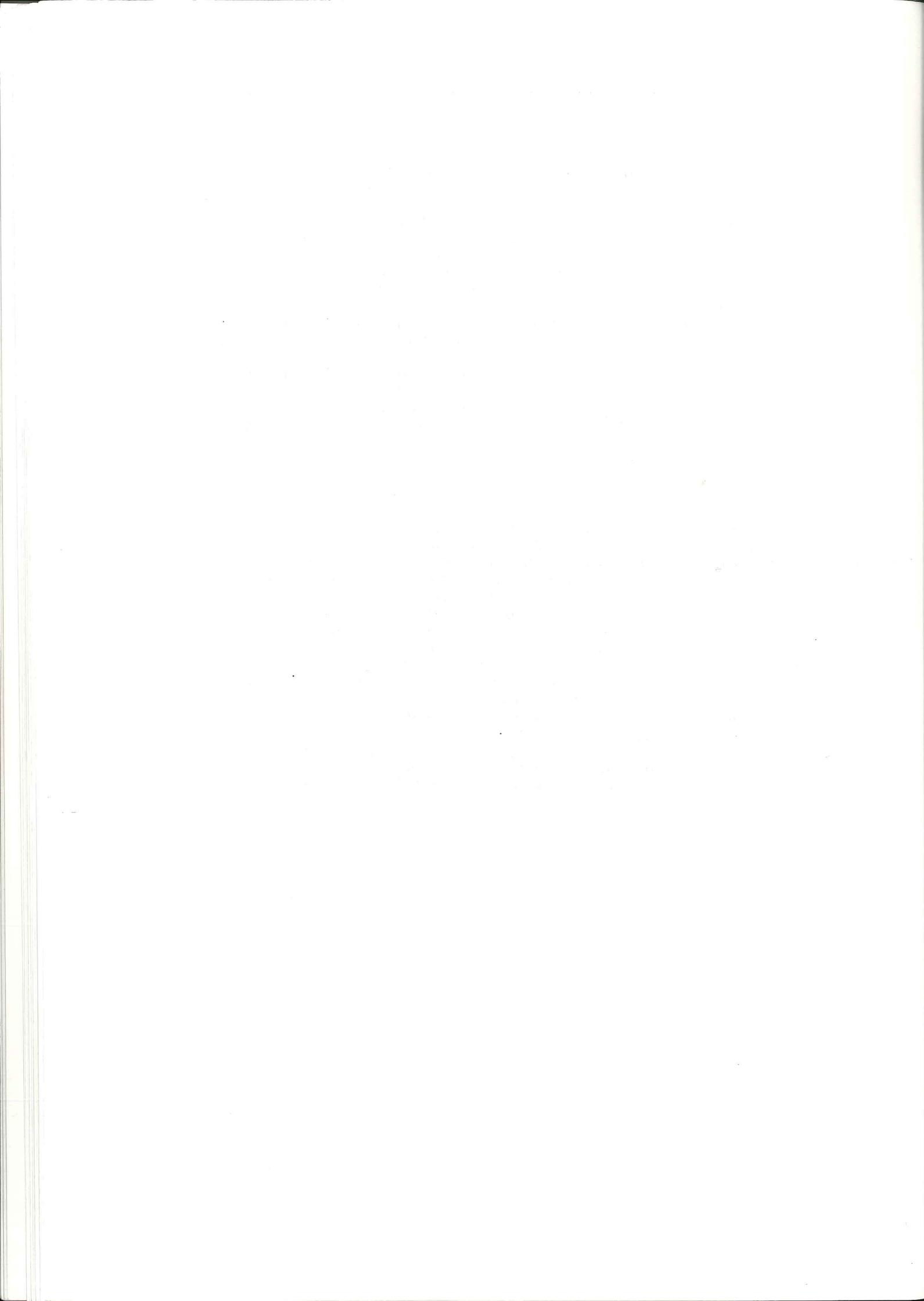
```
if (dhm25_mal ge 0 & dhm25_mal le 300) elev_percs3 = 6.7
  else if (dhm25_mal ge 300 & dhm25_mal le 400) elev_percs3 = 0.9
  else if (dhm25_mal ge 400 & dhm25_mal le 500) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 500 & dhm25_mal le 600) elev_percs3 = 0.5
  else if (dhm25_mal ge 600 & dhm25_mal le 700) elev_percs3 = 0.1
  else if (dhm25_mal ge 700 & dhm25_mal le 800) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 800 & dhm25_mal le 900) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 900 & dhm25_mal le 1000) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1000 & dhm25_mal le 1100) elev_percs3 = 11.5
  else if (dhm25_mal ge 1100 & dhm25_mal le 1200) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1200 & dhm25_mal le 1300) elev_percs3 = 13.9
  else if (dhm25_mal ge 1300 & dhm25_mal le 1400) elev_percs3 = 5.5
  else if (dhm25_mal ge 1400 & dhm25_mal le 1500) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1500 & dhm25_mal le 1600) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1600 & dhm25_mal le 1700) elev_percs3 = 0
  else if (dhm25_mal ge 1700 & dhm25_mal le 1800) elev_percs3 = 0
  else elev_percs3 = 0
```

endif

end

&end

&return



Anhang V

Berechnung der Feuerausbreitung

```

/*****
/*
/* meanspread.aml          mr 20.10.95
/*
/* Im GRID
/* Berechnen der Feuerausbreitung von Strassen, Haeusern und speziellen
/* Ojekten aus, mit Barrieren, fuer jede Brandsaison.
/* Da bei dieser Berechnung (in firespread.aml) beim Ueberqueren der
/* Barrieren eine Zufallsfunktion eingebaut ist, entstehen bei jeder
/* Berechnung unterschiedliche Resultate. Hier soll aus mehreren
/* Berechnungen so lange der Mittelwert berechnet werden, bis die
/* Standardabweichung uebers Resultatgrid kleiner als 0.05 ist, oder die
/* Berechnung 100 Mal durchgefuehrt wurde. Dazu werden die Extremwerte
/* (Maximum und Minimum) bestimmt.
*****/

/* Setzen der notwendigen Pfade und Umgebung

&amllpath $SPARKSHOME/aml/modellib
setcell 20
setwindow maxof

/* Berechnung fuer Ausbreitung von Siedlungen aus, mit Strassen als
Barrieren

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2

/* Berechnen der Feuerausbreitung

&r firespread /home/park2/mruegseg/basis/haus_buf r1 b1 1.9 barrier ~
/home/park2/mruegseg/basis/strflu_barr fln1 0.9 2.5 ~
/home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fsph1 min

&if %i% = 1 &then
&do
meanh1%n% = fsph1
sumh1%n% = con(isnull(fsph1),0,0)
minh1%n% = fsph1
maxh1%n% = fsph1
kill fsph1 all
&end

/* Berechnen von Mittelwert, Minimum, Maximum, Standardabweichung und der
/* Summe fuer die Standardabweichung. Dabei ist die Summe eine Annaeherung,
/* sie wird immer mit dem aktuellen Mittelwert berechnet (xi statt xn), da
/* sonst alle Grids gespeichert werden muessten. Dadurch entsteht ein
/* kleiner
/* Fehler, der jedoch nicht allzu stark ins Gewicht faellt.
/* Es handelt sich um ein gewichtetes Mittel, da bei jeder Berechnung der
alte

```

Anhang V

```
/* Mittelwert als Grundlage dient. mean = ((n-1) * mean(n-2) + x(n)) / n

&else
&do
  docell
    meanh1%n% = (%n% * meanh1%m% + fsph1) / %i%
    sumh1%n% = sqr(fsph1 - meanh1%n%) + sumh1%m%
    stdh1%n% = sqrt(sumh1%n% / %n%)
    minh1%n% = min(fsph1,minh1%m%)
    maxh1%n% = max(fsph1,maxh1%m%)
  end

/* Wenn der Mittelwert der Standardabweichung uebers ganze Grid < 0.05 ist,
/* soll zur naechsten Berechnung uebergangen werden. Falls dies nach 100
/* Berechnungen noch nicht eigetreten ist, soll dieser Loop ebenfalls
beendet /* werden.

&describe stdh1%n%
&if %i% gt 2 and %grid$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
  &goto x1

  kill meanh1%m% all
  kill stdh1%n% all
  kill minh1%m% all
  kill maxh1%m% all
  kill sumh1%m% all
  kill fsph1 all
&end

&end

&label x1

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2
  &r firespread /home/park2/mruegseg/basis/haus_buf r2 b2 2.3 barrier ~
    /home/park2/mruegseg/basis/strflu_barr fln2 0.9 2.5 ~
    /home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fsph2 min

&if %i% = 1 &then
  &do
    meanh2%n% = fsph2
    sumh2%n% = con(isnull(fsph2),0,0)
    minh2%n% = fsph2
    maxh2%n% = fsph2
    kill fsph2 all
  &end

&else
  &do
    docell
      meanh2%n% = (%n% * meanh2%m% + fsph2) / %i%
      sumh2%n% = sqr(fsph2 - meanh2%n%) + sumh2%m%
      stdh2%n% = sqrt(sumh2%n% / %n%)
      minh2%n% = min(fsph2,minh2%m%)
      maxh2%n% = max(fsph2,maxh2%m%)
    end
  end
end
```

Anhang V

```
&describe stdh2%n%
&if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
  &goto x2

kill meanh2%m% all
kill stdh2%n% all
kill minh2%m% all
kill maxh2%m% all
kill sumh2%m% all
kill fsph2 all
&end

&end

&label x2

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2
  &r firespread /home/park2/mruegseg/basis/haus_buf r3 b3 2.1 barrier ~
    /home/park2/mruegseg/basis/strflu_barr fln3 0.9 2.5 ~
    /home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fsph3 min

&if %i% = 1 &then
  &do
    meanh3%n% = fsph3
    sumh3%n% = con(isnull(fsph3),0,0)
    minh3%n% = fsph3
    maxh3%n% = fsph3
    kill fsph3 all
  &end

&else
  &do
    docell
    meanh3%n% = (%n% * meanh3%m% + fsph3) / %i%
    sumh3%n% = sqr(fsph3 - meanh3%n%) + sumh3%m%
    stdh3%n% = sqrt(sumh3%n% / %n%)
    minh3%n% = min(fsph3,minh3%m%)
    maxh3%n% = max(fsph3,maxh3%m%)
  &end

  &describe stdh3%n%
  &if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
    &goto x3

kill meanh3%m% all
kill stdh3%n% all
kill minh3%m% all
kill maxh3%m% all
kill sumh3%m% all
kill fsph3 all
&end

&end

/* Berechnung fuer Ausbreitung von Strassen aus, mit Siedlungen als
Barrieren

&label x3
```

Anhang V

```
&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2
  &r firespread /home/park2/mruegseg/basis/str_buf r1 b1 1.9 barrier ~
    /home/park2/mruegseg/basis/haus_barr fln1 0.9 2.5 ~
    /home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fsps1 min

&if %i% = 1 &then
  &do
    means1%n% = fsps1
    sums1%n% = con(isnull(fsps1),0,0)
    mins1%n% = fsps1
    maxs1%n% = fsps1
    kill fsps1 all
  &end

&else
  &do
    docell
    means1%n% = (%n% * means1%m% + fsps1) / %i%
    sums1%n% = sqr(fsps1 - means1%n%) + sums1%m%
    stds1%n% = sqrt(sums1%n% / %n%)
    mins1%n% = min(fsps1,mins1%m%)
    maxs1%n% = max(fsps1,maxs1%m%)
  &end

  &describe stds1%n%
  &if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
    &goto x4

  kill means1%m% all
  kill stds1%n% all
  kill mins1%m% all
  kill maxs1%m% all
  kill sums1%m% all
  kill fsps1 all
  &end

&end

&label x4

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2
  &r firespread /home/park2/mruegseg/basis/str_buf r2 b2 2.3 barrier ~
    /home/park2/mruegseg/basis/haus_barr fln2 0.9 2.5 ~
    /home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fsps2 min

&if %i% = 1 &then
  &do
    means2%n% = fsps2
    sums2%n% = con(isnull(fsps2),0,0)
    mins2%n% = fsps2
    maxs2%n% = fsps2
    kill fsps2 all
```

Anhang V

```
&end

&else
&do
  docell
    means2%n% = (%n% * means2%m% + fsps2) / %i%
    sums2%n% = sqr(fsps2 - means2%n%) + sums2%m%
    stds2%n% = sqrt(sums2%n% / %n%)
    mins2%n% = min(fsps2,mins2%m%)
    maxs2%n% = max(fsps2,maxs2%m%)
  end

  &describe stds2%n%
  &if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
    &goto x5

  kill means2%m% all
  kill stds2%n% all
  kill mins2%m% all
  kill maxs2%m% all
  kill sums2%m% all
  kill fsps2 all
&end

&end

&label x5

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2
  &r firespread /home/park2/mruegseg/basis/str_buf r3 b3 2.1 barrier ~
    /home/park2/mruegseg/basis/haus_barr fln3 0.9 2.5 ~
    /home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fsps3 min

&if %i% = 1 &then
  &do
    means3%n% = fsps3
    sums3%n% = con(isnull(fsps3),0,0)
    mins3%n% = fsps3
    maxs3%n% = fsps3
    kill fsps3 all
  &end

&else
  &do
    docell
      means3%n% = (%n% * means3%m% + fsps3) / %i%
      sums3%n% = sqr(fsps3 - means3%n%) + sums3%m%
      stds3%n% = sqrt(sums3%n% / %n%)
      mins3%n% = min(fsps3,mins3%m%)
      maxs3%n% = max(fsps3,maxs3%m%)
    end

    &describe stds3%n%
    &if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
      &goto x6

    kill means3%m% all
    kill stds3%n% all
```

Anhang V

```
kill mins3%m% all
kill maxs3%m% all
kill sums3%m% all
kill fsps3 all
&end

&end

/* Berechnung fuer Ausbreitung von speziellen Objekten aus, mit Strassen
und
/* Haeusern als Barrieren.

&label x6

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2
&r firespread /home/park2/mruegseg/basis/obj_buf r1 b1 1.9 barrier ~
/home/park2/mruegseg/basis/barr fln1 0.9 2.5 ~
/home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fspol min

&if %i% = 1 &then
&do
meanol%n% = fspol
sumol%n% = con(isnull(fspol),0,0)
minol%n% = fspol
maxol%n% = fspol
kill fspol all
&end

&else
&do
docell
meanol%n% = (%n% * meanol%m% + fspol) / %i%
sumol%n% = sqr(fspol - meanol%n%) + sumol%m%
stdol%n% = sqrt(sumol%n% / %n%)
minol%n% = min(fspol,minol%m%)
maxol%n% = max(fspol,maxol%m%)
end

&describe stdol%n%
&if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
&goto x7

kill meanol%m% all
kill stdol%n% all
kill minol%m% all
kill maxol%m% all
kill sumol%m% all
kill fspol all
&end

&end

&label x7

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
&setvar i = %i% + 1
```

Anhang V

```
&setvar n = %i% - 1
&setvar m = %i% - 2
  &r firespread /home/park2/mruegseg/basis/obj_buf r2 b2 2.3 barrier ~
    /home/park2/mruegseg/basis/barr fln2 0.9 2.5 ~
    /home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fspo2 min

&if %i% = 1 &then
  &do
    meano2%n% = fspo2
    sumo2%n% = con(isnull(fspo2),0,0)
    mino2%n% = fspo2
    maxo2%n% = fspo2
    kill fspo2 all
  &end

&else
  &do
    docell
    meano2%n% = (%n% * meano2%m% + fspo2) / %i%
    sumo2%n% = sqr(fspo2 - meano2%n%) + sumo2%m%
    stdo2%n% = sqrt(sumo2%n% / %n%)
    mino2%n% = min(fspo2,mino2%m%)
    maxo2%n% = max(fspo2,maxo2%m%)
  &end

  &describe stdo2%n%
  &if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
    &goto x8

  kill meano2%m% all
  kill stdo2%n% all
  kill mino2%m% all
  kill maxo2%m% all
  kill sumo2%m% all
  kill fspo2 all
  &end

&end

&label x8

&setvar i = 0

&do &while [exists ../basis/haus_buf -grid]
  &setvar i = %i% + 1
  &setvar n = %i% - 1
  &setvar m = %i% - 2
    &r firespread /home/park2/mruegseg/basis/obj_buf r3 b3 2.1 barrier ~
      /home/park2/mruegseg/basis/barr fln3 0.9 2.5 ~
      /home/park2/mruegseg/basis/dhm25_mal fspo3 min

  &if %i% = 1 &then
    &do
      meano3%n% = fspo3
      sumo3%n% = con(isnull(fspo3),0,0)
      mino3%n% = fspo3
      maxo3%n% = fspo3
      kill fspo3 all
    &end

  &else
    &do
      docell
```

Anhang V

```
    meano3%n% = (%n% * meano3%m% + fspo3) / %i%
    sumo3%n% = sqr(fspo3 - meano3%n%) + sumo3%m%
    stdo3%n% = sqrt(sumo3%n% / %n%)
    mino3%n% = min(fspo3,mino3%m%)
    maxo3%n% = max(fspo3,maxo3%m%)
end

&describe stdo3%n%
&if %i% gt 2 and %grd$mean% lt 0.05 or %i% = 101 &then
  &return

kill meano3%m% all
kill stdo3%n% all
kill mino3%m% all
kill maxo3%m% all
kill sumo3%m% all
kill fspo3 all
&end

&end
```


Anhang VI

Berechnung des Gefahrencodes der Rückwärtsausbreitung

```
/*
/*
/* access.aml      rs (Quelle)      veraendert mr 24/10/95
/*
/* GRID
/* Gewichtung der Distanztransformationen
/* Resultate der Rueckwaertsausbreitung (meanspread.aml) werden gewichtet,
/* um den zu schuetztenden Objekten Prioritaeten zuzuweisen.
/* Der Faktor x ist eine empirisch ermittelte Groesse.
/*
*****

&set b = ~mruegseg/fire

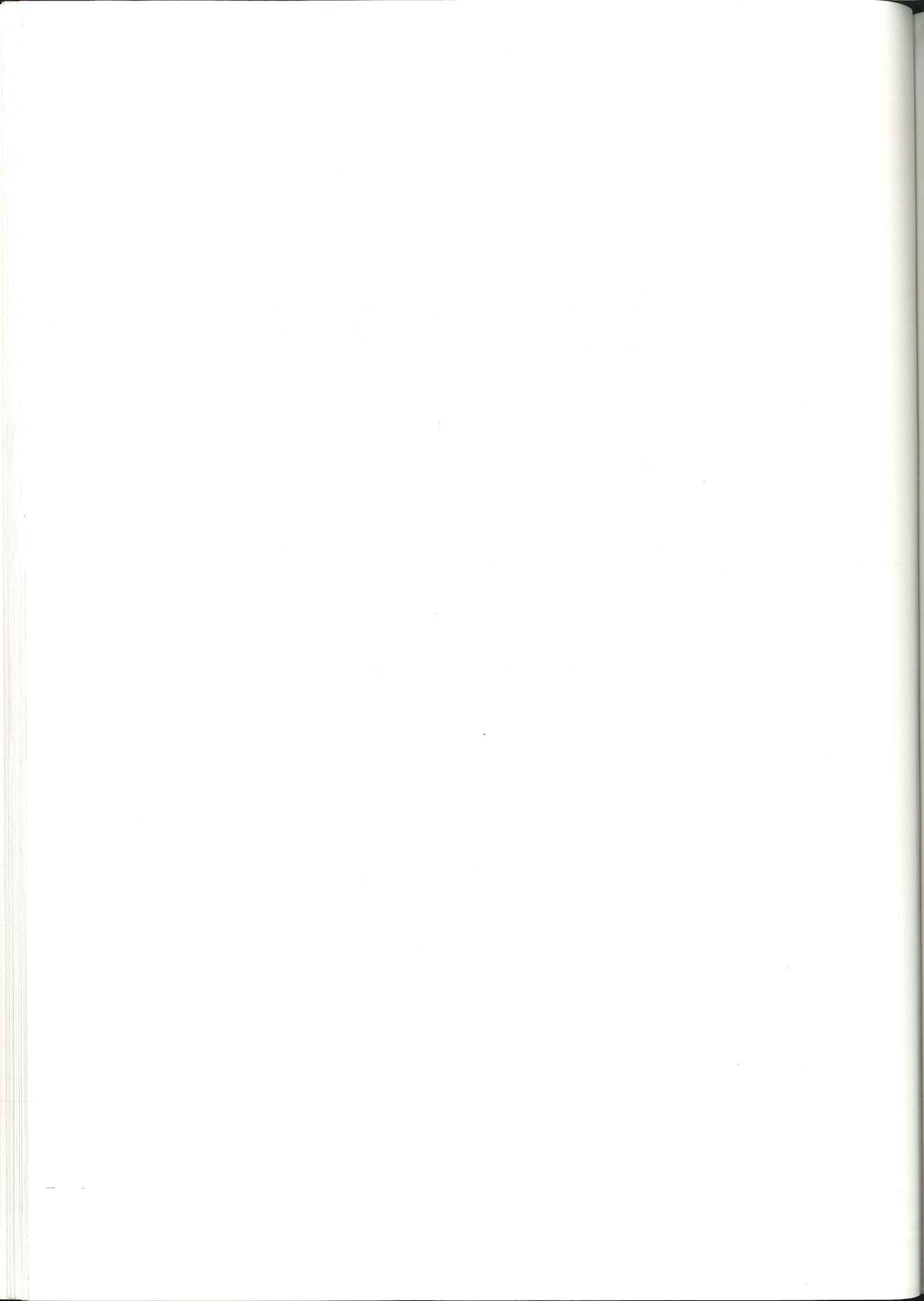
&do i = 2 &to 3

  &set x      = -0.003
  &set w_str  = 3
  &set w_obj  = 1
  &set w_haus = 6

  str_accs%i%b = con(isnull(%b%/str_sprs%i%),0,%w_str% * exp(%x% * ~
    %b%/str_sprs%i%))
  haus_accs%i%b = con(isnull(%b%/haus_sprsk%i%),0,%w_haus% * ~
    exp(%x% * %b%/haus_sprsk%i%))
  obj_accs%i%b = con(isnull(%b%/obj_sprsk%i%),0,%w_obj% * exp(%x% * ~
    %b%/obj_sprsk%i%))

  access%i%b = str_accs%i%b + haus_accs%i%b + obj_accs%i%b

&end
```



Anhang VII

Modellierung der Brandgutfeuchtigkeit

```
/*
*****
/* moist.aml      mr 12.10.95
/*
/* GRID
/* Berechnen der Korrekturfaktoren fuer die Brandgutfeuchten in
/* Abhaengigkeit von der Topographie. Da die Hangneigung fast keinen
/* Einfluss auf die Brandgutfeuchten hat, wird sie nicht beruecksichtigt.
/* Die die Veraenderungen mitden Hoehenstufen sind kaum saisonal bedingt
/* und daher in einem Grid zusammengefasst (fuelelev). Dieses wird am
/* Schluss mit der saisonal bedingten expositionsabhaengigen
/* Brandgutfeuchte zu topo(s1-s3) addiert. Hier muessen die Werte fuer das
/* Outputgrid und sein Name der Saison angepasst werden. asp steht fuer
/* Hangneigung, s fuer season und 1-3 fuer die jeweilige Saison.
/* Am Schluss werden zum Grid topo noch die Ausgangswerte, die korrigiert
/* werden muessen addiert (moist(s1-3)). Sie muessen ebenfalls auf die
/* Saison angepasst werden.
*****
&do i = 1 &to 3

  &if %i% = 1 &then
    &do
      &setvar w = 1
      &setvar x = 1
      &setvar y = 2
      &setvar z = 2
      &setvar j = 9
    &end

  &if %i% = 2 &then
    &do
      &setvar w = 0
      &setvar x = 0
      &setvar y = 1
      &setvar z = 1
      &setvar j = 8
    &end

  &if %i% = 3 &then
    &do
      &setvar w = 3
      &setvar x = 2
      &setvar y = 3
      &setvar z = 4
      &setvar j = 9
    &end

/* Berechnen des Korrekurfaktors fuer die Exposition

if (asp_dhm_mal > 45 & asp_dhm_mal <= 135) fuelasps%i% = %w%
  else if (asp_dhm_mal > 135 & asp_dhm_mal <= 225) fuelasps%i% = %x%
  else if (asp_dhm_mal > 225 & asp_dhm_mal <= 315) fuelasps%i% = %y%
  else fuelasps%i% = %z%
endif
```

Anhang VII

```
/* Addieren aller Faktoren

  topos%i% = (fuelelev + fuelasps%i%)
  moist%i% = (topos%i% + %j%)

  kill topos%i% all
  kill fuelasps%i% all

&end
&return
```

Anhang VIII

Zur Berechnung des Schadenpotentials der Waldbrandgeschichte wurde der Anteil der verbrannten Fläche an der gesamten Fläche der gefährdeten Objekte, der Höhenstufen, der Expositions-, Hangneigungs- und Vegetationsklassen benötigt.

Anteil der verbrannten Flächen der gefährdeten Objekte

gefährdetes Gebiet	Dezember-Februar	März-April	Mai-November
Schutzwald	26.96	32.85	0.09
Aufforstungen	100.95	899.28	26.52
Kulturelle Objekte	8.74	90.67	9.67
Erosion	14.59	17.83	35.50

Tab. 1: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen an der gesamten Fläche der gefährdeten Objekte in Prozent

Anteil der verbrannten Fläche der Topographie

Exposition

Exposition	Dezember-Februar	März-April	Mai-November
S	27.66	47.44	5.91
SW	2.62	6.96	0.35
W	0.87	0.85	0.26
NW	0.08	0.00	0.00
N	0.00	0.00	0.00
NE	0.42	0.00	0.69
E	3.49	1.80	0.00
SE	7.04	26.51	1.77

Tab. 2: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen an der gesamten Fläche der Expositions-klassen in Prozent (berechnet mit RIMINI)

Höhe

Höhe	Dezember-Februar	März-April	Mai-November
bis 300	1.98	1.15	6.66
300-400	0.25	0.59	0.86
400-500	0.73	9.46	0.00
500-600	16.38	28.81	0.45
600-700	28.64	2.17	0.10
700-800	2.45	48.72	0.00
800-900	1.97	9.35	0.00
900-1000	0.00	19.74	0.00
1000-1100	5.95	27.41	11.50
1100-1200	0.00	0.00	0.00
1200-1300	11.37	15.13	13.87
1300-1400	0.00	0.00	5.49
1400-1500	0.00	110.35	0.00
1500-1600	0.00	21.38	0.00
1600-1700	0.00	0.00	0.00
1700-1800	0.00	0.00	0.00
grösser 1800	0.00	0.00	0.00

Tab. 3: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen an der gesamten Fläche der Höhenstufen in Prozent (berechnet mit RIMINI)

Hangneigung

Neigung in %	Dezember-Februar	März-April	Mai-November
0-10	0.33	0.68	0.00
10-20	0.73	0.33	0.01
20-30	3.63	4.45	0.06
30-40	27.27	41.83	0.30
40-50	4.50	28.45	0.00
50-60	0.00	0.00	0.00
60-70	0.00	0.00	0.00
70-80	0.00	0.00	0.00
80-90	0.00	0.00	0.00
90-100	0.00	0.00	0.00

Tab. 4: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen an der gesamten Fläche der Hangneigungsklasse in Prozent (berechnet mit RIMINI)

Anteil der verbrannten Fläche der Vegetation

Vegetationstyp	Dezember-Februar	März-April	Mai-November
unproduktive Fläche	1.56	8.11	1.59
Kastanienselven	1.85	5.16	0.01
Kastanie	7.58	8.37	0.18
Buche	1.66	14.44	1.56
Eiche	15.85	0.86	0.00
Birke	5.80	17.73	0.00
Auenwald	0.00	0.00	0.00
geschützter Wald	7.37	0.00	14.69
Gemischter Laubwald	12.99	10.05	0.00
Pionierwald	0.83	7.30	1.77
Reiner Laubwald	52.11	112.49	0.00
Gemischter Laubwald (Laub dominant)	8.26	4.07	0.03
Gemischter Laubwald (Nadel dominant)	26.02	16.91	2.60
Reiner Nadelwald	0.00	2.81	0.00

Tab. 5: Anteil der von Waldbrand betroffenen Flächen an der gesamten Fläche des Vegetationstyps in Prozent

Gefahrencodes und Schadenpotential

Für die Einteilung in die Prioritätszonen müssen die Gefahrencodes klassiert werden. Tabelle 6 wird benutzt um allen schützenswerten Objekten, deren Gefahrencode mit der Rückwärtsausbreitung und der Waldbrandgeschichte berechnet wird und der Kombination der beiden das Schadenpotential zuzuweisen.

Klasse	Gefahrencode	Schadenpotential
1	0.5 - 2.4	sehr gering
2	2.4 - 4.3	gering
3	4.3 - 6.2	mittel
4	6.2 - 8.1	hoch
5	8.1 - 10.0	extrem

Tab. 6: Gefahrencodes und zugehöriges Schadenpotential

Anhang IX

Regionen-Konzept in ARC/INFO

Regionen (Vektordaten) sind komplexe Gebilde aus Flächen (ESRI 1994), die einander überlappen oder gemeinsame Grenzen haben, oder nicht zusammenhängenden Flächen, die aber derselben Klasse angehören.

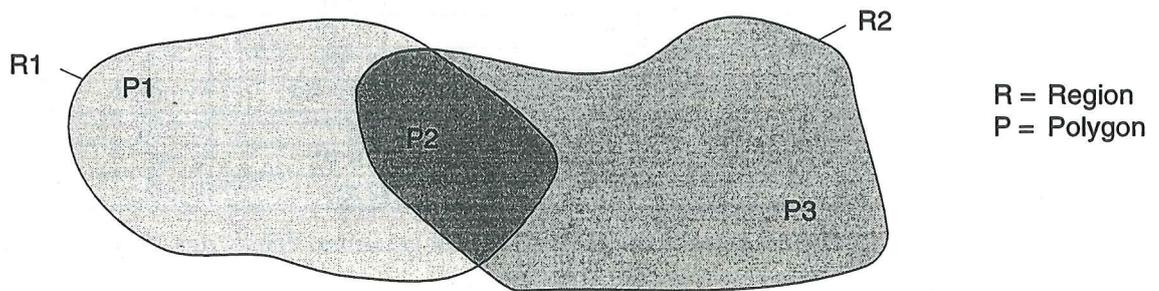


Fig. 1: Überlappende Flächen

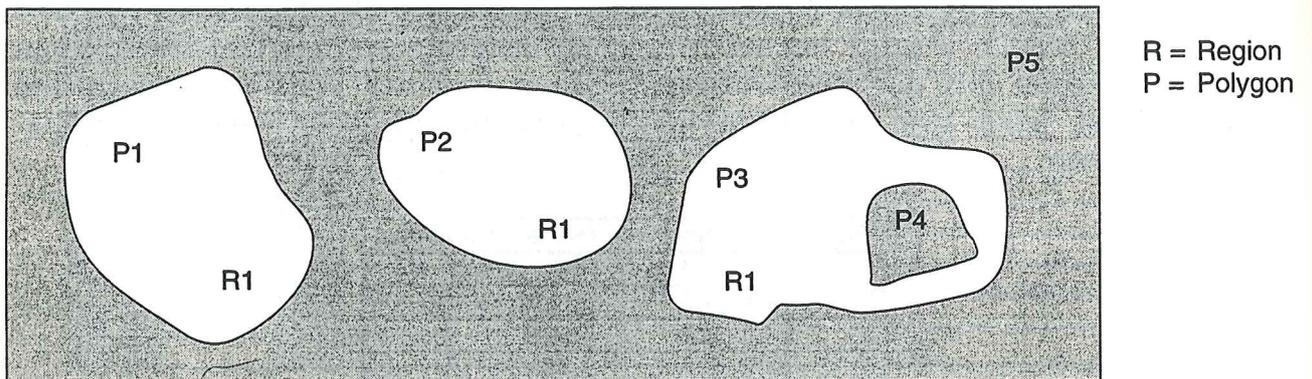


Fig. 2: Unzusammenhängende Flächen

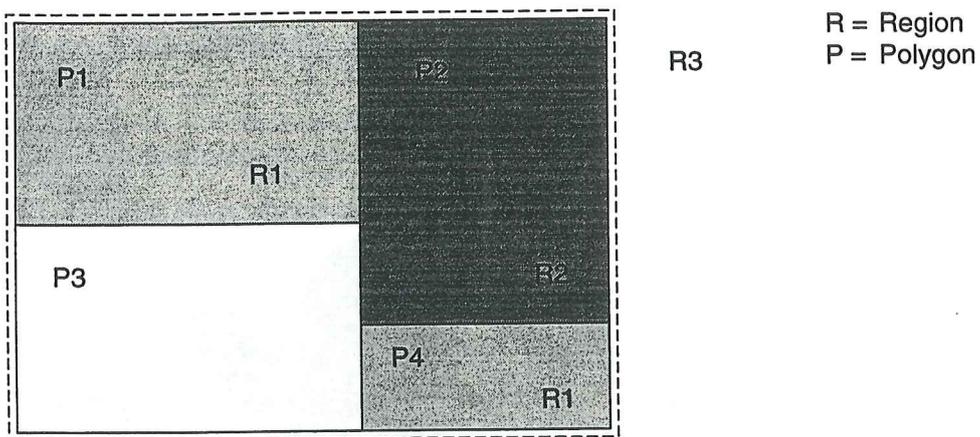


Fig. 3: Flächen mit gemeinsamen Grenzen

Regionen können die Probleme der realen Welt besser darstellen als Polygone. Polygone können, im Gegensatz zu den Regionen, an einem bestimmten Ort nur eine Fläche repräsentieren. Dies ist aber in der Wirklichkeit nur selten der Fall. Meistens überlappen sich die Gebiete. So kommen Waldbrände sehr häufig am gleichen Ort wieder vor, wo sie schon vor einiger Zeit waren.

Wenn zwei Waldbrände am ungefähr gleichen Ort im Abstand von mehreren Jahren aufgetreten sind, überlappen die abgebrannten Flächen sich zu einem Teil. Fig. 1 zeigt, dass zur Darstellung der beiden Feuer in der Regel drei Polygone benötigt werden (nur erstes Feuer (P1), nur zweites Feuer (P3), erstes und zweites Feuer (P2)). Für die Repräsentation mit Regionen dagegen genügen deren zwei (R1 vom ersten, R2 vom zweiten Brand betroffene Fläche).

Ein Regionendatensatz besteht aus einer oder mehreren Subklassen. Diese enthalten eine oder mehrere Regionen. Ein Regionendatensatz basiert immer auf einem Polygondatensatz und einem Liniendatensatz. Eine Region besteht also aus einem oder mehreren Polygonen, deren Geometrie ihr zugrunde liegt.

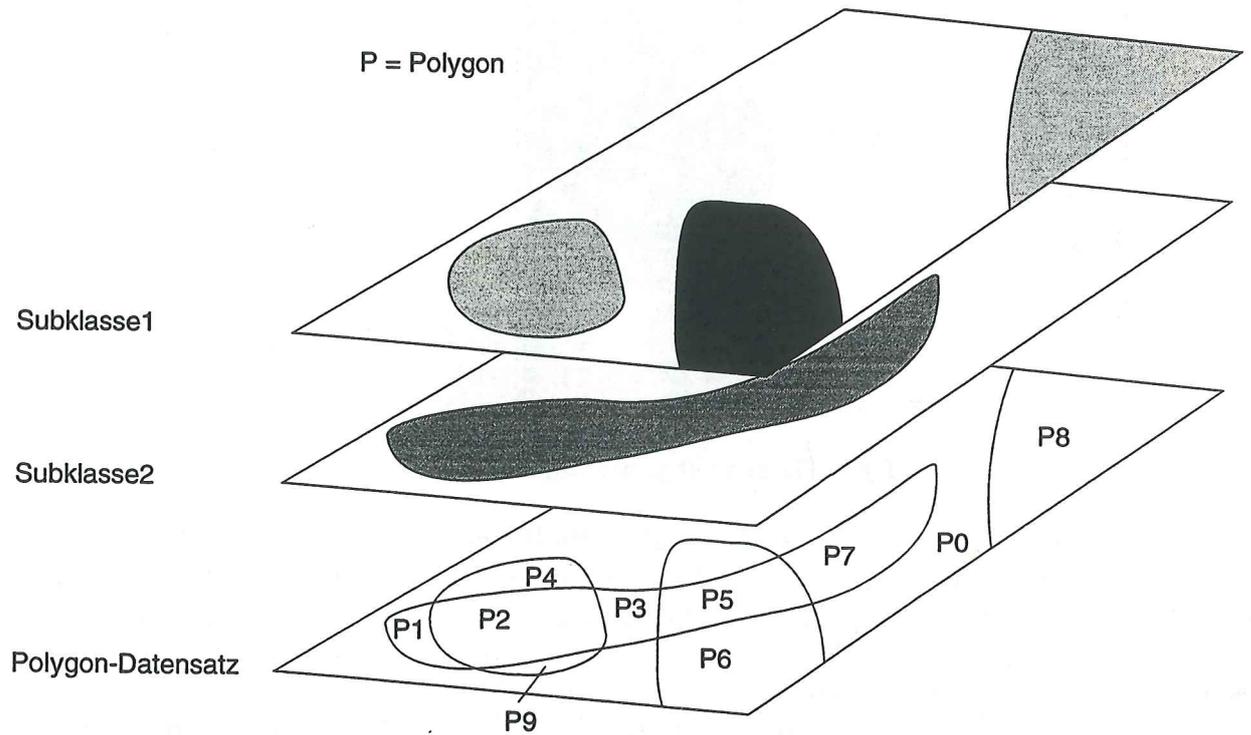
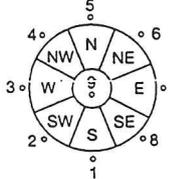


Fig. 4: Regiontopologie mit der ihr zugrunde liegenden Polygonen

Jede Subklasse hat eine Attributtabelle. Jede dieser Tabellen kann unterschiedliche Attribute aufweisen. Polygone, die gleiche Werte für ein Attribut haben, bilden in der Subklasse eine Region.

Anhang X

Waldbrandprotokoll des Forstdienstes im Tessin

Sezione forestale Cantonale	PNR31	FNP Sottostazione Sud delle Alpi																				
Rapporto incendio di boschi e pascoli																						
Cantone _____ Circondario _____ Sezione _____ Luogo e data _____																						
Numero dell' incendio: _____ <small>(lasciare in bianco)</small> <small>anno mese giorno n°</small>	Nome del comune: _____																					
Data e ora inizio incendio: _____ <small>giorno mese anno ora min.</small>	altro comune 1: _____																					
Data e ora fine incendio: _____ <small>giorno mese anno ora min.</small>	altro comune 2: _____																					
Giorno della settimana: _____ <small>lu ma me gio ve sa do</small> <small>1 2 3 4 5 6 7</small>	altro comune 3: _____																					
Località: _____		Annuncio pericolo: <table style="display: inline-table; border: 1px solid black;"><tr><td style="text-align: center;">si</td><td style="text-align: center;">no</td></tr><tr><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td></tr><tr><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">0</td></tr></table>	si	no	o	o	1	0														
si	no																					
o	o																					
1	0																					
Estratto CN 1:25'000 foglio n° _____ <small>(indicare le coordinate chilometriche a margine)</small>		Giorno festivo: <table style="display: inline-table; border: 1px solid black;"><tr><td style="text-align: center;">feriale</td><td style="text-align: center;">festivo</td><td style="text-align: center;">ponte</td></tr><tr><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td></tr><tr><td style="text-align: center;">0</td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td></tr></table>	feriale	festivo	ponte	o	o	o	0	1	2											
feriale	festivo	ponte																				
o	o	o																				
0	1	2																				
<div style="border: 1px solid black; width: 100%; height: 100%;"></div>		Coordinata d'inizio: x: _____ y: _____ Altitudine: _____ m s.l.m. <small>(punto d'inizio)</small> Pendenza: _____ % <small>(media)</small> Esposizione: 																				
Superficie percorsa: bosco: _____ ha pascolo e prato: + _____ ha improduttivo: + _____ ha <hr style="border: 1px solid black;"/> Superficie percorsa totale: = _____ ha	Boschi naturali: <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>arbusteto:</td><td>_____ ha</td></tr> <tr><td>ceduo:</td><td>_____ ha</td></tr> <tr><td>selva:</td><td>_____ ha</td></tr> <tr><td>novellame/spessina:</td><td>_____ ha</td></tr> <tr><td>fustaia latifoglie:</td><td>_____ ha</td></tr> <tr><td>fustaia conifere:</td><td>_____ ha</td></tr> <tr><td>piantagioni:</td><td>_____ ha</td></tr> </table>	arbusteto:	_____ ha	ceduo:	_____ ha	selva:	_____ ha	novellame/spessina:	_____ ha	fustaia latifoglie:	_____ ha	fustaia conifere:	_____ ha	piantagioni:	_____ ha							
arbusteto:	_____ ha																					
ceduo:	_____ ha																					
selva:	_____ ha																					
novellame/spessina:	_____ ha																					
fustaia latifoglie:	_____ ha																					
fustaia conifere:	_____ ha																					
piantagioni:	_____ ha																					
Specie colpite: _____ <small>(crociare solo la specie principale)</small> <table style="width: 100%; border: 1px solid black;"><tr><td style="text-align: center;">castagno</td><td style="text-align: center;">quercia</td><td style="text-align: center;">faggio</td><td style="text-align: center;">lat. miste</td><td style="text-align: center;">conifere</td><td style="text-align: center;">lat./con.</td><td style="text-align: center;">passaggio</td></tr><tr><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td><td style="text-align: center;">o</td></tr><tr><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td><td style="text-align: center;">4</td><td style="text-align: center;">5</td><td style="text-align: center;">6</td><td style="text-align: center;">7</td></tr></table>	castagno	quercia	faggio	lat. miste	conifere	lat./con.	passaggio	o	o	o	o	o	o	o	1	2	3	4	5	6	7	Boschi artificiali: Codice: <input type="checkbox"/> <small>(lasciare in bianco)</small>
castagno	quercia	faggio	lat. miste	conifere	lat./con.	passaggio																
o	o	o	o	o	o	o																
1	2	3	4	5	6	7																

	<table border="1" style="font-size: small; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>superficie o</td> <td>chiloma o</td> <td>sotterr. o</td> <td>superf. + chiloma o</td> <td>superf. + sotterr. o</td> <td>chiloma + sotterr. o</td> <td>3 tipi o</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> </tr> </table>	superficie o	chiloma o	sotterr. o	superf. + chiloma o	superf. + sotterr. o	chiloma + sotterr. o	3 tipi o	1	2	3	4	5	6	7	Altezza scottature: <input type="text"/> cm Diametro medio: <input type="text"/> cm <small>(piante bruciate)</small> Zona già bruciata negli ultimi: <input type="text"/> 5 anni <input type="text"/> 10 anni Sup. di aggregato totalmente morto <input type="text"/> <input type="text"/> ha <small>(valutazione dopo un periodo vegetativo)</small>																						
superficie o	chiloma o	sotterr. o	superf. + chiloma o	superf. + sotterr. o	chiloma + sotterr. o	3 tipi o																																
1	2	3	4	5	6	7																																
Tipo di fuoco:	<table border="1" style="font-size: small; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>0-19 o</td> <td>20-39 o</td> <td>40-59 o</td> <td>60-79 o</td> <td>80-100 o</td> <td>% piante colpite</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td></td> </tr> </table>	0-19 o	20-39 o	40-59 o	60-79 o	80-100 o	% piante colpite	1	2	3	4	5																										
0-19 o	20-39 o	40-59 o	60-79 o	80-100 o	% piante colpite																																	
1	2	3	4	5																																		
Danni al bosco: <small>(valutazione immediata)</small>	<table border="1" style="font-size: small; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>0-19 o</td> <td>20-39 o</td> <td>40-59 o</td> <td>60-79 o</td> <td>80-100 o</td> <td>% piante colpite</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td></td> </tr> </table>	0-19 o	20-39 o	40-59 o	60-79 o	80-100 o	% piante colpite	1	2	3	4	5																										
0-19 o	20-39 o	40-59 o	60-79 o	80-100 o	% piante colpite																																	
1	2	3	4	5																																		
<small>(valutazione dopo un periodo vegetativo)</small>	<table border="1" style="font-size: small; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>0-19 o</td> <td>20-39 o</td> <td>40-59 o</td> <td>60-79 o</td> <td>80-100 o</td> <td>% piante colpite</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td></td> </tr> </table>	0-19 o	20-39 o	40-59 o	60-79 o	80-100 o	% piante colpite	1	2	3	4	5																										
0-19 o	20-39 o	40-59 o	60-79 o	80-100 o	% piante colpite																																	
1	2	3	4	5																																		
Cause:	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 15%;">ignote</td> <td style="width: 5%; text-align: center;">1</td> <td style="width: 5%;">o</td> <td>non identificabile _____</td> </tr> <tr> <td>naturali</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>fulmine _____</td> </tr> <tr> <td>volontarie</td> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>dolo/piromania _____</td> </tr> <tr> <td>involontarie</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>negligenza _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">5</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>militari _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">6</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>ferrovia _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>importato _____</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">8</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>cortocircuito _____</td> </tr> <tr> <td>altre</td> <td style="text-align: center;">9</td> <td style="text-align: center;">o</td> <td>_____</td> </tr> </table>		ignote	1	o	non identificabile _____	naturali	2	o	fulmine _____	volontarie	3	o	dolo/piromania _____	involontarie	4	o	negligenza _____		5	o	militari _____		6	o	ferrovia _____		7	o	importato _____		8	o	cortocircuito _____	altre	9	o	_____
ignote	1	o	non identificabile _____																																			
naturali	2	o	fulmine _____																																			
volontarie	3	o	dolo/piromania _____																																			
involontarie	4	o	negligenza _____																																			
	5	o	militari _____																																			
	6	o	ferrovia _____																																			
	7	o	importato _____																																			
	8	o	cortocircuito _____																																			
altre	9	o	_____																																			
	<table border="0" style="font-size: x-small;"> <tr> <td>presunta o</td> <td>certa o</td> </tr> </table>	presunta o	certa o																																			
presunta o	certa o																																					
Affidabilità causa:	<table border="1" style="font-size: small; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>	0	1																																			
0	1																																					
Osservazioni:	Economica _____ Protettiva _____ Sociale _____ <small>(ricreativa e paesaggistica)</small> Ecologica _____																																					
Eventuali conseguenze alle funzioni del bosco:																																						
Picchetto forestale:	<table border="0" style="font-size: small;"> <tr> <td style="text-align: center;">si o</td> <td style="text-align: center;">no o</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>	si o	no o	1	0	Allarme ora: _____ in che modo: _____																																
si o	no o																																					
1	0																																					
Inchiesta polizia:	<table border="0" style="font-size: small;"> <tr> <td style="text-align: center;">si o</td> <td style="text-align: center;">no o</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </table>	si o	no o	1	0																																	
si o	no o																																					
1	0																																					
Attività svolta dal personale forestale:	_____																																					
Chi era presente?	_____																																					
Compiti?	_____																																					
Luogo pescaggio acqua per eli <small>(coordinate)</small>	_____																																					
Valutazione azione di spegnimento:	_____																																					
Valutazione ruolo viabilità:	_____																																					
Altre considerazioni generali:	_____																																					
Allegati:	<input type="checkbox"/> foto luogo incendio <input type="checkbox"/> articoli giornale <input type="checkbox"/> _____																																					
	Firma: _____																																					

Anhang XI

Interview mit Herrn D. Ryser

- Was ist an Entscheidungsgrundlagen, -hilfen vorhanden?
 - Pläne
 - Karte mit Waldbrandhäufigkeiten im Tessin anhand der Waldbranddatenbank der Sottostazione
 - Brachlandarbeit RISMALC (Daten sind ev. sogar digital vorhanden). Zeigt besonders Waldbrand gefährdete Gebiete
 - Besitzverhältnisse
 - Im Kanton Tessin gibt es ca. 4000 ha Wald
 - 80% des Waldes ist öffentlich. Es brennt hier mehr als im privaten Wald, da die Gebiete auf Grund ihrer geographischen Lage stärker gefährdet sind.
 - Bekämpfung der Waldbrände wird immer vom Kanton bezahlt, sodass die Besitzverhältnisse keine Rolle spielen. Die Wälder sind auch nicht versichert.
 - Vorschriften
 - Die kantonale Umweltschutzverordnung besagt, dass im Freien keine Gartenabfälle verbrannt werden dürfen wegen der Luftverschmutzung und auch der grossen Waldbrandgefahr. Es gibt so wirklich weniger Waldbrände aus Unvorsichtigkeit.
 - Während früher die Gemeinden für die Bekämpfung verantwortlich waren, ist die Feuerwehr heute überregional organisiert. Zur Bekämpfung der Waldbrände wird v.a. die Gebirgsfeuerwehr eingesetzt. Wenn die 2000 Leute (im ganzen Kanton Tessin) nicht reichen werden andere Truppen beigezogen (s.u.).
 - Richtlinien
 - Ablauf des Alarms bei der Waldbrandbekämpfung: Feuerwehr - Bergfeuerwehr - Helikopter - Zivilschutz - Armee
 - Erfahrungswerte
 - keine schriftlich dokumentierte Erfahrungswerte, es wird jedoch in besonders gefährdeten Regionen trainiert. Darüber bestehen schriftliche Informationen. Hier wird versucht einen optimalen Bekämpfungsablauf zu garantieren, auch indem die Wasserentnahmestellen genau geplant und dimensioniert werden.
 - In der Brachlandarbeit RISMALC sind die potentiellen Waldbrandflächen kartiert.
 - Bekämpfungsstrategien
 - Für das Vorgehen bei der Bekämpfung ist ein Heft im Entstehen, das Richtlinien aufzeigen soll.
 - Bergfeuerwehrkommandanten erhalten alle Jahre einen Kurs und führen mit ihren Leuten Übungen durch. Dabei werden Wasserentnahmestellen und Positionen für die mobilen Wasserbecken (mit ihren Koordinaten) für den Ablauf der Bekämpfung geplant. Für die Rotation der Helikopter dürfen sie höchstens 500m von einander entfernt sein.
 - Die Bevölkerung ist stark auf Waldbrand sensibilisiert und meldet sehr schnell, wenn ein vermeintlicher Brand entdeckt wird.

- Gegenfeuer werden von den verschiedenen Feuerwehrkommandanten unterschiedlich häufig angewendet. Es ist schwierig der Öffentlichkeit ihren Nutzen klarzumachen, da anscheinend unnötigerweise noch mehr Wald verbrannt wird. Es ist jedoch eines der wirksamsten Mittel und wird besonders an Steilhängen eingesetzt. Hier besteht eine grosse Gefahr, dass noch brennende oder glühende Holzstücke in unversehrte Gebiete herabrollen und dort erneut Feuer entfachen. Da dies häufig erst viel später geschieht, wenn der Brand längst als gelöscht gilt, hat dies häufig verheerendere Folgen als der ursprüngliche Waldbrand. Häufig sind es nicht einmal Holzstücke, sondern sogar nur Kastanienigel, deren Stacheln verbrannt sind und so sehr gut rollen können. Wird nun aber sicherheitshalber durch ein Gegenfeuer ein zusätzlicher Streifen ausgebrannt, findet das Feuer dort keine Nahrung mehr und es kann kein neuer Brand entstehen.
- Auswirkungen auf die Waldwirtschaft: Finanziell und direkt
 - Waldbrandbekämpfung wird immer vom Umweltschutzdepartement des Kantons bezahlt
 - Die Wälder sind nicht versichert, da die Wälder kaum genutzt werden. Der Schaden geht also voll zu Lasten der BesitzerInnen
 - Im Falle einer Brandstiftung jedoch, wird der/die TäterIn sowohl für die unmittelbaren Schäden, als auch die Folgeschäden haftbar gemacht.
- Schwellwerte und Entscheidungskriterien, die ein Eingreifen notwendig machen: Feuertyp, -intensität, -verhalten, etc.
 - Variieren von Fall zu Fall, sind nicht explizit festgehalten, sondern nur in Form von Erfahrungen.
- Brandursachen
 - V.a. durch Pyromanie. Häufig Städter, die absichtlich Brände legen. Fallen durch immer gleiche Verhaltensmuster auf. Die Waldbrände finden daher hauptsächlich in stärker besiedelten Gebieten statt.
- *Waldwirtschaft*

Ursprünglich bestanden im Tessin hauptsächlich Kastanienselven. Diese wurden später sich selbst überlassen und die Verjüngung fand hier durch Versamung, im Niederwald durch Stockausschlag statt. Genutzt wurden die bestehenden Wälder alle zehn Jahre. Diese Art der Bewirtschaftung bewirkt eine hohe Waldbrandgefahr, da die Stockauschläge sehr gut brennen. Tritt hier ein Waldbrand auf, verjüngt sich der Wald wieder durch Stockauschläge und da nun mehr Licht vorhanden ist, kommt auch mehr Unterholz auf. Es entsteht so ein Zyklus, in dem eine sehr einseitige Vegetation aufkommt und der Wald durch das Feuer zunehmend degradiert.

Kastanienselven dagegen bieten einen guten Feuerschutz, da hier nur wenig Unterholz besteht und sich das im Tessin häufige Lauffeuer nicht ausbreiten kann. Ebenfalls wenig Unterholz wächst unter Lärchen. Wenn also Aufforstungen vorgenommen werden, bieten sich diese beiden Baumarten speziell an.

Ab einer bestimmten Höhe wächst nur noch die Buche, welche schon bei einer sehr kurzen Hitzeeinwirkung abstirbt, da ihre Rinde kaum wärmeresistent ist. Die Bäume selbst dagegen, brennen kaum. Trifft ein Waldbrand jedoch auf

einen Buchenbestand, sterben später bis 10m von der Feuerfront entfernt Bäume ab.

Aus diesen Gründen sollte versucht werden, Kastanienselven zu erhalten, Aufforstungen mit Kastanien vorzunehmen und Buchenbestände möglichst vor Feuer zu schützen.

- *Was für ein Endprodukt ist gewünscht?*

- Zusammenstellungen und Pläne für besonders gefährdete Gebiete, abhängig von Wetterlage und Jahreszeit. Beides für normale und ausserordentliche Waldbrand Jahre.

- Die Erstellung von Berichten, ähnlich dem Wetterbericht, ist fragwürdig, da dann Pyromanen erst auf die "günstigen" Bedingungen aufmerksam gemacht werden. Aus den gleichen Gründen sollten die oben genannten Pläne nicht veröffentlicht werden

- *Was ist aktuelles Management?*

Momentan wird in den meisten Fällen mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln gelöscht, es ist eigentlich auch nichts anderes gewünscht. Es wäre jedoch denkbar, dass wenn genügende Grundlagen für ein differenzierteres Management vorliegen würden, die Bekämpfung weniger aggressiv vorgenommen würde. Es ist jedoch zu bedenken, dass es häufig sehr viel einfacher ist, in einem frühen Stadium Helikopter zu gebrauchen, als mit einem Dutzend Leuten den Brand vom Boden aus zu bekämpfen (was sehr viel billiger ist). Zudem ist es schwierig, vor der Öffentlichkeit zu vertreten, weshalb nicht sofort gelöscht wurde, wenn es ihnen ja nicht einmal erlaubt ist, aus Waldbrandgefahr, ein 1.-August-Feuer zu entfachen.

- *Wie sieht optimales Management aus? Wunschvorstellungen.*

- waldbaulich

- Erhalten und Wiedererstellen der Kastanienselven, die viel weniger feuergefährdet sind. Der heute bestehende Niederwald sollte in Hochwald zurück geführt werden. Die Walderneuerung sollte nicht mehr hauptsächlich durch Stockausschlag geschehen, da dies einem Feuer ausserordentlich gute Nahrung liefert.

- Vermeiden von besonders gut brennenden Baumarten wie Tannen und Föhren

- Erstellen von schneisenförmigen Anpflanzung von feuerresistenten Arten (z.B. Eiche) zusammen mit einer gezielten Beweidung. Diese sollen ein Ausbreiten des Feuers verhindern und trotzdem in der Landschaft attraktiv wirken.

- technisch

- Anlegen von Wasserentnahmestellen für Helikopter an den neuralgischen Punkten.

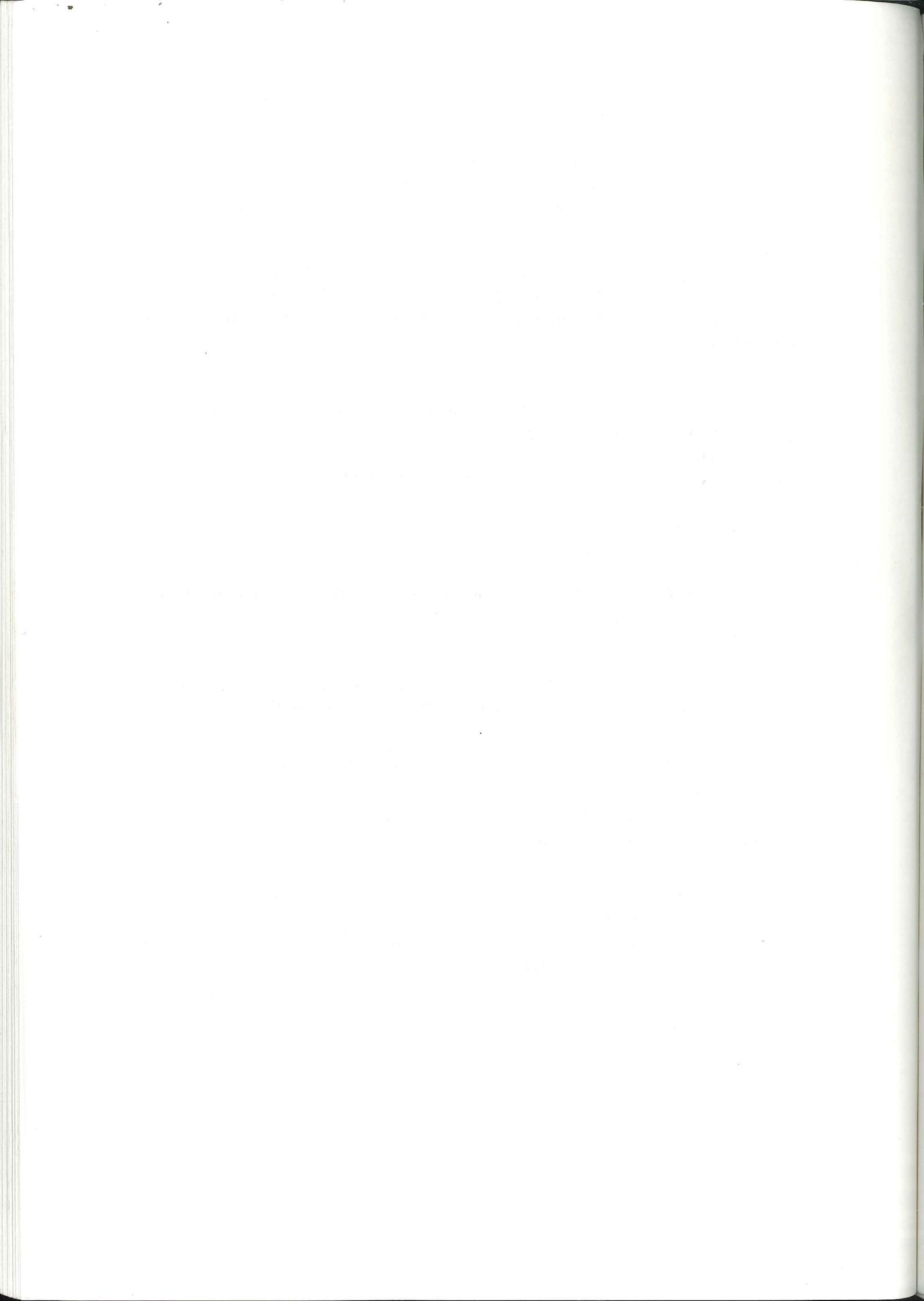
- *Welche Informationen für ein sinnvolles Management fehlen?*

- Es bestehen keine Informationen über Erosionsgefahr als Folge von Waldbränden. Diese Gefahr wird von einigen sogar für nicht existent gehalten.
- Schriftliche Dokumente über vorhandene Erfahrungswerte.

- *Wann könnte Feuer toleriert werden?*
 - natürliche und künstliche Hindernisse für die Feuerausbreitung
 - Witterung
 - grosser Niederschlag, vor oder während des Feuers
 - Tageszeit
15h - 10h
 - Jahreszeit
Anfang Mai - Ende November
 - Windstille
 - Degradation der Vegetation weil Feuer fehlt
z.B. Monte Caslano. Hier besteht aber ein Konflikt zwischen der natürlichen Entwicklung und dem Naturschutz, der die heute bestehenden Arten erhalten möchte.
 - Brandgut
 - genügend hohe Feuchtigkeit
 - schlecht brennbar
 - zu kleine Menge
 - feuerresistente Vegetation
Wiesen und Weiden haben ein gut vorhersagbares Brandverhalten
 - Feuercharakteristiken
 - kleine Ausbreitungsgeschwindigkeit
 - tiefe Intensität
 - Typ
 - keine Siedlungen oder andere menschliche Einrichtungen
 - gute Erreichbarkeit
 - Kleineres Feuer verbrennt Nahrung eines wahrscheinlichen späteren, viel gefährlicheren Feuers

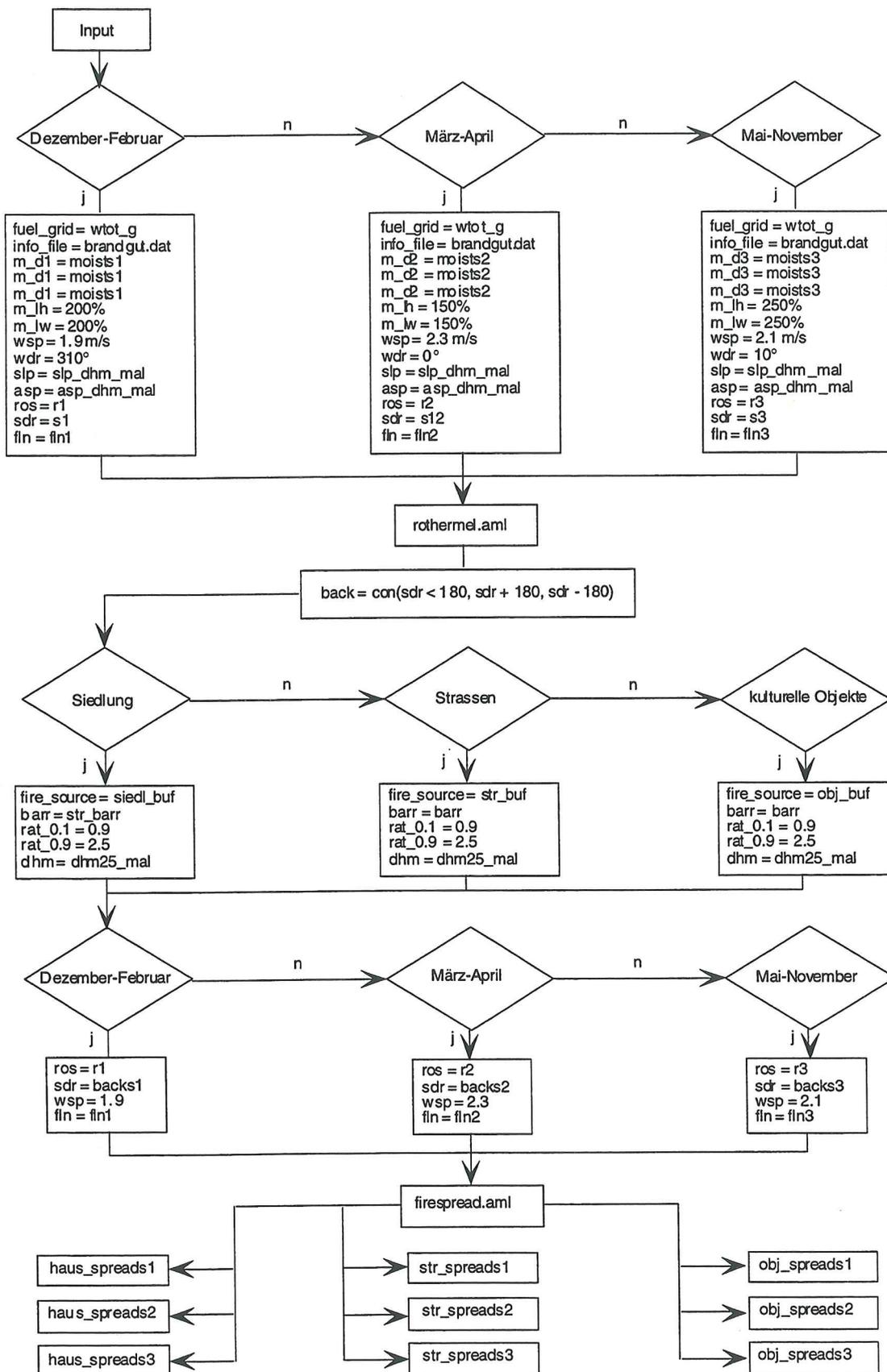
- *Wann muss unbedingt gelöscht werden?*
 - nahe Siedlungen
 - psychologische Aspekte
Im Tessin wird in der Umweltschutzverordnung festgehalten, dass es auf Grund der hohen Waldbrandgefahr verboten ist, Gartenabfälle im Freien zu verbrennen. Es besteht daher in den Kreisen der Bevölkerung kein Verständnis dafür, wenn Feuer nicht sofort gelöscht werden. Waldbrände werden als Bedrohung empfunden.
 - Wald mit Schutzfunktionen
Die Lage der Schutzwälder ist allgemein bekannt.
 - Witterung
 - Tageszeit
10h - 15h sehr gefährlich
 - Jahreszeit

- Ende November - Anfang Mai
- starker Wind
 - N-Wind ist gefährlich. Böden trocknen sehr schnell aus.
- kein Niederschlag vor oder während des Feuers
 - Im Winter trocknen die sandigen Böden in vier Tagen, im Sommer in 15 Tagen aus
- lange Trockenperioden
- kritische Neigung, bei der brennende Hölzer herab zu rollen beginnen
 - Liegt ungefähr bei 30° (wie bei Lawinen). Auch glühende Kastanienigel reichen um ein Feuer zu entfachen (sie rollen besonders gut, wenn Stacheln verbrannt sind).
- Brandgut
 - sehr grosse Mengen
 - v.a. Laub macht Lage gefährlich, seine Menge ist vom Jahr abhängig
 - geringe Feuchtigkeit
 - leicht entzündbar
 - GINSTER (ätherische Öle), Kastanienlaub, Farne, Stockausschläge
- starke Neigung
- Feuercharakteristiken
 - ungehinderte Ausbreitung
 - Typ
 - meistens Lauffeuer, in Tannenaufforstungen auch Kronenfeuer möglich
 - zu rasche Ausdehnung
 - hohe Intensität
- Erosionsgefahr
 - Wichtiger Aspekt, der jedoch noch kaum als solcher zur Kenntnis genommen wurde. Es bestehen daher darüber keine Informationen.
- Ökologie
 - Degradation der Vegetation durch zu häufige Feuer
 - empfindliche Ökosysteme
 - spezielle Objekte
 - spezielle Vegetation
 - Buchen, da speziell empfindlich, Jungwuchs
- Exposition
- schlechte Bekämpfbarkeit
- schlechte Erreichbarkeit
 - Spielt im Malcantone keine, oder nur eine untergeordnete Rolle. Könnte aber in anderen Regionen wichtig sein.



Anhang XII

Berechnung der Rückwärtsausbreitung



Glossar

Waldbrand

Im Deutschen fehlen häufig genaue Begriffe in der Waldbrandthematik. Um den Text nicht allzu stark mit englischen Ausdrücken zu belasten, werden sie ins Deutsche übersetzt. Dieses Glossar soll dazu dienen, klarzustellen, wie die Begriffe in der Arbeit verwendet werden. Die englischen Begriffe sind jeweils kursiv in Klammern angemerkt.

Biomasse: Trockengewicht organischen Materials

Brandgut (*fuel*): Einem Feuer zur Verfügung stehendes brennbares Material. In dieser Arbeit wird der Begriff eingeschränkt und beinhaltet Material bis 2 m über dem Waldboden mit Durchmesser < 7.5 cm.

Brandgutfeuchtigkeit (*fuel moisture*): Wasseranteil einer Brandgutpartikel, gemessen an ihrem ofentrockenen Gewicht.

Brandgutklasse (*fuel class*): Charakteristische Art von Brandgutpartikel, wovon fünf Klassen existieren:

- totes Material mit folgenden Durchmessern:

- < 0.6 cm
- 0.6 cm - < 2.5 cm
- 2.5 cm - < 7.5 cm

- lebendes Material mit Durchmesser < 0.6 cm:

- krautig (*herbaceous*)
- verholzt (*woody*)

Brandgutparameter: Damit werden die 16 Eingabeparameter bezeichnet, welche das Brandgutmodell beschreiben.

Brandgutpartikel: Einzelne Partikel im Brandgut: Blätter, Äste, etc.

Brandguttyp (*fuel type*): Charakteristische Art von Brandgut, z.B. Gras, Laub, Holz oder Streu.

Brandschutzmassnahmen (*fire presuppression*): Alle Aktivitäten, die vor dem Auftreten von Feuer verwendet werden, um die Waldbrandbekämpfung effizienter zu gestalten.

Erlöschungsfeuchtigkeit: Feuchtigkeit des toten Brandgutes, bei welchem sich ein Feuer nicht ausbreiten kann.

Feuerausbreitung (*fire spread*): Richtung und Geschwindigkeit, mit der ein Feuer sich fortbewegt.

Feuergeschichte (*fire history*): Alle Feuer, die in der Vergangenheit stattgefunden haben und erfasst wurden.

Feuerökologie (*fire ecology*): Reaktionen des Ökosystems auf Feuer.

Feuerverhalten (*fire behavior*): Die Art wie ein Feuer auf die Variablen Wetter, Brandgut und Topographie reagiert.

Gegenfeuer (*backfires*): Feuer, die innerhalb der Bekämpfungslinie entzündet werden, um Brandgut in der Ausbreitungsrichtung des Feuers zu verbrennen.

kontrollierte Feuer (*prescribed fires*): Feuer natürlichen oder künstlichen Ursprungs, welches unter kontrollierten Bedingungen brennt.

kontrolliertes Abbrennen (*prescribed burning*): Kontrolliertes Verwenden von Feuer, um die Brandgutmenge zu reduzieren.

Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis: Verhältnis der Oberfläche zum Volumen einer Partikel (z.B. Blatt oder Ast); wichtige Grösse bei der Brandgutmodellierung.

Prioritätszonen (*priority zones*): Gebiete, die anhand ihrer Waldbrandgefahr und ihres Schadenpotentials zu einer Zone mit gleich hoher Priorität in der Waldbrandbekämpfung zusammengefasst werden.

Rückwärtsausbreitung: Berechnete Feuerausbreitung von den Zielorten des Feuers zu seinem Startpunkt.

Schadenpotential: Ausmass des Schadens, der durch ein zukünftiges Feuer an einem Ort wahrscheinlich angerichtet wird.

Sukzession (*ecologic succession*): Zeitliche Aufeinanderfolge von Pflanzengesellschaften.

Waldbrand (*wildfire*): Alle Feuer in einer naturnahen Landschaft, ausgenommen kontrollierte Feuer.

Waldbrandbekämpfung (*fire suppression*): Alle Aktivitäten, die im Zusammenhang mit dem Auslöchen von Feuern stehen, beginnend mit dem Entdecken des Feuers.

Waldbrandgefahr (*fire danger*): Oberbegriff für alle Faktoren, die Entzündung, Ausbreitung und Schwierigkeiten bei der Bekämpfung beeinflussen sowie die entstandenen Schäden.

Waldbrandmanagement (*fire management*): Alle Aktivitäten, die benötigt werden, um Wald vor Feuer zu schützen, sowie die Verwendung von Feuer, um Ziele der Landnutzung zu erreichen.

Waldbrandrisiko (*fire risk*): Die Wahrscheinlichkeit für ein Entzünden eines Feuers.

Waldbrandsaison (*fire season*): Die Zeitabschnitte des Jahres, in denen Waldbrände mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten.

Computersysteme

Kursiv in Klammer sind jeweils die englischen Begriffe angemerkt.

Entscheidungsunterstützendes System (*decision support system*): Interaktives, computerbasiertes System, welches AnwenderInnen hilft, Daten und Modelle zur Lösung von un- oder nur teilweise strukturierten Problemen zu gebrauchen.

Expertensystem (*expert system*): Computerprogramm, welches mit integriertem ExpertInnenwissen Probleme löst. Es besteht immer aus einer Wissensbasis und einer Problemlösenden Komponente.

Fakten (*facts*): Codiertes Expertenwissen

Geographisches Informationssystem (GIS): Computersystem zur Modellierung räumlicher Daten. Besteht aus einer Attribut- und einer Geometriedatenbank.

Problemlösende Komponente (*inference engine*): Problemlösender Teil des Expertensystems, ruft dazu Daten der Wissensbasis und der Datenbank ab.

Rasterdaten: Datengrundstruktur bestehend aus Pixeln, bzw. Rasterzellen bestimmter Maschenweite (z.B. 10 x10 m).

Regeln (*rules*): Regeln, die im Expertensystem die Fakten logisch verknüpfen.

Region (*region*): Komplexe Gebilde aus Polygonen, die einander überlappen, gemeinsame Grenzen haben, oder nicht zusammenhängende Flächen, die aber derselben Klasse angehören. Konzept der GIS-Software ARC/INFO.

Rückwärtsverketteten (*backward chaining*): Abfragemodus der problemlösenden Komponente des Expertensystems: Ausgehend vom gewünschten Ziel werden die Regeln so lange abgesucht, bis eine gefunden ist, in der alle Bedingungen wahr sind.

Subklasse (*subclass*): Regions, die für mindestens ein Attribut den gleichen Wert haben, können eine Subklasse bilden.

Vektordaten: Datengrundstruktur wird aus Linien und Knoten gebildet.

Vorwärtsverketteten (*forward chaining*): Abfragemodus der problemlösenden Komponente des Expertensystems: Ausgehend von den Daten werden die Regeln so lange abgesucht, bis eine gefunden ist, in der alle Bedingungen wahr sind und das Zielwort erreicht ist.

Wissensakquisition (*knowledge acquisition*): Gewinnen des ExpertInnenwissens für ein Expertensystem

Wissensbasis (*knowledge base*): Der Teil des Expertensystems, in welchem die Regeln zur Problemlösung gespeichert sind.