

MB
858

Geographisches
Institut
MB Universität
Zürich

858

Brandgutdaten in der Waldbrandmodellierung



Diplomarbeit von
Stephan Harvey

Ausgeführt unter der Leitung von

Dr. B. Allgöwer
Prof. Dr. K. Brassel
Dipl. Forst-Ing. M. Conedera

Januar 1996

Geographisches Institut der Universität Zürich

1214470

828

Vorwort

Um mit Informationssystemen alle Art arbeiten zu können, sind Daten über das zu untersuchende Thema notwendig. Für Waldbrandmodellierungen ist dies nicht anders. Die Idee Brandgutdaten für Waldbrandmodellierungen zu erheben wurde von Reto Schöning und Britta Allgöwer an mich herangetragen. Während der Einarbeit in das Thema Waldbrand hörte ich öfters von verschiedener Seite Ausrufe über mangelhafte Datenqualität, nicht repräsentative Stichprobenwahl etc.. Da ich in meiner Diplomarbeit selber Daten erhob, hatte ich den Vorteil, selber über die Qualität und Repräsentativität der Daten zu entscheiden und konnte somit auf gezielte Fragestellungen Brandgutdaten sammeln. Die ganze Arbeit war durch ein abwechslungsreiches Vorgehen geprägt, von der Planung über die Durchführung der Datenerhebung zur Analyse und Verwendung der Daten. Ich hatte dabei die Gelegenheit viele interessante Bekanntschaften mit Experten verschiedener Fachgebiete zu machen und konnte aus ihrem reichen Erfahrungsschatz profitieren.

Ich möchte bei dieser Gelegenheit mich für die begleitende Betreuung und die kritische Durchsicht meiner Arbeit bei Dr. Britta Allgöwer und Prof. Dr. K. Brassel bedanken. Weiter danke ich allen Mitarbeitern der Sottostation für die fachliche und physische Unterstützung während der Feldarbeit, allen voran Marco Conedera und Marco Marcozzi. Dank gebührt auch Dr. Huib Ernste für die Bereitstellung der Workstations mit dem Statistikpaket SAS, Prof. Dr. F. Klötzli für die fachliche Unterstützung aus botanischer Sicht, sowie Danile Leonardi für die Bereitstellung der Originalkarten und Christof Brandenberger, welcher das Scannen der Originalkarte ermöglichte. Zum Schluss möchte ich mich noch bei Peter Lendi für das Trocknen und Wägen der Proben und bei allen MitstudentInnen, die in irgendeiner Weise etwas zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben bedanken, allen voran Reto Schöning, der bedeutende Vorarbeit für die Durchführung dieser Arbeit geleistet hat.

Zürich, 10.1.1996

Stephan Harvey

Zusammenfassung

Damit ein Feuer brennt braucht es unter anderem Brennstoff. Dies gilt auch für Waldbrände. In der vorliegenden Diplomarbeit wurde versucht, Brennstoff für Waldbrände quantitativ zu erfassen. Der Begriff Brennstoff wurde dabei durch die Bezeichnung Brandgut ersetzt. Die Brandgutdaten wurden im Hinblick auf Waldbrandmodellierungen erfasst.

Für das mathematische Feuerausbreitungsmodell von Rothermel sind unter anderem verschiedene Eingaben über das Brandgutmaterial notwendig, welche aus verschiedenen Parametern zusammengesetzt sind. Einige dieser Parameter ändern bei jedem Waldtyp. Um für ausgewählte Waldflächen Brandgutdaten zu erhalten, müssen Erhebungen durchgeführt werden. Die Erhebung von Brandgutdaten ist sehr zeitraubend und teuer. Deshalb sind effiziente, auf ein Minimum reduzierte Erhebungsmethoden gefragt, die trotz Vereinfachungen nicht an Zuverlässigkeit einbüßen. Für ein ausgewähltes Untersuchungsgebiet im Malcantone (Kanton Tessin) wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit die ersten Brandguterhebungsversuche in der Schweiz durchgeführt. Mit Hilfe amerikanischer Erhebungstechniken wurde eine Methode entwickelt, um Brandgutdaten für kleinräumige, schweizerische Verhältnisse zu erheben. Mit einem systematisch stratifizierten Stichprobenverfahren wurden 54 Stichprobenpunkte innerhalb des Untersuchungsgebietes mit GIS-Unterstützung berechnet. Bei jedem dieser Stichprobenpunkte wurden Brandgutproben gesammelt, sowie diverse Messungen durchgeführt.

Durch die Probenanalyse und Auswertung der Messungen wurden Rohdaten erstellt. Aus diesen Rohdaten mussten die für die Waldbrandmodellierung spezifischen Parameter berechnet werden. Diese Parameter sind Bestandteil eines Brandgutmodells. Es entstanden für jeden Stichprobenpunkt vier Werte für die Biomasse, aufgeteilt in die Durchmesserklassen kleiner 0.6cm, zwischen 0.6 und 2.5cm, zwischen 2.5 und 7.5cm, sowie für lebendes, verholztes Brandgut. Im weiteren wurde das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis der Partikel, die Tiefe der Brandgutschicht, sowie die Erlöschungseuchtigkeit berechnet.

Es entstand eine Datenmatrix bestehend aus sieben Brandgutparametern und 54 Stichprobenpunkten. Mittels Gruppierungs- und Unterscheidungsanalysen wurde die Ähnlichkeit der Punkte untereinander untersucht. Für die Region Malcantone entstanden drei Brandgutmodelle: a) für Kastanienwald b) für ehemalige Waldbrandflächen c) für aufgeforsteten Nadelwald. Die Streuung der Brandgutparameter, sowie ihre Zuverlässigkeit ist innerhalb der drei Brandgutmodelle unterschiedlich. Die Waldfläche Nadelwald ist sehr heterogen und weist grosse Streuungen der Brandgutparameter auf. Die Unsicherheit der Rothermelmodellberechnung ist mit diesem Brandgutmodell am grössten. Die Brandgutparameter des Modells Kastanienwald streuen am wenigsten. Berechnete Ausbreitungsraten für das Brandgutmodell Kastanienwald weisen grosse Ähnlichkeiten mit gemessenen Ausbreitungsraten aus portugiesischen Brennversuchen von Brandgut aus Kastanienwäldern auf.

Mit den gewonnenen Daten können Waldbrandmodellierungen im Tessin durchgeführt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen aus dieser Arbeit sind für weitere Erhebungskampagnen (z.B im Schweizerischen Nationalpark) verwendbar.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	i
Zusammenfassung	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
1. Einleitung und Problemstellung.....	1
2. Zielsetzung	2
3. Grundlagen	3
3.1 Brandgutgrundlagen	3
3.1.1 Begriff Brandgut (<i>Fuel</i>)	3
3.1.2 Brandgutmodelle	4
3.2 Das Rothermel-Feuerausbreitungsmodell	7
3.3 Das BEHAVE-System.....	15
3.4 Methode der Brandguterhebung.....	16
3.5 Kartengrundlagen	21
3.6 Untersuchungsgebiet.....	24
3.7 Die ARC/INFO-Applikation <i>Sparks</i>	26
3.7.1 Einführung	26
3.7.2 Funktionen	26
3.8 Statistische Analysemethoden	27
3.8.1 Clusteranalyse.....	27
3.8.2 Diskriminanzanalyse.....	29
4. Vorgehen.....	34
4.1 Einleitung	34
4.2 Datenerhebung	35
4.2.1 Stichprobenplanung	35
4.2.2 Übertragung ins Gelände	39
4.2.3 Stichprobenentnahme.....	39
4.3 Erstellung der Rohdaten.....	40
4.3.1 Tiefe der Brandgutschicht.....	41
4.3.2 Biomasse.....	41
4.3.3 Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis	50
4.4 Berechnung von Brandgutmodellen.....	52
4.4.1 Biomasse (m)	52
4.4.2 Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (σ)	53
4.4.3 Tiefe der Brandgutschicht (δ).....	54

4.4.4 Erlöschungsfeuchtigkeit des toten Materials (Mx)	55
4.4.5 Zusammenstellung	57
4.5 Datenanalyse	58
4.5.1 Datenaufbereitung	58
4.5.2 Eliminierung von Ausreißern	59
4.5.3 Analyse von Stratenunterschieden	61
4.5.4 Strukturen innerhalb der Straten	63
4.5.5 Gruppierungen	66
5. Resultate	73
5.1 Brandgutmodell Nadelwald	73
5.2 Brandgutmodell Waldbrandflächen	74
5.3 Brandgutmodell Kastanienwald	76
5.4 Berechnungen mit dem Rothermelmodell	77
5.5 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse	78
6. Ausbreitungsmodellierungen mit <i>Sparks</i>	81
6.1 Implementation der Brandgutmodelle in <i>Sparks</i>	81
6.2 Nachsimulationen von Waldbränden	82
7. Vergleiche und Beurteilung	85
7.1 Vergleiche der Brandgutmodelle mit Messergebnissen	85
7.2 Beurteilung der Erhebungsmethode	86
7.2.1 Positive Aspekte	86
7.2.2 Negative Aspekte	86
7.3 Verbesserungsvorschläge	86
8. Schlussfolgerungen und Ausblick	88
8.1 Brandgutmodellvalidierung	88
8.2 Grossflächige Erhebungen	88
8.3 Ausblick Nationalpark	89
8.3.1 Gefährdete Gebiete	89
8.3.2 Vorschläge für Brandgutdatenerhebungen	89
Literaturverzeichnis	92
Anhänge	95
A1. Datensätze	95
A2. Brandgutmodelle	97
A3. Erhebungsformular	100
A4. SAS-Steuerprogramme	102
A5. Formeln des Rothermelmodells	104

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Die Brandguttypen der „surface fuels“ (gezeichnet nach ROTHERMEL, 1983)	3
Abb. 2:	Brandgutparameter die in das Rothermelmodell einfließen (die schraffierten Parameter werden im Feld erhoben)	5
Abb. 3:	Ein- und Ausgabegrößen des Rothermelmodells	7
Abb. 4:	Abhängigkeit der optimalen Packungsdichte vom Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 32)	10
Abb. 5:	Die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Packungsdichte und dem Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis. (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 33)	11
Abb. 6:	Einfluss der Packungsdichte und des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses auf den Ausbreitungsfluss-Anteil. (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 36)	12
Abb. 7:	Einfluss des Windes und des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses auf den Windkoeffizienten (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 37)	13
Abb. 8:	Einfluss des Windes und der relativen Packungsdichte auf den Windkoeffizienten (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 38)	13
Abb. 9:	Einfluss des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses auf den effektiven Entzündungsanteil einer Partikel	14
Abb. 10:	Die Struktur des BEHAVE-Systems	15
Abb. 11:	Grundriss eines Stichprobenpunktes (nach BROWN et al., 1982)	17
Abb. 12:	Entscheidungskriterien für das Sammeln von Blättern (Bsp. Kastanienblatt)	19
Abb. 13:	Waldbestandskarte des Malcantone (carta dei popolamenti forestali)	22
Abb. 14:	Waldvegetationskarte des Malcantone (carta della vegetazione arborea)	23
Abb. 15:	Untersuchungsgebiet (schräg schraffierte Flächen) der Datenerhebung	25
Abb. 16:	Überblick über ausgewählte Cluster-Algorithmen (BACKHAUS 1994)	27
Abb. 17:	Ablaufschema der agglomerativen hierarchischen Clusterverfahren (BACHKHAUS, 1994)	28
Abb. 18:	Trennung zweier Gruppen durch verschiedene Diskriminanzachsen (BAHRENBERG et al., 1992, S. 321)	31
Abb. 19:	Vorgehen der Brandgutdatenerhebung in dieser Diplomarbeit	34
Abb. 20:	Verteilung der 54 Stichprobenpunkte auf die 4 Straten	38
Abb. 21:	Weg des Brandgutes über das Erstellen von Rohdaten zum Brandgutmodell	40
Abb. 22:	Berechnung des Hangneigungskoeffizienten	42
Abb. 23:	Korrelation der Holzbiomasse zwischen der Transsekt-Methode und der Stichprobenentnahme	43
Abb. 24:	Prozentualer Anteil der totalen Strauchmasse für die Durchmesserklasse <0.5 cm als Funktion der Stammdurchmesser. (Aus BROWN, 1976, S. 155)	47
Abb. 25:	Prozentualer Anteil der totalen Strauchmasse für die Durchmesserklasse 0.5-2 cm als Funktion der Stammdurchmesser. (Aus BROWN, 1976, S. 156)	47
Abb. 26:	Baumdiagramm der Clusteranalyse nach dem Single-Linkage-Verfahren (standardisierte Werte)	60
Abb. 27:	Klassifikationsresultate der Diskriminanzanalyse	62
Abb. 28:	Tiefen der Brandgutschicht der Punkte in Stratum Z mit und ohne Berücksichtigung der Sträucher	66
Abb. 29:	Baumdiagramm der Clusteranalyse nach dem Ward-Verfahren, ohne Ausreisser und mit standardisierten Werten	67
Abb. 30:	A: Gruppierung der Stichprobenpunkte mit den erhobenen 7 Brandgutparametern als Variable B: Gruppierung der Stichprobenpunkte mit den Ergebnissen der Rothermelberechnung	71
Abb. 31:	Schnittmengen der Gruppen 2 und α , sowie der Gruppen 3 und β	72
Abb. 32:	Fotobeispiel für das Brandgutmodell Nadelwald	74
Abb. 33:	Fotobeispiel für das Brandgutmodell Waldbrandflächen	75
Abb. 34:	Fotobeispiel für das Brandgutmodell Kastanienwald	76
Abb. 35:	Struktur eines Brandgutgrids in Sparks	81
Abb. 36:	Simulierung vorgekommener Waldbrände im Malcantone mit der Applikation „Sparks“	83

Abb. 37: Vergleich von Ausbreitungsraten	85
Abb. 38: Mögliche Auslegung an einem Stichprobenpunkt.....	87
Abb. 39: Waldbrandgefährdete Gebiete in der Umgebung Ofenpässstrasse	90

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Gliederung der 4 Straten.....	36
Tab. 2: Maschenweiten der vier Straten	37
Tab. 3: Tabellenwerte für die Abschätzung von Laub- und Totalgewicht über Boden für 25 Straucharten und 3 Strauchgruppen mit Benützung folgender linearer Gleichung: $\ln(\text{Biomasse, g}) = a + b \ln(\text{Stammdurchmesser, cm})$ (BROWN, 1976; Tab. 1, S. 154)..	45
Tab. 4: Biomassen (in Gramm) der verschiedenen Straucharten und Stammdurchmesserklassen mit amerikanischer Vergleichsart.....	48
Tab. 5: Berechnung der Strauchbiomassen am Beispiel von Stichprobenpunkt Nr.19	49
Tab. 6: Datensatz der Brandgutdaten von den 54 Stichprobenpunkten	57
Tab. 7: Korrelationsmatrix der erhobenen Brandgutparameter	59
Tab. 8: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit den Ausgangsstraten A, B, C und D.....	61
Tab. 9: Klassifikationsmatrix mit vier Straten.....	63
Tab. 10: Punktverteilung der drei Straten A, B, Z	63
Tab. 11: Relative Stichprobenfehler der Brandgutparameter von Stratum A, B und Z	65
Tab. 12: Gruppen aus der Clusteranalyse mit den Brandgutparametern als Variablen	68
Tab. 13: Unterschiede der Punkte von Stratum A und B der Gruppe 2	68
Tab. 14: Gruppen aus der Clusteranalyse mit den Rothermelergebnissen als Variablen	70
Tab. 15: Zusammenfassung der Werte der Brandgutparameter in den drei Modellen.....	77
Tab. 16: Rothermelergebnisse aus den drei Brandgutmodellen.....	78
Tab. 17: Resultate der Sensitivitätsanalyse	79
Tab. 18: Resultate der Unsicherheitsanalyse	80

1. Einleitung und Problemstellung

Anlässlich der Frage, wie mit einem Brand im Schweizerischen Nationalpark umzugehen wäre, implementierte SCHÖNING (1996) im Rahmen seiner Diplomarbeit das Waldbrandverhaltensmodell von Rothermel (ROTHERMEL, 1972) in ein Geographisches Informationssystem (GIS) für den Schweizerischen Nationalpark. Zur Modellierung von Lauffeuern mit dem Rothermelmodell sind verschiedene Eingabegrößen wie Wind, Hangneigung, Exposition, Feuchtigkeit, sowie die Beschaffenheit des Brandgutes erforderlich. In digitalen Höhenmodellen sind die Daten für die Hangneigung und die Exposition vorhanden. Aus Meteodaten können Näherungswerte für Feuchtigkeit und Wind abgeleitet werden. Für eine der wichtigsten Eingabegrößen - die Beschaffenheit von Brandgut (*engl. „fuel“*) sind keine Daten vorhanden. Um diese Lücke zu schliessen, entstand die vorliegende Diplomarbeit, mit dem Ziel, die Menge und die Beschaffenheit von Brandgut zu quantifizieren.

Da es sich im Schweizerischen Nationalpark um ein Schutzgebiet handelt, ist es sinnvoll, Methoden für die Datenerhebung ausserhalb davon zu entwickeln. Im Tessin, wo am meisten Waldbrände in der Schweiz vorkommen, ist die Beschaffenheit und die Quantität des vorhandenen Brandgutes ebenfalls von Interesse. Die Wissenschaftler der Sottostatione, einer Zweigstelle der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), im Tessin, haben eine Waldbranddatenbank aufgebaut, sowie Methoden entwickelt, um die Wahrscheinlichkeit für das Ausbrechen von Waldbränden an einem bestimmten Tag anzugeben. Um gezielt in gewissen Gebieten Aussagen über die Waldbrandgefahr machen zu können, sind Brandgutinformationen notwendig. Die Waldbranderfahrung der Tessiner Wissenschaftler, Förster und Feuerwehrleute, sowie die guten Kontakte zur Sottostatione bildeten optimale Voraussetzungen für die Durchführung dieser Arbeit in der südlichen Schweiz.

Im „*Forest Service*“ der USA wird schon seit mehr als 20 Jahren versucht, Brandgut zu quantifizieren. Es wurden Messmethoden entwickelt, um im Feld Brandguterhebungen durchzuführen. Eine wichtige Person, die sich mit Brandgutproblemen auseinandersetzt und viele Methoden entwickelt hat, ist James Brown. BROWN et al. (1982) entwickelten eine praxisbezogene Anleitung, mit welchen Techniken die Biomasse für verschiedene Brandguttypen in Wäldern des *Interior West* (USA) zu erheben ist.

Für die riesigen und homogenen Wälder Nordamerikas werden keine flächendeckenden Erhebungen durchgeführt, sondern erhobene Daten von ausgewählten Parzellen extrapoliert. Für die kleinräumigen und gut zugänglichen Waldflächen in der Schweiz müssen andere Vorgehensweisen überlegt werden.

2. Zielsetzung

Dank der relativ guten Erreichbarkeit und der „Waldbranderfahrung“ im Tessin, sollen im Malcantone erste Erhebungsversuche von Brandgutdaten für die Schweiz vorgenommen werden. Zur Schonung wurde der Schweizerische Nationalpark absichtlich nicht als Testgebiet ausgewählt. In der vorliegenden Arbeit soll mit Hilfe von amerikanischen Erhebungstechniken eine Erhebungsmethode entwickelt werden, die:

- auf schweizerische Verhältnisse zugeschnitten ist
- mit möglichst geringem Aufwand zu den erforderlichen Daten führt
- bei der Durchführung von Drittpersonen zu ähnlichen Ergebnissen führt
- in weiteren Erhebungskampagnen (z.B. im Nationalpark) eingesetzt werden kann.

Dabei soll eine Stichprobenplanung mit GIS-Unterstützung durchgeführt werden. Für Berechnungen mit dem Rothermelmodell müssen dabei folgende Parameter erhoben werden.

- Biomasse [kg/m^2]
- Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis [m^{-1}]
- Tiefe der Brandgutschicht [m]
- Erlöschungsfeuchtigkeit [%]

Im weiteren sind folgende Fragen von Interesse:

- Wie stark ändert die Brandgutsituation in unterschiedlichen Waldtypen?
- Können einst vorgekommene Waldbrände mit den gewonnen Daten nachsimuliert werden?
- Wie soll mit den gemachten Erfahrungen eine Brandgutdatenerhebung im Schweizerischen Nationalpark durchgeführt werden?

3. Grundlagen

3.1 Brandgutgrundlagen

3.1.1 Begriff Brandgut (*Fuel*)

Unter dem Begriff Brandgut versteht man alles organische, lebendige oder tote Material in, auf oder über dem Grund, welches sich entzünden und brennen kann. Es gehören Bäume, Sträucher, Gräser, sowie die Streuschicht oder herumliegendes Holz dazu. Nach FULLER (1991) kann man drei Arten von Brandgut unterscheiden:

- Als Brandgut **im Boden** („*ground fuel*“) bezeichnet man verwesenes organisches Material, welches unterhalb der Streuschicht liegt, sowie begrabene Holzstücke und Wurzeln, welche Feuer ohne weiteres Kilometer weit unterirdisch transportieren und an einer anderen Stelle an die Oberfläche bringen können.
- Als Brandgut **auf dem Boden** („*surface fuel*“) wird die in folgender Abbildung dargestellte Streu-, Kraut- und Strauchschicht bis zwei Meter über dem Boden bezeichnet.

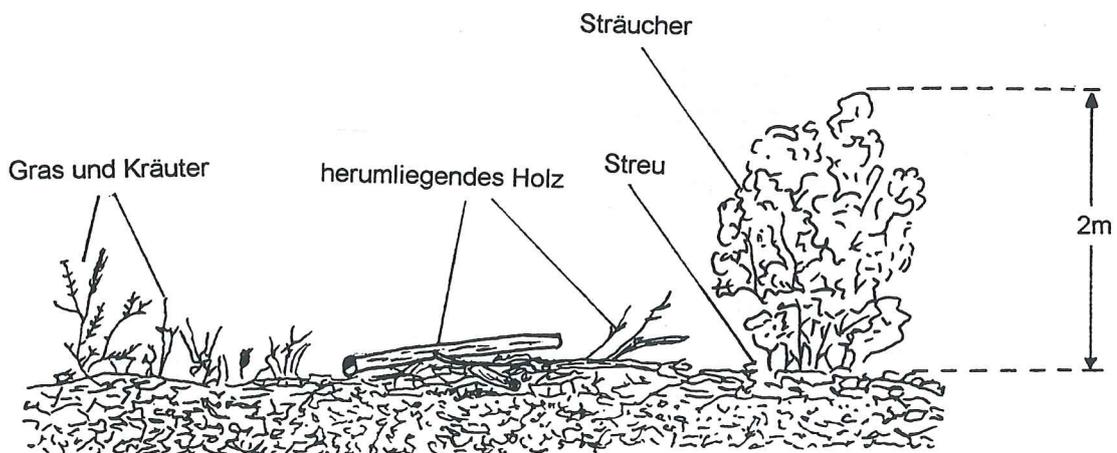


Abb. 1: Die Brandguttypen der „*surface fuels*“ (gezeichnet nach ROTHERMEL, 1983)

Zum Holz gehören alle herumliegenden toten Hölzer. Die Streu besteht aus Nadeln, Blättern und Früchten. Zur Krautschicht werden Kräuter und Gräser gezählt. Als Sträucher werden alle Strauch- und Baumarten bis zwei Meter über dem Waldboden bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wurde nur diese Art von Brandgut in Betracht gezogen.

- Zum Brandgut **über dem Boden** („*aerial fuel*“) gehören Bäume und Sträucher, welche höher als 1.5 m über Grund liegen.

Wenn im weiteren Verlauf dieser Arbeit von Brandgut die Rede ist, so ist nur das Brandgut auf dem Boden („*surface fuel*“) gemeint.

Um den Begriff Brandgut etwas zu strukturieren, wurde in dieser Arbeit folgende Unterteilung durchgeführt:

a) **Brandguttyp:** Unterteilt das Brandgut in Gras, Laub, Holz, Strauch

b) **Brandgutklasse:** Aufteilung in fünf Klassen:

Wobei totes Material drei Durchmesserklassen enthält:

<0.6 cm
0.6 cm bis <2.5 cm
2.5 cm bis <7.5 cm

Lebendes Material enthält zwei Klassen, mit Durchmesser <0.6 cm:

- krautig
- verholzt.

c) **Brandgutparameter:** Damit werden die 16 Eingabeparameter bezeichnet, welche die Eingabegrösse Brandgutmaterial des Rothermelmodells beschreiben.

3.1.2 Brandgutmodelle

Ein Brandgutmodell ist eine mathematische Beschreibung der Brandgutschicht mit den für Waldbrandmodellierungen nötigen Variablen (CHANDLER et al., 1983). Es besteht aus den in Abb. 2 dargestellten Brandgutparametern. Die Eingabegrösse Brandgutmaterial des Rothermelmodells (Kap. 3.2) wird durch ein Brandgutmodell beschrieben.

Die in Abb. 2 schraffierten Brandgutparameter werden im Feld erhoben. Die restlichen Parameter bleiben in allen amerikanischen Brandgutmodellen konstant und werden auch für die Modelle dieser Arbeit konstant belassen, da ihr Einfluss untergeordnet ist. Im folgenden werden die Brandgutparameter eines Brandgutmodells, mit der englischen Bezeichnung in Klammern, kurz vorgestellt.

- **Biomasse [kg/m^2] (*fuel loading*)**

Für jede der fünf Brandgutklassen wird die Biomasse durch Stichproben erhoben (Kap. 3.3), wobei totes Material mit Durchmesser kleiner 0.6 cm die grösste Genauigkeit erfordert, da dessen Einfluss auf die Ergebnisse am grössten ist.

Die Biomasse besteht aus fünf Brandgutparametern.

- **Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis [m^{-1}] (*surface-area-to-volume-ratio*)**

Je feiner ein Brandgut ist, desto kleiner ist sein Volumen im Vergleich zur Oberfläche, das Verhältnis Oberfläche zu Volumen wird gross. Die Entflammbarkeit eines Brandgutpartikels steigt mit zunehmenden Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis an. Für Durchmesser kleiner 0.6 cm, welche im Feld erhoben wurden, müssen genaue Werte vorliegen, da sie von Brandgutseite her einen grossen Einfluss auf die Ausbreitungsrate haben. Die restlichen Klassen werden als konstante Werte aus amerikanischen Brandgutmodellen übernommen. Ihr Einfluss auf die Waldbrandmodellierung ist gering. Die konstanten Werte für das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis lauten (ALBINI, 1976):

- Totes Material:

0.6 < \varnothing < 2.5 cm:	358 m^{-1}
2.5 < \varnothing < 7.5 cm:	98 m^{-1}

- Lebendes Material: krautig: 4920 m^{-1}
verholzt: 4920 m^{-1}

Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis besteht ebenfalls aus fünf Brandgutparametern.

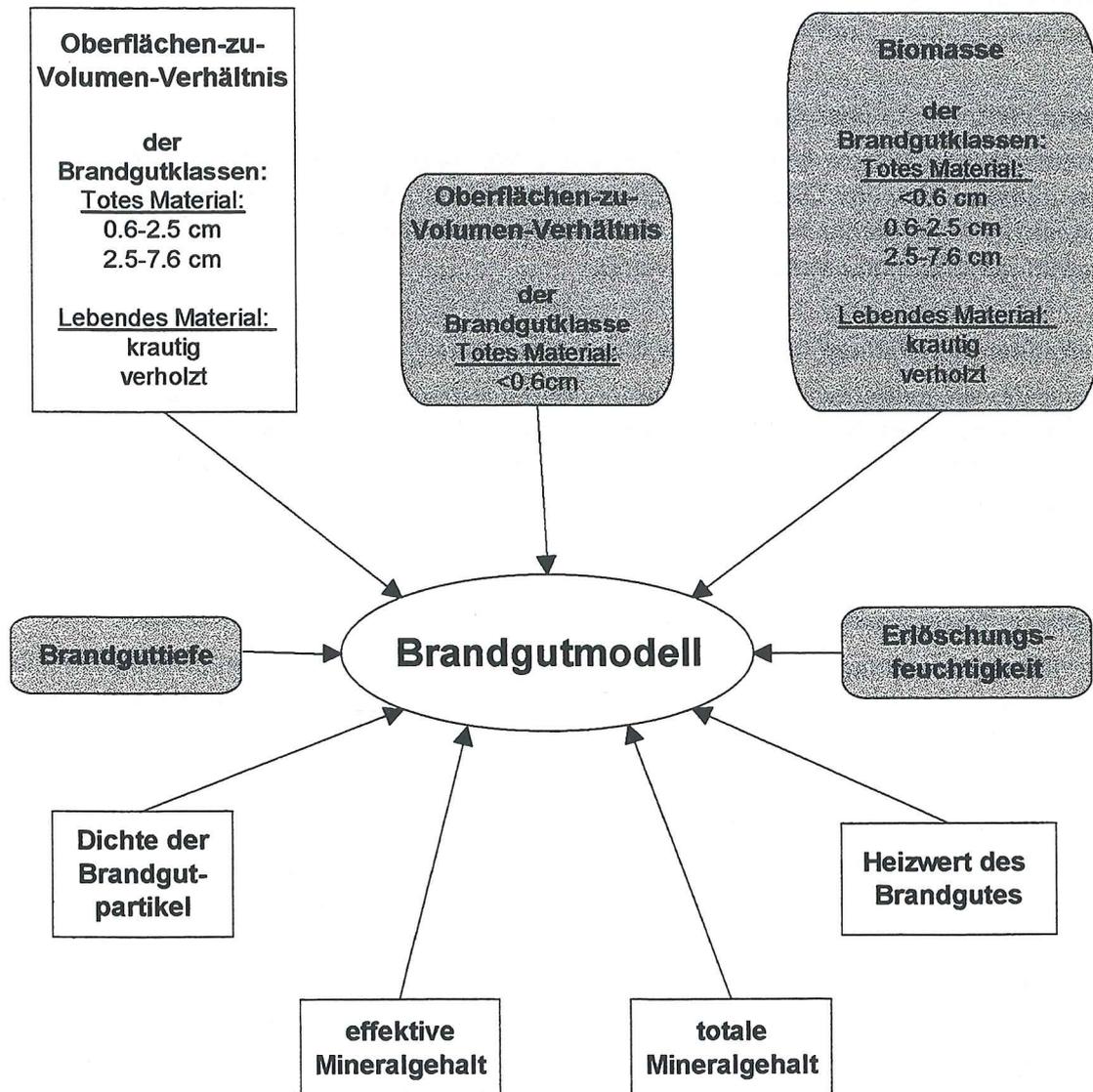


Abb. 2: Brandgutparameter die in das Rothermelmodell einfließen (die schraffierten Parameter werden im Feld erhoben)

- *Tiefe der Brandgutschicht [m] (fuel bed depth)*

Der ermittelte Wert entspricht der mittleren Tiefe der Brandgutschicht (Streu- Kraut- und Strauchschicht).

- **Erlöschungsfeuchtigkeit [%] (moisture of extinction)**

Die Erlöschungsfeuchtigkeit ist gleich dem Feuchtigkeitsgehalt des toten Brandgutes, bei welchem sich ein Feuer nicht ausbreiten kann. Sie wird als Prozentanteil der Trockenmasse des Brandgutes angegeben. Ein Brandgut brennt erst, wenn die Durchschnittsfeuchtigkeit kleiner ist als die Erlöschungsfeuchtigkeit (BURGAN & ROTHERMEL, 1984).

Die Werte der folgenden Brandgutparameter wurden aus amerikanischen Brandgutmodellen übernommen, da deren Einfluss auf die Feuermmodellierung gering ist.

- **Unterer Heizwert des Brandgutes (fuel particle low heat content)**

Die entstehende Wärme bei der Verbrennung von einem Kilogramm Brandgut entspricht dem unteren Heizwert. Dieser Energiewert kann durch das Vorkommen von pflanzlichen Ölen im Brandgut erhöht werden. Er wird jedoch in allen amerikanischen Brandgutmodellen konstant gehalten und beträgt 18600 KJ/kg.

- **Totaler Mineralgehalt der Brandgutpartikel (fuel particle total mineral content)**

Der totale Mineralgehalt der Brandgutpartikel ist gleich dem Mineralgehalt, der nach der Verbrennung eines Brandgutpartikels übrig bleibt (Asche). Das Gewicht der Asche eines Brandgutpartikels wird als Anteil der Trockenmasse der entsprechenden Partikel beschrieben. Dieser Anteil ist mit 0.055 (5.5%) in allen Modellen gleich (BURGAN & ROTHERMEL, 1984).

- **Effektiver Mineralgehalt der Brandgutpartikel (fuel particle effectiv mineral content)**

Der effektive Mineralgehalt ist gleich dem Mineralgehalt eines Brandgutpartikels, der durch ein Feuer verbrennt wird. Er wurde ebenfalls als Anteil der Trockenmasse angegeben und beträgt 0.01 (1%) (BURGAN & ROTHERMEL 1984).

- **Dichte der Brandgutpartikel (ovendry particle density)**

Die Dichte der Brandgutpartikel ist gleich dem durchschnittlichen spezifischen Gewicht des ofengetrockneten Brandgutes. Es beträgt in allen Brandgutmodellen 510 kg/m^3 .

NFFL-Brandgutmodelle

An den Northern Forest Fire Laboratories (NFFL) wurden 13 Brandgutmodelle für das Feuerbreitungsverhalten entwickelt. Zur Erleichterung bei der Brandguterhebung kann eine im Feld angetroffene Situation mit Hilfe von Fotoserien einem Brandgutkomplex zugeordnet werden (FISCHER, 1981 a-c). Es müssen keine oder nur noch vereinzelt Erhebungen gemacht werden. Die NFFL-Modelle können in 4 Gruppen unterteilt werden (ANDERSON, 1982):

- Grasland („grass“): Reicht von offener Prärie bis zu lichten Wäldern. Bis höchstens zwei Meter über Grund ist mehrheitlich Gras anzutreffen. Vereinzelt sind noch Sträucher und herumliegendes Holz vorhanden. (Nr. 1-3)
- Sträucher („shrub“): Buschvegetation; können auch Büsche im Wald sein, sowie grosser Anteil lebender Pflanzen. (Nr. 4-7)
- Holz („timber“): Verschiedene Brandguttypen im Wald, wo wenig Sträucher vorhanden sind. (Nr. 8-10)

- Schlagholz („*logging slash*“): Verschiedene Brandgutmodelle, wo Schlagholz herumliegt. (Nr. 11-13)

In diesen vier Gruppen sind jeweils alle Brandgutttypen vorhanden, die Verteilung ist jedoch unterschiedlich. Der Anteil Gras nimmt z.B. von der Gruppe „*grass*“ zu „*slash*“ kontinuierlich ab. Ausführliche Daten zu den 13 Modellen sind im Anhang A2 zu finden.

3.2 Das Rothermel-Feuerausbreitungsmodell

Das mathematische Feuerausbreitungsmodell von ROTHERMEL (1972) lässt das Feuerverhalten über eine homogene Brandgutfläche, welche aus verschiedenen Brandgutpartikeln unterschiedlicher Grösse besteht, berechnen und ist beschränkt auf Bodenlauffeuer. Folgende Ein- und Ausgabegrößen sind Bestandteil des Rothermel-Modells:

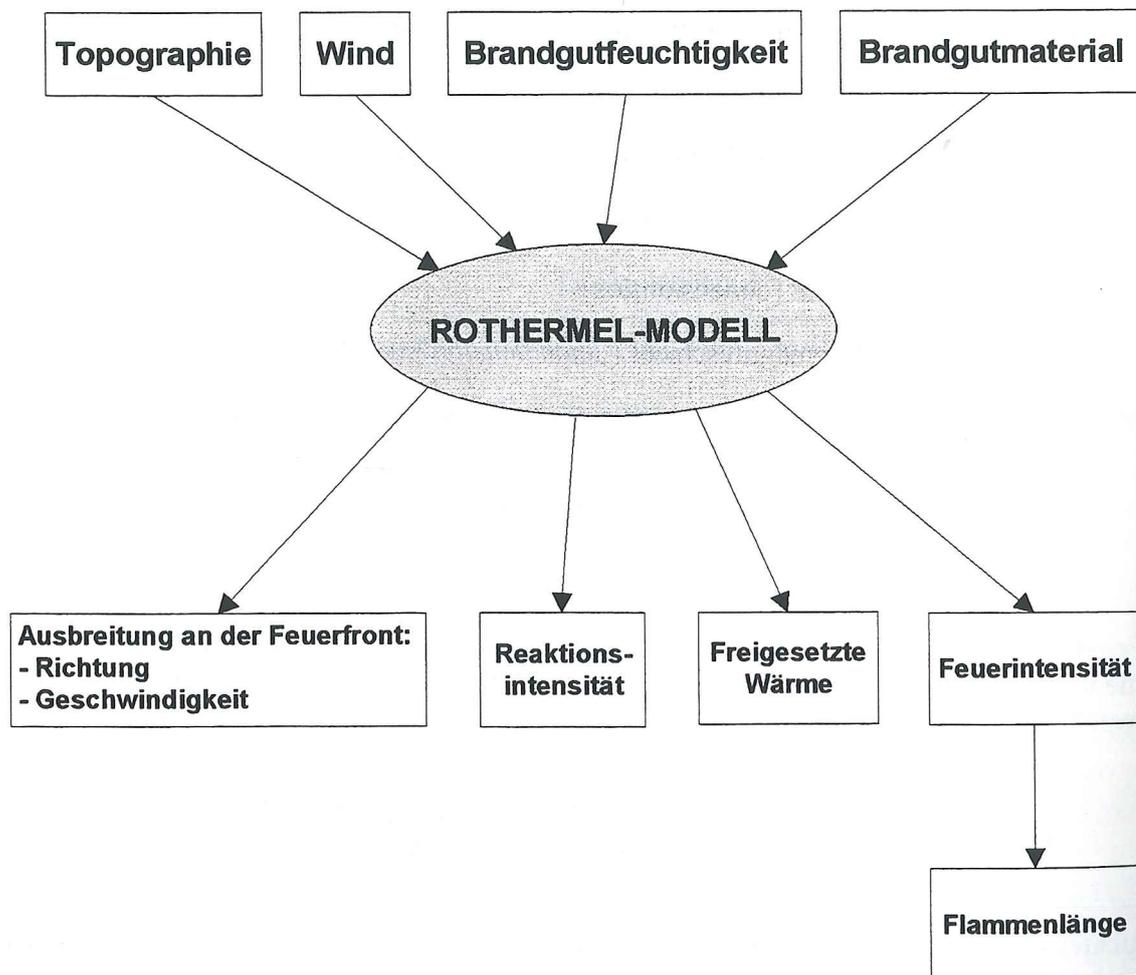


Abb. 3: Ein- und Ausgabegrößen des Rothermelmodells

Mit den Eingabedaten Topographie, Wind, Brandgutfuechtigkeit und der Beschreibung des Brandgutmaterials berechnet das Rothermelmodell neben der Ausbreitungsrate die Richtung, die freigesetzte Wärme, die Reaktionsintensität, die Flammenlänge, etc. eines Feuers.

Zur Topographie gehören Hangneigung und Exposition eines Punktes im Gelände, der Wind setzt sich aus der Richtung und seiner Geschwindigkeit zusammen. Die Brandgutfuechtigkeit

wird durch einen Prozentanteil der Trockenmasse für fünf Brandgutklassen ausgedrückt. Ein Brandgutpartikel mit einer Brandgutfeuchtigkeit von 100% z.B. ist doppelt so schwer wie sein Trockengewicht. Zum Brandgutmaterial gehören 16 verschiedene Parameter, welche ein Brandgutmodell beschreiben (Abb. 2).

Die wichtigste Ausgabegrösse des Rothermelmodells ist die Ausbreitungsrate. Sie wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$R = \frac{I_r \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad (1)$$

wobei:

- R = Ausbreitungsrate der Flammenfront („*rate of spread*“) [m/s]
- I_r = Reaktionsintensität („*reaction intensity*“) [kW/m²]
- ξ = Ausbreitungsfluss-Ratio („*propagating flux ratio*“) [dimensionslos]
- Φ_w = Windkoeffizient [dimensionslos]
- Φ_s = Hangkoeffizient [dimensionslos]
- ρ_b = Dichte der Brandguteschicht („*bulk density*“) [kg/m³]
- ε = Effektiver Entzündungsanteil einer Partikel („*effective heating number*“) [dimensionslos]
- Q_{ig} = Entzündungswärme („*heat of preignition*“) [kWh/kg]

Die Feuerausbreitungsrate lässt sich auch als Quotient, aus der vom Brandgut aufgenommenen Wärme und der Wärme, die zur Entzündung einer Volumeneinheit des Brandgutes aufgenommen werden muss, beschreiben.

$$\text{Ausbreitungsrate} = \frac{\text{vom potentiellen Brandgut erzeugte Wärme}}{\text{erforderliche Wärme um das Brandgut zu entzünden}}$$

Je feuchter ein Brandgut ist, desto mehr Wärme ist erforderlich, um das Brandgut zu entzünden und desto kleiner wird die Ausbreitungsrate.

Die Variablen der Ausbreitungsrate werden im folgenden kurz beschrieben. Da in dieser Arbeit Brandgutdaten von Interesse sind, wird besonders der Einfluss des Brandgutes auf die einzelnen Variablen betrachtet. Die Koeffizienten der Formeln beziehen sich auf metrische Einheiten. Sie wurden von SCHÖNING (1996) aus amerikanischen Einheiten an metrische Einheiten angepasst.

- **Reaktionsintensität (reaction intensity) $[I_R] = [\text{kW}/\text{m}^2]$**

Die Reaktionsintensität wird vom Rothermelmodell als Ausgabeparameter berechnet und ist ein Mass für die total freigesetzte Energie an der Feuerfront pro Flächeneinheit und Zeit.

I_R wird durch folgende Formel beschrieben:

$$I_R = \Gamma' h \eta_S \sum_{i=1}^2 w_{n_i} \eta_{M_i} \quad (2)$$

wobei:

- Γ' = potentielle Reaktionsgeschwindigkeit („potential reaction velocity“)
- h = Unterer Heizwert des Brandgutes („fuel particle low heat content“); Eingabegrösse
- η_S = Mineraldämpfungskoeffizient („mineral damping coefficient“)
- w_{n_i} = Netto Biomasse („net loading“)
- η_{M_i} = Feuchtigkeitsdämpfungskoeffizient („moisture damping coefficient“)

$i = 1$: totes Material

$i = 2$: lebendes Material

Im folgenden wird kurz auf die einzelnen Parameter eingegangen und besonders der Einfluss der Brandgutdaten auf die Reaktionsintensität erläutert.

Die Reaktionsgeschwindigkeit (Γ') ist ein wichtiger Term für die Reaktionsintensität. Er wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\Gamma' = \frac{0.16828\sigma^{3/2}}{29700 + 0.5997\sigma^{3/2}} \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^A e^{A \left(1 - \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right) \right)} \quad (3)$$

wobei: $A = 340.53\sigma^{-0.7913}$

Die Reaktionsgeschwindigkeit wird von der Partikelgrösse des Brandgutes und der sog. Packungsdichte beeinflusst. Die Partikelgrösse ist definiert durch das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis. Die Packungsdichte beschreibt die Kompaktheit eines Brandgutes und wird als prozentualer Anteil der Brandgutschicht bezeichnet, welcher aus Brandgut besteht. Der Rest ist Luft. Die Werte liegen zwischen den Extremen 0 und 1. Bei einer Packungsdichte von 0 ist kein Brandgut vorhanden, die Brandgutschicht besteht nur aus Luft. Ein solides Stück Holz besitzt eine Packungsdichte von 1, es sind keine luftgefüllten Hohlräume vorhanden. Realistische Werte liegen zwischen 0 und 0.1. Die Packungsdichte (β) wird aus der Biomasse, der Tiefe der Brandgutschicht und der Partikeldichte bestimmt.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i}{\delta\rho_p} \quad (4)$$

wobei:

- w_i = Biomasse der Brandgutklasse i
 δ = Tiefe der Brandgutschicht
 ρ_p = Partikeldichte (513kg/m^3)

Diejenige Packungsdichte, welche die höchste Reaktionsintensität erzeugt wird optimale Packungsdichte genannt und ist die optimale Mischung von Brandgut und Luft. Die optimale Packungsdichte (β_{op}) wird durch das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis bestimmt.

$$\beta_{op} = 8.8578\sigma^{-0.8189} \quad (5)$$

Abb. 4 zeigt die Abhängigkeit der optimalen Packungsdichte vom Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis.

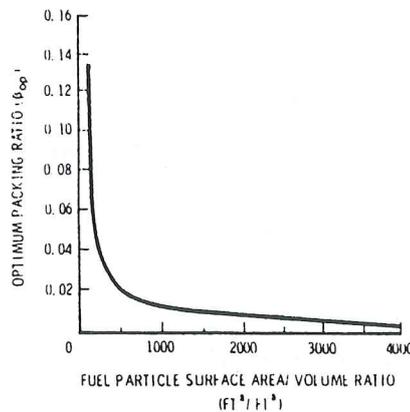


Abb. 4: Abhängigkeit der optimalen Packungsdichte vom Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 32)

Bei sehr kleinem Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis steigt die optimale Packungsdichte rasant an. D.h. grosse Partikel brennen besser, wenn sie höhere Packungsdichten aufweisen als die feinen Partikel. Die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit vom Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und der Packungsdichte ist in folgender Abbildung dargestellt.

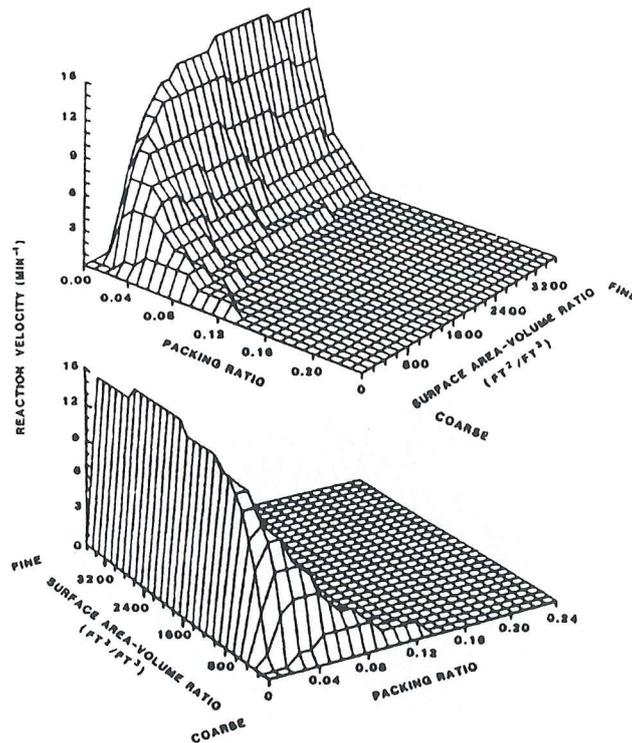


Abb. 5: Die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Packungsdichte und dem Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis. (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 33)

Die Abb. 5 verdeutlicht, dass die Reaktionsgeschwindigkeit rasant sinkt, wenn die Packungsdichte von ihrem Optimum abweicht.

Die Variable η_s der Formel (2) wird durch den effektiven Mineralgehalt (S_e) bestimmt und wird durch folgenden Term beschrieben.

$$\eta_s = 0.174S_e^{-0.19} \quad (6)$$

Im weiteren beeinflussen die Biomasse und die Feuchtigkeit des Brandgutes die Reaktionsintensität. Sie kommen in der Formel (2) als Variablen w_{n_i} und η_{M_i} vor. Die zahlreichen Formeln für die Terme w_{n_i} und η_{M_i} sind im Anhang A5 aufgeführt. Bei feuchtem Brandgut wird die Reaktionsintensität kleiner, weil die Energie gebraucht wird, um Wasser zu verdampfen.

- **Ausbreitungsfluss-Anteil (propagating flux ratio) [ξ] (dimensionslos)**

Der Ausbreitungsfluss-Anteil (ξ) gibt an, welcher Wärmeanteil der Reaktionsintensität die benachbarten Brandgutpartikel zur Entzündung bringt. Der Term ξ sieht folgendermassen aus:

$$\xi = \frac{1}{192 + 0.0791\sigma} e^{[(0.792 + 0.376\sqrt{\sigma})(\beta + 0.1)]} \quad (7)$$

Der Anteil des Ausbreitungsflusses liegt zwischen 0 und 1. Bei 0 erreicht keine Wärme das benachbarte Brandgut, ist $\xi = 1$ so wird die gesamte Wärme übergeben. Realistische Werte liegen nach BURGAN & ROTHERMEL (1984) zwischen 0.01 und 0.2. Wie die Packungsdichte (β) und das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (σ) den Ausbreitungsfluss-Anteil beeinflussen, zeigt die folgende Abbildung.

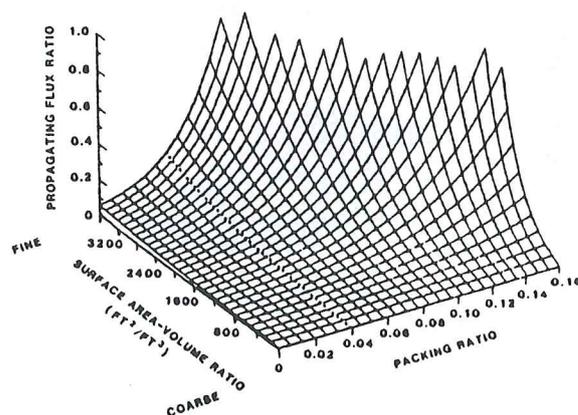


Abb. 6: Einfluss der Packungsdichte und des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses auf den Ausbreitungsfluss-Anteil. (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 36)

Hohe Packungsdichten und hohe Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisse führen zu einem hohen Ausbreitungsfluss-Anteil.

- **Windkoeffizient [ϕ_w] (dimensionslos)**

Der Wind spielt bei der Feuerausbreitung eine sehr wichtige Rolle. Sein Einfluss ist je nach Brandgut unterschiedlich. Durch den Wind kommt eine Flamme in direkten Kontakt mit der benachbarten Brandgutpartikel. Die Entzündung der benachbarten Brandgutpartikel hängt von seiner Größe ab. Je feiner die Partikel ist, desto schneller wird sie entzündet. Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis hat demzufolge einen Einfluss auf den Windkoeffizienten. Bei einer lockeren Brandgutschicht trägt der Wind mehr dazu bei, dass eine brennende Brandgutpartikel eine benachbarte entzündet, als bei einer dichten Brandgutschicht, wo benachbarte Partikel ohnehin im Bereich von brennenden liegen. Der Windkoeffizient wird durch das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (σ), die Packungsdichte (β), der Windgeschwindigkeit (U) und einigen empirisch ermittelten Konstanten beschrieben.

Für $U \leq 0.024I_R$ lautet der Windkoeffizient:

$$\Phi_w = C(196.85U)^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E} \quad (8)$$

Für $U > 0.024I_R$ lautet der Windkoeffizient:

$$\Phi_W = C(4.755J_R)^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E} \quad (9)$$

wobei:

$$C = 7.47e^{(-0.06919\sigma^{0.55})}$$

$$B = 0.013298\sigma^{0.54}$$

$$E = 0.715e^{(-0.0001094\sigma)}$$

Folgende Abbildungen zeigen den Einfluss der Packungsdichte der Windgeschwindigkeit und des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses auf den Koeffizienten.

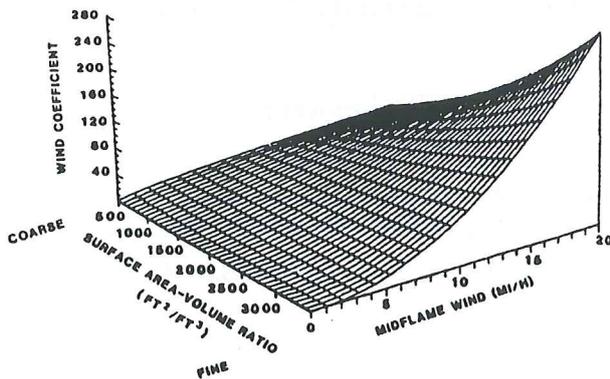


Abb. 7: Einfluss des Windes und des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses auf den Windkoeffizienten (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 37)

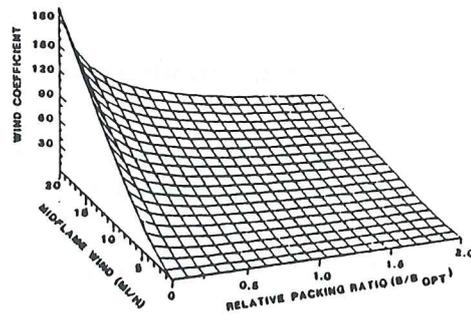


Abb. 8: Einfluss des Windes und der relativen Packungsdichte auf den Windkoeffizienten (BURGAN & ROTHERMEL, 1984, S. 38)

Die in Abb. 8 dargestellte relative Packungsdichte ist gleich der aktuellen Packungsdichte dividiert durch die optimale Packungsdichte. Sie ist bei optimaler Packungsdichte gleich 1.

Der Windkoeffizient wird erhöht durch:

- Hohe Windgeschwindigkeit
- Grosses Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis
- Geringe Packungsdichte.

- **Hangneigungskoeffizient $[\phi_s]$ (dimensionslos)**

Die Hangneigung beeinflusst eine Flamme in ähnlicher Weise wie der Wind. Durch die Hangneigung gelangt eine Flamme ebenfalls näher zum benachbarten Brandgut und entzündet dieses. Der Hangneigungskoeffizient wächst bei steigender Hangneigung. Wie beim Windkoeffizienten beeinflussen wieder das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und die Packungsdichte den Hangneigungskoeffizienten.

- **Dichte der Brandgutschicht (bulk density) $[\rho_b] = [\text{kg}/\text{m}^3]$**

Als Dichte der Brandgutschicht bezeichnet man das ofentrockene Gewicht des Brandgutes pro Volumen der Brandgutschicht. Die „Bulk density“ dient als Basis, um das potentiell

vorhandene Brandgut pro m^3 zu quantifizieren. Sie wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\rho_b = \frac{\sum_i^5 w_i}{\delta} \quad (10)$$

wobei:

w_i = Biomasse der Brandgutklasse i

δ = Tiefe der Brandgutschicht

Die Dichte der Brandgutschicht wird durch die totale Biomasse und die Tiefe der Brandgutschicht beeinflusst.

- **Effektiver Entzündungsanteil einer Partikel (*effective heating number*) [ε] (dimensionslos)**

Der effektive Entzündungsanteil einer Partikel gibt an, welcher Anteil einer Brandgutpartikel beim Durchgang der Flammenfront auf die Entzündungstemperatur erhitzt wird. Grosse brennende Hölzer können in der Mitte relativ zur Oberfläche noch kalt sein. Der Wert ε wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\varepsilon = e^{-\frac{452.76}{\sigma}} \quad (11)$$

Abb. 9 zeigt, dass bei feinen Brandgutpartikel der Hauptteil beim Durchgang eines Feuers entzündet wird.

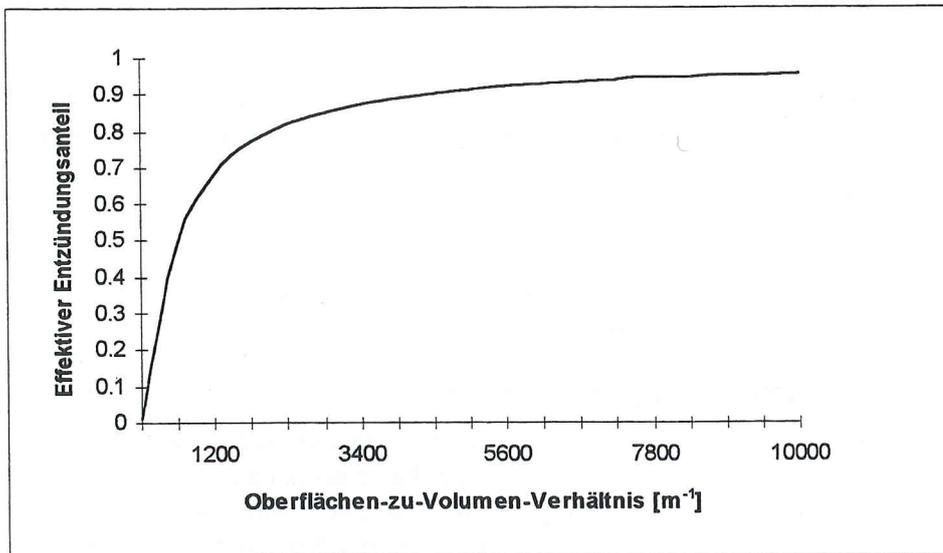


Abb. 9: Einfluss des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses auf den effektiven Entzündungsanteil einer Partikel

- **Entzündungswärme (*heat of preignition*) [Q_{ig}] = [kWh/kg]**

Die erforderliche Wärme, um feuchtes Holz zu entzünden, wird als Entzündungswärme (Q_{ig}) bezeichnet. In diesem Prozess muss zuerst das Wasser im Holz verdunsten, damit das

trockene Holz erhitzt werden kann. Der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes beeinflusst den Heizwert. Die Formel für die Entzündungswärme lautet:

$$Q_{igj} = 581.5 + 25.957M_{fj} \quad (12)$$

wobei:

M_{fj} = Brandgutfeuchtigkeit der Brandgutklasse j .

Das Produkt $\rho_b \epsilon$ quantifiziert, wieviel Gewicht Brandgut pro Kubikmeter entzündet werden kann. Die Entzündungswärme sagt, wieviel Wärme pro Kilogramm Brandgut es erfordert.

Einschränkungen des Rothermel-Modells:

1. Das Rothermelmodell beschränkt sich nur auf Bodenlauffeuer, d.h. als Brandgut kommt nur Material in Frage, das direkt auf dem Grund und in einer Schicht bis ca. zwei Meter Höhe liegt (*surface fuel*, Kap. 3.1).
2. Das Rothermelmodell ist gedacht, um Feuerverhalten vorherzusagen, welches durch feines Brandgut an der Feuerfront bestimmt wird. Nach BURGAN & ROTHERMEL (1984) soll nur feines Brandgut, welches für die Ausbreitung von Lauffeuer entscheidend ist, betrachtet werden. Holz, das lange nach dem Durchgang der Feuerfront noch brennt, soll ignoriert werden. Deshalb wird nur **totes Material mit Durchmesser kleiner 7.5 cm** und **lebendes Brandgut mit Durchmesser kleiner 0.6 cm** berücksichtigt.

3.3 Das BEHAVE-System

BEHAVE ist ein operationelles System von interaktiven Computer-Programmen, welche Vorhersagen des Feuerverhaltens und die Erstellung von Brandgutmodellen erlauben. Es besteht aus zwei Subsystemen: Das Brandgutmodell-Subsystem *FUEL* (BURGAN & ROTHERMEL, 1984) und das Feuerverhalten-Vorhersage-Subsystem *BURN* (ANDREWS, 1986 und ANDREWS & CHASE, 1989).

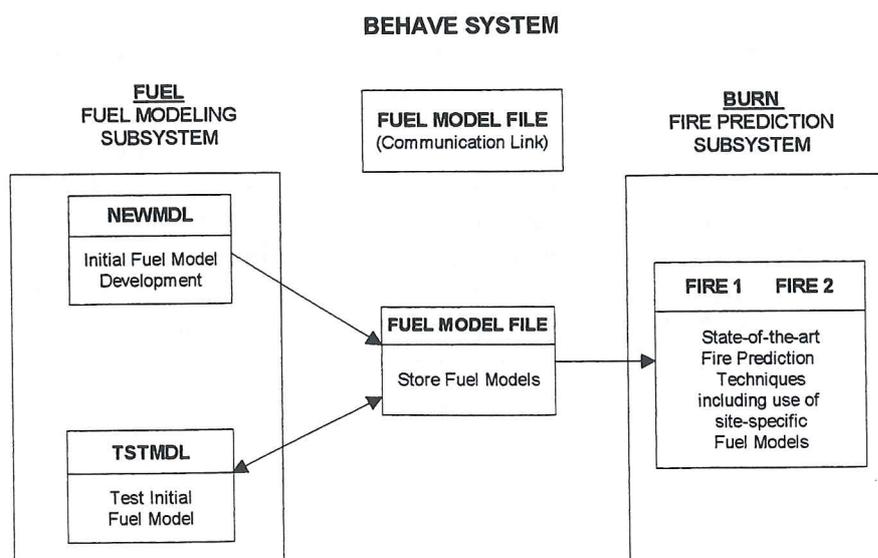


Abb. 10: Die Struktur des BEHAVE-Systems

Im BEHAVE-System ist das Rothermel-Feuerausbreitungsmodell implementiert.

FUEL bietet dem Benutzer eine systematische Methode an, Brandgutmodelle zu erstellen. Es können einerseits aus gesammelten Rohdaten Brandgutmodelle erstellt werden. Andererseits können auch Modelle getestet werden, d.h. es kann an den Brandgutparametern herumgeschraubt werden, bis realistische Ausbreitungsraten und Reaktionsintensitäten etc. eines Feuers aus den Berechnungen mit dem Rothermelmodell resultieren.

Das *BURN*-Subsystem wird verwendet, um das Verhalten von Feuer vorherzusagen. Das Programm besteht aus verschiedenen Modulen, welche die folgenden Ergebnisse liefern:

- Berechnung der Fläche und Perimeter eines Feuers, welches von einer Punktquelle entzündet wird.
- Berechnung des Ausmasses eines Feuers basiert auf Bekämpfungsmöglichkeiten. Daraus lässt sich auch berechnen, mit welchem Einsatz ein Feuer bekämpft werden muss.
- Berechnung von Feuerflug

Die mathematischen Formeln von BEHAVE wurden zudem in einen Taschenrechner implementiert. Mit Hilfe des Taschenrechners können Feuerwehrleute im Bekämpfungseinsatz von Waldbränden direkt die Ausgabegrößen des Rothermelmodells berechnen und damit anhand der Ergebnisse Massnahmen ergreifen.

In dieser Diplomarbeit wurden die Formeln für die Berechnung von Brandgutmodellen vom BEHAVE-Subsystem *FUEL* verwendet.

3.4 Methode der Brandguterhebung

Im Zentrum der Erhebungstechnik stand die Methode von BROWN et. al. (1982) für die Erhebung von Biomasse des Brandgutes auf dem Boden. Durch Messungen der Tiefe der Brandgutschicht und der Durchmesser oder Dicke einzelner Partikel für die Erhebung des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses wurde zudem die Methode erweitert.

Die Erhebung des Brandgutes im Malcantone erfolgte stichprobenweise (Kap. 4.2.1).

Ausgangslage bei jedem Stichprobenpunkt war die in Abb. 11 dargestellte Auslegung von vier rechteckigen Holzrahmen der Grösse 30 cm × 60 cm.

Vom Stichprobenpunkt aus wurde die Richtungslinie im Bereich Nord über Ost nach Süd (0° - 180°) mittels Würfeln zufällig bestimmt. Die vier rechteckigen Holzrahmen wurden gemäss Abb. 11 verteilt. In den Rechtecken wurden die Brandguttypen Holz, Streu und Kraut, innerhalb der dargestellten Kreise die Sträucher erhoben. Sollte ein Rechteck genau auf einen Baum oder Stein fallen, so wurde je nach Situation entweder das Rechteck etwas verschoben oder die ganze Auslegung an der Richtungslinie gespiegelt. Diese Massnahmen mussten vorgenommen werden, weil in Anbetracht der geringen Anzahl Stichproben versucht werden musste das Entstehen von Ausreissern möglichst zu verhindern.

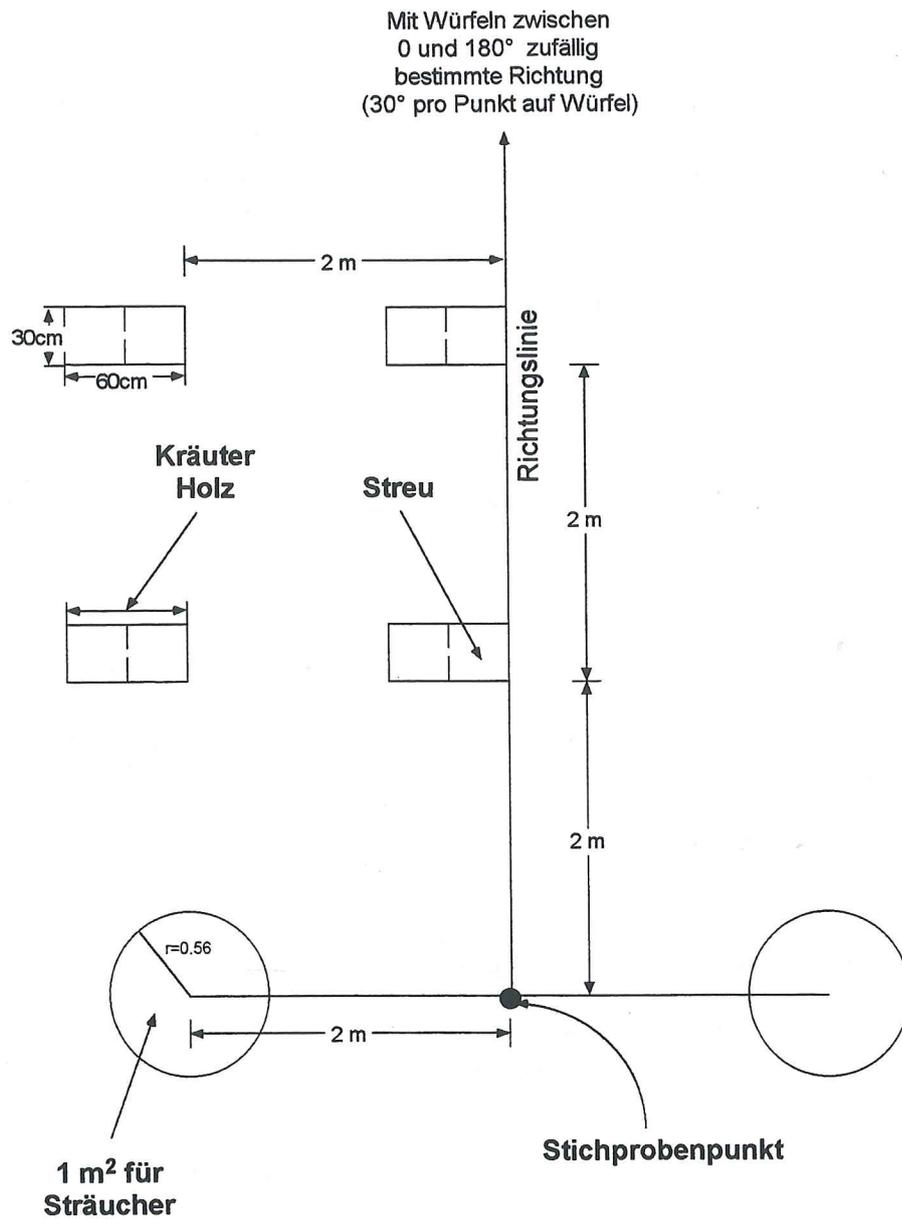


Abb. 11: Grundriss eines Stichprobenpunktes (nach BROWN et al., 1982)

Für die vier Brandguttypen wurden der Reihe nach folgende Variablen erhoben:

- Tiefe der Brandgutschicht
- Biomasse in den vier Brandgutklassen ($\varnothing < 0,6$ cm, $0,6 < \varnothing < 2,5$ cm, $2,5 < \varnothing < 7,5$ cm, lebend verholzt). Die Brandgutklasse lebend krautig wurde nicht erhoben, weil sie während der Datenaufnahme nicht vorhanden war.
- Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis für Durchmesser kleiner 0,6 cm
- Prozentual lebende Pflanzen (nur bei den Sträuchern)

a) Tiefe der Brandgutschicht

Das Feuerausbreitungsmodell von Rothermel ist sehr sensibel auf die Tiefe der Brandgutschicht. Kleine Änderungen der Tiefe führen sehr schnell zu anderen Modellresultaten. Es müssen deshalb möglichst genaue Werte erhoben werden. Nach BURGAN & ROTHERMEL (1984) kann mittels der Dichte der Brandgutschicht (*bulk density*) und der Biomasse auf die Tiefe der Brandgutschicht geschlossen werden. Die Beziehung lautet:

$$\text{Tiefe der Brandgutschicht [m]} = \frac{\text{Biomasse [kg / m}^2\text{]}}{\text{bulk density [kg / m}^3\text{]}}$$

Die Dichte der Brandgutschicht ist gleich dem ofengetrocknetem Gewicht von Brandgut pro m^3 .

In den USA existieren Fotoserien für *Bulk density*-Werte von verschiedenen dichten Gras- und Strauchflächen. Mittels den erhobenen Biomassen und den Dichtewerten aus den Tabellen kann die Tiefe der Brandgutschicht berechnet werden.

Für die Erhebungen im Tessin konnte nicht auf Fotoserien zurückgegriffen werden. Die Tiefe der Brandgutschicht musste deshalb gemessen werden. Zu diesem Zweck wurde in jeder Rechteckshälfte von Abb. 11 für die Brandguttypen Holz, Streu und Kraut die Höhe über dem Waldboden auf cm genau gemessen. Dabei wurden jeweils diejenigen Partikel gemessen, welche die höchsten Werte innerhalb der Rechteckshälfte aufwiesen.

Bei den Sträuchern wurde die Höhe jedes einzelnen Strauches gemessen.

b) Biomasse

Für die Erhebung der Biomasse wurden Proben von Holz, Streu und Kraut gesammelt. Die Proben wurden in luftdurchlässigen Papiersäcken aufbewahrt und in einem späteren Zeitpunkt getrocknet und gewogen. Mit welchen Techniken die Biomasse von Kraut, Streu, Holz und Strauch erhoben wurden, wird im folgenden erläutert:

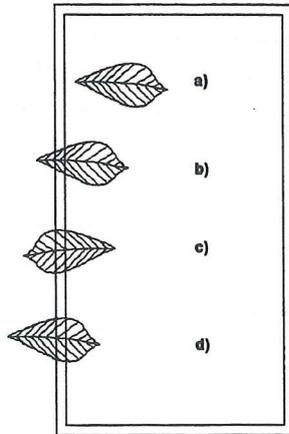
- **Kraut und Streu:**

BROWN et al. (1982) wenden die sog. relative Gewicht-Abschätz-Methode nach HUTCHINS und SCHMAUZ (1969) an. Diese Methode basiert auf der Annahme, dass es einfach ist, Gewichte untereinander zu vergleichen. Von den vier rechteckigen Parzellen wird eine Standardparzelle, welche schätzungsweise die grösste Masse an krautiger Vegetation und Streu hat, ausgewählt. Der Biomasseanteil der restlichen drei Parzellen wird als Prozentanteil derjenigen der Standardfläche abgeschätzt. Nachdem die Kräuter des Standardrechteckes geschnitten und gewogen, die Streu gesammelt und gewogen wird, kann auch das Gewicht der anderen drei Rechtecke bestimmt werden. Diese Methode erfordert jedoch viel Erfahrung im Erheben von Brandgut. Sie ist zudem sehr subjektiv. Um den erwähnten Nachteilen entgegen zu wirken, wurden in dieser Diplomarbeit die Kräuter und die Streu in allen vier Rechtecken gesammelt und anschliessend gewogen.

Die **Kräuter** wurden im ganzen Rechteck abgeschnitten und gesammelt. Es wurden nur Krautteile gesammelt, welche innerhalb der Rechtecke lagen. Teile ausserhalb der Abgrenzung wurden abgeschnitten.

Um nicht zu grosse Mengen von **Streu** sammeln zu müssen, wurde dieser Brandguttyp in der Hälfte jedes Rechteckes gesammelt. Es wurde konsequent immer in der Hälfte, die näher zur Richtungslinie lag, gesammelt. Die Streuschicht besteht aus unzersetzter organischer

Substanz und wird in der Bodenkunde als „L“ oder „Ol“ - Horizont bezeichnet (FITZE, 1990). Schon teilweise vermoderte Blätter werden nicht mehr dazu gezählt. Damit ein Blatt gesammelt wurde, musste es eine eindeutige Blattform aufweisen. Um zu entscheiden ob ein Blatt im Grenzbereich der Rechteckshälfte nun innerhalb oder ausserhalb liegt, wurde folgende Regel aufgestellt:



1. Sobald deutlich mehr als die Hälfte eines Blattes auf der Innenseite des Rechtecks liegt, wird es dazu gezählt und gesammelt (a) und b)).
2. Wird die Blattfläche durch die Begrenzung des Rechtecks halbiert, sodass eine eindeutige Zuordnung zweifelhaft ist, so wird das Blatt dorthin gezählt, wo der hintere Teil des Blattes hinschaut. Das Blatt c) kommt nach innen, das Blatt d) nach aussen.

Abb. 12: Entscheidungskriterien für das Sammeln von Blättern (Bsp. Kastanienblatt)

- **Herumliegendes Holz**

In jedem Rechteck wurde herumliegendes Holz mit Durchmesser kleiner 0.6 cm gesammelt. Längere Zweige, welche teilweise in ein Rechteck zu liegen kamen, wurden an den Begrenzungsrändern abgeschnitten. Dickere Exemplare wurden liegen gelassen, in der Hoffnung, mit der anschliessend beschriebenen Transsekt-Methode Näherungswerte zu erhalten.

BROWN (1974) entwickelte die sog. **Transsekt-Methode**, um die Biomasse von herumliegendem Holz abzuschätzen. Dadurch soll das Sammeln und Wägen von Hölzern erspart werden. Bei der Transsekt-Methode stellt man sich entlang der Richtungslinie von Abb. 11 eine Scheibe vor, welche guillotineartig die herumliegenden Hölzer schneidet. Die theoretisch entstandenen Schnittflächen der drei Durchmesserklassen <0.6 cm, $0.6-2.5$ cm, $2.5-7.5$ cm werden gezählt. Aus der Anzahl der Schnittflächen kann die Biomasse von herumliegendem Holz in den erwähnten Durchmesserklassen abgeschätzt werden. Die Berechnung erfolgt durch folgende Formeln:

$$\text{Biomasse } \varnothing < 0.6 \text{ cm:} \quad m = 0.030nc \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

$$\text{Biomasse } 0.6 < \varnothing < 2.5 \text{ cm:} \quad m = 0.587nc \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

$$\text{Biomasse } 2.5 < \varnothing < 7.5 \text{ cm:} \quad m = 3.122nc \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

wobei:

n = Anzahl der gezählten Schnittflächen

c = Hangneigungskoeffizient

Parallel zum Sammeln der Hölzer in den Rechtecken wurden auch die Durchmesser <0.6 cm mit der Transsekt-Methode erhoben, in der Hoffnung ähnliche Ergebnisse zu erhalten. (vgl. Kap. 4.3)

- **Sträucher**

Die Sträucher wurden in den beiden Kreisen (Abb. 11) erhoben. BROWN (1976) stellte fest, dass zwischen dem Stammdurchmesser und der Biomasse eines Strauches ein enger Zusammenhang besteht. Er entwickelte für 25 amerikanische Straucharten Umrechnungstabellen, um aus bekannten Stammdurchmessern die Biomasse dieser Straucharten abzuschätzen. Es entstanden Richtwerte für die Stammdurchmesserklassen 0-0.5 cm, 0.5-1 cm, 1-1.5 cm, 1.5-2 cm, 2-3 cm, 3-5 cm, >5 cm. Da im Tessin noch keine Richtwerte zur Abschätzung der Biomasse existieren, mussten Vergleiche von amerikanischen Pflanzen mit Pflanzen in den Wäldern des Malcantone gemacht werden. Dank Vorschlägen von Prof. F. Klötzli¹ konnten einige Vergleiche gemacht werden (Tab. 4, Kap. 4.3). Die amerikanischen Tabellenwerte für ähnliche Straucharten wurden im Tessin übernommen. Für den Ginster (*Sarothamnus scoparium*) mussten durch Abschneiden und Wägen einzelner Sträucher eigene Werte bestimmt werden (Kap. 4.3).

Für die Erhebung der Strauchmasse wurde gemäss Abb. 11 in den beiden Kreisen der Stammdurchmesser für jede Strauchart gemessen.

c) Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis

Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis wurde nur für Brandgut mit Durchmesser <0.6 cm erhoben. Für jede Brandgutpartikel lässt sich auf einfache Art das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis messen. Die Partikel gelten entweder als rund oder als flach. Dabei gilt (BURGAN & ROTHERMEL 1984):

Flache Partikel (Blätter etc.):	Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis = $2/\text{Dicke}$
Runde Partikel (Gräser, Hölzer etc.):	Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis = $4/\text{Durchmesser}$

Um Werte für das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis zu erhalten, wurde beim Wägen von Holz, Streu und Kraut zusätzlich von ausgewählten Partikeln je nach Beschaffenheit, entweder die Dicke oder der Durchmesser mittels einer Schublehre gemessen.

Bei den Sträuchern wurden Durchmesser an verschiedenen Stellen von oben bis unten mittels einer Schublehre gemessen. Dabei wurden nur Zweige mit einem Durchmesser bis 0.6 cm beachtet, da das zu erhebende Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis ebenfalls für diese Brandgutklasse gilt.

d) Prozentual lebende Pflanzen (nur Sträucher)

Von jedem Strauch wurde bestimmt, ob er lebend oder tot ist. Daraus konnte von jeder Stichprobe der prozentuale Anteil lebender Sträucher bestimmt werden.

¹ Prof. Klötzli, Frank; Geobotanisches Institut der ETH Zürich

3.5 Kartengrundlagen

Um ein optimales Stichprobenverfahren durchführen zu können, muss versucht werden, alle vorhandenen und nützlichen Informationen miteinzubeziehen. Dies können z.B. Luftbilder, Satellitenbilder oder Karten sein. Für diese Arbeit musste nach Grundlagedaten gesucht werden, welche die Brandgutsituation in den Wäldern möglichst gut differenziert. Die besten zur Verfügung stehenden Grundlagen neuerer Zeit für die Planung der Datenerhebung waren eine Waldbestandeskarte und eine Vegetationskarte des Malcantone, beide im Massstab 1:25000. Beide Karten wurden vom Ingenieur- und Planungsbüro Francesco Ryf in Taverna (TI) hergestellt.

Die „*carta dei popolamenti forestali*“ aus dem Jahre 1992 ist eine Waldbestandeskarte, in der die verschiedenen Nutzungsarten der Wälder kartiert sind (z.B. Hochwald, Niederwald, Selven, etc.). In der „*carta della vegetazione arborea*“, ebenfalls aus dem Jahre 1992, sind die verschiedenen Baumarten kartiert. Hier widerspiegelt sich die Topographie im Vorkommen der Baumarten. Während in der gebirgigen Region des Malcantone vor allem Buchen- und Laub/Nadelmischwälder vorkommen, wird das untere und mittlere Malcantone durch Kastanienwälder dominiert.

Abb. 13 und Abb. 14 zeigen den Inhalt dieser beiden Karten.

Kartenaufbereitung für das GIS (ARC/INFO)

Um eine Stichprobenplanung mit einem GIS (ARC/INFO) durchführen zu können, mussten die analogen Karten, welche als Grundlagedaten dienten, in eine digitale Form gebracht werden. Die Flächenumrisse (*Perimeter*) der beiden Karten stammen von einem Schwarz-weiss-Original auf Deckpause. Das Original wurde vom Ingenieur- und Planungsbüro Francesco Ryf freundlicherweise für die Digitalisierung zu Verfügung gestellt.

Die Digitalisierung der Originalkarte konnte durch scannen erleichtert werden. Dabei mussten verschiedene Schritte vorgenommen werden.

- **Scannen der Originalkarte und Erstellung eines TIFF-Files:**

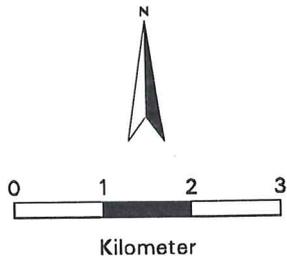
Die Originalkarte konnte freundlicherweise auf einem Trommelscanner Optronics 5040 am Institut für Kartographie der ETH Zürich unter Spezialistenbetreuung eingescannt werden.

Für eine automatische Digitalisierung sollte eine saubere Vorlage ohne zusätzliche Elemente vorliegen. In der mit Tusche gezeichneten Deckpause war diese Bedingung erfüllt. Es waren jedoch noch verschiedene Baumsymbole eingezeichnet, welche auch digitalisiert wurden und später wieder wegeditiert werden mussten. Zudem war auf der Rückseite der Deckpause ein spiegelverkehrter Schwarz-weiss-Auszug aus der Landeskarte gedruckt, welcher beim Betrachten des Originals als Hintergrund wirkte. Die mattwirkende Landeskarte wirkte als Hintergrundrauschen, welches mit einer Blendenöffnung von 100 µm (Micron) eliminiert werden konnte.

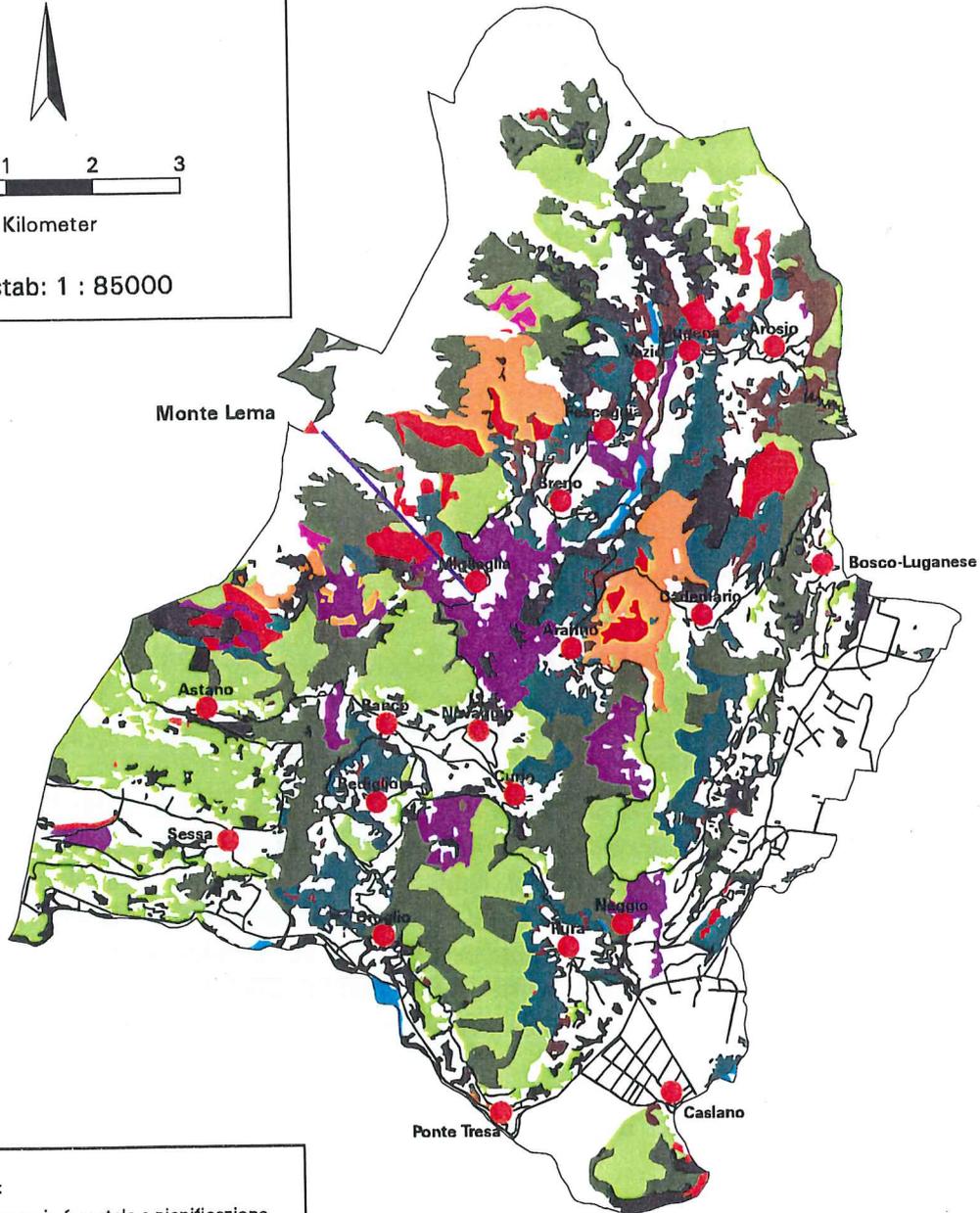
- **Umwandlung des TIFF-Files in einen ARC/INFO-Rasterdatensatz (Grid)**

Waldbestandeskarte des Malcantone

- | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Produktiver Niederwald |  Hochwald |  Pionierwald |  Alte Pflanzungen |
|  Hangniederwald |  Kastanien-Selven |  Buchenjungwald |  Strassen |
|  Mittelwald |  Auenwald |  Junge Pflanzungen |  Seilbahn |



Masstab: 1 : 85000

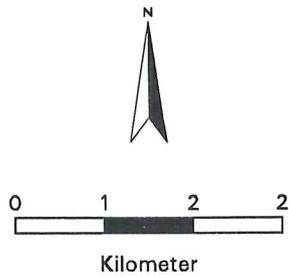


Datenquelle:
 Studio d'ingegneria forestale e pianificazione
 Francesco Ryf, 6807 Taverna

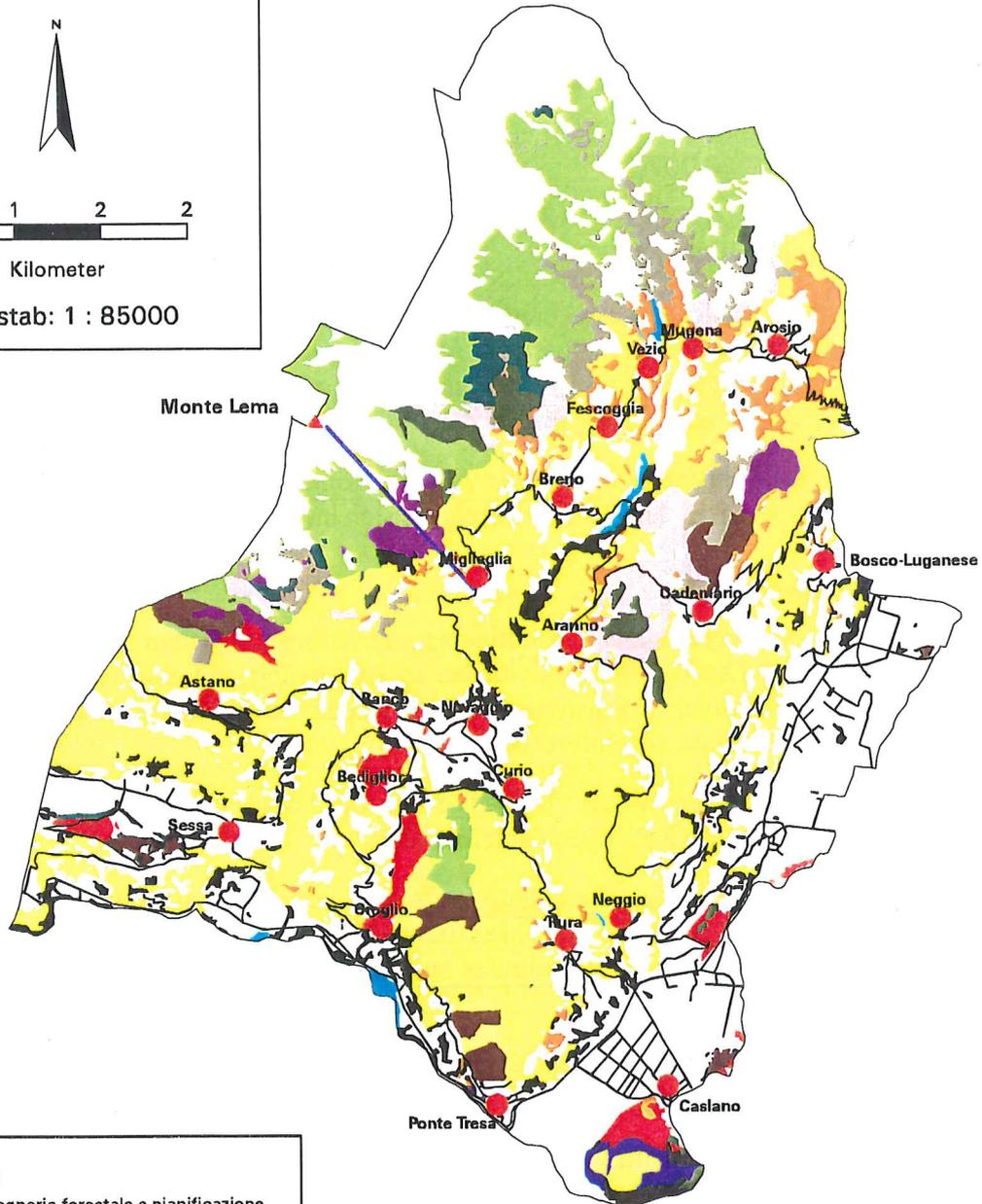
Abb. 13: Waldbestandeskarte des Malcantone (carta dei popolamenti forestali)

Waldvegetationskarte des Malcantone

 Kastanien-Selven	 Birke	 Pionierwald	 Reiner Nadelwald
 Kastanie	 Auenwald	 Reiner Laubwald	 Strassen
 Buche	 Schutzwald	 Mischwald (Laub dominant)	 Seilbahn
 Eiche	 Gemischter Laubwald	 Mischwald (Nadel dominant)	



Masstab: 1 : 85000



Datenquelle:
Studio d'ingegneria forestale e pianificazione
Francesco Ryf, 6807 Taverna

Abb. 14: Waldvegetationskarte des Malcantone (carta della vegetazione arborea)

- **Georeferenzierung des Grid**

Damit das Grid eine geographische Zuordnung erhält, d.h. jeder Zelle Landeskoordinaten zugewiesen werden können, musste es noch georeferenziert werden. Dazu wurden zehn markante Punkte, die weit auseinander liegen, von der Originaldeckpause von Hand digitalisiert. Die digitalisierten Punkte wurden den entsprechenden Zellen im Grid zugeordnet und anschliessend georeferenziert.

- **Vektorisierung des Grid in eine ARC/INFO-Coverage**

Das georeferenzierte Grid wurde in einen ARC/INFO-Vektordatensatz (Polygoncoverage) umgewandelt.

- **Editieren und Attributieren der Polygon-Coverage**

Die mitdigitalisierten Baumsymbole mussten gelöscht werden. Jede Fläche wurde mit der entsprechenden Information aus den Karten attribuiert.

3.6 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Diplomarbeit liegt mitten im Malcantone am Fusse des Monte Lema. Es ist in Abb. 15 dargestellt.

Die Gründe für die Auswahl dieses Testgebietes sind einmal die unterschiedlich vorhandenen Waldbestände und die relativ gute Erreichbarkeit. Andererseits wird die Region um Novaggio öfters von Waldbränden heimgesucht, und zudem sind am Monte Lema und am Motto Croce zwei ehemalige, grosse Waldbrandflächen, die für die Untersuchungen von Interesse sind.

Die meisten Brände im Malcantone sind kleinerer Art und können von der Feuerwehr in höchstens einem Tag gelöscht werden. Alle 10 Jahre ereignet sich im Durchschnitt ein Grossbrand.

Untersuchungsflächen

Für die Erhebungen wurden verschiedene Waldflächen mit unterschiedlichen Vegetations- und Waldbeständen ausgesucht. Die Waldflächen wurden so ausgewählt, um einerseits repräsentative Resultate für das Malcantone zu erhalten und andererseits, um die Erhebungsmethode zu testen. Es waren folgende Flächen von Interesse:

1. Verschieden genutzte Kastanienwälder: Es stellte sich die Frage, ob sich das Brandgut in unterschiedlicher Nutzung von Kastanienwäldern ändert.
2. Ehemalige Waldbrandflächen: Das dominante Auftreten von Farn und Ginster auf abgebrannten Flächen führt in den Winterhalbjahren zu viel Brandgut und zu einer potentiellen Waldbrandgefahr. Die Quantität des Brandgutes auf diesen Flächen zu erfassen, ist von besonderem Interesse.
3. Nadelwälder: Als Kontrast zu den Laubwäldern wurde in einer relativ heterogenen aufgeforsteten Nadelwaldfläche Brandgut erhoben.

Die Auswahl der oben erwähnten Untersuchungsflächen war durch folgende Fragen begleitet:

- a) Können diese optisch unterschiedlichen Flächen durch die Erhebungsergebnisse differenziert werden?
- b) Hängt das Vorkommen von Brandgut mit der Baumart und dem Waldbestand zusammen?

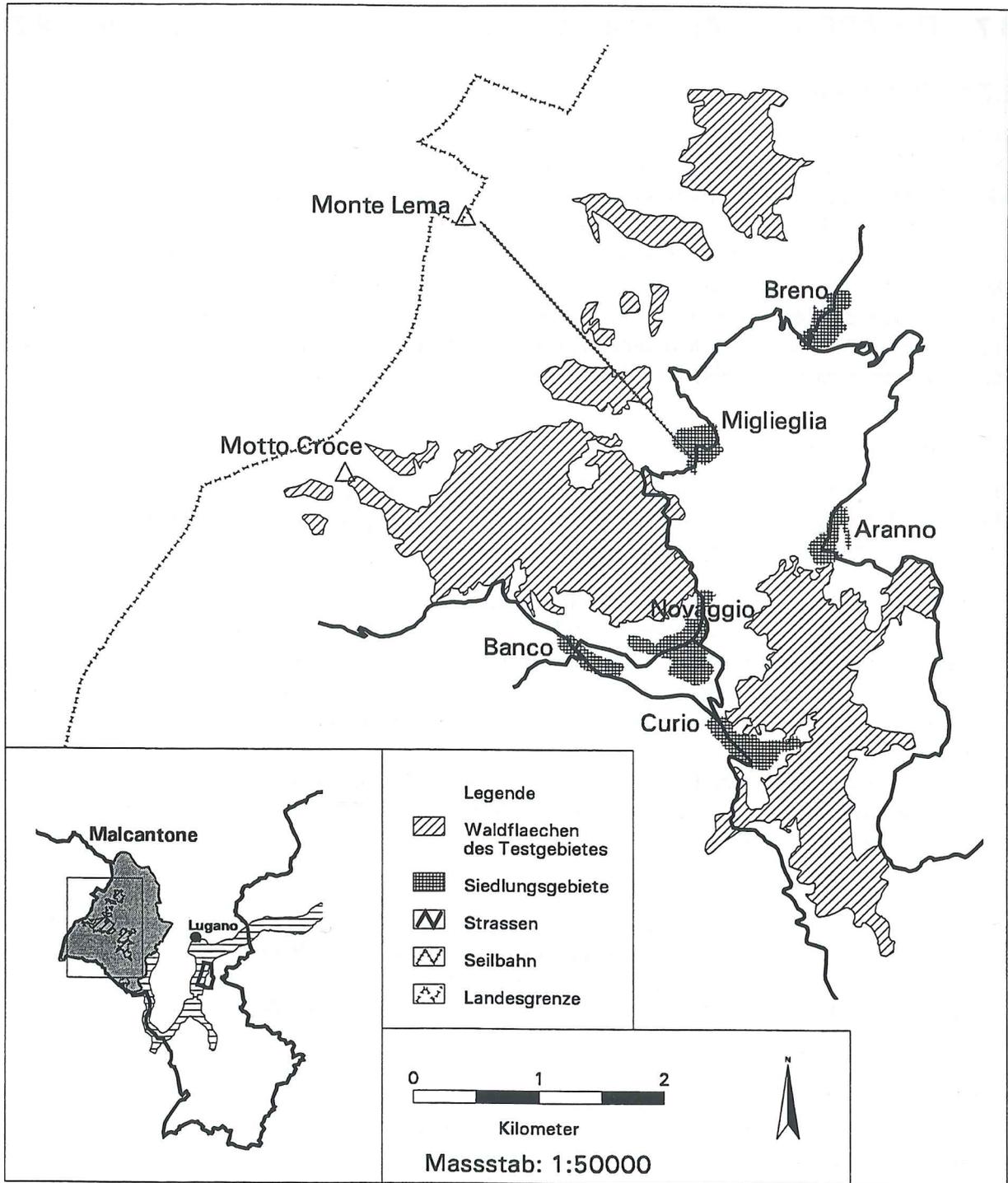


Abb. 15: Untersuchungsgebiet (schräg schraffierte Flächen) der Datenerhebung

3.7 Die ARC/INFO-Applikation *Sparks*

3.7.1 Einführung

SCHÖNING (1996) entwickelte die Applikation *Sparks* für die Waldbrandmodellierung mit GIS. Die Grundlage von *Sparks* bildet die umfangreiche GIS-Software ARC/INFO. ARC/INFO erlaubt die Bearbeitung raumbezogener Daten in Vektor- wie auch Rasterform. Vektordaten beschreiben die exakte Geometrie von Objekten und sind auf Punkte, Linien und Flächen reduziert. Rasterdaten kennen keine Unterscheidung in Punkte, Linien und Flächen. Das geometrische Grundelement sind Rasterzellen mit einer bestimmten Maschenweite. Daraus werden Eigenschaften von Objekten dargestellt. Die geometrische Genauigkeit ist beschränkt und abhängig von der Maschenweite. Dafür eignen sich Rasterdaten für Simulationen und Modellierungen im Raum. *Sparks* wurde im ARC/INFO-Rastermodul GRID entwickelt.

3.7.2 Funktionen

SCHÖNING (1996) entwickelte mit AML (Arc Macro Language) eine umfassende Menüoberfläche für eine einfache Bedienung von *Sparks*. Die Applikation umfasst diverse Funktionen, von denen im folgenden einige kurz erläutert werden.

- **Modellierung des potentiellen Brandverhaltens**

In *Sparks* wurde das Rothermel-Modell implementiert. Dabei mussten die für amerikanischen Einheiten vorliegenden Gleichungen des Rothermelmodells in metrische Einheiten konvertiert werden. Somit mussten auch die Eingabegrößen umgewandelt werden. Der Brandgutparameter Biomasse z.B. wurde von lb/acre (Pfund pro amerik. Are) in kg/m^2 umgewandelt.

Mit *Sparks* kann das Brandverhalten von Lauffeuern räumlich berechnet werden. Es werden für jede Zelle eines Rasterdatensatzes (Grid) aus den Eingabegrößen die Ergebnisse des Rothermelmodells berechnet.

- **Simulation der Brandausbreitung**

Aus den Modellberechnungen des Brandverhaltens können mit *Sparks* Ausbreitungssimulationen von einer Quelle aus durchgeführt werden. Mit der GRID-Funktion *pathdistance* wird die entsprechende Zeit akkumuliert, die das Feuer braucht, um eine Längeneinheit zurückzulegen. Es wird ein Rasterdatensatz (Grid) für die Zeit berechnet, nach der jede Zelle von Feuer erreicht wird.

- **Bearbeitung der Brandgutdaten**

In *Sparks* existiert eine Menüoberfläche für die Bearbeitung von Brandgutmodellen, sowie die Zuweisung derselben zu Vegetationseinheiten oder Straten.

- **Sensitivitäts und Unsicherheitsanalyse**

Für Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen wurde in *Sparks* eine Monte-Carlo-Simulation implementiert. Damit kann die Wichtigkeit und der Einfluss der Eingabegröße auf die Resultate des Rothermelmodells abgeschätzt werden. Es können somit Prioritäten für die zu erhebenden Daten festgelegt werden, wie auch Eingabegrößen, die einen geringen Einfluss auf die Modellresultate ausüben, konstant gesetzt werden.

Wie Brandgutmodelle in *Sparks* implementiert werden, wird in Kap 6.1 kurz beschrieben.

3.8 Statistische Analysemethoden

Im Kap. 4.5 (Datenanalyse) wurden verschiedene statistische Untersuchungen durchgeführt. Die Grundlagen dazu werden im folgenden beschrieben. Um die im Feld erhobenen Daten zu analysieren, wurde eine Clusteranalyse, einerseits zur Erkennung von Ausreißern und andererseits zur Gruppierung ähnlicher Punkte angewendet. Für die Prüfung von Gruppenunterschieden wurde die Diskriminanzanalyse beigezogen.

3.8.1 Clusteranalyse

Unter dem Begriff Clusteranalyse versteht man die Verfahren der Gruppenbildung. In dieser Arbeit wurde sie angewendet, um Ausreißer der Stichprobenpunkte zu erkennen und um neue Gruppierungen zu bilden. Die Clusteranalyse besteht im wesentlichen aus zwei Schritten: (BACKHAUS et al., 1994)

a) Wahl des Proximitätsmass

Von jeweils zwei Stichprobenpunkten wird ein Zahlenwert berechnet, der die Ähnlichkeit der Punkte hinsichtlich der beschreibenden Variablen bestimmt. Einen solchen Zahlenwert bezeichnet man als Distanz- oder Ähnlichkeitsmass. Die Ähnlichkeit zwischen zwei Objekten wird mit dem Ähnlichkeitsmass ausgedrückt. Je grösser der Wert, desto ähnlicher sind sich zwei Objekte. Distanzmasse messen die Unähnlichkeit zwischen zwei Objekten: Je grösser die Distanz, desto unähnlicher sind sich die Objekte (BACKHAUS et al., 1994).

In der vorliegenden Arbeit wurde mit einem Distanzmass gearbeitet und zwar mit der euklidischen Distanz.

$$djk = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_{ik})^2} = \text{Euklidische Distanz} \quad (13)$$

mit: djk = Distanz der Punkte k und j
 x_{ij} ; x_{ik} = Wert der Variablen i bei Punkt j und k

b) Wahl der Fusionierungsalgorithmen

Die gewonnene Distanzmatrix bildet den Ausgangspunkt zur Fusionierung der ähnlichsten Punkte. BACKHAUS (1994) teilt die Fusionierungsalgorithmen in vier Hauptklassen ein (Abb. 16):

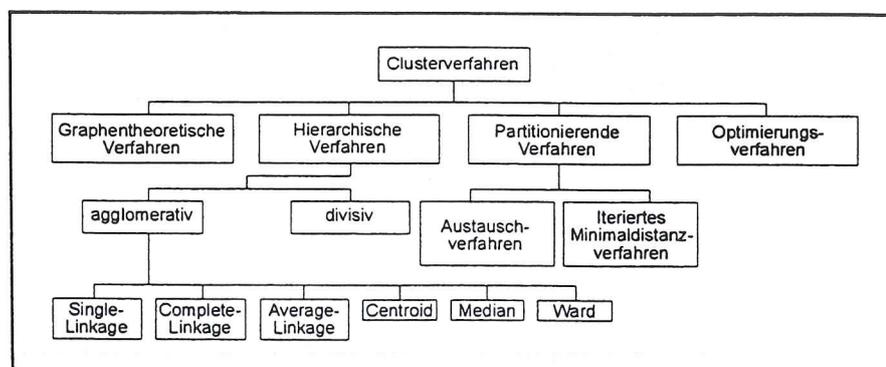


Abb. 16: Überblick über ausgewählte Cluster-Algorithmen (BACKHAUS 1994)

In dieser Arbeit wurde aus folgenden Gründen ein agglomerativ, hierarchisches Verfahren gewählt:

- guter Gesamtüberblick über die Ähnlichkeiten aller Punkte
- gute Erkennung von Ausreißern
- die Anzahl Cluster wird nicht zum Voraus festgelegt

Folgende Abbildung verdeutlicht den Ablauf eines agglomerativ hierarchischen Verfahrens (BACKHAUS 1994):

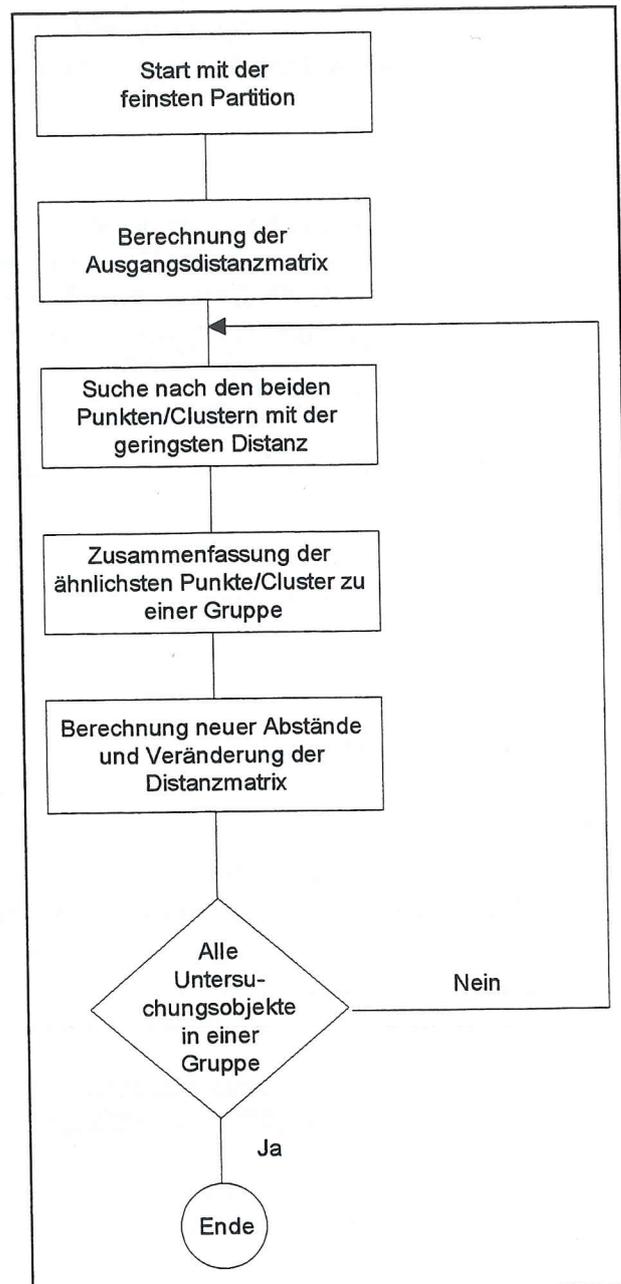


Abb. 17: Ablaufschema der agglomerativen hierarchischen Clusterverfahren (BACHKHAUS, 1994)

Auf der Suche nach der geringsten Distanz zwischen zwei Cluster gibt es verschiedene Vorgehensweisen, die Distanz zu ermitteln.

Für die Analysen in dieser Diplomarbeit wurde das *Single-Linkage*- und das *Ward-Verfahren* angewendet, welche im folgenden näher vorgestellt werden.

Single-Linkage-Verfahren

Das *Single-Linkage-Verfahren* oder *Nearest-Neighbour-Verfahren* berechnet die Distanz zwischen den am nächsten gelegenen Punkten zweier Cluster. Dies hat den Vorteil, dass Ausreisser erkannt werden. Auf der anderen Seite neigt dieses Verfahren zu Kettenbildung und dadurch zu grossen Gruppen. Schwierig zu trennende Gruppen werden nicht aufgedeckt. An den Felddaten wurde zuerst das Single-Linkage-Verfahren angewendet, um Ausreisser zu erkennen.

Ward- oder Minimum-Varianz-Verfahren

Dieses Verfahren unterscheidet sich von den vorhergehenden dadurch, dass es Gruppen zusammenfasst, die ein vorgegebenes Heterogenitätsmass am wenigsten erhöhen. Ziel ist es, die Varianz der Punkte in einer Gruppe möglichst gering zu halten und somit homogene Cluster zu erhalten. Zu Beginn des Clusterprozesses werden vor allem kleine Cluster gebildet. Später werden kleine mit grossen Clustern zusammengefügt, und es entstehen etwa gleich grosse Gruppen.

Das Varianzkriterium für eine Gruppe g errechnet sich wie folgt (BACKHAUS et al., 1994):

$$V_g = \sum_{k=1}^{K_g} \sum_{j=1}^J (x_{kj} - \bar{x}_{jg})^2 \quad (14)$$

mit:

x_{kj} : Beobachtungswert der Variablen j ($j = 1, \dots, J$) bei Objekt k (für alle Objekte $i = 1, \dots, K_g$ in Gruppe g)

\bar{x}_{jg} : Mittelwert über die Beobachtungswerte der Variablen j in Gruppe g

BERGS (1981) hat gezeigt, dass das Ward-Verfahren als sehr guter Fusionierungsalgorithmus angesehen werden kann, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

- Das Distanzmass als inhaltlich sinnvolles Kriterium zur Ähnlichkeitsbestimmung erscheint.
- Alle Variablen auf metrischem Skalenniveau gemessen wurden.
- Keine Ausreisser vorhanden sind bzw. diese vorher eliminiert wurden.
- Die Variablen unkorreliert sind.

3.8.2 Diskriminanzanalyse

Die Diskriminanzanalyse ist ein multivariates Verfahren zur Analyse von Gruppenunterschieden. Es muss für jede Merkmalsausprägung (in dieser Arbeit Stichprobenpunkte) eine Grup-

penzugehörigkeit vorhanden sein. Diese kann z.B. vorgängig mittels einer Clusteranalyse erzeugt werden.

Um eine Diskriminanzanalyse durchführen zu können, müssen die Variablen der Objekte (unabhängige Variablen) metrisch skaliert sein. Die Gruppenzugehörigkeit lässt sich durch eine nominal skalierte Variable (abhängige Variable) ausdrücken (BACKHAUS et al., 1994).

Nach BACKHAUS et al. (1994) lässt sich die Durchführung einer Diskriminanzanalyse in folgende Teilschritte zerlegen.

- a) Definition der Gruppen
- b) Formulierung der Diskriminanzfunktion
- c) Schätzung der Diskriminanzfunktion
- d) Prüfung der Diskriminanzfunktion
- e) Prüfung der Klassifikation

a) Definition der Gruppen

Die Anzahl der Gruppen sollte nicht grösser sein als die Anzahl der Merkmalsvariablen.

b) Formulierung der Diskriminanzfunktion

Die Diskriminanzfunktion versucht, zwei Gruppen optimal zu trennen und hat im allgemeinen folgende Form:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_jX_j \quad (15)$$

mit:

- Y = Diskriminanzvariable
- X_j = Merkmalsvariable j (j = 1, 2, ... ,j)
- b_j = Diskriminanzkoeffizient für Merkmalsvariable j
- b₀ = konstantes Glied

Die Anzahl der Diskriminanzfunktionen ist gleich der Anzahl Gruppen minus 1.

Abb. 18 stellt im vereinfachten *Zwei-Gruppen-Zwei-Variablen-Fall* graphisch die Bedeutung der Diskriminanzfunktion dar.

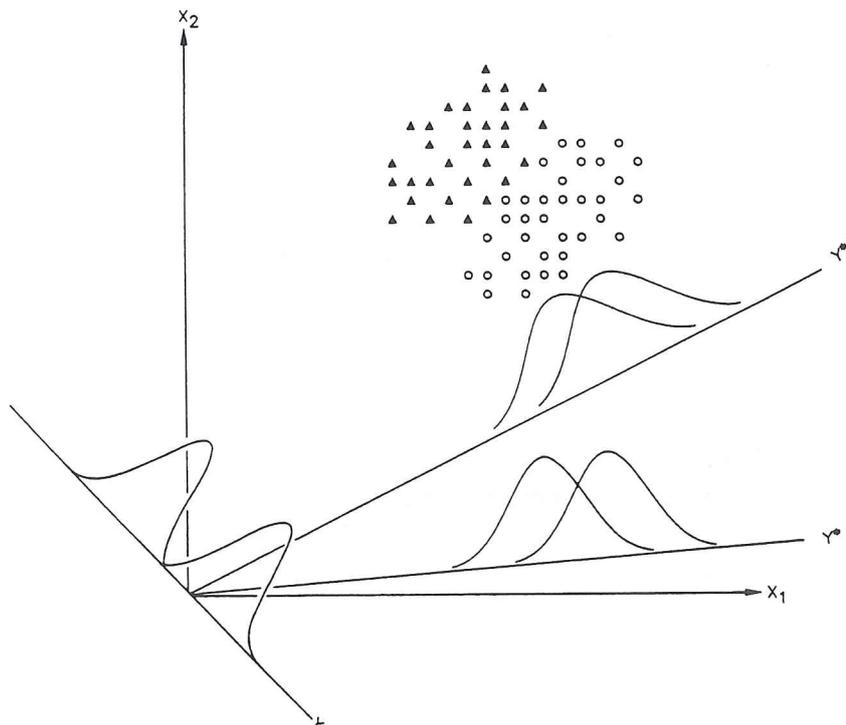


Abb. 18: Trennung zweier Gruppen durch verschiedene Diskriminanzachsen
(BAHRENBURG et al., 1992, S. 321)

Die Achsen Y^* und Y^{**} weisen wesentlich stärkere Überschneidungen auf als Y und trennen die beiden Gruppen nicht optimal. Für eine optimale Trennung muss die Diskriminanzachse so gelegt werden, dass der Überschneidungsbereich der Diskriminanzwerte (einzelne Punkte) minimiert wird. Dies trifft für die Gerade Y zu.

c) Schätzung der Diskriminanzfunktion

Ein Mass für die Unterschiedlichkeit ist die Distanz der Gruppenzentren. Je weiter die Zentren auseinander sind, desto besser lassen sich die Gruppen trennen. Dies jedoch nur wenn die Gruppen nicht zu stark streuen. Wenn die Streuung der Gruppen mit berücksichtigt wird, erhält man ein besseres Mass für die Unterschiedlichkeit. Damit lässt sich folgendes Distanzmass für zwei Gruppen der gleichen Grösse und mit der gleichen Streuung bilden:

$$\frac{\bar{Y}_A - \bar{Y}_B}{s} \quad (16)$$

wobei:

\bar{Y}_A ; \bar{Y}_B : Gruppenzentren von A und B

s: Streuung um die Gruppenzentren

Für unterschiedlicher Streuung, Grösse und Anzahl der Gruppen steht das Diskriminanzkriterium Γ , um die Gruppen zu trennen.

$$\Gamma = \frac{\text{Streuung zwischen den Gruppen}}{\text{Streuung in den Gruppen}} = \frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{nicht erklärte Streuung}}$$

Die Koeffizienten b_j der Formel (14) in der Diskriminanzfunktion müssen so gewählt werden, dass das Diskriminanzkriterium Γ maximal wird. Der Maximalwert des Diskriminanzkriteriums wird als *Eigenwert* bezeichnet.

$$\gamma = \text{Max} \{ \Gamma \}$$

Für jede Diskriminanzfunktion erhält man einen Eigenwert, wobei der Eigenwert der ersten Diskriminanzfunktion immer grösser ist als derjenige der zweiten, derjenige der zweiten Funktion grösser als derjenige der dritten usw..

d) Prüfung der Diskriminanzfunktion

In diesem Schritt geht es darum, die Trennkraft (Güte) einer Diskriminanzfunktion für die Unterschiedlichkeit zweier Gruppen zu messen. Der Eigenwert (Maximalwert des Diskriminanzkriteriums) bildet ein Mass für die Trennkraft der Diskriminanzfunktion. Der Nachteil ist, dass er nicht auf Werte zwischen null und eins normiert ist. Folgende Quotienten schaffen hier Abhilfe:

$$\frac{\gamma}{1+\gamma} = \frac{\text{erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}}$$

$$\frac{1}{1+\gamma} = \frac{\text{nicht erklärte Streuung}}{\text{Gesamtstreuung}}$$

Als Gütemass für die Trennkraft einer Diskriminanzfunktion wird gewöhnlich der *kanonische Korrelationskoeffizient* (c) bezeichnet.

$$c = \sqrt{\frac{\gamma}{1+\gamma}} \quad (17)$$

Je grösser c (max. = 1), desto besser trennt die Diskriminanzfunktion.

Zur Prüfung der Diskriminanz ist *Wilks' Lambda* (Λ) das gebräuchlichste Kriterium. Für den „Zwei-Gruppen-Fall“ gilt:

$$\Lambda = \frac{1}{1+\gamma} \quad (18)$$

Im „Mehr-Gruppen-Fall“ werden die verschiedenen Lambdas miteinander multipliziert.

$$\Lambda = \prod_{k=1}^K \frac{1}{1+\gamma_k} \quad (19)$$

wobei: K = Anzahl Diskriminanzfunktionen

Wilks' Lambda ist ein inverses Gütemass, d.h. je kleiner die Werte, desto besser sind die Gruppen durch die Diskriminanzfunktion getrennt. Nach BACKHAUS et al. (1994) liegt die Bedeu-

tung von Wilks' Lambda darin, dass es sich in eine probabilistische Variable transformieren lässt und damit Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Unterschiedlichkeit von Gruppen erlaubt. Durch die Transformation erhält man eine Variable, die annähernd χ^2 (Chi-quadrat) verteilt ist. Durch eine Signifikanzprüfung kann getestet werden, ob sich die Gruppen unterscheiden oder nicht. Die Hypothesen lauten:

H_0 : Die Gruppen unterscheiden sich nicht

H_1 : Die Gruppen unterscheiden sich

e) Prüfung der Klassifikation

Um zu überprüfen, ob Elemente einer Stichprobe der richtigen Gruppierung angehören, wird eine Klassifizierung durchgeführt. Nach BACKHAUS et al. (1994) wird gemäss dem Distanzkonzept ein Element i in diejenige Gruppe g eingeordnet, der es am nächsten liegt. Die euklidische Distanz zwischen dem Element und dem Gruppenmittel (Centroid) ist minimal und ergibt sich aus dem Abstand zwischen Element und Centroid auf der Diskriminanzachse. Das Distanzmass drückt sich wie folgt aus:

$$D_{ig}^2 = \sum_{k=1}^K (Y_{ki} - \bar{Y}_{kg})^2 \quad (g = 1, \dots, G) \quad (20)$$

wobei:

Y_{ki} = Diskriminanzwert von Element i bezüglich Diskriminanzfunktion k

\bar{Y}_{kg} = Lage des Centroids von Gruppe g bezüglich Diskriminanzfunktion k

4. Vorgehen

4.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die in Kap. 3 erläuterten Grundlagen angewendet. Es wird auf die folgenden vier Schwerpunkte eingegangen:

- Datenerhebung
- Erstellung der Rohdaten
- Berechnung von Brandgutmodellen
- Datenanalyse

Abb. 19 zeigt das systematische Vorgehen der Brandgutdatenerhebung in dieser Arbeit.

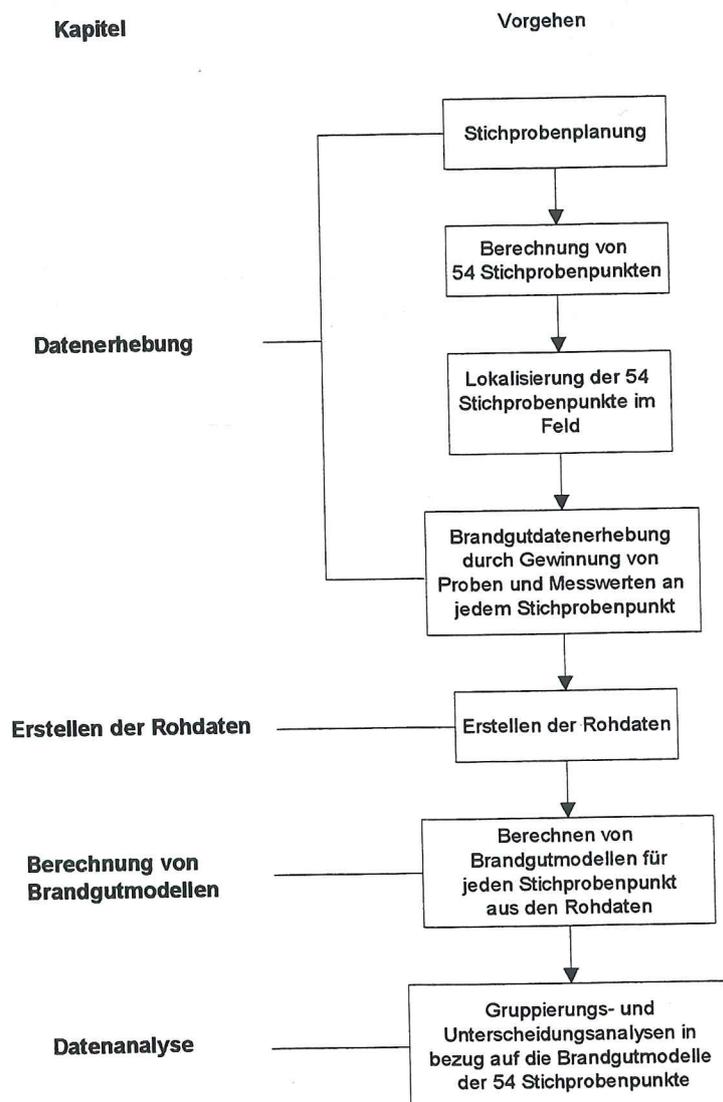


Abb. 19: Vorgehen der Brandgutdatenerhebung in dieser Diplomarbeit

Aufgrund einer durchgeführten Stichprobenplanung des Untersuchungsgebietes wurden in einem ersten Schritt die Koordinaten von 54 Stichprobenpunkten berechnet. An jedem im Feld

lokalisiertem Stichprobenpunkt wurden Brandgutdaten erhoben. Aus den getrockneten und gewogenen Proben, sowie den unterschiedlichen Berechnungen mit den Messwerten wurden die Rohdaten erstellt. In einem weiteren Schritt konnten aus den Rohdaten Brandgutmodelle für jeden Stichprobenpunkt berechnet und somit die Datenmenge verringert werden. Um den Werdegang des Sammelns von Material bis zum fertigen Brandgutmodell eines Stichprobenpunktes nachzuvollziehen, werden die diversen Berechnungen durch Rechenbeispiele mit dem Stichprobenpunkt Nr. 19 illustriert. Der Stichprobenpunkt Nr. 19 wurde deshalb ausgewählt, weil er für die Dokumentierung der Berechnungen als geeignet erschien. Im letzten Unterkapitel (Kap. 4.5) werden verschiedene Analysen mit den Brandgutmodellen der 54 Stichprobenpunkte durchgeführt.

4.2 Datenerhebung

Die Durchführung der Brandgutdatenerhebung mit der in Kap. 3.4 beschriebenen Methode durchläuft die Schritte der Planung, der Umsetzung im Gelände und der Stichprobenentnahme.

4.2.1 Stichprobenplanung

a) Ziel der Stichprobenplanung

Als Grundgesamtheit der Untersuchung galt das in Kap. 3.6 vorgestellte Untersuchungsgebiet. Es wurde so ausgewählt, dass verschiedene Waldtypen mit unterschiedlichem Brandgut in der Region Novaggio-Migliaglia vorlagen. Ziel der Stichprobenplanung war es, mit Hilfe von Vorinformationen (Waldkarten) und einem optimalen Stichprobenplan mit möglichst geringer Anzahl Stichproben Aussagen über die Brandgutsituation in der Grundgesamtheit (Untersuchungsgebiet) zu machen.

b) Anzahl Stichproben

Die Anzahl Stichproben war durch den hohen Arbeitsaufwand pro Probe sehr limitiert. Pro Tag konnten zwischen 3 bis 8 Stichprobenpunkte (je nach Zugänglichkeit und Brandgutmenge) aufgenommen werden. Im Mittel waren es zwischen 4 bis 5. Für die Planung der Stichprobenpunkte wurde mit einem Tagesdurchschnitt von drei Stichproben gerechnet. Die Arbeitsdauer an einem Stichprobenpunkt variierte zwischen 40 Minuten und 2 Stunden. Dazu kam noch der zum Teil grosse Zeitaufwand für die Wechsel zwischen den Punkten, welcher meistens durch abgelegenes und wegloses Gelände führte.

Mit einem hohen Stichprobenumfang hätte jede einzelne Stichprobe weniger Gewicht, dies ist besonders bei Ausreissern von Vorteil. Zu viele Stichproben hätten aber den Zeitrahmen dieser Diplomarbeit gesprengt und wären auch bei allfälligen gross angelegten Erhebungskampagnen eine finanzielle Hürde. Nach WAGNER (1994) sollten ca. 8 Stichprobenpunkte notwendig sein, damit ein Stratum genügend repräsentiert ist. SACHS (1993) schreibt, dass mindestens 12 Beobachtungen oder Messungen vorliegen müssen, um Kennwerte (wie z.B. Quantile) zu berechnen.

Für die Erhebungen sollte der ganze Monat März 1995 zur Verfügung stehen. Es war von vornherein klar, dass mit einem erwarteten Schnitt von drei Stichprobenpunkten pro Tag nicht mehr als 60 Punkte im Rahmen dieser Diplomarbeit erhoben werden konnten. Der zeitliche Rahmen erlaubte eine Anzahl von 56 geplanten Stichprobenpunkten. Um einer minimalen Anzahl von 12 Punkten pro Stratum zu entsprechen, konnten 4 Straten mit je 14 Stichprobenpunkten berücksichtigt werden. Effektiv waren nach der Berechnung des Stichprobenrasters 54 Punkte im Untersuchungsgebiet verteilt.

c) Systematisch stratifizierte Stichprobe

Wie bereits erwähnt können die Ergebnisse einer Untersuchung durch einen erhöhten Stichprobenumfang verbessert werden. Dies wird auch erreicht durch eine Verkleinerung der Variabilität, z.B. durch homogenere Untersuchungsflächen. Dies kann mittels einer sinnvollen Stratifizierung erreicht werden (SACHS, 1993).

Die Stratifizierung gehört zu den wichtigsten Massnahmen zur Erhöhung der Effizienz von Stichprobenerhebungen. Es wird vor allem dann stratifiziert, wenn sich Bestände stark von einander abheben und diese sich auch noch über grössere Flächen ausdehnen. Der Gültigkeitsbereich der Stichprobenerhebung ist zwar einschränkt, aber dafür kann bereits vorhandenes Wissen in die Planung miteinbezogen werden (ZÖHRER, 1980). Das Prinzip des Stratifizierens ist es, die Untersuchungsfläche mit unterschiedlichen Baumbeständen und Bearbeitungsweisen in verschiedene Straten zu unterteilen. Das unterschiedliche Brandgut im Testgebiet war für die Unterteilung bestimmend. Durch die Stratifizierung konnten bekannte Störeinflüsse wie z.B. die Veränderung des Brandgutes mit dem Wechsel des Waldtyps, eliminiert werden.

Pro Stratum sollte wenn möglich eine gleiche Anzahl von Stichprobenpunkten erhoben werden, damit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse unter den Straten möglich ist. Deshalb wurde für die Untersuchungen im Malcantone ein systematisch stratifiziertes Stichprobenverfahren angewendet. D.h. die Stichprobenpunkte werden stratenweise in regelmässigen Mustern mit gleicher Intensität verteilt (WILDI, 1986). Dabei ist folgendes zu beachten:

- Die Maschenweite des Rasters ist stratenweise so festzulegen, dass sie sich proportional zur Wurzel der Stratumfläche verhält.
- Es dürfen keine periodisch auftretenden Strukturen im Wald auftreten, die zum Versagen dieses Stichprobenverfahrens führen würde.

In mehreren Voruntersuchungen wurden verschiedene Brandgutsituationen mit den Waldkarten verglichen. Dabei wurde versucht, die vorkommenden Brandgutsituationen einem Waldbestand oder einer Baumart zuzuordnen. Aufgrund dieser Voruntersuchungen und durch Absprache mit M. Conedera von der Sottostation (WSL/FNP), wurde das Untersuchungsgebiet mit Hilfe der beiden Waldkarten stratifiziert. Es entstanden die folgenden vier Straten mit den entsprechenden Wald- und Vegetationstypen.

Stratum	Waldbestand	Baumart
A: Aufgeforsteter Nadelwald	Alte und junge Pflanzungen	Mischwald (Nadel dominant), reiner Nadelwald
B: Ehemalige Waldbrandflächen	Alte Pflanzungen	Reiner Laubwald
C: Genutzter Kastanienwald	Produktiver Niederwald, Mittelwald, Hochwald	Kastanie
D: Kastanien-Hangniederwald	Hangniederwald	Kastanie

Tab. 1: Gliederung der 4 Straten

In jedem dieser Straten sollten nun etwa 14 Stichprobenpunkte gesetzt werden. Um Stichprobenpunkte genau auf den Stratumsgrenzen zu vermeiden wurde in einem weiteren Schritt entlang der Grenzen eine Pufferzone von 20m Breite nach „innen“ gelegt. Bei zwei angrenzenden Straten war die Grenzlinie durch eine 40m breite Pufferzone definiert.

Für jedes der vier Straten wurde ein individuelles Stichprobenraster bestimmt. Die Maschenweite des Rasters sollte sich proportional zur Wurzel der Stratumfläche verhalten. Wie im folgenden Beispiel illustriert, wird dabei die Stratumfläche durch die Anzahl erwarteter Stichprobenpunkte dividiert und danach die Wurzel gezogen.

Beispiel:

$$\text{Maschenweite} = \sqrt{\frac{\text{Fläche von Stratum A}}{\text{Anzahl erwarteter Stichprobenpunkte pro Stratum}}} = \sqrt{\frac{821141\text{m}^2}{14}} = 242\text{m}$$

Für die vier Straten entstanden vier Raster mit folgender Maschenweite:

Stratum	Fläche [m ²]	Maschenweite [m]
A	821141	242
B	311115	149
C	1949375	373
D	1619222	340

Tab. 2: Maschenweiten der vier Straten

In ARC/INFO wurde für jedes Stratum von einem zufällig bestimmten Ursprung aus eine Punkt-Coverage mit den Rasterpunkten entsprechender Maschenweite generiert. Der Ursprungspunkt wurde mit der Randomfunktion *RAND* im GRID-Modul bestimmt. Er hat die Koordinaten 90822.8/703414.4. In einem weiteren Schritt wurde jede Stratumfläche mit den entsprechenden Stichprobenpunkten versehen. Durch die zufällige Platzierung der Stichprobenraster beträgt die Anzahl der Stichprobenpunkte in jedem Stratum nur annähernd 14. Insgesamt wurden 54 Stichprobenpunkte berechnet. Folgende Abbildung zeigt die Verteilung der 54 Stichprobenpunkte.

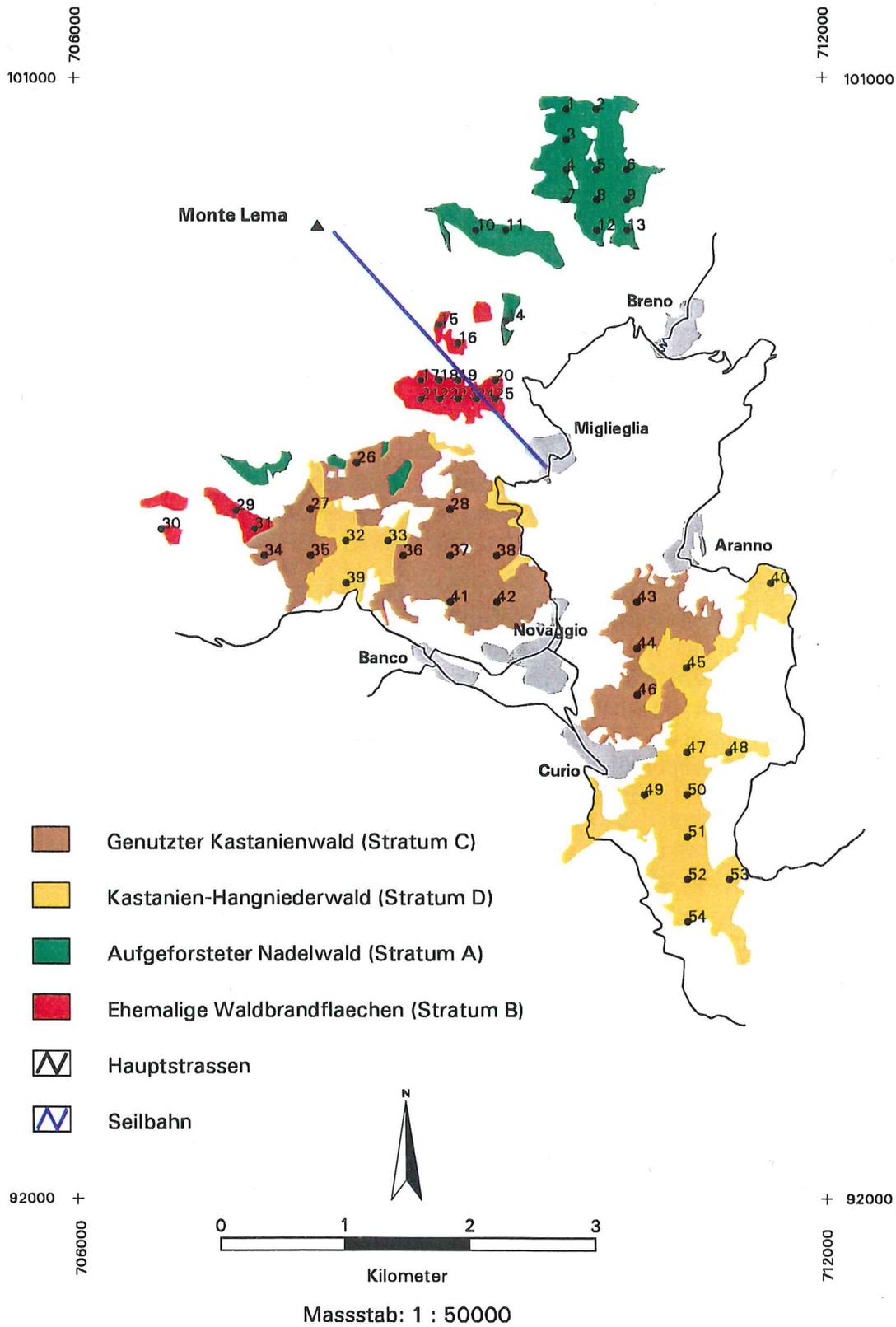


Abb. 20: Verteilung der 54 Stichprobenpunkte auf die 4 Straten

4.2.2 Übertragung ins Gelände

Die erhaltenen 54 Stichprobenpunkte wurden in einem weiteren Schritt von Hand in Übersichtspläne im Massstab 1:5'000 eingetragen. Im Feld konnten die Punkte mit Hilfe der Übersichtspläne, Kompass und Höhenmeter gut lokalisiert werden. Die Lokalisierung eines Stichprobenpunktes wurde in eine Grob- und eine Feinsuche aufgeteilt.

Grobsuche

Ziel der Grobsuche war es, möglichst nah in den Bereich des Stichprobenpunktes zu gelangen. Einige Punkte erwiesen sich insofern als einfach, da sie z.B. nahe einer Wegkreuzung lagen und die Richtung zum Punkt mit dem Kompass bestimmt werden konnte. Bei Punkten mitten in einem Hang wurde zum Teil in der Falllinie der Punkt von oben nach unten mit dem Höhenmeter lokalisiert. Dies bedingte jedoch, dass der Anfangspunkt einfach bestimmbar war. Andernfalls musste der Stichprobenpunkt von einem bekannten Ausgangspunkt mit Kompass und Höhenmeter schräg zum Hang anvisiert werden. Mit der Grobsuche konnte der Stichprobenpunkt in einem Umkreis von ca. 20-50 m lokalisiert werden.

Feinsuche

Die Idee der Feinsuche war es, eine subjektive Auswahl des Stichprobenpunktes möglichst zu eliminieren. Dabei wurde folgendermassen vorgegangen:

Nach beendeter Grobsuche befand man sich im Umkreis des Stichprobenpunktes. Um einen zufälligen Ort des Punktes zu erhalten, wurden in festgelegter Richtung z.B. 30 Schritte blind abgezählt und beim dreissigsten Schritt befand sich der zu erhebende Stichprobenpunkt. Die Zufälligkeit für die Auslegung der Rechtecke wurde noch erhöht, in dem deren Richtung durch Würfeln bestimmt wurde (Abb. 11).

Verschiebung von Punkten

Die Stichprobenpunkte 13 und 51 mussten, wegen falscher Kartierung in den Waldkarten, um 100 bzw. 50m verschoben werden.

4.2.3 Stichprobenentnahme

Die Stichprobenentnahme erfolgte durch die in Kap. 3.4 beschriebene Erhebungsmethode. Von jedem Stichprobenpunkt wurde Material von Holz, Streu und Kraut gesammelt. Zudem wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Tiefe der Brandgutschicht
- Stammdurchmesser der Sträucher
- Durchmesser <0.6 cm von Strauchästen
- Anzahl Querschnittflächen der Transsekt-Methode

Im weiteren mussten der prozentual lebende Anteil von Sträuchern, sowie die Strauchart bestimmt werden.

Aus all diesen Informationen jedes Stichprobenpunktes konnten in einem weiteren Schritt die Rohdaten erstellt werden.

4.3 Erstellung der Rohdaten

Um die Brandgutsituation an einem Stichprobenpunkt durch ein Brandgutmodell zu charakterisieren, müssen nach der Stichprobenentnahme die Rohdaten erstellt werden. Folgende Abbildung zeigt den schematischen Werdegang eines Brandgutmodells mit der wichtigen Zwischenstation der Rohdatenerstellung.

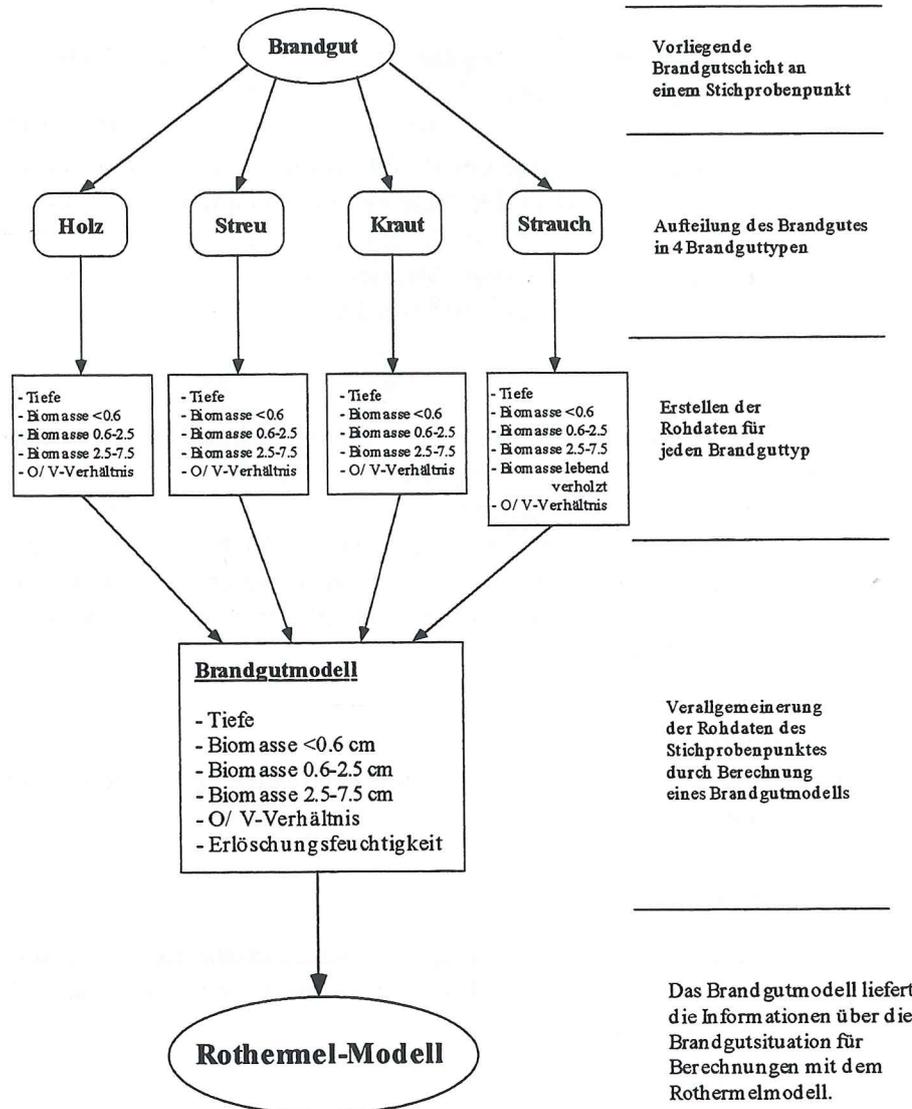


Abb. 21: Weg des Brandgutes über das Erstellen von Rohdaten zum Brandgutmodell

Die Rohdaten werden aus den Messungen und Proben der Stichprobenentnahme erstellt. Sie werden in einer Matrix mit den verschiedenen Werten der Brandgutttypen für jeden Stichprobenpunkt aufgeführt. In diesem Unterkapitel wird die Erstellung folgender Rohdatenwerte der Brandgutttypen Holz, Kraut, Streu und Strauch beschrieben:

- Tiefe der Brandgutschicht
- Biomasse
- Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis

Die Entstehung jedes Wertes der Rohdatenmatrix wird anhand eines Beispiels für den Stichprobenpunkt Nr. 19 erklärt. Zusammenfassend werden am Schluss dieses Unterkapitels alle Werte der Rohdatenmatrix für den Stichprobenpunkt Nr. 19 aufgelistet. Die vollständige Rohdatenmatrix befindet sich im Anhang.

4.3.1 Tiefe der Brandgutschicht

In jedem der vier Rechtecke von Abb. 11 wurde die Tiefe von Kraut, Streu und Holz zwei Mal gemessen. Bei den Sträuchern wurde die Höhe jedes einzelnen Strauches gemessen. Die Mittelwerte der Messungen jedes Brandguttyps ergaben einen Wert pro Brandguttyp.

4.3.2 Biomasse

Um Biomassewerte zu erhalten, wurden in den vier Rechtecken von Abb. 11 Proben entnommen. Das gesammelte Material wurde in luftdurchlässigen Papiertüten verpackt und aufbewahrt. Am Ende der Stichprobenentnahmen wurden die Proben getrocknet und gewogen.

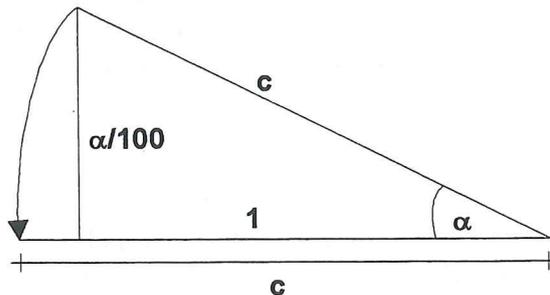
Die Witterung während den Feldaufnahmen war durch häufige Nordföhnlagen charakterisiert. Während dieser Zeit regnete es nie. Dies führte dazu, dass die Luft und damit auch das Material am Boden sehr trocken war. In Anbetracht dieser Bedingungen bot sich die Möglichkeit, für die Trocknung der Proben eine Lufttrocknungsanlage beim Gewürzproduzenten P. Lendi in Bedigliora zu benutzen. Nach BROWN et al. (1982) müssen die Proben vor dem Wägen während 24 Stunden bei 100° C ofengetrocknet werden. Der Feuchtigkeitsgehalt der Proben beträgt bei diesem Verfahren 0%. Um den Transport der Proben nach Zürich zu ersparen und mit der Begründung, dass Gewürze nicht feucht verpackt werden können, wurden die Proben in der Anlage von P. Lendi luftgetrocknet.

Mit der oben erwähnten Lufttrocknungsanlage wurde das Material in einem Trocknungsraum von Luft mit Zimmertemperatur während 48 Stunden umströmt und getrocknet. Nach Angaben von P. Lendi beträgt der Feuchtigkeitsgehalt des Materials nach dem Trocknen etwa 10%. Es wurde noch am selben Ort gewogen.

Bevor mit den gewogenen Werten die Biomasse berechnet werden konnte, musste, um hangneigungsunabhängige Resultate zu erhalten, ein Hangneigungskoeffizient berechnet werden.

Die Probenentnahmen in den Rechtecken für die Erhaltung der Biomasse wurde unter unterschiedlichen Hangneigungen durchgeführt. Je steiler ein Hang ist, desto kleiner ist die auf eine horizontale Ebene projizierte Fläche (Abb. 22). Da die Biomassewerte sich auf horizontale Flächen beziehen, müssen die erhaltenen Biomassen der Proben mit einem **Hangneigungskoeffizienten** gewichtet werden.

Nach BROWN et al. (1982) berechnet sich der Hangneigungskoeffizient (c) wie folgt:



wobei: α = Hangneigung in %

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{\text{Hangneigung in \%}}{100}\right)^2}$$

Abb. 22: Berechnung des Hangneigungskoeffizienten

Beispiel Stichprobenpunkte Nr. 19:

Die Hangneigung beim Stichprobenpunkt Nr. 19 betrug 80%. Damit wurde ein Hangneigungskoeffizient von $c = 1.28$ berechnet.

Die Biomassewerte der verschiedenen Brandguttypen entstanden auf unterschiedliche Arten. Sie werden im folgenden beschrieben.

a) Holz

Herumliegendes Holz wurde auf zwei verschiedene Arten erhoben:

1. Entlang der Richtungslinie wurden die Durchmesser der Hölzer in den drei Brandgutklassen <0.6 cm, 0.6-2.5 cm und 2.5-7.5 cm gezählt (Kap. 3.4; Transekt-Methode).
2. Zusätzlich wurde in allen Rechtecken Holz mit Durchmesser <0.6 cm gesammelt.

Weil die Biomasse der Brandgutklasse <0.6 cm die wichtigste Biomassegrösse für die Waldbrandmodellierung ist, wurde Holz mit Durchmesser <0.6 cm auf zwei verschiedene Arten erhoben. Holz mit Durchmesser 0.6-7.5 cm wurde nur mit der Transekt-Methode erhoben. Ziel der Doppelerhebung von Holz mit Durchmesser <0.6 cm war es, die Werte der beiden Erhebungsmethoden zu vergleichen. Die voneinander unabhängigen Messungen sollten zu ähnlichen Werten führen. In Abb. 23 sind die Werte beider Methoden gegeneinander aufgetragen.

Die Berechnung der Korrelation ergab folgende Werte:

Korrelation Transekt vs. Stichprobe				
DF	R	R^2	F-Wert	P-Wert
1	0.636	0.405	35.412	<0.0001

Die Ergebnisse zeigen, dass zwischen der Stichprobenentnahme und der Transektmethode ein Zusammenhang besteht. D.h. mit beiden Methoden können Punkte mit grossen Holzmassen von solchen mit wenig Holz unterschieden werden. Die erhaltenen Biomassen aus den beiden Methoden sind aber überhaupt nicht vergleichbar. Die Transekt-Methode weist etwa zehn mal höhere Werte als die gewogenen Stichproben auf. Die 1:1-Linie in Abb. 23 zeigt den Verlauf, den die Regressionsgerade haben müsste. Die Transekt-Methode nach BROWN et al. (1982) erwies sich daher als sehr ungenau. Die mit dieser Methode erhobenen Werte konnten deshalb für die Analysen nicht berücksichtigt werden. Dies hatte zur Folge, dass für Holz mit Durchmesser zwischen 0.6 und 7.5 cm keine Werte vorlagen, weil nur Holz mit Durchmesser <0.6 cm gesammelt und gewogen wurde.

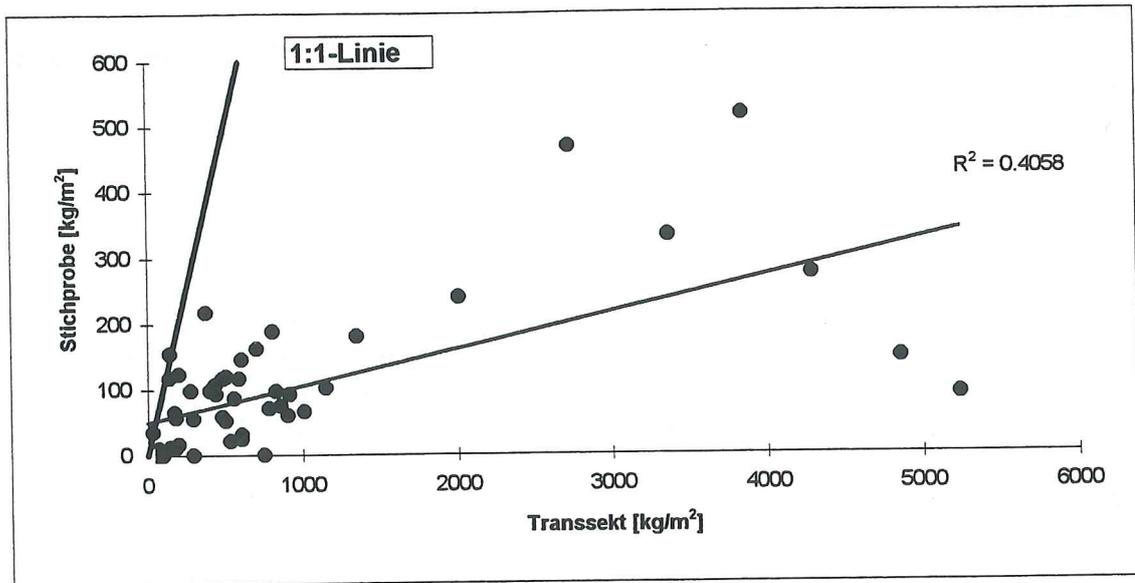


Abb. 23: Korrelation der Holzbiomasse zwischen der Transsekt-Methode und der Stichprobenentnahme

Auf die Resultate der Modellberechnungen mit Rothermel hat dieser Datenverlust keinen Einfluss. In drei von vier Straten war einerseits kaum Holz mit Durchmesser >0.6 cm vorhanden. Andererseits beeinflussen geringe Änderungen der Biomasse mit Durchmesser $0.6-2.5$ cm und $2.5-7.5$ cm die Rothermelresultate nicht.

Die Berechnung der Holzbiomasse mit Durchmesser <0.6 cm ging folgendermassen vor sich:

Das Holz mit Durchmesser <0.6 cm wurde in jedem Rechteck gesammelt, die gewogene Biomasse musste danach noch auf die entsprechende Masse pro m^2 hochgerechnet und mit dem Hangneigungskoeffizienten (c) multipliziert werden.

Die totale Fläche der vier Rechtecke beträgt: $4 \times 0.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} = 0.72 \text{ m}^2$

Um die korrigierte Masse pro m^2 zu erhalten, musste die gewogene Biomasse von Holz mit Durchmesser <0.6 cm für einen bestimmten Stichprobenpunkt noch mit dem Faktor $\frac{1}{0.72}$ und c multipliziert werden.

Beispiel, Stichprobenpunkt Nr. 19:

Am Stichprobenpunkt Nr. 19 war kein Holz vorhanden. Die Biomasse von Holz mit Durchmesser <0.6 cm beträgt Null.

b) Kräuter

Die Kräuter wurden ebenfalls in jedem Rechteck gesammelt, getrocknet und gewogen. Zu dieser Gruppe zählen vor allem Farne und Gräser. Alle Kräuter gehören der Brandgutklasse <0.6 cm an. Die Umrechnung auf 1 m^2 ist genau gleich wie beim Holz. Es wird auch mit dem Faktor $\frac{1}{0.72}$ und c multipliziert.

Beispiel, Stichprobenpunkt Nr. 19:

Die Kräuter vom Stichprobenpunkt Nr. 19 wogen 326 g. Der Wert der Krautbiomasse in der Rohdatenmatrix wurde wie folgt berechnet:

$$\frac{1}{0.72} \times c \times 0.326 = 0.58 \text{ kg/m}^2$$

c) Streu

Bei vielen Stichprobenpunkten war die Streumenge recht hoch. Um den Aufwand des Sammelns zu minimieren, wurde die Streu nur in einer Hälfte jedes Rechteckes gesammelt und zwar konsequent immer in der gleichen Hälfte. Zapfen, Kastanien, Kastanienhüllen wurden dabei zur Brandgutklasse 0.6-2.5 cm gezählt. In die Brandgutklasse 2.5-7.5 cm wurde keine Streu gezählt.

Die Fläche der vier Rechteckshälften beträgt: $4 \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} = 0.36 \text{ m}^2$

Demzufolge wurde die entsprechend korrigierte Biomasse pro m^2 mit dem Faktor $\frac{1}{0.36}$ und c multipliziert.

Beispiel, Stichprobenpunkt Nr. 19:

Die gewogene Streumasse betrug:

Streu mit Durchmesser <0.6 cm:	217 g
Streu mit Durchmesser von 0.6-2.5 cm:	0 g

Die Biomasse der Streu beträgt:

$$\frac{1}{0.36} \times c \times 0.217 = 0.772 \text{ kg/m}^2 \text{ für Brandgut mit Durchmesser } <0.6 \text{ cm}$$

und 0 kg/m^2 für Brandgut mit Durchmesser von 0.6-2.5 cm.

d) Sträucher

Um exakte Biomassewerte der Sträucher zu erhalten, müsste jeder Strauch, der in eine Stichprobe fällt, abgeschnitten werden. Bei einem toten Strauch müsste die Biomasse in die drei Brandgutklassen für totes Material aufgeteilt werden. Im Fall eines lebenden Strauches würde nur die Biomasse für Material mit Durchmesser <0.6 cm gemessen werden.

Um eine möglichst schonende Erhebung durchzuführen, wurde versucht, die Biomasse der Sträucher zu schätzen. Nach BROWN (1976) besteht zwischen dem Stammdurchmesser und der Biomasse eines Strauches ein enger Zusammenhang. BROWN (1976) untersuchte 25 Straucharten und verglich die Biomasse mit den Strauchdurchmessern. Als Ergebnis seiner Arbeit entstanden Tabellenwerte (Tab. 3) mit welchen sich bei bekannten Stammdurchmessern und Straucharten die Biomasse berechnen lässt. Für jede Strauchart im Tessin wurde versucht, einen Vergleich mit einer der 25 amerikanischen Sträuchern zu suchen. Mit Hilfe von Prof. Klötzli konnten ausser für den Ginster (*Sarothamnus scoparium*) überschlagsmässige Vergleichsarten gefunden werden.

TABLE 1. Regression components for estimating leaf and total aboveground weights of 25 woody shrub species and 3 shrub groups using the linear equation $\ln(\text{weight, g}) = a + b \ln(\text{basal diameter, cm})$

Species	n	Range of sample diameters, cm	Leaf weight			Total aboveground weight				
			a	b	r ²	Variance	a	b	r ²	Variance
Low shrub										
<i>Symphoricarpos albus</i> (L.) Blake (snowberry)	31	0.2-1.2	1.848	1.721	0.68	0.315	3.490	2.285	0.88	0.165
<i>Vaccinium globulare</i> Rydb. (blue huckleberry)	44	0.3-1.7	1.480	2.537	0.84	0.325	3.388	3.150	0.97	0.086
<i>Vaccinium scoparium</i> Leiberg (grouse whortleberry)	31	0.3-0.7	0.513	1.567	0.26	0.417	3.113	2.148	0.62	0.171
<i>Rosa</i> spp. (rose)	32	0.2-1.2	2.023	2.112	0.88	0.154	3.628	2.779	0.96	0.082
<i>Ribes</i> spp. (gooseberry)	37	0.4-1.4	2.164	2.538	0.63	0.348	3.892	3.122	0.90	0.101
<i>Spiraea betulifolia</i> Pall. (white spiraea)	31	0.2-0.8	2.410	2.281	0.80	0.187	3.604	2.604	0.84	0.180
<i>Berberis repens</i> Lindl. (Oregon grape)	36	0.3-0.9	2.101	1.586	0.48	0.183	2.976	2.092	0.70	0.130
<i>Rubus parviflorus</i> Nutt. (thimbleberry)	27	0.3-1.4	2.497	2.024	0.72	0.122	3.469	2.538	0.88	0.069
<i>Rubus idaeus</i> L. (red raspberry)	26	0.3-0.9	2.912	2.932	0.85	0.172	3.784	2.860	0.89	0.113
Combined species	295	0.2-1.7	2.033	2.165	0.67	0.535	3.565	2.667	0.91	0.166
Medium shrub										
<i>Physocarpus malvaceus</i> (Greene) Kuntze (ninebark)	38	0.4-3.8	2.275	2.036	0.89	0.162	3.730	2.576	0.94	0.140
<i>Menziesia ferruginea</i> Smith (smooth menziesia)	37	0.4-2.1	0.661	2.263	0.83	0.307	3.073	3.150	0.98	0.057
<i>Lonicera utahensis</i> Wats. (Utah honeysuckle)	32	0.3-1.7	2.002	2.158	0.67	0.616	3.768	2.957	0.96	0.086
<i>Holodiscus discolor</i> (Pursh) Maxim. (oceanspray)	31	0.7-2.2	2.164	2.605	0.86	0.119	3.769	3.033	0.93	0.070
<i>Ceanothus velutinus</i> Dougl. (evergreen ceanothus)	30	0.6-2.5	2.687	2.415	0.67	0.334	3.670	2.847	0.92	0.085
<i>Philadelphus lewisii</i> Pursh (mockorange)	28	0.5-2.9	1.921	2.778	0.71	0.448	3.708	2.999	0.90	0.137
<i>Shepherdia canadensis</i> (L.) Nutt. (russet buffaloberry)	30	0.7-2.9	2.010	2.034	0.80	0.157	3.497	2.407	0.89	0.111
<i>Artemisia tridentata</i> Nutt. (big sagebrush)	22	0.8-6.9	1.603	1.888	0.75	0.511	3.161	2.242	0.92	0.172
<i>Juniperus communis</i> L. (common juniper)	23	0.8-2.9	3.414	1.650	0.80	0.089	4.081	2.202	0.92	0.056
Combined species	226	0.3-6.9	1.945	2.363	0.66	0.672	3.580	2.853	0.92	0.164
High shrub										
<i>Anelanchier alnifolia</i> Nutt. (serviceberry)	39	0.4-4.5	1.691	2.111	0.83	0.317	3.607	2.887	0.99	0.098
<i>Acer glabrum</i> Torr. (mountain maple)	31	0.4-3.7	1.868	2.038	0.89	0.180	3.634	2.752	0.98	0.053
<i>Sorbus scopulina</i> Greene (mountain ash)	29	1.0-4.2	1.497	2.581	0.84	0.171	3.273	2.881	0.95	0.070
<i>Prunus virginiana</i> L. (chokecherry)	31	0.6-2.9	2.180	1.902	0.74	0.335	3.399	2.920	0.98	0.074
<i>Alnus sinuata</i> (Regel) Rydb. (mountain alder)	30	0.7-6.3	2.065	1.588	0.82	0.181	3.523	2.466	0.95	0.110
<i>Cornus stolonifera</i> Michx. (redosier dogwood)	31	0.6-3.4	2.246	1.762	0.68	0.316	3.681	2.575	0.93	0.071
<i>Salix</i> spp. (willow)	31	0.7-3.7	1.858	2.066	0.58	0.342	3.303	2.762	0.97	0.043
Combined species	222	0.4-6.3	1.930	1.974	0.79	0.291	3.507	2.697	0.95	0.095

Tab. 3: Tabellenwerte für die Abschätzung von Laub- und Totalgewicht über Boden für 25 Straucharten und 3 Strauchgruppen mit Benützung folgender linearer Gleichung:

$$\ln(\text{Biomasse, g}) = a + b \ln(\text{Stammdurchmesser, cm})$$

(BROWN, 1976; Tab. 1, S. 154)

BROWN et al. (1982) teilen die Stammdurchmesser der Sträucher in folgende Klassen ein:

0-0.5 cm, 0.5-1 cm, 1-1.5 cm, 1.5-2 cm, 2-3 cm, 3-5 cm, >5cm

Pro Stichprobenpunkt wurden in den zwei Kreisen von Abb. 11 die Stammdurchmesser für jede Strauchart in eine der sieben Stammdurchmesserklassen eingeteilt. Mit dem mittleren Stammdurchmesser jeder Klasse wurde aus Tab. 3 die Biomasse geschätzt.

Beispiel für *Holodiscus discolor*:

Ein *Holodiscus discolor* mit einem Stammdurchmesser von 2.2 cm wird in die Stammdurchmesserklasse 2-3 cm eingeordnet. Von dieser Stammdurchmesserklasse wird mit dem mittleren Durchmesser von 2.5 cm die Biomasse aus Tab. 3 abgeschätzt. Um die totale Biomasse (mit Laub) abzuschätzen, werden die entsprechenden Werte für a und b aus der Tabelle gelesen und in folgender Gleichung eingesetzt:

$$m_T = e^{a+b(\ln d)} \quad \text{wobei } d = \text{Stammdurchmesser (hier 2.5 cm)}$$

$$m_T = e^{3.769+3.033 \ln 2.5} = 698 \text{ g}$$

Um die Biomasse ohne Laub zu erhalten, wird die geschätzte Laubmasse abgezogen. Die geschätzte Laubmasse lautet:

$$m_L = e^{2.164+2.605 \ln 2.5} = 95 \text{ g}$$

Die geschätzte Biomasse von *Holodiscus discolor* ohne Laub lautet:

$$m_T - m_L = 698 \text{ g} - 95 \text{ g} = 603 \text{ g/m}^2$$

Die geschätzten Biomassen (ohne Laub) für die verschiedenen Stammdurchmesserklassen der im Tessin erhobenen Sträucher sind in Tab. 4 aufgeführt.

Aus den vorangegangenen Schätzungen erhält man einen Wert für die gesamte Biomasse eines Strauches. Um die Strauchmasse in die Rothermelberechnungen einfließen zu lassen, muss sie noch in die Brandgutklassen aufgeteilt werden. BROWN (1976) schätzte nicht nur die Biomasse von Sträuchern, sondern versuchte zudem durch Messungen der Zweigdurchmesser eine Relation derselben zu den Stammdurchmessern zu finden. Er unterteilte die Zweigdurchmesser eines Strauches in die Klassen 0-0.5 cm, 0.5-2 cm und >2 cm. Aus zahlreichen Durchmesser-messungen teilte er in Abhängigkeit der Stammdurchmesser die totale Biomasse auf die Durchmesserklassen <0.5 cm, 0.5-2 cm und >2 cm auf.

Die folgenden Abbildungen zeigen den prozentualen Anteil der gesamten Biomasse eines Strauches für die Durchmesserklassen 0-0.5 cm und 0.5-2 cm, in Abhängigkeit des Stammdurchmessers.

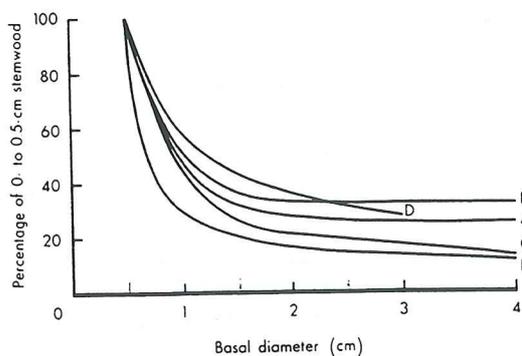


Abb. 24: Prozentualer Anteil der totalen Strauchmasse für die Durchmesserklasse <0.5 cm als Funktion der Stammdurchmesser. (Aus BROWN, 1976, S. 155)

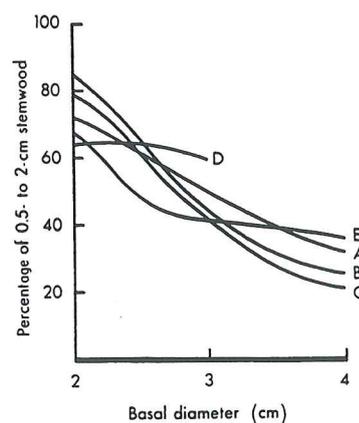


Abb. 25: Prozentualer Anteil der totalen Strauchmasse für die Durchmesserklasse 0.5-2 cm als Funktion der Stammdurchmesser. (Aus BROWN, 1976, S. 156)

Die Grossbuchstaben, welche die Kurven beschriften stehen für folgende amerikanische Straucharten:

- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>A: - <i>Symphoricarpos albus</i>
 - <i>Vaccinium globulare</i>
 - <i>Rosa spp</i>
 - <i>Ribes spp</i>
 - <i>Lonicera utahensis</i>
 - <i>Menziesia ferruginea</i>
 - <i>Physocarpus malvaceus</i>
 - <i>Philadelphus lewisii</i>
 - „Combined medium species“</p> | <p>B: - <i>Rubus idaeus</i>
 - <i>Rubus parviflorus</i></p> <p>C: - <i>Salix spp</i>
 - <i>Amalancher alnifolia</i>
 - <i>Acer glabrum</i>
 - <i>Alnus sinuata</i>
 - <i>Prunus virginiana</i></p> |
| <p>D: - <i>Shepherdia canadensis</i>
 - <i>Ceanothus velutinus</i></p> | <p>E: - <i>Artemisia tridentata</i>
 - <i>Holodiscus discolor</i>
 - <i>Juniperus communis</i></p> |

Beispiel *Holodiscus discolor*:

Für den *Holodiscus discolor* der Stammdurchmesserklasse 2-3 cm beträgt der mittlere Durchmesser wie im vorhergehenden Beispiel 2.5 cm. In Abb. 24 wird für einen Stammdurchmesser von 2.5 cm ein Wert von 35 % abgelesen. D.h. die Biomasse für den Strauchanteil mit Durchmesser <0.5 beträgt 35 % der totalen Biomasse des Strauches.

In Abb. 25 wird ein Wert von ca. 50 % abgelesen. D.h. die Biomasse für den Strauchanteil mit Durchmesser zwischen 0.5 und 2 cm beträgt 50 % der totalen Biomasse.

Die übrig bleibenden 15 % geben den Anteil der totalen Biomasse für Durchmesser >2 cm an.

Die Durchmesserklassen, die BROWN (1976) bildete, entsprechen nicht ganz den Brandgutklassen, welche für die Rohermelberechnungen notwendig sind. Da es sich bei den in Abb. 24 und Abb. 25 herausgelesenen Prozentanteilen um Schätzwerte handelt, wurden die Werte der Durchmesserklassen 0-0.5 cm und 0.5-2 cm für die Brandgutklassen <0.6 cm bzw. 0.6-2.5 cm übernommen.

In folgender Tabelle sind für alle erhobenen Straucharten die geschätzten Biomassen für alle Stammdurchmesserklassen aufgeführt. Im weiteren sind in Klammern die Prozentanteile der gesamten Biomasse für die Durchmesser <0.5 cm und 0.5-2 cm angegeben. Zu jeder erhobenen Strauchart wird noch die aus Tab. 3 am besten passende amerikanische Vergleichsart, welche mit Hilfe von Prof. Klötzli bestimmt wurde, angegeben.

Straucharten		Biomasse eines Strauches [g] (%-Strauchanteil mit $\varnothing < 0.5$ cm / %-Strauchanteil mit $0.5 < \varnothing < 2$ cm)					
Tessin	USA	Strauchdurchmesserklassen [cm]					
		0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-3	3-5
Hasel (<i>Corylus</i>)	Oceanspray (<i>Holodiscus discolor</i>)	2.5	14 (70%)	70 (40%)	200 (35%)	603 (35%/50%)	1818 (35%/40%)
Rose (<i>Rosa</i>)	Rose (<i>Rosa sp.</i>)	1.5	13 (70%)	58 (38%)	153 (30%)	428 (27%/60%)	
Brombeere (<i>Rubus fruticosus</i>)	Himbeere (<i>Rubus idaeus</i>)	1.7	11 (40%)	48 (25%)	123 (20%)	335 (15%)	
Eiche (<i>Quercus</i>) Buche (<i>Fagus</i>) Kastanie (<i>Castanea sativa</i>) Ahorn (<i>Acer</i>) Birke (<i>Betula</i>)	Combined medium species	2.3	12 (70%)	56 (38%)	151 (30%)	429 (27%/60%)	
Erika (<i>Erica</i>)	combined low species	1.6	12	52	131	351	
Kirsche (<i>Prunus</i>)	Virginische Traubenkirsche (<i>Prunus virginia</i>)	2.1	8 (70%)	44 (35%)	127 (25%)	383 (20%/60%)	1155
Esche (<i>Sorbus</i>)	Westl. Eber- esche (<i>Sorbus scopulina</i>)	2.4	9 (40%)	42 (25%)	113 (20%)	322 (15%)	
Liguster (<i>Ligustrum</i>)	Weide (<i>Salix sp.</i>)	2.4	9 (70%)	40 (35%)	108 (25%)	299 (20%)	
Ginster (<i>Sarothamnus scoparium</i>)	Kein Vergleich!	8	32 (70%)	138 (38%)	296 (30%)	563 (27%/60%)	1470 (27%/30%)

Tab. 4: Biomassen (in Gramm) der verschiedenen Straucharten und Stammdurchmesserklassen mit amerikanischer Vergleichsart

Für den Ginster (*Sarothamnus scoparium*) war keine amerikanische Vergleichsart zu finden. Von einigen Stichprobenpunkten wurden Ginstersträucher abgeschnitten und gewogen. Die

Werte in der Tabelle stammen aus den gewogenen Mittelwerten der abgeschnittenen Sträucher. Diese Werte sind mit Vorsicht zu geniessen. Sie wurden aus einer geringen Anzahl Stichproben erstellt.

Beispiel, Stichprobenpunkt Nr. 19:

Beim Stichprobenpunkt Nr. 19 wurde für jede Stammdurchmesserklasse folgende Anzahl Sträucher gezählt:

Strauchart	Stammdurchmesser [cm]					
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-3	3-5
Hasel	3	17				
Ginster			1	4	1	1

Aus Tab. 4 wurde nun für jeden Strauch die Biomasse jeder Stammdurchmesserklasse herausgelesen. Dieser Wert wurde noch mit der Anzahl der gezählten Sträucher, sowie mit dem prozentualen Biomasseanteil für die entsprechende Brandgutklasse multipliziert. Da die Sträucher auf zwei Kreisen mit je einer Fläche von 1m^2 erhoben wurden, die rohe Biomasse für jeden Punkt sich aber auf eine Fläche von 1m^2 bezieht, musste noch durch 2 dividiert werden. In folgender Tabelle (Tab. 5) wird der Rechengang für jede Strauchart und jeden Stammdurchmesser des Stichprobenpunktes Nr. 19 erläutert. Dabei beschreiben die Zahlen über dem Bruchstrich der Quotienten jeder Zelle folgende Größen:

1. Zahl: Anzahl der gezählten Sträucher
2. Zahl: Biomasse der entsprechenden Stammdurchmesserklasse und Strauchart (Tab. 4)
3. Zahl: Prozentualer Biomasseanteil der entsprechenden Brandgutklasse (Tab. 4)

	Stammdurchmesser [cm]						Summe [g/m ²]
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-3	3-5	
Hasel Ø < 0.6 cm	$\frac{3 \cdot 2.5 \cdot 1}{2}$ = 3.75	$\frac{17 \cdot 14 \cdot 0.7}{2}$ = 83.3					87
Hasel 0.6 < Ø < 2.5		$\frac{17 \cdot 14 \cdot 0.3}{2}$ = 35.7					35.7
Ginster Ø < 0.6			$\frac{1 \cdot 67 \cdot 0.7}{2}$ = 23.45	$\frac{4 \cdot 296 \cdot 0.3}{2}$ = 177.6	$\frac{1 \cdot 563 \cdot 0.27}{2}$ = 76	$\frac{1 \cdot 1582 \cdot 0.27}{2}$ = 213.57	490.6
Ginster 0.6 < Ø < 2.5			$\frac{1 \cdot 67 \cdot 0.3}{2}$ = 10.05	$\frac{4 \cdot 296 \cdot 0.7}{2}$ = 414.4	$\frac{1 \cdot 563 \cdot 0.6}{2}$ = 168.9	$\frac{1 \cdot 1582 \cdot 0.3}{2}$ = 237.3	830.7
Ginster 2.5 < Ø < 7.5					$\frac{1 \cdot 563 \cdot 0.13}{2}$ = 36.6	$\frac{1 \cdot 1582 \cdot 0.43}{2}$ = 340.13	376.7

Tab. 5: Berechnung der Strauchbiomassen am Beispiel von Stichprobenpunkt Nr. 19

Am Stichprobenpunkt Nr. 19 wurden die Ginstersträucher der Stammdurchmesserklasse 1-1.5 cm und 3-5 cm abgeschnitten. Für die Bestimmung der Biomasse dieser beiden Klassen wur-

den die gewogenen Werte der abgeschnittenen Sträucher verwendet. Aus diesem Grund stimmen die Biomasse dieser Durchmesserklassen nicht mit den Tabellenwerten aus Tab. 4 überein. Für den Stichprobenpunkt Nr. 19 wurden folgende Resultate berechnet:

Biomasse $\varnothing < 0.6$ cm	Biomasse $0.6 < \varnothing < 2.5$ cm	Biomasse $2.5 < \varnothing < 7.5$ cm
$87 + 490.6 = 578 \text{ g/m}^2$	$35.7 + 830.7 = 866 \text{ g/m}^2$	377 g/m^2

Bei Stichprobenpunkt Nr. 19 waren 100% der Sträucher lebend. Für die Brandgutmodelle ist nur die kleinste Brandgutklasse bei lebendem Material von Interesse (BURGAN & ROTHERMEL, 1984). In diesem Fall ist die Biomasse von lebendem Material gleich 578 g/m^2 (oder 0.578 kg/m^2 als Eingabeeinheit für das Rothermelmodell), der Rest der interessierten Strauchbiomasse ist gleich Null.

Unter der Annahme, dass 80% der Sträucher lebend wären, betrügen die Biomassen:

- $0.8 \cdot 578\text{g} = 462\text{g}$ für lebende Sträucher mit Durchmesser < 0.6 cm
- $0.2 \cdot 578\text{g} = 116\text{g}$ für totes Material mit Durchmesser < 0.6 cm
- $0.2 \cdot 866\text{g} = 173\text{g}$ für totes Material mit Durchmesser $0.6-2.5$ cm
- $0.2 \cdot 377\text{g} = 75\text{g}$ für totes Material mit Durchmesser $2.5-7.5$ cm

4.3.3 Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis

Nach dem Wägen der Biomassen wurden für jeden Stichprobenpunkt einige Partikel der Brandguttypen **Streu**, **Kraut** und **Holz** ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass eine repräsentative Auswahl von runden, flachen, kleinen und grossen Partikeln jedes Brandguttypes gewählt wurde. Für runde Partikel (Äste, Gräser, Nadeln etc.) wurde der Durchmesser, für flache Partikel (Blätter etc.) die Dicke mittels einer digitalen Schublehre gemessen. Aus diesen Messungen wurden für jeden Brandguttyp das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis berechnet (Kap. 3.4 c). Waren z.B. bei der Streu oder den Kräutern ein Gemisch von runden und flachen Partikeln vorhanden, so wurden deren Werte des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses mit dem prozentualen, geschätzten Vorkommen gewichtet.

Bespiel, Stichprobenpunkt Nr. 19: Streu

Gemessen wurden folgende Werte für runde und flache Partikel der Streu:

	Runde Partikel	Flache Partikel
Durchmesser oder Dicke in [mm] mit der Schublehre gemessen	1.0, 1.42, 0.74, 1.08, 1.02	0.14, 0.11, 0.1, 0.23, 0.3, 0.09, 0.17, 0.23
Mittelwert	1.1 mm	0.17 mm
Prozentualer Anteil aller Partikel	30 %	70 %

Aus den beiden Mittelwerten lassen sich folgende Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisse berechnen:

$$\text{Runde Partikel: } \frac{4}{0.0011} = 3636 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Flache Partikel: } \frac{2}{0.00017} = 11765 \text{ m}^{-1}$$

Um das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis für die Streu des Stichprobenpunktes Nr. 19 zu erhalten, wurden diese beiden Zwischenergebnisse mit den jeweiligen prozentualen Anteilen gewichtet und zusammengezählt:

$$\sigma = 0.3 \times 3636 + 0.7 \times 11765 = 9326 \text{ m}^{-1}$$

Um das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis der **Sträucher** zu bestimmen, wurden ebenfalls stichprobenweise Durchmesser der Äste gemessen (Kap. 3.4 c). Der Mittelwert aus den Messungen wurde für die Berechnung des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses verwendet.

Beispiel Stichprobenpunkt Nr.19: Sträucher

Es wurden von den Ästen folgende Durchmesser gemessen:

0.9 mm, 1 mm, 1 mm, 1.2 mm, 1.4 mm, 1.4 mm, 1.6 mm, 1.7 mm

Mit dem erhaltenen Mittelwert von 1.3 mm wurde das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis für runde Partikel berechnet:

$$\sigma = \frac{4}{0.0013} = 3077 \text{ m}^{-1}$$

Zusammenfassung der Rohdaten für den Stichprobenpunkt Nr.19

Die Rohdaten bilden die Basis für die Berechnungen von Brandgutmodellen. Welche Werte der Rohdatenmatrix für den Stichprobenpunkt Nr.19 vorliegen, zeigt die folgende Auflistung. Die vollständige Rohdatenmatrix befindet sich im Anhang A1.

Holz; Biomasse $\varnothing < 0.6$ cm [kg/m^2]:	0
Holz; O/V-Verhältnis [m^{-1}]:	0
Holz; Tiefe der Brandgutschicht [m]:	0
Kraut; Biomasse $\varnothing < 0.6$ cm [kg/m^2]:	0.58
Kraut; O/V-Verhältnis [m^{-1}]:	7941
Kraut; Tiefe der Brandgutschicht [m]:	0.31
Streu; Biomasse $\varnothing < 0.6$ cm [kg/m^2]:	0.772
Streu; Biomasse $0.6 < \varnothing < 2.5$ cm [kg/m^2]:	0
Streu; O/V-Verhältnis [m^{-1}]:	9326
Streu; Tiefe der Brandgutschicht [m]:	0.05
Strauch; Biomasse $\varnothing < 0.6$ cm [kg/m^2]:	0
Strauch; Biomasse $0.6 < \varnothing < 2.5$ cm [kg/m^2]:	0
Strauch; Biomasse $2.5 < \varnothing < 7.5$ cm [kg/m^2]:	0
Strauch; Biomasse lebend, verholzt [kg/m^2]:	0.578
Strauch; O/V-Verhältnis [kg/m^2]:	3077
Strauch; Tiefe der Brandgutschicht [m]:	1.38

4.4 Berechnung von Brandgutmodellen

Aus den in Kap. 4.3 erstellten Rohdaten wurde nun für jeden Stichprobenpunkt ein Brandgutmodell berechnet. Mit diesem Schritt konnte die Datenmenge im Hinblick auf die statistischen Analysen reduziert werden. Zudem erhielt jeder Stichprobenpunkt diejenigen Brandgutdaten, welche für Berechnungen mit dem Rothermelmodell notwendig sind. Die Brandgutmodelle wurden nach dem BEHAVE-Subsystem *FUEL* (BURGAN & ROTHERMEL, 1984) berechnet. Dabei wurde für die Berechnung der einzelnen Brandgutparameter mit der Biomasse jedes Brandguttypes gewichtet. Im folgenden wird nun beschrieben, wie die einzelnen Brandgutparameter berechnet wurden. Im Kap. 4.4.5 sind alle Werte der Brandgutmodelle jedes Stichprobenpunktes aufgeführt.

4.4.1 Biomasse (m)

Die Biomasse enthält in einem Brandgutmodell fünf Brandgutparameter. Dies sind die Biomassen der Brandgutklassen Durchmesser <0.6 cm, Durchmesser 0.6-2.5 cm, Durchmesser 2.5-7.5 cm, lebend krautig und lebend verholzt. Da die Bodenvegetation im Winterhalbjahr pausiert, sind keine lebenden Kräuter und Gräser vorhanden. Die Biomasse von lebendem, krautigem Material beträgt bei allen Stichprobenpunkten Null. Die Brandgutklasse lebend krautig wird in den folgenden Analysen nicht mehr erwähnt.

Es wurden demzufolge vier Brandgutparameter für die Biomasse berechnet:

1. Biomasse Durchmesser <0.6 cm:

Die Biomassen der kleinen Partikel der vier Brandguttypen Holz, Kraut, Streu, Strauch wurden zusammengezählt.

$$m_{\varnothing < 0.6 \text{ cm}} = \sum_{i=1}^4 m_i \quad (21)$$

wobei

- m_1 = Biomasse von Holz mit Durchmesser <0.6 cm
- m_2 = Biomasse von Kraut mit Durchmesser <0.6 cm
- m_3 = Biomasse von Streu mit Durchmesser <0.6 cm
- m_4 = Biomasse von Sträucher mit Durchmesser <0.6 cm

Beispiel Stichprobenpunkt Nr.19:

$$m_{\varnothing < 0.6 \text{ cm}} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 = 0 + 0.58 + 0.772 + 0 = 1.352 \text{ kg/m}^2$$

2. Biomasse 0.6 < \varnothing < 2.5:

Für diesen Parameter wurden die Biomassen der Brandgutklassen 0.6 < \varnothing < 2.5 von Streu und Sträuchern zusammengezählt.

Am Stichprobenpunkt Nr. 19 wurde kein Brandgut dieser Klassen erhoben. Man erhält den Wert $m_{0.6 < \varnothing < 2.5} = 0 \text{ kg/m}^2$

3. Biomasse 2.5 < \varnothing < 7.5:

Diese Brandgutklasse ist nur bei den Sträuchern vorhanden. Die Werte konnten deshalb gleich aus der Rohdatenmatrix übernommen werden.

Auch für diese Brandgutparameter erhält man bei Punkt Nr. 19 den Wert 0 kg/m^2 .

4. Biomasse lebend verholzt:

Diese Klasse ist auch nur bei den Sträuchern vorhanden. Die Biomassen konnten ebenfalls aus der Rohdatenmatrix übernommen werden.

Bei Stichprobenpunkt Nr. 19 ergibt dies:

$$m_{\text{lebend verholzt}} = 0.578 \text{ kg/m}^2$$

4.4.2 Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (σ)

Die Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisse der einzelnen Brandguttypen wurden mit den entsprechenden Biomassen gewichtet. Da nur das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis für Material mit Durchmesser <0.6 cm gemessen worden war, wurde auch nur mit der Biomasse der Brandgutklasse Durchmesser <0.6 cm gewichtet.

Nach BURGAN & ROTHERMEL (1984) lässt sich ein allgemeines Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis aus folgender Formel berechnen:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i \cdot \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^4 m_i \cdot \sigma_i} \quad (22)$$

- wobei:
- m_1 = Biomasse von Holz mit Durchmesser <0.6 cm
 - m_2 = Biomasse von Kraut mit Durchmesser <0.6 cm
 - m_3 = Biomasse von Streu mit Durchmesser <0.6 cm
 - m_4 = Biomasse von Sträucher mit Durchmesser <0.6 cm
 - σ_1 = Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von Holz
 - σ_2 = Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von Kraut
 - σ_3 = Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von Streu
 - σ_4 = Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von Strauch

Beispiel Stichprobenpunkt Nr. 19:

Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis des Stichprobenpunktes Nr. 19 berechnet sich nur aus den Werten von Kraut und Streu, weil bei den Sträuchern die Biomasse mit Durchmesser <0.6 cm gleich Null ist.

Es wurden folgende Daten aus der Rohdatenmatrix verwendet:

	O/V-Verh. [m ⁻¹]	Biomasse <0.6 cm [kg/m ²]
Holz:	$\sigma_1 = 0$	$m_1 = 0$
Kraut:	$\sigma_2 = 7941$	$m_2 = 0.58$
Streu:	$\sigma_3 = 9326$	$m_3 = 0.772$
Strauch:	$\sigma_4 = 3077$	$m_4 = 0$

Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von Sträuchern wurde in diesem Beispiel nicht berücksichtigt, weil es nur mit der Biomasse von totem Material mit Durchmesser <0.6 cm gewichtet wurde, welches für diesen Stichprobenpunkt gleich Null ist. Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis der Sträucher wurde nur in die Rechnung einbezogen, wenn auch tote Sträucher am Stichprobenpunkt vorhanden waren. Für das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis von lebendem Brandgut wurde ein konstanter Wert angenommen (4920 m⁻¹).

Das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis des Stichprobenpunktes Nr. 19 berechnet sich wie folgt:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^4 m_i \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^4 m_i \cdot \sigma_i} = \frac{0 + 0.58 \cdot 7941^2 + 0.772 \cdot 9326^2 + 0}{0.58 \cdot 7941 + 0.772 \cdot 9326} = 8786 \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

4.4.3 Tiefe der Brandgutschicht (δ)

Für die Berechnung der Tiefe der Brandgutschicht (δ) eines Brandgutmodells wurde ähnlich vorgegangen, wie mit dem Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis. Es wurde ebenfalls mit der Biomasse gewichtet. Dies jedoch im Gegensatz zur vorhergehenden Berechnung mit den Biomassen aller Brandgutklassen.

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^4 \delta_i m_i}{m_{total}} \quad (23)$$

Wobei :

- m_{total} = totale Biomasse aller Brandgutklassen eines Stichprobenpunktes
- m_1 = Biomasse von Holz
- m_2 = Biomasse von Kraut
- m_3 = Biomasse aller Brandgutklassen von Streu
- m_4 = Biomasse aller Brandgutklassen von Sträuchern
- δ_1 = Tiefe von Holz
- δ_2 = Tiefe von Kraut

- δ_3 = Tiefe von Streu
 δ_4 = Tiefe von Sträuchern

Beispiel Stichprobenpunkt Nr. 19:

Für die Berechnung der Tiefe der Brandgutschicht wurde die Biomasse aller Brandgutklassen einbezogen.

	Tiefe	Biomasse aller Brandgutklassen	$\delta_i \times m_i$
Holz:	$\delta_1 = 0$	$m_1 = 0$	0
Kraut:	$\delta_2 = 0.31$	$m_2 = 0.58$	$0.31 \times 0.58 = 0.1798$
Streu:	$\delta_3 = 0.05$	$m_3 = 0.772$	$0.05 \times 0.772 = 0.0386$
Strauch:	$\delta_4 = 1.38$	$m_4 = 0.578$	$1.38 \times 0.578 = 0.798$
		$m_{\text{total}} = 1.93$	

Die Tiefe der Brandgutschicht beträgt:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^4 \delta_i m_i}{m_{\text{total}}} = \frac{0.1798 + 0.0386 + 0.798}{1.93} = 0.52 \text{ [m]}$$

4.4.4 Erlöschungsfeuchtigkeit des toten Materials (Mx)

Die Erlöschungsfeuchtigkeit ist ein Brandgutparameter der mittels einer empirischen Formel nach BURGAN & ROTHERMEL (1984) aus der Biomasse und der Tiefe jedes Brandguttyps berechnet wird.

In einem ersten Schritt wurde eine Erlöschungsfeuchtigkeit für jeden Brandguttyp aus der Biomasse des toten Materials, der Tiefe der Brandgutschicht und einigen Konstanten berechnet. Jeder Wert wurde, wie bei der Berechnung der Tiefe, mit der entsprechenden Biomasse gewichtet. Man erhielt am Schluss einen Wert für die Erlöschungsfeuchtigkeit eines Stichprobenpunktes. Die Erlöschungsfeuchtigkeit eines Brandguttyps (i) berechnet sich nach BURGAN & ROTHERMEL (1984) wie folgt:

$$Mx_i = 100 \left(0.12 + \frac{m_i}{106.7 \cdot \delta_i} \right) \quad (24)$$

- Wobei: m_i = Biomasse des toten Materials aller Brandgutklassen des Brandguttyps i
 δ_i = Tiefe eines Brandguttyps i

Die Werte für die Erlöschungsfeuchtigkeiten der vier Brandguttypen wurden mit den entsprechenden Biomassen gewichtet. Die Summe dieser Produkte dividiert durch die gesamte Biomasse ergab die Erlöschungsfeuchtigkeit des Brandgutes am Stichprobenpunkt.

$$Mx = \frac{\sum_{i=1}^4 Mx_i m_i}{m_{tot}} \quad (25)$$

- Wobei:
- 1 = Brandgutttyp Holz
 - 2 = Brandgutttyp Kraut
 - 3 = Brandgutttyp Streu
 - 4 = Brandgutttyp Strauch

Beispiel Stichprobenpunkt Nr. 19:

Für den Stichprobenpunkt Nr. 19 gibt es drei Werte für Mx_i .

	Tiefe	Biomasse des toten Materials aller Brandgutklassen	Mx_i
Holz:	$\delta_1 = 0$	$m_1 = 0$	kein Wert
Kraut:	$\delta_2 = 0.31$	$m_2 = 0.58$	13.75
Streu:	$\delta_3 = 0.05$	$m_3 = 0.772$	26.47
Strauch:	$\delta_4 = 1.38$	$m_4 = 0$	12
		$m_{total} = 1.35$	

Die Erlöschungsfeuchtigkeit lautet folgendermassen:

$$Mx = \frac{\sum_{i=1}^4 Mx_i m_i}{m_{tot}} = \frac{13.75 \cdot 0.58 + 26.47 \cdot 0.772 + 12 \cdot 0}{1.35} = 21 \%$$

4.4.5 Zusammenstellung

Aus den für jeden Stichprobenpunkt berechneten Brandgutmodellen entstand der folgende Datensatz. Er dient für die anschließende Datenanalyse.

Rec.Nr.	Biomasse <0.6 cm [kg/m ²]	Biomasse 0.6-2.5 cm [kg/m ²]	Biomasse 2.5-7.5 cm [kg/m ²]	Biomasse lebend verholzt [kg/m ²]	O/V-Verh [m ⁻¹]	Tiefe der Brandgut- schicht [m]	Erlöschungs- feuchtigkeit [%]	Stratum
1	0.523	0	0	0	3593	0.01	57	A
2	1.061	0.112	0	0	7228	0.05	40	A
3	1.353	0.495	0.159	0.352	3714	0.88	22	A
4	0.687	0	0	0	4039	0.05	24	A
5	0.985	0	0	0	14156	0.04	31	A
6	0.797	0.42	0.063	1.07	5977	1.56	18	A
7	1.433	0.514	0.137	0	6012	0.73	16	A
8	0.847	0	0	0	3926	0.17	14	A
9	0.994	0	0	0	8757	0.04	49	A
10	1.105	0	0	0	11396	0.05	31	A
11	1.617	0.396	0	0	2357	0.05	48	A
12	1.502	0.105	0	0	6356	0.07	26	A
13	0.707	0	0	0	6094	0.05	20	A
14	1.075	0.049	0	0.106	6600	0.19	25	A
15	0.975	0	0	0	14542	0.16	15	B
16	0.661	0.221	0.316	0	13914	1.27	13	B
17	0.895	0.143	0	0	8628	0.45	14	B
18	0.957	0	0	0.366	9960	0.71	14	B
19	1.352	0	0	0.578	8786	0.52	21	B
20	0.672	0.070	0	0	10089	0.08	18	B
21	0.830	0.049	0	0.310	11543	0.60	13	B
22	0.555	0.007	0	0.023	10084	0.18	14	B
23	1.227	0.083	0.009	0.217	15070	0.40	20	B
24	0.839	0.106	0	0.038	9553	0.25	16	B
25	0.942	0	0	0.066	8731	0.22	16	B
26	0.623	0	0	0.040	10374	0.05	22	C
27	1.085	0.646	0.309	0.779	10132	0.82	14	C
28	0.570	0.276	0	0.001	9299	0.08	19	C
29	1.030	0.028	0	0.034	10511	0.40	14	B
30	1.101	0.005	0	0.029	13789	0.35	16	B
31	0.936	0.100	0	0	9776	0.27	16	B
32	0.264	0.218	0	0	8280	0.08	17	D
33	0.670	0.002	0	0.006	12238	0.10	17	D
34	0.579	0.076	0	0	11016	0.09	17	C
35	0.596	0	0	0	8172	0.09	16	C
36	0.503	0.047	0	0	9736	0.11	16	C
37	0.407	0.235	0	0	10205	0.05	17	C
38	0.467	0.077	0	0.017	9693	0.09	15	C
39	0.466	0.146	0	0.098	9367	0.25	17	D
40	0.680	0.071	0	0	12109	0.08	15	D
41	0.527	0.146	0	0	11488	0.08	18	C
42	0.649	0.107	0	0	9874	0.09	19	C
43	0.516	0	0	0.001	10933	0.08	16	C
44	0.483	0.083	0	0	10000	0.05	23	C
45	0.583	0.079	0.014	0.076	9515	0.30	17	D
46	0.378	0.054	0	0.004	10055	0.08	16	C
47	0.471	0.057	0	0.041	9106	0.15	17	D
48	0.262	0.016	0	0.022	12542	0.11	13	D
49	0.534	0	0	0.006	11167	0.04	25	D
50	0.514	0.051	0	0.059	7271	0.17	18	D
51	0.415	0	0	0	12317	0.07	16	D
52	0.727	0	0	0	12172	0.09	17	D
53	0.607	0	0	0	10329	0.13	15	D
54	0.759	0	0	0.012	12306	0.10	17	D

Tab. 6: Datensatz der Brandgutdaten von den 54 Stichprobenpunkten

4.5 Datenanalyse

Für jeden der 54 Stichprobenpunkte wurden im vorangegangenen Kapitel Brandgutmodelle erstellt. Um für ähnliche Waldflächen (Straten) ein einheitliches Brandgutmodell zu erhalten, müssen die Brandgutmodelle der in der Fläche vorkommenden Stichprobenpunkte zusammengefasst werden. Dabei müssen die Stichprobenpunkte einander ähnlich sein. Ob die Brandgutmodelle der Stichprobenpunkte innerhalb der gleichen Straten Ähnlichkeiten aufweisen, muss zuerst mit Unterscheidungsanalysen untersucht werden. Dazu wurde eine Diskriminanzanalyse zur Untersuchung und Überprüfung der Stratenunterschiede durchgeführt.

Eine weitere Möglichkeit, die ähnlichsten Stichprobenpunkte zu einem Brandgutmodell zusammenzufassen, bietet die Bildung von Gruppen mittels Clusteranalyse. Dabei werden, mit vorgegebenem Fusionsalgorithmus, die ähnlichsten Objekte gruppiert. Die 54 Stichprobenpunkte wurden unabhängig der Stratenzugehörigkeit mit der Clusteranalyse zu Gruppen zusammengefasst. Die daraus gebildeten optimalen Gruppen konnten mit den bereits bestehenden Straten verglichen werden.

Der Datensatz in Tab. 6 bildet die Grundlage für die erwähnten statistischen Untersuchungen. Um die Brandgutdaten zu analysieren, müssen sie zuerst aufbereitet werden. Durch eine Standardisierung werden sie in eine Form gebracht, welche den Vergleich aller Variablen erlaubt. In einem weiteren Schritt werden Ausreisser der Stichproben mittels einer Clusteranalyse bestimmt und eliminiert. In Kap. 3.8 sind die Grundlagen der verwendeten Analysemethoden beschrieben.

4.5.1 Datenaufbereitung

Die Daten aus Tab. 6 haben verschiedene metrische Einheiten und bewirken deshalb eine unterschiedliche Gewichtung der Analysen. Ähnliches passiert, wenn zwei Variablen hoch korrelieren und daher fast das Gleiche aussagen. Bevor mit den Daten aus der Stichprobenerhebung Analysen gemacht werden, müssen folgende Schritte vorgenommen werden:

- a) Ausschluss hoch korrelierter Variablen
- b) Standardisierung des Datensatzes

a) Ausschluss korrelierter Variablen

Bei einer hohen Korrelation zweier Variablen wird die Information der einen Variable grösstenteils durch die Information der anderen wiedergegeben. Nach BACKHAUS et al. (1994) soll bei Korrelationen >0.9 eine Variable eliminiert werden.

Die Korrelationsmatrix (Tab. 7) der Variablen der Brandgutdaten enthält keine solch hohen Korrelationen. Es wurden demzufolge alle Variablen für die Analysen benutzt.

	Biomasse <0.6 cm	Biomasse 0.6-2.5 cm	Biomasse 2.5-7.5 cm	Biomasse verholzt	Oberflächen- zu-Vol.- Verhältnis	Tiefe der Brandgut- schicht	Erlöschungs- feuchtigkeit
Biomasse <0.6 cm	1	0.332	0.220	0.271	-0.254	-0.311	0.278
Biomasse 0.6-2.5 cm		1	0.686	0.490	-0.333	0.571	-0.010
Biomasse 2.5-7.5 cm			1	0.410	0.002	0.693	-0.143
Biomasse verholzt				1	-0.131	0.747	-0.160
Oberflächen-zu- Vol.-Verhältnis					1	-0.032	-0.409
Tiefe der Brandgutschicht						1	-0.308
Erlöschungs- feuchtigkeit							1

Tab. 7: Korrelationsmatrix der erhobenen Brandgutparameter

b) Standardisierung

Die verschiedenen Variablen enthalten unterschiedliche Einheiten, wie z.B. [kg/m²], [m] oder [m⁻¹]. Um diese differenzierten Masse miteinander zu vergleichen, müssen sie einander angepasst sein, d. h. sie müssen gleiche Wertniveau aufweisen. Dies erreicht man durch eine sog. Standardisierung, einer Transformation der Variablen X zu einer Variablen Z.

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \quad (26)$$

mit: z_i = i-ter Wert der „neuen“ Variablen Z
 x_i = i-ter Wert der „alten“ Variablen X
 \bar{x} = Arithmetisches Mittel von X
 s_x = Standardabweichung von X

(BAHRENBERG et al. 1990)

Der Mittelwert aller Variablen der 54 Stichprobenpunkte ist jetzt gleich Null, die Standardabweichung gleich 1.

Die Datenmatrix der standardisierten Werte ist im Anhang A1 zu finden.

4.5.2 Eliminierung von Ausreißern

Als Ausreisser werden die Stichprobenpunkte bezeichnet, deren Variablenwerte stark von den anderen Variablen abweichen, d.h. das Distanzmass zu allen anderen Punkten ist sehr gross. Sie können einerseits bei der Datenanalyse zu grossen Verzerrungen führen. Andererseits beeinflussen sie die Resultate eines Brandgutmodells durch die extremen Werte. Ausreisser können durch Fehler während der Datenerhebung entstehen. Sie können aber auch zu Stande kommen, wenn die Untersuchungsfläche sehr heterogen ist oder der Stichprobenpunkt an einen extremen, nicht repräsentativen Ort fällt (z.B. viele Sträucher, örtlich grosse Laubanhäufungen, etc.).

Mit dem *Single-Linkage-Verfahren* der Clusteranalyse (Kap. 3.8.1) können solche Ausreisser eliminiert werden.

Das an den Felddaten durchgeführte *Single-Linkage-Verfahren* führte zu folgendem Baumdiagramm:

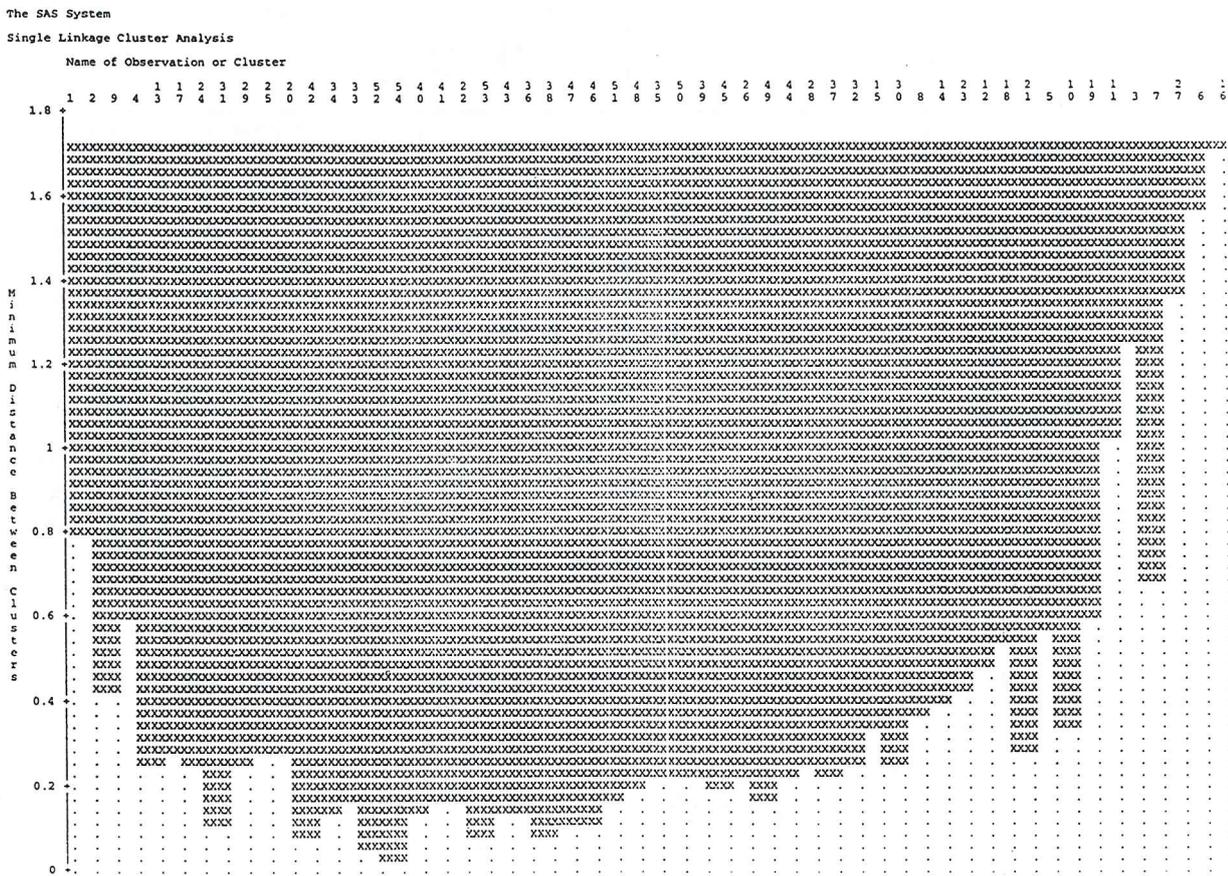


Abb. 26: Baumdiagramm der Clusteranalyse nach dem *Single-Linkage-Verfahren* (standardisierte Werte)

Auf der x-Achse sind die Nummern der Stichprobenpunkte aufgetragen und zwar so, dass sich Gruppenmitglieder als Nachbarn gegenüberstehen. Die y-Achse zeigt die bei einer Fusion entstehenden minimalen Distanzen zwischen den Gruppen. Je grösser die Distanz, desto unähnlicher sind die Gruppen und die dazu gehörenden Punkte untereinander. Die Punkte ganz rechts aussen sind Ausreisser, ihre Distanzen sind sehr gross. Die Stichprobenpunkte Nr. 7 und Nr. 3 sind sich noch relativ nahe. Doch dieser „Minicluster“ bildet auch einen Ausreisser. Alle Punkte und Minicluster mit einer normierten, minimalen Distanz >1 wurden eliminiert.

Mit dem *Single-Linkage-Verfahren* wurden folgende Punkte als Ausreisser ermittelt:

3, 6, 7, 11, 16, 27

Diese Punkte werden bei folgenden Analysen nicht mehr berücksichtigt. Es fällt auf, dass sich die Punkte 3, 6, 7, 11 alle im Stratum Nadelwald befinden.

4.5.3 Analyse von Stratenunterschieden

Jeder Stichprobenpunkt gehört einem in Kap. 4.2.1 definierten Stratum an. Um zu untersuchen, ob sich die vier Straten in bezug auf die sieben Variablen (Biomasse für Durchmesser <0.6 cm, Biomasse für Durchmesser 0.6-2.5 cm, Biomasse für Durchmesser 2.5-7.5 cm, Biomasse lebend verholzt, Tiefe der Brandgutschicht, Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und Erlöschungsfeuchtigkeit) jedes Stichprobenpunktes unterscheiden, wurde eine Diskriminanzanalyse (Kap. 3.8.2) durchgeführt. BACKHAUS et al. (1994) gibt zur Anwendung einer Diskriminanzanalyse folgende Empfehlungen:

- Der Umfang der Stichprobe sollte wenigstens doppelt so gross sein wie die Anzahl der Merkmalsvariablen. Im konkreten Fall beträgt der Umfang der Stichprobe 48 und die Anzahl der Variablen sieben.
- Die Anzahl der Merkmalsvariablen sollte grösser sein als die Anzahl der Gruppen. Mit sieben Variablen und vier Gruppen (Straten) ist neben der ersten auch diese Empfehlung erfüllt.

Die einbezogenen Variablen sind:

- **Unabhängige, metrische Variablen:**
 - Biomasse für Durchmesser <0.6 cm
 - Biomasse für Durchmesser 0.6-2.5 cm
 - Biomasse für Durchmesser 2.5-7.5 cm
 - Biomasse lebend verholzt
 - Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis
 - Tiefe der Brandgutschicht
 - Erlöschungsfeuchtigkeit
- **Abhängige, kategorialen Variablen:**
 - Stratum A (Nadelwald)
 - Stratum B (Waldbrandflächen)
 - Stratum C (genutzter Kastanienwald)
 - Stratum D (Kastanien-Hangniederwald)

Es entstanden drei Diskriminanzfunktionen. Die Trennkraft (Güte) für die Unterschiedlichkeit der Straten sieht folgendermassen aus:

Diskriminanzfunktion	kanonische Korrelation	Eigenwert	Likelihood Ratio	Prob > F
1	0.876281	3.3079	0.07237859	0.0001
2	0.810187	1.9104	0.31179923	0.0001
3	0.30414	0.1020	0.90745412	0.5455
Wilks' Lambda = 0.07237859				

Tab. 8: Ergebnisse der Diskriminanzanalyse mit den Ausgangsstraten A, B, C und D

Die Diskriminanzfunktionen 1 und 2 weisen auf eine eindeutige Trennung gewisser Straten hin. Die kanonische Korrelation ist mit über 0.8 beide Male sehr hoch. Anders sieht es bei der Funktion 3 aus. Die kanonische Korrelation von 0.30414 signalisiert, dass sich offenbar zwei Straten sehr schlecht unterscheiden lassen.

Die Klassierung jedes einzelnen Stichprobenpunktes im folgenden SAS-Output zeigt deutlich, welche Straten sich schlecht trennen. Die Sterne geben an, welche Punkte falsch klassiert wurden.

RECNO	From STRATUM	Classified into STRATUM	Posterior Probability of Membership in STRATUM:				
			A	B	C	D	
1	A	A	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
2	A	A	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
4	A	A	0.9985	0.0000	0.0009	0.0006	
5	A	A	0.4551	0.1740	0.1610	0.2099	
8	A	A	0.9906	0.0072	0.0010	0.0012	
9	A	A	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
10	A	A	0.9964	0.0026	0.0005	0.0005	
12	A	A	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
13	A	A	0.8944	0.0018	0.0603	0.0435	
14	A	A	0.9953	0.0043	0.0002	0.0001	
15	B	B	0.0001	0.8083	0.0455	0.1461	
17	B	B	0.0000	0.9999	0.0000	0.0001	
18	B	B	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	
19	B	B	0.0032	0.9953	0.0006	0.0009	
20	B	C	*	0.0010	0.0101	0.5909	0.3980
21	B	B		0.0000	0.9990	0.0001	0.0009
22	B	D	*	0.0000	0.0614	0.2377	0.7008
23	B	B		0.0000	0.9749	0.0022	0.0229
24	B	B		0.0011	0.8136	0.0912	0.0941
25	B	B		0.1360	0.7692	0.0324	0.0623
26	C	D	*	0.0024	0.0030	0.4694	0.5252
28	C	C		0.0000	0.0004	0.9285	0.0711
29	B	B		0.0000	0.9999	0.0000	0.0001
30	B	B		0.0000	0.9997	0.0000	0.0002
31	B	B		0.0013	0.9861	0.0051	0.0075
32	D	C	*	0.0000	0.0000	0.8551	0.1449
33	D	D		0.0001	0.0238	0.3197	0.6565
34	C	C		0.0000	0.0054	0.5311	0.4635
35	C	D	*	0.0073	0.0136	0.4050	0.5741
36	C	D	*	0.0000	0.0046	0.4467	0.5487
37	C	C		0.0000	0.0000	0.8878	0.1121
38	C	C		0.0000	0.0009	0.5709	0.4282
39	D	C	*	0.0000	0.0205	0.5530	0.4265
40	D	C	*	0.0001	0.0100	0.5393	0.4507
41	C	C		0.0000	0.0009	0.7122	0.2869
42	C	C		0.0006	0.0087	0.6666	0.3242
43	C	D	*	0.0000	0.0026	0.3486	0.6488
44	C	C		0.0001	0.0008	0.6288	0.3703
45	D	D		0.0000	0.0047	0.0406	0.9547
46	C	D	*	0.0000	0.0004	0.4785	0.5211
47	D	D		0.0000	0.0057	0.4457	0.5486
48	D	D		0.0000	0.0002	0.2528	0.7470
49	D	D		0.0007	0.0019	0.4139	0.5835
50	D	D		0.0016	0.0183	0.4657	0.5144
51	D	D		0.0000	0.0007	0.2957	0.7036
52	D	D		0.0004	0.0343	0.3397	0.6256
53	D	D		0.0002	0.0351	0.2927	0.6721
54	D	D		0.0004	0.0545	0.3285	0.6166

* Misclassified observation

Abb. 27: Klassifikationsresultate der Diskriminanzanalyse

Die Klassifikationsresultate zeigen, dass fast nur Punkte von Stratum C nach D oder umgekehrt umklassiert werden. Eine Ausnahme sind die Stichprobenpunkte Nr. 20 und 22. Sie werden von Stratum B nach C bzw. D klassiert. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl Beobachtungen und die prozentualen Anteile der richtig klassierten Stichprobenpunkte in jedem Stratum.

	A	B	C	D	Total
A	10 100.00%	0 0.00%	0 0.00%	0 0.00%	10 100.00%
B	0 0.00%	11 84.62%	1 7.69%	1 7.69%	13 100.00%
C	0 0.00%	0 0.00%	7 58.33%	5 41.67%	12 100.00%
D	0 0.00%	0 0.00%	3 23.08%	10 76.92%	13 100.00%
Total %	10 20.83%	11 22.92%	11 22.92%	16 33.33%	48 100.00

Tab. 9: Klassifikationsmatrix mit vier Straten

Gesamthaft wurden 79% aller Punkte richtig klassiert.

Aus den Ergebnissen dieser Analysen können die beiden Straten C und D zu einem neuen Stratum Z zusammengefasst werden. Obwohl die beiden Punkte Nr. 20 und 22 grössere Ähnlichkeiten zum Stratum Z aufweisen, können sie aus folgendem Grund nicht dazu gezählt werden. Die Fusion der Punkte von Stratum C und D hat auch eine Fusion der Flächen dieser beiden Straten zur Folge. D.h. aus zwei Waldflächen wird eine, der das gleiche Brandgutmodell zugewiesen wird. Da die Punkte Nr. 20 und 22 nicht in der neuen Waldfläche (Stratum Z) liegen, sondern zum Stratum der ehemaligen Waldbrandflächen gehören, dürfen diese Werte nicht für die Berechnungen des Brandgutmodells für Stratum Z verwendet werden. Die Punktverteilung auf die veränderten Straten sieht wie folgt aus:

	A (wie bisher) Nadelwald	B (wie bisher) Waldbrandflächen	Z (Fusion von C u. D) Kastanienwald
Punkte	1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 14	15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31	26, 28, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54

Tab. 10: Punktverteilung der drei Straten A, B, Z

Für die Analysen im nächsten Unterkapitel wurde mit den Punktverteilungen der Straten A (Nadelwald), B (Waldbrandflächen) und Z (Kastanienwald) gemäss Tab. 10 gearbeitet.

4.5.4 Strukturen innerhalb der Straten

Die Strukturen zwischen den Straten wurden im vorhergehenden Kapitel untersucht und die nötigen Änderungen vorgenommen. In einem weiteren Schritt geht es nun darum, die Strukturen innerhalb der Straten Nadelwald, Waldbrandflächen und Kastanienwald (A; B und Z) zu untersuchen. Sie geben Aufschluss über die Homogenität einer Fläche in bezug auf das Brandgut. Je mehr die Punkte innerhalb einer Fläche streuen, um so heterogener ist sie.

Unterschied der Punkte innerhalb eines Stratums

Um die Unterschiedlichkeit der Punkte innerhalb der Straten zu untersuchen, wurde die euklidische Distanz aller Punkte untereinander berechnet und daraus eine Distanzmatrix erstellt. Als Variablen dienten die Brandgutparameter Biomasse <0.6 cm, Biomasse 0.6-2.5 cm, Biomasse 2.5-7.5 cm, Biomasse lebend verholzt, Tiefe der Brandgutschicht, Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und Erlöschungsfeuchtigkeit. Von jedem Stratum wurden Mittelwert und Streuung der Distanzen der entsprechenden Punkte untereinander berechnet. Es entstanden folgende Werte:

	Mittelwert	Standardabweichung
Stratum A (Nadelwald)	2.79	1.05
Stratum B (Waldbrandflächen)	2.03	0.8
Stratum Z (Kastanienwald)	1.17	0.45

Der Mittelwert der euklidischen Distanzen zwischen den Punkten innerhalb eines Stratums wird von Stratum A über B nach Z immer kleiner. Dies bedeutet, dass sich die Punkte in Stratum Z (Kastanienwald) am ähnlichsten sind, weil sie die kleinsten euklidischen Distanzen aufweisen. Die Standardabweichung gibt an, wieviel die euklidischen Distanzen unter den Punkten eines Stratums streuen.

Um Aussagen über die Variation der einzelnen Brandgutparameter jedes Stichprobenpunktes innerhalb der drei Straten zu erhalten, wurden die jeweiligen, relativen Fehler berechnet. Dabei wurde die Standardabweichung (s) dividiert durch den Mittelwert der Werte jedes Brandgutparameters (\bar{x}) eines Stratums.

$$\text{relativer Fehler} = \frac{s}{\bar{x}}$$

Die Werte s und \bar{x} der Straten Nadelwald, Waldbrandflächen und Kastanienwald sind in Tab. 15 (S. 77) aufgeführt.

Beispiel:

Berechnung des relativen Fehlers der Stichproben von Stratum Z (Kastanienwald) für den Brandgutparameter Biomasse <0.6 cm:

$$\text{relativer Fehler} = \frac{\text{Standardabweichung}}{\text{Mittelwert}} = \frac{0.126}{0.53} = 0.238$$

Die Fehler jedes Brandgutparameters der drei Straten sind in der folgenden Tabelle (Tab. 11) dargestellt.

	Stratum A Nadelwald	Stratum B Waldbrandflächen	Stratum Z Kastanienwald
Biomasse <0.6 cm	0.29	0.22	0.238
Biomasse 0.6-2.5 cm	1.723	1.097	1.146
Biomasse 2.6-7.5 cm	0	3.606	5
Biomasse lebend verholzt	3.162	1.442	1.752
O/V-Verhältnis	0.472	0.2	0.138
Tiefe	0.819	0.523	0.608
Erlöschungsfeuchtigkeit	0.414	0.157	0.237

Tab. 11: Relative Stichprobenfehler der Brandgutparameter von Stratum A, B und Z

Die relativen Fehler des Stratums A (Nadelwald) sind bei allen Brandgutparameter grösser als bei den anderen Straten. Die grössere Streuung der Werte von Stratum A macht sich auch hier wieder bemerkbar. Dadurch, dass bei vielen Punkten die Werte für die Biomassen >0.6 cm und lebend verholzt gleich Null sind, sind die Fehler dieser Brandgutparameter enorm hoch.

Nach BROWN et al. (1982) sollten die prozentualen Fehler der Stichproben für die Biomassen um 20% liegen. Dies wird mit 29%, 22% und 24% für die Biomassen mit Durchmesser <0.6 cm mehr oder weniger erreicht. Was ebenfalls auffällt, sind die relativ grossen Abweichungen der Tiefen der Brandgutschicht.

Was bedeutet z.B. ein relativer Fehler von 0.6 für die Tiefe der Brandgutschicht von Stratum Z (Kastanienwald)?

Wenn im Stratum Z ein weiterer Stichprobenpunkt erhoben wird und eine Tiefe des Brandgutes von z.B. 10 cm gemessen wird, so ist mit einem Fehler von +/- 60% zu rechnen. D.h. die Tiefe der Brandgutschicht bewegt sich im Bereich von ca. 4-16 cm.

Die relativ hohen Fehler für die Tiefen der Brandgutschicht sind dadurch zustande gekommen, dass bei jedem Stratum einige Stichprobenpunkte mit hohen Werten den Mittelwert und die Standardabweichung verändern.

Hohe Tiefen der Brandgutschicht sind bei der Modellberechnung häufig durch die Werte der Sträucher entstanden. Besonders an Stichprobenpunkten mit Sträuchern, wo die Streu und die Krautschicht nicht so mächtig ist, wird die Tiefe der Brandgutschicht durch die Höhe der einzelnen Sträucher massiv gewichtet. Auch schon vereinzelt, unscheinbare Sträucher können die Tiefe der Brandgutschicht an einem Stichprobenpunkt stark beeinflussen. Im Stratum Kastanienwald z.B. ist folgende Situation einige Male vorgekommen.

Das Brandgut bestand häufig aus Streu mit einer Mächtigkeit von 7 cm. In den beiden Kreisen, wo die Straucherhebung stattfindet, wurden einige kahle Laubbäume gezählt, die aus 2-3 Zweigen bestanden und eine Höhe von 1.5 m hatten. Für die Berechnungen der Brandgutmodelle wurden die unterschiedlichen Tiefen der Brandgutschicht jedes Brandguttypes mit der entsprechenden Biomasse gewichtet (vgl. Kap. 4.4.3). Auch wenn die Biomasse der Sträucher z.B. zehn Mal kleiner ist als diejenige der Streu, so haben die 1.5 m Höhe doch einen grossen Einfluss auf die Tiefe des Brandgutmodells. Die berechnete Tiefe der Brandgutschicht beträgt

in diesem Fall $\frac{10 \cdot 7 \text{ cm} + 1 \cdot 150 \text{ cm}}{11} = 20 \text{ cm}$. Somit ist die 7 cm tiefe Brandgutschicht durch

das Vorkommen einiger weniger Sträucher an diesem Stichprobenpunkt fast verdreifacht worden.

Im folgenden Diagramm sind die berechneten Tiefen der Brandgutschicht mit und ohne Einfluss der Sträucher jedes Stichprobenpunktes von Stratum Z (Kastanienwald) dargestellt.

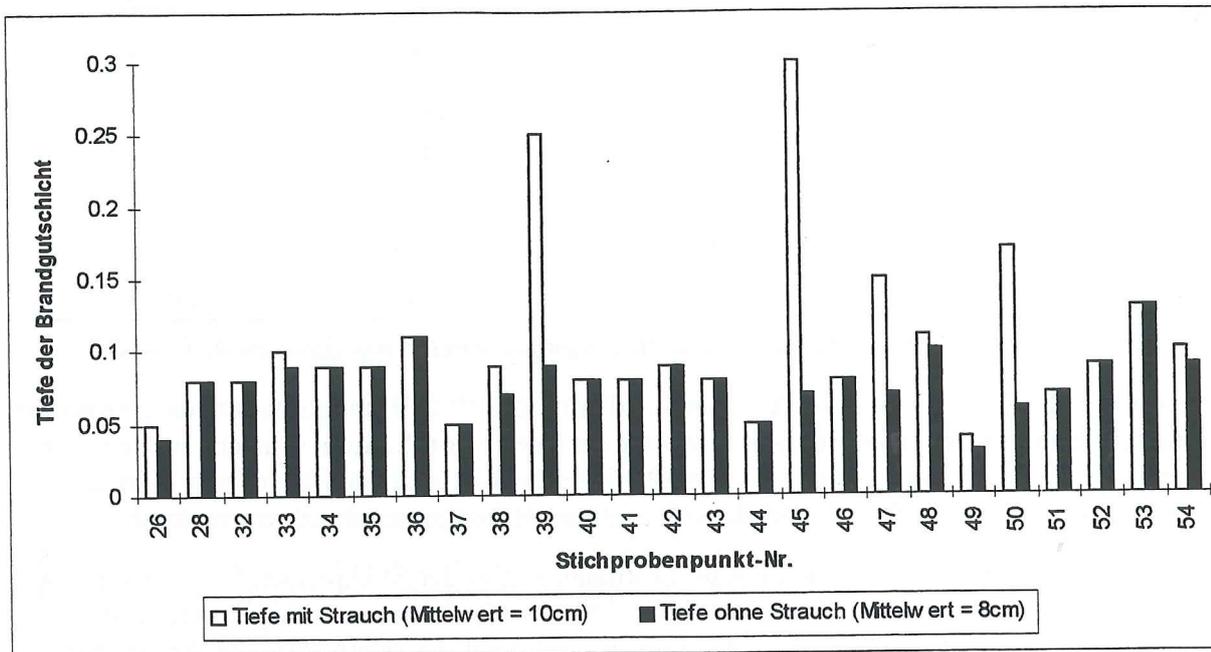


Abb. 28 Tiefen der Brandgutschicht der Punkte in Stratum Z mit und ohne Berücksichtigung der Sträucher

Massive Änderungen der Tiefen der Brandgutschicht sind lediglich an vier Stichprobenpunkten der Fall. Diese hohen Werte steigern den Mittelwert der Tiefe der Brandgutschicht vom Brandgutmodell für Kastanienwald um 2cm von 8 auf 10cm. Mehr als der Mittelwert wird die Streuung beeinflusst. Der relative Fehler für die Tiefe der Brandgutschicht ohne die Sträucher beträgt nur noch 0.26 anstelle von 0.6.

Es stellt sich nun die Frage, ob in oben erwähnten Situationen die Sträucher überhaupt erhoben werden sollen oder nicht. Ob nun mit oder ohne Sträucher die Tiefe erhoben wird, hat im Fall des Brandgutmodells für Kastanienwälder auf die Ausgabegrößen des Rothemmelmodells nicht einen grossen Einfluss.

Die Unterschiede in Mittelwert und Streuung mit und ohne Berücksichtigung der Strauchtiefen zeigt die folgende Tabelle:

	Mittelwert	Standardabweichung	relativer Fehler
Tiefe mit Sträucher berechnet	0.10	0.06	0.6
Tiefe ohne Sträucher berechnet	0.08	0.02	0.26

4.5.5 Gruppierungen

Im Kap. 4.5.3 wurden die bereits durch die Straten bestehenden Gruppen auf ihre Unterschiedlichkeit hin untersucht. Ergänzend dazu wird in diesem Unterkapitel von jedem einzelnen Punkt ausgegangen und mittels Clusteranalysen aus den einzelnen Punkten Gruppen gebildet. Dabei werden die gebildeten Straten nicht berücksichtigt. Es ist besonders von Interesse, ob sich den Straten ähnliche Gruppen bilden. Die Gruppierungen der Punkte wurde mit folgenden Variablen durchgeführt:

- a) mit den erhobenen sieben Brandgutparametern
- b) mit den berechneten Ergebnissen vom Rothermelmodell für jeden Stichprobenpunkt

a) Gruppierung aus erhobenen Brandgutparametern

Um die Stichprobenpunkte mit den sieben Brandgutparametern als Variablen zu gruppieren, wurde das Ward- oder Minimum-Varianz-Verfahren der Clusteranalyse angewendet. Dabei wurden die in Kap. 4.5.2 eliminierten Ausreisser nicht verwendet. Es entstand folgendes Baumdiagramm.

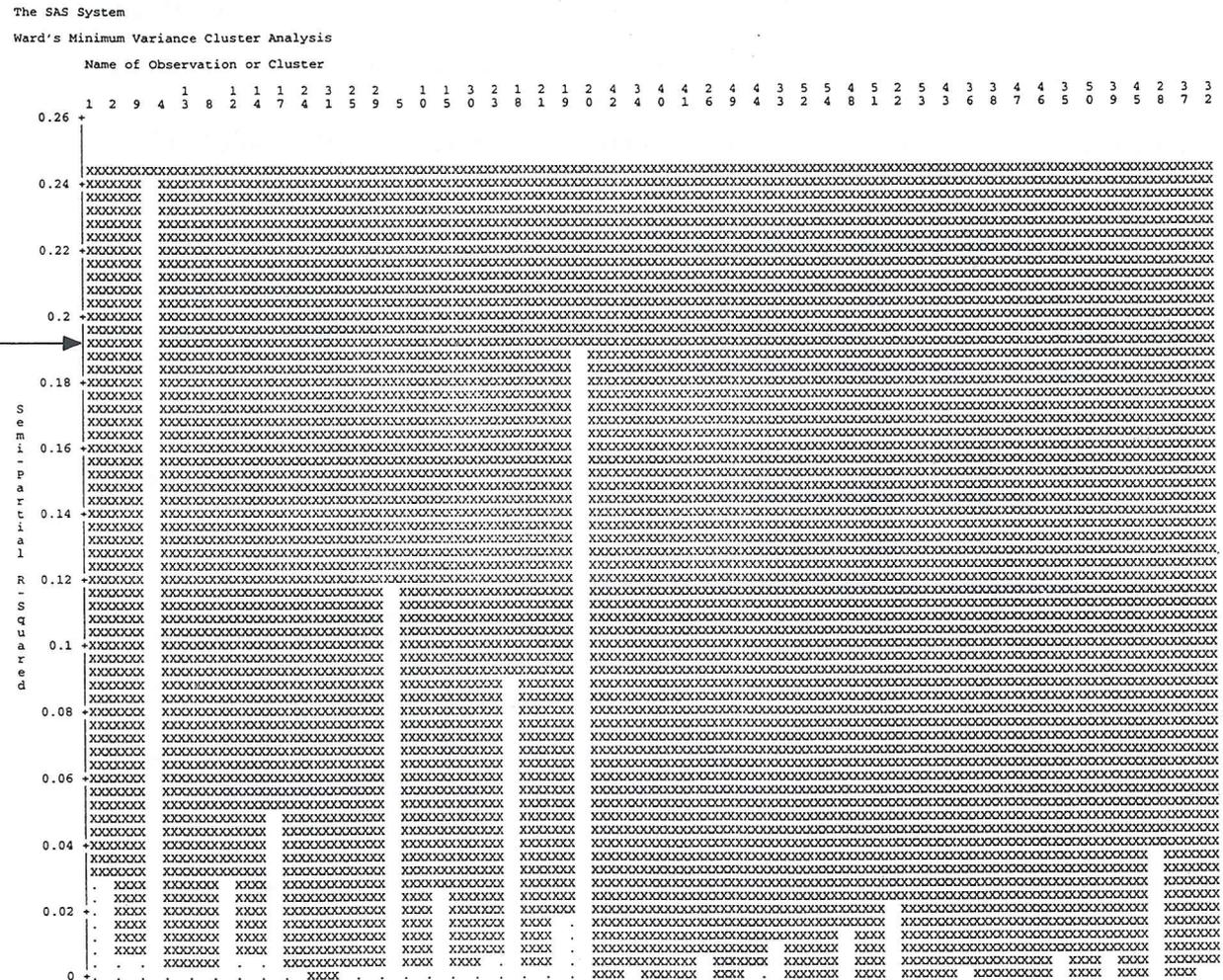


Abb. 29: Baumdiagramm der Clusteranalyse nach dem Ward-Verfahren, ohne Ausreisser und mit standardisierten Werten

Die Punkte 1, 2 und 9 bilden eine eigene Gruppe (Gruppe 1), welche erst im letzten Schritt des Fusionierungsprozesses mit den restlichen Punkten und Gruppen zusammenkommt. Eine wichtige Trennung erfolgt bei „R-Squared“ = 0.193 (Pfeil) zwischen den Punkten 19 und 20. Die Punkte von Nr. 20 an nach rechts werden alle zu einem ziemlich homogenem Cluster zusammengefügt (Gruppe 3). Die restlichen Punkte bilden eine weniger homogene Gruppe (Gruppe 2).

Es wurden folgende drei Hauptgruppen gebildet werden:

	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Stichprobenpunkte	1, 2, 9	4, 13, 8, 12, 14, 17, 24, 31, 25, 29, 5, 10, 15, 30, 23, 18, 21, 19	20, 42, 34, 40, 41, 26, 49, 44, 33, 52, 54, 48, 51, 22, 53, 43, 36, 38, 47, 46, 35, 50, 39, 45, 28, 37, 32

Tab. 12: Gruppen aus der Clusteranalyse mit den Brandgutparametern als Variablen

Die Gruppe 3 beinhaltet fast ausschliesslich Punkte der Straten C und D (Kastanienwald). Nur gerade Punkt Nr. 20 und 22 sind vom Stratum B (ehemalige Waldbrandflächen). Es fällt auf, dass die Punkte dieser Gruppe sehr homogen sind und sich klar von den anderen abgrenzen.

Die Gruppe 2 beinhaltet ausser Nr. 20 und 22 alle Punkte aus Stratum B. Zusätzlich wurden noch die Punkte 4, 13, 8, 12, 14, 5 und 10 dazu gruppiert, welche dem Stratum A (Nadelwald) angehören. Diese Gruppe ist nicht sehr homogen, es bilden sich verschiedene kleine Untergruppen.

Die drei Punkte der Gruppe 1 gehören alle dem Stratum A.

Die nähere Betrachtung der Punkte von Gruppe 2 weisen deutliche Differenzen zwischen den Punkten der Straten A (Nadelwald) und B (Waldbrandflächen) auf. Die Verteilung der Punkte von Gruppe 2 auf die Straten A und B sieht wie folgt aus:

Stratum A (Nadelwald): 4, 13, 8, 12, 14, 5, 10

Stratum B (ehemalige Waldbrandflächen): 15, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 29, 30, 31

Vergleicht man die Mittelwerte der Brandgutparameter der auf die beiden Straten verteilten Punkte untereinander, so erhält man folgendes Ergebnis:

	Mittelwert der Punkte 4, 5, 8, 10, 12, 13, 14 (Stratum A; Nadelwald)	Mittelwert der Punkte 15, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 29, 30, 31 (Stratum B; ehemalige Waldbrandflächen)
Biomasse <0.6	0.987	1.008
Biomasse 0.6-2.5	0.022	0.047
Biomasse 2.5-7.6	0	0.001
Biomasse lebend	0.015	0.149
O/V-Verhältnis	7510	10990
Tiefe	0.09	0.39
Erlöschungsfeuchtigkeit	24	15

Tab. 13: Unterschiede der Punkte von Stratum A und B der Gruppe 2

Die Biomassen sind praktisch gleich. Hingegen sind beim Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und bei der Erlöschungsfeuchtigkeit Unterschiede vorhanden, sowie ganz besonders bei der Tiefe der Brandgutschicht. Die Tiefe der Brandgutschicht von Stratum B ist vier mal höher als diejenige von Stratum A.

Obwohl alle diese Stichprobenpunkte der Gruppe 2 zugeordnet wurden, müssen für die Punkte von Stratum A (Nadelwald) andere Ausgaberesultate aus dem Rothermelmodell erwartet werden, als für die Punkte im Stratum B (ehemalige Waldbrandflächen), infolge der doch sehr

unterschiedlichen Tiefen der Brandgutschicht. Aus dieser Vermutung wurde deshalb eine Gruppierung mit den Ergebnissen des Rothermelmodells durchgeführt.

b) Gruppierung mit Rothermelergebnissen

Die Ergebnisse der Brandgutmodellierung fliessen in die Berechnungen mit dem Rothermelmodell ein. Punkte die in bezug auf die Brandgutdaten gleich gruppiert wurden, sollten für gleiche Umweltbedingungen (Hangneigung, Wind, Feuchtigkeit, etc.) ähnliche Ausgaberesultate vom Rothermelmodell erhalten. Demzufolge müssten mit den Punkten von Gruppe 2 ähnliche Ergebnisse entstehen. Um dies zu untersuchen wurde eine Clusteranalyse mit den Ausgabeparametern des Rothermelmodells als Variablen und allen Stichprobenpunkten gemacht. Es sollten dabei ähnliche Gruppen wie bei der vorangegangenen Analyse gebildet werden. Die Berechnungen mit dem Rothermelmodell wurden mit den sieben erhobenen Brandgutparametern, sowie den folgenden konstant gehaltenen Eingabegrössen durchgeführt.

O/V-Verhältnis $0.6 < \varnothing < 2.5$ cm:	357 m ⁻¹
O/V-Verhältnis $2.5 < \varnothing < 7.6$ cm:	98 m ⁻¹
O/V-Verhältnis lebend, krautig:	4920 m ⁻¹
O/V-Verhältnis lebend, verholzt:	4920 m ⁻¹
Totaler Mineralgehalt:	5.5 %
Effektiver Mineralgehalt:	1 %
Dichte der Partikel:	513 kg/m ³
Heizwert des Brandgutes:	18600 kJ/kg
Feuchtigkeit des toten Brandgutes:	10 %
Feuchtigkeit des lebenden Brandgutes:	70 %
Hangneigung:	0°
Windgeschwindigkeit:	0 m/s

Daraus wurden folgende Ausgabegrössen berechnet:

- Ausbreitungsrate (*rate of spread*)
- Flammenlänge (*flame length*)
- Feuerfrontintensität (*fireline intensity*)
- Tiefe der Flammenfront (*depth of flaming zone*)
- Wärmemenge (*heat per unit area*)
- Reaktionsintensität (*reaction intensity*)

Diese neuen Daten wurden gemäss Kap. 4.5.1 aufbereitet und die Ausreisser wie in Kap. 4.5.2 eliminiert.

Von diesen Variablen mussten zwei eliminiert werden, wegen einer Korrelationen > 0.9 (vgl. Kap. 4.5.1). Es blieben noch folgende Variablen:

- Ausbreitungsrate (*rate of spread*)
- Tiefe der Flammenfront (*depth of flaming zone*)
- Wärmemenge (*heat per unit area*)
- Reaktionsintensität (*reaction intensity*)

Mit dem *Single-Linkage-Verfahren* der Clusteranalyse wurde wiederum nach Ausreissern gesucht. In diesem Fall wurden die Stichprobenpunkte Nr. 3 und 16 eliminiert.

Aus dem *Ward-Verfahren* der Clusteranalyse bildeten sich folgende Gruppen:

Gruppe α	Gruppe β
6, 7, 19, 27, 18, 21, 29, 30, 8, 14, 15, 45, 23, 31, 24, 25, 17	1, 5, 9, 32, 37, 44, 49, 2, 26, 10, 51, 38, 41, 48, 52, 20, 42, 35, 34, 40, 43, 36, 4, 11, 12, 13, 28, 12, 39, 33, 54, 53, 47, 50

Tab. 14: Gruppen aus der Clusteranalyse mit den Rothermelergebnissen als Variablen

Aus den Rothermelergebnissen der Stichprobenpunkte werden nur noch zwei Gruppen (α und β) gebildet. Die Punkte von Gruppe 2 der vorangegangenen Clusteranalyse werden nicht mehr alle in die gleiche Gruppe gruppiert. Es zeigt sich, dass durch die Gruppierung mit den Rothermelergebnissen die Unterschiede der Punkte von Gruppe 2 (Tab. 13) erkannt werden. Die Tatsache, dass aus statistisch ähnlichen Brandgutmodellen unterschiedliche Rothermelergebnisse resultieren, ist auf Unterschiede in den Tiefen der Brandgutschicht zurückzuführen. Mit der euklidischen Distanz, als verwendetes Distanzmass der Clusteranalyse, wird nur der quadrierte Unterschied der Brandgutparameter zweier Brandgutmodelle aufsummiert. Es wird aber nicht differenziert, welche Brandgutparameter sich unterscheiden. Es spielt also keine Rolle, ob sich nun die Biomasse oder die Tiefe der Brandgutschicht z.B. um einen Faktor zwei unterscheiden. Eine verdoppelte Tiefe der Brandgutschicht hat aber auf die Ausgaberesultate des Rothermelmodells einen grösseren Einfluss, als eine mit dem Faktor zwei erhöhte Biomasse.

Zusammenfassend sind in Abb. 30 die Ergebnisse aus den Gruppierungsanalysen dargestellt.

Die Gruppe α enthält viele Punkte, die ebenfalls in Gruppe 2 vorkommen. Die Gruppe β übernimmt die Punkte von Gruppe 1 und enthält die meisten von Gruppe 3.

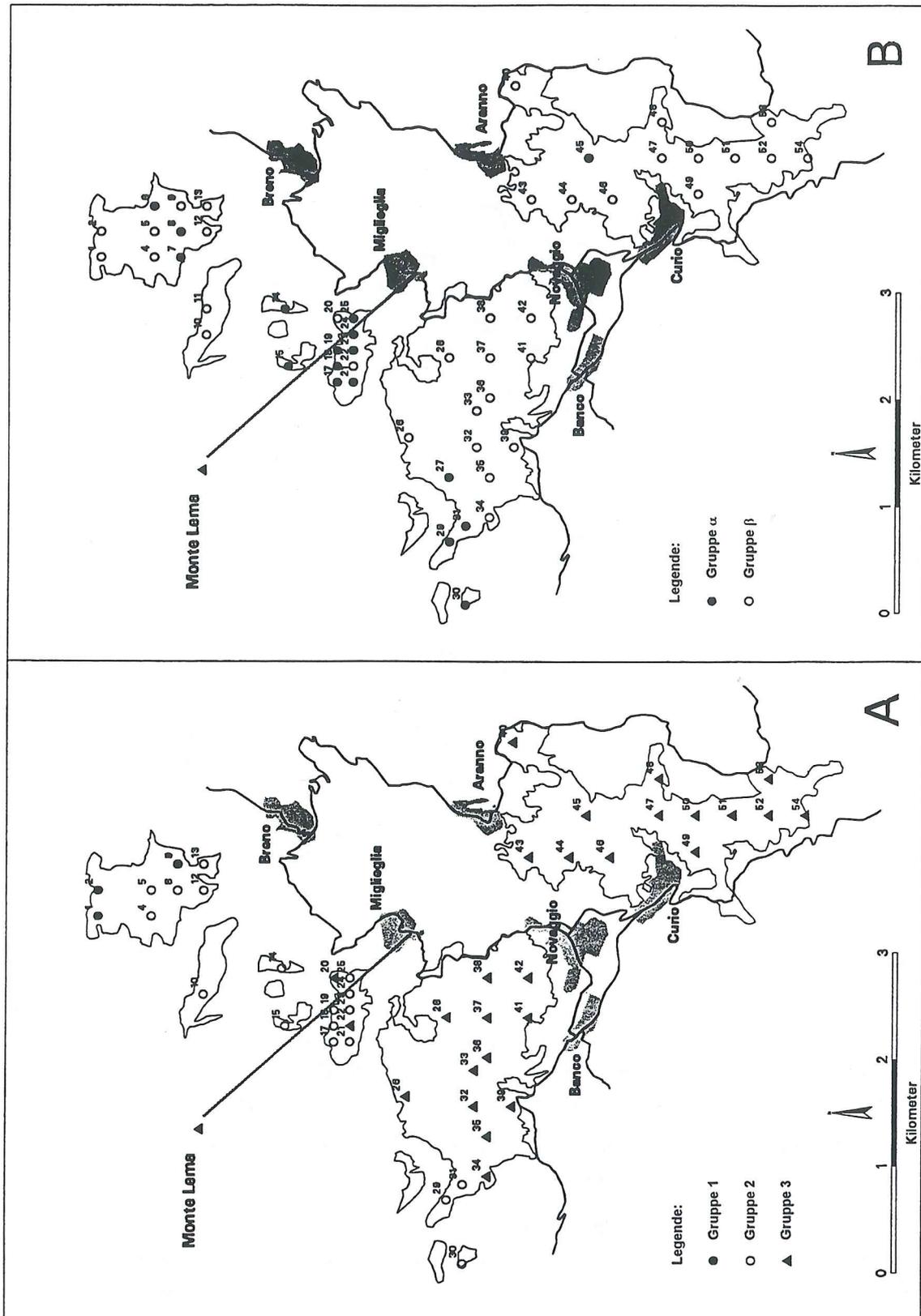


Abb. 30: A: Gruppierung der Stichprobenpunkte mit den erhobenen 7 Brandgutparametern als Variable
 B: Gruppierung der Stichprobenpunkte mit den Ergebnissen der Rothermelberechnung

Die Schnittmenge der sich ähnlichen Gruppen α und 2 ($\text{Gr.}\alpha \cap \text{Gr.}2$), sowie diejenige von Gruppe β und Gruppe 3 ($\text{Gr.}\beta \cap \text{Gr.}3$) sehen folgendermassen aus.

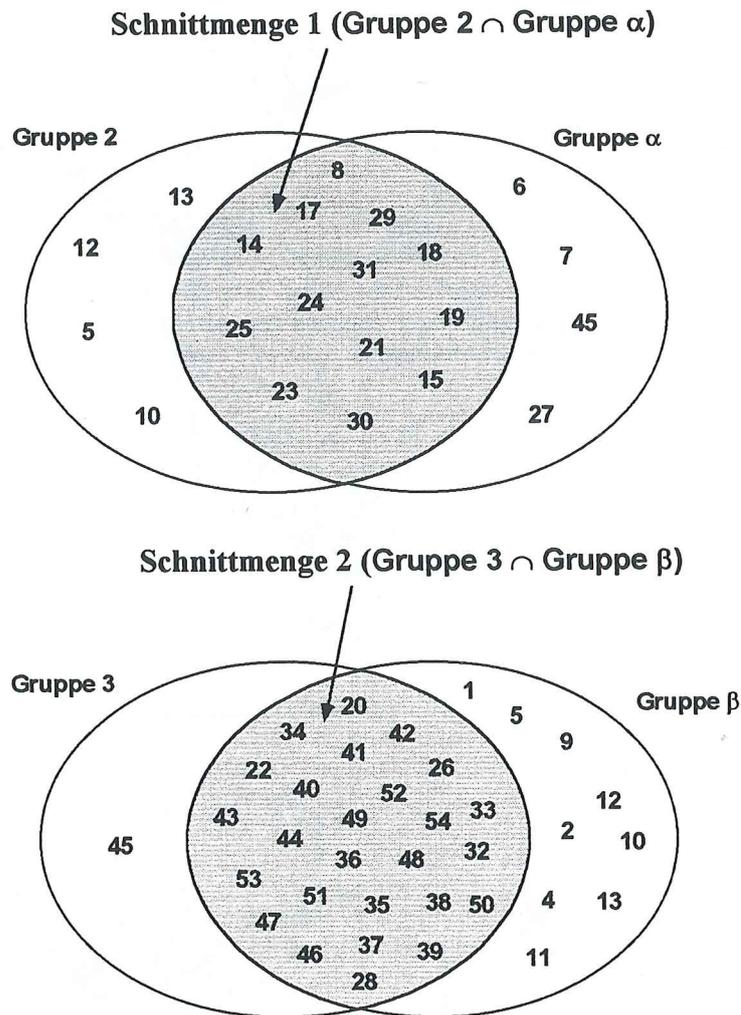


Abb. 31: Schnittmengen der Gruppen 2 und α , sowie der Gruppen 3 und β

Die Punkte von Schnittmenge 1 ($\text{Gr.}2 \cap \text{Gr.}\alpha$) entsprechen ausser Nr. 8 und 14 denjenigen von Stratum B (Waldbrandflächen). Die Punkte von Schnittmenge 2 ($\text{Gr.}3 \cap \text{Gr.}\beta$) sind ausser Nr. 20 und 22 im Stratum Z (Kastanienwald) vorhanden. Die Punkte ausserhalb der Schnittmengen sind entweder Ausreisser oder sie gehören zum Stratum A (Nadelwald), ausser Nr. 45.

Die oben durchgeführte Vereinigung führt mit wenigen Ausnahmen zur Einteilung der Punkte in die ursprünglichen Straten Nadelwald (A), Waldbrandflächen (B) und Kastanienwald (Z).

Daraus kann folgendes geschlossen werden:

Die Ergebnisse der Gruppierung der Stichprobenpunkte, unabhängig der vorhandenen Straten, mit den Ansätzen a) und b) bekräftigen die vor der Datenerhebung durchgeführte Stratifizierung. Die durch die Vereinigung der Gruppen aus a) und b) gebildeten Schnittmengen kommen den Straten Kastanienwald und Waldbrandflächen sehr nahe. Dies bestätigt die in der Stichprobenplanung durchgeführte Stratifizierung.

5. Resultate

Die verschiedenen Analysen zeigen, dass die Straten Nadelwald, Waldbrandflächen und Kastanienwald unterschiedliche Homogenität in bezug auf das Brandgut aufweisen.

Für die Straten Nadelwald, Waldbrandflächen und Kastanienwald wurden aus den entsprechenden Stichprobenpunkten Brandgutmodelle gebildet. Dabei bildete der Mittelwert der Brandgutparameter aller Punkte innerhalb eines Stratum die Bestandteile des Brandgutmodells für das entsprechende Stratum. Es entstanden Brandgutmodelle für Kastanienwald, ehemalige Waldbrandflächen und Nadelwald im Tessin. Sie beziehen sich alle auf die Fläche des Untersuchungsgebietes und werden im folgenden beschrieben. Zudem werden die jeweiligen Waldbestände und Baumarten in den Waldkarten beschrieben.

Bei der Datenerhebung wurde von den meisten Stichprobenpunkten Fotos gemacht. Einige davon sollen die Brandgutsituation der drei Brandgutmodelle veranschaulichen. Die Fotos dienen zusätzlich, um eines der drei Brandgutmodelle einer ähnlichen Brandgutsituation ausserhalb des Untersuchungsgebietes zuzuweisen.

5.1 Brandgutmodell Nadelwald

Das Brandgutmodell Nadelwald beschreibt die Brandgutsituation innerhalb des Stratum Nadelwald, mit den aufgeforsteten Nadelwaldflächen.

Auf den Waldkarten entspricht dies der Fläche folgender Waldbestände und Baumarten:

Waldbestand:	Alte und junge Pflanzungen
Baumart:	Mischwald mit Nadelbäumen dominant, sowie reiner Nadelwald

Folgende erhobene Parameter gehören zum Brandgutmodell Nadelwald:

Biomasse <0.6 cm [kg/m^2]:	0.95
Biomasse 0.6-2.5 cm [kg/m^2]:	0.03
Biomasse 2.5-7.5 cm [kg/m^2]:	0
Biomasse lebend verholzt [kg/m^2]:	0.01
O/V-Verhältnis [m^{-1}]:	7215
Tiefe der Brandgutschicht [m]:	0.07
Erlösungsfeuchtigkeit [%]:	32

Das Brandgutmodell Nadelwald ist mit Vorbehalt zu geniessen. Wie schon während der Datenanalyse (Kap. 4.5) bemerkt wurde, ist dieses Stratum sehr heterogen. Dies zeigt sich einmal dadurch, dass vier von sechs Ausreissern diesem Stratum angehören und dass die anderen 10 Punkte immer noch mehr streuen als die Punkte der beiden anderen Brandgutmodelle. Die aufgenommenen Fotos in diesem Stratum sind ebenfalls sehr unterschiedlich und schlecht miteinander vergleichbar. Betrachtet man die untersuchte Waldfläche oberhalb von Breno aus weiterer Entfernung, so ist die markante Heterogenität gut erkennbar. Verschiedene Aufforstungsstufen wechseln einander ab. Die Übergänge sind z. T. sehr abrupt. Diese Waldflächen bestehend aus jungen, dichten Fichtenpflanzungen und lockeren, älteren Douglasienbeständen müssen anhand der Analyseergebnisse als ungeeignet für Brandgutdatenerhebungen erachtet werden.

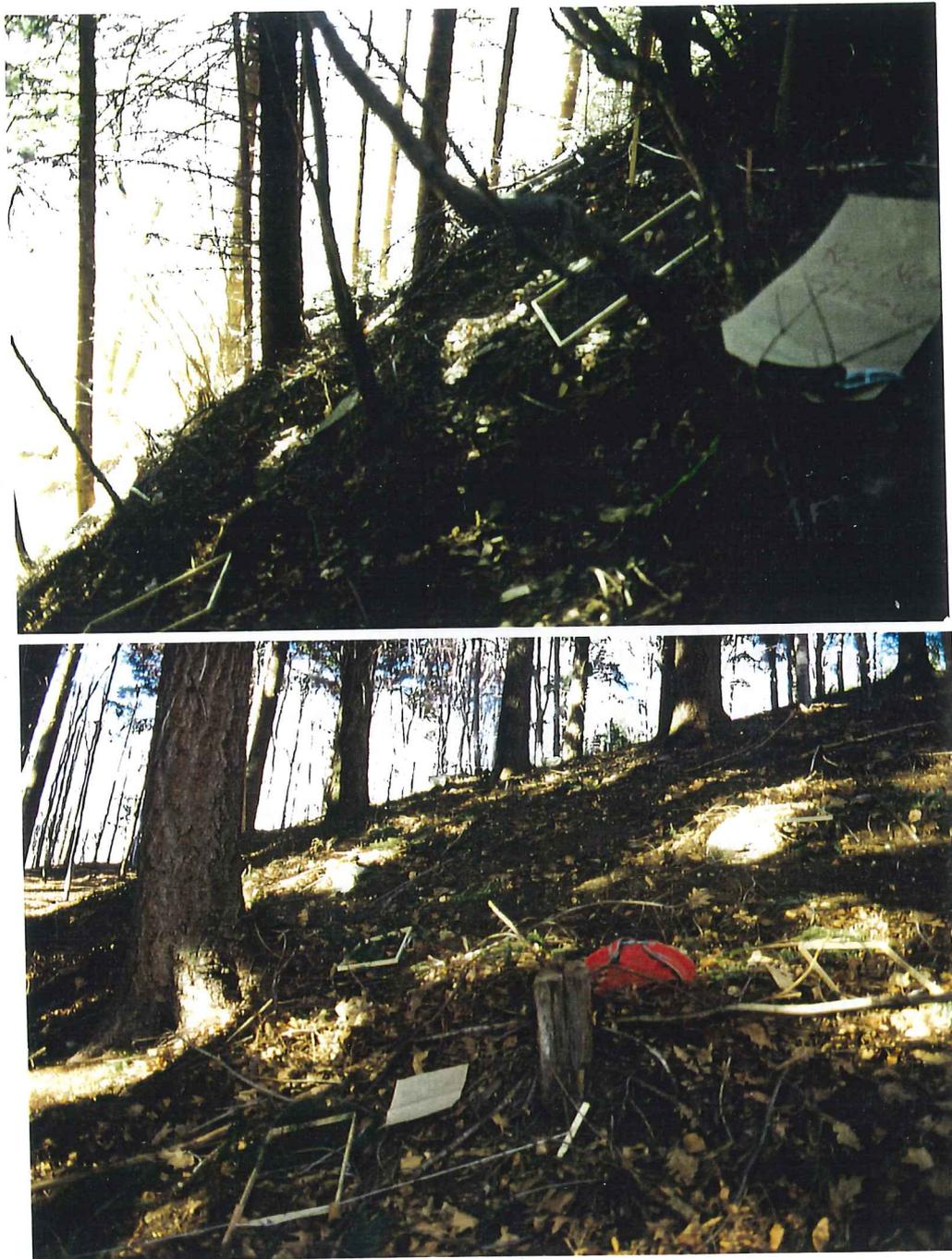


Abb. 32: Fotobeispiel für das Brandgutmodell Nadelwald

5.2 Brandgutmodell Waldbrandflächen

Dieses Modell entspricht der Situation des Brandgutes, in den ehemaligen Waldbrandflächen. Diese Flächen sind auf den Waldkarten als folgende Wald- und Vegetationstypen beschrieben:

Waldbestand: Alte Pflanzungen
 Baumart: Reiner Laubwald

Die erhobenen Daten für Brandgutmodell Waldbrandflächen lauten:

Biomasse <0.6 cm [kg/m^2]:	0.95
Biomasse 0.6-2.5 cm [kg/m^2]:	0.05
Biomasse 2.5-7.5 cm [kg/m^2]:	0
Biomasse lebend verholzt [kg/m^2]:	0.13
O/V-Verhältnis [m^{-1}]:	10851
Tiefe der Brandgutschicht [m]:	0.35
Erlöschungsfeuchtigkeit [%]:	16

Auf ehemals abgebrannten Flächen kommen im Tessin sehr viele Farne und Ginster vor. Im Winter bilden die ausgetrockneten Farne hervorragende Brennbedingungen. Der Ginster begünstigt mit seinen vorkommenden pflanzlichen Ölen ein Feuer zusätzlich. Hauptsächlich bestimmen Farn, Gräser und Ginster dieses Brandgutmodell. Die häufig vorkommende Tatsache, dass wiederholte Waldbrände im selben Gebiet die Brandgefahr reduzieren, trifft für das Tessin nicht zu. Im Gegenteil; je mehr Waldbrände auf einer Fläche vorkommen, desto feuergefährdeter wird sie.



Abb. 33: Fotobeispiel für das Brandgutmodell Waldbrandflächen

5.3 Brandgutmodell Kastanienwald

Das dritte Brandgutmodell umfasst die meisten Stichprobenpunkte und beschreibt die Brandgutsituation im Stratum Kastanienwald. In den Waldkarten sind diese Flächen folgendermassen kartiert worden:

Waldbestand: Produktiver Niederwald, Hangniederwald, Mittelwald, Hochwald
 Baumart: Kastanie

Das Brandgutmodell Kastanienwald umfasst folgende Daten:

Biomasse <0.6 cm [kg/m ²]:	0.53
Biomasse 0.6-2.5 cm [kg/m ²]:	0.07
Biomasse 2.5-7.5 cm [kg/m ²]:	0
Biomasse lebend verholzt [kg/m ²]:	0.02
O/V-Verhältnis [m ⁻¹]:	10383
Tiefe der Brandgutschicht [m]:	0.1
Erlöschungsfeuchtigkeit [%]:	18

Die Kastanienwälder sind in bezug auf das Brandgut ziemlich homogen. Sie sind für Brandguterhebungen optimal.



Abb. 34: Fotobeispiel für das Brandgutmodell Kastanienwald

5.4 Berechnungen mit dem Rothermelmodell

Um Vergleiche mit den anderen Modellen zu machen werden die Daten der drei Brandgutmodelle des Malcantone nochmals zusammengefasst.

	Modell A		Modell B		Modell C	
	Mittelwert	Stand. abw.	Mittelwert	Stand. abw.	Mittelwert	Stand. abw.
Biomasse <0.6 cm [kg/m ²]:	0.95	0.28	0.95	0.21	0.53	0.13
Biomasse 0.6-2.5 cm [kg/m ²]:	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.08
Biomasse 2.5-7.6cm [kg/m ²]:	0	0	0	0	0	0
Biomasse lebend verholzt [kg/m ²]:	0.01	0.03	0.13	0.18	0.02	0.03
O/V-Verhältnis [m ⁻¹]:	7215	3406	10851	2220	10383	1433
Tiefe der Brandgutschicht [m]:	0.07	0.06	0.35	0.18	0.1	0.06
Erlöschungsfeuchtigkeit [%]:	32	13	16	2	18	4

Tab. 15: Zusammenfassung der Werte der Brandgutparameter in den drei Modellen

Mit den neu erhaltenen Brandgutmodellen wurden Berechnungen mit dem Rothermelmodell durchgeführt. Dabei wurden für alle drei Modelle die folgenden konstanten Werte aus den NFFL-Brandgutmodellen übernommen:

O/V-Verhältnis 0.6<Ø<2.5 cm:	357 m ⁻¹
O/V-Verhältnis 2.5<Ø<7.6cm:	98 m ⁻¹
O/V-Verhältnis lebend, krautig:	4920 m ⁻¹
O/V-Verhältnis lebend, verholzt:	4920 m ⁻¹
Totaler Mineralgehalt:	5.5 %
Effektiver Mineralgehalt:	1 %
Dichte der Partikel:	513 kg/m ³
Heizwert des Brandgutes:	18600 kJ/kg

Für die restlichen Eingabeparameter wurden folgende Werte eingesetzt:

Feuchtigkeit des toten Brandgutes:	10 %
Feuchtigkeit des lebenden Brandgutes:	70 %
Hangneigung:	0°
Windgeschwindigkeit:	0 m/s
Biomasse lebend, krautig	0 kg/m ²

Es entstanden die folgenden mit *Sparks* berechneten Rothermelergebnisse:

	Modell Nadelwald	Modell Waldbrand- flächen	Modell Kastanienwald mit Strauch	Modell Kastanienwald ohne Strauch
Ausbreitungsrate [m/s]	0.0043	0.0245	0.0078	0.0063
Flammenlänge [m]	0.3542	0.8963	0.3692	0.322
Feuerfrontintensität [kW/m]	27.22	204.75	29.77	22.12
Tiefe der Flammenfront [m]	0.0462	0.1772	0.0577	0.0471
Wärmemenge [kJ/m ³]	6192	8323	3801	3460
Reaktionsintensität kW/m ²	589	1155	516	469

Tab. 16: Rothermelergebnisse aus den drei Brandgutmodellen

5.5 Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse

Der unterschiedliche Einfluss der Brandgutparameter auf die Rothermelergebnisse wurde schon einige Male angedeutet. Dieser Einfluss kann durch Sensitivitätsanalysen quantifiziert werden. Ein Brandgutparameter gilt als sensitiv, wenn er leicht variiert zu grossen Änderungen der Modellresultate führt. Andernfalls ist er robust (MAUCH et al., 1992). Die Unsicherheit der Brandgutparameter, ausgedrückt durch die Streuung, führt zu Unsicherheiten der Resultate des Rothermelmodells. Diese Unsicherheiten können mit Unsicherheitsanalysen untersucht werden.

SCHÖNING (1996) implementierte in *Sparks* eine Monte-Carlo-Simulation zur Durchführung von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen. Dabei werden jeweils mehrere Berechnungen mit dem Rothermelmodell durchgeführt. Bei jedem Durchlauf werden die Eingabegrössen gemäss einer gegebenen Verteilung zufällig verändert.

Für die Analyse mit den Brandgutmodellen der Straten Nadelwald, Waldbrandflächen und Kastanienwald wurden folgende Brandgutparameter als veränderbare Eingabegrössen verwendet:

- Biomasse mit Durchmesser <0.6 cm
- Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis
- Tiefe der Brandgutschicht
- Erlöschungsfeuchtigkeit

Die Werte der Eingabegrössen wurden gemäss einer Normalverteilung in ihre Wertebereiche verteilt. Der Wertebereich wurde aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der jeweiligen Straten bestimmt. Die restlichen Brandgutparameter (Biomasse $0.6 < \varnothing < 2.5$ cm, Biomasse $2.5 < \varnothing < 7.5$ cm und Biomasse lebend verholzt) wurden als konstante Werte eingegeben. Der Grund dafür sind die enorm grossen Streuungen dieser Brandgutparameter, welche den Wertebereich dieser Eingabegrösse überdimensionieren würden. Die grossen Streuungen kamen durch die vielen Nullwerte zustande. Für die restlichen, konstanten Eingabegrössen wurden die gleichen Werte wie in Kap. 5.4 verwendet.

Mit 5000 Durchläufen wurden folgende Punkte untersucht:

• **Sensitivität der Eingabegrößen**

Mit Sparks wurde die Sensitivität der veränderbaren Eingabegrößen auf die verschiedenen Ausgabegrößen des Rothermelmodells untersucht. In den im folgenden dargestellten Ergebnissen nimmt die Sensitivität der Eingangsgrößen von 1. - 4. ab.

	Modell A (Nadelwald)	Modell B (Brandflächen)	Modell Z (Kastanienwald) (mit Strauchtiefe)	Modell Z (Kastanienwald) (ohne Strauchtiefe)
Ausbreitungsrate	1. Tiefe 2. O/V-Verh. 3. Erlöschungsf. 4. Biomasse <0.6			
Flammenlänge	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.	1. Tiefe 2. Biomasse <0.6 3. Erlöschungsf. 4. O/V-Verh.	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.
Tiefe der Flammenzone	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. O/V-Verh. 4. Biomasse <0.6	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.
Reaktionsintensität	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.	1. Biomasse <0.6 2. Tiefe 3. Erlöschungsf. 4. O/V-Verh.	1. Tiefe 2. Biomasse <0.6 3. Erlöschungsf. 4. O/V-Verh.	1. Tiefe 2. Erlöschungsf. 3. Biomasse <0.6 4. O/V-Verh.

Tab. 17: Resultate der Sensitivitätsanalyse

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Tiefe der Brandgutschicht den grössten Einfluss auf die Rothermelresultate hat.

Gemäss Kap. 4.5.4 bewirken die Sträucher im Stratum Kastanienwald grosse Streuungen der Tiefen der Brandgutschicht. Um deren Einfluss auf die Resultate des Rothermelmodells zu untersuchen, wurde das Stratum Kastanienwald ein mal mit Straucheinfluss und ein mal ohne analysiert.

• **Unsicherheit der Resultate**

Die Streuung der vier veränderbaren Eingabegrößen hat einen Einfluss auf die Ausgaberesultate. In welchen Wertebereichen die Resultate liegen zeigt folgende Tabelle:

	Ausbreitungsrate		Flammenlänge		Tiefe der Flammenzone		Reaktionsintensität	
	Mittel	Std.abw	Mittel	Std.abw	Mittel	Std.abw	Mittel	Std.abw
Modell A (Nadelwald)	0.0052	0.0046	0.35	0.22	0.05	0.04	528.8	346.2
Modell B (Brandflächen)	0.0242	0.0131	0.82	0.26	0.17	0.08	1027.8	291.8
Modell Z (Kastanienwald (mit Strauchtiefe)	0.0072	0.0041	0.31	0.14	0.05	0.03	415.3	183.4
Modell Z (Kastanienwald (ohne Strauchtiefe)	0.0057	0.0021	0.28	0.08	0.04	0.01	407.2	122.7

Tab. 18: Resultate der Unsicherheitsanalyse

Die Mittelwerte der Ausgabegrößen entsprechen etwa den erwarteten Werten.

Die Resultate einer Ausgabegröße der drei Straten können durch die relative Abweichung miteinander verglichen werden. Die relative Abweichung berechnet sich aus dem Quotienten Standardabweichung über Mittelwert. Am Beispiel der Ausbreitungsrate sehen die relativen Abweichungen folgendermassen aus:

Brandgutmodell Nadelwald:	0.88
Brandgutmodell Waldbrandflächen:	0.54
Brandgutmodell Kastanienwald (mit Strauchtiefe):	0.57
Brandgutmodell Kastanienwald (ohne Strauchtiefe):	0.37

Die Unsicherheit der Ausbreitungsergebnisse der vier Brandgutmodelle kann somit verglichen werden. Die Ausbreitungsrate des Brandgutmodells Nadelwald liefert die unsichersten Ergebnisse, weil die relative Abweichung mit 0.88 am grössten ist. Die Brandgutmodelle Waldbrandflächen und Kastanienwald (mit Strauchtiefe) liefern praktisch gleiche Unsicherheiten in den Ausbreitungsraten auf. Obwohl die Stichprobenpunkte des Stratum Kastanienwald ähnlicher sind als diejenigen der Waldbrandflächen (Kap. 4.5.4), sind die Ausbreitungsraten mit gleicher Unsicherheit behaftet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Variation der Tiefen der Brandgutschicht im Brandgutmodell Waldbrandflächen geringer ist, als diejenige des Modells Kastanienwald (mit Strauchtiefe). Welchen Einfluss die Strauchtiefe auf das Brandgutmodell Kastanienwald hat, ist in Kap. 4.5.4 beschrieben. Aus der Unsicherheitsanalyse ist deutlich erkennbar, dass das Brandgutmodell Kastanienwald ohne Berücksichtigung der Strauchtiefe wesentlich zuverlässigere Ausbreitungsdaten liefert.

6. Ausbreitungsmodellierungen mit Sparks

6.1 Implementation der Brandgutmodelle in Sparks

Um mit den drei Brandgutmodellen des Malcantone Feuerausbreitungsmodellierungen durchführen zu können, müssen sie in die Applikation *Sparks* implementiert werden. Dabei muss ein Grid erzeugt werden mit der Geometrie der Brandgutkomplexe. Ein Grid enthält automatisch die Attribute *VALUE* und *COUNT*. Damit das erzeugte Grid als Brandgutgrid in *Sparks* verwendet werden kann, müssen Attribute mit den Namen *NR*, *SYMBOL* und *TEXT* hinzuaddiert werden. Ein Brandgutgrid besteht aus folgenden fünf Attributen mit vorgegebener Reihenfolge:

- VALUE
- COUNT
- NR
- SYMBOL
- TEXT

Alle Rasterzellen des erzeugten Brandgutgrid, welche dasselbe Brandgutmodell beschreiben enthalten den gleichen Wert im Attribut *VALUE*. Abb. 35 veranschaulicht symbolisch die Struktur des Brandgutgrids.

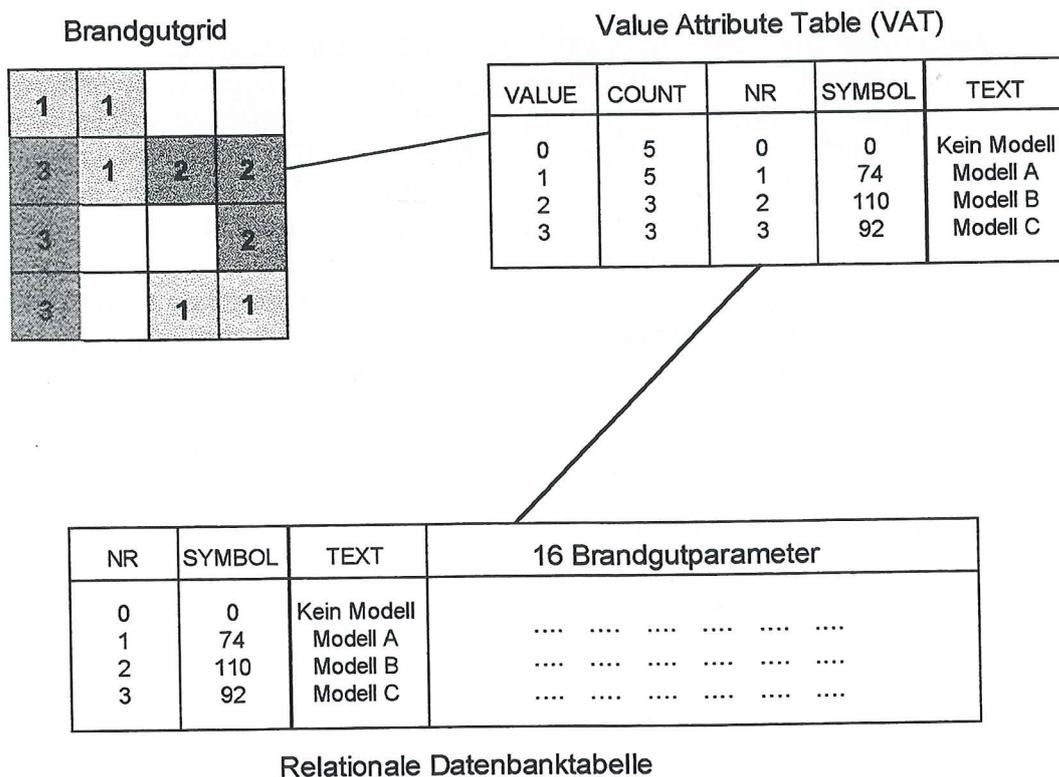


Abb. 35: Struktur eines Brandgutgrids in Sparks

Die Brandgutdaten werden in *Sparks* in einer Datenbanktabelle verwaltet, welche relational mit dem Brandgutgrid verknüpft ist (SCHÖNING, 1996). Die Struktur dieser Tabelle kann mit *Sparks* erzeugt werden. In einer speziell für die Bearbeitung von Brandgutdaten erzeugten Menüoberfläche können die Einträge der Brandgutmodelle in die Datenbanktabelle vorge-

nommen werden und mit den entsprechenden Zellen des Brandgutgrids verknüpft werden. Mit dieser Menüoberfläche können auf einfache Art Änderungen der Brandgutparameter für das Brandgutgrid vorgenommen werden.

6.2 Nachsimulationen von Waldbränden

Das Eidgenössische Institut für Wald, Schnee und Landschaft (WSL/FNP) verfügt über eine Walbranddatenbank, die alle im Tessin vorgekommenen Waldbrände seit 1969 vollständig aufführt. Die Brandflächen sind zusätzlich in Form einer ARC/INFO-Coverage vorhanden.

Anhand der Information aus der Datenbank wurde versucht, drei im Malcantone vorgekommene Waldbrände mit der Applikation *Sparks* nachzusimulieren (Abb. 36). Es liegt auf der Hand, dass die folgenden Simulationen nicht zur Validierung der Brandgutmodelle oder des Rothermelmodells dienen. Es soll viel mehr ein qualitativer Vergleich von Wirklichkeit und Modell hergestellt und auf Grenzen der Modellierung aufmerksam gemacht werden.

Die blau umrandeten Flächen von Abb. 36 zeigen die Brandausbreitung folgender drei Brände:

1. Brand bei Astano vom 8. März 1971 (Nr. in der Datenbank: 1971030802)
2. Brand am Monte Lema vom 20. April 1979 (Nr. in der Datenbank: 1979042003)
3. Brand bei Banco vom 1. Januar 1981 (Nr. in der Datenbank: 1981010104)

Aus der Waldbranddatenbank wurden die Informationen über den Startpunkt, die Brenndauer und die Windstärke entnommen. Wobei die Windstärke nur durch vier Kategorien beschrieben wird, ohne absolute Angabe. Die absolute Windstärke musste deshalb geschätzt werden. Die Daten der Brandgutfeuchtigkeiten wurden von den durch RÜEGSEGGER (1996) modellierten Feuchtigkeiten entnommen. Anhand von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Höhenstufe und Exposition modellierte RUEGSEGGER (1996) für drei Waldbrandsaisons die Feuchtigkeit des toten Brandgutes im Malcantone. Daraus entstand je ein Feuchtigkeitsgrid für die drei Saisons Dezember bis Februar, März bis April und Mai bis November. Die Brandgutsituation ist durch die zwei Brandgutmodelle für Kastanienwald und Waldbrandflächen gegeben. Die Windrichtung ist nicht in der Datenbank vorhanden. Es wurde ein wahrscheinlicher Wert angenommen.

Für die simulierten Brände wurden folgende Grössen eingesetzt:

1. Brand bei Astano vom 8.3.71; Eingabegrössen:

Topographie:	Geländemodell DHM25
Windrichtung:	230° (Richtung, aus der der Wind kommt)
Windgeschwindigkeit:	2 m/s
Dauer des Brandes:	360 Min.
Barrieren:	2. Kl. - 5. Kl.-Strassen
2. Brand am Monte Lema vom 20.4.79; Eingabegrössen:

Topographie:	Geländemodell DHM25
Windrichtung:	180° (Richtung, aus der der Wind kommt)
Windgeschwindigkeit:	1 m/s
Dauer des Brandes:	360 Min.
Barrieren:	2. Kl. - 5. Kl.-Strassen

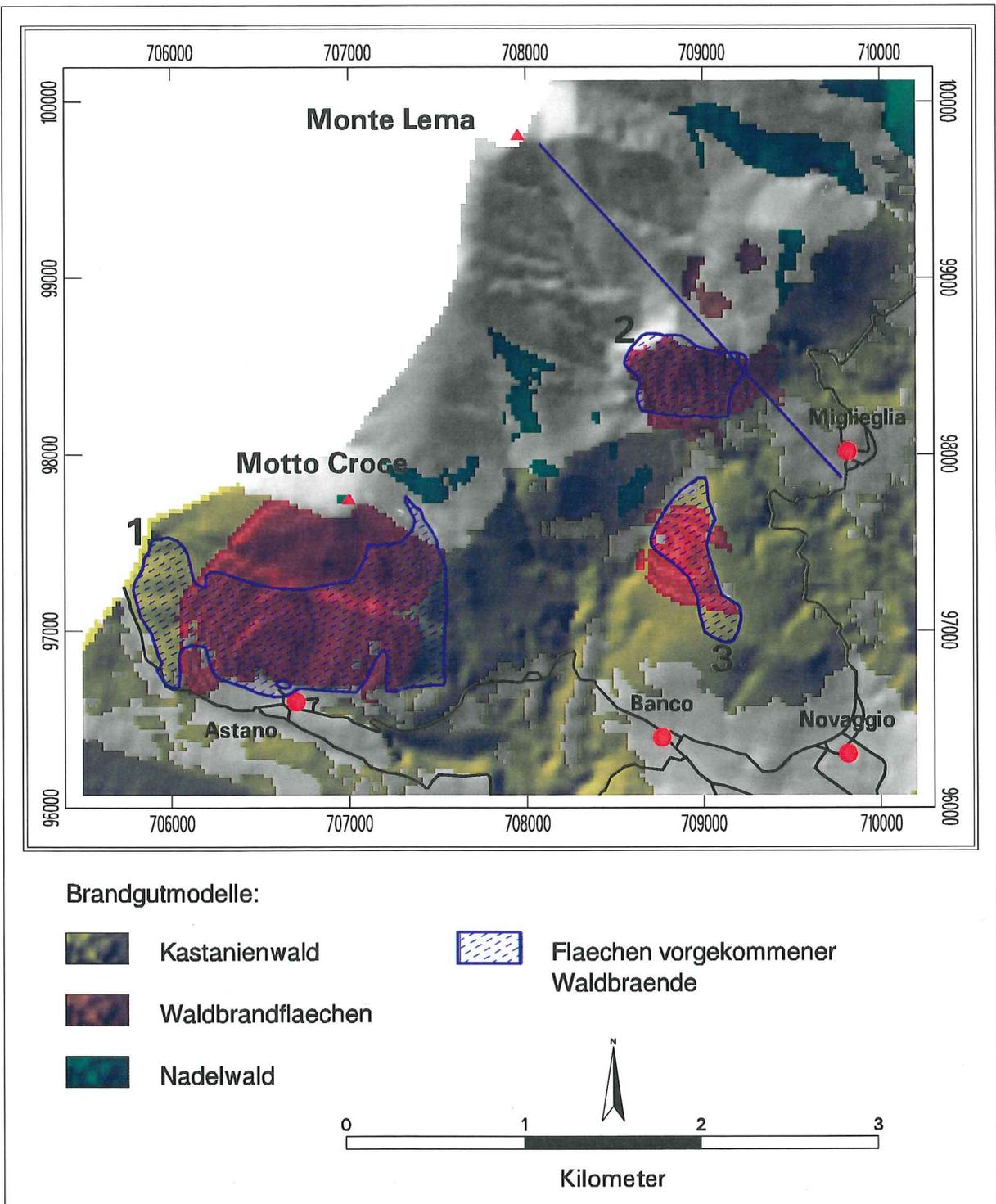


Abb. 36: Simulation vorgekommener Waldbrände im Malcantone mit der Applikation „Sparks“. © DHM25: Bundesamt für Landestopographie. Reproduziert mit Bewilligung vom 27.2.1996.

3. Brand bei Banco vom 1.1.81; Eingabegrößen:

Topographie: Geländemodell DHM25
 Windrichtung: 300° (Richtung, aus der der Wind kommt)
 Windgeschwindigkeit: 2 m/s

Dauer des Brandes: 180 Min.
Barrieren: 2. Kl. - 5. Kl. - Strassen

In Sparks können Feuerbarrieren angegeben werden, mit welchen eine Überspringwahrscheinlichkeit bei der Modellierung der Feuerausbreitung berechnet wird. Die Wahrscheinlichkeit für das Überspringen der Feuerbarriere, im angewendeten Beispiel sind es Strassen, wird aus der Breite der Barriere und der Flammenlänge berechnet. Eine grosse Breite der Barriere führt zu einer geringen Wahrscheinlichkeit. Weil Strassen und Feldwege optimale Möglichkeiten bieten für die Feuerwehr einzugreifen, wurde für diese Barrieren eine grosse Breite angegeben, um ein Überspringen des Feuers möglichst zu verhindern.

Die Flächen der drei simulierten Brände weisen eine grobe Ähnlichkeit mit den effektiven Bränden auf. Zu bemerken ist jedoch, dass die Form der simulierten Brandflächen im wesentlichen von der Richtung und der Stärke des Windes abhängt. Dadurch dass die vorgekommenen Brände durch die Feuerwehr bekämpft wurden, entspricht die abgebrannte Fläche nicht unbedingt derjenigen Fläche, die entstehen würde ohne Eingriff der Feuerwehr.

Diese Simulationen zeigen, dass das Ausmass eines berechneten Lauffeuers mit den aus dieser Arbeit entstandenen Brandgutmodellen ungefähr ähnliche Dimensionen haben, wie real vorgekommene Waldbrände im Malcantone. Die Berechnungsdauer der Feuerausbreitung entspricht dabei der in der Waldbranddatenbank angegebenen Brenndauer. Diese Simulationen zeigen aber auch, dass Eingabegrössen, wie z.B. Windgeschwindigkeit oder Windrichtung, sowie der Einfluss von Barrieren als einfache Schätzwerte eingegeben wurden. Diese Schätzwerte sind aber unter anderem massgebend für die Modellierung der Feuerausbreitung.

7. Vergleiche und Beurteilung

7.1 Vergleiche der Brandgutmodelle mit Messergebnissen

Um Brandgutmodelle zu validieren, müssen Brennversuche durchgeführt werden. In der Schweiz bestehen zur Zeit keine Möglichkeiten, solche Versuche durchzuführen. Um einen Anhaltspunkt über die Werte des Brandgutmodells Kastanienwald für das Malcantone zu erhalten, wurden Vergleiche mit Messergebnissen aus Portugal durchgeführt.

An der Technischen Universität in Coimbra, Portugal beschäftigt sich eine Gruppe¹ mit Waldbränden. Es werden dort ebenfalls im Feld Brandgutdaten mit ähnlichen Methoden erhoben. Daneben misst diese Gruppe Ausbreitungsraten von Feuern auf einem sogenannten Brenntisch mit unterschiedlichem Brandgut. Die Versuche werden unter windstillen Bedingungen und ohne Hangneigung durchgeführt. Unter anderem wurden auch einige Brandversuche mit Brandgut aus Kastanienwäldern durchgeführt. Dabei betrug die Biomasse dieses Brandgutes 0.5 kg/m^2 , was den Werten für die Biomasse mit Durchmesser $<0.6 \text{ cm}$ aus den in dieser Arbeit erhobenen Daten entspricht. Die Gruppe führte diese Versuche für unterschiedliche Brandgutfeuchtigkeiten durch. Die wenigen Resultate für das Brandgut aus Kastanienwäldern wurden mit den berechneten Ausbreitungsraten aus den Brandgutdaten vom Modell Kastanienwald verglichen. Die folgende Abbildung zeigt die Resultate.

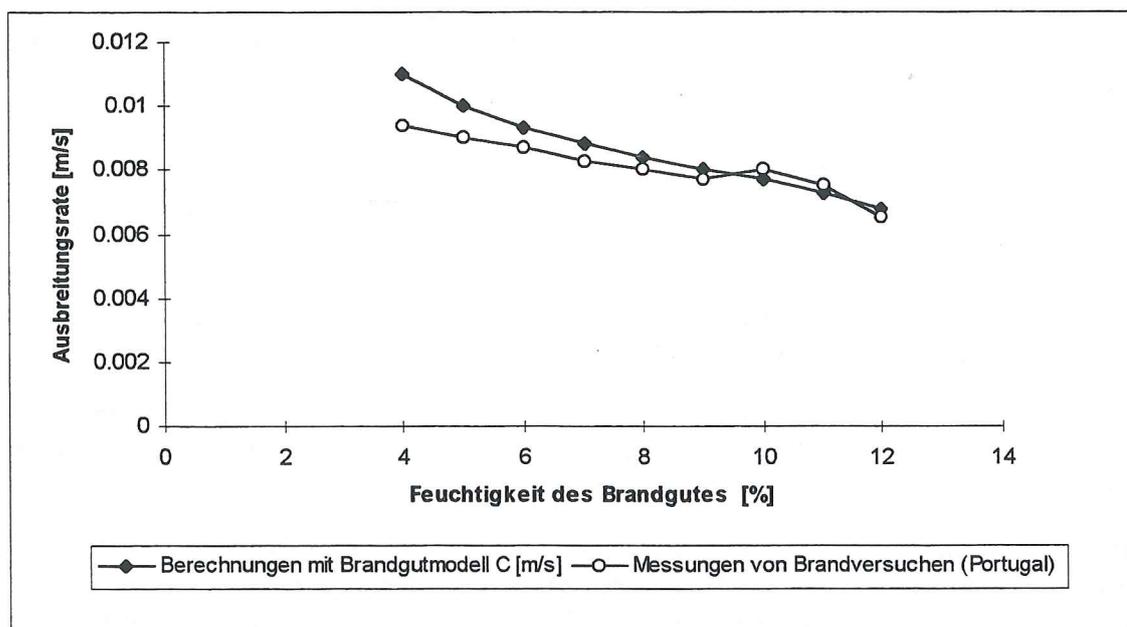


Abb. 37: Vergleich von Ausbreitungsraten

Die Ähnlichkeit ist eindeutig. Vor allem für die Feuchtigkeit von 8-12% sind die Ergebnisse praktisch gleich. Zu bemerken ist jedoch, dass die portugiesischen Werte aus nur vier Versuchen stammen. Um zuverlässigere Vergleiche machen zu können, müssten noch mehr Versuchsergebnisse vorliegen. Der Knick bei der Feuchtigkeit von ungefähr 10% in der Versuchs-

¹ Grupo de Mecânica dos Fluidos Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, unter der Leitung von Prof. D. X. Viegas.

daten-Kurve kommt in abgeschwächter Form durch eine geringere Steigung der berechneten Kurve im erwähnten Bereich zum Vorschein.

7.2 Beurteilung der Erhebungsmethode

Die abgeänderte und erweiterte Erhebungsmethode von BROWN et al. (1982) (Kap. 3.3) wurde ohne vorgängige praktische Erfahrungen in dieser Diplomarbeit angewendet. Aus den Erkenntnissen der Felderhebung kann eine Bilanz gezogen und die Methode bewertet werden. Dies führt zu positiven wie auch zu negativen Aspekten.

7.2.1 Positive Aspekte

- + Die Zufälligkeit der Stichprobenentnahme wird durch das Würfeln für die Richtungslinie erhöht. Die Lage eines Rechtecks kann nicht subjektiv bestimmt werden.
- + Durch das Sammeln von Material in allen Rechtecken ist die vorhandene Biomasse mit Durchmesser < 0.6 cm, welche die wichtigste Rolle der Biomassen für die Feuerausbreitung spielt, so genau wie möglich erhoben worden.
- + Die Methode kann von einer Einzelperson ohne Probleme angewendet werden. Um jedoch eine gewisse Effizienz zu erreichen, ist ein Team aus zwei Personen die optimale Grösse.
- + Es müssen relativ wenig Schätzungen subjektiv durchgeführt werden. Dadurch sollten Drittpersonen durch unabhängige Erhebungen auf gleichen Flächen zu ähnlichen Resultaten kommen.

7.2.2 Negative Aspekte

- Die Erhebung der Sträucher führt zu relativ ungenauen Schätzwerten, obwohl die Schätzung systematisch nach vorgegebenen Regeln erfolgt.
- Die Erhebung der Tiefe der Brandgutschicht führte zu grossen Streuungen in allen Straten. Besonders das Vorkommen einzelner Sträucher führte zu hohen Werten.
- Die Erhebung von Holz mit Durchmesser 0.6-7.5 cm durch die „Transsekt-Methode“ erwies sich als unbrauchbar. Die erwähnten Hölzer werden am besten auch in den Rechtecken gesammelt.
- Da kein Trocknungsofen zur Verfügung stand, konnten die Proben nicht hundertprozentig getrocknet werden, was zu einer gewissen Unsicherheit in der Biomasse führte. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Werte nicht stark von der hundertprozentig getrockneten Biomasse abweichen.

7.3 Verbesserungsvorschläge

Die Erhebungsmethode, wie sie in dieser Arbeit angewendet wurde, führte zu brauchbaren Ergebnissen. Durch einige Vereinfachungen oder Änderungen könnte die Methode noch verbessert und benutzerfreundlicher gemacht werden, was im folgenden dargestellt wird.

Die Schätzwerte der Sträucher könnten durch Abschneiden und Wägen erheblich verbessert werden. Ebenso könnte die Auslegung an einem Stichprobenpunkt vereinfacht werden. In Portugal wird innerhalb von zwei Dreiecken alles darin vorhandene Brandgut von der Streu bis

zu den Sträuchern abgeschnitten und gesammelt. Um die Arbeit im Feld zu vereinfachen ist es sinnvoller innerhalb der Rechtecke alles Material zu sammeln und erst im Labor die Trennung von Streu, Kraut, Holz und Strauch vorzunehmen. Dies setzt jedoch voraus, dass ein Labor in der Nähe vorhanden ist. Um bessere Resultate zu erhalten, muss zudem ein Trocknungsöfen vorhanden sein, um das Material bei 100°C zu trocknen und danach zu wägen. Die Erhebungen in den Rechtecken $30 \times 60\text{ cm}$, sowie in den beiden Kreisen à 1 m^2 erforderten verschiedene Umrechnungsfaktoren für eine einheitliche Biomasse in kg/m^2 . Wenn die Erhebungsfläche gleich 1 m^2 beträgt, muss die gewogene Masse nur noch mit dem Hangneigungskoeffizienten multipliziert werden. Eine mögliche Auslegung an einem Stichprobenpunkt könnte folgendermaßen aussehen:

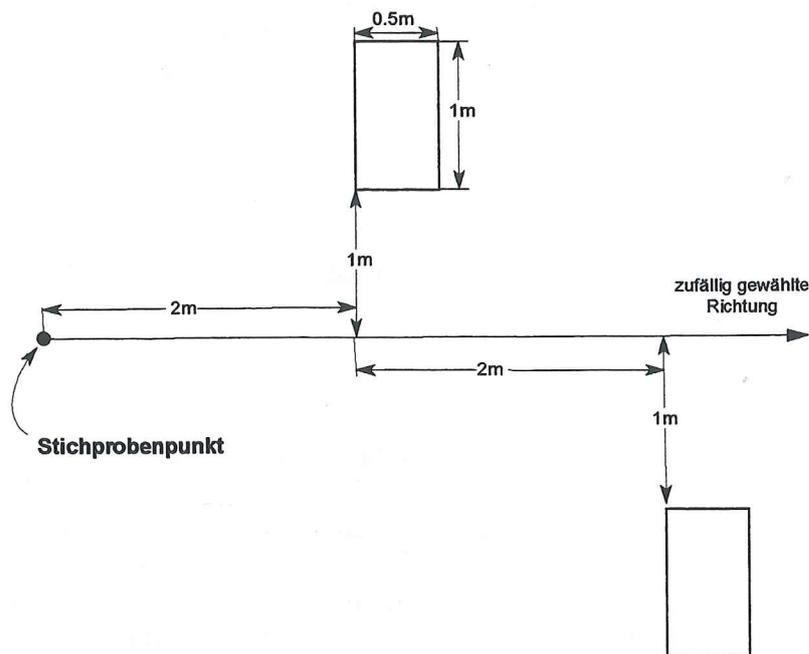


Abb. 38: Mögliche Auslegung an einem Stichprobenpunkt

Das Problem der zu hohen Tiefen der Brandgutschicht bei geringem Strauchvorkommen, wie dies z.B. in den Kastanienwäldern der Fall ist, könnte durch subjektives Entscheiden, ob ein einzelner Strauch erhoben werden soll oder nicht, behoben werden. Fällt z.B. ein kahler Strauch in den zu erhebenden Stichprobenpunkt, so soll von Fall zu Fall entschieden werden, ob der betreffende Strauch für die Ausbreitung eines Feuers einen Einfluss hat oder nicht. Diese Beurteilung erfordert jedoch einige Erfahrung im Abschätzen von Brandgut und dessen Einfluss auf die Modellierungsergebnisse.

In Portugal werden die Stichprobenpunkte nicht zufällig ausgewählt, sondern es wird in einer Waldfläche ein Punkt gesucht, der das Brandgut in dieser Fläche repräsentiert. Diese Methode erfordert viel Erfahrung im Erheben von Brandgut.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

8.1 Brandgutmodellvalidierung

Um Brandgutmodelle operationell einzusetzen, müssen sie getestet werden.

Mit den durch die Datenerhebung erstellten Brandgutmodellen, sowie Wind-, Gelände- und Feuchtigkeitsparametern kann das Feuerverhalten eines Bodenfeuers modelliert werden. Es stellt sich nun die Frage, ob ein reales Feuer in der durch das Brandgutmodell beschriebenen Brandgutsituation bei gleichen Umweltparametern (Wind, Gelände, Feuchtigkeit) sich gleich verhält. Dazu ist es nicht nötig, ganze Waldflächen zur Prüfung von Brandgutmodellen abzubrennen. Brennversuche können im Labor auf sogenannten Brenntischen durchgeführt werden. Dabei wird auf dem Brenntisch die Brandgutsituation des zu testenden Brandgutmodells erstellt. Unter windstillen Bedingungen und ebener Fläche können Brennversuche des Materials mit unterschiedlichen Brandgutfeuchtigkeiten durchgeführt werden. Es können Ausbreitungsrate, Flammenlänge, Wärmemenge, etc. gemessen werden. Aus Vergleichen mit berechneten Resultaten können auf diese Weise Brandgutmodelle verbessert und Erhebungsfehler berechnet werden.

In Portugal werden solche Brennversuche zur Modellvalidierung durchgeführt. Mit den Messergebnissen aus Brandgut von Kastanienwäldern wurde ein Vergleich mit dem Brandgutmodell Kastanienwald durchgeführt (Kap. 7.1).

8.2 Grossflächige Erhebungen

Die Erhebung von Brandgutdaten ist eine zeitraubende, aufwendige und teure Angelegenheit. Eine flächendeckende Erhebung für das ganze Tessin ist mit den in dieser Arbeit durchgeführten Methoden nicht vorstellbar. Es können jedoch Brandgutmodelle für nicht erhobene Waldflächen von vergleichbaren Waldtypen übernommen werden. Dazu dienen Fotoserien als Vergleich. So kann im Tessin z.B. angenommen werden, dass das Brandgutmodell Kastanienwald auch im Kastanienwald ausserhalb des Untersuchungsgebietes im Malcantone seine Gültigkeit hat. Einige Teststichproben könnten diese Annahmen bestätigen.

Eine weitere Möglichkeit, Brandgutdaten grossflächig zu erheben, wäre z.B. eine Klassifikation von Brandgut aus Luftbildern. Die „Ground truth“ für das Malcantone ist jetzt vorhanden. Falls sich die Waldflächen der drei Brandgutmodelle aus Luftbildern eindeutig unterscheiden lassen, könnte mit weniger Stichprobenpunkten und der Hilfe von Luftbildern Brandgut in grösseren Waldgebieten erhoben werden.

Mittels Satellitenbildern, die während einer optimalen Vegetationszeit aufzunehmen wären, könnte ebenfalls Brandgut klassiert werden. Im Frühjahr z.B. treiben die Blätter der Kastanienbäume im Vergleich zu anderen Baumarten sehr spät. Kastanienwälder könnten während dieser Jahreszeit aus Satellitenbildern klassiert werden. WILSON et al. (1994) haben im „Wood Buffalo National Park“ im Norden Kanadas eine MSS-Klassifikation von Brandgut mit einer Klassifikationsgenauigkeit von 74% durchgeführt.

Für das Tessin ist ein erster Grundstein für die Brandgutquantifizierung gesetzt. Es kann nun in weiteren Untersuchungen und Erhebungskampagnen darauf aufgebaut werden.

8.3 Ausblick Nationalpark

Das Thema Waldbrand hat im Nationalpark für viel Gesprächsstoff gesorgt (SCHEURER, 1991). Es stellen sich Fragen wie:

- Was macht man, wenn es einmal brennt?
- Soll man natürlich entstandene Brände, z.B. durch Blitzschlag, sich selber überlassen?
- Wie gross ist die Gefahr für Waldbrände im Nationalpark?

Tatsache ist, dass der Totholzanteil in zunehmender Zeit ständig steigt und damit auch die Waldbrandgefahr. Wieviel Brandgut jedoch vorhanden ist, ist nicht bekannt.

Um die Brandgutmengen zu quantifizieren, müssten Erhebungen durchgeführt werden. Es werden im folgenden einige Vorschläge erarbeitet, wie eine allfällige Brandgutdatenerhebung im Nationalpark aus den im Tessin gemachten Erfahrungen durchzuführen wäre.

8.3.1 Gefährdete Gebiete

Als gefährdete Gebiete werden vor allem Waldflächen entlang viel besuchter Wanderwege, an verschiedenen Park- und Rastplätzen, sowie entlang der Ofenpassstrasse angesehen. Nach SCHEURER (1991) sind im Nationalpark vor allem die Bergföhrenbestände besonders brandgefährdet. Zur leichten Entzündbarkeit der Bergföhre kommt noch dazu, dass sie, durch ihre Konkurrenzfähigkeit, besonders auf trockenen Standorten vorkommt. Die Gefährdung ist dort am Grössten, wo der Boden der Bergföhrenbestände durch leicht brennbares Material wie Nadelstreu oder Erika, etc. bedeckt ist. Mittels dieser Angaben und der Vegetationskarte des Nationalparks wurden Gebiete in der Umgebung der Ofenpassstrasse, die für eine Datenerhebung von Interesse sind, ausgeschieden (Abb. 39).

Die Waldflächen der Bergföhre könnten mit Hilfe der Vegetationskarte des Schweizerischen Nationalparks, der Geologie und dem Geländemodell stratifiziert werden.

8.3.2 Vorschläge für Brandgutdatenerhebungen

Stratifizierung

Massgebend für eine erfolgreiche Erhebungskampagne ist eine gut überlegte Planung. Dabei spielt die Stratifizierung des zu untersuchenden Gebietes eine wichtige Rolle. Um das oben dargestellte gefährdete Gebiet sinnvoll zu stratifizieren, muss zuerst abgeklärt werden, ob überhaupt unterschiedliche Brandgutsituationen vorkommen. Das kann einerseits durch Feldbegehungen, andererseits aus Gesprächen mit Experten, wie z.B. Parkwächter, Förster, etc. abgeklärt werden. Sind Brandgutunterschiede vorhanden, muss versucht werden die Unterschiede anhand von Informationen aus Grunddaten zu erklären. Vom dargestellten, gefährdeten Gebiet sind aus den zur Verfügung stehenden Daten folgende Informationen zu entnehmen:

- **Vegetation:**
 - Bergföhrenwald über Karbonatgestein
 - Bergföhrenwald über Silikat- und Karbonatgestein, gemischt
 - Bergföhrenwald über Silikatgestein
 - Bergföhren-Lärchenwald
 - Bergföhren-Fichtenwald
 - Bergföhren-Arvenwald

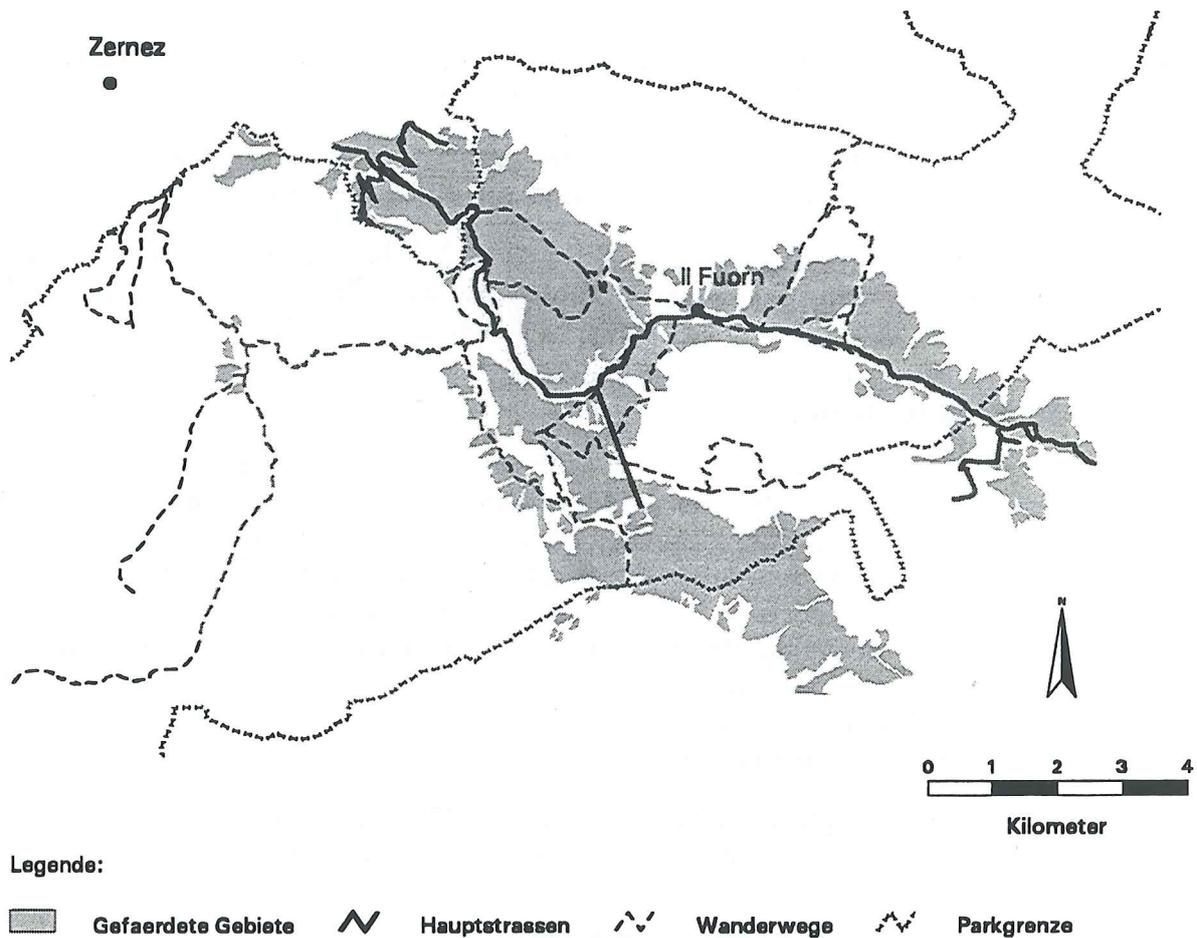


Abb. 39: Waldbrandgefährdete Gebiete in der Umgebung Ofenpassstrasse

- **Geologie:**
 - Silikatgestein
 - Karbonatgestein
- **Geländemodell**
 - Exposition:*
 - Sonnenseite
 - Schattenseite
 - Hangneigung:*
 - Steile Hänge
 - Flache Hänge

Mögliche Unterschiede der Brandgutsituation können aus den obigen Kategorien erklärt werden. Solch heterogene Flächen, wie der Nadelwald im Malcantone sind im Nationalpark nicht zu erwarten, da die dort vorkommenden Wälder nicht bewirtschaftet werden.

Datenerhebung

Um möglichst effizient zu arbeiten, sollte das im Feld gesammelte Material erst im Labor in die einzelnen Brandguttypen sortiert werden. Die Sortierung wird genauer, da keine äusseren Einflüsse, wie Witterung, Gelände etc. störend wirken. Die Datenerhebung könnte durch eine vereinfachte Auslegung am Stichprobenpunkt (Abb. 38) erleichtert werden. Zudem wird am einfachsten alles Material inklusive Sträucher in den Rechtecken gesammelt.

Die pflanzenschonende Erhebung der Sträucher liefert grobe Schätzwerte der Biomasse. Für zuverlässigere Werte müssten die Sträucher abgeschnitten werden. Ob dies im Nationalpark möglich ist, müsste abgeklärt werden. Dank der ähnlichen Vegetation in Nordamerika sind Vergleiche mit amerikanischen Straucharten denkbar und wahrscheinlich zuverlässiger für den Nationalpark als für das Tessin.

Literaturverzeichnis

- Albini, F., A.: Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1976.
- Anderson, Hal E.: Aid to determining fuel models for estimating fire behavior. Gen. Tech. Rep. INT-122. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1982.
- Andrews, P., L.: BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System - BURN Subsystem, Part 1. Gen. Tech. Rep. INT-194. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1986.
- Andrews, P., L., Chase, C., H.: BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System - BURN Subsystem, Part 1. Gen. Tech. Rep. INT-260. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1989.
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Verlag. 7. Auflage, 1994
- Bahrenberg, G.; Giese, E.; Nipper, J.: Statistische Methoden in der Geographie Bd.2. Teubner Studienbücher. 2. Auflage, 1992.
- Bergs, S.: Optimalität bei Cluster-Analysen, Diss. Münster (1981)
- Brown, James K.: Estimating shrub biomass from basal stem diameters. Can. J. For. Res. 6:153-158. 1976.
- Brown, James K.: Handbook for inventorying downed woody material. Gen. Tech. Rep. INT-16 Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: 1974b, 24p.
- Brown, James K.; Oberheu, R. D.; Johnston, C. M.: Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. Gen. Tech. Rep. INT-129. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1982. 48p.
- Burgan, R. E., Rothermel, R. C.: BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system - FUEL Subsystem. Gen. Tech. Rep. INT-167. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1984.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., Williams, D.: Fire in forestry. Vol. 1: Forest fire behavior and effects. A Wiley-Interscience Publication. 1983.
- Fischer, W. C.: Photo guide for appraising downed woody fuels in Montana forests: interior ponderosa pine, ponderosa pine-larch-Douglas-fir, larch-Douglas-fir and interior

- Douglas-fir cover types. Gen. Tech. Rep. INT-97. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1981a.
- Fischer, W. C.: Photo guide for appraising downed woody fuels in Montana forests: lodgepole pine and Engelmann spruce-subalpine fir cover types. Gen. Tech. Rep. INT-98. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1981b.
- Fischer, W. C.: Photo guide for appraising downed woody fuels in Montana forests: grand fir-larch-Douglas-fir, western hemlock, western hemlock-western redcedar and western redcedar cover types. Gen. Tech. Rep. INT-96. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station; 1981c.
- Fitze, P.: Skript zur Vorlesung Bodengeographie; 1990.
- Fuller, M.: Forest fires. A Introduction to Wildlife Fire Behavior, Management, Fire fighting, and Prevention. Wiley Nature Editions. 1991.
- Hutchings, Selar S., and Jack E. Schmutz: A field test of the relative weight estimate method for determining herbage production. *J. Range Manage.* 22(6):408-411. 1969.
- Mauch, S., Keller, M., Heldstab, J., Rotach, M.: Fehlerrechnung und Sensitivitätsanalyse für Fragen der Luftreinhalte. Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement Bundesamt für Strassenbau. 1992.
- Rothermel, R. C.: A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972. INT-115
- Rothermel, R. C.: How to predict the spread and intensity of forest and range fires. USDA, Forest Service Research Paper INT-143, Intermountain Forest and Range Experimental Station, Ogden, Utah, USA. 1983.
- Rüegsegger, M.: Entscheidungsunterstützung im Waldbrandmanagement mit GIS. Strategien und ausgewählte Beispiele. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich. 1996.
- Sachs, L.: Statistische Methoden, Planung und Auswertung. Springer-Verlag. 7. Auflage, 1993.
- Scheurer, T.: Waldbrand im Schweizerischen Nationalpark; Ergebnisse der Klausurtagung 2./3. Juli 1991. Wissenschaftliche Nationalparkkommission (WNPK).
- Schöning, R.: Modellierung des potentiellen Waldbrandverhaltens mit einem Geographischen Informationssystem. Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich. 1996.
- Wagner, H.: Vegetations- und Bodenverhältnisse am Fusse des Piz Alv (Bernina). Diplomarbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich. 1994.

- Wildi, O.: Analyse vegetationskundlicher Daten. Theorie und Einsatz statistischer Methoden. ETH Stiftung Rübel Zürich. 90. Heft. 1986.
- Wilson, B. A., Ow, C. F. Y., Heathcott, M., Milne, D., McCaffrey, T. M., Ghitler, G., Franklin, S. E.: Landsat MSS classification of fire fuel types in Wood Buffalo National Park, Northern Canada. *Global Ecology and Biogeography Letters* (1994) 4.
- Zöhner, F.: Forstinventur. Parey, Hamburg Berlin. Pareys Studientexte 26. 1980.

Anhänge

A1. Datensätze

Rohdatensatz

Rec.Nr.	Holz <0.6 [kg/m ²]	Holz O/V-Verh.	Holz Tiefe [m]	Krautmasse [kg/m ²]	Kraut O/V-Verh.	Kraut Tiefe [m]	Streu <0.6 [kg/m ²]	Streu 0.6-2.5 [kg/m ²]	Streu O/V-Verh.	Streu Tiefe	Strauch tot <0.6 [kg/m ²]	Strauch tot 0.6-2.5 [kg/m ²]	Strauch tot 2.5-7.6 [kg/m ²]	Strauch lebend <0.6cm	Strauch O/V-Verh.	% lebend	Strauch Tiefe [m]	Foto
1	0.024	1717	0.04	0	0	0	0.499	0	3636	0.01	0	0	0	0	0	0	0	X
2	0.146	1429	0.19	0	0	0	0.915	0.112	7407	0.03	0	0	0	0	0	0	0	X
3	0.239	1905	0.03	0	0	0	0.762	0	4292	0.03	0.352	0.495	0.159	0.352	2500	50	1.5	X
4	0.09	1290	0.12	0	0	0	0.597	0	4167	0.04	0	0	0	0	0	0	0	X
5	0.102	1250	0.04	0	0	0	0.883	0	14286	0.04	0	0	0	0	0	0	0	X
6	0.06	1379	0.09	0	0	0	0.47	0	6837	0.03	0.267	0.42	0.063	1.07	2857	80	2	
7	0.274	1481	0.22	0	0	0	0.842	0.062	6780	0.11	0.317	0.452	0.137	0	2000	0	1.5	X
8	0.332	1600	0.16	0	0	0	0.515	0	4464	0.18	0	0	0	0	0	0	0	
9	0.012	2000	0.03	0.094	755	0.28	0.888	0	8850	0.02	0	0	0	0	0	0	0	X
10	0.162	1600	0.08	0	0	0	0.943	0	11628	0.04	0	0	0	0	0	0	0	X
11	0.517	1429	0.09	0	0	0	1.1	0.396	2597	0.03	0	0	0	0	0	0	0	X
12	0.468	1818	0.10	0	0	0	1.034	0.105	6897	0.06	0	0	0	0	0	0	0	X
13	0.18	1333	0.04	0	0	0	0.527	0	6431	0.05	0	0	0	0	0	0	0	
14	0.188	1212	0.06	0	0	0	0.887	0.049	6803	0.06	0	0	0	0.106	2000	100	1.6	X
15	0	0	0.00	0.667	11850	0.2	0.308	0	18315	0.08	0	0	0	0	0	0	0	X
16	0	0	0.00	0.282	16500	0.16	0.181	0	9781	0.04	0.198	0.221	0.316	0	2000	0	2	X
17	0	0	0.00	0.604	8302	0.43	0.178	0	10499	0.04	0.113	0.143	0	0	2857	0	0.78	X
18	0	0	0.00	0.614	8781	0.65	0.343	0	11563	0.10	0	0	0	0.366	2000	100	1.4	X
19	0	0	0.00	0.58	7941	0.31	0.772	0	9326	0.05	0	0	0	0.578	3077	100	1.38	X
20	0.065	1000	0.04	0.055	11765	0.08	0.552	0.07	10000	0.08	0	0	0	0	0	0	0	
21	0	0	0.00	0.611	9855	0.41	0.185	0	15385	0.07	0.034	0.049	0	0.31	2500	90	1.13	X
22	0.01	1290	0.07	0.165	11243	0.2	0.374	0	9524	0.14	0.006	0.007	0	0.023	800	80	0.6	X
23	0.35	1333	0.02	0.366	17216	0.07	0.457	0	14286	0.07	0.054	0.083	0.009	0.217	3077	80	1.5	X
24	0.154	1000	0.05	0.1	9167	0.06	0.547	0	10000	0.10	0.038	0.106	0	0.038	3200	50	0.95	X
25	0	0	0.00	0.942	8731	0.21	0	0	0	0.00	0	0	0	0.066	2500	100	0.3	X
26	0.093	1905	0.06	0.007	16667	0.04	0.519	0	10526	0.04	0.004	0	0	0.04	2000	90	0.15	X
27	0.075	1538	0.04	0	0	0	0.491	0	11765	0.09	0.519	0.646	0.309	0.779	2000	60	1	X
28	0.098	1290	0.04	0	0	0	0.472	0.276	9524	0.09	0	0	0	0.001	2000	100	0.4	X
29	0	0	0.00	0.796	10699	0.38	0.2	0	10000	0.12	0.034	0.028	0	0.034	2000	50	1.2	X
30	0	0	0.00	0.383	8671	0.7	0.705	0	15384	0.12	0.013	0.005	0	0.029	2000	70	1	X
31	0.117	1290	0.09	0.038	12212	0.17	0.691	0	10000	0.11	0.09	0.1	0	0	2000	0	1	
32	0.016	930	0.04	0	0	0	0.248	0.218	8333	0.08	0	0	0	0	0	0	0	X
33	0.119	1333	0.08	0	0	0	0.548	0	12500	0.09	0.003	0.002	0	0.006	2000	70	0.65	X
34	0.065	1333	0.04	0.01	13333	0.07	0.504	0.076	11111	0.10	0	0	0	0	0	0	0	
35	0.052	1333	0.04	0.058	7773	0.09	0.486	0	8333	0.10	0	0	0	0	0	0	0	X
36	0.012	1667	0.03	0.072	11667	0.23	0.419	0.047	9364	0.09	0	0	0	0	0	0	0	X
37	0.217	952	0.04	0	0	0	0.19	0.235	11111	0.06	0	0	0	0	0	0	0	
38	0.145	1250	0.06	0.004	20000	0.05	0.316	0.075	9928	0.08	0.002	0.002	0	0.017	2000	88	0.45	
39	0.057	1333	0.06	0	0	0	0.409	0.146	9524	0.09	0	0	0	0.098	216	100	1.26	
40	0.116	1379	0.02	0.055	10811	0.17	0.509	0.071	12500	0.08	0	0	0	0	0	0	0	
41	0.107	1250	0.06	0	0	0	0.42	0.146	11765	0.08	0	0	0	0	0	0	0	
42	0.055	930	0.05	0.012	6133	0.09	0.582	0.107	10000	0.09	0	0	0	0	0	0	0	X
43	0.071	1176	0.05	0.011	10526	0.09	0.434	0	11111	0.08	0	0	0	0.001	2000	100	0.15	X
44	0	0	0.00	0	0	0	0.483	0.083	10000	0.05	0	0	0	0	0	0	0	
45	0.031	1429	0.06	0.029	8696	0.09	0.49	0.033	9737	0.07	0.033	0.046	0.014	0.076	2000	70	1.1	
46	0.021	889	0.05	0.006	14286	0.09	0.351	0.054	10000	0.08	0	0	0	0.004	2000	100	0.13	
47	0.098	2000	0.05	0	0	0	0.368	0.053	9524	0.07	0.005	0.004	0	0.041	2000	90	1.03	
48	0.097	1333	0.14	0.001	16667	0.05	0.153	0	13333	0.07	0.011	0.016	0	0.022	2000	66	0.2	X
49	0.066	1250	0.06	0	0	0	0.465	0	11333	0.03	0.003	9E-04	0	0.006	2000	70	0.23	X
50	0.058	1333	0.02	0	0	0	0.456	0.051	7407	0.07	0	0	0	0.059	2000	100	1.2	X
51	0.092	1600	0.12	0	0	0	0.323	0	12702	0.06	0	0	0	0	0	0	0	
52	0.123	1739	0.06	0.014	1250	0.1	0.59	0	12500	0.09	0	0	0	0	0	0	0	
53	0.086	1406	0.06	0	0	0	0.521	0	10526	0.14	0	0	0	0	0	0	0	
54	0.116	1212	0.05	0	0	0	0.643	0	12500	0.10	0	0	0	0.012	2000	100	0.4	X

Standardisierter Datensatz

Rec.Nr.	Biomasse <0.6cm	Biomasse 0.6-2.5cm	Biomasse 2.5- 7.6 cm	Biomasse lebend verholzt	O/V-Verh	Tiefe der Bg- schicht [m]	Erlöschungs- feuchtigkeit [%]
1	-0.800	-0.666	-0.286	-0.397	-2.069	-0.742	4.021
2	0.890	0.095	-0.286	-0.397	-0.803	-0.619	2.169
3	1.808	2.698	2.155	1.339	-2.027	2.006	0.099
4	-0.285	-0.666	-0.286	-0.397	-1.913	-0.617	0.426
5	0.652	-0.666	-0.286	-0.397	1.609	-0.651	1.188
6	0.062	2.191	0.687	4.879	-1.239	4.171	-0.446
7	2.060	2.827	1.817	-0.397	-1.226	1.538	-0.446
8	0.218	-0.666	-0.286	-0.397	-1.953	-0.231	-0.664
9	0.680	-0.666	-0.286	-0.397	-0.271	-0.636	3.150
10	1.029	-0.666	-0.286	-0.397	0.648	-0.632	1.188
11	2.638	2.025	-0.286	-0.397	-2.499	-0.633	3.041
12	2.276	0.048	-0.286	-0.397	-1.107	-0.550	0.644
13	-0.222	-0.666	-0.286	-0.397	-1.198	-0.627	-0.010
14	0.934	-0.333	-0.286	0.125	-1.022	-0.165	0.426
15	0.620	-0.666	-0.286	-0.397	1.743	-0.263	-0.555
16	-0.367	0.836	4.565	-0.397	1.525	3.260	-0.773
17	0.369	0.306	-0.286	-0.397	-0.316	0.650	-0.664
18	0.564	-0.666	-0.286	1.408	0.148	1.494	-0.773
19	1.805	-0.666	-0.286	2.454	-0.261	0.895	-0.228
20	-0.332	-0.190	-0.286	-0.397	0.193	-0.535	-0.228
21	0.164	-0.333	-0.286	1.132	0.699	1.113	-0.773
22	-0.700	-0.618	-0.286	-0.284	0.191	-0.194	-0.664
23	1.412	-0.102	-0.148	0.673	1.927	0.482	-0.119
24	0.193	0.055	-0.286	-0.210	0.006	0.000	-0.555
25	0.516	-0.666	-0.286	-0.072	-0.280	-0.092	-0.446
26	-0.486	-0.666	-0.286	-0.200	0.292	-0.618	0.208
27	0.966	3.725	4.457	3.445	0.208	1.815	-0.555
28	-0.653	1.210	-0.286	-0.392	-0.082	-0.509	-0.119
29	0.793	-0.476	-0.286	-0.230	0.340	0.506	-0.664
30	1.016	-0.632	-0.286	-0.254	1.481	0.341	-0.446
31	0.498	0.014	-0.286	-0.397	0.084	0.090	-0.446
32	-1.614	0.816	-0.286	-0.397	-0.437	-0.528	-0.337
33	-0.338	-0.652	-0.286	-0.368	0.941	-0.467	-0.337
34	-0.624	-0.149	-0.286	-0.397	0.516	-0.480	-0.337
35	-0.571	-0.666	-0.286	-0.397	-0.474	-0.480	-0.446
36	-0.863	-0.346	-0.286	-0.397	0.070	-0.438	-0.446
37	-1.165	0.931	-0.286	-0.397	0.233	-0.609	-0.228
38	-0.976	-0.143	-0.286	-0.314	0.055	-0.496	-0.446
39	-0.979	0.326	-0.286	0.086	-0.058	0.014	-0.337
40	-0.307	-0.183	-0.286	-0.397	0.896	-0.532	-0.228
41	-0.788	0.326	-0.286	-0.397	0.680	-0.534	-0.228
42	-0.404	0.061	-0.286	-0.397	0.118	-0.501	-0.119
43	-0.822	-0.666	-0.286	-0.392	0.487	-0.535	-0.446
44	-0.926	-0.102	-0.286	-0.397	0.162	-0.619	0.317
45	-0.612	-0.129	-0.071	-0.023	-0.007	0.180	-0.337
46	-1.256	-0.299	-0.286	-0.378	0.181	-0.526	-0.446
47	-0.964	-0.278	-0.286	-0.195	-0.149	-0.302	-0.446
48	-1.621	-0.557	-0.286	-0.289	1.047	-0.416	-0.773
49	-0.766	-0.666	-0.286	-0.368	0.568	-0.659	0.535
50	-0.829	-0.319	-0.286	-0.106	-0.788	-0.231	-0.228
51	-1.140	-0.666	-0.286	-0.397	0.969	-0.545	-0.446
52	-0.159	-0.666	-0.286	-0.397	0.918	-0.507	-0.337
53	-0.536	-0.666	-0.286	-0.397	0.277	-0.369	-0.555
54	-0.059	-0.666	-0.286	-0.338	0.965	-0.469	-0.337

A2. Brandgutmodelle

Modelle des Malcantone

Rec.Nr.	Biomasse <0.6cm	Biomasse 0.6-2.5cm	Biomasse 2.5-7.6 cm	Biomasse lebend verholzt	O/V-Verh	Tiefe der Bg-schicht [m]	Erlö- schungs- feuchtigkeit [%]
Brandgutmodell Nadelwald							
1	0.523	0	0	0	3593	0.01	57
2	1.061	0.112	0	0	7228	0.05	40
4	0.687	0	0	0	4039	0.05	24
5	0.985	0	0	0	14156	0.04	31
8	0.847	0	0	0	3926	0.17	14
9	0.994	0	0	0	8757	0.04	49
10	1.105	0	0	0	11396	0.05	31
12	1.502	0.105	0	0	6356	0.07	26
13	0.707	0	0	0	6094	0.05	20
14	1.075	0.049	0	0.106	6600	0.19	25
Mittelwert	0.949	0.027	0	0.011	7215	0.07	32
Standartabw.	0.275	0.046	0	0.034	3406	0.06	13
rel. Fehler	0.290	1.723	0	3.162	0.472	0.819	0.419
Brandgutmodell Waldbrandflächen							
15	0.975	0	0	0	14542	0.16	15
17	0.895	0.143	0	0	8628	0.45	14
18	0.957	0	0	0.366	9960	0.71	14
19	1.352	0	0	0.578	8786	0.52	21
20	0.672	0.070	0	0	10089	0.08	18
21	0.830	0.049	0	0.310	11543	0.60	13
22	0.555	0.007	0	0.023	10084	0.18	14
23	1.227	0.083	0.009	0.217	15070	0.40	20
24	0.839	0.106	0	0.038	9553	0.25	16
25	0.942	0	0	0.066	8731	0.22	16
29	1.030	0.028	0	0.034	10511	0.40	14
30	1.101	0.005	0	0.029	13789	0.35	16
31	0.936	0.100	0	0	9776	0.27	16
Mittelwert	0.947	0.045	0.001	0.128	10851	0.35	16
Standartabw.	0.210	0.050	0.002	0.184	2220	0.18	2
rel. Fehler	0.222	1.097	3.606	1.442	0.205	0.523	0.128
Brandgutmodell Kastanienwald							
26	0.623	0	0	0.040	10374	0.05	22
28	0.570	0.276	0	0.001	9299	0.08	19
32	0.264	0.218	0	0	8280	0.05	12
33	0.670	0.002	0	0.006	12238	0.10	21
34	0.579	0.076	0	0	11016	0.13	23
35	0.596	0	0	0	8172	0.08	14

36	0.503	0.047	0	0	9736	0.09	14
37	0.407	0.235	0	0	10205	0.06	17
38	0.467	0.077	0	0.017	9693	0.09	16
39	0.466	0.146	0	0.098	9367	0.25	24
40	0.680	0.071	0	0	12109	0.08	16
41	0.527	0.146	0	0	11488	0.08	18
42	0.649	0.107	0	0	9874	0.12	22
43	0.516	0	0	0.001	10932	0.06	12
44	0.483	0.083	0	0	10000	0.04	14
45	0.583	0.079	0.014	0.076	9515	0.30	27
46	0.378	0.054	0	0.004	10055	0.05	12
47	0.471	0.057	0	0.041	9106	0.15	17
48	0.262	0.016	0	0.022	12542	0.11	13
49	0.534	0	0	0.006	11167	0.04	25
50	0.514	0.051	0	0.059	7271	0.17	18
51	0.415	0	0	0	12317	0.07	16
52	0.727	0	0	0	12172	0.09	17
53	0.607	0	0	0	10329	0.13	15
54	0.759	0	0	0.012	12306	0.10	17
Mittelwert	0.530	0.070	0.001	0.015	10383	0.102	18
Standartabw.	0.126	0.080	0.003	0.027	1433	0.062	4
rel. Fehler	0.238	1.146	5.000	1.752	0.138	0.608	0.237

NFFL-Modelle

Northern Forest Fire Laboratory Fuel Models

Nr	Typischer Brandgut komplex (Modell)	Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis [l/m]						Biomasse [kg/m ²]				Tiefe der Brandgut-schicht [m]	Erlöschungs-feuchtigkeit [%]
		tot		lebend		tot		lebend					
		Ø<0.6cm	0.6<Ø<2.5cm	2.5<Ø<7.6cm	krautig	verholzt	Ø<0.6cm	0.6<Ø<2.5cm	2.5<Ø<7.6cm	krautig	verholzt		
1	short grass (1 ft)	11480	358	98	4920	4920	0.166	0	0	0	0	0.3	12
2	timber (grass and understory)	9840	358	98	4920	4920	0.448	0.224	0.112	0.11	0	0.3	15
3	tall grass (2.5 ft)	4920	358	98	4920	4920	0.672	0	0	0	0	0.8	25
4	chaparral	6560	358	98	4920	4920	1.121	0.897	0.448	0	1.121	1.8	20
5	brush	6560	358	98	4920	4920	0.224	0.112	0	0	0.448	0.6	20
6	dormant brush, hardwood slash	5740	358	98	4920	4920	0.336	0.56	0.448	0	0	0.8	25
7	southern rough	5740	358	98	4920	4920	0.253	0.419	0.336	0	0.083	0.8	40
8	closed timber litter	6560	358	98	4920	4920	0.336	0.224	0.56	0	0	0.06	30
9	hardwood litter	8200	358	98	4920	4920	0.655	0.092	0.034	0	0	0.06	25
10	timber litter (litter and understory)	6560	358	98	4920	4920	0.672	0.448	1.121	0	0.448	0.3	25
11	light logging slash	4920	358	98	4920	4920	0.336	1.011	1.233	0	0	0.3	15
12	medium logging slash	4920	358	98	4920	4920	0.897	3.138	3.699	0	0	0.7	20
13	heavy logging slash	4920	358	98	4920	4920	1.569	5.156	6.276	0	0	0.9	25

A3. Erhebungsformular

Datum:	Rec.Nr.:	Art:	Nutz:	Neigung:	Trans.Richtung:
--------	----------	------	-------	----------	-----------------

Name des Bearbeiters:

Herumliegendes Holz

Transsektlänge [m]			Anzahl Schnittflächen									
0-2.5cm: 2		2.5-7.6cm: 3	<0.6:		0.6-2.5:		2.5-7.6:					
% Bed.:		% lebend:										
Tiefe [m]	0.5:		1:		totale Biomasse		totale Biomasse		totale Biomasse			
	1.5:		2:		m=		m=		m=			
	2.5:		3:		Ø <0.6cm [mm]		1:		2:		3:	
	x̄:						4:		5:		6:	
						x̄:						

Biomasse in den Rechtecken		
<0.6:	0.6-2.5:	2.5-7.6:

Kräuter

% Bed.:				% lebend:			
Gewicht der Parzellen:				Ø		Dicke	
Tiefe [m]	1			Ø od. Dicke:		1	
	2			[mm]		2	
	3					3	
	4			totale Biomasse		4	
	x̄:			m=		x̄:	

O/V-Verh.:	%:	%:
------------	----	----

Streu

% Bed.:				% lebend:				Ø		Dicke	
Gew. <0.6 (Blätter)	Tiefe: [m]	1		Ø od. Dicke [mm]	1						
		2			2						
		3			3						
		4			4						
Gewicht 0.6-2.5											
Gewicht 2.5-7.6		x̄:				x̄:					
						%:		%:			

Biomasse <0.6:	Biomasse 0.6-2.5:	Biomasse 2.5-7.6:	O/V-Verh.:
----------------	-------------------	-------------------	------------

A4. SAS-Steuerprogramme

```

/*          Cluster-Analyse der Brandgutdaten          */
/*          Diplomarbeit - Stephan Harvey 1995        */
/*          standardisierte Daten                    */
/*-----*/

data fuel;
  input recno biom1 biom2 biom3 biom4 ovverh
        tiefe erlsch stratum $ ;

  cards;
1 -0.800 -0.666 -0.286 -0.397 -2.088 -0.742 4.021 A
2 0.890 0.095 -0.286 -0.397 -0.826 -0.619 2.169 A
3 1.808 2.698 2.155 1.343 -1.974 2.007 0.099 A
4 -0.285 -0.666 -0.286 -0.397 -1.933 -0.617 0.426 A
5 0.652 -0.666 -0.286 -0.397 1.578 -0.651 1.188 A
6 0.062 2.191 0.687 4.892 -1.051 4.172 -0.446 A
7 2.060 2.827 1.817 -0.397 -1.131 1.538 -0.446 A
8 0.218 -0.666 -0.286 -0.397 -1.972 -0.231 -0.664 A
9 0.680 -0.666 -0.286 -0.397 -0.296 -0.636 3.150 A
10 1.029 -0.666 -0.286 -0.397 0.620 -0.632 1.188 A
11 2.638 2.025 -0.286 -0.397 -2.517 -0.633 3.041 A
12 2.276 0.048 -0.286 -0.397 -1.129 -0.550 0.644 A
13 -0.222 -0.666 -0.286 -0.397 -1.220 -0.627 -0.010 A
14 0.934 -0.333 -0.286 0.127 -1.044 -0.165 0.426 A
15 0.620 -0.666 -0.286 -0.397 1.712 -0.263 -0.555 B
16 -0.367 0.836 4.565 -0.397 1.726 3.261 -0.773 B
17 0.369 0.306 -0.286 -0.397 -0.266 0.651 -0.664 B
18 0.564 -0.666 -0.286 1.412 0.123 1.494 -0.773 B
19 1.805 -0.666 -0.286 2.406 -0.285 0.880 -0.228 B
20 -0.332 -0.190 -0.286 -0.397 0.167 -0.535 -0.228 B
21 0.164 -0.333 -0.286 1.136 0.697 1.114 -0.773 B
22 -0.700 -0.618 -0.286 -0.284 0.166 -0.193 -0.664 B
23 1.412 -0.102 -0.148 0.676 1.942 0.483 -0.119 B
24 0.193 0.055 -0.286 -0.209 0.016 0.002 -0.555 B
25 0.516 -0.666 -0.286 -0.071 -0.304 -0.092 -0.446 B
26 -0.486 -0.666 -0.286 -0.200 0.271 -0.618 0.208 C
27 0.966 3.725 4.457 3.455 0.606 1.815 -0.555 C
28 -0.653 1.210 -0.286 -0.392 -0.107 -0.509 -0.119 C
29 0.793 -0.476 -0.286 -0.229 0.327 0.508 -0.664 B
30 1.016 -0.632 -0.286 -0.254 1.456 0.341 -0.446 B
31 0.498 0.014 -0.286 -0.397 0.106 0.090 -0.446 B
32 -1.614 0.816 -0.286 -0.397 -0.461 -0.528 -0.337 D
33 -0.338 -0.652 -0.286 -0.368 0.915 -0.468 -0.337 D
34 -0.624 -0.149 -0.286 -0.397 0.488 -0.480 -0.337 C
35 -0.571 -0.666 -0.286 -0.397 -0.499 -0.480 -0.446 C
36 -0.863 -0.346 -0.286 -0.397 0.044 -0.438 -0.446 C
37 -1.165 0.931 -0.286 -0.397 0.207 -0.609 -0.228 C
38 -0.976 -0.143 -0.286 -0.313 0.032 -0.497 -0.446 C
39 -0.979 0.326 -0.286 0.087 -0.084 0.014 -0.337 D
40 -0.307 -0.183 -0.286 -0.397 0.860 -0.532 -0.228 D
41 -0.788 0.326 -0.286 -0.397 0.652 -0.534 -0.228 C
42 -0.404 0.061 -0.286 -0.397 0.092 -0.501 -0.119 C
43 -0.822 -0.666 -0.286 -0.392 0.460 -0.535 -0.446 C
44 -0.926 -0.102 -0.286 -0.397 0.136 -0.619 0.317 C
45 -0.612 -0.129 -0.071 -0.022 -0.004 0.182 -0.337 D
46 -1.256 -0.299 -0.286 -0.378 0.156 -0.526 -0.446 C
47 -0.964 -0.278 -0.286 -0.195 -0.169 -0.298 -0.446 D

49 -0.766 -0.666 -0.286 -0.368 0.543 -0.660 0.535 D
50 -0.829 -0.319 -0.286 -0.106 -0.810 -0.230 -0.228 D
51 -1.140 -0.666 -0.286 -0.397 0.940 -0.545 -0.446 D
52 -0.159 -0.666 -0.286 -0.397 0.890 -0.507 -0.337 D
53 -0.536 -0.666 -0.286 -0.397 0.250 -0.369 -0.555 D
54 -0.059 -0.666 -0.286 -0.338 0.937 -0.469 -0.337 D
;

proc print;
  var recno biom1--erlsch stratum;

proc cluster data=fuel method=single;
  var biom1--erlsch;
proc tree;
run;

```

```

/*          Diskriminanz-Analyse der Brandgutdaten          */
/*          Diplomarbeit - Stephan Harvey 1995             */
/*          standardisierte Daten                          */
/*-----*/

data fuel;
  input recno biom1 biom2 biom3 biom4 ovverh
        tiefe erlsch stratum $ ;

  cards;
1  -0.800 -0.666 -0.286 -0.397 -2.088 -0.742  4.021 A
2   0.890  0.095 -0.286 -0.397 -0.826 -0.619  2.169 A
4  -0.285 -0.666 -0.286 -0.397 -1.933 -0.617  0.426 A
5   0.652 -0.666 -0.286 -0.397  1.578 -0.651  1.188 A
8   0.218 -0.666 -0.286 -0.397 -1.972 -0.231 -0.664 A
9   0.680 -0.666 -0.286 -0.397 -0.296 -0.636  3.150 A
10  1.029 -0.666 -0.286 -0.397  0.620 -0.632  1.188 A
12  2.276  0.048 -0.286 -0.397 -1.129 -0.550  0.644 A
13 -0.222 -0.666 -0.286 -0.397 -1.220 -0.627 -0.010 A
14  0.934 -0.333 -0.286  0.127 -1.044 -0.165  0.426 A
15  0.620 -0.666 -0.286 -0.397  1.712 -0.263 -0.555 B
17  0.369  0.306 -0.286 -0.397 -0.266  0.651 -0.664 B
18  0.564 -0.666 -0.286  1.412  0.123  1.494 -0.773 B
19  1.805 -0.666 -0.286  2.406 -0.285  0.880 -0.228 B
20 -0.332 -0.190 -0.286 -0.397  0.167 -0.535 -0.228 B
21  0.164 -0.333 -0.286  1.136  0.697  1.114 -0.773 B
22 -0.700 -0.618 -0.286 -0.284  0.166 -0.193 -0.664 B
23  1.412 -0.102 -0.148  0.676  1.942  0.483 -0.119 B
24  0.193  0.055 -0.286 -0.209  0.016  0.002 -0.555 B
25  0.516 -0.666 -0.286 -0.071 -0.304 -0.092 -0.446 B
26 -0.486 -0.666 -0.286 -0.200  0.271 -0.618  0.208 C
28 -0.653  1.210 -0.286 -0.392 -0.107 -0.509 -0.119 C
29  0.793 -0.476 -0.286 -0.229  0.327  0.508 -0.664 B
30  1.016 -0.632 -0.286 -0.254  1.456  0.341 -0.446 B
31  0.498  0.014 -0.286 -0.397  0.106  0.090 -0.446 B
32 -1.614  0.816 -0.286 -0.397 -0.461 -0.528 -0.337 D
33 -0.338 -0.652 -0.286 -0.368  0.915 -0.468 -0.337 D
34 -0.624 -0.149 -0.286 -0.397  0.488 -0.480 -0.337 C
35 -0.571 -0.666 -0.286 -0.397 -0.499 -0.480 -0.446 C
36 -0.863 -0.346 -0.286 -0.397  0.044 -0.438 -0.446 C
37 -1.165  0.931 -0.286 -0.397  0.207 -0.609 -0.228 C
38 -0.976 -0.143 -0.286 -0.313  0.032 -0.497 -0.446 C
39 -0.979  0.326 -0.286  0.087 -0.084  0.014 -0.337 D
40 -0.307 -0.183 -0.286 -0.397  0.860 -0.532 -0.228 D
41 -0.788  0.326 -0.286 -0.397  0.652 -0.534 -0.228 C
42 -0.404  0.061 -0.286 -0.397  0.092 -0.501 -0.119 C
43 -0.822 -0.666 -0.286 -0.392  0.460 -0.535 -0.446 C
44 -0.926 -0.102 -0.286 -0.397  0.136 -0.619  0.317 C
45 -0.612 -0.129 -0.071 -0.022 -0.004  0.182 -0.337 D
46 -1.256 -0.299 -0.286 -0.378  0.156 -0.526 -0.446 C
47 -0.964 -0.278 -0.286 -0.195 -0.169 -0.298 -0.446 D
48 -1.621 -0.557 -0.286 -0.289  1.047 -0.416 -0.773 D
49 -0.766 -0.666 -0.286 -0.368  0.543 -0.660  0.535 D
50 -0.829 -0.319 -0.286 -0.106 -0.810 -0.230 -0.228 D
51 -1.140 -0.666 -0.286 -0.397  0.940 -0.545 -0.446 D
52 -0.159 -0.666 -0.286 -0.397  0.890 -0.507 -0.337 D
53 -0.536 -0.666 -0.286 -0.397  0.250 -0.369 -0.555 D

;
proc print;
  var recno biom1--erlsch stratum;

proc candisc all;
  class stratum;
  var biom1--erlsch;

proc discrim list crossvalidate;
  class stratum;
  var biom1--erlsch;
  id recno;
run;

```

A5. Formeln des Rothermelmodells

Die im folgenden aufgeführten Formeln wurden von SCHÖNING (1996) aus amerikanischen Einheiten in metrische Einheiten umgewandelt.

$L = 0.0775I^{0.46}$	[m]	Flammenlänge (<i>flame length</i>)
$I = I_R D$	[kW/m]	Feuerfrontintensität (<i>fireline intensity</i>)
$H = I_R \tau$	[KJ/m ²]	Wärme pro Flächeneinheit (<i>heat per unit area</i>)
$D = R \tau$	[m]	Tiefe der Flammenzone (<i>depth of flame zone</i>)
$\tau = 75590 \sigma^{-1}$	[s]	Brenndauer einer Flamme (<i>flame residence time</i>)
$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_S + \Phi_W)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}$	[m/s]	Ausbreitungsrate (<i>forward rate of spread</i>)
$\rho_b = \frac{\sum_i \sum_j w_{0ij}}{\delta}$	[kg/m ³]	Dichte der Brandgutschicht (<i>mean bulk density</i>)
$\varepsilon_{ij} = e^{\frac{-452.76}{\sigma_{ij}}}$		Effektiver Entzündungsanteil eines Partikel (<i>effectiv heating number</i>)
$Q_{igij} = 581.5 + 25.957 M_{fij}$	[KJ/kg]	Entzündungswärme (<i>heat of preignition</i>)
$I_R = \Gamma' m_S \sum_{i=1}^2 w_{n_i} \eta_{M_i}$	[KW/m ²]	Reaktionsintensität (<i>reaction intensity</i>)
$\Gamma' = \frac{0.16828 \sigma^{3/2}}{29700 + 0.5997 \sigma^{3/2}} \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^A e^{A \left(1 - \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right) \right)}$	[s ⁻¹]	Potentielle Reaktionsgeschwindigkeit (<i>potential reaction velocity</i>)
$A = 340.53 \sigma^{-0.7913}$		
$\beta = \frac{\sum_i \sum_j w_{0ij}}{\delta \rho_p}$		Packungsdichte (<i>mean packing ratio</i>)
$\beta_{op} = 8.8578 \sigma^{-0.8189}$		Optimale Packungsdichte (<i>optimal packing ratio</i>)
$\eta_{M_i} = 1 - 2.59 r_{M_i} + 5.11 r_{M_i}^2 - 3.52 r_{M_i}^3$		Feuchtigkeitsdämpfungskoeffizient (<i>moisture damping coefficient</i>)

$$r_{M_i} = \frac{\sum_j f_{ij} M_{f_{ij}}}{M_{x_i}}$$

Feuchtigkeitsverhältnis
(*moisture ratio*)

$$M_{x_{live}} = \left(2.9W' \left(1 - \frac{M'_{f_{dead}}}{M_{x_{dead}}} \right) - 0.226 \right) 100$$

Erlöschungsfeuchtigkeit von
lebenden Brandgut (*moisture
of extinction, live fuels*)

$$M'_{f_{dead}} = \frac{\sum_j M_{f_{deadj}} h_{n_{deadj}}}{\sum_j h_{n_{deadj}}}$$

$$W' = \frac{\sum_j h_{n_{deadj}}}{\sum_j h_{n_{livej}}}$$

$$h_{n_{livej}} = 0.2048 w_{n_{livej}} e^{\left(\frac{-1640.42}{\sigma_{livej}} \right)}$$

$$h_{n_{deadj}} = 0.2048 w_{n_{deadj}} e^{\left(\frac{-452.76}{\sigma_{deadj}} \right)}$$

$$\eta_S = 0.174 S_e^{-0.19}$$

Mineraldämpfungskoeffizient
(*mineral damping coefficient*)

$$w_{ni} = \sum_j f_{ij} w_{nij} \quad [\text{kg/m}^2]$$

Netto Biomasse (*net loading*)

$$w_{nij} = (1 - S_T) w_{0ij} \quad [\text{kg/m}^2]$$

$$\sigma = \sum_i f_i \sum_j f_{ij} \sigma_{ij} \quad [\text{m}^{-1}]$$

Oberflächen-zu-Volumen-
Verhältnis (*characteristic
surface to volume ratio*)

$$\xi = \frac{1}{192 + 0.0791\sigma} e^{[(0.792 + 0.376\sqrt{\sigma})(\beta + 0.1)]}$$

Ausbreitungsfluss-Anteil
(*propagating flux ratio*)

$$U \leq 0.024 I_R$$

$$\Phi_W = C (196.85U)^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}$$

Windkoeffizient (*wind
coefficient*)

$$U > 0.024 I_R$$

$$\Phi_W = C (4.755 I_R)^B \left(\frac{\beta}{\beta_{op}} \right)^{-E}$$

$$C = 7.47 e^{(-0.06919\sigma^{0.55})}$$

$$B = 0.013298\sigma^{0.54}$$

$$E = 0.715 e^{(-0.0001094\sigma)}$$

$$\Phi_S = 5.275\beta^{-0.3} (\tan\Phi)^2$$

Hangneigungskoeffizient
(*slope coefficient*)

$$f_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_i} \quad f_i = \frac{A_i}{A_T}$$

Wichtungsfaktoren (*weighting
factors*)

$$A_{ij} = \frac{\sigma_{ij} w_{0ij}}{\rho_p}$$

$$A_i = \sum_j A_{ij}$$

$$A_T = \sum_i A_i$$

[m²]

Brandgutoberfläche (*fuel
surface area*)

wobei:

w_o	Ofentrockende Biomasse (<i>ovendry fuel loading</i>)	[kg/m ²]
δ	Tiefe der Brandgutschicht (<i>fuel bed depth</i>)	[m]
σ	Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis der Partikel (<i>fuel particle surface-area-to-volume-ratio</i>)	[m ⁻¹]
h	Unterer Heizwert des Brandgutes (<i>fuel particle low heat content</i>)	[KJ/kg]
ρ_p	Partikeldichte (<i>ovendry particle density</i>)	[kg/m ³]
M_f	Brandgutfeuchtigkeit (<i>fuel particle moisture content</i>)	[%]
S_T	Totaler Mineralgehalt (<i>fuel particle total mineral content</i>)	[Anteil Trockenmasse]
S_e	Effektiver Mineralgehalt (<i>fuel particle effective mineral content</i>)	[Anteil Trockenmasse]
U	Windgeschwindigkeit bei mittlerer Flammenhöhe (<i>windspeed at midflame height</i>)	[m/s]
Φ	Hangneigung (slope)	[grad]
M_x	Erlöschungsfeuchtigkeit von totem Brandgut (<i>moisture of extinction, dead fuel</i>)	[%]

i = Kategorie (geht von 1 bis 2; 1 = lebend, 2 = tot)

j = Grössenklasse (geht von 1 bis 5; 1 = <0.6 cm, 2 = 0.6-2.5 cm, 3 = 2.5-7.5 cm, 4 = verholzt, 5 = krautig)

Glossar

Aml	Arc Macro Language
Biomasse (<i>fuel loading</i>)	Trockengewicht organischen Materials
Brandgut (<i>fuel</i>)	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 (<i>fuel moisture</i>)	Wasseranteil eines Brandgut-partikels, gemessen an seinem ofentrockenen Gewicht.
Brandgutklasse (<i>fuel class</i>)	Charakteristische Art von Brandgutpartikel, wovon 5 Klassen existieren:
	totes Material mit folgenden Durchmessern:
	1. <0.6 cm
	2. 0.6-2.5 cm
	3. 2.5-7.5 cm
	lebendes Material mit Durchmesser <0.6 cm:
	4. krautig
	5. verholzt
Brandgutparameter	Damit wird jeder der 16 Eingabeparameter bezeichnet, welcher ein Brandgutmodell beschreibt.
Brandgutpartikel	Einzelne Partikel im Brandgut: Blätter, Äste etc.
Brandguttyp (<i>fuel typ</i>)	Charakteristische Art von Brandgut, z.B. Gras, Laub, Holz oder Streu.
Coverage	Vektordatensatz in ARC/INFO
DHM25	Digitales Höhenmodell mit einer Rasterauflösung von 25 Metern.
Erlöschungsfeuchtigkeit (<i>moisture of extinction</i>)	Feuchtigkeit des toten Brandgutes, bei welchem sich ein Feuer nicht ausbreiten kann.
Feuerverhalten (<i>fire behavior</i>)	Die Art wie ein Feuer auf die Variablen Wetter, Brandgut und Topographie reagiert
Grid	Rasterbasierter Datensatz in ARC/INFO
Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (<i>surface-to-volume-ratio</i>)	Verhältnis der Oberfläche zum Volumen einer Partikel (z.B. Blatt oder Ast)
Stichprobe	Eine Menge von Stichprobeneinheiten, die einer Grundgesamtheit entnommen werden.
Stichprobeneinheit	Ein Element aus der Stichproben (z.B. eine Pflanze oder die Streumenge innerhalb einer festgelegten Fläche)

Stratum	Teilfläche einer Grundgesamtheit, welche durch bereits vorhandenes Wissen, z.B. aus Karte oder Luftbild, gebildet wurde.
TIFF	Taged Image File Formed
Waldbrände (<i>wildfires</i>)	Alle Feuer in einer naturnahen Landschaft, ausgenommen kontrollierte Feuer.
Waldbrandgefahr (<i>fire danger</i>)	Oberbegriff für alle Faktoren, die Entzündung, Ausbreitung und Schwierigkeiten bei der Bekämpfung beeinflussen sowie die entstandenen Schäden.
Waldbrandsaison (<i>fire season</i>)	Die Zeitabschnitte des Jahres, in denen Waldbrände mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten.

