



Master Thesis

Im Rahmen des Universitätslehrganges
Geographical Information Science & Systems (UNIGIS MSc)
am Zentrum für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Einsatz von Sichtbarkeitsanalysen und heuristischer
Optimierungsverfahren bei der Routenplanung von
Aufklärungsflügen zur Waldbranddetektion
in Südportugal

vorgelegt von

Mag. rer. nat. Vojko Daneu

U1241, UNIGIS MSc Jahrgang 2012

Zur Erlangung des Grades

Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc (GIS)

Gutachter

Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Albufeira, im Juni 2014

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle wörtlich oder inhaltlich aus den angeführten Quellen übernommenen Stellen sind entsprechend gekennzeichnet.

Albufeira, den 30.06.2014

Vojko Daneu

Kurzfassung

Busch- und Waldbrände zählen mit ihrem enormen Zerstörungspotenzial und ihrer von Jahr zu Jahr steigenden Intensität zu jenen Naturphänomenen, die eine immer größere Bedrohung für die Umwelt und den Lebensraum des Menschen darstellen. Weltweit gewinnen Waldbrandprävention, -detektion und -bekämpfung einen immer höheren Stellenwert. Präventive Maßnahmen können aber nur einen Bruchteil der Brandereignisse tatsächlich auch verhindern. Statistiken belegen zudem, dass vor allem die Zahl katastrophaler Großbrände in Zukunft signifikant steigen wird. Neben der Brandbekämpfung kommt daher der rechtzeitigen Branddetektion vermehrt Bedeutung zu. Je früher ein Brandereignis detektiert werden kann, desto eher können katastrophale Konsequenzen abgewendet werden.

Zahlreiche Methoden wurden im Laufe der Zeit entwickelt, um Busch- und Waldbrände frühest möglich zu detektieren. Die Methoden reichen von der Überwachung waldbrandgefährdeter Gebiete aus Feuerwachtürmen heraus über die automatisierte Überwachung mit Hilfe von Kameras und Wärmesensoren bis hin zur luftgestützten Überwachung mit Hilfe von Flugzeugen und Helikoptern. In Abhängigkeit von den finanziellen, technischen und personellen Ressourcen eines Staates werden unterschiedliche Detektionsmethoden eingesetzt.

Portugal zählt zu jenen Staaten, die mit der jährlichen Anzahl an Waldbränden und dem Anteil an betroffener Waldfläche weltweit an oberster Stelle stehen. Besonders in den letzten zwei Jahrzehnten haben sich katastrophale Waldbrände ereignet, die weite Landschaftsbereiche verwüstet und auch Menschenleben gefordert haben. Neben der Prävention von Waldbränden setzt auch Portugal auf unterschiedliche Waldbranddetektionsmethoden. Unter anderem werden jeden Sommer landesweit und von mehreren Flughäfen und Flugplätzen aus Beobachtungsflüge zur Waldbranddetektion durchgeführt. Im Vergleich zu anderen Methoden ist die Detektionsrate vom Luftfahrzeug aus allerdings sehr bescheiden. Die Akzeptanz von Detektionsflügen wird deshalb in jenem Maß steigen, mit dem sich die Anzahl rechtzeitiger Waldbranddetektionen erhöht. Die Wahrscheinlichkeit erfolgreicher Detektionen hängt dabei ganz wesentlich von der geflogenen Flugroute ab. Ein Routenverlauf, der den Beobachter in die Lage versetzt, ungehindert alle Landschaftsbereiche mit hohem Waldbrandpotenzial beobachten zu können, kann die Wahrscheinlichkeit zur Detektion von Bränden, die sich noch im Anfangsstadium befinden, signifikant erhöhen.

Damit eröffnet sich die Frage, nach welchen Gesichtspunkten und auf welche Weise der Ver-

lauf einer Flugroute optimiert werden kann, um dem Ziel einer höheren Detektionsrate von Waldbränden etwas näher zu kommen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll überprüft werden, ob der Einsatz von Sichtbarkeitsanalysen und heuristischer Optimierungsverfahren die Berechnung von Flugrouten ermöglicht, die ein Überwachungsgebiet vorgegebener Größe best möglich abdecken. Am Beispiel eines Überwachungsgebietes in Südportugal werden für verschiedene Waldbrandrisikoszenarien Flugrouten berechnet und mit einer Referenzflugroute verglichen, die in diesem Überwachungsbereich seit 2006 zur Waldbranddetektion eingesetzt wird. Ziel dieser Arbeit ist nicht die Ausarbeitung von optimalen Flugrouten, sondern von Flugrouten, die gegenüber der Referenzflugroute einen optimierten Verlauf aufweisen.

Abstract

With their enormous destructive potential and continuously increasing intensity, bush and forest fires more and more threaten the environment and the living space of human beings. Specific preventive measures, wild fire detection and forest fire-fighting become therefore increasingly important. Unfortunately only a fraction of wild fires can be avoided by preventive measures. Statistics show a significant increase of devastating major fires in the near future. Early detection of wild fires is therefore of vital importance. The sooner a forest fire can be detected, the smaller the negative consequences of the fire will be.

Various forest fire detection methods have been developed ranging from detection methods based on lookout towers to electronic fire detection or detection with manned aircraft. Based on the financial, technical and human resources, different detection methods are implemented by governments.

Portugal belongs with its high numbers of wild fires per year and its high percentage of affected forest areas to the countries most affected by wild fires. Particularly in the last two decades, Portugal has experienced large devastating forest fires which destroyed vast areas of the country and which have also been responsible for many casualties among the inhabitants. Besides relying on specific preventive measures, Portugal also utilizes various wild fire detection methods such as aerial detection with manned aircraft. Each summer observation flights are started from airports and air fields all over the country. However, if compared with other wild fire detection methods, aerial detection is only responsible for a very small number of early detections. It is therefore very important to increase the detection rate of aerial observation to keep the support for this detection method. The probability of successful early fire detection essentially depends on the flight route used. A flight route allowing unobstructed view onto all areas of the landscape with high forest fire risk can result in a higher rate of early fire detections. This raises the question of how flight routes can be improved to increase the rate of early detections.

The aim of this master thesis is to find out, if the use of viewshed analysis and of heuristic optimisation algorithms can lead to the computation of flight routes, which cover a surveillance area of given size in an optimized way. Based on a monitoring area in the south of Portugal, different flight routes will be calculated for different wild fire risk scenarios. A comparison of the flight routes with a reference route operational since 2006 will reveal the quality of the alternative routes.

The main objective is not to find an optimal route but a route, which shows an optimized course, if compared to the reference flight route.

Inhaltsverzeichnis

Selbständigkeitserklärung	I
Kurzfassung	II
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	VI
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	IX
1 Einleitung und Problemstellung	1
1.1 Der Wald und seine Bedrohung	1
1.1.1 Nutzen des Waldes	1
1.1.2 Waldvernichtung aufgrund natürlicher und anthropogener Ursachen	2
1.1.3 Erhöhtes Waldbrandpotential im mediterranen Raum	5
1.1.4 Waldbrände und ihre Ursachen in Portugal	6
1.2 Das Nationale System zur Detektion von Waldbränden	8
1.2.1 Das portugiesische Feuerwachturmnetz	10
1.2.2 Waldbrandstreifendienste	10
1.2.3 Automatisches Waldbrandfrühwarnsystem mit optischen Kameras, Infrarotsensoren und LIDAR	10
1.2.4 Luftgestützte Überwachung mit Flugzeugen	11
1.3 Optimierung der Routenplanung von Aufklärungsflügen zur Waldbranddetektion	12
2 Theoretische Grundlagen	14
2.1 Berechnung der Waldbrandgefahr in Portugal	15
2.1.1 Einführung	15
2.1.2 Das kanadische Waldbrandwetterindex-System	16
2.1.2.1 Methodische Ansätze	16
2.1.2.2 Implementierung und Kalibrierung des kanadischen FWI für Portugal	17
2.1.2.3 Referenzwerte des FWI für die 18 portugiesischen Distrikte	18
2.1.3 Der „kombinierte Waldbrandgefahrenindex“ ICRIF	19
2.1.4 Waldbrandrisikokarten CRIF	20
2.2 GIS-basierte Sichtbarkeitsanalysen (Viewshed)	22
2.2.1 Sichtbarkeitskriterien	22
2.2.2 Erweiterung des Basisalgorithmus durch ein Offset	26
2.2.3 Erdkrümmung und terrestrische Refraktion	28
2.2.4 Reduktion der Sichtbarkeit durch atmosphärische Eigenschaften	29
2.2.5 Begrenzung der Sichtweite durch die Größe des Objektes	29
2.2.6 Werte der Sichtweite zu Erkennung von Brandereignissen – Auszüge aus der Literatur	30
	VI

2.3 TSP – das Problem des Handlungsreisenden	36
2.3.1 Einführung in das TSP	36
2.3.2 Mathematische Beschreibung	37
2.3.3 Heuristische Lösungsverfahren	39
2.3.4 Genetische Algorithmen	40
2.3.4.1 Genetische Algorithmen - Methodenbeschreibung	41
2.4 Flughöhe und Sicherheitsmindesthöhe	44
2.4.1 Flughöhe – Begriffsbestimmung	45
2.4.2 Sicherheitsmindesthöhe	46
3 Datengrundlage	47
3.1 Untersuchungsgebiet und Fluggebiete	47
3.1.1 Wahl des Untersuchungsgebietes	47
3.1.2 Aufteilung des Untersuchungsgebietes in zwei Teilbereiche	49
3.1.3 Beschreibung der zwei Fluggebiete „Portimão“ und „Faro“	50
3.1.3.1 Geographische Lage, Morphologie und Hydrographie	50
3.1.3.2 Landnutzung	52
3.1.3.3 Bevölkerungsdichte	54
3.1.3.4 Feuerwachtürme und Sichtbereiche	54
3.1.3.5 CRIF-Brandrisikogebiete	55
3.1.3.6 ICRIF-Brandrisikogebiete	56
3.2 Datenquellen	58
3.2.1 Geländemodell	58
3.2.2 Landnutzungsdaten	59
3.2.3 Daten zur Bevölkerungsdichte – Zensus 2011	61
3.2.4 Daten der Feuerwachtürme Portugals	62
3.2.5 CRIF und ICRIF Daten zur Ausweisung von Brandrisikogebieten	63
4 Optimierungsprogramme	64
4.1 File Path Optimizer (FPO)	64
4.1.1 Grundlegendes	64
4.1.2 Berechnung der Cluster	64
4.1.3 Berechnung der Sichtbarkeit	68
4.1.4 Genetische Algorithmen – Umsetzung im FPO Programm	69
4.1.5 Berechnung von Zwischenpunkten	72
4.2 Flight Altitude Optimizer FAO	73
4.2.1 Grundlegendes	73
4.2.2 Berechnung der Flughöhen	73

5 GIS Vorarbeiten und Sichtbarkeitsanalysen	78
5.1 Grundlegendes	78
5.2 GIS Vorarbeiten	78
5.2.1 Datenimport und Datenverarbeitung	78
5.2.2 Datenverschneidung	80
5.3 Clusterberechnungen	81
5.4 TSP Berechnungen	82
5.5 Zwischenpunktberechnungen, Höhenanpassungen und finale Sichtbarkeitsanalysen	85
5.6 Referenzflugüberwachungsroute und Routenvereinfachung	86
5.6.1 Referenzüberwachungsroute	86
5.6.2 Routenvereinfachung	87
6 Ergebnisse und Diskussion	88
6.1 Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Referenzflugroute	90
6.2 Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugrouten der 270 NM Klasse	92
6.3 Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugrouten der 120 NM Klasse	93
7 Zusammenfassung und Ausblick	97
8 Literatur- und Quellenverzeichnis	100
9 Anhang	110
9.1 CLC Klassen mit Nomenklatur und CLC Code	110
9.2 TSP Berechnungsvarianten	111
9.3 Flugpfade und Sichtbarkeiten der Alternativrouten	115

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

- Abbildung 1:** Weltkarte mit der Verteilung von Laub- und Nadelwäldern (Ahlenius, 2008) 1
- Abbildung 2:** Geschätzte weltweite Abholzung nach Waldart (grüne Balken: Wälder der gemäßigten Breitengrade, braune Balken: tropische Wälder) aufgrund menschlicher Aktivität (FAO, 2012) 2
- Abbildung 3:** Globale durchschnittliche Lufttemperaturanomalien (1850 bis 2012). Obere Kurve: jährlicher Durchschnitt, untere Kurve: 10-Jahresdurchschnitt (European Environment Agency, 2013) 3
- Abbildung 4:** Europäische durchschnittliche Lufttemperaturanomalien über Land (1850 bis 2012). Obere Kurve: jährlicher Durchschnitt, untere Kurve: 10-Jahresdurchschnitt (European Environment Agency, 2013) 4
- Abbildung 5:** Prognostizierte Veränderung des jährlichen Temperaturmittels bodennaher Luft in Europa für die Zeiträume 2021 bis 2050 (linke Abbildung) und 2071 bis 2100 (rechte Abbildung) nach Simulationen des regionalen Klimamodells ENSEMBLES für das IPCC SRES A1B Emissionsszenario (European Environment Agency, 2013) 4
- Abbildung 6:** Prognostizierte Veränderung des jährlichen Niederschlagsmittels (linkes Bild) und des Niederschlagsmittels für die Sommermonate (rechtes Bild) in Prozent zwischen 1961 bis 1990 und 2071 bis 2100 für den europäischen Kontinent nach Simulationen des regionalen Klimamodells ENSEMBLES für das IPCC SRES A1B Emissionsszenario (European Environment Agency, 2013) 5
- Abbildung 7:** Prognostizierte Veränderung der Anzahl an Tagen mit extremen Temperaturen für Mittel- und Südeuropa. Die Abbildungen zeigen die kombinierte Anzahl heißer Sommertage (mit Maximaltemperaturen $> 35^{\circ}\text{C}$) und tropischer Nächte (mit Minimumtemperaturen $> 20^{\circ}\text{C}$) für Juni bis August für die Perioden 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 im Vergleich zur Periode 1961 bis 1990. Nach Simulationen des regionalen Klimamodells ENSEMBLES für das IPCC SRES A1B Emissionsszenario (European Environment Agency, 2013) 6
- Abbildung 8:** Verteilung der jährlichen Anzahl an Buschbränden (port. fogachos) und Waldbränden (port. incêndios) des portugiesischen Festlandes zwischen 1996 und 2010. Quelle: Statistische Daten der nationalen Forstbehörde (port. Autoridade Florestal Nacional) (Lourenço et al., 2012) 6
- Abbildung 9:** Räumliche Verteilung der von Waldbränden betroffenen Flächen Portugals von 1990 bis 2008 7
- Abbildung 10:** Prozentueller Anteil an erfolgreicher Waldbranddetektion durch vier der fünf portugiesischen Waldbranddetektionssysteme von 2001 bis 2007 8
- Abbildung 11:** Linke Graphik: Geographische Position der Feuerwachtürme Portugals (rote Punkte) und Effektivität des Überwachungsnetzes (%) pro Distrikt; in hellgrau eingefärbten Distrikten werden weniger als 5 % aller Waldbrände von Feuerwachtürmen aus detektiert (Catry et al., 2007). Rechte Graphik: Sichtbarkeitskarte des portugiesischen Feuerwachturmnetzes mit variabler Sichtweite (16 Klassen). Die roten Bereiche sind von keinem Feuerwachturm aus sichtbar (Grupo CRISE, 1998-2011b) 9

Abbildung 12: Überdeckungsgrad des Waldbrandfrühwarnsystems Ciclope (Relvas et al., 2005)	11
Abbildung 13: Referenzrouten zum luftgestützten Waldbrandmonitoring in Portugal (Germano et al., 2010)	11
Abbildung 14: Struktur des CFFWIS Modells. Quelle: http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi (18.05.2014)	17
Abbildung 15: Linke Graphik: Waldbrandrisikokarte Portugals basierend auf dem CRIF Index (Grupo CRISE, 1998-2011). Rechte Graphik: Waldbrandrisikokarte Portugals basierend auf dem ICRIF Index für den 11.08.2012 (Bugalho, 2013)	21
Abbildung 16: Sichtbarkeit von verschiedenen Beobachterpositionen aus, mit verbesserter Sichtbarkeit aus dem Luftfahrzeug	23
Abbildung 17: TIN, Raster und trianguliertes Raster (Floriani und Magillo, 2003)	23
Abbildung 18: Beobachterposition und Geländeposition als Punkte, Zellen oder TIN und Darstellung der Sichtlinien. Unterschiedliche Möglichkeiten zur Definition des Sichtbarkeitskriteriums: (a) von Punkt zu Punkt (1 Sichtlinie) (b) von Punkt zu Zelle (4 Sichtlinien) (c) von Zelle zu Punkt (4 Sichtlinien) (d) von Zelle zu Zelle (16 Sichtlinien) (e) TIN: von Punkt zu Punkt (1 Sichtlinie) (f) TIN: von Punkt zu Zelle (3 Sichtlinien) Die Optionen TIN von Zelle zu Punkt (3 Sichtlinien) und TIN von Zelle zu Zelle (9 Sichtlinien) sind nicht dargestellt	24
Abbildung 19: (a) TIN mit der Möglichkeit zu 100%iger Sichtbarkeit der Dreiecksflächen. (b) stufenförmiges Geländemodell ohne Möglichkeit zu 100%iger Sicht auf Zellen in abschüssigem Gelände	24
Abbildung 20: Schematische Darstellung von Bereichen, die nicht direkt einsehbar sind, in denen die Detektion von Brandereignissen dennoch wahrscheinlich ist (Fisher, 1996)	27
Abbildung 21: Einfluss von Erdkrümmung und terrestrischer Refraktion auf die Sichtbarkeit eines Objektes	28
Abbildung 22: Rauchkerze (Byram und Jemison, 1948)	30
Abbildung 23: Simulation der Anfangsphase eines Waldbrandes durch eine Rauchkerze (Byram und Jemison, 1948)	30
Abbildung 24: Maximaldistanzen [Meilen], die eine Detektion kleiner Standardrauchsäulen unter unterschiedlichen Dunstverhältnissen vor drei typischen kalifornischen Geländehintergründen und für unterschiedliche Winkel zwischen Sonne, Beobachter und Rauchsäule erlauben (Bruce, 1944)	32
Abbildung 25: Layout des Feldversuches zum Vergleich von luftgestützten Waldbranddetektionssystemen und den Detektionssystemen mit Hilfe von Feuerwachtürmen (Harris und Fahnestock, 1954)	35
Abbildung 26: Einfluss der Distanz auf die Sichtbarkeit der Testrauchsäulen vom Luftfahrzeug aus. Die Punkte repräsentieren erfolgreiche Detektionen in der jeweiligen Distanzklasse, die numerischen Werte die Anzahl der erfolgreichen Beobachtungen (Harris und Fahnestock, 1954)	35
Abbildung 27: Einfaches graphisches TSP Modell	37
Abbildung 28: Schematische Darstellung eines Gens auf einem DNA-Strang (Deutsche Wikipedia, Gen)	41
Abbildung 29: Allgemeiner Ablauf eines Genetischen Algorithmus (Windisch, 2007)	42

Abbildung 30: Lage und Brandfläche der vier Großfeuer in der Algarve in den Jahren 2003 und 2012 (Tedim et al., 2013)	47
Abbildung 31: Gesamtuntersuchungsgebiet (UG gesamt), Teilbereiche des Untersuchungsgebietes (UG Faro und UG Portimão) und Flugzonen (Faro und Portimão)	48
Abbildung 32: Einteilung der Algarve nach geologischen Gesichtspunkten (Lopes und Monteiro, 2010)	51
Abbildung 33: Geographische Lage, Morphologie und Hydrographie des Untersuchungsgebietes	52
Abbildung 34: Landbedeckung im Untersuchungsgebiet (CORINE-Datensatz)	53
Abbildung 35: Bevölkerungsdichte (mehr als 100 Personen/km ²) im Untersuchungsgebiet	53
Abbildung 36: Verteilung der Feuerwachtürme im Untersuchungsgebiet und die Sichtbereiche mit einem Sichtradius von 9.800 m	55
Abbildung 37: Waldbrandrisikokarte des Untersuchungsgebietes. Datengrundlage: CRIF Waldbrandrisikoindexdaten. Vier Zonen mit extrem hohen Brandrisikoklassen sind ausgewiesen	56
Abbildung 38: Waldbrandrisikokarte des Untersuchungsgebietes. Datengrundlage: ICRIF Waldbrandrisikoindexdaten vom 11.08.2012	57
Abbildung 39: Waldbrandrisikokarte des Untersuchungsgebietes. Datengrundlage: ICRIF Waldbrandrisikoindexdaten vom 16.08.2012	57
Abbildung 40: Am Erdbeobachtungsprogramm Copernicus der Europäischen Union teilnehmende europäische Staaten (inklusive Türkei) sowie deren Beteiligung an den einzelnen CLC Datenerfassungen (European Environment Agency, 2007)	60
Abbildung 41: Beispiel eines Datensatzes für den Feuerwachturm „Picota“ in der Algarve aus der Datenbank des Webportals des IGEO-PT	62
Abbildung 42: Vereinfachtes Sichtfeldmodell als gerader, vertikaler Sichtkegel	64
Abbildung 43: Zellen (in grüner Farbe), die für die Sichtbarkeitsanalysen in Betracht gezogen werden. Mit C = Beobachtungspunkt und R = Sichtradius	65
Abbildung 44: Graphiken (A) bis (C): Darstellung eines Berechnungszyklus im Rahmen der Clusterberechnungen. Graphik (D): Blickrichtungen innerhalb der Sichtbarkeitsberechnungen. Grün und gelb eingefärbte Zellen: Zellen, die sich zur Gänze innerhalb eines footprints befinden; orange eingefärbte Zellen: Zellen, die mit einem Brandrisikoindex > 25 attribuiert sind; weiß eingefärbte Zellen: Zellen, die mit einem Brandrisikoindex ≤ 25 attribuiert sind und für die keine Sichtbarkeitsanalysen gerechnet werden	66
Abbildung 45: Beispiel einer Standard Rekombination in einem Genetischem Algorithmus. Die zwei Elternindividuen werden nach der dritten Teilstrecke durchtrennt und rekombiniert. Die Nachkommen sind für den Fall des Problems des Handlungsreisenden ungültig	71
Abbildung 46: Finale Flugroute LPPM-270NM-CRIF (blauer Pfad) und LPFR-270NM-CRIF (roter Pfad). Die zwei Flougrouten haben theoretischen Charakter und werden so in der Praxis kaum abgeflogen	84
Abbildung 47: Programmeinstellungen für die Berechnung der Flughöhen	85
Abbildung 48: Höhenprofil (Ausschnitt) für den Flugpfad LPPM-270NM-CRIF. Abszisse: Nummerierung der Wegpunkte der Flugroute (1 = Poritmão Flugplatz LPPM). Ordinate: Höhe über MSL in Fuß	86

Abbildung 49: Vergleich zwischen optimiertem und vereinfachtem Flugpfad. Der optimierte Flugpfad LPPM-120NM ICRIF 11.08. mit 20 Wegpunkten wurde durch Eliminierung von 14 Wegpunkten vereinfacht	87
Abbildung 50: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für den Referenzflugpfad (CRIF 2011). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	90
Abbildung 51: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für den Referenzflugpfad (ICRIF 11.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	91
Abbildung 52: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für den Referenzflugpfad (ICRIF 16.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	91
Abbildung 53: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 270 NM (ICRIF 11.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	93
Abbildung 54: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 120 NM (ICRIF 11.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	94
Abbildung 55: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die vereinfachten Flugpfade der Klasse 120 NM (ICRIF 11.08.2012). Vom Flugzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	94
Abbildung 56: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die vereinfachten Flugpfade der Klasse 120 NM (ICRIF 16.08.2012). Vom Flugzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	96
Abbildung 57 (oben) und 58 (unten): Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 270 NM (CRIF 2011 und ICRIF 16.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	115
Abbildung 59: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 120 NM (CRIF 2011). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	116
Abbildung 60: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 120 NM (ICRIF 16.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt	116

Tabellen

Tabelle 1: FWI Referenzwerte für die fünf portugiesischen Waldbrand Risikoklassen für jeden Bezirk (Viegas et al., 2004)	18
Tabelle 2: Werte für Feuerdetektionsradien [km] unterschiedlicher Staaten und Regionen mit Quellenangabe	31
Tabelle 3: Distanzwerte für Sichtweiten zur Detektion kleiner Testrauchsäulen als Funktion der Helligkeit des Landschaftshintergrundes, des Blickwinkels (30° bis 150°) und optimaler atmosphärischer Bedingungen. Die Werte der maximal möglichen Sichtweite multipliziert mit 70 % ergeben die Werte der sicheren Sichtweite (Bruce, 1944)	33
Tabelle 4: Werte für Feuerdetektionsradien [km] von Luftfahrzeugen aus mit Quellenangabe	34
Tabelle 5: Koordinaten (UTM 29N, WGS 84) der Flugplätze LPFR, LPPM und LPBJ	

(*Flughafen/Flugplatzkennung nach der Internationalen Zivilen Luftverkehrsorganisation ICAO)	49
Tabelle 6: Koordinaten der Eckpunkte für die Untersuchungsgebiete Portimão (LPPM) und Faro (LPFR) (UTM 29N, WGS 84)	50
Tabelle 7: Zeit (Time), benötigter Treibstoff (Fuel Used) und zurückgelegte Distanz (Distance) im Steigflug für ein Luftfahrzeug des Typs Cessna 152 (Cessna Aircraft Company, 1979)	75
Tabelle 8: Triebwerksleistungseinstellung (Break Horse Power – BHP), Wahre Fluggeschwindigkeit in Knoten (True Airspeed – KTAS) und Treibstoffverbrauch pro Stunde (Gallons per Hour – GPH) für unterschiedliche Motordrehzahlen (Round per Minute – RPM) und Druckhöhen für ein Luftfahrzeug des Typs Cessna 152 (Cessna Aircraft Company, 1979)	76
Tabelle 9: Teilauszug der Einstellungen und Resultate der Cluster- und TSP Berechnungen für drei unterschiedliche Waldbrandrisikoszenarien (CRIF 2011, ICRIF 11.08.2012 und ICRIF 16.08.2012)* Die in der Tabelle angegebenen Werte der Flugpfadlänge beziehen sich auf die horizontalen Distanzen zwischen den Wegpunkten	84
Tabelle 10: Vergleich der Sichtbarkeiten zwischen der Referenzflugroute und den Alternativflugrouten für drei Waldbrandrisikoszenarien (CRIF 2011, ICRIF 11.08.2012 und ICRIF 16.08.2012)	89
Tabelle 11: CLC Klassen mit Nomenklatur und CLC Code	110
Tabelle 12: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m]. Die optimalen Pfade sind blau eingefärbt	111
Tabelle 13: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m].	112
Tabelle 14: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m]. Die optimalen Pfade sind blau eingefärbt	113
Tabelle 15: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m]. Die optimalen Pfade sind blau eingefärbt	114

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Der Wald und seine Bedrohung

1.1.1 Nutzen des Waldes

Wälder zählen in ihrer außerordentlichen Bedeutung für Ökologie, Wirtschaft und Gesellschaft zu den wichtigsten und produktivsten Ökosystemen dieses Planeten. Sie bieten unzähligen Arten Lebensraum und Schutz und beherbergen mehr als 50 % aller pflanzlichen und tierischen Landlebewesen (Thies et al., 2011). Wälder regulieren das Klima auf lokaler, regionaler und globaler Ebene und haben damit nach den Weltmeeren den zweitgrößten Einfluss auf das Weltklima. Sie absorbieren CO₂ aus der Atmosphäre, speichern dieses in Form von Biomasse sowie im Boden ab und wirken damit dem globalen Treibhauseffekt entgegen. Luftschadstoffe werden absorbiert und gebunden, Regenwasser wird gereinigt, Bodenerosion, Schlamm- und Schneelawinen sowie Fluten werden verhindert oder abgeschwächt. Wälder spielen eine entscheidende Rolle im natürlichen Wasserkreislauf der Erde, sind Orte größter Biodiversität und gehören zu den wichtigsten Sauerstoffproduzenten.

Wälder und die Forstwirtschaft haben einen bedeutenden Einfluss auf die nationale Ökonomie, indem sie Rohstoffe liefern sowie Arbeit und Einkommen für Tausende von Menschen sichern. Der globale Umsatz mit international gehandelten Forstprodukten erreicht inzwischen 270 Milli-

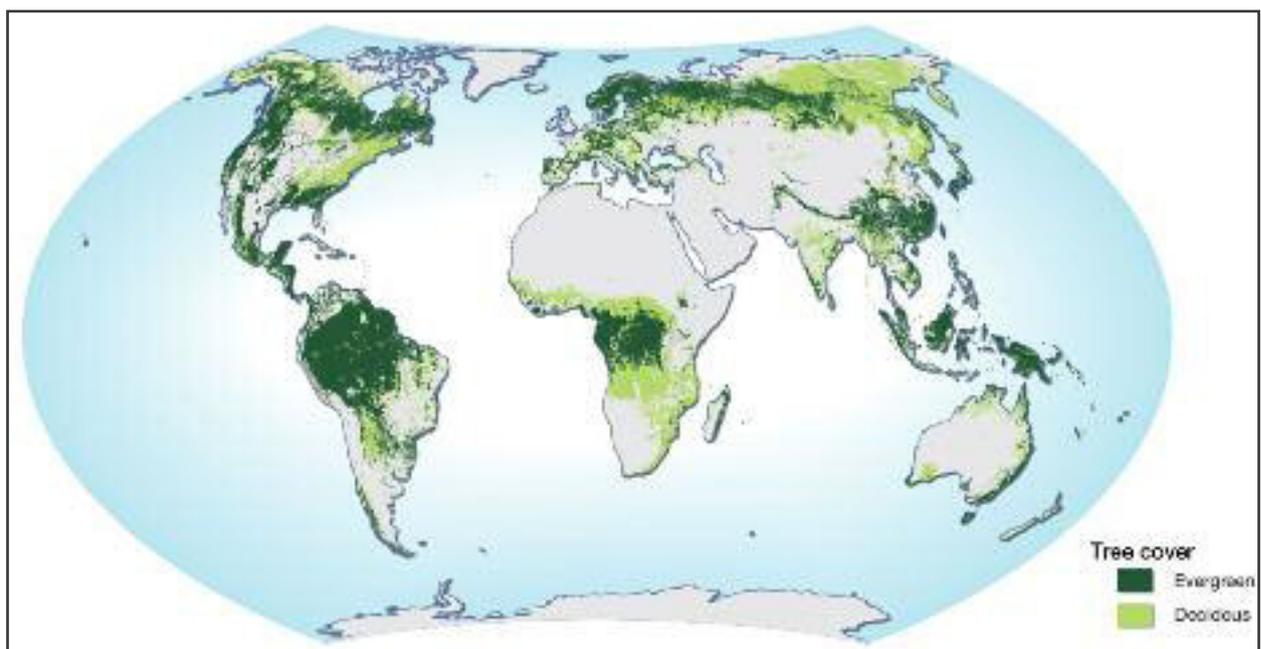


Abbildung 1: Weltkarte mit der Verteilung von Laub- und Nadelwäldern (Ahlenius, 2008)

arden US\$, wobei der Anteil der Entwicklungsländer am globalen Handel bis zu 20 % beträgt. Es wird geschätzt, dass die Forstwirtschaft weltweit bis zu 50 Millionen Menschen eine Arbeitsmöglichkeit verschafft und damit zum Lebensunterhalt von über 1,6 Milliarden Menschen beiträgt (The World Bank, 2009). Wälder sind von vitaler Bedeutung für ein funktionierendes Ökosystem und spielen daher eine entscheidende Rolle für das Leben und Überleben des Menschen.

1.1.2 Waldvernichtung aufgrund natürlicher und anthropogener Ursachen

Zum Ende der letzten Eiszeit vor ca. 10.000 Jahren waren etwa 45 % der Landfläche (fast 6 Milliarden Hektar) bewaldet (FAO, 2012). Seitdem ist der Waldbestand aufgrund von Temperatur- und Klimaveränderung, aber vor allem durch den menschlichen Einfluss, signifikant zurückgegangen. 2011 waren nur noch 30,9 % der Erdoberfläche durch Wälder bedeckt (The World Bank, 2011). Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts waren die höchsten Raten an Entwaldung aufgrund von menschlicher Aktivität bei Wäldern der gemäßigten Breiten in Asien, Europa und Nordamerika zu verzeichnen (siehe Abb. 2). Dieser Trend hat sich allerdings bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts

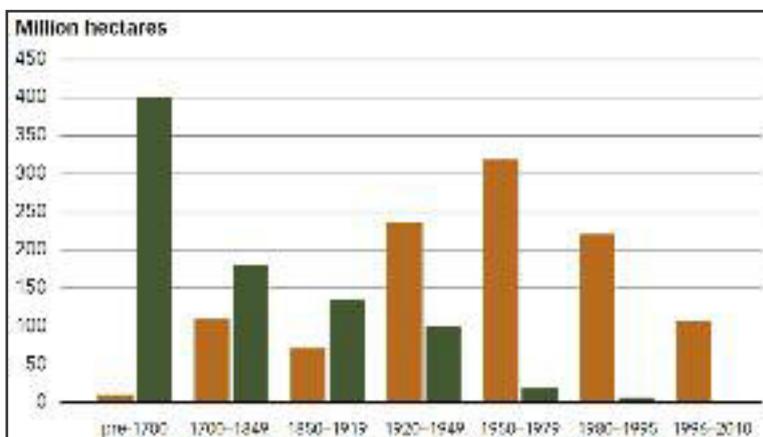


Abbildung 2: Geschätzte weltweite Abholzung nach Waldart (grüne Balken: Wälder der gemäßigten Breitengrade, braune Balken: tropische Wälder) aufgrund menschlicher Aktivität (FAO, 2012)

nicht fortgesetzt – im Wesentlichen bleibt der Waldbestand der gemäßigten Breiten seitdem konstant. Gleichzeitig hat aber die Entwaldung der tropischen Urwälder rasant zugenommen und hält auch heute noch mit außerordentlich hohen Raten an (FAO, 2012). Als Ursachen für die vorsätzliche oder unbeabsichtigte globale Entwaldung sind vor allem die landwirtschaftliche Expansion, Holzschlag, die Verwendung von Biomasse zur Gewinnung von Energie, Infrastrukturprojekte, kulturelle Faktoren und nicht zuletzt auch politische und institutionelle Fehlentscheidungen zu nennen.

Neben dem menschlichen Einfluss haben aber auch natürliche Phänomene einen maßgeblichen Anteil am weltweiten Rückgang des Waldbestandes. Dazu gehören Entwaldung durch Vulkanausbrüche, durch Insektenbefall und Krankheiten, durch invasive Pflanzenarten und

insbesondere durch natürliche Busch- und Waldbrände. Aktuelle Studien zeigen aber, dass lediglich 4 % der Waldbrände durch natürliche Ursachen wie Blitzeinschläge und Selbstentzündungen entfacht werden. 96 % aller Waldbrände haben ihre Ursache in vorsätzlicher Brandlegung aus wirtschaftlichen Gründen, in Brandrodung, in Unachtsamkeit beim Hantieren mit Campingfeuern oder durch unachtsames Wegwerfen von Zündhölzern und Zigarettenkippen (WWF, 2011).

Wald- und Buschbrände verursachen jedes Jahr global enorme Schäden. Zwischen 2003 und 2007 wurden jährlich im Durchschnitt rund 20 Millionen Hektar oder 0,7 % des weltweiten Waldbestandes durch Brände vernichtet. Innerhalb dieses Zeitraumes verzeichneten dabei die Länder Tschad, Senegal, Ghana, Botswana und Portugal den höchsten Anteil an betroffener Waldfläche (FAO, 2010). Der daraus resultierende globale Rückgang an Fertilität, die großräumige Bodenerosion, der Klimawandel und die zunehmende Desertifikation werden jedes Jahr problematischer.

Das Ausmaß und die Häufigkeit an Busch- und Waldbränden hat sich in den letzten Jahren dramatisch erhöht und insbesondere in Europa und Nordamerika wird innerhalb der nächsten 30 Jahre eine weitere Zunahme der Waldbrandhäufigkeit erwartet (Moritz et al., 2012). Der Klimawandel führt zu signifikanter Veränderung der Niederschlags- und Temperaturverteilung auf lokaler, regionaler und globaler Ebene. Basierend auf fortlaufenden Klimasimulationen und klimatologischen Auswertungen der Europäischen Umweltagentur (engl. European Environment Agency – EEA), konnte zwischen 2003 und 2012 ein Anstieg der globalen, bodennahen (Land und Ozean) jährlichen Durchschnittstemperaturen von 0,76 °C bis 0,81 °C im Vergleich zu vorindustriellen Temperaturdurchschnittswerten festgestellt werden (siehe Abb. 3). Der durchschnittliche Temperaturanstieg für den europäischen Kontinent war im selben Zeitraum mit 1,3 °C sogar noch höher als der globale Durchschnitt (siehe Abb. 4). Es wird prognostiziert, dass die jährlichen Durchschnittstemperaturen bis 2100 global um zwischen 1,8 °C und 4,0 °C und in Europa um 2,5 °C bis 4,0 °C weiter steigen werden (unter

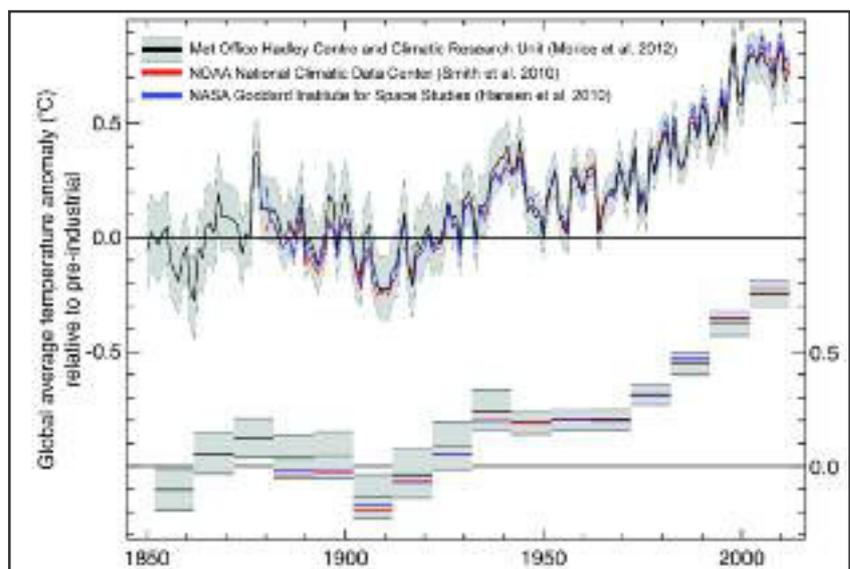


Abbildung 3: Globale durchschnittliche Lufttemperaturanomalien (1850 bis 2012). Obere Kurve: jährlicher Durchschnitt, untere Kurve: 10-Jahresdurchschnitt (European Environment Agency, 2013)

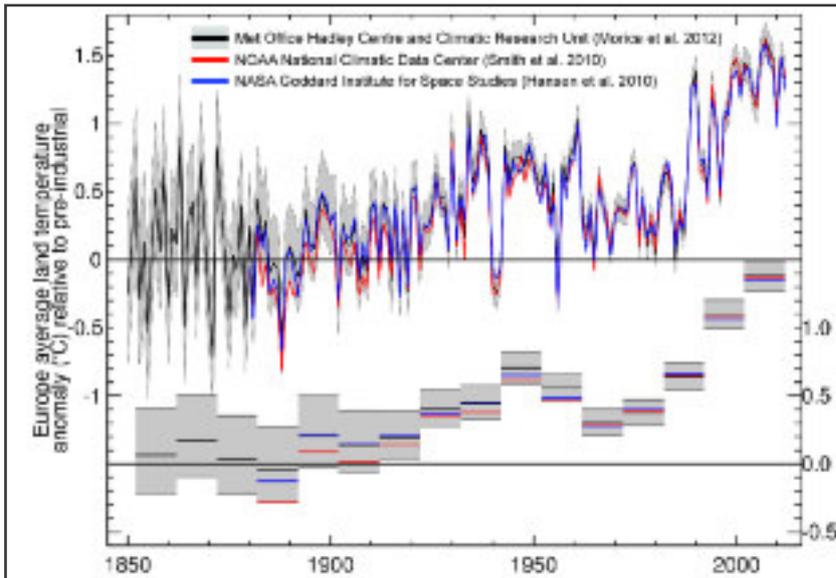


Abbildung 4: Europäische durchschnittliche Lufttemperaturanomalien über Land (1850 bis 2012). Obere Kurve: jährlicher Durchschnitt, untere Kurve: 10-Jahresdurchschnitt (European Environment Agency, 2013)

Nichtberücksichtigung der Unsicherheiten der verwendeten Klimamodelle). Der größte Temperaturanstieg im Verlauf des 21. Jahrhunderts wird für die Wintermonate in Nord- und Osteuropa, und für die Sommermonate in Südeuropa erwartet (European Environment Agency, 2013) (siehe Abb. 5).

Klimatologische Simulationen prognostizieren darüber hinaus saisonale und jährliche Änderungen der Niederschlagsverteilung in Europa (siehe Abb. 6). Bis zum Ende des Jahrhunderts soll die Niederschlagswahrscheinlichkeit im nördlichen Europa signifikant zunehmen und im südlichen Europa signifikant abnehmen. Die Änderung des jährlichen Niederschlagsmittels zwischen den Perioden 1961 bis 1990 und 2071 bis 2100 wird gemäß des Forschungsprojektes ENSEMBLES (Van der Linden und Mitchell, 2009) auf 10 bis 20 % für das nördliche Europa und auf -5 bis -20 % für das südliche Europa und den mediterranen Raum geschätzt. Die Langzeitvorhersagen für die Sommermonate zeigen eine Abnahme der Niederschläge über weite Bereiche von Süd-, Zentral- und Nordwesteu-

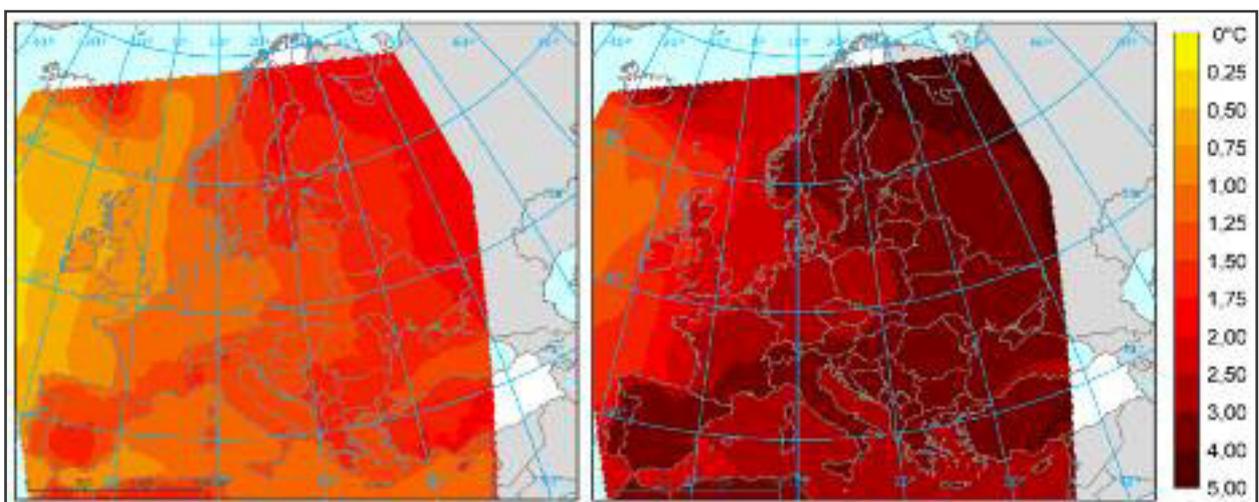


Abbildung 5: Prognostizierte Veränderung des jährlichen Temperaturmittels bodennaher Luft in Europa für die Zeiträume 2021 bis 2050 (linke Abbildung) und 2071 bis 2100 (rechte Abbildung) nach Simulationen des regionalen Klimamodells ENSEMBLES für das IPCC SRES A1B Emissionsszenario (European Environment Agency, 2013)

ropa, mit Werten von bis zu 60 % für Teile Südeuropas (European Environment Agency, 2012). Der andauernde Anstieg des jährlichen Temperaturmittels und die zu erwartende Verringerung der Niederschlagswahrscheinlichkeit in den kommenden Dekaden werden den bereits existierenden Druck auf die Ökosysteme des südlichen Europas und des mediterranen Raumes noch weiter erhöhen. Ohne Zweifel wird auch die Wahrscheinlichkeit von immer verheerenderen Busch- und Waldbränden ansteigen!

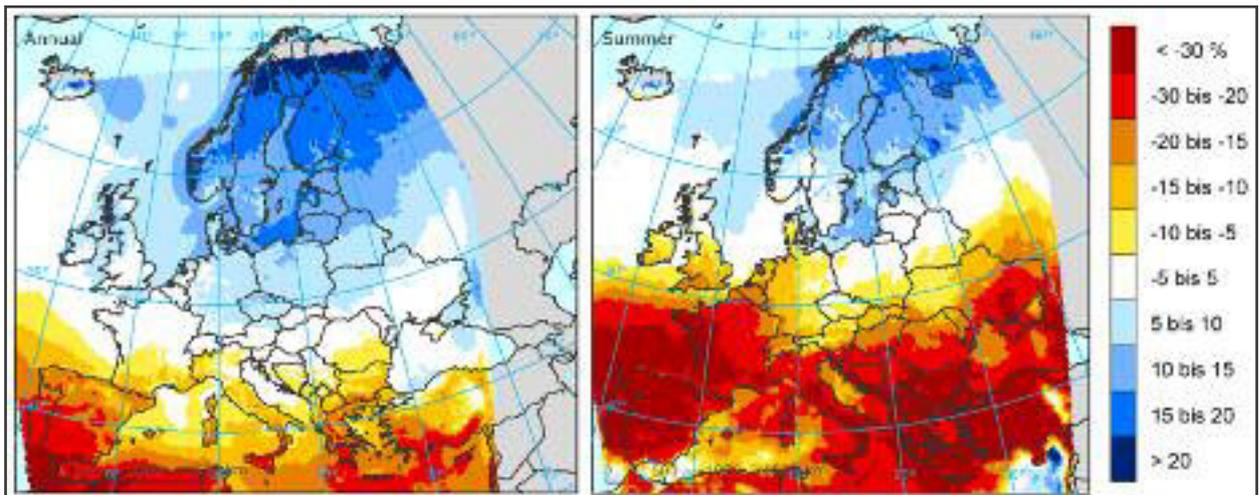


Abbildung 6: Prognostizierte Veränderung des jährlichen Niederschlagsmittels (linkes Bild) und des Niederschlagsmittels für die Sommermonate (rechtes Bild) in Prozent zwischen 1961 bis 1990 und 2071 bis 2100 für den europäischen Kontinent nach Simulationen des regionalen Klimamodells ENSEMBLES für das IPCC SRES A1B Emissionsszenario (European Environment Agency, 2013)

1.1.3 Erhöhtes Waldbrandpotential im mediterranen Raum

Die mediterrane Region erstreckt sich über Teile der drei Kontinente Europa, Asien und Afrika und umfasst 27 nationale Staaten inklusive Portugal. Das Klima ist gekennzeichnet durch milde und regenreiche Winter sowie heiße und trockene Sommer. Für das Jahr 2010 wurde der Gesamtbestand an mediterranem Wald mit 85 Millionen Hektar oder 2 % des globalen Waldbestandes geschätzt, wobei auf Portugal ca. 3,46 Millionen Hektar entfielen (FAO, 2010). Der Aufbau von Biomasse über die Wintermonate liefert den Brennstoff für ausgedehnte Waldbrände im Sommer, wobei als Hauptbrandursache nachlässiges menschliches Verhalten und Brandstiftung identifiziert werden (Delattre, 1993). Die klimatischen Verhältnisse in der heißen und trockenen Sommersaison (von Juni bis Ende Oktober) mit wenig Regen, hohen Tagesdurchschnittstemperaturen von über 30° C und Wind führen zu einem starken Austrocknen der Biomasse und damit zu einer stark erhöhten Waldbrandgefahr (FAO, 2007). Nach einer Studie von Barbosa et al. (2007) zählen Portugal, Spanien, Frankreich, Italien, Kroatien und Griechenland zu jenen Ländern des mediterranen Raumes mit der höchsten Zahl an verheerenden Wald- und Buschbränden und der größten Zahl an ver-

nichteter Waldfläche. Die Situation wird in naher Zukunft zusätzlich durch häufigeres Auftreten von intensiven Hitzeperioden verschärft (Fischer und Schär, 2010; European Environment Agency, 2012) (siehe Abb. 7).

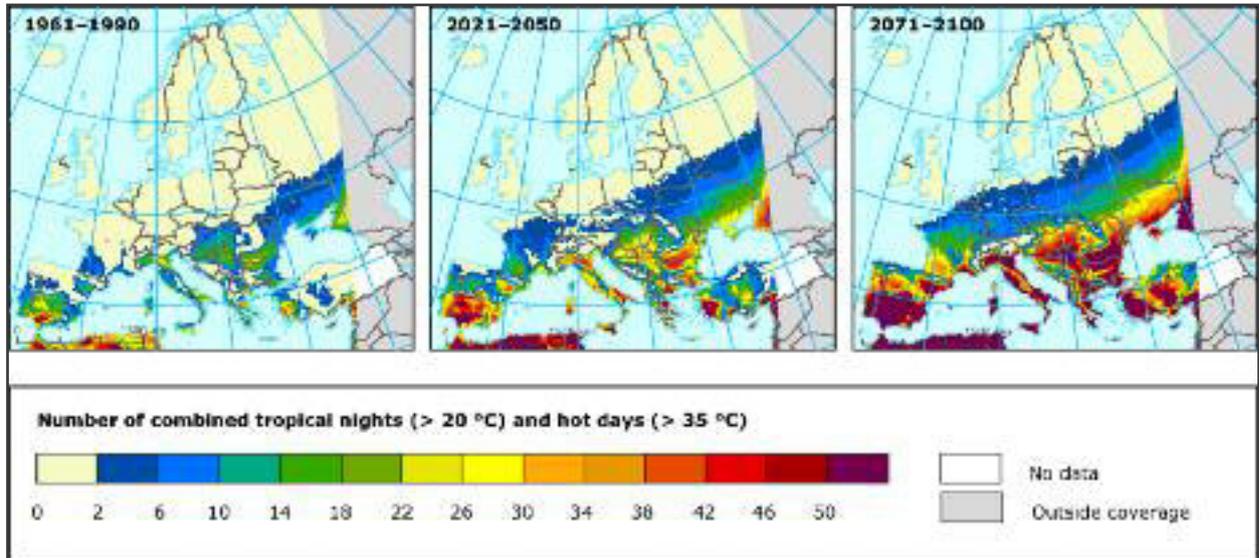


Abbildung 7: Prognostizierte Veränderung der Anzahl an Tagen mit extremen Temperaturen für Mittel- und Südeuropa. Die Abbildungen zeigen die kombinierte Anzahl heißer Sommertage (mit Maximaltemperaturen > 35°C) und tropischer Nächte (mit Minimumtemperaturen > 20°C) für Juni bis August für die Perioden 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 im Vergleich zur Periode 1961 bis 1990. Nach Simulationen des regionalen Klimamodells ENSEMBLES für das IPCC SRES A1B Emissionsszenario (European Environment Agency, 2013)

1.1.4 Waldbrände und ihre Ursachen in Portugal

Etwa zwei Drittel des portugiesischen Festlandes sind durch Wald bedeckt, wobei Pinien-, Eukalyptus- und Korkeichenarten vorherrschen (Verde, 2008). Noch vor mehr als 45 Jahren wurden Brände in ihrer Zahl und Größe als keine besondere Bedrohung für die portugiesischen Wälder an-

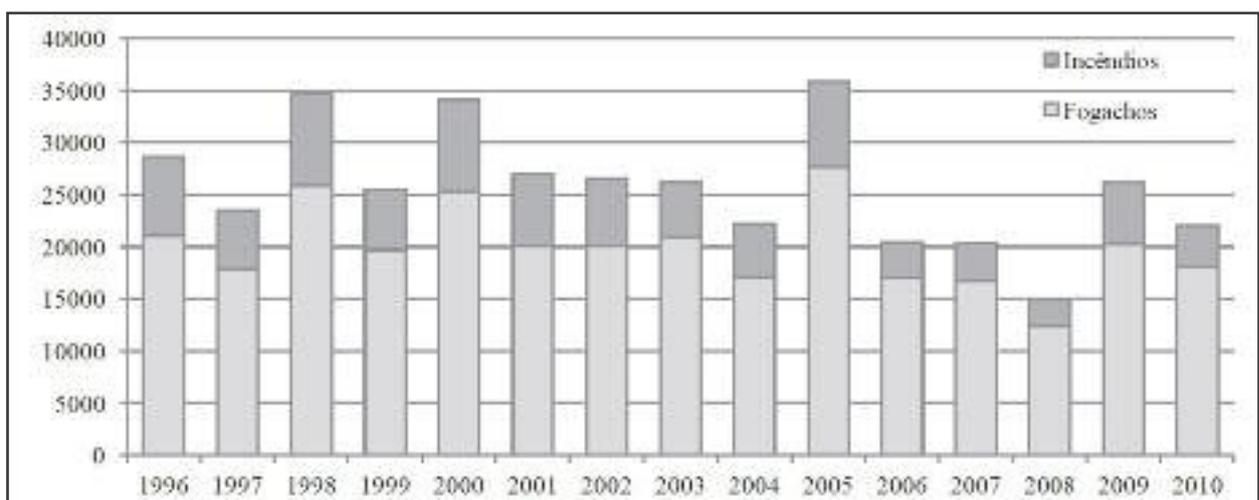


Abbildung 8: Verteilung der jährlichen Anzahl an Buschbränden (port. fogachos) und Waldbränden (port. incêndios) des portugiesischen Festlandes zwischen 1996 und 2010. Quelle: Statistische Daten der nationalen Forstbehörde (port. Autoridade Florestal Nacional) (Lourenço et al., 2012)

gesehen. Erst mit den sozioökonomischen, demographischen und kulturellen Veränderungen der portugiesischen Gesellschaft Anfang der Siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts kam es zu einem großen Anstieg der Anzahl kleiner und mittlerer Busch- und Waldbrände, der Größe der betroffenen Flächen und der Anzahl katastrophaler Waldbrände. Mit dem Beginn der Neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts erreichten die Waldbrände inzwischen dramatische Ausmaße regionalen Charakters und enormer Zerstörungskraft (Portela, 1993; Ferreira-Leite et al., 2012). Von 1996 bis 2010 wurden jährlich zwischen 15.000 und 35.000 Busch- und Waldbrände unterschiedlicher Größe registriert (siehe Abb. 8). Die große Variabilität der Anzahl jährlicher Brände

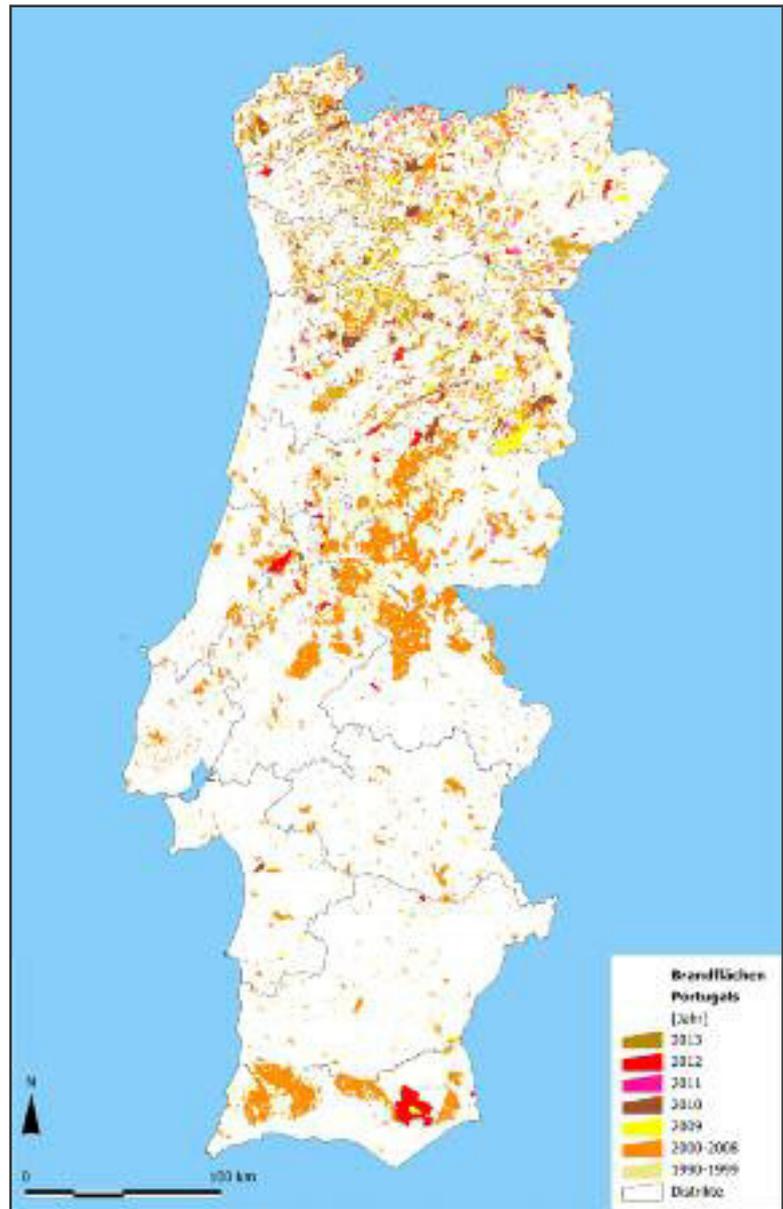


Abbildung 9: Räumliche Verteilung der von Waldbränden betroffenen Flächen Portugals von 1990 bis 2008

lässt sich im Wesentlichen durch jährlich unterschiedlich vorherrschende meteorologische Bedingungen erklären, die in manchen Jahren das Auftreten von Bränden stärker begünstigen als in anderen (Lourenço et al., 2012).

Eine Studie über die Ursachen der Busch- und Waldbrände in Portugal, die 2005 durch die nationale Forstverwaltung (port. Corpo Nacional da Guarda Florestal) durchgeführt wurde, zeigt, dass auch in Portugal die überwiegende Mehrheit der Brände, deren Ursachen durch anschließende Untersuchungen geklärt werden konnten, durch menschliche Aktivität ausgelöst werden. So wurden im Zeitraum von 1993 bis 2003 von allen erfolgreich untersuchten Bränden 42 % durch Unachtsamkeit im Hantieren mit Feuer, 55 % durch Brandstiftung und lediglich 3 % durch natürliche Er-

eignisse verursacht (Gonçalves et al., 2007).

1.2 Das Nationale System zur Detektion von Waldbränden

Portugal verfügt über ein nationales System zur Detektion von Waldbränden (port. Sistema Nacional de Detecção de Incêndios Florestais – SNDIF), das sich auf fünf unterschiedliche Detektionsmethoden stützt. Zu den Methoden zählen (Almeida, 1998-2009):

- Detektion über das portugiesische Netz an Feuerwachtürmen (engl. lookout towers)
- Detektion über Waldbrandstreifendienste (engl. ground mobile)
- Detektion über luftgestützte Überwachung mit Flugzeugen (engl. aerial)
- Detektion mit Hilfe automatischer Waldbrandfrühwarnsysteme mit optischen Kameras, Infrarotsensoren und LIDAR (engl. automated video and infrared detection systems and LIDAR)
- Detektion durch die Bevölkerung (engl. population)

Laut einer Analyse, die im Zuge der Vorbereitungen zur Entwicklung des weltraumgestützten Feuermeldesystems FUEGO (Escorial et al., 2003) durchgeführt wurde, werden etwa 9 % aller Waldbrände (in manchen Ländern auch bis zu 40 %) durch die Öffentlichkeit gemeldet (San-Miguel-Ayanz et al., 2005). Eine ab März 2006 von der Universität Lissabon (Centro de Ecologia Aplicada "Prof. Baeta Neves" – CEABN) unter den Mitgliedern des Europäischen Waldbrandinformationssystems (EFFIS) durchgeführte Umfrage (Projektnummer: FP6-018505; Akronym: FIRE PARADOX) zur Effektivität einzelner Waldbranddetektionsmethoden in Abhängigkeit ausgewählter

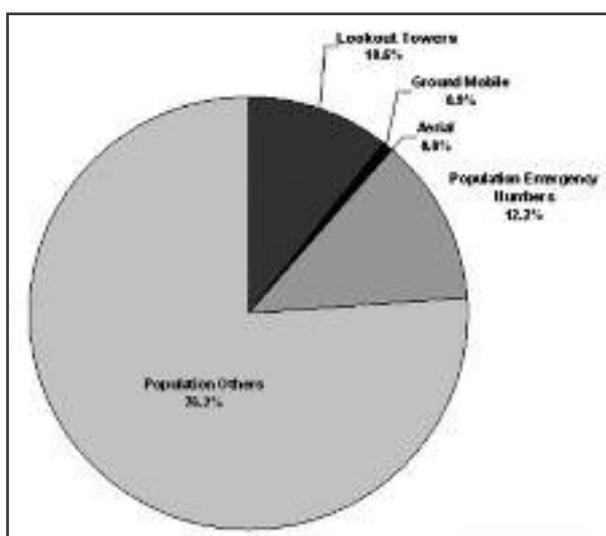


Abbildung 10: Prozentueller Anteil an erfolgreicher Waldbranddetektion durch vier der fünf portugiesischen Waldbranddetektionssysteme von 2001 bis 2007

physiogeographischer und humangeographischer Variablen ergab noch weitaus eindeutiger Werte. So wurden laut dieser Studie beispielsweise auf der Iberischen Halbinsel von 2001 bis 2007 88% aller Waldbrände in Portugal und 56 % aller Waldbrände in Spanien durch die Bevölkerung detektiert und gemeldet (Rego et al., 2012). Rund 10 % der Brandsichtungen erfolgen durch Beobachter aus Feuerwachtürmen und nur ein kleiner Bruchteil von weniger als 2 % der Detektionen entfallen auf die Beobachtung durch Waldbrandstreifendienste und auf

die luftgestützte Überwachung mit Flugzeugen (siehe Abb. 10). Als Datenbasis dienten unter anderem 290.976 Brandereignisse in Portugal und Spanien in den Jahren 2001 bis 2007. Die Detektion von Brandereignissen mit Hilfe automatischer Waldbrandfrühwarnsysteme mit optischen Kameras und Infrarotsensoren wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt (Rego et al., 2012).

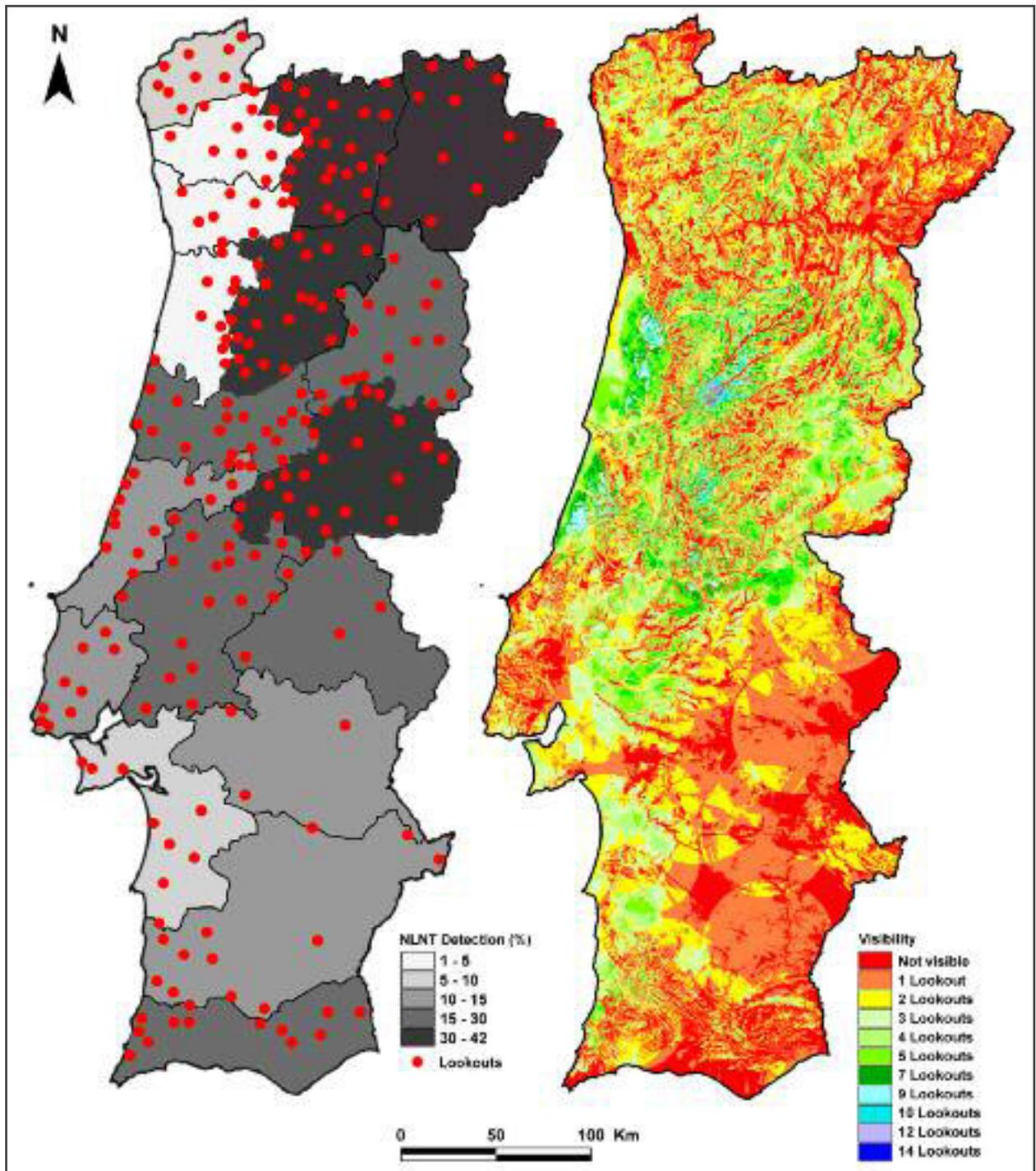


Abbildung 11: Linke Graphik: Geographische Position der Feuerwachtürme Portugals (rote Punkte) und Effektivität des Überwachungsnetzes (%) pro Distrikt; in hellgrau eingefärbten Distrikten werden weniger als 5 % aller Waldbrände von Feuerwachtürmen aus detektiert (Catry et al., 2007). Rechte Graphik: Sichtbarkeitskarte des portugiesischen Feuerwachturmnetzes mit variabler Sichtweite (16 Klassen). Die roten Bereiche sind von keinem Feuerwachturm aus sichtbar (Grupo CRISE, 1998-2011b)

1.2.1 Das portugiesische Feuerwachturmnetz

Portugal verfügt mit 237 Feuerwachtürmen (Conselho de Ministros, 2005) über ein relativ dichtes Überwachungsnetz. Durch seinen geringen Bewaldungsgrad weist die Region Alentejo die geringste Dichte auf. In der Waldbrandsaison vom 1. Juni bis 30. September sind die Feuerwachtürme größtenteils rund um die Uhr besetzt (Rego und Catry, 2006). Bemängelt werden in diesem Zusammenhang die Qualifikation des saisonal ohne jegliche Vorauswahl und ohne Eignungsprüfung angestellten Personals, sowie das Fehlen spezieller operativer Vorgaben (Natário und Ribeiro, 2003). Der daraus resultierende negative Einfluss auf die Branddetektionsrate liegt auf der Hand. Tendenziell scheint zudem die Effektivität der Branddetektion leicht rückläufig zu sein. In den Jahren 2001 bis 2003 verringerte sich beispielsweise die Detektionsrate von 16,5 % aller gesichteten Waldbrände auf 10,9 %. Catry et al. (2007) führen dies darauf zurück, dass durch die vermehrte Nutzung von Mobiltelefonen, der bereits sehr hohe Anteil an Brandsichtungen durch die Bevölkerung weiter erhöht wird. Des Weiteren weisen sie auch darauf hin, dass die Effektivität der Branddetektion von Distrikt zu Distrikt stark variiert (siehe Abb. 11, linke Graphik). In einigen nördlichen Distrikten ist die Detektionsrate durch Feuerwachtürme aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte geringer als 5 %, während sie in andern Distrikten bis auf 42 % steigt. Sie betonen auch, dass die größeren Waldbrände in den Distrikten mit hoher Detektionsrate vermehrt auftreten.

1.2.2 Waldbrandstreifendienste

Als Ergänzung zum Netz an Feuerwachtürmen werden auch in Portugal mobile Waldbrandstreifendienste eingesetzt. Das dazu notwendige Personal setzt sich aus Einheiten des portugiesischen Militärs, der Polizei und Feuerwehr sowie aus Mitarbeitern der Städte und Gemeinden, Förstern und Streifendienste des Portugiesischen Instituts zur Erhaltung der Natur (port. Instituto de Conservação da Natureza – ICN) zusammen (Resolução do Conselho de Ministros, 2006). 2004 waren bereits über 9.000 Personen im Einsatz, mit der Tendenz zum Einsatz von mehr als 10.000 Personen in den folgenden Jahren (Natário, 2005).

1.2.3 Automatisches Waldbrandfrühwarnsystem mit optischen Kameras, Infrarotsensoren und LIDAR

Seit 2001 verfügt Portugal über ein Netz von Türmen, die in Abhängigkeit des Einsatzortes wahlweise mit optischen Kameras, Infrarotsensoren, LIDAR und verschiedenen meteorologischen Messgeräten bestückt sind. Von 2001 bis 2008 wurden insgesamt 37 Türme aufgestellt sowie 11

Verwaltungs- und Kontrollzentren eingerichtet. Das Waldbrandfrühwarnsystem Ciclope (siehe Abb. 12) überdeckt einen Überwachungsbereich von 1,3 Millionen Hektar, etwa 13,5 % des portugiesischen Festlandes (Relvas et al., 2005; INOV, 2008).

Eine Neuheit stellt die Verwendung von LIDAR zur Detektion von Waldbränden dar (Andrei et al., 2003). Bei dieser vom Institut für Neue Technologien (INOV) patentierten Vorgehensweise erfolgt die Detektion eines Brandes über die Reflexion der vom LIDAR-Gerät ausgesendeten Laserstrahlen an den Partikeln der Rauchwolke. Wie auch bei Infrarotkameras ist die Detektion von Brandereignissen weitgehend unabhängig von den atmosphärischen Verhältnissen (Relvas et al., 2005).

1.2.4 Luftgestützte Überwachung mit Flugzeugen

1983 begannen in Portugal die ersten Überwachungsflüge zur Waldbranddetektion auf Initiative der Zellstoffindustrie (Germano et al., 2010). 1993 wurden die beteiligten portugiesischen Flugschulen und Fliegerclubs durch die Nationale Waldbrandkommission (port. Comissão Nacional Especializada de Fogos Florestais – CNEFF), aus der die Nationale Feuerwehr- und Zivildienst (port. Serviço Nacional de Bombeiros e Protecção Civil – SNBPC) hervorgegangen ist, in das nationale System zur Detektion von Waldbränden eingebunden. Die Flugüberwachungsrouten wurden damals in Abhängigkeit des Geländeverlaufs der überflogenen Gebiete, des Bewaldungsgrades, dem Zuständigkeitsbereich der einzelnen nationalen Zivildienstbehörden (port. Autoridade Nacional de Protecção Civil – CDOS) und der Durchführbarkeit der Funkkommunikation zwischen Luftfahrzeug und dem Personal der Zivildienstbe-

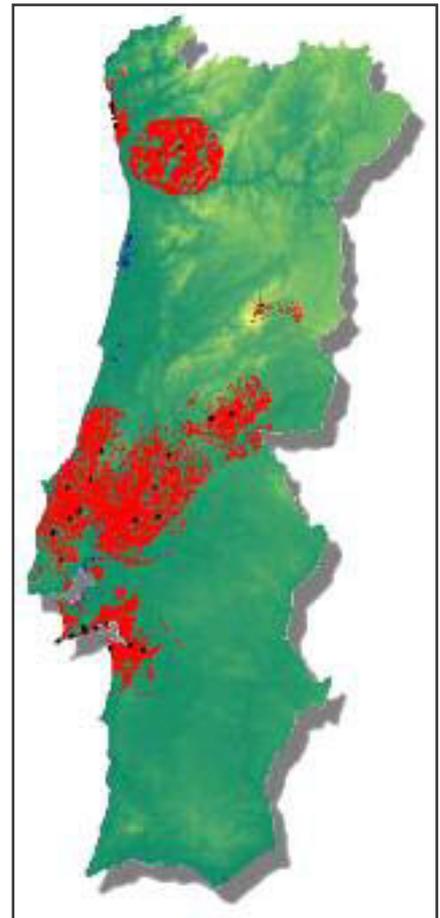


Abbildung 12: Überdeckungsgrad des Waldbrandfrühwarnsystems Ciclope (Relvas et al., 2005)

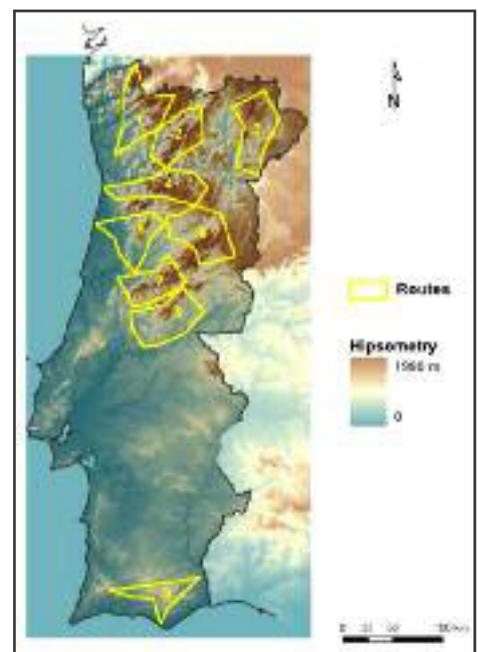


Abbildung 13: Referenzrouten zum luftgestützten Waldbrandmonitoring in Portugal (Germano et al., 2010)

hörden auf dem Boden festgelegt (Plano Nacional: Defesa da Floresta Contra Incêndios, 2005).

2006 vereinbarten die Portugiesische Forstbehörde (port. Autoridade Florestal Nacional – AFN) und der Portugiesische Luftfahrtverband (port. Federação Portuguesa de Aeronáutica – AFP) ein Abkommen zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Flugüberwachung. Neben der Detektion von Busch- und Waldbränden wurde auch die Überwachung aktiver Waldbrände sowie die Überwachung von bereits zerstörten Brandflächen zur Detektion von wieder aufflammenden Bränden in den Aufgabenkatalog aufgenommen (Germano et al., 2010).

Mit der Vereinbarung von AFN und AFP wurden auch 9 neue Referenzflugrouten festgelegt (siehe Abb. 13). Das Routenlayout wurde über Gebiete höchster Brandrisikoklasse gelegt, die von den Positionen des portugiesischen Feuerwachturmsnetzes nicht einsehbar sind. Damit wurden erstmals auch Naturschutzgebiete, Waldflächen mit hohem ökologischen und ökonomischen Wert sowie die Verteilung der Bevölkerungsdichte als Kriterien für die Routenführung berücksichtigt (Germano et al., 2010).

1.3 Optimierung der Routenplanung von Aufklärungsflügen zur Waldbranddetektion

Der geringe Anteil an erfolgreicher Waldbranddetektion durch die luftgestützte Überwachung mit Flugzeugen wirft die Frage auf, ob durch verbesserte Flugroutenführung die Detektionswahrscheinlichkeit erhöht werden kann.

Die luftgestützte Detektionsmethode wird dann erfolgreich sein, wenn sie den Beobachter in die Lage versetzt, Busch- und Waldbrände in ihrer Entstehungsphase erkennen zu lassen. Aufgrund der Möglichkeit, von einer privilegierten Beobachtungsposition aus weite Gebiete überblicken zu können, ist sie dazu im Vergleich zu den anderen Detektionsmethoden eigentlich auch prädestiniert. Wesentlich dabei ist eine möglichst ideale Positionierung des Luftfahrzeuges, damit auch kleine Brandherde detektierbar sind.

Als wichtigster Punkt für eine verbesserte Erkennung von Busch- und Waldbränden werden daher Flugrouten gefordert, die eine direkte Sicht auf eventuelle Brandherde ermöglichen. Eine Flugroute, die so festgelegt ist, dass größere waldbrandgefährdete Flächen durch das Geländere relief abgedeckt werden und daher vom Luftfahrzeug nicht einsehbar sind, erweist sich als ebenso ungünstig wie eine Flugroute, die aufgrund ihrer limitierten Länge und ihrem Verlauf (wegen der begrenzten Sichtweite des Beobachters) eine lückenlose Überwachung des Observationsgebietes nicht ermöglicht.

Mit Hilfe von Sichtbarkeitsanalysen kann die Qualität einer Flugroute abgeschätzt werden. Einer Flugroute wird den Vorzug gegeben, wenn sie im Vergleich zu anderen alternativen Routen mehr direkten Sichtkontakt zu waldbrandgefährdeten Gebieten ermöglicht. Im optimalen Fall verläuft sie so, dass alle waldbrandgefährdeten Gebiete mindestens ein Mal einsehbar sind. Da ein Waldbrand bei Tag besonders aufgrund seiner Rauchentwicklung detektierbar ist, kann die Forderung nach direktem Sichtkontakt zur Geländeoberfläche allerdings deutlich abgeschwächt werden. Durch die Bildung eines weithin sichtbaren Rauchkörpers, der bereits im Anfangsstadium eines Brandes große Dimensionen erreichen kann, ist es zur Detektion nicht notwendig, direkte Sicht auf das Brandereignis zu haben. Für die Sichtbarkeitsanalysen lässt sich damit ein Maß für den vertikalen Versatz (engl. offset) der Geländepositionen definieren, der das einsehbare Gebiet für alle Detektionsmethoden deutlich vergrößert.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Wahl einer Flugroute ist seine Länge. Mit den Leistungsdaten eines Luftfahrzeuges und den einzuhaltenden Sicherheitspuffern ist die maximal fliegbare Länge einer Flugroute von vornherein vorgegeben. Als weiterer limitierender Faktor zählt der Mensch mit seiner begrenzten Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit. Da Observationsflüge in besonderem Maß ermüdend sind, muss die Länge des Fluges auf ein sinnvolles, allerdings nicht objektiv quantifizierbares Maß reduziert werden. Der Einsatz von Optimierungsalgorithmen bei der Berechnung von Flugrouten kann aber aus der fast unbegrenzten Anzahl möglicher Routen immerhin die kürzesten herausfiltern.

Mit dieser Arbeit soll der Versuch unternommen werden, eine Methodik zur Berechnung von optimierten Flugrouten für die Busch- und Waldbranddetektion zu entwickeln. Im zweiten Schritt sollen alternative Flugrouten zu der bereits existierenden und zur Waldbranddetektion operationell eingesetzten Überwachungsroute in Südportugal (Flugroute 9 in Abb. 13) gefunden werden. Die Detektion auch nur eines einzigen zusätzlichen Großfeuers aufgrund der abgeänderten Flugroutenführung ist diesen Aufwand schon wert.

2 Theoretische Grundlagen

Die klassischen Waldbranddetektionssysteme (Feuerwachtürme, Waldbrandstreifendienste, luftgestützte Überwachung mit Flugzeugen und Hubschraubern) wie auch die neuen Feuerüberwachungsmethoden (automatische Waldbrandfrühwarnsysteme mit optischen Kameras und Infrarotsensoren, lasergestützte Systeme, Drohnen- und Satellitensysteme) sind auf optische bzw. quasi-optische Sicht angewiesen. Zur Überwachung großer Gebiete mit Luftfahrzeugen müssen Flugrouten konzipiert werden, die das Überwachungsgebiet möglichst gut und effektiv abdecken, in Übereinstimmung mit der Höchstflugdauer des eingesetzten Flugzeugtyps sind und deren Verlauf einen sicheren und regelkonformen Flug ermöglichen. Die Ermittlung optimierter Flugpfade zur Detektion von Waldbränden stützt sich daher maßgeblich auf Sichtbarkeitsanalysen, die mit Hilfe von Geoinformationssystemen oder wie im vorliegenden Fall mit Hilfe eines hierfür eigens entwickelten Softwarepakets durchgeführt werden können. Das Softwarepaket besteht im Wesentlichen aus zwei Programmteilen, die als Flight Path Optimizer (FPO) und Flight Altitude Optimizer (FAO) bezeichnet werden.

Die Bestimmung der Wegpunkte der Flugpfade, von denen aus die Sichtbarkeitsanalysen durchgeführt werden, erfolgt im Flight Path Optimizer in einer ersten Berechnungsphase zunächst durch einfache Clusterberechnungen, bei denen eine möglichst große Anzahl waldbrandgefährdeter Bereiche (Zellen) des Landschaftsmodells zu einem Cluster zusammengefasst werden. Je nach Größe des Untersuchungsgebietes ergibt sich daraus eine mehr oder weniger große Anzahl von unregelmäßig gestreuten Clustern, die mit Hilfe eines Routenoptimierungsalgorithmus zu einem vorläufigen Flugpfad verknüpft werden. Durch Projektion der einzelnen Flugpfadsegmente auf die Zellen des darunterliegenden Landschaftsmodells ergeben sich weitere Positionen, die zusammen mit den Clusterpunkten die Wegpunkte des Flugpfades beschreiben. Nach einer Höhenanpassung aller Wegpunkte des Flugpfades mit Hilfe des Flight Level Optimizers wird für jeden Wegpunkt die Sichtbarkeitsanalyse wiederholt (und anschließend bewertet).

In dieser Arbeit werden damit im Wesentlichen drei große Themenbereiche angesprochen zu denen in den folgenden Kapiteln die theoretischen Grundlagen und Konzepte überblicksmäßig beschrieben werden. Zu diesen Themenbereichen zählen zum einen die methodischen Ansätze zur Ermittlung der Waldbrandgefahr von Busch- und Waldgebieten in einer bestimmten Region sowie zum anderen die Durchführung von GIS-basierter Sichtbarkeitsanalysen und die Routenoptimie-

rung. Dabei ist keine vollständige Beschreibung der methodischen Grundlagen angestrebt, es sollen vielmehr vor allem jene Aspekte hervorgehoben und beschrieben werden, die in direktem Zusammenhang mit dieser Arbeit stehen.

2.1 Berechnung der Waldbrandgefahr in Portugal

2.1.1 Einführung

Waldbrände werden in all ihren Phasen (Ausbruch und Ausbreitung als Lauffeuer am Boden, Ausbreitung über Wipfelfeuer oder als Totalbrand und Eindämmung durch Niederschlag oder durch menschliche Löschanstrengungen) maßgeblich durch die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen beeinflusst. Das Brandrisiko hängt im Allgemeinen von variablen Umweltfaktoren ab, ist direkt an die meteorologischen Bedingungen geknüpft und kann objektiv durch existierende Indexmethoden quantifiziert werden (Viegas et al., 2004). Ein Waldbrandrisikoindex basiert auf der Beziehung zwischen den meteorologischen Verhältnissen, die vor einem Brand herrschen, und der Anzahl auftretender und beobachteter Brandereignisse. Unterschiedlichste Methoden zur Berechnung der Waldbrandgefahr wurden basierend auf meteorologischen Parametern entwickelt und weltweit angewendet. Um eine Methode für eine bestimmte geographische Region anwenden zu können, muss sie zuvor kalibriert werden. Die Kalibrierung hängt im Wesentlichen vom regionalen Klima, von der Charakteristik der in der Region vorkommenden Waldarten, von der Charakteristik der in der Region auftretenden Busch- und Waldbrände und nicht zuletzt vom eingesetzten System zur Waldbrandprävention und -detektion ab (Viegas et al., 1994; Reis, 1998).

Eine Vergleichsstudie sechs unterschiedlicher Index Methoden für das Gebiet Südeuropas ergab, dass der kanadische Waldbrandgefahrenindex FWI der beste Index ist, um sowohl die Anzahl der Brände als auch die Größe der Brandfläche pro Tag für eine vorgegebene geographische Testregion zu reproduzieren (Viegas et al., 1999). Die Europäische Kommission sprach daraufhin eine Empfehlung zur Übernahme des kanadischen FWI (Canadian Fire Weather Index) als Indexmethode für die Klassifizierung des Waldbrandrisikos für alle Staaten der EU aus. Nach Kalibrierung der wesentlichen Indikatoren des FWI wurde er auch in Portugal eingeführt.

Um die Aussagekraft und die Nutzbarkeit des FWI noch weiter zu erhöhen wurde 2006 der „kombinierte Waldbrandgefahrenindex“ ICRIF (port. Índice Combinado de Risco de Incêndio Florestal) vom Portugiesischen Institut für Meteorologie (port. Instituto Portugues do Mar e Atmosfera – IPMA) in Lissabon eingeführt. Der ICRIF kombiniert den kalibrierten meteorologischen Index

FWI mit Strukturinformationen der in Betracht gezogenen portugiesischen Vegetationstypen und der Vitalität der Vegetation. Der ICRIF soll nicht nur die Wahrscheinlichkeit eines Brandereignisses sondern auch sein Ausbreitungsvermögen quantifizieren (Bugalho und Pessanha, 2009). FWI und ICRIF werden seit 2006 vom IPMA zur Klassifizierung des Waldbrandrisikos für portugiesische Distrikte eingesetzt.

Einen anderen Ansatz zur Darstellung des Waldbrandrisikos in Portugal verfolgt das Portugiesische Geographische Institut (port. Instituto Geográfico Português – IGP) in Lissabon mit seinem System zur Produktion von Waldbrandrisikokarten CRIF (port. Cartas de Risco de Incêndio Florestal). Dazu verwendet das IGP ein Modell, das 6 physiogeographische Elemente, die die räumliche Variabilität des Waldbrandrisikos innerhalb der 308 politischen Kreise (port. Municípios) Portugals beschreiben, verarbeitet. Es handelt sich hierbei um ein Verfahren mit relativ simpler Methodologie, das besonders geeignet ist, um Waldbrandrisikokarten schnell zu erstellen oder zu aktualisieren (Verde, 2008).

Auf die methodischen Ansätze der drei Systeme CFFWIS, ICRIF und CRIF wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen, da sie eine wichtige Datengrundlage zur Bestimmung optimierter Flugpfade zur Waldbranddetektion bilden.

2.1.2 Das kanadische Waldbrandwetterindex-System

2.1.2.1 Methodische Ansätze

Das kanadische Waldbrandwetterindex-System CFFWIS (Canadian Forest Fire Weather Index System) beschreibt das Risiko von Busch- und Waldbränden mit Hilfe einer Indexzahl, die als Fire Weather Index (FWI) bezeichnet wird, und in Kanada einen Wertebereich von 0 bis 20 besitzt. Der FWI basiert auf einem empirischen Modell, das 1976 in Kanada entwickelt wurde (Turner und Lawson, 1978). Das CFFWIS erlaubt die Abschätzung des Feuchtigkeitsgehaltes verschiedener Komponenten der Biomasse kanadischer Wälder, die als Brennmaterial für Waldbrände dienen können. Die Abschätzung des Feuchtigkeitsgehaltes basiert auf einer Reihe von physikalischen Gleichungen, die empirisch mit Hilfe experimenteller Daten ermittelt wurden. Die Struktur und Komponenten des CFFWIS Modells sind in Abb. 14 dargestellt. Das Modell beschreibt die Feuchtigkeit des Brennstoffes und das Brandverhalten anhand folgender Komponenten: Feuchtigkeit des leicht kompaktierten Oberbodens (engl. Duff Moisture Code – DMC), Feuchtigkeit des leicht entzündlichen Bodenstreu (engl. Fine Fuel Moisture Code – FFMC), Feuchtigkeit des kompaktierten Unterbodens (engl. Drought Code – DC) und der windgeschwindigkeitsabhängige Brandausbrei-

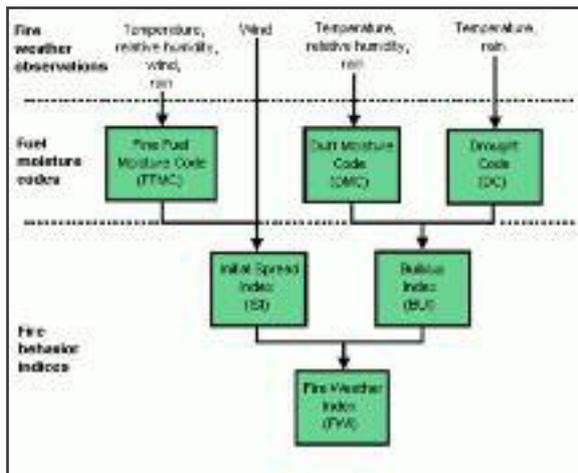


Abbildung 14: Struktur des CFFWIS Modells.
Quelle: <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi> (18.05.2014)

tungsindex (engl. Initial Spread Index – ISI). Der BUI Index (engl. Buildup Index), der aus DMC und DC berechnet wird, umschreibt die Gesamtmenge an Brennmaterial und ergibt zusammen mit dem ISI den Fire Weather Index (FWI). Der FWI schließlich ist ein numerischer Indikator für die Brandintensität und ein Maß für die Ausbreitung eines Waldbrandes (McAlpine und Eiber, 1985). Zur Berechnung der Komponenten des CFFWIS Modells werden die täglichen meteorologischen Messungen der Lufttemperatur, der relative Luft-

feuchtigkeit, der Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe über Grund und des Tagesniederschlages herangezogen. Detailliertere Informationen zu den einzelnen Komponenten des CFFWIS Modells, sowie zu die dazugehörigen mathematischen Gleichungen, können unter (Van Wagner, 1987) nachgelesen werden.

2.1.2.2 Implementierung und Kalibrierung des kanadischen FWI für Portugal

Die Anpassung des CFFWIS-Systems an die klimatische Situation Portugals und an den Charakter der in Portugal existierenden Vegetation wird durch Kalibrierung der Komponenten des Systems erreicht. Seit 1987 läuft am portugiesischen Waldbrandforschungszentrum CEIF (port. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais) ein Programm zur täglichen Messung von Feuchtigkeit und Entflammbarkeit einer für portugiesische Wälder repräsentativen Gruppe von Bodenstreuarten. Zusammen mit den Tageswerten der Temperatur, der Windgeschwindigkeit, der relativen Luftfeuchtigkeit und des Niederschlages wurde eine Kalibrierungsfunktion für die FFMC Komponente entwickelt. Analog dazu wurden in weiteren Messreihen der Feuchtigkeitsgehalt von Blättern und Astspitzen repräsentativer Straucharten bestimmt und in Beziehung zu den Tageswerten von Temperatur und Niederschlagsmenge gesetzt. Eine entsprechend formulierte Funktion wurde zur Kalibrierung der DC Komponente verwendet. Die Kalibrierung der DMC Komponente erübrigt sich, da Portugals Wälder im Vergleich zu Kanadischen Wäldern kaum nennenswerte Flächen mit leicht kompaktiertem Oberboden besitzen (Viegas et al., 2004). Das portugiesischen Waldbrandforschungszentrum CEIF untersuchte zudem in vielen Feldexperimenten das Ausbreitungsverhalten von kontrollierten Testbränden in Testparzellen mit repräsentativer Vegetation und konnte auf die-

sem Weg auch eine Kalibrierungsfunktion für die ISI Komponente ermitteln. Über die Berechnung des BUI und zusammen mit den täglich gemessenen meteorologischen Parametern wird der portugiesische FWI täglich bestimmt. Der Index wird durch das Meteorologische Institut von Lissabon während der Waldbrandsaison mit Hilfe der Daten von 85 meteorologischer Stationen mit einer Rasterauflösung von 1,1 x 1,1 km berechnet und publiziert (Viegas et al., 2004).

2.1.2.3 Referenzwerte des FWI für die 18 portugiesischen Distrikte

Aufgrund der unterschiedlichen operativen Interessen der einzelnen Distriktbehörden und der organisatorischen Struktur der zuständigen öffentlichen Dienste ist eine distriktabhängige Klassifizierung des FWI notwendig. Für jeden der 18 Distrikte Portugals wurden FWI Referenzwerte für 5 Waldbrandrisikoklassen ausgearbeitet. Die Waldbrandrisikoklassen werden wie folgt definiert:

- 1 niedriges Risiko
- 2 moderates Risiko
- 3 hohes Risiko
- 4 sehr hohes Risiko
- 5 extrem hohes Risiko

Dazu wurde eine statistische Studie durch das IPMA durchgeführt, um die Werte des FWI mit der Anzahl der aufgetretenen Waldbrände n und mit der Größe der durch Feuer betroffenen Flächen A pro Tag und Distrikt zu korrelieren. Die Studie ergab große Discrepanzen der Werte FWI, A und n von Distrikt zu Distrikt. Als Konsequenz zeigen im Endergebnis auch die FWI Referenzwerte für die Waldbrand Risikoklassen von Distrikt zu Distrikt große Unterschiede, wie in Tabelle 1 ersichtlich ist.

Distrikte	Risiko Klasse				
	Niedrig	Moderat	Hoch	Sehr hoch	Extrem hoch
Viana d. Castelo	< 10	15	30	45	> 45
Braga	< 10	15	30	50	> 50
Porto	< 8	15	25	40	> 40
Vila Real	< 13	20	30	50	> 50
Bragança	< 23	30	45	55	> 55
Aveiro	< 10	17	23	40	> 40
Viseu	< 15	25	45	70	> 70
Guarda	< 8	15	25	50	> 50
Coimbra	< 15	22	30	45	> 45
Leiria	< 15	25	30	50	> 50
C. Branco	< 20	35	45	60	> 60
Lisboa	< 25	35	50	70	> 70
Santarém	< 25	33	50	60	> 60
Setúbal	< 30	40	55	70	> 70
Portalegre	< 35	50	65	75	> 75
Évora	< 40	50	65	75	> 75
Beja	< 40	50	65	75	> 75
Faro	< 30	40	60	75	> 75

Tabelle 1: FWI Referenzwerte für die fünf portugiesischen Waldbrand Risikoklassen für jeden Bezirk (Viegas et al., 2004)

2.1.3 Der „kombinierte Waldbrandgefahrenindex“ ICRIF

Mit der Berechnung des ICRIF Index wird der rein meteorologisch definierte Waldbrandrisikoindex FWI um eine strukturelle Risikokomponente (port. risco estrutural) und um einen Vegetationsindex, dem NDVI, erweitert. Die Berechnung des strukturellen Risikoindex basiert auf den Daten der europäischen Landnutzungsdatenbank CORINE 2000 mit einer Rasterauflösung von 100 m und mit 44 Landnutzungsklassen (Corine Land Cover, 1995). Im ersten Schritt der Berechnung wird für jede FWI Zelle ermittelt, welche Landnutzungsflächen durch die Zelle abgedeckt werden und wie hoch deren prozentueller Anteil A_k an der Gesamtfläche der Einzelzelle ist. Durch Multiplikation mit einem empirisch ermittelten Risikofaktor R_k und anschließender Aufsummierung gemäß Formel 2.1.3-1 wird das strukturelle Risiko für jede FWI Zelle ermittelt (Bugalho und Pessanha, 2007; Bugalho und Pessanha, 2009). Die Ergebnisse werden in Form von Risikokarten zusammengefasst und jedes Jahr vor Beginn der Brandsaison aktualisiert.

$$\text{struktureller Risiko Index} = \Sigma (A_k * R_k) \quad (2.1.3-1)$$

Des Weiteren wird die Vitalität von grüner Vegetation über die Berechnung des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ermittelt. Der NDVI ist ein einfacher numerischer Indikator, der sich aus Reflexionswerten im nahen Infrarotbereich und des roten sichtbaren Bereichs des elektromagnetischen Spektrums von Fernerkundungsdaten gemäß Formel 2.1.3-2 berechnet (Goward et al., 1991).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR-RED}) / (\text{NIR+RED}) \quad (2.1.3-2)$$

Der NDVI für Portugal wird täglich durch das IPMA mit Hilfe der Fernerkundungsdaten des Advanced Very High Resolution Radiometers (AVHRR) an Bord des amerikanischen NOAA Satelliten berechnet. Der ICRIF Index wird im letzten Schritt für jede 1,1 x 1,1 km Rasterzelle gemäß Formel 2.1.3-3 berechnet. Dabei wird für den NDVI Werte der Maximalwert der letzten 10 Tage verwendet (Bugalho und Pessanha, 2007; Bugalho und Pessanha, 2009).

$$\text{ICRIF} = a * \text{FWI} * \text{FUELRISK} + f(\text{NDVI}) \quad (2.1.3-3)$$

Der ICRIF zeigt eine hervorragende Korrelation zu anderen meteorologischen Indices wie den

FWI. Hohe ICRIF Werte (über 25) korrelieren eindeutig mit meteorologischen Bedingungen, die das Ausbrechen von Waldbränden begünstigen, sowie mit der Anzahl von Brandereignissen in den einzelnen Distrikten Portugals (Bugalho und Pessanha, 2007; Bugalho und Pessanha, 2009; Bugalho 2012).

2.1.4 Waldbrandrisikokarten CRIF

Von 1995 bis 2004 wurden in mehreren Phasen die ersten Waldbrandrisikokarten für 68 der 308 portugiesischen administrativen Kreise sowie für einen Distrikt (Viseu) durch das IPG erstellt. Nach einer Änderung der Methodik zur Erstellung der Karten im Jahr 2004 wurde schließlich 2011 die erste Waldbrandrisikokarten für ganz Portugal fertig gestellt (siehe Abb. 15) (Grupo CRISE, 1998-2011a). Die methodischen Ansätze für die Erstellung der Karten basieren im Wesentlichen auf der Methodik der multikriteriellen räumlichen Analyse wie von Chuvieco et al. (1989) und Almeida et al. (1995) vorgeschlagen. Dabei wird das Brandrisiko für jede Rasterzelle des Untersuchungsgebietes durch Aufsummieren von gewichteten Risikofaktoren und anschließender Klassifizierung in 5 Brandrisikoklassen ermittelt. Zu den verwendeten Risikofaktoren zählen folgende vier Risikogruppen:

- Landnutzung
- orographisch bedingte Risikofaktoren – Hangneigung
 - Exposition (geographische Orientierung)
- Verkehrsinfrastruktur – Nähe zu Straßen, Eisenbahnen und Hochspannungsleitungen
 - Dichte der Feld- und Forstwege
- demographische Dichte

Nach Grupo CRISE (1998-2011a) lassen sich die oben genannten Risikofaktoren wie folgt darstellen: Der wichtigste Risikofaktor mit der größten Gewichtung stellt die Landnutzung dar. Sie bestimmt, wie viel Brennstoff für einen Busch- oder Waldbrand zur Verfügung steht, wie leicht ein Brand entfacht werden kann und mit welcher Intensität sich der Brand ausbreiten kann. Der Einfluss der Hangneigung wiederum ist vor allem während der Anfangsphasen eines Waldbrandes beträchtlich und bestimmt maßgeblich die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Feuers. Je steiler die Orographie ist, desto leichter kann die Energie durch Strahlung und Konvektion weitergegeben werden. Die Exposition einer brandgefährdeten Fläche bestimmt die Menge an aufgenommener Solarstrahlung und damit das Maß an Feuchtigkeit und Temperatur auf dieser Fläche. Nordhänge in Portugal haben demnach ein geringeres Brandrisiko als beispielsweise Südhänge. Die Nähe zu Verkehrs-

wegen und ihre Dichte stellen ebenfalls ein erhöhtes Brandrisiko dar, da Verkehrswege den Einflussbereich des Menschen in die Natur erweitern. Durch Unachtsamkeit und Fahrlässigkeit in der

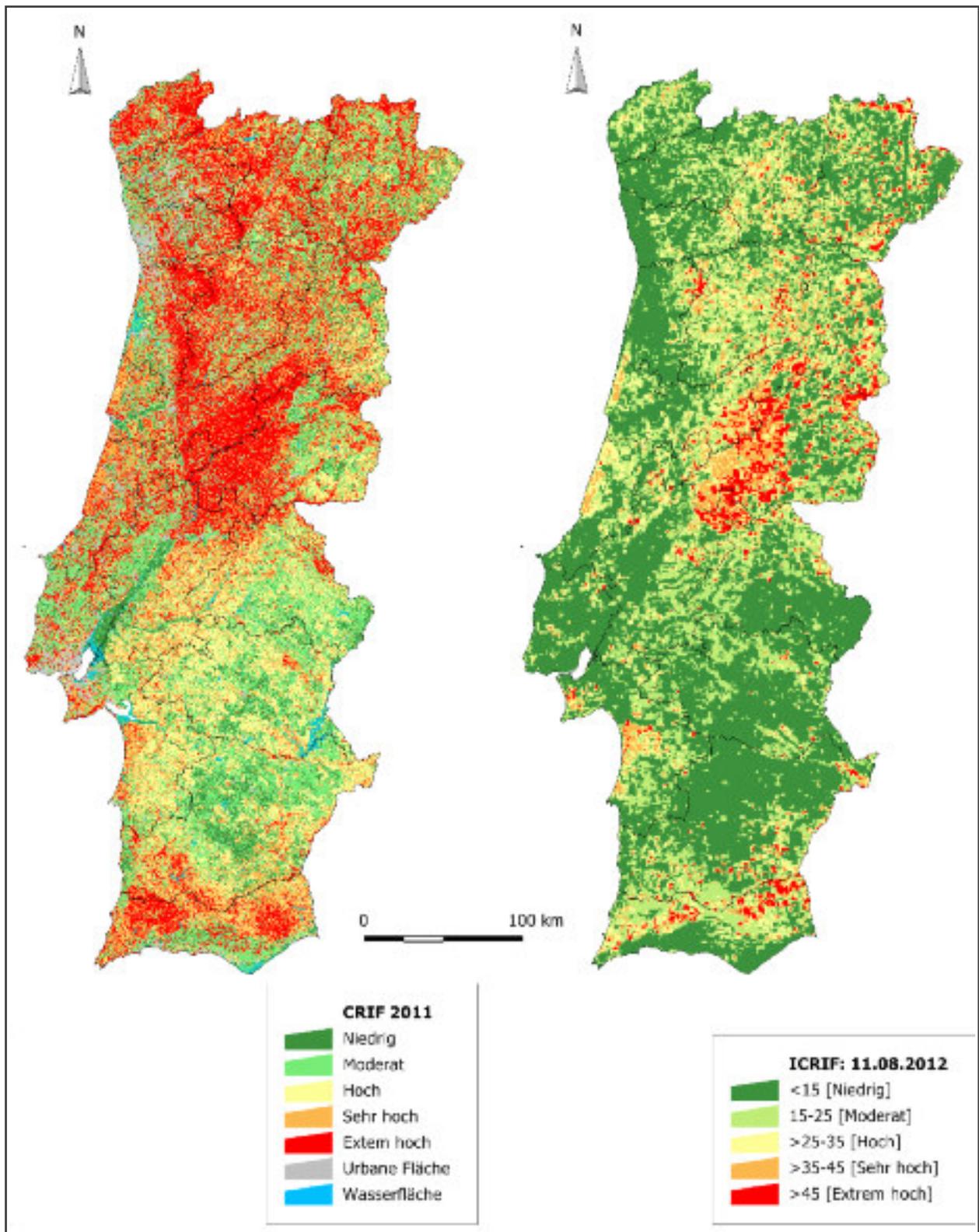


Abbildung 15: Linke Graphik: Waldbrandrisikokarte Portugals basierend auf dem CRIF Index (Grupo CRISE, 1998-2011). Rechte Graphik: Waldbrandrisikokarte Portugals basierend auf dem ICRIF Index für den 11.08.2012 (Bugalho, 2013)

Handhabung von Feuer wird jährlich eine große Zahl von Bränden verursacht. Schließlich haben auch sowohl eine hohe als auch eine niedrige Bevölkerungsdichte ein erhöhtes Brandrisiko zur Folge. In ersterem Fall steigt mit der Zahl der Bevölkerung in bewaldeten Gebieten das Risiko von durch menschliches Fehlverhalten verursachten Bränden, während in zweiterem Fall mit abnehmender Bevölkerungsdichte es einerseits durch geringere Fürsorge des Waldes zu einer Akkumulation von Bodenstreu und anderem Brennmaterial kommt und andererseits die Wahrscheinlichkeit von rechtzeitiger Branddetektion sinkt.

2.2 GIS-basierte Sichtbarkeitsanalysen (Viewshed)

Sichtbarkeitsanalysen gehören inzwischen zu den bekanntesten Analyseverfahren in einem Geoinformationssystem. Mit Hilfe von Sichtbarkeitsanalysen können viele Ingenieur- und Planungstechnische Fragestellungen beantwortet werden und dienen damit der Entscheidungsunterstützung in diesen Bereichen. Mit der Verfügbarkeit von hoch aufgelösten digitalen Gelände- und Landschaftsmodellen sind Sichtbarkeitsanalysen zu wichtigen Hilfsmitteln in der Planungspraxis geworden.

2.2.1 Sichtbarkeitskriterien

Die Form einer Geländeoberfläche ist bei einer Sichtbarkeitsanalyse maßgeblich dafür entscheidend, welche Bereiche der Oberfläche von einem bestimmten Beobachtungspunkt aus gesehen werden können. Die Beobachterposition muss sich dabei nicht zwingend auf der Geländeoberfläche befinden, sondern kann von dieser durch einen vertikalen Versatz (engl. Offset) entkoppelt sein, wie im Fall eines Beobachtungspunktes aus einem Luftfahrzeug im Fluge heraus. Gleiches gilt für den beobachteten Punkt, dem in einem Geoinformationssystem ebenfalls ein Offset zugewiesen werden kann. Durch die Zuweisung von Offset Werten an bestimmten Positionen in dem Geländeoberflächenmodell können technische Objekte (Windkraftanlagen, Hochspannungsleitungen, Sendeanlagen) oder andere Bauwerke wie auch Naturphänomene (Rauchsäulen von Waldbränden) in einem Modell simuliert und deren Sichtbarkeit ermittelt werden.

Sichtbarkeit zwischen zwei Punkten besteht dabei genau dann, wenn die Verbindungslinie zwischen beiden Punkten die Geländeoberfläche dazwischen in keinem Punkt schneidet (Lee, 1991; Sorensen und Lanter, 1993) (siehe Abb. 16). Ein Geoinformationssystem ermöglicht die Bestimmung der Sichtbarkeit von Punkt zu Punkt auf einer durch die zwei Punkte definierten Sichtlinie

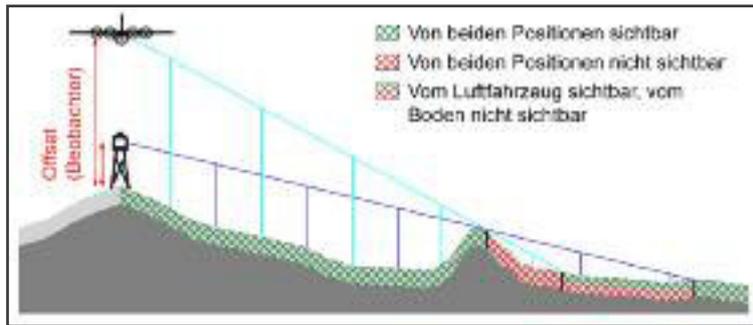


Abbildung 16: Sichtbarkeit von verschiedenen Beobachterpositionen aus, mit verbesserter Sichtbarkeit aus dem Luftfahrzeug

(engl. Line of sight – LOS) oder flächenmäßig in einem Sichtfeld in Form einer Sichtbarkeitskarte (engl. Binary Viewshed). Eine Sichtbarkeitskarte stellt Flächen dar, die von einem Beobachtungspunkt aus entweder sichtbar oder unsichtbar sind (Fisher, 1996b).

Grundlegendes Element einer Sichtbarkeitsanalyse ist die Beschreibung der realen Geländeoberfläche durch ein digitales Geländemodell. Hierfür bieten sich im Wesentlichen zwei methodische Ansätze an: die Beschreibung durch ein Rasterdatenmodell mit einer Matrix aus Prismen (Zellen) mit in der Regel quadratischen Grundflächen oder die Beschreibung durch vektorbasierte Dreiecksvermaschung (engl. Triangulated Irregular Network – TIN) der gegebenen Stützstellen des Untersuchungsgebietes.

Im Fall eines Rasterdatenmodells wird jedem Zentrum einer Zelle ein Höhenwert zugewiesen, der das Höhengniveau der realen, von der Zelle abgedeckten Terrainoberfläche, am besten repräsentiert. Da im Rasterdatenmodell in der Regel von einer horizontalen Rasterzellenfläche ausgegangen wird, besitzen alle Punkte innerhalb der Fläche denselben Höhenwert – eine Vereinfachung, die aufgrund des Stufencharakters des Modells besonders bei Sichtbarkeitsanalysen problematisch sein

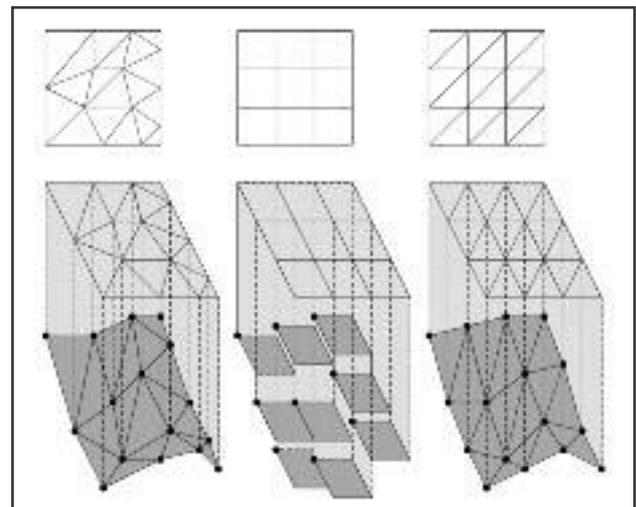


Abbildung 17: TIN, Raster und trianguliertes Raster (Floriani und Magillo, 2003)

kann. Bei einem TIN wird die reale Geländeoberfläche durch Dreiecksflächen modelliert, die durch Triangulation der üblicherweise unregelmäßig verteilten Stützstellen des Modells entstehen. Die Dreiecksflächen sind entsprechend dem Gelände geneigt und bilden eine größtenteils stufenlose Modelloberfläche (siehe Abb. 17).

Der Basisalgorithmus zur Berechnung der Sichtbarkeit ist für Rasterdatenmodelle und TINs denkbar einfach: von der Beobachterposition wird zu jeder Geländeposition eine Sichtlinie gezeichnet und mit dem dazwischen liegenden Gelände geschnitten. Existiert kein Schnittpunkt, ist

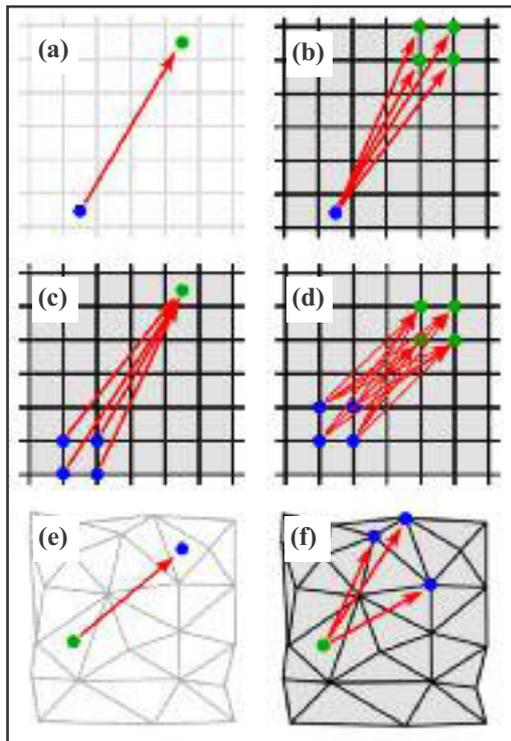


Abbildung 18: Beobachterposition und Geländedeposition als Punkte, Zellen oder TIN und Darstellung der Sichtlinien. Unterschiedliche Möglichkeiten zur Definition des Sichtbarkeitskriteriums:

- (a) von Punkt zu Punkt (1 Sichtlinie)
 - (b) von Punkt zu Zelle (4 Sichtlinien)
 - (c) von Zelle zu Punkt (4 Sichtlinien)
 - (d) von Zelle zu Zelle (16 Sichtlinien)
 - (e) TIN: von Punkt zu Punkt (1 Sichtlinie)
 - (f) TIN: von Punkt zu Zelle (3 Sichtlinien)
- Die Optionen TIN von Zelle zu Punkt (3 Sichtlinien) und TIN von Zelle zu Zelle (9 Sichtlinien) sind nicht dargestellt

den Kanten meist nicht zielführend. Besonders in abschüssigem Gelände führt jede noch so kleine Stufe zwischen zwei benachbarten Rasterzellen zu einem Sichtschatten auf der Zielzelle. Mit der geforderten Sichtbarkeit von 100 % führt die daraus folgende Klassifizierung der Zielzelle zu "nicht sichtbar" unweigerlich zu unrealistischen Sichtbarkeitsergebnissen (siehe Abb. 19).

Es stellt sich außerdem die Frage, auf welche Art und Weise die Sichtlinien mit dem modellierten Gelände verlauf geschnitten werden sollen. Im Fall des Rasterdatenmodells können nach Fisher (1993) mehrere Ansätze verfolgt werden. Zum einen kann die Sichtlinie (die Projektion der Sichtlinie auf das

die Geländedeposition von der Beobachterposition aus sichtbar. Allerdings gibt es verschiedene Arten, wie der Basisalgorithmus implementiert werden kann. Nach Fisher (1993) stellt sich die Frage, ob man im Zuge der Sichtbarkeitsberechnungen die Beobachterposition und die Geländedeposition als Punkte, Zellen (Raster) oder Dreiecksflächen (TIN) behandelt.

Für jeden Fall ergibt sich eine unterschiedliche Anzahl von Sichtlinien mit entsprechenden Sichtprofilen und damit mit unterschiedlichen Sichtbarkeitsergebnissen (siehe Abb. 18). Im Fall von mehreren Sichtlinien pro Beobachtung stellt sich bei beiden Modellen, aber insbesondere beim Rasterdatenmodell zusätzlich die Frage, wie das Sichtbarkeitskriterium definiert werden soll: Wie viel Prozent der Zellfläche muss sichtbar sein, um als insgesamt sichtbar klassifiziert werden zu können? Während als Sichtbarkeitskriterium bei einem TIN Geländemodell die hundertprozentige Sichtbarkeit der Dreiecksfläche problemlos gefordert werden kann, ist das im Fall eines Rasterdatenmodells aufgrund seiner Stufencharakteristik mit abrupten Höhenänderungen an

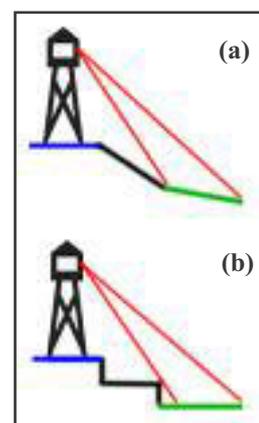


Abbildung 19: (a) TIN mit der Möglichkeit zu 100%iger Sichtbarkeit der Dreiecksflächen. (b) stufenförmiges Geländemodell ohne Möglichkeit zu 100%iger Sicht auf Zellen in abschüssigem Gelände

Raster) mit jeder Rasterkante geschnitten werden. Für jede Schnittposition erfolgt dann die Ermittlung der Höhe der Rasterkante durch lineare Interpolation der Höhen jener zwei Zellen, die die Rasterkante bilden und der Höhe der Sichtlinie an dieser Stelle. Der Höhenvergleich bestimmt dann die Sichtbarkeit der Zielzelle. Zum anderen können die Maschen des Rasters durch Triangulation zusätzlich verdichtet werden. Die Ermittlung der Sichtbarkeit erfolgt in diesem Fall analog zum ersten Ansatz. Bei einem weiteren Ansatz wird die Rasterzelle auch tatsächlich als ebenes Prisma betrachtet, wobei die zuvor beschriebene Problematik der abrupten Höhenänderungen an den Kanten zum Tragen kommt.

An zwei Rasterdatenmodellen mit einer Größe von jeweils 100 x 100 Zellen hat Fisher die verschiedenen Implementierungsmöglichkeiten des Basisalgorithmus getestet und signifikant unterschiedliche Sichtbarkeitskarten erstellt (Fisher, 1993). Unterschiedliche Sichtbarkeitsergebnisse werden zudem durch Unsicherheiten, die in jedem digitalen Höhenmodell enthalten sind, verursacht (Fisher, 1991; Fisher, 1992; Wood und Fisher, 1993; Fisher, 1996b; Goodchild und Lee, 1989). De Floriani und Magillo (2003) geben einen Überblick über die in der Fachliteratur vorgeschlagenen Sichtbarkeitsalgorithmen sowohl für TIN-Modellierungen als auch für rasterbasierte Modellierungen. Wie auch Fisher kommen sie zu dem Schluss, dass es eigentlich unzulänglich ist, Sichtbarkeitskarten als binäre Sichtbarkeiten zu betrachten. Es wird vielmehr vorgeschlagen, stattdessen für jede einzelne Geländeposition eine Wahrscheinlichkeit der Sichtbarkeit zu ermitteln und diese den Positionen zuzuweisen. Auch eine Validierungsstudie zur Genauigkeit verschiedener Methoden GIS-basierter Sichtbarkeitsanalysen durch Vergleich mit in situ durchgeführter Sichtbarkeitsbestimmungen zeigen die Schwächen des binären Ansatzes (Maloy und Dean, 2001). In ihrer Studie berechnen Maloy und Dean sowohl TIN-basierte als auch rasterbasierte Sichtbarkeitskarten für ein und dasselbe Untersuchungsgebiet mit mehreren Modellen unterschiedlicher Auflösung sowie unter Berücksichtigung unterschiedlicher Sichtbarkeitskriterien. Sie stellen fest, dass die Übereinstimmung zwischen berechneten und realen Sichtbarkeiten kaum 50 % übersteigt und dass die rasterbasierten Sichtbarkeitsergebnisse die der TIN-basierten überraschenderweise übertreffen!

De Floriani und Magillo (2003) weisen darauf hin, dass vom praktischen Gesichtspunkt aus gesehen, für den klassischen, binären Ansatz vor allem jene Algorithmen bevorzugt werden sollten, die leicht zu implementieren sind und eine möglichst geringe Rechenkomplexität besitzen. Dieser Hinweis gewinnt vor allem für große Geländemodelle mit hoher Auflösung an Bedeutung. Wie auch in dieser Arbeit festgestellt, kann die Berechnungszeit der Sichtbarkeitsanalysen durch die Verwendung rechenkomplexer Algorithmen jeden sinnvollen Zeitrahmen sprengen.

Zu Sichtbarkeitsstudien aus einem Luftfahrzeug heraus ist kaum Literatur auffindbar. Einige ältere Werke (Morris, 1946; Harris und Fahnestock, 1954; Davis, 1959) befassen sich in diesem Zusammenhang mit Faktoren, die die Sichtbarkeit von kleinen Rauchsäulen beeinflussen: Helligkeit und Farbe des Geländehintergrunds, atmosphärische Eigenschaften und Beleuchtungswinkel der Rauchsäulen. Harris und Fahnestock (1954) vergleichen zusätzlich die Effektivität zweier Waldbranddetektionsmethoden (Waldbranddetektion von Feuerwachtürmen und luftgestützte Waldbranddetektion) und untersuchen den Faktor Distanz auf die Sichtbarkeit von kleinen Rauchsäulen. Die Literaturwerke gehen aber speziell auf methodische Aspekte von Sichtbarkeiten von stark erhöhter Beobachterposition nicht ein. In Hinblick darauf stellt sich beispielsweise die Frage, wie empfindlich die Sichtbarkeitsanalyse gegenüber den Unsicherheiten eines digitalen Höhenmodells ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein (vertikaler) Höhenfehler im Geländemodell im Fall einer stark erhöhten Beobachterposition und dem damit verbundenen größeren Winkel zwischen dem Sichtstrahl und der Geländehorizontalen, weniger Auswirkung auf die Sichtbarkeit hat, als im Fall einer viel niedrigeren Beobachterposition. Binäre Sichtbarkeiten sollten daher insbesondere für diesen Sonderfall nach wie vor als ein probates Mittel zur Sichtbarkeitsanalyse angesehen werden. Das binäre Sichtbarkeitskriterium diene somit als Grundlage für die Sichtbarkeitsberechnungen der vorliegenden Diplomarbeit.

Darauf beruhend, dass rasterbasierte Sichtbarkeitsalgorithmen tendenziell leichter implementierbar sind als TIN-basierte Algorithmen und dass rasterbasierte Sichtbarkeitsanalysen den TIN-basierten Sichtbarkeitsanalysen mindestens ebenbürtig sind (Maloy und Dean, 2001), wurde in dieser Diplomarbeit dem rasterbasierten Ansatz den Vorzug gegeben. Mit der Größe des Untersuchungsgebietes dieser Diplomarbeit und der hohen Anzahl an Stützstellen (Zellen) des Geländemodells ergibt sich für die PC-gestützten Berechnungen ein Datenvolumen, das möglichst einfache und Arbeitsspeicher schonende Berechnungsverfahren verlangt. Auch aus diesem Grund wurde der rasterbasierte Ansatz gewählt.

2.2.2 Erweiterung des Basisalgorithmus durch ein Offset

Der in Kapitel 2.2.1 beschriebene Basisalgorithmus beschreibt die Berechnung von Sichtbarkeiten zwischen zwei Positionen, die sich direkt auf der Geländeoberfläche befinden. Tatsächlich werden aber in der Mehrheit der Fragestellungen Sichtbarkeiten zwischen Objekten ermittelt, die sich in einer bestimmten Höhe über dem Gelände befinden. Dazu zählen zum Beispiel Studien über die visuellen Auswirkungen von in der Landschaft errichteten technischen Objekten (Hochspannungslei-

tungen Windkraftanlagen, etc.) auf das Landschaftsbild oder Studien zur Positionierung von Beobachtungstürmen zur Waldbranddetektion. Durch Berücksichtigung eines vertikalen Versatzes sowohl für die Beobachterposition als auch für die Zielposition können solche Fragestellungen beantwortet werden. Bei der Waldbranddetektion kommt es beispielsweise nicht darauf an, ob direkte Sicht zu der Geländeoberfläche besteht. Vielmehr werden Brände vor allem durch die begleitende Rauchentwicklung entdeckt, die im Geländemodell durch ein Offset simuliert werden kann (siehe Abb. 20).

Von entscheidender Bedeutung auf die Sichtbarkeitsanalyse ist in diesem Zusammenhang die Wahl des Offsetwertes. Im Rahmen der erstmaligen Ausarbeitung von Sichtbarkeitskarten des nationalen portugiesischen Aussichtsturmnetzes (Catry et al., 2004) wurde als Offsetwert für die Zielposition 10 m verwendet. Catry et al. stützen sich dabei auf der Feststellung, dass viele Waldbrände auch in Geländebereichen detektiert werden, die nicht direkt einsehbar sind (Davis et al., 1959; Mees, 1978), beziehungsweise dass aufgrund der Sichtbarkeit von Rauch ein gewisser Offset bei Sichtbarkeitsanalysen durchaus sinnvoll ist (Shank, 1931; Mees, 1978). Der Offsetwert der Zielposition darf aber laut Catry et al. nicht zu groß gewählt werden, da es von entscheidender Bedeutung ist, dass das Feuer noch in seiner Anfangsphase (mit kleinen Dimensionen der Feuer- und Rauchentwicklung) detektiert ist. Insbesondere in Situationen, bei der sich die Rauchsäule durch thermische Inversion oder durch Windeinfluss mehr horizontal als vertikal ausbreitet, kann die Implementierung von Ergebnissen aus Sichtbarkeitsanalysen mit zu großen Offsetwerten in weiterer Folge die Detektion von Waldbränden deutlich verzögern (Bruce, 1941; Mees, 1978; Trejo, 1996; FAO, 2001).

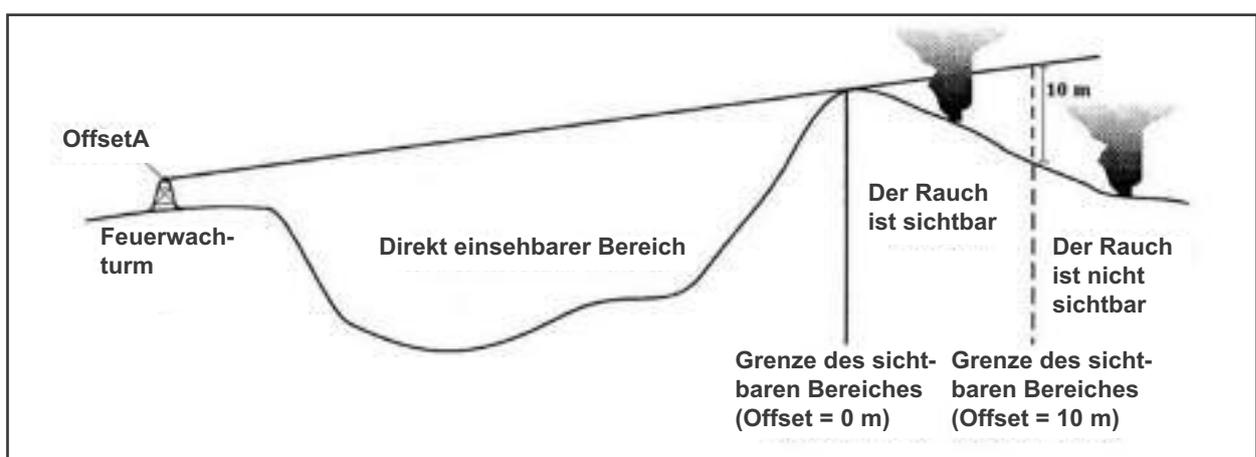


Abbildung 20: Schematische Darstellung von Bereichen, die nicht direkt einsehbar sind, in denen die Detektion von Brandereignissen dennoch wahrscheinlich ist (Fisher, 1996)

In seiner Diplomarbeit hat Catry (2002) den Einfluss des Offsetparameters der Zielposition auf die Sichtbarkeiten innerhalb des nationalen portugiesischen Aussichtsturmnetzes untersucht,

indem er durch Variation dieses Parameters (0 m, 10 m und 20 m) drei unterschiedliche Sichtbarkeitskarten erstellt hat. Catry stellt fest, dass bereits kleine Änderungen des Offsetparameters der Zielposition signifikante Auswirkungen auf die Sichtbarkeitsanalyse haben. Dies gilt insbesondere für den Offsetbereich von 0 bis 10 m, bei der sich die gesamt sichtbare Fläche Portugals um bis zu 21 % erhöht. Aufgrund des starken Einflusses des Offsetparameters auf die Sichtbarkeiten muss seine Größe daher mit Bedacht ausgewählt werden.

2.2.3 Erdkrümmung und terrestrische Refraktion

Aufgrund der Erdkrümmung weicht die (ideale) Erdoberfläche von einer durch das Auge des Betrachters gelegten Tangentialebene radial Richtung Erdmittelpunkt ab. Die Tangentialebene entspricht dabei dem ebenen Sichtfeld des Beobachters. Die Abweichung von der Tangentialebene beträgt beispielsweise in 5 km Entfernung 1,96 m und in 10 km Entfernung bereits 7,85 m. Diese Abweichung führt zu einem vertikalen Höhenfehler, der exponentiell mit der Entfernung zunimmt und der Objekte höher erscheinen lässt, als sie tatsächlich sind.

Demgegenüber erfolgt durch Brechung der Sichtstrahlen in der untersten Erdatmosphäre ein gegenteiliger Effekt. Aufgrund des vertikalen Druckgradienten der Atmosphäre sowie zu einem geringeren Maße durch atmosphärische Temperaturgradienten werden die Sichtstrahlen radial Richtung Erdmittelpunkt gebrochen und lassen Objekte niedriger erscheinen, als sie tatsächlich sind.

Der kombinierte Effekt wird nach Duggal (2004) in folgender Näherungsformel zur Korrektur der Erdkrümmung und der terrestrischen Refraktion berücksichtigt:

$$Z = Z_{\text{Ziel}} - \text{Dist}^2 / D_E + R_{\text{Refr}} * \text{Dist}^2 / D_E \quad (2.2.3-1)$$

wobei Z_{Ziel} die Höhe der Zielposition über dem Referenzniveau (MSL¹) darstellt, Dist die hori-

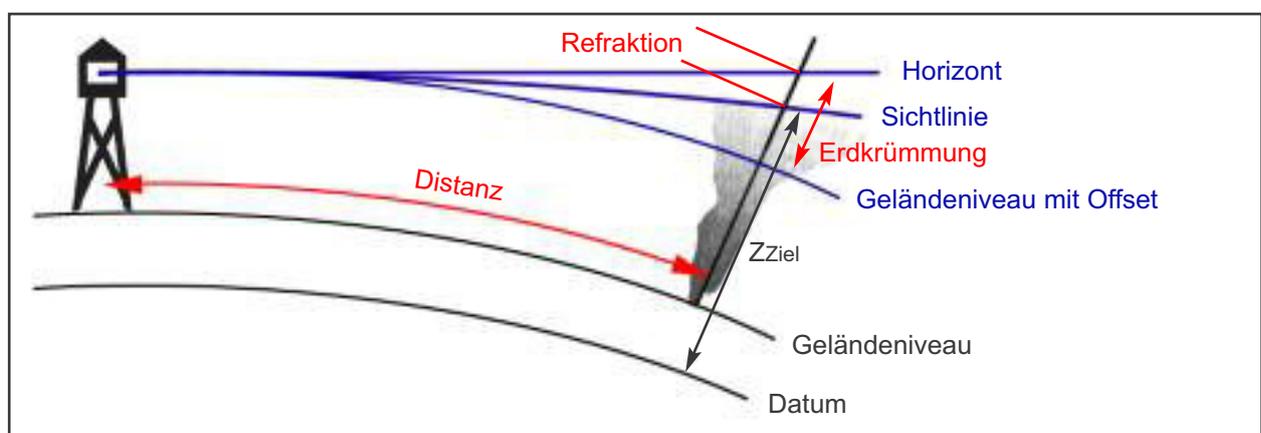


Abbildung 21: Einfluss von Erdkrümmung und terrestrischer Refraktion auf die Sichtbarkeit eines Objektes

¹ MSL: Mean Sea Level – Höhe über dem Meeresspiegel

zontale Distanz zwischen Beobachterposition und Zielposition, R_{Ref} den atmosphärischen Refraktionskoeffizienten und D_E den mittleren Erddurchmesser. Als Werte für D_E beziehungsweise für R_{Ref} von Licht wurden im FPO Programm 12.740.000 Meter und 0,13 verwendet (ESRI, 2002).

2.2.4 Reduktion der Sichtbarkeit durch atmosphärische Eigenschaften

Die Atmosphäre ist kein 100%ig transparentes Medium, da sie zu jeder Zeit eine gewisse Konzentration an atmosphärischen Aerosolpartikeln (Bakterien, Sporen, Pollen, Staub, Seesalz, etc.) sowie an Wassertropfen unterschiedlicher Größe enthält, die als Dunst zusammengefasst werden. Dunst führt durch eine verstärkte Lichtstreuung, Reflexion und Refraktion zu einer Trübung der Atmosphäre und hat damit einen bestimmenden Einfluss auf die Sichtweiten innerhalb der Atmosphäre (Bruce, 1941; Brown und Davis, 1973; Chandler et al., 1983). Mit der Intensität des Dunstes ändert sich der Kontrast zwischen einem weit entfernten Objekt und seiner Umgebung und damit seine Sichtbarkeit (Byram und Jemison, 1948).

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf den Aspekt unterschiedlicher Sichtbarkeiten von Rauch aufgrund unterschiedlicher atmosphärischer Eigenschaften nicht direkt eingegangen. Für die Berechnung der Flugpfade wird eine Standardatmosphäre angenommen, in der Dunst oder andere meteorologische Eintrübungen (Nebel, Wolken, Regen, etc.) keine Rolle spielen. Den sichtbarkeitsreduzierenden atmosphärischen Einflüssen wird aber insofern Rechnung getragen, dass grundsätzlich Minimalwerte für die wesentlichen Parameter der Sichtbarkeitsanalysen verwendet werden – es wird also ein „pessimistischer“ Ansatz verfolgt.

2.2.5 Begrenzung der Sichtweite durch die Größe des Objektes

Sichtbarkeitsanalysen können von einem Beobachtungspunkt aus für alle Zielpositionen des Untersuchungsgebietes durchgeführt werden (Clarke, 1990) oder nur für einen Teilbereich, der in der Regel durch einen Sichtradius begrenzt ist (Aronoff, 1989). Die Bestimmung der Sichtweite (Sichtradius) zur sicheren Erkennung gerade entstehender Waldbrände gestaltet sich als ausgesprochen schwierig, da das zu sichtende Objekt – der Rauchkörper – keine einheitliche Gestalt, Farbe, Größe und Dichte hat und da zur Definition kleiner Waldbrände in ihrer Anfangsphase und damit zur Definition der Größe des Rauchkörpers unterschiedlichste Vorgaben in der Fachliteratur gefunden werden. Bereits in den Vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden Rauchkerzen (engl. smoke candles) entwickelt (zum Beispiel Mc Ardle, 1936), die bei Windstille oder geringen Windgeschwindigkeiten Rauchkörper von möglichst einheitlicher Form, Farbe, Dichte und Größe er-



Abbildung 22: Rauchkerze (Byram und Jemison, 1948)

zeugen, und die jene Rauchentwicklung simulieren sollen, die in der Frühphase eines Waldbrandes entsteht (siehe Abb. 22 und 23). Die von McArdle entwickelte Rauchkerze soll die Rauchentwicklung simulieren, die bei der Verbrennung von 200 Fuß² (ca. 18,6 m²) kalifornischem Nadelwaldes oder die bei der Verbrennung von 150 Fuß² (ca. 13,9 m²) trockenem, Hartholz-Laubstreu entsteht (Byram und Jemison, 1948). Bei seinen praktischen Experimenten zur Bestimmung der Sichtweite von Bränden in ihrer Anfangsphase verwendet auch Bruce (1944) Rauchkerzen, allerdings zur Simulation einer Brandfläche von 196 Fuß² (ca. 18,2 m²) Buchweizen. In den südlichen Appalachen wiederum wurden Rauchsäulen als Basis für die Sichtweitenbestimmung verwendet, die durch eine Brandfläche von 1/8 Morgen (ca. 505,8 m²) verursacht werden (Byram und Jemison, 1948). Neuere Rauchentwicklungssysteme (smoke generators) werden in jüngster Zeit in Kanada, beispielsweise in Alberta, eingesetzt, um Waldbrände in ihrer Startphase zu simulieren, die eine Fläche von maximal 0,1 Hektar (1000 m²) abdecken (Schroeder, 2005) oder in Saskatchewan, um Waldbrände von maximal 0,01 Hektar (100 m²) zu simulieren (Schroeder, 2004). Es zeigt sich damit ein ausgesprochen heterogenes Bild in der Dimensionierung der Brandflächen als Maß für die Größe eines entstehenden Feuers und als Maß für seine Sichtbarkeit in größerer Entfernung.



Abbildung 23: Simulation der Anfangsphase eines Waldbrandes durch eine Rauchkerze (Byram und Jemison, 1948)

2.2.6 Werte der Sichtweite zu Erkennung von Brandereignissen – Auszüge aus der Literatur

Ungeachtet aller Alternativen bildet das Netz an Feuerwachtürmen nach wie vor das Rückgrat-

des nationalen Systems zur Detektion von Waldbränden in Portugal (Rego und Catry, 2006). Wie auch in anderen Ländern werden Feuerwachtürme als charakteristisches Element des Waldbrandmanagements erachtet (Davis, 1959). Seine Effizienz ist maßgeblich von der Anzahl und Positionierung der Feuerwachtürme abhängig. Die Entscheidung zur Dekommissionierung alter und zur Planung neuer Feuerwachtürme an strategisch günstigerer Position wird wesentlich durch die Ergebnisse von Sichtbarkeitsanalysen beeinflusst. Zentraler und bestimmender Faktor dafür ist die Verwendung möglichst realitätsnaher Distanzwerte für die Sichtweiten vom Feuerwachturm zum Brandereignis.

In der Fachliteratur finden sich mehrere methodische Ansätze zur Quantifizierung der Sichtweiten und eine Vielzahl unterschiedlicher Distanzwerte, die je nach Staat oder Region zum Teil beträchtlich variieren. In Tabelle 2 sind die Distanzwerte der Sichtweiten für die USA, Kanada, die ehemalige UdSSR, Spanien und Portugal aus verschiedenen Quellen zusammengefasst.

Staat	Feuerdetektionsradius [km]	Quelle
USA generell	13 bis 32	Rego und Catry, 2006
USA West	24	Rego und Catry, 2006
USA Süd und Südost	10 bis 13	Rego und Catry, 2006
Kanada	bis zu 18, in Abhängigkeit der atmosphärischen Bedingungen	Rego und Catry, 2006
ehemalige UdSSR	5 bis 7 (für Türme in bevorzugter Position das 1,5 bis 2-fache)	Rego und Catry, 2006
Spanien	6 bis 8 für ungünstige Bedingungen 30 bis 40 für günstige Bedingungen	Rego und Catry, 2006
Portugal	13,4 für ungünstige Bedingungen 20,6 für günstige Bedingungen	Rego und Catry, 2006
Portugal (küstennah)	22 bis 28 je nach Geländerauhigkeit	Costa, 2009
Portugal (Landesinnere)	25 bis 35 je nach Geländerauhigkeit	Costa, 2009
USA West	19,3 bis 37 für günstige Bedingungen 5,6 bis 8,8 für günstige Bedingungen	Bruce, 1944
	5,6 bis 24,1, in Abhängigkeit der atmosphärischen Bedingungen, der Blickrichtung und der Tageszeit	FAO, 2001
	24	Byram und Jemison, 1948

Tabelle 2: Werte für Feuerdetektionsradien [km] unterschiedlicher Staaten und Regionen mit Quellenangabe

Als für die vorliegende Arbeit besonders wertvoll erscheint die Studie zur Sichtbarkeit klein dimensionierter Rauchsäulen von Bruce (1944). In einem breit angelegten Feldversuch in Kalifornien ermittelt er die Sichtbarkeit von über 450 durch Rauchkerzen simulierten Brandereignissen unter variierenden meteorologischen Bedingungen (Dunstkonzentrationen), aus unterschiedlichen

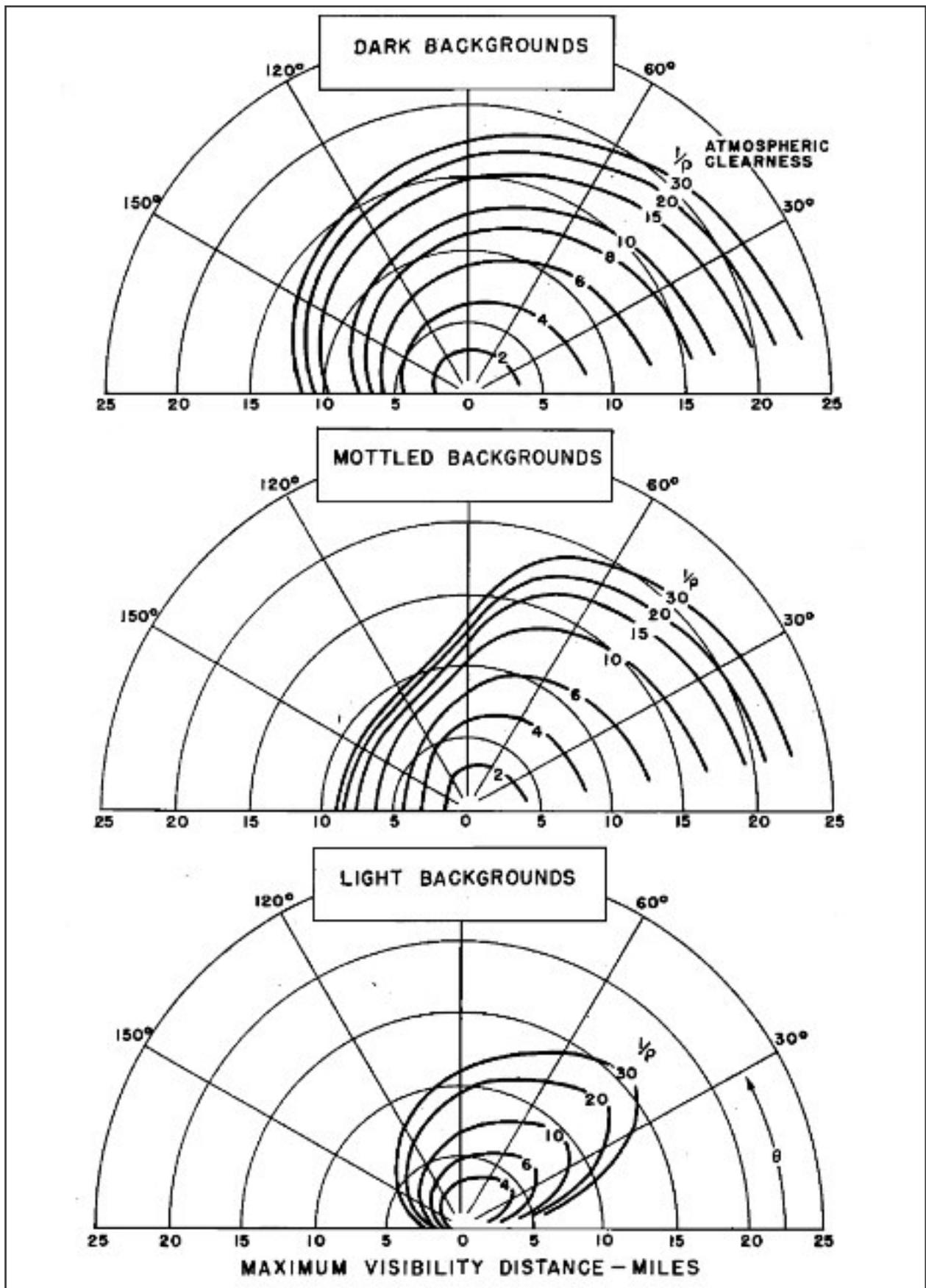


Abbildung 24: Maximaldistanzen [Meilen], die eine Detektion kleiner Standardrauchsäulen unter unterschiedlichen Dunstverhältnissen vor drei typischen kalifornischen Geländehintergründen und für unterschiedliche Winkel zwischen Sonne, Beobachter und Rauchsäule erlauben (Bruce, 1944)

Blickrichtungen in Bezug zur Position der Sonne und vor Geländehintergründen unterschiedlicher Helligkeit. Die Ergebnisse seiner Studie sind Ausgangspunkt für die Definition von Sichtweiten zur Erfassung von Waldbränden von Feuerwachtürmen aus, wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet werden. Abbildung 24 zeigt die graphische Analyse der Felddaten als Hauptresultat der Studie. Für drei Helligkeitsvarianten des Landschaftshintergrunds (dunkel, meliert und hell) werden für unterschiedliche Dunstwerte der Atmosphäre (ausgedrückt durch die Transparenz der Atmosphäre als reziprokes Verhältnis des Dunstkoeffizienten ρ) die durchschnittlichen Sichtweiten zu den Rauchsäulen in Abhängigkeit von der Blickrichtung in drei Diagrammen dargestellt.

Bei den Sichtweiten handelt es sich um maximale Distanzwerte, die ein Erkennen der Testrauchsäulen mit freiem Auge gerade noch erlauben. Byram (1936) schlägt in diesem Zusammenhang vor, anstatt der maximal möglichen Sichtweite die „sichere“ Sichtweite zu verwenden und beziffert diese willkürlich mit 70 % der maximal möglichen Sichtweite. Damit soll sichergestellt werden, dass in der Praxis kleine Brandereignisse mit großer Wahrscheinlichkeit auch tatsächlich detektierbar sind. Mit Schätzwerten von durchschnittlich 77 % für die „sichere“ Sichtweite in der eigenen Studie schließt sich auch Bruce (1944) dieser Meinung an und empfiehlt als Richtwert 70 % zu verwenden.

Bruce (1944) beschreibt in seiner Studie die Helligkeitsvarianten des Landschaftshintergrunds wie folgt: Der dunkle Landschaftstyp wird durch Gebiete mit dunklem Gestrüpp des Typs *California chaparral* und *ceanothus-manzanita* repräsentiert, der melierte Landschaftstyp durch Gebiete mit vorwiegend dunklen Hügeln, die durch Flecken brauner Erde, nacktem Fels und Abtrag- und Füllmaterial des Straßenbaus gesprenkelt sind. Der helle Landschaftstyp wird durch Gebiete mit hellgelbem, trockenem Gras repräsentiert.

Damit lassen sich aus Abbildung 24 für optimale Sichtbedingungen ($1/\rho = 30$) und für Blickwinkel zwischen 30° und 150° für die maximal möglichen sowie die sicheren Sichtweiten Werte ableiten, wie sie in Tabelle 3 zusammengefasst sind. Die Werte der sicheren Sichtweite werden im Rahmen dieser Diplomarbeit für die Berechnung der Sichtbarkeitskarten von Feuerwachtürmen ver-

Landschaftshintergrund	Maximal mögliche Sichtweite [Meilen]	Sichere Sichtweite [Meilen]
Dunkel	13,00 bis 21,63	9,7 bis 15,1
Meliert	8,72 bis 21,63	6,1 bis 15,1
Hell	5,00 bis 15,76	3,5 bis 11,0

Tabelle 3: Distanzwerte für Sichtweiten zur Detektion kleiner Testrauchsäulen als Funktion der Helligkeit des Landschaftshintergrundes, des Blickwinkels (30° bis 150°) und optimaler atmosphärischer Bedingungen. Die Werte der maximal möglichen Sichtweite multipliziert mit 70 % ergeben die Werte der sicheren Sichtweite (Bruce, 1944)

wendet.

Die Definition der Sichtweiten zur Waldbranddetektion von Luftfahrzeugen aus erweist sich aufgrund mangelnder Fachliteratur als besonders schwierig. Aus lediglich vier Literaturwerken konnten Distanzwerte abgeleitet werden. Diese sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Flughöhe über Grund [Fuß]	Feuerdetektionsradius [Meilen] als horizontale Distanz zwischen Flugzeug und Rauchsäule	Quelle
700 bis 14.000	1 bis 5 (größere Entfernungen werden nicht geflogen) mit unterschiedlichem prozentualen Detektionserfolg	Morris, 1946
Unbekannt	4,5 bis 12 mit unterschiedlichem prozentualen Detektionserfolg	Harris und Fahnestock, 1954
2.000 bis 5.000	5 bis 10 rechts und links des Flugpfades	Matthews et al., 2010
1.000 bis 2.000	5 bis 10 rechts und links des Flugpfades	Zimmerman, 1969

Tabelle 4: Werte für Feuerdetektionsradien [km] von Luftfahrzeugen aus mit Quellenangabe

Hierbei ist besonders die Arbeit von Harris und Fahnestock (1954) hervorzuheben. Sie ziehen in ihrer Arbeit einen direkten Vergleich zwischen dem luftgestützten Waldbranddetektionssystem und dem Detektionssystem mit Hilfe von Feuerwachtürmen anhand eines experimentellen Feldversuches. In dem Experiment werden um einen Feuerwachturm radial in einer Entfernung von ca. 8 Meilen und möglichst orthogonal zueinander insgesamt 4 Rauchkerzen aufgestellt. Zwei Luftfahrzeuge fliegen zeitlich versetzt auf einem radialen Kurs in einem Abstand von ca. 4 Meilen um den Feuerwachturm, beobachten an 8 Wegpunkten des Kurses die bekannten Positionen der Rauchkerzen und notieren deren Sichtbarkeit. Zeitgleich wird die Sichtbarkeit vom Feuerwachturm aus aufgenommen. Das Layout des Experimentes ist in Abbildung 25 dargestellt. Das Experiment fand an einem Tag im Juni 1951 bei hervorragenden atmosphärischen Sichtverhältnissen im Coeur d'Alene National Forest im Norden Idahos statt. Von 5:30 bis 19:30 wurde der Parcours im Zweistundentakt abgeflogen. Die für die vorliegende Arbeit wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Aufgrund der atmosphärischen Verhältnisse dieses Tages hatte die Dunstkonzentration keinen Einfluss auf die Sichtbarkeit der Rauchsäulen. Selbiges wurde für den Beobachtungswinkel in Bezug zur Position der Sonne festgestellt. Neben der Position der Rauchkerzen war vor allem die Distanz zwischen Beobachter und Ziel maßgeblich für die Sichtbarkeit verantwortlich. Bis zu einer Distanz von 4 Meilen wurden annähernd alle Rauchsäulen vom Luftfahrzeug aus detektiert, bis zu einer Distanz von 10 Meilen ca. 70 %. Ab 12 Meilen waren nur noch 50 % der Rauchsäulen detektierbar. Diese Werte können aus Abbildung 26 entnommen werden. Harris

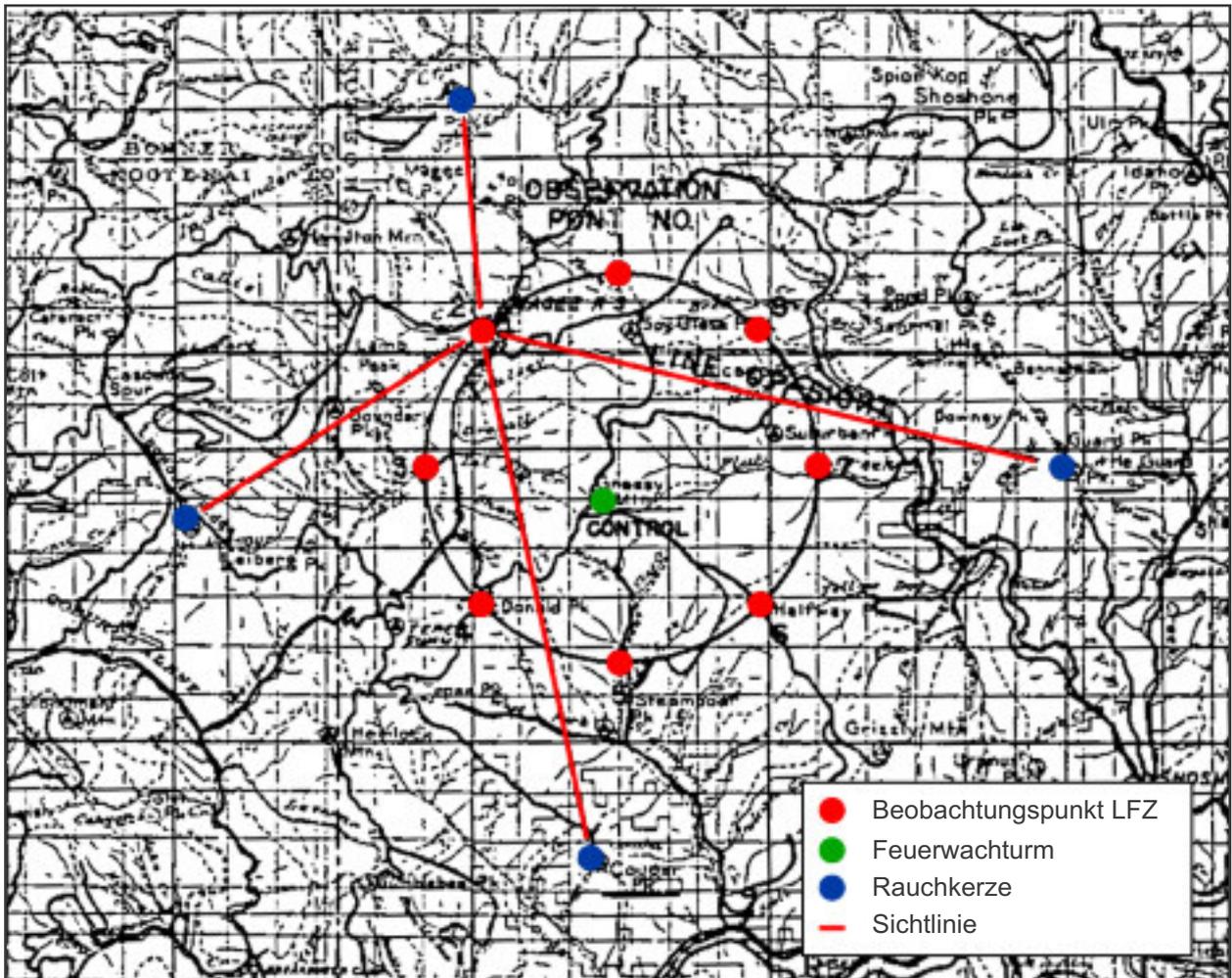


Abbildung 25: Layout des Feldversuches zum Vergleich von luftgestützten Waldbranddetektionssystemen und den Detektionssystemen mit Hilfe von Feuerwachtürmen (Harris und Fahnestock, 1954)

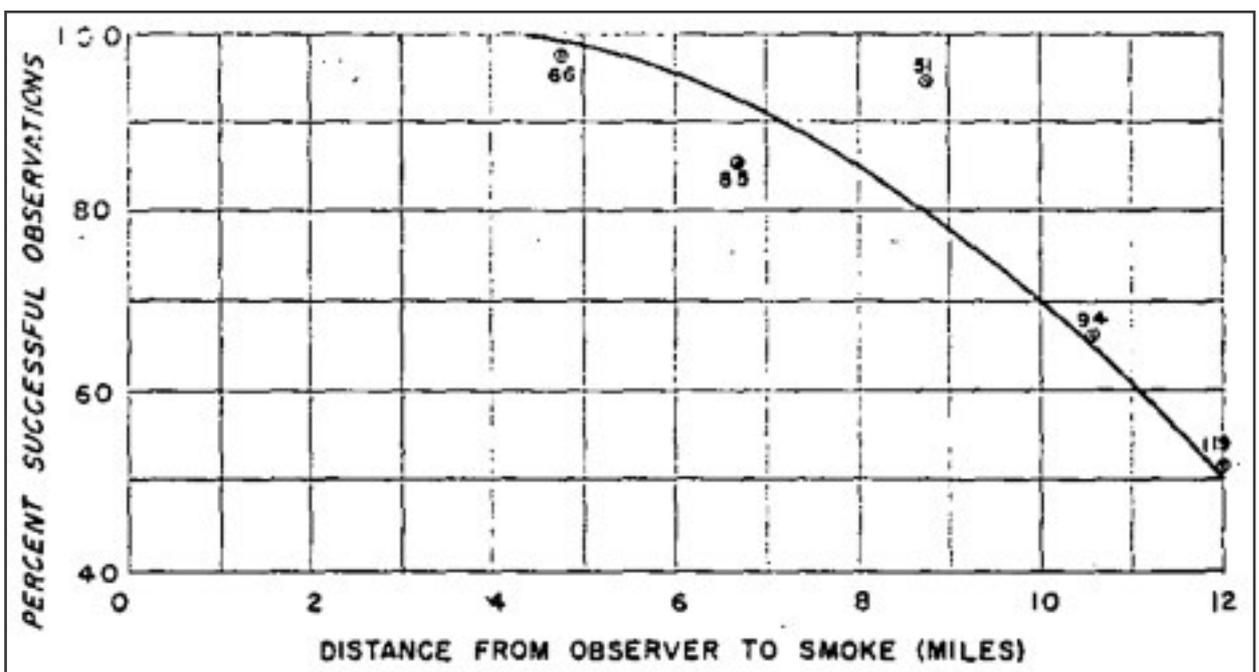


Abbildung 26: Einfluss der Distanz auf die Sichtbarkeit der Testrauchsäulen vom Luftfahrzeug aus. Die Punkte repräsentieren erfolgreiche Detektionen in der jeweiligen Distanzklasse, die numerischen Werte die Anzahl der erfolgreichen Beobachtungen (Harris und Fahnestock, 1954)

und Fahnestock (1954) stellen auch fest, dass die luftgestützte Beobachtung für eine Distanz von 11,5 Meilen die gleiche Erfolgsquote an Detektionen hatte als die Beobachtung vom Boden aus für eine Distanz von 8,5 Meilen – ein Unterschied von ca. 26 %! Die Resultate dieses Experiments wurden im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit zur Distanzdefinition für Sichtbarkeitsanalysen vom Luftfahrzeug aus verwendet.

2.3 TSP – das Problem des Handlungsreisenden

Die Suche nach einem möglichst kurzen Flugpfad, von dem aus Waldbrand gefährdete Gebiete so lückenlos wie möglich überwacht werden können, kann thematisch in die klassischen Routenoptimierungsprobleme eingeordnet werden. Mit der Vorgabe, dass das Luftfahrzeug nach erfolgter Überwachungsmission wieder auf dem Startflugplatz landen soll, ergibt sich eine geschlossene Flugroute, bei der Anfangs- und Endpunkt identisch sind. Die Aufgabe besteht nun darin, die Reihenfolge der vorgegebenen Flugwegpunkte so zu wählen, dass deren Verknüpfung eine Flugroute möglichst kurzer Länge ergibt. Diese Aufgabe ist in ähnlicher Form als „Problem des Handlungsreisenden“ aus der Komplexitätstheorie bekannt. Das Problem tauchte vermutlich 1832 das erste Mal auf und wurde in einem Handbuch für Handlungsreisende mit dem Titel „Der Handlungsreisende – wie er sein soll und was er zu thun hat, um Aufträge zu erhalten und eines glücklichen Erfolgs in seinen Geschäften gewiß zu sein – von einem alten Commis-Voyageur“ erstmals erwähnt, aber mathematisch nicht behandelt. Erst in den Zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts hat sich der österreichische Mathematiker Karl Menger offenbar erstmals aus mathematischer Sicht mit dem Problem des Handlungsreisenden beschäftigt (Schrijver, 2005). Der US-amerikanische Mathematiker Hassler Whitney prägte erstmals den englischen Begriff „Traveling Salesman Problem“ (TSP). Seit der ersten Erwähnung des TSP als mathematisches Problem im Jahre 1930 wurden eine Vielzahl von exakten und heuristischen Lösungsverfahren entwickelt (Biron, 2006).

2.3.1 Einführung in das TSP

Das Traveling Salesman Problem ist das bekannteste und am intensivsten untersuchte kombinatorische Optimierungsproblem. Das Problem ist einfach formuliert: für eine gegebene Menge von Städten soll eine Rundreise gefunden werden, auf der nacheinander jede Stadt genau einmal besucht wird und die am Ende zur Ausgangsstadt zurückkehrt. Die Länge der Rundreise soll dabei so kurz wie möglich sein. Trotz der einfachen Definition und Verständlichkeit des Problems ist das Finden eines beweisbar schnellen Verfahrens zur exakten, optimalen Lösung des TSP sehr schwie-

rig, wenn nicht gar unmöglich, da es sich beim TSP um ein NP-vollständiges Problem handelt (Garey und Johnson, 1979). NP-vollständig steht dabei für „nichtdeterministisch polynomielle Zeit“ und behandelt Optimierungsprobleme, die sich vermutlich nicht effizient lösen lassen. Die deterministischen Algorithmen, die zur Lösung NP-vollständig Probleme entwickelt wurden, erfordern exponentiellen Rechenaufwand (Papadimitriou, 1993). Da exakte Lösungsverfahren beliebig lange Computerlaufzeiten voraussetzen, wird für diese Diplomarbeit ein heuristisches Verfahren zur Anwendung gebracht, das oft in kurzer Zeit gute Lösungen finden kann.

2.3.2 Mathematische Beschreibung

Die mathematische Beschreibung des TSP zur Entwicklung von Lösungsverfahren beginnt mit der Abbildung der realen Situation durch ein einfaches graphisches Modell. Da das TSP für weitaus mehr Anwendungsmöglichkeiten verwendet werden kann, als für die Suche nach einer optimalen Städterundreise, werden die Städte in graphentheoretischer Sprache als Knoten und die Verbindungslinien zwischen den Städten als Kanten eines Graphen bezeichnet. Im Falle eines Flugpfades (einer Flugroute) entsprechen die Flugwegpunkte den Knoten und die Flugroutensegmente (die Verbindungslinien zwischen den Flugwegpunkten) den Kanten. Abbildung 27 zeigt ein einfaches graphisches Modell mit 5 Knoten (A, B, C, D und E) und den Kanten (i,j) , die die Verbindungslinien zwischen zwei Knoten i und j bilden.

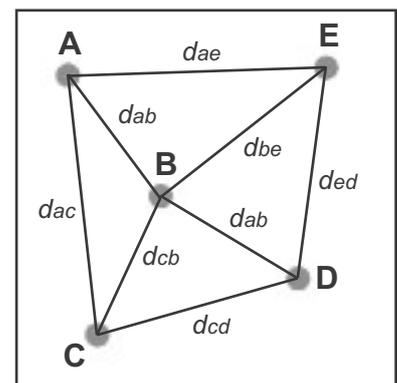


Abbildung 27: Einfaches graphisches TSP Modell

Jede Kante besitzt ein Entfernungsmaß, das je nach Zusammenhang beispielsweise als geographische Distanz, als Reisezeit oder als Reisekosten darstellbar ist, und das üblicherweise als dimensionslose Entfernung d_{ij} festgelegt wird. Je nach Problemstellung kann das Entfernungsmaß ein und der selben Kante unterschiedlich groß sein. Dieser Fall tritt beispielsweise bei einer Städterundreise auf, wenn durch Berücksichtigung von Einbahnen oder Baustellen der Weg zwischen zwei Knoten in einer Richtung länger dauert als in der entgegengesetzten Richtung. In so einem Fall spricht man von einem asymmetrischen TSP, modellierbar durch einen „gerichteten Graphen“. Bei einem symmetrischen TSP ist das Entfernungsmaß in beiden Richtungen gleich groß, es gilt $d_{ij} = d_{ji}$ (Manthey et al. 2004; Grötschel, 2005; Greco, 2008). Die Flugpfadoptimierung entspricht im Wesentlichen einem asymmetrischen TSP, da der Einfluss von Wind beispielsweise die Flugzeit entscheidend verändern kann, je nachdem ob man mit Rücken- oder Gegenwind fliegt. Aufgrund

der Variabilität des Windes und der Tatsache, dass lediglich für Flugplätze ausreichend genaue Windvorhersagen existieren, wird in im Rahmen dieser Diplomarbeit auf die Berücksichtigung des Windes verzichtet und damit das vorliegende Optimierungsproblem zu einem symmetrischen TSP.

Das Flugpfadoptimierungsproblem lässt sich zudem in die Kategorie der „metrischen“ TSP einordnen. Bei einem metrischen TSP ist der direkte Weg von i nach j nie länger als der Weg von i nach j über einen dritten Knoten k , die sogenannte Dreiecksungleichung $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$ ist erfüllt (Korte und Vygen, 2008; Greco, 2008).

Nach Lin (1965) kann das Problem des Handlungsreisenden mathematisch über zwei äquivalente Ansätze beschrieben werden:

- 1) Mit der vorgegebenen „Kostenmatrix“ $D = d_{ij}$ sowie d_{ij} als Kostenmaß, um von der Stadt i zu der Stadt j zu gelangen ($i, j = 1, 2, \dots, n$), soll jene Permutation $P = (i_1, i_2, i_3 \dots, i_n)$ der Zahlen 1 bis n gefunden werden, sodass die Summe $d_{i_1 i_2} + d_{i_2 i_3} + \dots + d_{i_n i_1}$ ein Minimum wird
- 2) Mit der vorgegebenen „Kostenmatrix“ $D = d_{ij}$ sowie d_{ij} als Kostenmaß, um von der Stadt i zu der Stadt j zu gelangen ($i, j = 1, 2, \dots, n$), soll jener Wert x_{ij} gefunden werden, der die Summe $Q = \sum_{i,j} d_{ij} x_{ij}$ minimiert wobei folgende Nebenbedingungen gelten sollen:
 - a) $x_{ii} = 0$
 - b) $x_{ij} = 0, 1$
 - c) $\sum_i x_{ij} = \sum_j x_{ij} = 1$
 - d) für jede Untermenge $S = \{i_1, i_2, i_3 \dots, i_m\}$ der Zahlen 1 bis n gilt:

$$x_{i_1 i_2} + x_{i_2 i_3} + \dots + x_{i_{m-1} i_m} + x_{i_m i_1}$$

Trotz der Linearität des zweiten Ansatzes ist dieser kaum geeignet, um das TSP für eine große Anzahl von Städten n zu lösen, da bereits eine geringe Anzahl n zu einer astronomisch großen Anzahl an Randbedingungen führt. Die exakte Ermittlung der kürzesten Rundreise führt daher über den Weg der Permutation mit $(n-1)!/2$ Möglichkeiten (Lin, 1965). Aber obwohl Symmetrie und Metrik die Anzahl der möglichen Lösungen des Optimierungsproblems beträchtlich reduzieren, ist die exakte Berechnung der kürzesten Strecke mit bisher entwickelten Algorithmen und basierend auf der heutigen Computertechnik noch nicht möglich (Grötschel, 2005; Greco, 2008). Biron (2006) veranschaulicht die Problematik mit Hilfe des Pseudocodes eines sehr einfachen Algorithmus nur allzu deutlich:

so zu erzeugen, dass sie anschließend mit anderen Methoden weiter verbessert werden kann. Zu den Eröffnungsverfahren zählen das Uninformierte Verfahren (Korf, 1985; Ginsberg und Harvey, 1990), die Greedy-Heuristiken (Hart und Shogan, 1987; Caruana und Freitag, 1994; Feo und Resende, 1995) und das Vorausschauende Verfahren (Frost, 1997).

Die lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren versuchen bereits bestehende zulässige Lösungen eines Problems, die entweder zufällig oder mit Hilfe eines Eröffnungsverfahrens ermittelt wurden, durch kleine Modifikationen zu verbessern. Ein lokales Optimum (aber nicht notwendigerweise ein globales Optimum) ist dann gefunden, wenn die Modifikationen zu keiner weiteren Lösungsverbesserung führen. Als Vertreter der lokale Such- bzw. Verbesserungsverfahren sind unter anderem die k -Opt-Heuristiken (Jungnickel, 1999; Lin, 1965; Lin und Kernighan, 1973), Simulated Annealing (Kirkpatrick et al., 1983; Wegener, 2005), Tabu Search (Glover und Laguna, 1993; Glover und Laguna, 1997; Kuhn 2001) und Genetische Algorithmen (Falkenauer, 1998; Goldberg, 1989; Holland, 1975; Joereßen und Sebastian, 1988; Mitchell, 1996; Rechenberg, 1973; Schwefel, 1995; Whitley, 2001) bekannt.

Relaxationsbasierte Verfahren basieren auf dem Versuch, durch Weglassen bestimmter Nebenbedingungen das Problem so zu vereinfachen, dass exakte Lösungsverfahren einsetzbar sind und in akzeptabler Zeit eine Lösung finden (Klein und Scholl, 2004).

Bei den unvollständig ausgeführten Optimierungsverfahren schließlich werden exakte Lösungsverfahren angewendet, wobei diese nach einer gewissen Rechenzeit vorzeitig abgebrochen werden. Die bis dahin ermittelte Lösung ist das Endergebnis. Zu den Vertretern der unvollständig ausgeführten Optimierungsverfahren zählt das B&B-Verfahren (Arnold et al., 2008).

2.3.4 Genetische Algorithmen

Genetische Algorithmen eignen sich im Allgemeinen hervorragend zur Lösung von Optimierungsproblemen. Dem Suchraum S , der die Menge aller möglichen Lösungen des Optimierungsproblems beschreibt, steht eine Zielfunktion (Fitnessfunktion) $f: S \rightarrow \mathcal{R}$ gegenüber, die jede Lösung $s \in S$ nach seiner Güte bewertet. Soll beispielsweise mit einem genetischen Algorithmus eine 150 km lange Flugstrecke erraten werden, dann würde man die Güte einer Lösung nach der Differenz zur optimalen Lösung definieren. Berechnet der Algorithmus eine Flugstrecke von 155 km, dann ist dies nicht die richtige Lösung, aber sehr wohl eine gute Lösung. Berechnet der Algorithmus hingegen eine Flugstrecke von 200 km, dann ist dies eine schlechte Lösung, aber keine falsche Lösung. Richtige und falsche Lösungen sind bei der Verwendung von genetischen Verfahren irrelevant,

die Güte einer Lösung wird lediglich relativ betrachtet. Durch Maximierung der Zielfunktion $f(s) = \max \{f(x) \mid x \in S\}$ erhält man die optimierte Lösung $s \in S$ (Harbich, 2007). Zu einem der Vorteile genetischer Algorithmen zählt, dass die optimierende Zielfunktion f keinen Einschränkungen hinsichtlich der Stetigkeit, Dimensionalität oder Ableitbarkeit unterliegt und dass auch keine besonderen Informationen über den Suchraum S , wie beispielsweise Ableitungen, benötigt werden. Genetische Algorithmen eignen sich insbesondere auch für Optimierungsprobleme, die einen großen Suchraum besitzen (Feltl, 2003).

Zur Waldbranddetektion aus der Luft werden naturgemäß große Flächen abgeflogen. In Abhängigkeit von der Größe des Sichtbarkeitskegels aus dem Luftfahrzeug heraus ergeben sich grundsätzlich lange Flugstrecken mit einer großen Anzahl von Wegpunkten. Die damit verbundenen Optimierungsprobleme mit entsprechend großen Suchräumen lassen sich effektiv und in vertretbarer Rechenzeit mit Hilfe von genetischen Algorithmen lösen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden alle Berechnungen zur Flugpfadoptimierung mit Hilfe eines, auf genetischen Algorithmen basierenden Programms durchgeführt (LaLena, 2006). Der frei verfügbare Source Code wurde dazu in das FPO Programm übernommen und adaptiert.

2.3.4.1 Genetische Algorithmen - Methodenbeschreibung

Genetische Algorithmen zählen zu den evolutionären Algorithmen, die sich am Vorbild der Genetik und der Evolutionstheorie von Charles Darwin orientieren. Ausgangspunkt von Genetik und Evolution ist die Zelle als Grundbaustein jedes Lebewesens. Im Zellkern befinden sich die Chromosomen, die aus langen, kontinuierlichen DNA-Doppelsträngen aufgebaut sind. Als Gene bezeichnet man einzelne Abschnitte auf der DNA, die die Grundinformationen zur Herstellung von RNA, einem Teilabschnitt der DNA, enthalten.

Gene werden allgemein auch als Erbanlage bezeichnet, da sie die Träger der Erbinformation sind (Deutsche Wikipedia, Gen; Deutsche Wikipedia, Desoxyribonukleinsäure) (siehe Abb. 28). Unter biologischer Evolution versteht man die Veränderung der Gene einer Population bei ihrer Weitergabe von Generation zu Generation. Evolution wird dabei im Wesentlichen durch drei Mechanismen geprägt: Mutation

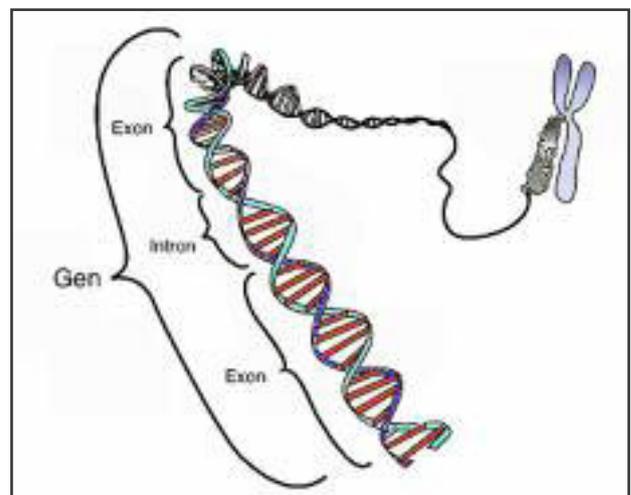


Abbildung 28: Schematische Darstellung eines Gens auf einem DNA-Strang (Deutsche Wikipedia, Gen)

(spontan auftretende oder durch äußere Einflüsse verursachte dauerhafte Veränderung der Erbinformation), Rekombination (Verteilung und Neuordnung des genetischen Materials durch Austausch der unterschiedlichen Genausprägungen) und natürliche Selektion (natürliche Auslese von Individuen über ihre Anpassung an die Umwelt sowie an die Veränderungen in der Umwelt). Die Angepasstheit eines Individuums wird auch als Fitness bezeichnet (Deutsche Wikipedia, Evolution).

Durch das Wechselspiel von Mutation, Rekombination und Selektion passt sich eine Population langsam an die veränderten Umwelt- und Lebensbedingungen an – ihre genetischen Merkmale werden über Generationen hinweg optimiert.

Nach diesem Vorbild arbeiten evolutionäre Algorithmen. Während klassische Optimierungsverfahren den Suchraum S schrittweise von Punkt zu Punkt nach Lösungen absuchen, arbeiten genetische Algorithmen gleichzeitig mit einer endlichen Menge von potentiellen Lösungen, die als Population P bezeichnet werden. Die potentiellen Lösungen sind digital als Zahlenfolge, als Folge von Variablen oder als Zeichenketten binär kodiert und werden als Individuen oder Chromosomen bezeichnet, die sich innerhalb der Population durch mehr oder weniger ähnliche Eigenschaften hinsichtlich des Problems auszeichnen (Harbich, 2007). Der Ablauf der meisten genetischen Algorithmen erfolgt im Wesentlichen nach einem Grundschemata, das in Abbildung 29 dargestellt ist und wie folgt beschrieben werden kann: die Durchsuchung des Suchraumes beginnt mit der Initialisierung potentieller Lösungen. Falls innerhalb des Suchraumes Bereiche mit Individuen bekannt sind, die besonders günstige Merkmale in Hinblick auf die Problemstellung besitzen, kann die Anfangspopulation in der Nähe dieser Bereiche posi-

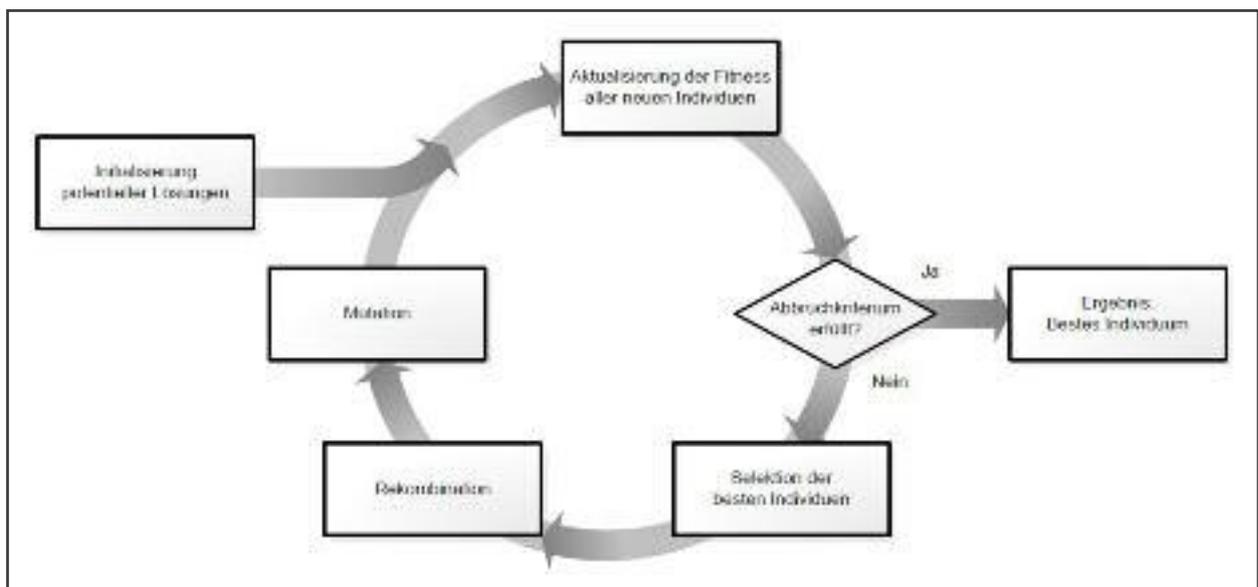


Abbildung 29: Allgemeiner Ablauf eines Genetischen Algorithmus (Windisch, 2007)

tioniert werden. Die Gefahr besteht allerdings, dass die Individuen lediglich ein lokales Optimum innerhalb des Suchraumes darstellen, und dass bei erfolgreicher Weitervererbung ihrer Gene letztendlich nur eine suboptimale Lösung gefunden wird (Harbich, 2007). Über Gene werden in diesem Zusammenhang die Teileigenschaften eines Individuums (Chromosome) charakterisiert.

Mit Hilfe einer Fitnessfunktion wird für jedes Individuum der Anfangspopulation seine Güte (Fitness, Stärke) in Hinblick auf der zu optimierenden Funktion berechnet. Nach Harbich (2007) kann die Fitnessfunktion folgendermaßen definiert werden:

$$p(c_i) = f(c_i) / \sum f(c_j) \quad (2.3.4.1-1)$$

Jedem Individuum c aus der Population $P = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ wird entsprechend der Zielfunktion des Optimierungsproblems ein Fitnesswert $f(c)$ und damit seine Überlebenswahrscheinlichkeit $p(c_i)$ zugeordnet. Falls das stärkste Individuum ein zuvor definiertes Abbruchkriterium erfüllt, wird die Durchsuchung des Lösungsraumes abgebrochen und das Individuum als optimierte Lösung ausgegeben. Im gegensätzlichen Fall erfolgt im nächsten Schritt die Bildung einer neuen Generation, bei der die stärksten Individuen überleben, beziehungsweise ihre Gene weitergeben, während die schwächsten Individuen verworfen werden (Selektion der besten Individuen). Die Selektion der Individuen erfolgt probabilistisch in Abhängigkeit des ausgewählten Selektionsverfahrens mit Hilfe von einer oder mehrerer vom Algorithmus generierter Zufallszahlen oder durch Zufallswahl. Zu den bekanntesten Verfahren zählen die Roulettenselektion (Baker, 1987), das stochastic universal sampling (Baker, 1987) und die Turniers Selektion (Goldberg, 1990). Der Roulettenselektion und dem stochastic universal sampling ist gemein, dass jedem Individuum ein bestimmter Wertebereich zugewiesen wird, dessen Größe die Überlebenswahrscheinlichkeit $p(c)$ des Individuums abbildet. Jene Individuen, in deren Wertebereich eine der Zufallszahlen hineinfällt, überlebt und kann seine Gene weitergeben. Diese Methodik gewährleistet, dass einerseits mit großer Wahrscheinlichkeit jene Individuen überleben, die eine hohe Fitness und damit einen (relativ zu den anderen Individuen) großen Wertebereich besitzen, aber andererseits auch schwächere Individuen überleben, über die unter Umständen ebenfalls Lösungsoptima gefunden werden können. Bei der Turniers Selektion hingegen werden aus der Population zufällig und gleichverteilt Individuen ausgewählt, die in Analogie zu einem Turnier gegeneinander antreten. Das stärkste Individuum überlebt und kommt in die nächste Runde, wo es gegen andere Überlebende antritt. Es werden so viele Runden ausgefochten, bis die Anzahl der zu selektierenden Individuen erreicht ist.

Der Selektionsschritt sorgt dafür, dass sich mit großer Wahrscheinlichkeit die stärksten Gene durchsetzen. Durch Rekombination und Mutation wird im nächsten Schritt versucht, zu noch stärkeren Individuen (Lösungen) zu gelangen. Bei der Rekombination werden sämtliche Individuen einer Population paarweise mit anderen Individuen gekreuzt, wobei jedes Individuum genau ein Mal an einer Rekombination als „Elternteil“ beteiligt ist. Nach Windisch (2007) existieren hierfür mehrere Verfahren, wobei beispielsweise jenes der diskreten Rekombination (Mühlenbein und Schlierkamp-Voosen, 1993) häufig zur Anwendung kommt. Dabei wird die Kreuzung zwischen zwei Individuen $c_1, c_2 \in P$ so durchgeführt, dass zunächst aus dem ersten Individuum c_1 ein Teilsequenz von Genen abgespalten wird. Die Position der abzuspaltenen Gene und damit ihre Anzahl werden mit Hilfe einer Zufallszahl bestimmt. Nachdem auch das Individuum c_2 an der gleichen Stelle gespalten wurde, erfolgt der Austausch der abgespaltenen Gene unter den zwei Kreuzungspartnern (Harbich, 2007). Das Resultat sind zwei neue Individuen („Kinder“) mit neuen Merkmalen und veränderter Fitness.

Im Zuge der Mutation, die in der Regel nach der Rekombination angewendet wird, werden zufällig ein oder mehrere Gene aus einem Individuum herausgelöst und durch zufällig gewählte, andere Gene ersetzt. Die Mutation wird dabei entsprechend einer, für jedes Individuum berechneten Mutationswahrscheinlichkeit p_m , die oft auf den Wert $1/m$ (mit $m = \text{Anzahl der Gene pro Individuum}$) gesetzt wird, ausgelöst (Harbich, 2007). Die Mutation verhindert eine zu große Ähnlichkeit der neuen Individuen, erhöht damit die Diversität der Population und trägt dazu bei, dass sich der Algorithmus nicht zu leicht in lokalen Optima verfängt (Windisch, 2007).

Mit einer neuerlichen Zuweisung von Fitnesswerten an die Individuen der neuen Generation ist ein Suchzyklus abgeschlossen. Es werden solange weitere Suchzyklen durchlaufen, bis das ausgewählte Abbruchkriterium erfüllt wird. Mit der Erfüllung des Abbruchkriteriums wird als Ergebnis jenes Individuum ausgegeben, das die größte Fitness innerhalb der letzten Generation besitzt.

2.4 Flughöhe und Sicherheitsmindesthöhe

Im Rahmen von Sichtbarkeitsanalysen werden Sichtbarkeiten standardmäßig von Beobachtungspunkten aus berechnet, die sowohl räumlich als auch zeitlich eine fixe Position besitzen. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei Überwachungsflügen um einen zeitlich kontinuierlichen Vorgang im dreidimensionalen Flugraum, in dem das Luftfahrzeug grundsätzlich in jeder beliebigen Position als Beobachtungsplattform fungieren kann. In vertikaler Richtung bildet die Erdoberfläche die untere Grenzfläche des Flugraumes, während die obere Grenzfläche von den Leistungsdaten

des Luftfahrzeuges sowie von den meteorologischen Bedingungen abhängt. Einerseits bestimmen die Luftdichte, die Temperatur und in geringerem Maße die Luftfeuchtigkeit die Leistungsfähigkeit der Flugmotoren und damit die maximale Flughöhe, andererseits kann die Gefahr von Eisbildung für Luftfahrzeuge ohne Enteisierungsvorrichtung oder Sichtbehinderung durch Wolken oder andere Eintrübungen der Atmosphäre für Luftfahrzeuge im Sichtflug zu einer erheblichen Reduzierung der maximalen Flughöhe führen.

Für Überwachungsflüge im Rahmen der Waldbranddetektion wird die Flughöhe allerdings durch folgende Faktoren maßgeblich bestimmt: Die Sichtweite, die das Erkennen von kleinen Brandherden erlaubt, die Sicherheitsmindesthöhe, die ein Luftfahrzeug aus gesetzlichen Gründen einhalten muss, Höhenrestriktionen aufgrund der Verkehrssituation und Sichtbehinderungen durch die Eintrübung der Atmosphäre. Für die Berechnung der optimierten Flugpfade wird von der ICAO² Standardatmosphäre ausgegangen, für die als Norm-Atmosphäre für die Luftfahrt nach Champion et al. (1985) folgende Parameter bis zur Tropopause gelten:

Globale Mittelwerte im mittleren Meeresniveau (MSL):

- Lufttemperatur $T_0 = 15 \text{ °C}$
- Luftdichte $\rho_0 = 1,225 \text{ Kg m}^{-3}$
- Luftdruck $p_0 = 1013,25 \text{ Hpa}$
- Schallgeschwindigkeit $a_0 = 340 \text{ ms}^{-1}$
- Gravitation $g = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$
- Vertikale Temperaturabnahme: $0,65 \text{ °C pro } 100 \text{ m}$
- Relative Luftfeuchtigkeit der Luft: 0%

Die Standardatmosphäre wird dazu verwendet, um Leistungsdaten von Fluggeräten beziehungsweise ihrer Motoren zu berechnen.

2.4.1 Flughöhe – Begriffsbestimmung

In der Luftfahrt existieren drei Möglichkeiten, die vertikale Position des Luftfahrzeuges zu definieren: Höhe über Grund (engl. height), Höhe über Meeresniveau (engl. altitude) und die Flugfläche (engl. flight level). Die Flughöhe wird generell in Fuß angegeben. In manchen Regionen der Erde (zum Beispiel in China oder in der Russischen Föderation) wird die Flughöhe in Metern angegeben. Als Höhe über Grund bezeichnet man die vertikale Distanz zwischen dem Luftfahrzeug

² ICAO: Internationale Zivilluftfahrtorganisation (International Civil Aviation Organization)

und der Erdoberfläche (Wasseroberflächen, Gebäude, Vegetation, etc.). Luftfahrzeuge, die in Flughöhen über Grund fliegen, stellen ihren Höhenmesser auf jenen Luftdruck ein, der am nächst gelegenen Flugplatz herrscht. Als Höhe über Meeresniveau bezeichnet man die vertikale Distanz zwischen dem Luftfahrzeug und der Meeresoberfläche. Luftfahrzeuge, die in Flughöhen über MSL fliegen, stellen ihren Höhenmesser auf jenen Luftdruck ein, der aktuell auf Meeresniveau herrscht. Als Flugfläche schließlich bezeichnet man die vertikale Distanz zwischen dem Luftfahrzeug und der Fläche gleichen Luftdrucks von 1013,25 Hektopascal (Standardisobare). Luftfahrzeuge, die in Flugflächen fliegen, stellen ihren Höhenmesser auf den Bezugsluftdruck von 1013,25 Hektopascal ein. Eine Flugfläche *FL 80* entspricht beispielsweise einer Flughöhe von 8.000 Fuß über der Standardisobaren. Da in der Regel nur auf Überlandflügen³ nach Flugflächen geflogen wird, erfolgen im Rahmen dieser Diplomarbeit nur Flughöhenangaben als Flughöhen über Grund oder über MSL.

2.4.2 Sicherheitsmindesthöhe

Die Mindestflughöhe beträgt über Städten, anderen dicht besiedelten Gebieten, Industrieanlagen, Menschenansammlungen, Unglücksorten sowie Katastrophengebieten mindestens 300 Meter (1.000 Fuß) über dem höchsten Hindernis in einem Umkreis von 600 Metern. Die Mindestflughöhe muss aus Sicherheitsgründen in jeder Phase des Fluges eingehalten werden. (Luftverkehrs-Ordnung, 1999).

³ Als Überlandflug bezeichnet man einen Flug zwischen zwei Flugplätzen mittels Flugnavigation (EU Verordnung Nr. 1178/2011 der Kommission, 2011).

3 Datengrundlage

Die Geodaten, die im Rahmen dieser Diplomarbeit für die Berechnung optimierter Flugpfade verwendet wurden, stammen aus mehreren Quellen. Neben digitaler Geländemodelldaten existieren für das Untersuchungsgebiet beispielsweise vektorbasierte Landnutzungsdaten, Waldbrandrisikokarten, Zensusdaten oder Flugstreckendaten von Waldbranddetektionsflügen. Nach einer kurzen Beschreibung des Untersuchungsgebietes, der darin enthaltenen Fluggebiete und ihrer Charakteristika wird in weiterer Folge auf die verwendeten Geodaten näher eingegangen.

3.1 Untersuchungsgebiet und Fluggebiete

3.1.1 Wahl des Untersuchungsgebietes

Als Untersuchungsgebiet für die Berechnung der Flugpfade wurden die Algarve als südlichste Region Portugals und die südlichen Teile der im Norden angrenzenden Region Alentejo ausgewählt. Das Untersuchungsgebiet wurde in weiterer Folge in zwei Fluggebiete unterteilt. Als Koordinatensystem wurde das UTM-System (Zone 29N, WGS 84) für alle Berechnungen und graphischen Darstellungen dieser Arbeit verwendet. Das gewählte Untersuchungsgebiet erscheint aufgrund folgender Gründe geeignet für die vorliegende Studie:

- 1) Die Algarve zählt innerhalb Portugals zu den Regionen mit ausgesprochen hohem Potenzial für Waldbrände. Zwischen 1980 und 2012 ereigneten sich in der Algarve über 9.400

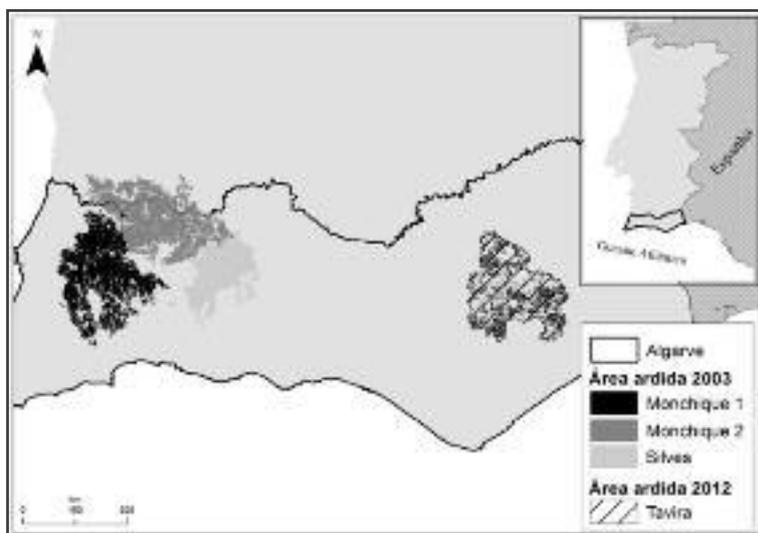


Abbildung 30: Lage und Brandfläche der vier Großfeuer in der Algarve in den Jahren 2003 und 2012 (Tedim et al., 2013)

Wald- und Buschbrände unterschiedlicher Größe, wobei zwischen 2000 und 2012 auch fünf Großfeuer mit Brandflächen > 10.000 Hektar verzeichnet wurden (ICNF, 2014). vier der fünf verheerenden Großfeuer wüteten 2003 und 2012 und zerstörten fast 80.000 Hektar Busch- und Waldland. Bei dem Großbrand von 2012 in der Region um die Stadt Tavira im Osten der

Algarve handelt es sich gemäß der Datenbank des portugiesischen Instituts zur Erhaltung der Natur und der Wälder (port. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas – ICNF) um das größte Waldbrandereignis, das je in Portugal aufgezeichnet wurde (Tedim et al., 2013) (siehe Abb. 30).

- 2) Ab 1983 werden in Portugal in den Sommermonaten Waldbranddetektionsflüge durchgeführt. Auch Südportugal wird im Rahmen des Brand- und Zivilschutzes befliegen, wobei die Flugrouten für die Algarve und das südliche Alentejo mehrmals geändert wurden. Teilweise wurden die Überwachungsflüge am selben Tag auch von den zwei Hauptflugplätzen der Algarve aus durchgeführt. Ab 2006 wird lediglich eine Überwachungsroute geflogen (Germano et al., 2010). Der Verlauf der unterschiedlichen Flugrouten wirft die Frage auf, in welchem Ausmaß eine Optimierung dieser Routen zur Überwachung eines so großen, über die Grenzen der Algarve hinausreichenden Gebietes möglich ist und ob eine veränderte Routenführung die Chancen einer rechtzeitigen Waldbranddetektion erhöht.

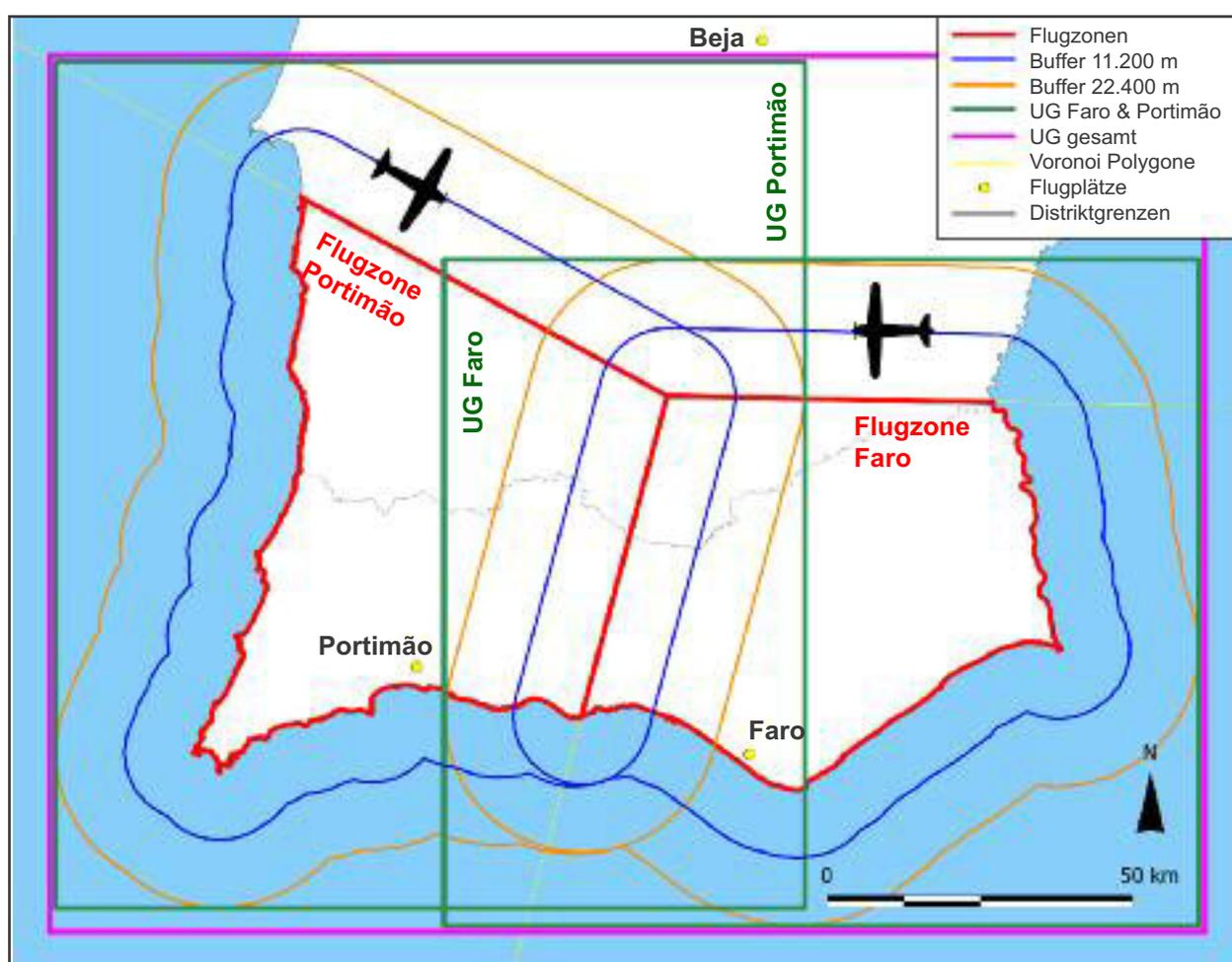


Abbildung 31: Gesamtuntersuchungsgebiet (UG gesamt), Teilbereiche des Untersuchungsgebietes (UG Faro und UG Portimão) und Flugzonen (Faro und Portimão)

3.1.2 Aufteilung des Untersuchungsgebietes in zwei Teilbereiche

Über die räumliche Verteilung der drei südlichsten in Betrieb befindlichen Flugplätze Portugals wurden die Grenzen für zwei Teilbereiche des Untersuchungsgebietes ermittelt. Bei den Flugplätzen handelt es sich um den internationalen Flughafen Faro im Süden der Algarve, den zivilen Flugplatz Portimão im Südwesten der Algarve und den im Zentrum des Alentejo gelegenen Flugplatz Beja, der sowohl zivil als auch militärisch genutzt wird. Jeder dieser Flugplätze bildet den Ausgangspunkt eines Flugüberwachungsgebietes, dessen Größe und Form nach unterschiedlichen Gesichtspunkten festgelegt werden kann. So können beispielsweise Flugüberwachungsgebiete anhand politischer Grenzen oder aufgrund der Flugreichweiten der eingesetzten Flugzeugtypen ausgewiesen werden. Eine andere Möglichkeit besteht in der Definition eines Flugüberwachungsgebietes mit Hilfe von Voronoi Polygonen (Thiessen Polygonen) in einem GIS. Die Begrenzungslinie eines Voronoi Polygons umschreibt dabei eine Fläche in der Euklidischen Ebene, innerhalb derer jede beliebige Position näher an ihrem zugeordneten Punkt (engl. seed) liegt als an allen anderen Punkten einer üblicherweise räumlich ungleichmäßig verteilten Punktmenge. Im vorliegenden Fall wurde jedem der drei Flugplätze in einem GIS ein Voronoi Polygon zugeordnet, wobei die zwei südlichsten Polygone die Algarve zur Gänze abdecken. Diese wurden mit der Landesgrenze von Portugal verschnitten und ergaben zwei Flugüberwachungsgebiete mit einer Fläche von 4.069,0 km² (Portimão) beziehungsweise 3.574,3 km² (Faro).

Flughafen / Flugplatz	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe über MSL [m]
Faro (LPFR)*	536935	4111526	6
Portimão (LPPM)*	591410	4097066	2
Beja (LPBJ)*	593635	4215104	194

Tabelle 5: Koordinaten (UTM 29N, WGS 84) der Flugplätze LPFR, LPPM und LPBJ (*Flughafen/Flugplatzkennung nach der Internationalen Zivilen Luftverkehrsorganisation ICAO)

Die Überwachung eines Fluggebietes erfolgt üblicherweise von einer Flugposition aus, die sich innerhalb der Fluggebietsgrenzen befindet. Im Verlauf der Routenoptimierung ist aber nicht auszuschließen, dass auch Beobachtungspositionen berechnet werden, die sich aufgrund besserer Sichtmöglichkeiten außerhalb der Überwachungszone befinden. Um auch solche Flugpositionen für die Routenoptimierung mitzubersichtigen, wird das Fluggebiet durch die Erstellung eines Pufferpolygons (engl. buffering) erweitert. Als Pufferabstand dient dazu der Abstandswert der Sichtweite zur Erkennung kleiner Brandherde. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für die Detektion kleiner Brände vom Luftfahrzeug aus ein Detektionswahrscheinlichkeit von mindestens 90 %

Untersuchungsgebiet	Unterer linker Eckpunkt		Oberer rechter Eckpunkt	
	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Hochwert [m]
Gesamtuntersuchungsgebiet	477.770	4.068.770	665.060	4.211.690
Teilbereich Portimão	477.770	4.071.650	600.530	4.211.690
Teilbereich Faro	541.400	4.068.770	665.060	4.178.930

Tabelle 6: Koordinaten der Eckpunkte für die Untersuchungsgebiete Portimão (LPPM) und Faro (LPFR) (UTM 29N, WGS 84)

gefordert. Nach Harris und Fahnestock (1954) ergibt sich dafür eine Sichtweite von 7 Meilen (ca. 11.265 m). Als Sichtweite wird daher Wert von 11.200 m festgesetzt. Da der im FPO Programm zur Sichtbarkeitsanalyse eingesetzte Algorithmus die Sichtbarkeit radial um den Beobachtungspunkt berechnet, ist eine nochmalige Erweiterung des Fluggebietes, wiederum um den Abstandswert der Sichtweite, notwendig.

Im letzten Schritt wird für jedes der zwei erweiterten Fluggebiete ein minimal umgebendes Rechteck (bounding box) berechnet. Nach Anpassung der zwei Rechtecke an die ausgewählte Rasterauflösung von 90 m ergeben sich die endgültigen Grenzen der zwei Teilbereiche des Untersuchungsgebietes (siehe dazu Abb. 31 und Tabelle 6).

3.1.3 Beschreibung der zwei Fluggebiete „Portimão“ und „Faro“

Im Folgenden erfolgt eine kurze, überblicksmäßige Zusammenfassung der geographischen Merkmale der Fluggebiete Portimão und Faro. Die Beschreibung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und soll vor allem jene Aspekte hervorheben, die für diese Arbeit von Bedeutung sind (siehe dazu auch Abb. 33). Dazu zählen nicht nur physiogeographische Merkmale wie die Verteilung von Busch- und Waldgebieten, die den Brennstoff für die Brandereignisse liefern, sondern auch humangeographische Merkmale, wie die räumliche Verteilung von Feuerwachtürmen zur Detektion von Busch- und Waldbränden oder die Bevölkerungsverteilung, die einen von mehreren Faktoren zur Erstellung des Brandrisikoindex bildet.

3.1.3.1 Geographische Lage, Morphologie und Hydrographie

Das Fluggebiet, das von Portimão aus abgeflogen wird, überdeckt den südwestlichen Bereich des Distriktes von Beja in der Region Alentejo und den westlichen Teil der Algarve. Der Distrikt von Beja ist gekennzeichnet durch eine weitgehend flache Topographie mit vereinzelt Höhenzügen gemäßiger Hangneigung. Die höchste Erhebung mit 522 m, die *Serra da Adiça*, befindet sich im Osten nahe der spanischen Grenze. Hydrogeographisch ist der Distrikt von Beja geprägt

durch kurze Flussläufe, die in der Regel wenig Wasser führen oder während der Sommermonate zur Gänze austrocknen (Portugiesische Wikipedia, Distrito de Beja). Ein sehr großer Stausee, der *Barragem de Santa Clara*, befindet sich im Südwesten des Distrikts etwa 10 km nördlich der Grenze zur Algarve. Der Stausee wird durch den Fluss *Mira* gespeist, der in nordwestlicher Richtung von den Ausläufern der *Serra do Calderão* in den Atlantik fließt.

Aufgrund ihrer Geologie kann die Algarve in drei große, von Norden nach Süden parallel verlaufende Regionen eingeteilt werden (siehe Abb. 32). Die Regionen werden als *Serra* („Gebirge“), *Barrocal* (Übergangsbereich) und *Litoral* (Küstengebiet) bezeichnet. Rund die Hälfte der Algarve gehört zur Region *Serra*,

die durch eine hügelige Landschaft mit durchschnittlichen Höhen zwischen 300 und 500 m gekennzeichnet ist. Sie verläuft in Ost-West-Richtung von der Westküste bis zur spanischen Grenze. Nach Norden hin erhebt sich die *Serra* bis auf knapp 900 m. Im Süden schließt das

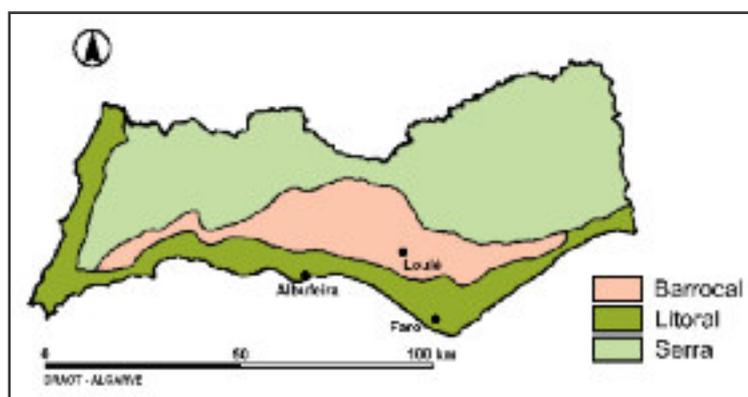


Abbildung 32: Einteilung der Algarve nach geologischen Gesichtspunkten (Lopes und Monteiro, 2010)

Barrocal an, das etwa ein Viertel der Algarve abdeckt, sich bis auf 400 m erhebt und in die flache und schmale Region des *Litoral*, der Südküste Portugals, übergeht (Deutsche Wikipedia, Algarve). Aus hydrogeographischer Sicht zeigen sich Ähnlichkeiten zum Distrikt von Beja. Bis auf den Grenzfluss *Rio Guadiana*, der Südportugal von Spanien trennt, sind die Flüsse der Algarve kurz und trocknen im Sommer teilweise aus.

Etwas mehr als 50 % des Fluggebietes Portimão decken den Westteil der Algarve ab, der auch als *barlavento* (frei übersetzt: „die dem Wind zugewandte Seite“) bezeichnet wird. Dieser Bereich wird durch den Höhenzug der *Serra de Monchique* dominiert, der sich bis in den Beja Distrikt erstreckt. Der *Fója de Monchique* bildet die höchste Erhebung des Höhenzuges und ist mit 902 m über MSL auch der höchste Punkt der Algarve. Der *Rio Arade*, mit einer Länge von etwa 75 km, entspringt in der *Serra do Caldeirão*, fließt in südwestlicher Richtung quer durch die Algarve und mündet an der Südküste in den Atlantik.

Das Fluggebiet Faro erstreckt sich zum größten Teil über den Ostteil der Algarve, der als *sotavento* (frei übersetzt: „unter dem Wind“) bekannt ist. Der *sotavento* wird durch die *Serra do Caldeirão* geprägt, die sich als hügeliges Hinterland über weite Bereiche der Ostalgarve ausdehnt und

bis in den Distrikt von Beja hineinreicht. Die *Serra do Caldeirão* besteht aus Hügelketten moderater Höhe und hat in *Pelados* mit 589 m seine höchste Erhebung. Die sanfte Hügellandschaft wird durch



Abbildung 33: Geographische Lage, Morphologie und Hydrographie des Untersuchungsgebietes

ein Netz von Wasserläufen durchzogen, die nur temporär Wasser führen (Portugiesische Wikipedia, Serra do Caldeirão). Im Norden reicht das Fluggebiet Faro bis in den südlichen Grenzbereich des Distriktes von Beja hinein. In diesem Bereich befinden sich die Ausläufer der *Serra do Caldeirão* sowie einige Zuflüsse des *Rio Guadiana*.

3.1.3.2 Landnutzung

Zur Darstellung der Landnutzungsverteilung beider Fluggebiete wurde der aktuellste Datensatz der Corine Landnutzungsdaten CLC2006 in der Version 17 – 12/2013 (Corine Land Cover, 1995) verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 34 dargestellt. Sie zeigt ausgedehnte Waldgebiete auf den Höhenzügen der *Serra do Caldeirão* und der *Serra de Monchique* sowie nördlich der zwei Höhenzüge im südwestlichen Gebiet des Alentejo. Der Waldbestand setzt sich zum größten Teil aus Laubwald zusammen, nur vereinzelt sind größere und zusammenhängende Nadelwaldgebiete

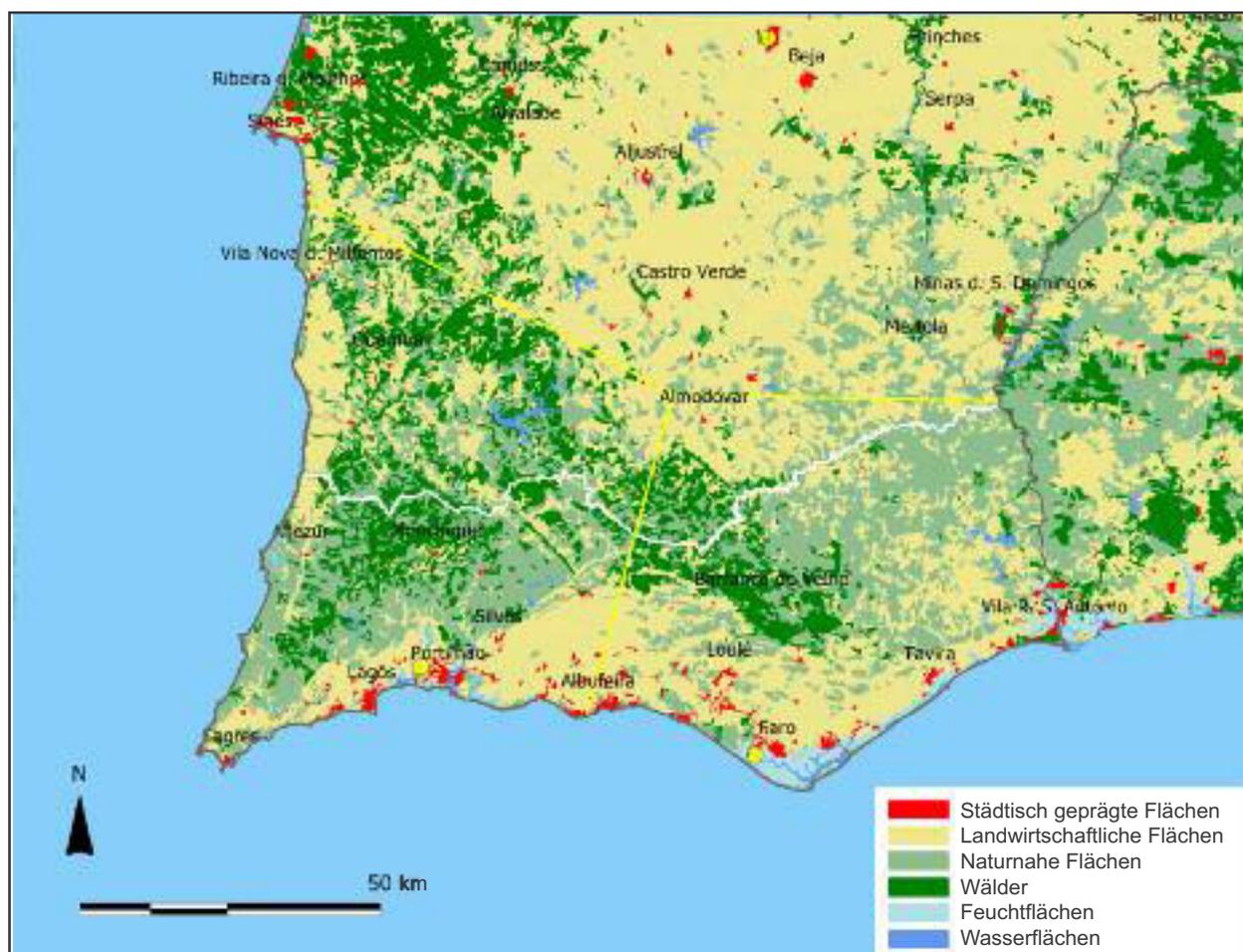


Abbildung 34: Landbedeckung im Untersuchungsgebiet (CORINE-Datensatz)

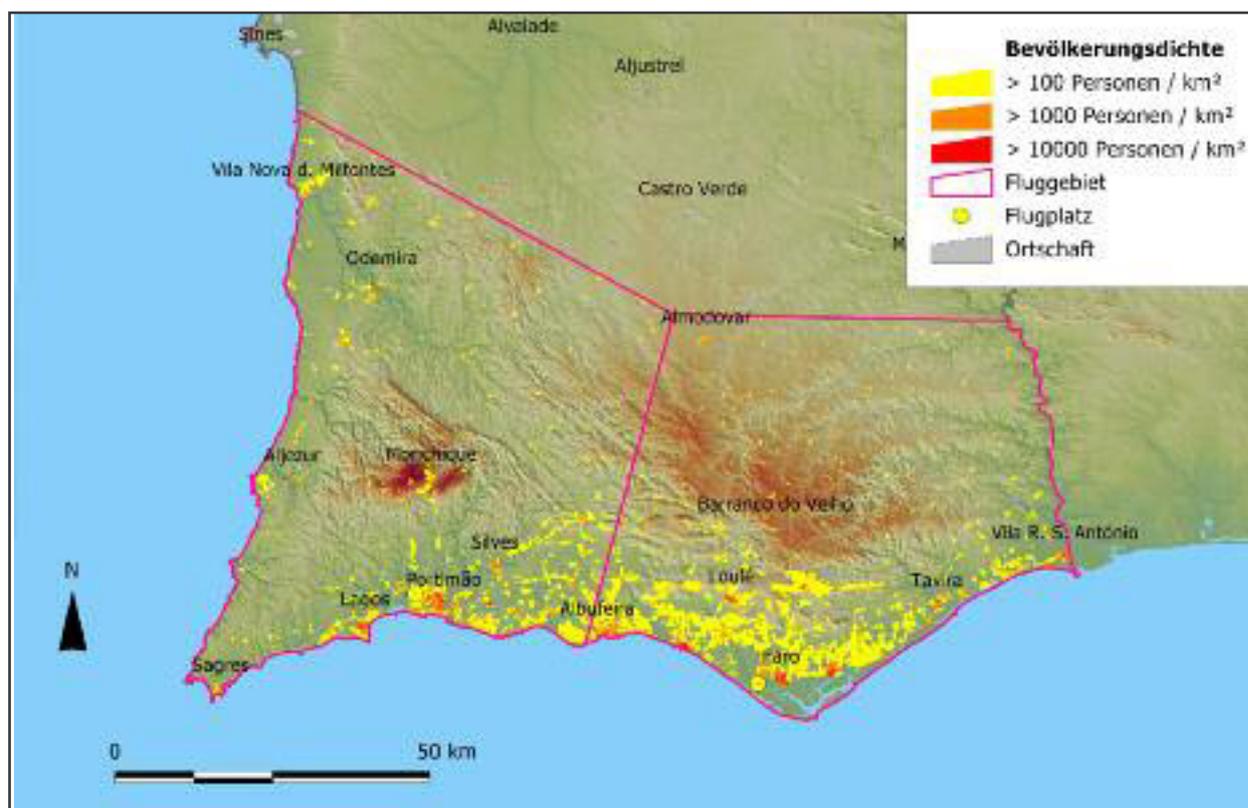


Abbildung 35: Bevölkerungsdichte (mehr als 100 Personen/km²) im Untersuchungsgebiet

vorzufinden. Der Osten der Algarve zeigt sich eher waldarm und ist vor allem geprägt durch naturnahe und landwirtschaftliche Flächen. Die städtisch geprägten Flächen konzentrieren sich im Wesentlichen entlang der Küste. Als naturnahe Flächen werden Busch- und Grasland sowie vegetationsarme oder vegetationslose Flächen zusammengefasst.

3.1.3.3 Bevölkerungsdichte

Den wichtigsten Beitrag zur Detektion von Brandereignissen leistet die Bevölkerung. Gebiete mit einer hohen Bevölkerungsdichte können damit aus dem luftgestützten Überwachungsbereich ausgenommen werden. Abbildung 35 zeigt die Verteilung der Bevölkerungsdichte innerhalb der beiden Fluggebiete basierend auf den durch das Nationale Statistikinstitut Portugals veröffentlichten statistischen Daten der letzten Volkszählung in Portugal (Instituto Nacional de Estatística, 2011). Erwartungsgemäß finden sich die Gebiete höchster Bevölkerungsdichte (mehr als 100 Personen pro km²) in den küstennahen Regionen, und dort insbesondere im Zentrum und im Osten des *Litoral*. Der westliche Bereich des *Litoral* ist im Vergleich dazu bis auf die Ortschaft *Aljezur* und seiner Umgebung relativ dünn besiedelt. Gleiches gilt für die restliche Fläche der zwei Fluggebiete. Die Bereiche höherer Bevölkerungsdichte haben geringe Ausmaße und sind gleichmäßig über beide Fluggebiete verteilt. Eine Ausnahme dazu bildet die Ortschaft *Vila Nova de Milfontes* mit seinem Einzugsgebiet an der Westküste.

3.1.3.4 Feuerwachtürme und Sichtbereiche

Eine wichtige Stütze bei der Detektion von Busch- und Waldbränden bildet das portugiesische Netz an Feuerwachtürmen. 21 der 237 Wachtürme Portugals befinden sich innerhalb der zwei Flugüberwachungsgebiete. Ein weiterer Wachturm, dessen Sichtbereich in das Fluggebiet Portimão hineinreicht, liegt ca. 4,8 km nördlich der Fluggebietsgrenzlinie. Basierend auf den Überlegungen zur Reichweite der Sichtbereiche von Feuerwachtürmen in Kapitel 2.2.6 werden im Rahmen dieser Diplomarbeit zur Früherkennung von Brandereignissen Sichtweiten von maximal 9.800 m in Betracht gezogen. Dementsprechend klein fallen auch die konzentrischen Sichtbereiche um die Wachtürme aus. Dieser Wert ergibt sich aus folgender Überlegung: Das Untersuchungsgebiet weist Landschaftstypen auf, die in ihrer Helligkeit jenen der drei typischen kalifornischen Geländehintergründen entsprechen. So repräsentieren die ausgedehnten Waldgebiete in der Flugzone von Portimão und in der Serra do Calderão den dunklen Typ während weite Gebiete der Ostalgarve mit ihrem arideren Klima und mit einer dementsprechend kargen Vegetation dem melierten und hellen

Geländehintergrund entsprechen. Als Konsequenz wurde aus Tabelle 3 als Durchschnittswert der Mindestwert für die sichere Sichtweite (meliertes Landschaftshintergrund) von 6,1 Meilen (ca. 9.800 m) herangezogen.

Abbildung 36 zeigt die geographische Lage der Feuerwachtürme sowie die konzentrischen Sichtbereiche. Im Fluggebiet Portimão überdecken die Sichtbereiche von 17 Feuerwachtürmen 328.452 Rasterzellen (von insgesamt 501.586 Zellen) oder 65,5 % des Fluggebietes, während nur 192.044 Zellen oder 38,3 % von mindestens einem der 17 Türme tatsächlich auch sichtbar ist. Im Fall des Fluggebietes Faro überdecken 8 Feuerwachtürme 188.806 Rasterzellen (von insgesamt 441.263 Zellen) oder 42,8 % des Fluggebietes. Sichtbar sind hier lediglich 78.903 Zellen oder 17,9 %.

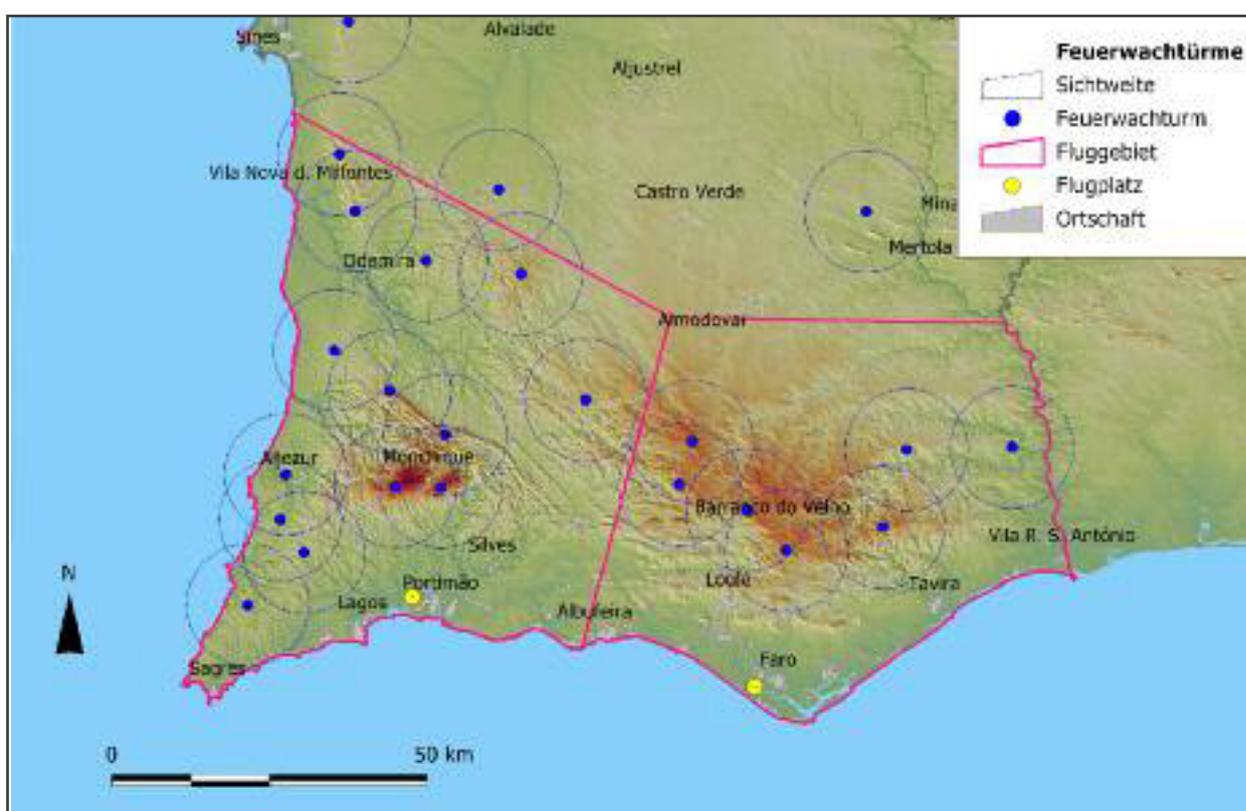


Abbildung 36: Verteilung der Feuerwachtürme im Untersuchungsgebiet und die Sichtbereiche mit einem Sichtradius von 9.800 m

3.1.3.5 CRIF Brandrisikogebiete

Über das Web-Portal des Portugiesischen Geographischen Instituts (port. Instituto Geográfico Português – IGP) kann die Waldbrandrisikokarte Portugals (Grupo CRISE, 1998-2011a) runter geladen werden. Der Ausschnitt, der von den zwei Flugzonen überdeckt wird, ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Karte zeigt für beide Fluggebiete große Bereiche mit höchstem Brandrisikopotenzial. Im Fluggebiet Portimão weisen 15,2 % der Fläche ein hohes Waldbrandrisiko, 34,3 % ein sehr

hohes Waldbrandrisiko und 21,5 % ein extrem hohes Waldbrandrisiko auf. Für das Fluggebiet Faro sind es 13,4 %, 31,3 % und 30,9 %. Zentrum des größten Bereiches mit extrem hohem Brandrisiko ist das Monchique Gebirge. Drei weitere extrem gefährdete Bereiche können wie folgt identifiziert werden: eine schmale, lang gezogene Zone an der Westküste der Algarve, eine Nordwest-Südost gestreckte Zone im Distrikt von Beja sowie eine großer Bereich auf und östlich der Höhenzüge der Serra do Caldeirão. Ein Vergleich der Brandrisikokarte mit der Landnutzungskarte zeigt, dass sich

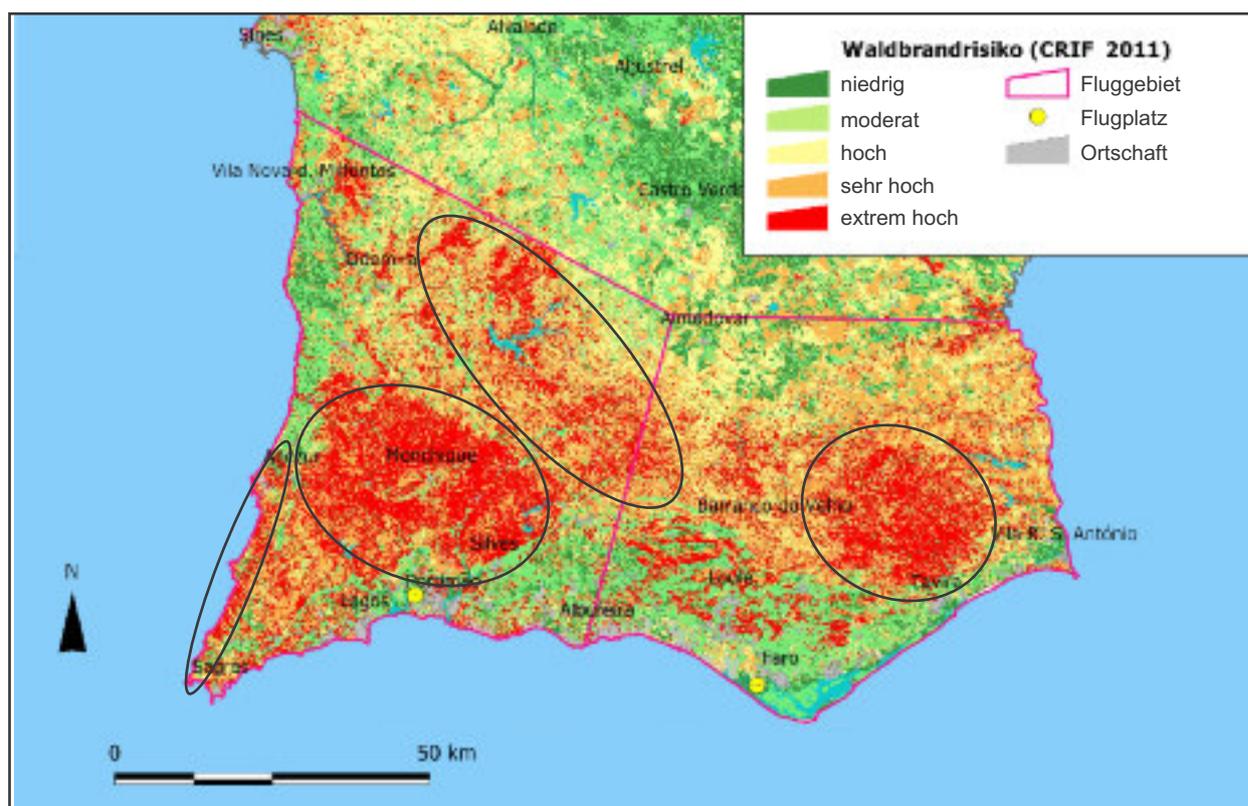


Abbildung 37: Waldbrandrisikokarte des Untersuchungsgebietes. Datengrundlage: CRIF Waldbrandrisikoindexdaten. Vier Zonen mit extrem hohen Brandrisikoklassen sind ausgewiesen

die drei grob umrissenen Zonen extrem hohen Brandrisikos innerhalb der Flugzone von Portimão im Wesentlichen mit den Waldgebieten und den naturnahen Flächen decken. Nördlich von Tavira im Fluggebiet Faro erstreckt sich ein fast kreisförmiger Bereich mit extrem hohem Brandrisiko, der vorwiegend naturnahe und landwirtschaftliche Flächen umfasst.

3.1.3.6 ICRIF Brandrisikogebiete

Aufgrund seiner Variabilität eignet sich der ICRIF Index nicht für eine allgemeine Beschreibung der Brandrisikogebiete innerhalb der zwei Fluggebiete. Je nach meteorologischer Situation und Vitalität der Vegetation können sich innerhalb von wenigen Tagen oder Stunden beträchtliche Unterschiede in der Intensität und Verteilung der Brandrisikogebiete ergeben. In den Abbildungen

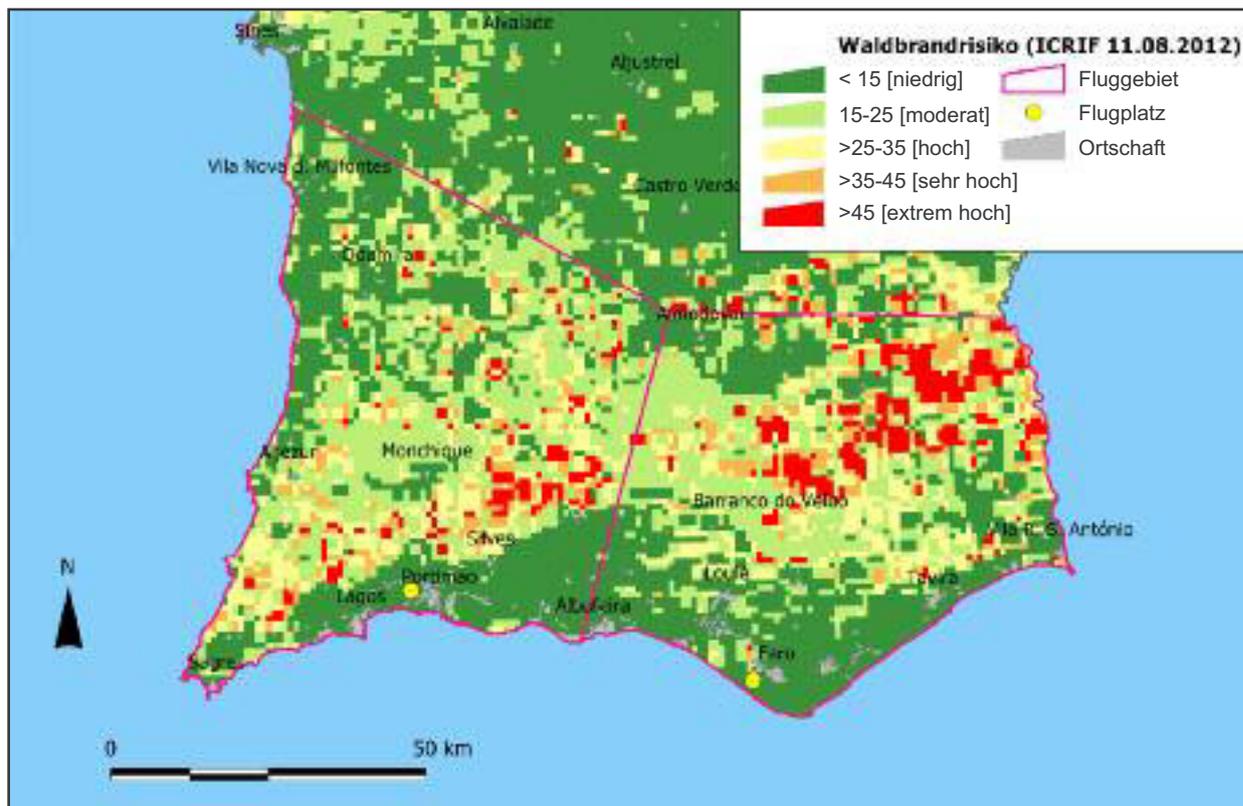


Abbildung 38: Waldbrandrisikokarte des Untersuchungsgebietes. Datengrundlage: ICRIF Waldbrandrisikoindexdaten vom 11.08.2012

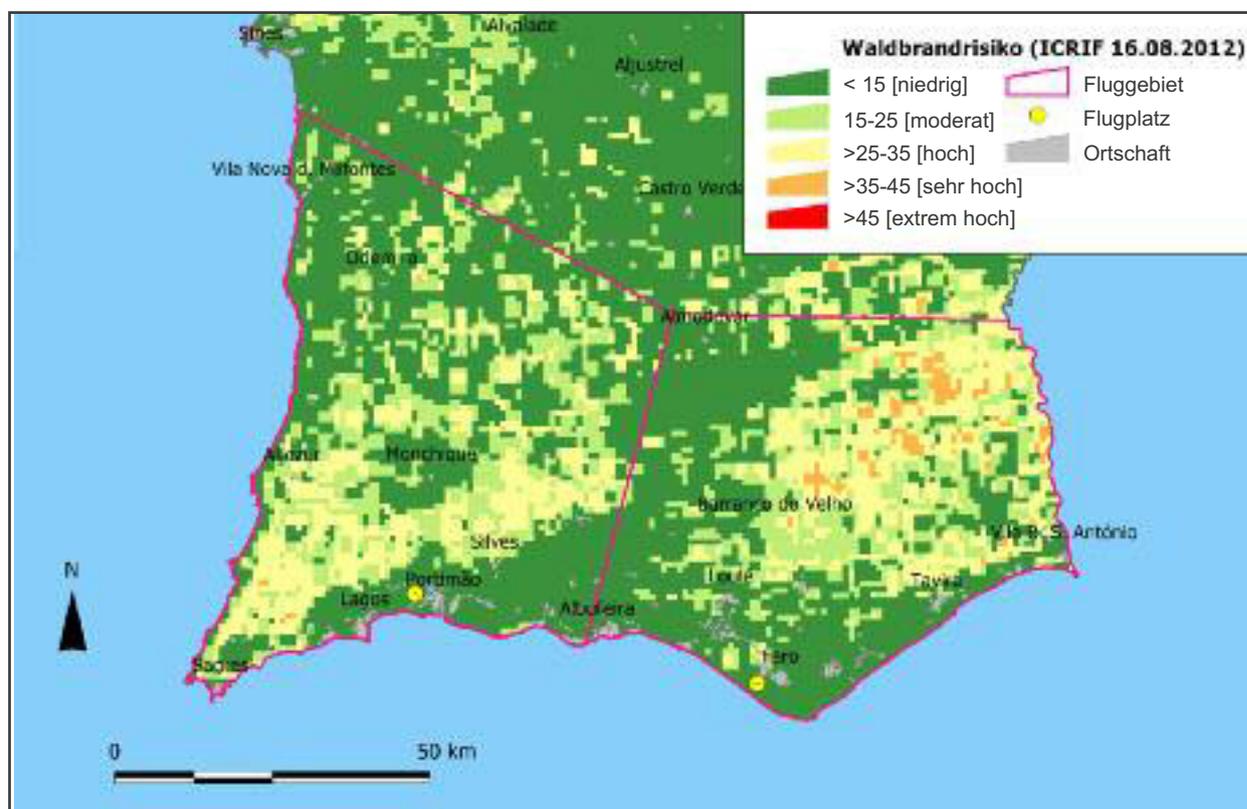


Abbildung 39: Waldbrandrisikokarte des Untersuchungsgebietes. Datengrundlage: ICRIF Waldbrandrisikoindexdaten vom 16.08.2012

38 und 39 sind die ICRIF Brandrisikogebiete für zwei unterschiedliche Tage dargestellt. Abbildung 38 zeigt die Brandrisikosituation des 11. August 2012 mit hohem und Abbildung 39 die Brandrisikosituation des 16. August 2012 mit niedrigem Brandpotenzial. Im Gegensatz zur CRIF 2011 Karte korrelieren die Zonen erhöhten Brandpotenzials in besonderem Maße mit den naturnahen Flächen beider Flugzonen. Die Wälder hingegen weisen für beide Tage ein niedriges bis moderates Brandrisiko auf.

3.2 Datenquellen

3.2.1 Geländemodell

Die Datengrundlage für das Höhenmodell stammt ausschließlich aus dem im Internet frei zugänglichen Datenbestand der STS-99 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) vom Februar 2000. Ziel der Shuttle Mission war die Erstellung des ersten globalen Höhenmodells in höchster Auflösung mit Abdeckung aller Landflächen zwischen dem 60. nördlichen und 58. südlichen Breitengrad. Die Erfassung der Daten erfolgte mit Hilfe eines aus einer SIR-C und einer X-SAR Komponente bestehenden Radarsystems (Farr et al., 2007).

NASA³ und USGS⁴ stellen zwei Produkte der SRTM Mission in unterschiedlicher Auflösung zur Verfügung – Rasterdaten mit einer horizontalen Auflösung von einer Bogensekunde (SRTM-1 mit einer Auflösung von etwa 30 m am Äquator) für das Gebiete der USA und von drei Bogensekunden (SRTM-3 mit einer Auflösung von etwa 90 m am Äquator) für den Rest der Welt. Die für diese Mission spezifizierten Fehlervorgaben des SRTM-3 Höhenmodells von horizontal weniger als 20 m (absolut) und weniger als 15 m (relativ) sowie vertikal weniger als 16 m (absolut) und weniger als 10 m (relativ) für 90 % der Daten werden in allen Bereichen und auf jedem Kontinent übertroffen. So haben 90 % der SRTM Daten im Eurasischen Raum horizontale eine absoluten Durchschnittsfehler von 9 m, vertikal einen absoluten Durchschnittsfehler von 6,2 m und einen relativen Durchschnittsfehler von 8,7 m (Rodríguez et al., 2005).

In ihrer ersten Ausgabe enthalten die SRTM Daten noch die beträchtliche Anzahl von 3.436.585 Fehlpixel (oder ca. 796.217 km² ohne Höheninformation). Fehlpixel häufen sich insbesondere über den Wasserflächen von Flüssen und Seen beziehungsweise in Gebieten, wo aufgrund ungenügender Kontraste im Radarbild die Berechnung dreidimensionaler Höheninformationen

³ NASA: National Aeronautics and Space Administration

⁴ USGS: U.S. Geological Survey

nicht möglich ist (Jarvis et al., 2008). Zur Korrektur der Fehlpixel wurde eine auf räumlicher Filterung basierende Methode entwickelt (Dowding et al., 2004). Die korrigierten SRTM Daten stehen auf der Webseite des Consultative Group for International Agriculture Research Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI {<http://srtm.csi.cgiar.org/>}) zum download bereit. Gorokhovich und Voustianiouk (2006) beziffern den vertikalen absoluten Durchschnittsfehler der CGIAR-CSI Daten für zwei Fallstudien mit $7,58 \pm 0,60$ m sowie $4,07 \pm 0,47$ m und bescheinigen den Daten eine Genauigkeit, die signifikant höher ist als die für die Shuttle Mission spezifizierten Fehlervorgaben des SRTM-3 Höhenmodells.

Für die vorliegende Arbeit wurden CGIAR-CSI SRTM Daten verwendet. Die Kachel „srtm_35_05“ aus der CGIAR-CSI SRTM 90 m Datenbank (DEM Version 4) deckt das geographische Gebiet 10 W bis 5 W und 35 N bis 40 N und damit auch das gesamte Untersuchungsgebiet ab. Die Kachel kann wahlweise im GEOTIFF oder im ArcInfo ASCII Format runter geladen werden. Im GIS wurden die Höhendaten vom geographischen Koordinatensystem (WGS 84) ins UTM Koordinatensystem (UTM Zone 29, WGS 84) umprojiziert. Für das Untersuchungsgebiet, das grob von 37° bis 38° nördlicher Breite reicht, ergibt sich damit als Zellengröße etwa 75×75 m. Nach einem Resampling der Daten auf 90×90 m erfolgte der Zuschnitt auf die Grenzen des Untersuchungsgebietes. Das für die Untersuchung genutzte, endgültige digitale Gesamthöhenmodell überdeckt mit 1.588 Zellen in Nord-Süd Richtung und 2.081 Zellen in West-Ost Richtung bei einer Zellenfläche von 8.100 m^2 eine Gesamtfläche von $26.767,48 \text{ km}^2$. Die insgesamt 3.304.628 Zellen besitzen einen minimalen Höhenwert von 0 m und einen maximalen Höhenwert von 893 m.

Für die Flugroutenberechnungen für zwei Fluggebiete wurden zwei Bereiche aus dem Gesamthöhenmodell extrahiert. Für das Fluggebiet Portimão ergibt sich ein Untersuchungsgebiet mit 1.556 Zeilen und 1.364 Spalten und damit eine Gesamtfläche von $17.191,31 \text{ km}^2$. Die insgesamt 2.122.384 Zellen besitzen einen minimalen Höhenwert von 0 m und einen maximalen Höhenwert von 893 m. Für das Fluggebiet Faro ergeben sich 1.224 Zeilen und 1.374 Spalten, eine Gesamtfläche von $13.622,39 \text{ km}^2$ und insgesamt 1.681.776 Zellen mit einem minimalen Höhenwert von 0 m und einen maximalen Höhenwert von 748 m.

3.2.2 Landnutzungsdaten

Zur statistischen Auswertung der berechneten Flugpfade werden unter anderem auch Landnutzungsdaten für das Untersuchungsgebiet benötigt. Hierfür eignen sich die Daten des CORINE (Coordination of Information on the Environment) Landcover Projekts (abgekürzt CLC), das 1985

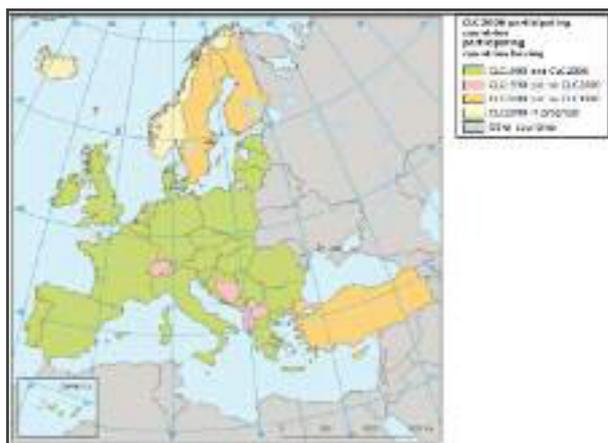


Abbildung 40: Am Erdbeobachtungsprogramm Copernicus der Europäischen Union teilnehmende europäische Staaten (inklusive Türkei) sowie deren Beteiligung an den einzelnen CLC Datenerfassungen (European Environment Agency, 2007)

durch die EU Kommission ins Leben gerufen wurde (Commission of the European Communities, 1995). Ziel dieses Projektes ist die einheitliche Klassifizierung der wichtigsten Landbedeckungs- und Landnutzungstypen auf dem Gebiet der Europäischen Union zur Abschätzung des Umweltzustands in den einzelnen Mitgliedstaaten. An der Ersterfassung der CLC Daten im Referenzjahr 1990 beteiligten sich 26 europäische Staaten. Dazu wurden Satellitenbilder der Landsat-4 und Landsat-5 Satelliten hin-

sichtlich der Flächennutzung ausgewertet und die Ergebnisse in 44 Landnutzungsklassen eingeteilt. Die Mindestgröße einer Erhebungseinheit beträgt 25 Hektar und die geometrische Genauigkeit der CLC Daten 100 m. Für die zweite Erfassung im Referenzjahr 2000 wurden Satellitenbilder des Satelliten Landsat-7 und für die dritte Erfassung im Referenzjahr 2006 Satellitenbilder der Satelliten SPOT-4 und IRS mit einer signifikant höheren Auflösung verwendet. Im Rahmen der zweiten und dritten Erfassung, an der sich 32 beziehungsweise 38 europäische Staaten beteiligten, wurde auch die zeitliche Veränderung der Landbedeckung und Landnutzung im Bezug zu den vorhergehenden Referenzjahren dokumentiert. (European Environment Agency, 2007) (siehe Abb. 40).

Die CLC Hierarchie besteht aus drei Klassifikationsstufen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Haupt- und Unterklassen. Die oberste Ebene (Level 1) setzt sich aus folgenden fünf Hauptklassen zusammen:

- Städtisch geprägte Flächen (engl. artificial surfaces)
- Landwirtschaftliche Flächen (engl. agricultural areas)
- Wälder und naturnahe Flächen (engl. forest and semi natural areas)
- Feuchtgebiete (engl. wetlands)
- Wasserflächen (engl. water bodies)

Die mittlere Ebene (Level 2) besteht aus 15 Unterklassen und die unterste und detaillierteste Ebene (Level 3) aus 44 Unterklassen. Eine Zusammenfassung der CLC Klassen mit Nomenklatur und CLC Code ist im Anhang 9.1 nachzulesen. Für die statistische Auswertung der berechneten Flugpfade wurde der aktuellste Datensatz der Corine Landnutzungsdaten CLC2006 in der Version 17 – 12/2013 verwendet (Corine Land Cover, 1995).

3.2.3 Daten zur Bevölkerungsdichte – Zensus 2011

Am 9. Mai 2011 begann die erste gemeinsame Volkszählung in den Mitgliedstaaten der Europäischen Union. Die Volkszählung wurde anhand eines europaweit einheitlich festgelegten Katalogs von Merkmalen, basierend auf der Verordnung (EG) Nr. 763/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Juli 2008 über Volks- und Wohnungszählungen, durchgeführt. Während die Merkmale, die geliefert werden müssen, einheitlich sind, bleibt es jedem Staat überlassen, mit welcher Methodik die Informationen gewonnen werden. Thematisch lassen sich die Merkmale folgendermaßen gliedern (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014a; Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014b):

- Demografische Merkmale (Einwohnerzahl, Geschlecht, Alter, Familienstand, Staatsangehörigkeit)
- Merkmale der Religionszugehörigkeit
- Merkmale zum Migrationshintergrund (Migrationshintergrund, Geburtsland)
- Erwerbsstatistische Merkmale (Beruf, Erwerbsstatus, Karrierestatus)
- Bildungsstatistische Merkmale (Bildungsniveau)
- Haushaltsstatistische Merkmale (Merkmale der Familie, Haushaltstyp, Haushaltsgröße, Typ der Kernfamilie)
- Gebäudestatistische Merkmale (Art, Baujahr, Eigentumsform, Bauweise, Größe, Heizungsart, Zahl der Wohnungen im Gebäude)
- Wohnungsstatistische Merkmale (Art, Nutzung, Eigentumsverhältnisse, Fläche Zahl der Räume)

Für Portugal zeichnet das Nationale Statistische Institut (port. Instituto Nacional de Estatística – INE) zusammen mit den Gemeinden und Rathäusern für die Erhebung der Zensusdaten verantwortlich. Über das Webportal des INEP {<http://mapas.ine.pt/>} können die Zensusdaten für alle Regionen von Festlandportugal sowie für die autonomen Regionen der Azoren und Madeira runtergeladen werden. Die Daten werden tabellarisch im CSV Format geliefert. In jedem Datensatz werden Merkmale und Zahlen für mehrere Verwaltungseinheiten angegeben. Diese reichen von den 4 NUTS Ebenen über die Gemeinde- und Rathausebene (port. junta de freguesia und município) bis hin zur Sektionsebene (port. secção) als kleinste Verwaltungseinheit in Portugal.

Für das vorliegende Untersuchungsgebiet wurden die Datensätze BGRI11_184.csv (Baixo Alentejo), BGRI11_181.csv (Alentejo Litoral) und BGRI11_ALGARVE.csv (Algarve) verwendet. Zur Ermittlung der Bevölkerungsdichte konnten zwei Merkmale identifiziert werden. Zum einen

wurden im Zensus 2011 alle Personen erfasst, die sich zum Zeitpunkt der Erhebung mit dem Stichtag 21. März 2011 in einer Gebäudeeinheit befanden oder diese bis zur Mittagszeit des Stichtages betraten (port. população presente – anwesende Personen). Zum anderen wurden alle Personen erfasst, die mindestens 12 Monate in einer Gebäudeeinheit resident waren, unabhängig ob sie zum Zeitpunkt der Erhebung in der Gebäudeeinheit an- oder abwesend waren (port. população residente – residente Personen).

Hinsichtlich der Detektion von Wald- und Buschbrandereignissen wurde von beiden zuvor genannten Merkmalen die geographische Verteilung der *população presente* als geeigneter für die Ermittlung der Bevölkerungsdichte erachtet. Dies gilt insbesondere für die touristische Region Algarve, in der die Bevölkerungsdichte in der Hochsaison und damit auch in der Zeit höchsten Brandrisikos durch Touristen aus dem Norden Portugals und aus dem Ausland außerordentlich ansteigt.

3.2.4 Daten der Feuerwachtürme Portugals

1994 wurde im portugiesischen Nationalen Zentrum für geographische Informationen (port. Centro Nacional de Informação Geográfica – CNIG) des IGP eine Arbeitsgruppe gegründet, die für die Kartierung des Waldbrandrisikos in Portugal im Rahmen des Projektes CRISE (port. Cartografia: Rede de Informação de Situações de Emergência) verantwortlich zeichnete. In Zusammenarbeit mit

dem Nationalen Zivilschutzdienst (port. Serviço Nacional de Protecção Civil) wurde in weiterer Folge ein Geoinformationsdienst zur Verwaltung und Visualisierung nationaler Notfälle und Katastrophen aufgebaut. Die Datenbank dieses Dienstes ist über das Webportal des IGP frei zugänglich (Grupo CRISE, 1998-2009). Über das Webportal sind auch die wesentlichen Informationen der 237 Feuerwachtürme Portugals abrufbar (ein Beispiel dazu ist in Abb. 41 dargestellt). Die Koordinaten der insgesamt 22 Feuerwachtürme, die sich innerhalb oder in unmittelbarer Nähe der zwei Fluggebiete befinden, sowie die Höhen der Observationsplattformen wurden aus den Datensätzen entnommen und weiterverarbeitet.



Abbildung 41: Beispiel eines Datensatzes für den Feuerwachturm „Picota“ in der Algarve aus der Datenbank des Webportals des IGEO-PT

3.2.5 CRIF und ICRIF Daten zur Ausweisung von Brandrisikogebieten

Wie auch bei den Daten der portugiesischen Feuerwachtürme, kann auch die CRIF Waldbrandrisikokarte Portugals über das Web-Portal des IGP kostenlos bezogen werden. Es handelt sich dabei um eine Karte, die 2011 fertig gestellt wurde und die als Graphik im GeoTIFF Format oder vektorbasiert als ESRI Shape Datei zur Verfügung gestellt wird.

Das IPMA bietet auf seine Webseite {<http://www.ipma.pt/pt/index.html>} umfangreiche Dienste unter anderem aus den Bereichen der allgemeinen Wettervorhersage, der Flug-, Agrar- und Umweltmeteorologie oder Erdbebenrisikoanalyse an. Unter {<http://www.ipma.pt//pt/ambiente/risco.incendio/index.jsp>} wird außerdem täglich eine aktuelle Waldbrandrisikokarte sowie eine Vorhersage für die nächsten zwei Tage veröffentlicht. Diese Karten basieren auf dem ICRIF Index und stellen das Waldbrandrisiko als ICRIF Mittelwert auf Kreisebene dar. Da diese Überblickskarten für die vorliegende Arbeit ungeeignet sind, wurden vom IPMA vier Beispieldatensätze der Tage 11. und 12. August 2012 sowie 15. und 16. August 2012 zur Verfügung gestellt (Bugalho, 2013). Die Dateien enthalten die geographischen Koordinaten (Lat/Lon) von 264.618 Zellen, die das portugiesische Festland abdecken und die Index Werte des ICRIF. Die Daten des 11. und 16. August wurden für diese Arbeit weiterverwendet.

4 Optimierungsprogramme

4.1 File Path Optimizer (FPO)

4.1.1 Grundlegendes

Die Sichtbarkeit aus dem Luftfahrzeug heraus unterliegt einigen Einschränkungen. Je nach Flugzeugmuster ergeben sich durch die Bauelemente des Luftfahrzeuges in Abhängigkeit vom Flugzustand unterschiedliche Sichtbehinderungen auf das überflogene Gelände. Im horizontalen Flug ergibt sich für Tiefdecker eine relativ große seitliche Sichtbehinderung durch die an der Unterseite des Rumpfes angeordneten Tragflächen, während beim Hochdecker die Sichtbehinderung lediglich im Kurvenflug auftritt. Streben, Fahrwerk und die Anordnung und Größe der Fenster der Flugzeugzelle bestimmen darüber hinaus das Sichtfeld der Piloten und der Beobachter. Da sowohl die Clusterberechnungen als auch die Sichtbarkeitsanalysen ausgesprochen rechenintensiv sind, wird ein stark vereinfachtes Sichtfeldmodell benötigt, um die Berechnungen in einem vertretbaren Zeitrahmen durchführen zu können. Aus diesem Grund wird für alle Berechnungen das Luftfahrzeug beziehungsweise der Beobachter als Punkt modelliert, von dessen Flugposition aus uneingeschränkte Sicht in Form eines geraden, vertikalen Sichtkegels zur Erdoberfläche besteht (siehe Abb. 42). Diese vereinfachende Annahme ist auch deswegen vertretbar, da während eines realen Beobachtungsfluges die Sichtfeldbeschränkungen durch Verlagerung der Sitzposition der Beobachter oder durch geeignete Flugmanöver (Drehen um die Hoch-, Längs- und Querachse) verringert werden können. Selbst die Sicht nach hinten ist bei vielen Flugzeugmustern möglich (zum Beispiel Cessna 152).

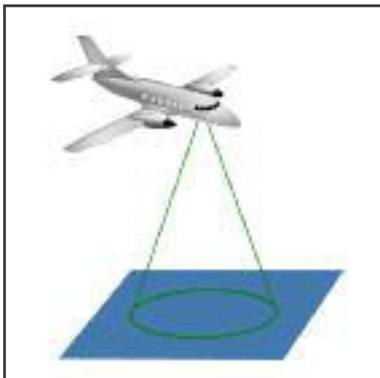


Abbildung 42: Vereinfachtes Sichtfeldmodell als gerader, vertikaler Sichtkegel

vereinfachtes Sichtfeldmodell benötigt, um die Berechnungen in einem vertretbaren Zeitrahmen durchführen zu können. Aus diesem Grund wird für alle Berechnungen das Luftfahrzeug beziehungsweise der Beobachter als Punkt modelliert, von dessen Flugposition aus uneingeschränkte Sicht in Form eines geraden, vertikalen Sichtkegels zur Erdoberfläche besteht (siehe Abb. 42). Diese vereinfachende Annahme ist auch deswegen vertretbar, da während eines realen Beobachtungsfluges die Sichtfeldbeschränkungen durch Verlagerung der Sitzposition der Beobachter oder durch geeignete

Flugmanöver (Drehen um die Hoch-, Längs- und Querachse) verringert werden können. Selbst die Sicht nach hinten ist bei vielen Flugzeugmustern möglich (zum Beispiel Cessna 152).

4.1.2 Berechnung der Cluster

Die grundlegende Vorgehensweise bei der Bestimmung der Cluster erfolgt in mehreren Schritten, ist schematisch in Abbildung 44 dargestellt und kann wie folgt beschrieben werden: Zunächst wird das vom Luftfahrzeug beobachtbare Flächenelement der Erdoberfläche (engl. footprint) modelliert. Unter der Annahme uneingeschränkter Sicht vom Beobachtungspunkt aus hängt die Form und Größe des *footprints* von der Position des Luftfahrzeuges (Höhe und Koordinaten), von der maximal möglichen Sichtweite zur Detektion kleiner Brandereignisse und von der Geländeform

ab. Insbesondere in Gebieten mit komplexer Topographie kann der Verlauf des Geländes die Größe und Form des *footprints* stark beeinflussen. So ist beispielsweise der *footprint* über Höhenrücken kleiner und in Tälern größer als über ebenem Gelände. Des Weiteren verringert sich die Fläche des *footprints* bei konstanter Sichtweite mit zunehmender Flughöhe. Zur programmtechnischen Umsetzung empfiehlt sich auch hier eine vereinfachte Herangehensweise, um Modellkomplexität und Rechenzeit möglichst niedrig zu halten. Zum einen wird daher für die Definition des vom Luftfahrzeug beobachtbaren *footprints* für die Clusterberechnungen zunächst ein horizontales und reliefloses Untersuchungsgebiet angenommen. Der Schnitt des Sichtkegels mit der horizontalen Ebene ergibt damit ein kreisförmiges Flächenelement. Als Radius für diesen Sichtbarkeitskreis wird in Anlehnung an die Sichtbarkeitsstudien von Beobachtungstürmen aus die maximale Sichtweite zur Erkennung kleiner Brandereignisse verwendet. Diese vereinfachende Annahme führt dazu, dass der im Modell vom Luftfahrzeug aus sichtbare *footprint* größer ist, als dies in Realität aufgrund der noch zu berücksichtigenden realen Flughöhe tatsächlich der Fall wäre. Dennoch kann diese Vorgehensweise implementiert werden, da das Flächenelement lediglich zur Auswahl der Zellen dient, die für die einzelnen Sichtbarkeitsberechnungen herangezogen werden. Die Sichtbarkeitsanalysen selbst werden unter Berücksichtigung der realen Beobachtungshöhe durchgeführt und zwar für jene Zellen, die sich zur Gänze innerhalb des *footprints* befinden (grün eingefärbte Zellen in Abb. 43).

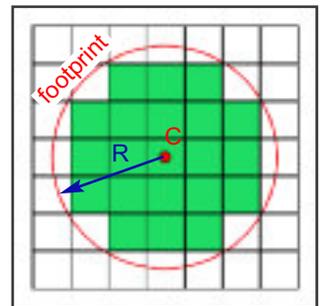


Abbildung 43: Zellen (in grüner Farbe), die für die Sichtbarkeitsanalysen in Betracht gezogen werden. Mit C = Beobachtungspunkt und R = Sichtradius

Im nächsten Schritt erfolgt für jede der drei Brandrisikoklassen die Definition eines eigenen zweidimensionalen Suchraumes S_{BRK} . Die Dimensionen der Suchräume ergeben sich durch die Berechnung einer *bounding box* um die Zellen der jeweiligen Brandrisikoklasse BRK und durch Erweiterung der *bounding box* um den einfachen Sichtradius in jede Richtung. Die Iteration über die drei Klassen bildet die äußerste Schleife des Programms und beginnt mit der höchsten Brandrisikoklasse.

Jede Zelle des Suchraumes S_{BRK} bildet in weiterer Folge ein mögliches Zentrum für eine Sichtbarkeitsanalyse. In Anlehnung an die Technik der *moving windows*⁵ wird das beobachtbare Flächenelement *footprint 1* als „Fenster“ (grün eingefärbte Zellen in Abb. 44), beginnend mit der linken unteren Zelle, um je eine Zellbreite zuerst in x- und anschließend in y-Richtung über den S_{BRK} hinweg bewegt (Schleife $L1$). Sobald die oberste Zelle des Fensters *footprint 1* eine Zelle Cl_n

⁵ moving windows: Gleitfenster-Statistik

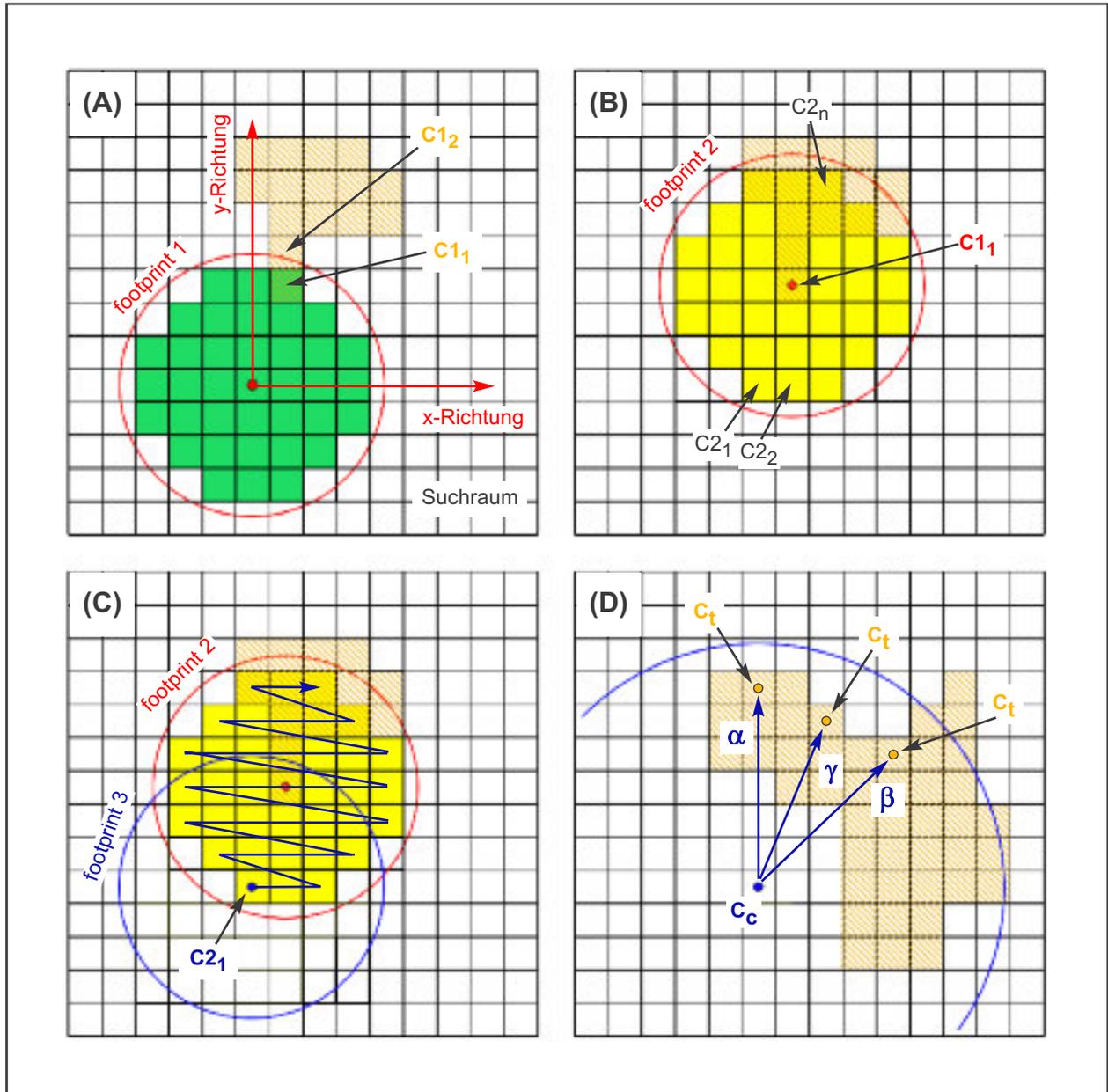


Abbildung 44: Graphiken (A) bis (C): Darstellung eines Berechnungszyklus im Rahmen der Clusterberechnungen. Graphik (D): Blickrichtungen innerhalb der Sichtbarkeitsberechnungen. Grün und gelb eingefärbte Zellen: Zellen, die sich zur Gänze innerhalb eines *footprints* befinden; orange eingefärbte Zellen: Zellen, die mit einem Brandrisikoindex > 25 attribuiert sind; weiß eingefärbte Zellen: Zellen, die mit einem Brandrisikoindex ≤ 25 attribuiert sind und für die keine Sichtbarkeitsanalysen gerechnet werden

überdeckt (Zelle $C1_1$ in Abb. 44A), die als Attribut den Brandrisikoindex der zu diesem Zeitpunkt betrachteten Brandrisikoklasse besitzt, erfolgt der Beginn eines Clusterberechnungszyklus. Der Zyklus beginnt mit der Auswahl aller Zellobjekte $C2_n$, die sich zur Gänze innerhalb des *footprint 2* mit dem Zentrum $C1_n$ und dem Radius $R = \text{Sichtweite}$ befinden (Abb. 44B). Bei einem Radius von 11.200 m und einer Rastergröße von 90 m werden damit pro Zentrum $C2_n$ maximal 48.121 Zellen selektiert und den weiteren Berechnungen übergeben. Optional ist eine Reduzierung der

Zellenanzahl dieser Selektion möglich.

Beginnend mit der linken unteren Zelle $C2_1$ wird in einer Schleife zuerst in x-Richtung und dann in y-Richtung über alle Zellen der Auswahl iteriert (blau eingefärbter Pfeil in Abb. 44C). Das gerade aktuelle Zellobjekt $C2_n$ der Iteration bildet das Zentrum eines weiteren beobachtbaren Flächenelements *footprint 3*. Der Algorithmus ermittelt dann, ob von $C2_n$ in einer Flughöhe $H2$ die Ausgangszelle $C1_n$ sichtbar ist und gegebenenfalls die Anzahl aller Zellen n_{Cn} , die mit einem Brandrisikoindex der gerade in Betracht gezogenen Brandrisikoklasse belegt sind und sich zur Gänze innerhalb von *footprint 3* befinden. Die Notwendigkeit, dass $C1_n$ von $C2_n$ aus ungehindert sichtbar sein muss, begründet sich damit, dass am Ende des Zyklus die Zelle $C1_n$ von den folgenden Zyklen ausgenommen wird und einem Cluster zugeordnet sein muss, von dessen Zentrum sie aus sichtbar ist. Jedes Zellobjekt $C2_n$ erhält im Zuge der Iteration zwei Eigenschaftswerte: Die Anzahl der überdeckten Brandrisikozellen n_{Cn} sowie die Entfernung von $C2_n$ zum Zentrum des Suchraumes S_{BRK} .

Im nächsten Schritt werden die Zellobjekte $C2_n$ zuerst absteigend nach der Anzahl der überdeckten Brandrisikozellen n_{Cn} und dann aufsteigend nach ihrer Entfernung zum Zentrum des S_{BRK} sortiert. An erster Stelle der sortierten Liste steht damit jenes Zellobjekt, das die meisten Brandrisikozellen der gerade in Betracht gezogenen Brandrisikoklasse überdeckt und möglichst nahe zum Zentrum des S_{BRK} liegt.

In einer Schleife werden die Zellobjekte $C2_n$ der sortierten Liste der Reihe nach bis zum Erreichen eines Abbruchkriteriums abgearbeitet. Es erfolgt die Ermittlung der Anzahl n_{BRK} der von $C2_n$ aus sichtbaren Brandrisikozellen aller Brandrisikoklassen, die sich zur Gänze innerhalb des *footprint 3* befinden. Sobald die Anzahl der sichtbaren Zellen n_{BRK} von $C2_n$ größer ist als die Anzahl n_{BRK} der durch die Zelle $C2_{n+1}$ überdeckten Brandrisikozellen, ist das Abbruchkriterium erfüllt und der Schleifendurchlauf wird beendet. Diese Vorgehensweise reduziert die Anzahl der rechenintensiven Sichtbarkeitsberechnungen signifikant und schließt einen Clusterzyklus ab. Als Teilergebnis erhält man eine Zelle des Suchraumes S_{BRK} , die das Zentrum eines Clusters bildet.

Die Schleife $L1$ wird nun durch Verschieben des Fensters *footprint 1* fortgesetzt, bis die letzte Brandrisikozelle $C1_n$ in einen Clusterzyklus eingebunden wurde. Als Endergebnis ist jede Brandrisikozelle $C1_n$ einem Cluster zugeordnet, von dessen Zentrum sie aus sichtbar ist. Die Clusterberechnungen ergeben eine Auswahl ungleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilter Rasterzellen, die jede für sich das Zentrum eines Clusters bilden. Von den Beobachterpositionen über den Mittelpunkten der Clusterrasterzellen sind die Zielpositionen aller Rasterzellen des Un-

tersuchungsgebietes, die mit einem Brandrisikoindex > 25 belegt sind, mindestens ein Mal sichtbar.

4.1.3 Berechnung der Sichtbarkeit

Für die Berechnung der Sichtbarkeit zwischen einer beliebigen Beobachterzelle C_c (center cell) und einer beliebigen Zielzelle C_t (target cell) innerhalb des Untersuchungsgebietes benötigt der eingesetzte Algorithmus im Wesentlichen die 3D-Koordinaten (X, Y, Z) beider Zellen, die Beobachtungshöhe über dem Mittelpunkt von C_c (Beobachungsposition), den Offset über dem Mittelpunkt von C_t sowie den Höhenkorrekturfaktor H_c (siehe dazu Formel 2.2.3-1). Die Höhe der zu beobachtenden Position über C_t (Zielposition) ergibt sich aus der Addition der Höhe von C_t mit dem Offsetwert und optional durch Anbringen des Korrekturfaktors H_c . Die Beobachtungshöhe über C_c entspricht der Flughöhe über MSL. Mit Hilfe der x- und y-Koordinaten beider Zellen wird die Blickrichtung von C_c aus ermittelt. Aufgrund der Modellierung des Untersuchungsgebietes durch ein Raster unterscheidet der Algorithmus zur Sichtbarkeitsberechnung drei Fälle (siehe dazu Abb. 45D):

- (α) Die Blickrichtung erfolgt in Nord-Süd oder Ost-West Richtung
- (β) Die Blickrichtung erfolgt in Nordost-Südwest oder Nordwest-Südost Richtung
- (γ) Die Blickrichtung erfolgt in alle Richtungen außer (α) und (β)

Sichtbarkeitsberechnung Fall (α): Von der Beobachungsposition der Zelle C_c wird eine Sichtlinie zur Zielposition der Zelle C_t berechnet. Sie verläuft exakt über den Mittelpunkten der zwischen C_c und C_t liegenden Zellen. Damit kann der Höhenwert von jeder Zwischenzelle direkt zur Sichtbarkeitsberechnung herangezogen werden. Ist auch nur ein Höhenwert der Zwischenzellen größer als der Höhenwert der Sichtlinie an der entsprechenden Position, dann ist die Zielposition von der Beobachungsposition aus nicht sichtbar.

Sichtbarkeitsberechnung Fall (β): Die Sichtbarkeitsberechnung erfolgt teilweise in Analogie zu Fall (α). Die Sichtlinie zwischen der Beobachungsposition und der Zielposition liegt diagonal im Untersuchungsgebiet und verläuft über den Mittelpunkten der diagonal zwischen C_c und C_t liegenden Zellen. Für die Sichtbarkeitsberechnungen gelten die Aussagen aus (α). Zusätzlich werden für die Berechnungen aber auch jene Zellen berücksichtigt, die nördlich, östlich, südlich und westlich an die Diagonalzellen direkt angrenzen. Je nach Blickrichtung (Nordost-Südwest oder Nordwest-Südost) werden geeignete Zellenpaare selektiert, deren Mittelpunkte zu beiden Seiten der Sichtlinie liegen. Das zwischen den Mittelpunkten der zwei Zellen befindliche Gelände wird im

Modell durch eine Gerade approximiert. Durch Ermittlung der Lagebeziehung zwischen den einzelnen Geraden und der Sichtlinie kann die Sichtbarkeit zwischen Beobachtungs- und Zielpunkt ermittelt werden.

Sichtbarkeitsberechnung Fall (γ): Die Sichtlinie zwischen der Beobachtungsposition und der Zielposition wird auf das darunter liegende Raster projiziert. Für die Sichtbarkeitsberechnungen werden alle Zellen selektiert, die durch die Projektionslinie berührt oder geschnitten werden. Für jede der selektierten Zellen werden all jene unmittelbaren Nachbarzellen ermittelt, die sich auf der gegenüberliegenden Seite der Projektionslinie befinden. Analog zu (β) wird im Modell das zwischen den Mittelpunkten eines Zellenpaares befindliche Gelände durch eine Gerade approximiert, ihre Lage gegenüber der Sichtlinie berechnet und damit die Sichtbarkeit zwischen Beobachtungs- und Zielpunkt ermittelt.

4.1.4 Genetische Algorithmen – Umsetzung im FPO Programm

Die Bestimmung von optimierten Flugrouten zur Überwachung waldbrandgefährdeter Gebiete erfolgt mit Hilfe eines auf genetischen Algorithmen basierenden Programms (LaLena, 2006) das in weiterer Folge kurz als TSP Programm bezeichnet wird. Der frei zugängliche und in C# programmierte Sourcecode wurde ohne wesentliche Änderungen in den Sourcecode des FPO Programms übernommen. In weitestgehender Analogie zur zuvor beschriebenen allgemeinen Methodik genetischer Algorithmen wurden in dem Programm folgende Methoden zur Pfadoptimierung umgesetzt:

Initialisierung einer Anfangspopulation (*Population Size, Number of Nearby Waypoints und Nearby Waypoint Odds*): die Initialisierung der Anfangspopulation erfolgt mit Hilfe eines Eröffnungsverfahrens, das auf Greedy-Heuristiken basiert. Der Greedy-Algorithmus bestimmt die Anfangsroute, indem er an jedem Knotenpunkt eine lokal optimale Entscheidung zur Verknüpfung mit dem nächsten Knotenpunkt trifft. Diese lokal optimierte Entscheidung zur Verknüpfung zweier Knotenpunkte liefert im Allgemeinen kein globales Optimum sondern nur eine Näherungslösung. Der im Programm umgesetzte Greedy-Algorithmus bevorzugt die Verknüpfung von Knotenpunkten, die räumlich nahe zueinander liegen. Die Anzahl der Individuen, die die Anfangspopulation bilden (*Population Size*), kann durch den Nutzer beliebig gesetzt werden. Eine geringe Anzahl an Individuen und somit eine kleine Population erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass in weiterer Folge Pfade berechnet werden, die sich sehr ähnlich sind und dass damit eine optimale Lösung nicht gefunden wird. Eine große Population hingegen erhöht die Berechnungsdauer des Algorithmus. Zu-

sätzlich kann der Nutzer bestimmen, wie viele der Knotenpunkte durch den Greedy-Algorithmus als räumlich nah angesehen und mit höherer Wahrscheinlichkeit zur Generierung der Anfangsindividuen verwendet werden sollen (*Number of Nearby Waypoints*). Mit dem *Nearby Waypoint Odds* Parameter wird die prozentuelle Wahrscheinlichkeit festgelegt, mit der zum Aufbau zufällig ausgewählter Anfangsindividuen näher gelegene Knotenpunkte anstatt weiter entfernte Knotenpunkte verwendet werden sollen. Beschließt der Algorithmus, näher gelegene Knotenpunkte zu verwenden, dann besteht selbige Wahrscheinlichkeit, dass ein Knotenpunkt aus dem Pool jener nah gelegenen Knotenpunkte gewählt wird, dessen Größe durch den *Number of Nearby Waypoints* Parameter bestimmt wird.

Definition der Fitnessfunktion: Die Stärke (*Fitness*) eines Individuums (einer Lösung) wird über die Gesamtlänge des Pfades bestimmt. Die Gesamtlänge ergibt sich durch Aufsummieren der Einzelstrecken (Gene) des Pfades. Je kürzer die Gesamtlänge des Individuums im Vergleich zu den restlichen Individuen der Population ist, desto fitter ist das Individuum.

Definition des Abbruchkriteriums (*Maximum Generations* und *Flight Path Length*): In seiner ursprünglichen Fassung wird als Abbruchkriterium das Überschreiten einer festgelegten Anzahl von Generationen verwendet. Dieses Kriterium wurde durch die Vorgabe erweitert, dass nur Pfade erlaubt sind, die eine bestimmte Pfadlänge nicht überschreiten. Diese Limitierung ist damit begründet, dass für Überwachungsflüge die Flugstrecke durch das begrenzte Treibstoffassungsvermögen des Luftfahrzeuges zum einen und durch die zeitlich begrenzte Konzentrationsfähigkeit der Beobachter zum anderen gewisse Distanzen nicht überschreiten sollte. Wird nach Überschreiten der maximalen Anzahl an Generationen ein optimierter Pfad ausgegeben, der die maximale Pfadlänge überschreitet, wird der Optimierungsprozess nach Eliminierung eines ausgewählten Knotenpunktes automatisch erneut gestartet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis die maximale Pfadlänge unterschritten wird.

Selektion der besten Individuen (*Group Size*): Aus der Gesamtmenge aller Individuen einer Generation wird eine Gruppe von Individuen zufällig ausgewählt. Die Größe der Gruppe (die Anzahl der Individuen, die die Gruppe bilden) kann durch den Nutzer beliebig gesetzt werden. Aus dieser Gruppe übernehmen die zwei stärksten Individuen die Elternrolle und bilden durch Kreuzung (Rekombination) zwei Nachkommen, die ihrerseits die zwei schwächsten Individuen der Gruppe ersetzen. Damit setzen sich die stärkeren Individuen durch und geben ihre Gene weiter mit dem evolutionären Ziel, dass die Nachkommen fitter sind als ihre Eltern.

Rekombination: die Rekombination gehört mit der Kodierung der Gene zu den zwei kom-

plexeren Aufgaben bei der Lösung des Problems des Handlungsreisenden mit Genetischen Algorithmen. In ihrer einfachsten Form kann die Rekombination von zwei Individuen an folgendem Beispiel beschrieben werden:

Zwei Elternindividuen (Elternteil 1 und 2) bilden zwei Pfade aus jeweils 6 Teilstrecken in unterschiedlicher Reihenfolge, die mit den Buchstaben *A* bis *G* kodiert sind. Im Zuge der Rekombination werden beide Pfade an einer zufällig ausgewählten Position (im vorliegenden Beispiel zwischen der dritten und vierten Teilstrecke) in zwei Teile getrennt und rekombiniert. Die Rekombination erfolgt durch Austausch der Gensequenzen nach dem Schnitt unter den zwei Elternindividuen.

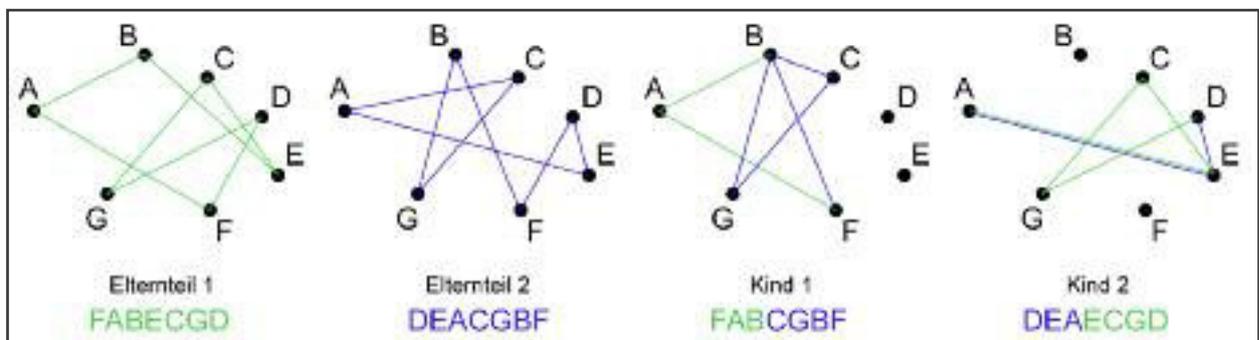


Abbildung 45: Beispiel einer Standard Rekombination in einem Genetischen Algorithmus. Die zwei Elternindividuen werden nach der dritten Teilstrecke durchtrennt und rekombiniert. Die Nachkommen sind für den Fall des Problems des Handlungsreisenden ungültig

Die einfache Definition des Individuums durch eine Sequenz von Knotenpunkten führt für den Fall des Problems des Handlungsreisenden zu ungültigen Nachkommen, da einerseits einige Knoten mehrfach (Kind 1 in Abb. 45) und andererseits einige Knoten überhaupt nicht in den Pfad eingebunden werden (Kind 2 in Abb. 45). Das TSP Programm definiert deshalb für den Schritt der Rekombination das Individuum als Sequenz von Kantenpaaren zu jedem Knoten. So werden beispielsweise für den Knoten *A* des Elternteils 1 aus obigem Beispiel die Kante *AB* zum Folgeknoten und die Kante *AF* zum vorhergehenden Knoten in einer Liste temporär gespeichert. Der Austausch der Gensequenzen (engl. crossover) gestaltet sich im TSP Programm komplizierter als allein durch Verknüpfung der durch Zeichenketten definierten Sequenzen. Der *crossover* Algorithmus übernimmt alle Kanten, die beide Eltern besitzen, und übergibt sie beiden Kindern (zum Beispiel die Kanten *CG* und *DF*). Danach entnimmt der Algorithmus für Kind 1 abwechselnd eine Kante von Elternteil 2 und danach von Elternteil 1. Für Kind 2 entnimmt der Algorithmus abwechselnd eine Kante, die Kind 1 nicht zugewiesen wurde, zuerst von Elternteil 1 und dann von Elternteil 2. Für beide Kinder besteht nach wie vor die Möglichkeit, dass anstatt eines gültigen, zusammenhängenden Pfades mehrere getrennte Pfade generiert werden. Die Kanten, die zu ungültigen Gensequenzen

führen, werden ausselektiert und durch Kanten zu zufällig selektierten Knoten ersetzt. Da die *crossover* Operation nur teilweise zufällig abläuft, entspricht sie einer Greedy-Heuristik.

Einstellen der Mutationsrate (Mutation in %): Durch die nach der Rekombination eingesetzten Mutation wird die Gensequenz einiger Nachkommen zufällig verändert. Im Zuge der Mutation wird die Position zweier zufällig ausgewählter Knoten eines Individuums in der Reihenfolge innerhalb der Sequenz ausgetauscht. Die Mutationsrate kann durch den Nutzer beliebig gesetzt werden und bestimmt, wie viel Prozent der Nachkommen einer Mutation unterzogen werden.

Einstellen des Startwertes des Zufallsgenerators (*Random Seed*): Der Startwert (engl. seed, Saatkorn) des deterministischen Zufallszahlengenerators ermöglicht die Reproduzierbarkeit der Berechnungsergebnisse. Dieser Parameter erleichtert vor allem die Fehlersuche während der Programmierung des TSP Algorithmus.

4.1.5 Berechnung von Zwischenpunkten

Der mit Hilfe des TSP Algorithmus ermittelte optimierte Flugpfad besteht nach wie vor aus der begrenzten Anzahl von Stützstellen, die aus den Clusterberechnungen hervorgegangen sind. Um einen Beobachtungsflug so realitätsnah wie möglich zu modellieren, werden in einem weiteren Programmteil zwischen den Stützstellen des Flugpfades Zwischenpunkte berechnet. Der Algorithmus dazu projiziert zunächst den Flugpfad auf das darunter liegende Raster und schneidet das Gitternetz des Rasters mit der Projektionsgeraden. Der Mittelpunkt zwischen zwei aufeinander folgenden Schnittpunkten wird in weiterer Folge als Zwischenpunkt für den Flugpfad verwendet. Die Höhe des Zwischenpunktes ergibt sich aus der Höheninformation der darunter liegenden Rasterzelle. Liegt der Schnittpunkt exakt auf einem Kreuzungspunkt des Gitternetzes, wird dieser Punkt direkt als Zwischenpunkt für den Flugpfad und als Höhe der Höhenwert einer der vier beteiligten Rasterzellen verwendet.

Die im Zuge eines Waldbranddetektionsfluges kontinuierlich stattfindende Beobachtung des Geländes wird somit durch Diskretisierung des Flugpfades mit anschließender Sichtbarkeitsanalyse für jede Flugpfadstützstelle modelliert.

4.2 Flight Altitude Optimizer (FAO)

4.2.1 Grundlegendes

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben unterliegt die Luftfahrt einer Reihe meteorologischer, flugtechnischer und verkehrsrechtlicher Restriktionen. Das Ausarbeiten der Flughöhen für die einzelnen Etappen eines Fluges bildet einen wichtigen Punkt bei der Flugplanung. Zur Vereinfachung der Flughöhenberechnungen wird jede meteorologisch bedingte Restriktion ausgeblendet. Der Flugpfad und die gewählten Flughöhen eines Waldbranddetektionsfluges werden demnach unter dem Gesichtspunkt idealer meteorologischer Verhältnisse berechnet und optimiert. Verkehrsrechtliche Restriktionen, wie beispielsweise Einflugverbote in Luftsperrgebiete, Flugbeschränkungen und Flugwegrestriktionen innerhalb von Kontrollzonen von Flughäfen und Flugplätzen oder einzuhaltenen Mindestflughöhen, die nur bei Start oder Landung unterschritten werden dürfen, müssen in der Regel berücksichtigt werden, können aber durch Ausnahmeregelungen für Überwachungsflüge vorübergehend geändert oder außer Kraft gesetzt werden.

4.2.2 Berechnung der Flughöhen

Das für die Flughöhenberechnung im Rahmen dieser Diplomarbeit geschriebene Flughöhenoptimierungsprogramm FAO (flight altitude optimizer) benötigt für die Höhenberechnungen das Geländemodell des Untersuchungsgebietes sowie die x- und y Koordinaten des optimierten Flugpfades. Angestrebt wird ein Flugverlauf mit möglichst wenigen Höhenänderungen beziehungsweise mit möglichst langen Flugstreckenabschnitten gleicher Höhe. Angestrebt wird zudem ein Höhenprofil, das möglichst mit der vom Nutzer des Programms eingegebenen Standardreiseflughöhe über Grund übereinstimmt.

Im ersten Schritt der Flughöhenberechnung werden die Wegpunkte des Flugpfades zu einzelnen Streckenabschnitten gleicher Höhe zusammengefasst. In einem iterativen Verfahren werden die Streckenabschnitte so lange vertikal verschoben, bis der höhenmäßige Verlauf des Flugpfades allen vorgesehenen Randbedingungen entspricht. Tendenziell werden dabei die Streckenabschnitte vertikal nach unten in den Flugraum zwischen der Standardreiseflughöhe und 2000 Fuß über Grund verschoben. Die Randbedingungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Mindestflughöhe muss aus Sicherheitsgründen in jeder Phase des Fluges eingehalten werden. Die Mindestflughöhe beträgt 1.000 Fuß über dem höchsten Hindernis in einem Umkreis von 600 Metern (siehe Kapitel 2.4.2).
- Als Standardreiseflughöhe (Beobachtungshöhe) über Grund kann durch den Nutzer des

Programms ein Wert zwischen 2000 und 5000 Fuß gewählt werden (Davis, 1959), wobei, in Anlehnung an die in der Praxis üblicherweise verwendete Höhenstaffelung von Flugflächen in 500 Fuß Schritten (International Civil Aviation Organization, 2005), diese Schrittweite auch für das FAO Programm übernommen wird. Demnach sind folgende Standardreise Flughöhen möglich: 2000 Fuß, 2500 Fuß, 3000 Fuß, 3500 Fuß, 4000 Fuß, 4500 Fuß und 5000 Fuß.

- Die Anzahl der Höhenänderungen wird gering gehalten. Hauptaugenmerk aller Beobachter in einem Luftfahrzeug ist die konzentrierte Beobachtung des überflogenen Geländes und die Suche nach kleindimensionierten Rauchkörpern. Eine zu hohe Anzahl an Höhen- wie auch Richtungsänderungen im Lauf eines Beobachtungsfluges unterbricht die Beobachtungsroutine und geht damit zu Lasten der Konzentration und der Zeit, die für die Beobachtungen zur Verfügung steht. In kontrolliertem Luftraum muss zudem jede Höhenänderung durch einen Fluglotsen über Flugsprechfunk genehmigt werden. Besonders in stark frequentierten Flugräumen ist die Kommunikationsdichte zwischen der Flugverkehrskontrollstelle und allen beteiligten Luftfahrzeugen oftmals sehr hoch. Je weniger die Flugbesatzung mit Cockpitarbeit und Kommunikation beschäftigt ist, desto effektiver kann sie sich der Waldbranddetektion widmen.

- Ein Unterschreiten der minimalen Standardflughöhe von 2000 Fuß über Grund ist für einzelne Streckenabschnitte eines Flugpfades möglich, sofern der Abschnitt eine durch den Nutzer bestimmte Maximallänge nicht überschreitet. Dazu kann er einen Zeitwert in Minuten eingeben, der mit der wahren Fluggeschwindigkeit (engl. true airspeed – TAS) multipliziert wird und die Maximallänge ergibt. Ein Unterschreiten der minimalen Standardflughöhe ist für Flugabschnitte vorgesehen, bei der steilere Kämme von Höhenzügen überflogen werden, die sich in etwa quer zur Flugrichtung ausdehnen beziehungsweise in Flugrichtung entsprechend schmal dimensioniert sind. Damit entfällt in geeigneten Fällen die Notwendigkeit eines Steigfluges mit kurz darauf folgendem Sinkflug zurück auf ein tieferes Flugniveau.

- Durch Eingabe einer zweiten Flugzeit kann der Nutzer die Minimallänge von Streckenabschnitten des Flugpfades bestimmen, ab der eine vertikale Verschiebung des Abschnittes im Zuge des Iterationsprozesses nicht mehr möglich ist. Diese Bedingung soll verhindern, dass der berechnete Höhenverlauf des Flugpfades zu sehr von der anvisierten Reise Flughöhe abweicht.

- Direkt aufeinander folgende Streckenabschnitte, die eine unterschiedlicher Flughöhe aufweisen, werden durch Steig- oder Sinkflugstreckenabschnitte miteinander verbunden. Die Berechnung der Längen aller Streckenabschnitte und aller Höhenänderungen basieren auf den reellen Leistungsdaten eines Musterluftfahrzeuges. Als solches ist in dem Programm ein Luftfahrzeug des

Typs Cessna 152 (C152) implementiert. Die C152 ist ein populäres zweisitziges Kleinflugzeug, das speziell für die Schulung entwickelt wurde und weltweit im Einsatz ist (http://de.wikipedia.org/wiki/Cessna_150/152). Als Hochdecker ist die C152 gut für Überwachungsflüge geeignet.

In Tabelle 7 sind die Leistungsdaten (bezogen auf die internationalen Standardatmosphäre

Weight [LBS]	Pressure Altitude [FT]	Temp [°C]	Climb Speed [KIAS]	Rate of Climb [FPM]	From Sea Level		
					Time [Min]	Fuel Used [Gallons]	Distance [NM]
1670	S.L.	15	67	715	0	0	0
	1.000	13	66	675	1	0,2	2
	2.000	11	66	630	3	0,4	3
	3.000	9	65	590	5	0,7	5
	4.000	7	65	550	6	0,9	7
	5.000	5	64	505	8	1,2	9
	6.000	3	63	465	10	1,4	12
	7.000	1	63	425	13	1,7	14
	8.000	-1	62	380	15	2,0	17
	9.000	-3	62	340	18	2,3	21
	10.000	-5	61	300	21	2,6	25
	11.000	-7	61	255	25	3,0	29
	12.000	-9	60	215	29	3,4	34

Tabelle 7: Zeit (Time), benötigter Treibstoff (Fuel Used) und zurückgelegte Distanz (Distance) im Steigflug für ein Luftfahrzeug des Typs Cessna 152 (Cessna Aircraft Company, 1979)

ISA (Englische Wikipedia, International Standard Atmosphere) einer C152 für den Steigflug dargestellt. Die Tabelle ist dem C152 Flughandbuch (Cessna Aircraft Company, 1979) entnommen. Die Werte dieser Tabelle bilden die Grundlage der Zeit- und Distanzrechnungen für die Berechnung der Streckenabschnittslängen im Steigflug. Die Tabelle zeigt für eine Cessna 152 mit 1.670 Pfund (LBS) Gesamtstartgewicht wichtige Leistungsdaten sowie die Zeit, den benötigten Treibstoff und die im Steigflug zurückgelegte Distanz,

um von einer Druckhöhe zur nächsten zu gelangen. Die Druckhöhe zeigt die Höhe über MSL (über der Standardbezugsdruckfläche von 1013,2 hPa) an. Sie wird in der Luftfahrt oft als Flugfläche angegeben. Steigflüge mit Kleinflugzeugen werden in der Regel mit maximaler Motorleistung und damit mit maximaler Motordrehzahl geflogen.

Im FAO Programm sind die Druckhöhen als Druckklassen implementiert. Druckhöhenklasse 1 bezieht sich zum Beispiel auf den Bereich von S.L. (engl. Sea level oder 0 Fuß) bis 1.000 Fuß. Als Vereinfachung wird im Programm eine lineare Abnahme der Steiggeschwindigkeit (engl. climb speed) und der Steigrate (engl. rate of climb) innerhalb der Druckhöhenklasse angenommen. Ebenso werden die Werte für die Flugzeit und die Flugdistanz über eine lineare Funktion berechnet.

Die in Tabelle 7 angegebenen Geschwindigkeitswerte beziehen sich auf die im Luftfahrzeug

auf dem Geschwindigkeitsmesser angezeigte Fluggeschwindigkeit in Knoten (engl. indicated airspeed – KIAS). Die angezeigte Fluggeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit eines Luftfahrzeugs relativ zur umgebenden Luftmasse. Für die Berechnung der Streckenabschnittslängen im Steig- und im Sinkflug muss die Angezeigte Fluggeschwindigkeit in die Wahre Fluggeschwindigkeit (engl. true airspeed – TAS) umgerechnet werden. Dazu existiert eine einfache Faustformel: durch Erhö-

Weight [LBS]	Pressure Altitude [FT]	RPM	Standard Temperature		
			% BHP	KTAS	GPH
1670	2.000	2400	75	101	6,1
		2300	66	98	5,4
		2200	59	91	4,8
		2100	53	86	4,3
		2000	47	80	3,9
	4.000	2450	75	103	6,1
		2400	71	101	5,7
		2300	63	95	5,1
		2200	56	90	4,6
		2100	51	85	4,2
		2000	46	80	3,8
	6.000	2500	75	105	6,1
		2400	67	100	5,4
		2300	60	95	4,9
		2200	54	89	4,4
2100		49	84	4,0	
2000		45	79	3,7	

Tabelle 8: Triebwerksleistungseinstellung (Break Horse Power – BHP), Wahre Fluggeschwindigkeit in Knoten (True Airspeed – KTAS) und Treibstoffverbrauch pro Stunde (Gallons per Hour – GPH) für unterschiedliche Motordrehzahlen (Round per Minute – RPM) und Druckhöhen für ein Luftfahrzeug des Typs Cessna 152 (Cessna Aircraft Company, 1979)

verschiedenen Druckhöhen und für verschiedene Leistungseinstellungen des Motors.

Für den Reiseflug mit Kleinflugzeugen wird in der Praxis ein bestimmter Wert für die Motordrehzahl eingestellt. Je nach geflogener Flughöhe resultiert daraus eine durchschnittliche Reisegeschwindigkeit, die aus Tabelle 8 abgegriffen werden kann. Für den Sinkflug wird ein einheitlicher Geschwindigkeitswert angenommen. Dies entspricht ebenfalls der gängigen Flugpraxis in Kleinflugzeugen. Durch Variation der Motorleistung wird bei gleich bleibender Geschwindigkeit die gewünschte Sinkrate ermöglicht. Da es sich auch in diesem Fall um die vom Geschwindigkeitsmesser des Luftfahrzeuges angezeigte Fluggeschwindigkeit handelt, wird diese ebenfalls über die zuvor beschriebene Faustformel in die wahre Fluggeschwindigkeit umgerechnet.

hung der Angezeigten Fluggeschwindigkeit um 2 % pro 1.000 Fuß Höhenänderung erhält man in erster Näherung die wahre Fluggeschwindigkeit (Deutsche Wikipedia, Fluggeschwindigkeit). Diese Faustformel gilt für Kleinflugzeuge und ist so im Programm implementiert.

In Tabelle 8 sind die Leistungsdaten (bezogen auf die internationalen Standardatmosphäre ISA (Englische Wikipedia, International Standard Atmosphere) einer C152 für den Reiseflug dargestellt. Die Tabelle ist als Auszug dem C152 Flughandbuch (Cessna Aircraft Company, 1979) entnommen. Die Werte dieser Tabelle bilden die Grundlage der Zeit- und Distanzrechnungen für die Berechnung der Streckenabschnittslängen im Reiseflug. Die Tabelle zeigt für eine Cessna 152 mit 1.670 LBS Gesamtstartgewicht die wahre Fluggeschwindigkeit und den Treibstoffverbrauch in ver-

Als Ergebnis der Flughöhenberechnungen in dem FAO Programm wird eine Datei mit den Koordinaten der Wegpunkte und den Flughöhenwerten in Meter über MSL ausgegeben. Diese wird dem FPO Programm zur finalen Berechnung der Sichtbarkeiten zugeführt.

5 GIS Vorarbeiten und Sichtbarkeitsanalysen

5.1 Grundlegendes

Mit einer Überwachungsfläche von 7643,29 km² für beide Fluggebiete und einer angepeilten Flugfadlänge von 120 nautische Meilen ist es nicht möglich, diese Fläche durch zwei Einzelflüge lückenlos zu überwachen. Mit der Berücksichtigung der Waldbrandrisikogebiete reduziert sich die Überwachungsfläche signifikant, denn nur zu diesen Gebieten muss im Laufe eines Überwachungsfluges Sichtkontakt möglich sein. Eine weitere Verringerung der Überwachungsfläche erfolgt durch Abzug aller Flächen, die grundsätzlich allein durch terrestrische Überwachungsmethoden oder durch Beobachtungen aus der Bevölkerung abgedeckt werden können.

Die Flächenberechnungen werden in einem GIS durchgeführt. Dazu werden die Daten der portugiesischen Feuerwachtürme sowie die portugiesischen Zensusdaten im GIS zusammengetragen und mit den Fluggebieten sowie den CRIF und ICRIF Waldbrandrisikobereichen verschnitten. Die Ergebnisse der GIS Operationen werden als Eingangsdatensätze für die anschließenden Optimierungsberechnungen mit dem FPO Programm verwendet. Den auf Sichtbarkeitsanalysen basierenden Clusterberechnungen folgt die Berechnung optimierter Flugpfade mit Hilfe der TSP Algorithmen und die Datenaufbereitung für das FAO Programm. Nach Höhenanpassung der einzelnen Flugwegpunkte im FAO Programm erfolgt wiederum im FPO Programm die endgültige Berechnung der Sichtbarkeiten für jeden Flugwegpunkt und der Export der Endergebnisse.

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Berechnungsschritte von den GIS Vorarbeiten bis hin zu den finalen Sichtbarkeitsanalysen näher erläutert.

5.2 GIS Vorarbeiten

5.2.1 Datenimport und Datenverarbeitung

Als Geographisches Informationssystem kam das amerikanische GIS Manifold® System der Firma manifold.net in der Release Version 8 zum Einsatz. Dieses kostengünstige System bietet eine umfangreiche GIS Funktionalität an, unterstützt Microsoft Standards und kann im Gegensatz zu anderen Systemen alle Funktionen unter einer einheitlichen Benutzeroberfläche aufrufen.

Als Koordinatensystem wurde für das GIS Projekt das UTM-System (Universal Transverse Mercator) Zone 29N mit dem geodätischen Referenzsystem WGS 84 (World Geodetic System

1984) festgelegt.

Wie in Kapitel 3.1.2 erläutert, erfolgte im ersten Schritt der GIS Vorarbeiten die Ausweisung der Fluggebiete durch Berechnung von Voronoi Polygonen um die Positionen der in Betrieb befindlichen Flugplätze Südportugals. Um die zwei südlichsten Polygone, die als Fluggebiete ausgesucht wurden, wurde jeweils ein Puffer von 22,4 km berechnet. Dieser Wert ergibt sich aus der Verdopplung der Feuerdetektionsreichweite aus dem Flugzeug von 11.200 m. Nach Berechnung von zwei minimal umgebender Rechtecke um beide Pufferzonen und anschließender Anpassung an die Rasterauflösung von 90 m ergaben sich die endgültigen Grenzen der zwei Teilbereiche des Untersuchungsgebietes sowie das Gesamtuntersuchungsgebiet selber.

Im nächsten Schritt wurden die SRTM Höhendaten als GeoTIFF Graphik in das GIS importiert und über mehrere Zwischenschritte von einem Manifold Surface Layer in einen Punktlayer transformiert. Nach dem Import der ICRIF Daten als Tabellen und der CRIF Daten im ESRI Shape Format wurden die Tabellen mit Hilfe des Voronoi Operators in zwei Polygonlayer umgewandelt. Mit den direkt verwendbaren Daten im ESRI Shape Format standen drei Polygonlayer als Basislayer für die Flugfadberechnung in drei Variationen bereit.

Die Positionen der Feuerwachtürme wurden als Punkte in einem Punktlayer manuell editiert und mit dem der Beobachtungshöhe attribuiert. Die Beobachtungshöhe setzt sich dabei aus der Geländehöhe, der Plattformhöhe und der Augenhöhe (1,6 m) eines durchschnittlich großen Beobachters zusammen (Costa, 2009). Nach dem Export des Punktlayers als Textdatei wurden für die 22 Feuerwachtürme mit Hilfe des FPO Programms Sichtbarkeitsanalysen gerechnet. Für die Definition des Sichtbereiches wurde als Feuerdetektionsreichweite ein Radius von 9.800 m gewählt und für die Modellierung der Sichtbarkeit von Rauchsäulen ein Offsetwert von 10 m (siehe dazu Kapitel 2.2.2 und 3.1.3.4). Die Erdkrümmung und die terrestrische Refraktion wurden für alle Sichtbarkeitsanalysen berücksichtigt. Die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen wurden als Tabelle in das GIS importiert und wiederum mit Hilfe des Voronoi Operators in einen Polygonlayer transformiert. Dieser Layer enthält Polygonflächen, die von mindestens einem der 22 Feuerwachtürme aus sichtbar sind.

Während Feuerdetektionsreichweiten von Feuerwachtürmen durch Definition von standardisierter Beobachtungshöhe, Sichtweite, Beobachtungsdauer und Beobachtungsmethodik noch relativ leicht quantifizierbar sind, ergibt sich für die Detektion von Brandereignissen durch die Bevölkerung keine klar eingegrenzte Parametrisierung. Zu keinem Zeitpunkt ist bekannt, an welcher Position sich ein Beobachter befindet oder mit welcher Aufmerksamkeit er die Umgebung beob-

achtet. In diesem Zusammenhang sind daher lediglich qualitative Aussagen möglich.

Um dennoch Gebiete ausweisen zu können, für die aufgrund von Brandbeobachtungen aus der Bevölkerung auf den Einsatz weiterer Überwachungssysteme verzichtet werden kann, wurde auf die Ergebnisse der FIRE PARADOX Umfrage (Rego et al., 2012) zurückgegriffen. Nach dieser Studie spielt die Bevölkerungsdichte einer Region einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der detektierten Waldbrände. Danach erfolgten von 2001 bis 2007 über 88 % aller Sichtungen von portugiesischen Waldbränden in Gebieten mit einer Bevölkerungsdichte von mehr als 100 Personen pro km². Dieser Prozentsatz erhöhte sich auf bis zu 95 % für Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte von mehr als 500 Personen pro km². Der Grenzwert von 100 Personen pro km² wird damit als Kriterium für die Ausweisung von Gebieten verwendet, für die auf eine Flugüberwachung verzichtet werden kann.

Im GIS erfolgte dazu die Verknüpfung der geokodierten portugiesischen Zensusdaten der Volkszählung von 2011 mit den Polygonen der portugiesischen Verwaltungssektionen der Regionen Alentejo und Algarve. Nach Eliminierung aller Polygone, die eine Bevölkerungsdichte von weniger als 100 Personen pro km² repräsentieren, war der letzte Polygonlayer zur Reduzierung der luftgestützten Überwachungsfläche fertig gestellt.

5.2.2 Datenverschneidung

Im Zuge der Datenverschneidung (engl. overlay) standen für die zwei Fluggebiete jeweils ein Satz von 6 Layern zur Verfügung:

1 Digitales Höhenmodell als Punktlayer (Attribut: Höhe in m über MSL)

3 Waldbrandrisikokarten als Polygonlayer (Attribut: Brandrisikoindex in drei Klassen)

1 Sichtbarkeitskarte von 22 Feuerwachtürmen als Polygonlayer (Attribut: Sichtbarkeit)

1 Bevölkerungsdichtekarte als Polygonlayer (Attribut: Bevölkerungsdichte in Personen/km²)

Durch Verschnitt der Höhendaten mit den Waldbrandrisikokarten wurde dem Höhenmodell ein viertes Attribut mit dem Brandrisikoindexwert zugeteilt. Der Brandrisikoindexattributwert wurde anschließend für alle Punkte des Höhenmodells Null gesetzt, die sich lagemäßig innerhalb der Polygonflächen der Sichtbarkeitskarte der Feuerwachtürme oder der Bevölkerungsdichtekarte befanden. Pro Fluggebiet wurden als Ergebnis drei Textdateien (eine basierend auf der CRIF 2011 Waldbrandrisikokarte und zwei basierend auf den ICRIF Waldbrandrisikokarten vom 11.08.2012 und vom 16.08.2012) für die Berechnung von mehreren Flugpfadvarianten exportiert und dem FPO Programm zur weiteren Verarbeitung zugeführt.

5.3 Clusterberechnungen

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird als durchschnittliche Beobachtungshöhe für alle Sichtbarkeitsanalysen ein Wert von 3000 Fuß über Grund ausgewählt. Nach Brown und Davis (1973) werden Beobachtungsflüge häufig in Höhen zwischen 2000 und 3000 Fuß über Grund durchgeführt und übersteigen selten die 5000 Fuß Marke. Mit einer angestrebten Beobachtungshöhe von 3000 Fuß über Grund wird diesen Erfahrungswerten Rechnung getragen. Zudem werden in weiterer Folge (im FAO Programm) Flughöhen berechnet, die sich nach Möglichkeit vorzugsweise in dem Bereich zwischen 2000 und 3000 Fuß über Grund bewegen.

Im Rahmen der Clusterberechnungen wird die Beobachtungshöhe als Wert über MSL definiert und angewendet, da eine Höhenanpassung zu diesem Zeitpunkt nicht sinnvoll ist. Erst mit der Kenntnis des kompletten Flugpfades, der frühestens nach den TSP Berechnungen bekannt ist, können die einzelnen Flugphasen (Steigflug, Reiseflug, Sinkflug) berechnet und damit eine Höhenanpassung für die abschließenden Sichtbarkeitsanalysen durchgeführt werden. Die Anwendung der Beobachtungshöhe als Wert über MSL hat im Vergleich zu einer höhenangepassten Beobachtungsposition zur Folge, dass die Sichtbarkeit der Geländepunkte mit zunehmender Höhe des Geländes abnimmt. Damit wird indirekt die Clusterbildung beeinflusst, da diese tendenziell jene Flugpositionen als Zentrum eines Clusters berechnet, von denen aus die meisten Geländepunkte sichtbar sind. Es erhöht sich somit die Wahrscheinlichkeit, dass vermehrt Wegpunkte über niedrig gelegenen Gelände als Clustermittelpunkte berechnet werden.

Die Verwendung der Beobachtungshöhe als Wert über MSL hat aber auch zur Folge, dass sich die Beobachtungspositionen nach der Höhenanpassungen im FAO Programm tendenziell auf einem höheren Niveau befinden als während der Clusterberechnungen. Damit steigen auch die Chancen zu gleicher oder besserer Sicht auf das umliegende Gelände nach der Höhenanpassung. Der Wert von 3000 Fuß liegt außerdem knapp über der höchsten Erhebung des Untersuchungsgebietes, dem Foja de Monchique mit 2.959 Fuß. Damit ist gewährleistet, dass die Sichtbarkeitsanalysen für jeden Punkt gerechnet werden können.

Für alle Clusterberechnungen wurden für die Branddetektionssichtweite ein Wert von 11.200 m und für den Offset ein Wert von 10 m verwendet (siehe dazu Kapitel 2.2.2 und 3.1.2). Die Erdkrümmung und die terrestrische Refraktion wurden für alle Sichtbarkeitsanalysen berücksichtigt.

Aufgrund limitierter Rechnerkapazität war es nicht möglich, innerhalb eines Clusterberechnungszyklus jede Zelle des *footprints* für die Clusterberechnung zu verwenden. Aus der Gesamt-

menge von 48.121 Zellen, die durch den *footprint2* abgedeckt werden (siehe Kapitel 4.1.2), wurden für das CRIF 2011 Waldbrandszenario (Grupo CRISE, 1998-2011a) (siehe Abb. 15) fünf unterschiedliche Programmeinstellungen (jede 50., jede 75., jede 100. Zelle, jede 125. Zelle und jede 150. Zelle des *footprint2*) zur Selektion der Teilmengen der *footprint* Zellen verwendet. Für zwei Fluggebiete (LPPM und LPFR) und 5 Einstellungen der *footprint2* Teilmengen wurden insgesamt 10 CRIF 2011 Clustervarianten berechnet, die sich im Ergebnis durch eine verschiedene Anzahl an Clusterpunkten und durch verschiedene räumliche Verteilung unterscheiden. Die Clusterberechnungen für die zwei weiteren Waldbrandrisikoszenarien (ICRIF 11.08.2012 und ICRIF 16.08.2012) erfolgten erst nach den TSP Kalkulationen der 10 CRIF 2011 Clustervarianten.

5.4 TSP Berechnungen

Das FPO Programm erlaubt zur Berechnung optimierter Pfade die Eingabe von 8 Parametern:

- Flight Path Length
- Population Size
- Maximum Generations
- Mutation
- Group Size
- Nearby Waypoint Odds
- Number of Nearby Waypoints
- Random Seed

Mit Ausnahme der Flugpfadlänge als Abbruchkriterium wurden die restlichen Parameter zunächst willkürlich gewählt. Im Laufe der vielen Optimierungsversuche kristallisierte sich heraus, dass höhere Werte der Populationsgröße oft zu besseren Optimierungsergebnissen führten. Allerdings steigt mit der Größe der Population gleichzeitig auch der Arbeitsspeicherverbrauch. Der Populationsgröße sind demnach nach oben hin Grenzen gesetzt.

Für die Flugpfadlänge wurden für alle Berechnungsvarianten die Werte 120 und 270 nautische Meilen eingesetzt. Eine Flugroutenlänge von 270 Nautischen Meilen entspricht bei einer durchschnittlichen Fluggeschwindigkeit von 90 Knoten ca. drei Stunden Flugzeit. In der ICAO Konvention über die internationale Zivilluftfahrtorganisation (Chicago Konvention) sind 18 Anhänge enthalten, in der Standards und Empfehlungen (Standards and Recommended Practices – SARPs) der internationalen Zivilluftfahrt beschrieben werden (International Civil Aviation Organization,

2008). Im Annex 6, Teil II, Absatz 2.2.3.6 ("Fuel and oil supply") der SARPs empfiehlt die ICAO für Sichtflüge unter Tags vor Abflug mindestens jene Treibstoffmenge an Bord zu haben, die einen Flug in normaler Reiseflughöhe vom Startflugplatz bis zum Zielflugplatz inklusive eines 30 minütigen Ausweichfluges erlaubt. Gemäß des Flughandbuches einer Cessna 152 ist bei Vollbetankung der Standard- und Zusatztanks (37,5 US Gallonen) mit einer Leistungseinstellung von 75% in einer Höhe von 8.000 Fuß eine maximale Flugdauer von 5,2 Stunden möglich. Damit liegt ein dreistündiger Überwachungsflug mit einer Sicherheitsreserve von 30 Minuten deutlich unterhalb der Limitierung von 5,2 Stunden. Mit der Berechnung von optimierten Flugpfaden für die sehr lange Flugdauer von drei Stunden soll in erster Linie festgestellt werden, ob die zwei Fluggebiete überhaupt mit Hilfe eines Kleinflugzeuges der Cessna 152 Klasse lückenlos überwachbar sind. Demgegenüber wird mit der Wahl der maximalen Flugroutenlänge von 120 nautischen Meilen ein Wert verwendet, der jenem der in der Realität geflogenen Referenzflugüberwachungsroute 9 (siehe Kapitel 1.2.4) entspricht.

Für jede der 10 Clustervarianten des CRIF 2011 Waldbrandrisikoszenario wurden für eine maximale Flugroutenlänge von 270 nautischen Meilen 10 Optimierungsberechnungen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen für den genetischen Algorithmus angestoßen. Aus den 100 Ergebnissen wurde für jedes Fluggebiet ein optimierter Flugpfad ausgesucht, der bei geringster Anzahl an Clusterpunkten (Wegpunkten) die kürzeste Routenlänge auswies. Die Parametereinstellungen, mit der diese zwei optimierten Flugpfade ermittelt wurden, wurden sowohl für die Flugroutenberechnungen der zwei weiteren Waldbrandrisikoszenarien (ICRIF 11.08.2012 und ICRIF 16.08.2012) als auch für die Berechnung der CRIF 2011 Variante mit einer maximalen Flugroutenlänge von 120 nautischen Meilen übernommen. Aus den insgesamt 110 TSP Berechnungen ergaben sich damit 12 optimierte Flugrouten (2 Flugzonen (LPPM und LPFR) x 2 maximale Pfadlängen (120 und 270 nautische Meilen) x 3 Waldbrandrisikoszenarien (CRIF 2011, ICRIF 11.08.2012 und ICRIF 16.08.2012).

Die Ergebnisse der Berechnungen sind überblicksmäßig in Tabelle 9 auf der folgenden Seite und im Detail in den Tabellen 12 bis 15 im Anhang 9.2 zusammengefasst. Abbildung 48 zeigt dazu als Beispiel das Ergebnis für die Flugpfade LPPM-270NM-CRIF2011 und LPFR-270NM-CRIF2011.

Fluggebiet	Waldbrandrisikoszenarium	Anzahl der berücksichtigten footprint2 Zellen	Maximale Pfadlänge [NM]	Anzahl der Clusterzellen	Pfadlänge * [m]
LPPM	CRIF 2011	jede 100. Zelle	270	83	466.324
	CRIF 2011	jede 100. Zelle	120	31	220.636
	ICRIF vom 11.08.2012	jede 100. Zelle	270	49	395.961
	ICRIF vom 11.08.2012	jede 100. Zelle	120	21	199.509
	ICRIF vom 16.08.2012	jede 100. Zelle	270	14	191.086
	ICRIF vom 16.08.2012	jede 100. Zelle	120	14	191.086
LPFR	CRIF 2011	jede 75. Zelle	270	65	385.766
	CRIF 2011	jede 75. Zelle	120	31	220.289
	ICRIF vom 11.08.2012	jede 75. Zelle	270	54	364.637
	ICRIF vom 11.08.2012	jede 75. Zelle	120	27	220.777
	ICRIF vom 16.08.2012	jede 75. Zelle	270	23	217.027
	ICRIF vom 16.08.2012	jede 75. Zelle	120	23	217.027

Tabelle 9: Teilauszug der Einstellungen und Resultate der Cluster- und TSP Berechnungen für drei unterschiedliche Waldbrandrisikoszenarien (CRIF 2011, ICRIF 11.08.2012 und ICRIF 16.08.2012)

* Die in der Tabelle angegebenen Werte der Flugpfadlänge beziehen sich auf die horizontalen Distanzen zwischen den Wegpunkten

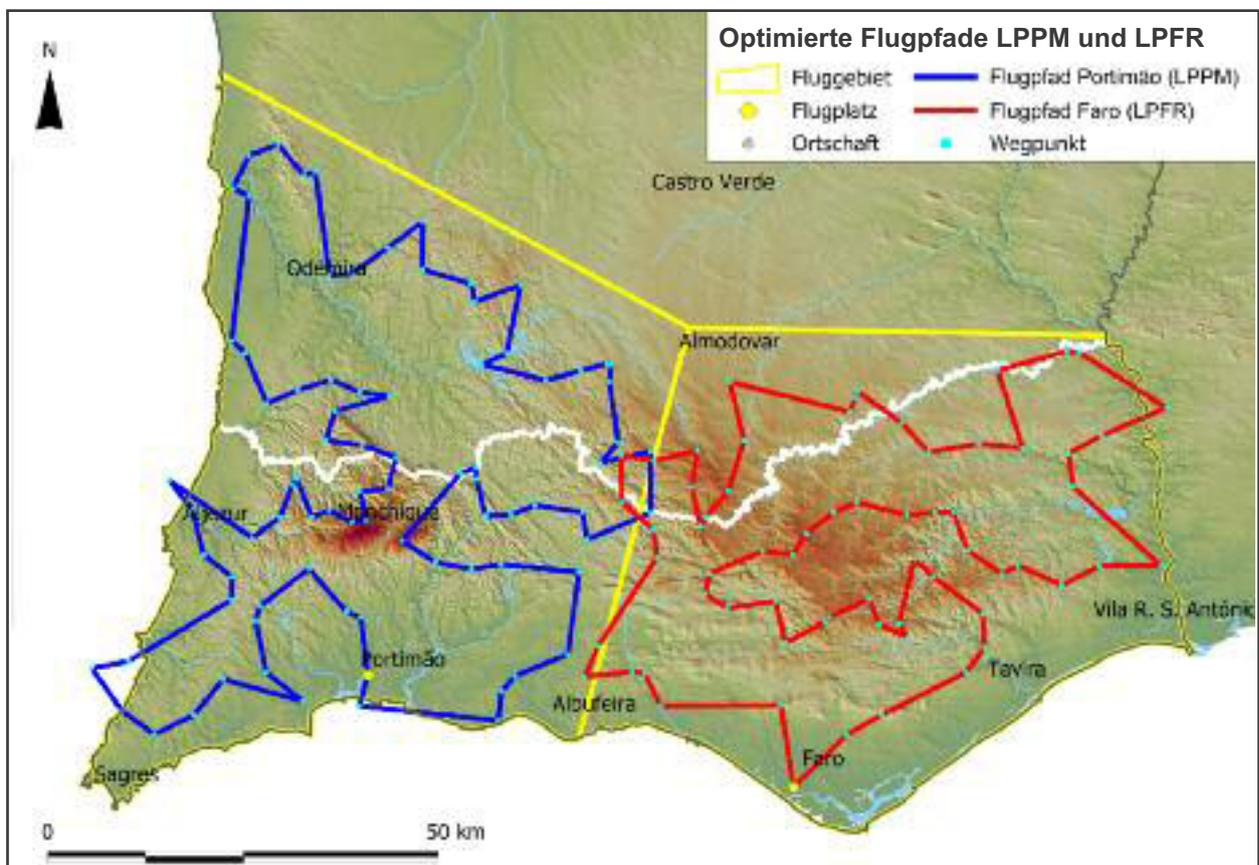


Abbildung 46: Finale Flugroute LPPM-270NM-CRIF (blauer Pfad) und LPFR-270NM-CRIF (roter Pfad). Die zwei Flougrouten haben theoretischen Charakter und werden so in der Praxis kaum abgeflogen

5.5 Zwischenpunktberechnungen, Höhenanpassungen und finale Sichtbarkeitsanalysen

Gemäß der in Kapitel 4.1.5 beschriebenen Methodik wurden für alle 12 Flugrouten zwischen aufeinander folgenden Clustermittelpunkten Zwischenwegpunkte gerechnet. Die längste der 12 Flugrouten besitzt damit 6.406 Wegpunkte (exklusive der Flugplatzposition), für die anschließend jeweils eine Sichtbarkeitsanalyse durchgeführt wird. Die kürzeste Flugroute besitzt immerhin 2.666 Wegpunkte.

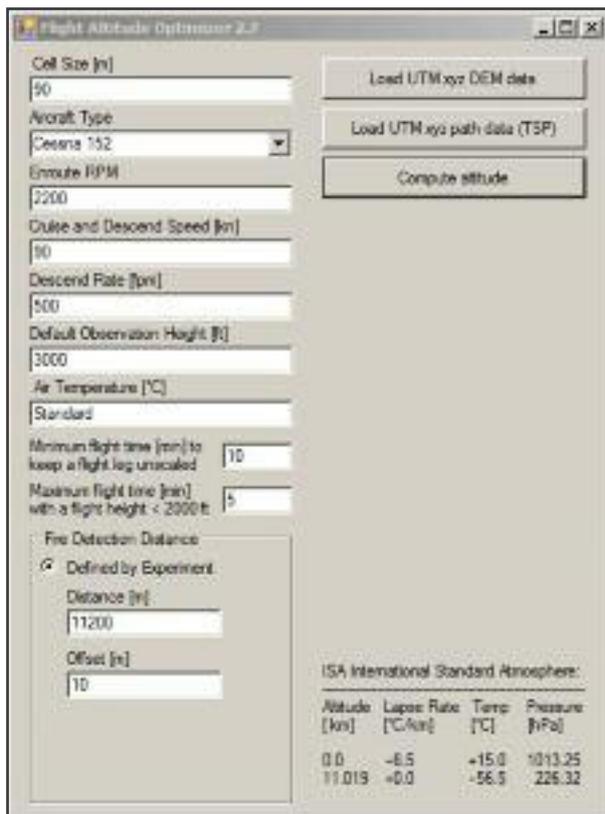


Abbildung 47: Programmeinstellungen für die Berechnung der Flughöhen

Die Zeitwerte für die Berechnung maximaler und minimaler Streckenabschnittslängen (siehe dazu Kapitel 4.2.1) wurden willkürlich gewählt. Der Wert für die durchschnittliche Beobachtungshöhe (engl. default observation height) wird im FAO Programm intern für alle Höhenberechnungen als Höhe über Grund verwendet. Jedem Wegpunkt des Flugpfades wird als Resultat ein Höhenwert zugewiesen, der unter Standardatmosphärenbedingungen für das verwendete Flugzeugmuster fliegbar ist. Die resultierenden Höhenwerte, die sich wieder auf MSL beziehen werden gemeinsam mit ihren Koordinaten als Textdatei exportiert und der finalen Sichtbarkeitsanalyse zugeführt. Abbildung

Die Zuweisung realistischer und fliegbarer Flughöhen erfolgte für jeden Flugwegpunkt im FAO Programm. Abbildung 46 zeigt die Programmeinstellungen, die ausnahmslos für alle Flughöhenberechnungen verwendet wurden. Als Motordrehzahl im Reiseflug wurde ein Wert von 2.200 Umdrehungen/Minute verwendet. Dies entspricht für den eingesetzten Flugzeugtyp für Flughöhen zwischen 2.000 und 6.000 Fuß einer Triebwerksleistungseinstellung von 54 bis 59 %. Das sind übliche Einstellungswerte für Kleinflugzeuge aus der Praxis, um treibstoffsparend und motorschonend zu fliegen. Die Fluggeschwindigkeit von 90 Knoten und die Sinkrate von 500 Fuß/Minute für das Sinken von einer Flughöhe zur nächst niedrigen Flughöhe sowie für den Anflug zur Landung entsprechen gängiger Praxis mit einem Luftfahrzeug des Typs Cessna 152.

Die Zeitwerte für die Berechnung maximaler und minimaler Streckenabschnittslängen (siehe dazu Kapitel 4.2.1) wurden willkürlich gewählt. Der Wert für die durchschnittliche Beobachtungshöhe (engl. default observation height) wird im FAO Programm intern für alle Höhenberechnungen als Höhe über Grund verwendet. Jedem Wegpunkt des Flugpfades wird als Resultat ein Höhenwert zugewiesen, der unter Standardatmosphärenbedingungen für das verwendete Flugzeugmuster fliegbar ist. Die resultierenden Höhenwerte, die sich wieder auf MSL beziehen werden gemeinsam mit ihren Koordinaten als Textdatei exportiert und der finalen Sichtbarkeitsanalyse zugeführt. Abbildung

47 zeigt als Beispiel einen Ausschnitt des Höhenprofils für den Flugpfad LPPM-270NM-CRIF.

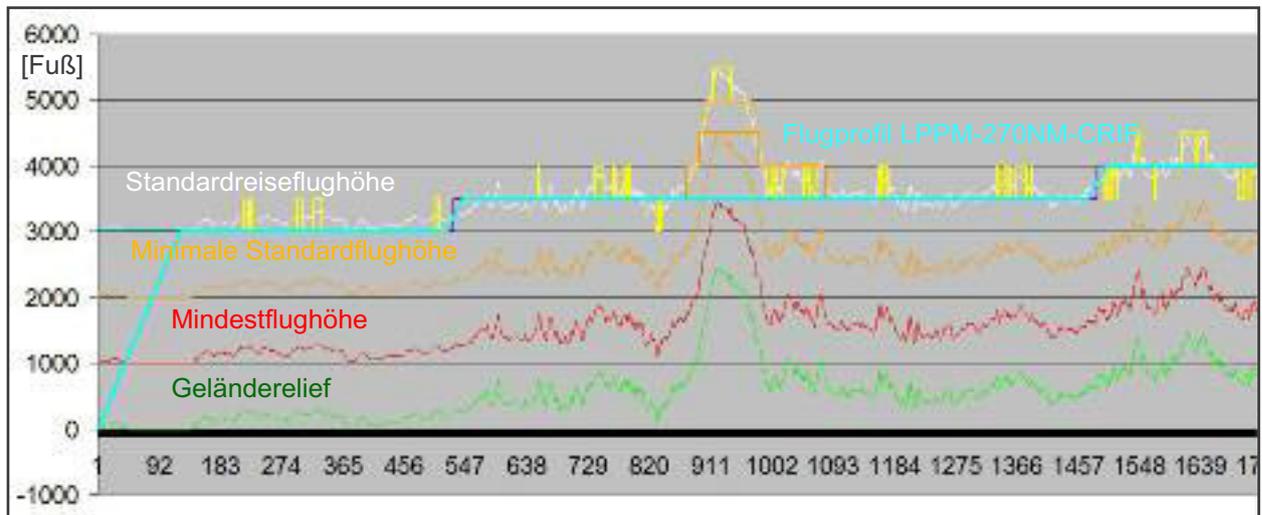


Abbildung 48: Höhenprofil (Ausschnitt) für den Flugpfad LPPM-270NM-CRIF. Abszisse: Nummerierung der Wegpunkte der Flugroute (1 = Poritvão Flugplatz LPPM). Ordinate: Höhe über MSL in Fuß

Die finalen Sichtbarkeitsberechnungen, die wiederum im FPO Programm durchgeführt werden, unterscheiden sich von den Sichtbarkeitsberechnungen im Zuge der Clusterbildung in zwei Punkten. Zum einen befinden sich die Flugwegpunkte nun in einer Flughöhe, die die topographisch bedingten Limitierungen berücksichtigt und der Flughöhenvorgabe (angestrebte Beobachtungshöhe über Grund) entspricht. Zum anderen werden jene Geländepunkte (Zellen), die im Zuge einer Sichtbarkeitsanalyse von einem beliebigen Flugwegpunkt aus sichtbar waren, von den weiteren Sichtbarkeitsanalysen der folgenden Flugwegpunkte ausgeschlossen. Damit wird erreicht, dass die Durchführung tausender Sichtbarkeitsanalysen in einem zeitlich akzeptablen Rahmen stattfinden.

Die Ergebnisse der finalen Sichtbarkeitsanalysen werden als Textdateien exportiert und einem GIS zur Bewertung zugeführt. Für 12 Flugrouten wurden damit 12 Sichtbarkeitskarten gerechnet.

5.6 Referenzflugüberwachungsroute und Routenvereinfachung

5.6.1 Referenzüberwachungsroute

Ein wesentlicher Punkt dieser Diplomarbeit ist der Versuch, eine Alternative zur aktuell im Rahmen der Überwachung waldbrandgefährdeter Gebiete Südportugals abgeflogenen Flugroute Nr. 9 (Germano et al., 2010) (siehe Abb. 13) zu finden. Um die Güte der Alternativrouten bewerten zu können, müssen auch für die Referenzflugroute Sichtbarkeitsberechnungen durchgeführt werden.

In Analogie zur Vorgehensweise bei den Sichtbarkeitsberechnungen der Alternativrouten wurden auch für die Referenzroute wie in Kapitel 5.5. beschrieben Zwischenpunktberechnungen,

Höhenanpassungen und finale Sichtbarkeitsanalysen durchgeführt. Aufgrund der vorgegebenen Routenführung mit 7 Wegpunkten ist eine Flugroutenoptimierung sinnlos. Die Länge der Referenzflugroute beträgt annähernd 120 nautische Meilen. Für die drei Waldbrandrisikoszenarien (ICRIF 11.08.2012, ICRIF 16.08.2012 und CRIF 2011) wurden weitere drei Sichtbarkeitskarten gerechnet.

5.6.2 Routenvereinfachung

In einem letzten Schritt wurde für die Flugpfade der Varianten ICRIF 11.08.2012 und CRIF 2011 der Flugpfadklasse 120 NM für beide Flugzonen eine Limitierung der maximalen Anzahl von Wegpunkten auf 10 Punkte eingeführt. Dieser Wert hat grundsätzlich willkürlichen Charakter, ist aber so gewählt, dass die Flugroute mit wenig Kursänderungen abgeflogen werden kann, aber dennoch den Verlauf des zugrunde liegenden Pfads möglichst gut abbildet (siehe Abb. 49). Das Resultat ist damit ein Flugpfad, der in der Realität durchaus abgeflogen werden kann und ein Sichtfeld hat, das dem des zugrunde liegenden und durch Optimierung berechneten Flugpfades in weiten Bereichen ähnlich ist.

Für zwei Waldbrandrisikoszenarien (ICRIF 11.08.2012 und CRIF 2011) und zwei Flugzonen (LPPM und LPFR) wurden vier weitere Sichtbarkeitskarten gerechnet. Zusammen mit den 12 Sichtbarkeitskarten aus dem ersten Berechnungsschritt und den drei Sichtbarkeitskarten der Referenzflugroute stehen damit 19 Sichtbarkeitskarten für die anschließende Bewertung und Diskussion zur Verfügung.

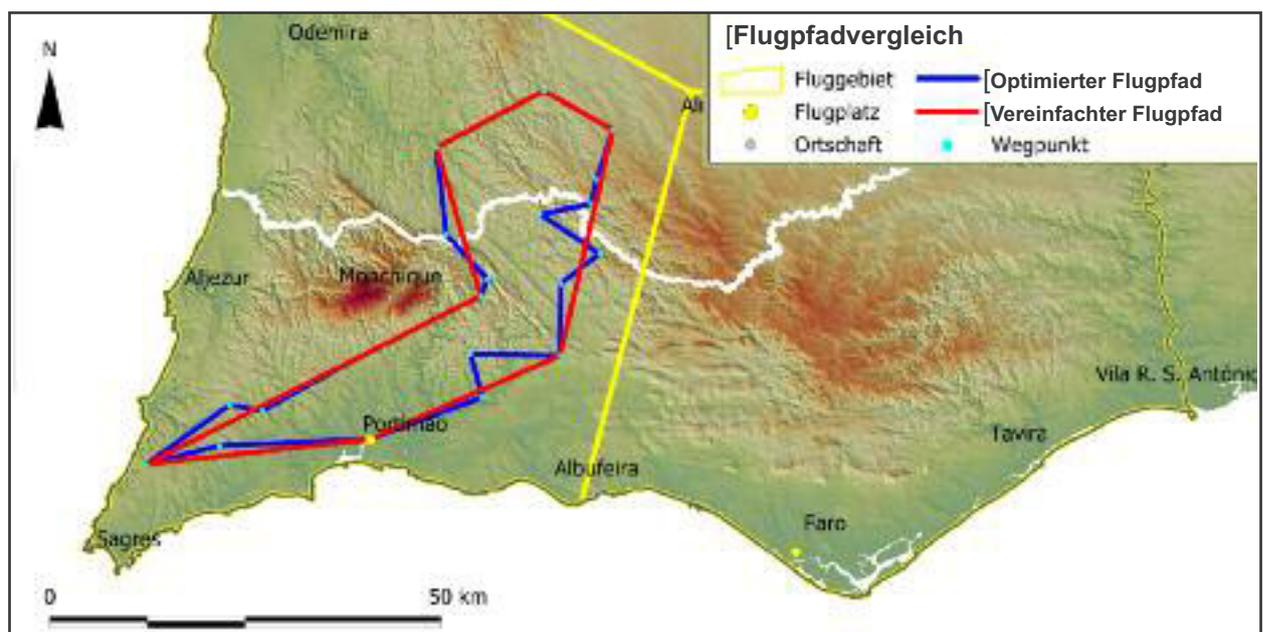


Abbildung 49: Vergleich zwischen optimiertem und vereinfachtem Flugpfad. Der optimierte Flugpfad LPPM-120NM ICRIF11.08. mit 20 Wegpunkten wurde durch Eliminierung von 14 Wegpunkten vereinfacht

6 Ergebnisse und Diskussion

Ziel der Diplomarbeit ist die Ausarbeitung von alternativen Flugrouten zur aktuell im Rahmen der Überwachung waldbrandgefährdeter Gebiete Südportugals abgeflogenen Referenzflugroute Nr. 9 (Germano et al., 2010). Anhand einer einfachen quantitativen und qualitativen Auswertung soll die Güte der im Rahmen dieser Diplomarbeit berechneten alternativen Flugrouten abgeschätzt werden.

Eine Flugroute oder die Kombination von zwei Flugrouten (für die zwei Flugzonen LPPM und LPFR) kann dann als Alternative zur Referenzflugroute gewertet werden, wenn durch die Alternativroute die Rahmenbedingungen für erfolgreiche Waldbranddetektionen verbessert werden. Das wesentlichste Kriterium dazu ist das Sichtbarkeitskriterium. Je höher der Prozentsatz an vom Luftfahrzeug einsehbarem Gelände ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, ein Feuer zu detektieren. Als direkte Sicht auf das Brandereignis wird in dieser Arbeit die Möglichkeit zur Erkennung von Rauchkörpern mit einer Mindesthöhe von mehr als 10 Metern definiert. Der Sichtstrahl vom Auge des Beobachters muss daher nicht den Brandort selber, sondern lediglich einen Punkt 10 Meter über dem Brandereignis ungehindert treffen können, um ein Brandereignis erfolgreich zu detektieren.

Freie Sicht ist auf jene Gebiete des Untersuchungsgebietes notwendig, die ein hohes Brandrisiko aufweisen. Die Ausweisung unterschiedlicher Waldbrandrisikogebiete aufgrund unterschiedlicher Indexmethoden bedingt, dass mehr als eine Flugroute als gültige Alternative zur Referenzflugroute angesehen werden kann. Der große Vorteil der auf physiogeographischen Elementen basierenden CRIF Indexmethode (siehe Kapitel 2.1.4) ist die Möglichkeit, eine Brandrisikokarte zu erstellen, die über einen längeren Zeitraum gültig ist. Für die so ermittelten Brandrisikogebiete lassen sich damit auch Flugüberwachungsrouten definieren, die über einen längeren Zeitraum, aber zumindest über eine komplette Brandsaison, Gültigkeit haben. Demgegenüber muss für den meteorologisch definierten ICRIF Brandrisikoindex (siehe Kapitel 2.1.3) aufgrund der Variabilität des Wetters für jeden Tag eine eigene Routenführung berechnet werden. Der große Vorteil hierbei ist allerdings, dass damit Flugrouten über Gebiete abgeflogen werden, für die an dem entsprechenden Tag auch tatsächliche hohe Brandgefahr herrscht. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Brandrisikoindexdaten spiegeln diesen Sachverhalt wieder. So zeigt die CRIF 2011 Risikokarte über weite Bereiche ausgedehnte Gebiete mit hohem bis extrem hohem Brandrisiko. Im Vergleich dazu sind auf der meteorologisch definierten ICRIF Brandrisikokarte selbst für einen Tag mit sehr hohem Brandrisiko (11.08.2012) signifikant weniger und kleinere Waldbrandrisikogebiete

ausgewiesen. Eine lückenlose Überwachung ist damit im Vergleich zur CRIF Brandrisikokarte mit wesentlich kürzeren Flugrouten möglich. Die ICRIF Waldbrandrisikokarte für den 16.08.2012 (siehe Abb. 52) zeigt die Verteilung der Risikogebiete für einen Tag mit geringer Waldbrandgefahr. An solchen Tagen ist eine Flugüberwachung wenig sinnvoll und es kann davon ausgegangen werden, dass die Waldbranddetektionsflüge an diesen Tagen nicht stattfinden. Zu Vergleichszwecken und der Vollständigkeit halber wurden auch für diesen Tag sämtliche Berechnungen durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse erfolgt in den folgenden Kapiteln. Anzumerken ist außerdem, dass in den Graphiken der folgenden Kapiteln nur jene Flächen mit erhöhtem Brandrisiko dargestellt werden, die durch bodengestützte Branddetektionsmethoden nicht abgedeckt sind.

Pfad-Nr	Flugzone / Referenzflugpfad	Waldbrandrisikoszenarium	Fläche der Gebiete mit hohem, sehr hohem und extrem hohem Waldbrandrisiko [km ²]	Flugpfadklasse [NM]	Flugpfadlänge* [km]	Gesamtanteil der sichtbaren Fläche [km ²]	Prozentsatz der sichtbaren Fläche [%]
1	Referenzflugpfad	ICRIF 11.08.	1454,0	120	223,9	999,5	68,7
2	LPPM	ICRIF 11.08.	585,9	270	396,0	585,9	100,0
3	LPFR	ICRIF 11.08.	868,1	270	364,6	868,1	100,0
4	LPPM + LPFR	ICRIF 11.08.	1454,0		760,6	1454,0	100,0
5	LPPM	ICRIF 11.08.	585,9	120	199,5	517,1	88,3
6	LPFR	ICRIF 11.08.	868,1	120	220,8	763,9	88,0
7	LPPM + LPFR	ICRIF 11.08.	1454,0		420,3	1281,0	88,1
8	LPPM (M)	ICRIF 11.08.	585,9	120	179,1	514,9	87,9
9	LPFR (M)	ICRIF 11.08.	868,1	120	200,8	763,2	87,9
10	LPPM (M) + LPFR (M)	ICRIF 11.08.	1454,0		379,9	1278,1	87,9
11	Referenzflugpfad	ICRIF 16.08.	214,9	120	223,9	173,8	80,9
12	LPPM	ICRIF 16.08.	32,1	270	191,1	32,1	100,0
13	LPFR	ICRIF 16.08.	182,8	270	217,0	182,8	100,0
14	LPPM + LPFR	ICRIF 16.08.	214,9		408,1	214,9	100,0
15	LPPM	ICRIF 16.08.	32,1	120	191,1	32,1	100,0
16	LPFR	ICRIF 16.08.	182,8	120	217,0	182,8	100,0
17	LPPM + LPFR	ICRIF 16.08.	214,9		408,1	214,9	100,0
18	Referenzflugpfad	CRIF 2011	3677,6	120	223,9	2061,4	56,1
19	LPPM	CRIF 2011	1801,4	270	466,3	1801,4	100,0
20	LPFR	CRIF 2011	1876,2	270	385,8	1876,2	100,0
21	LPPM + LPFR	CRIF 2011	3677,6		852,1	3677,6	100,0
22	LPPM	CRIF 2011	1801,4	120	220,6	1436,6	79,7
23	LPFR	CRIF 2011	1876,2	120	220,3	1363,1	72,7
24	LPPM + LPFR	CRIF 2011	3677,6		440,9	2799,7	76,1

Tabelle 10: Vergleich der Sichtbarkeiten zwischen der Referenzflugroute und den Alternativflugrouten für drei Waldbrandrisikoszenarien (CRIF 2011, ICRIF 11.08.2012 und ICRIF 16.08.2012)

6.1 Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Referenzflugroute

Ausgangspunkt der Referenzflugroute ist der Flughafen Faro (LPFR). Der Routenverlauf ist in Abbildung 50 dargestellt. Unter den zuvor beschriebenen Vorgaben für die Sichtbarkeitsanalysen und für die drei Waldbrandrisikoszenarien ergaben die Berechnungen für die Referenzflugroute folgende Resultate: Lage und Verlauf der Flugroute ermöglichen im Fall des CRIF 2011 Waldbrandszenarios eine direkte Sicht auf nur 56,1 % der waldbrandgefährdeten Gebiete. Innerhalb des Sichtweitenpolygons (violette Randlinie in Abb. 50) sind 97,9 % der Risikozellen mindestens ein Mal sichtbar. Große Bereiche der Wälder und naturnahen Flächen (vergleiche dazu Abb. 34) im Westen und Nordwesten der Flugzone Portimão sind von der Flugroute aus aufgrund der großen Distanzen nicht einsehbar. Gleiches gilt für die nördlichen und südöstlichen Bereiche der Flugzone Faro. Ein dreiecksförmiger Streifen in der Nähe der Ortschaft *Almodovar* wie auch ein Bereich in der Nähe der Städte *Tavira* und *Vila R. S. António* im Südosten sind von der Flugroute aus nicht einsehbar. Hier herrschen vorwiegend landwirtschaftliche Flächen vor.

Hätte der Überwachungsflug am 11.08.2012 stattgefunden, hätte er mit 68,7 % nicht wesentlich mehr waldbrandgefährdete Fläche abgedeckt. Lediglich am 16.08.2012, dem Tag mit niedriger

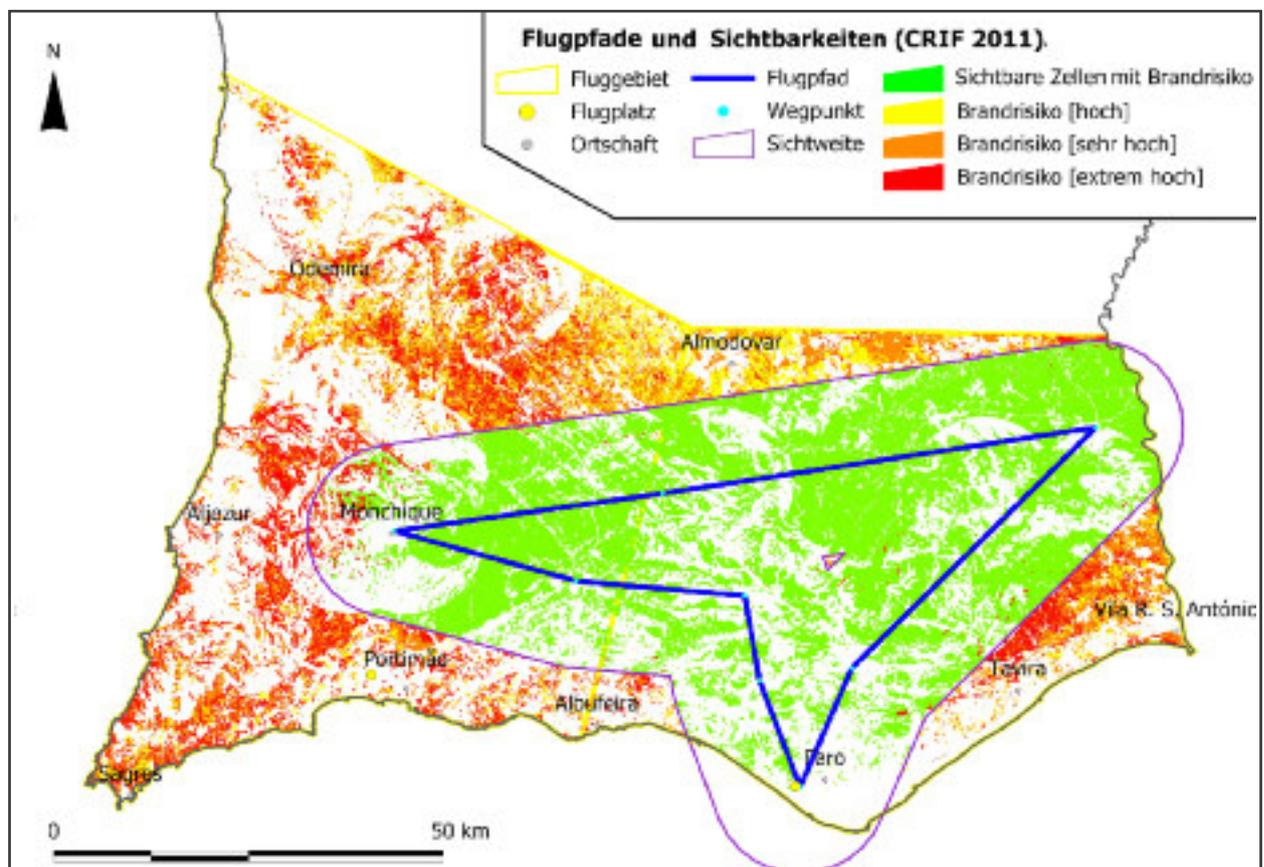


Abbildung 50: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für den Referenzflugpfad (CRIF 2011). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

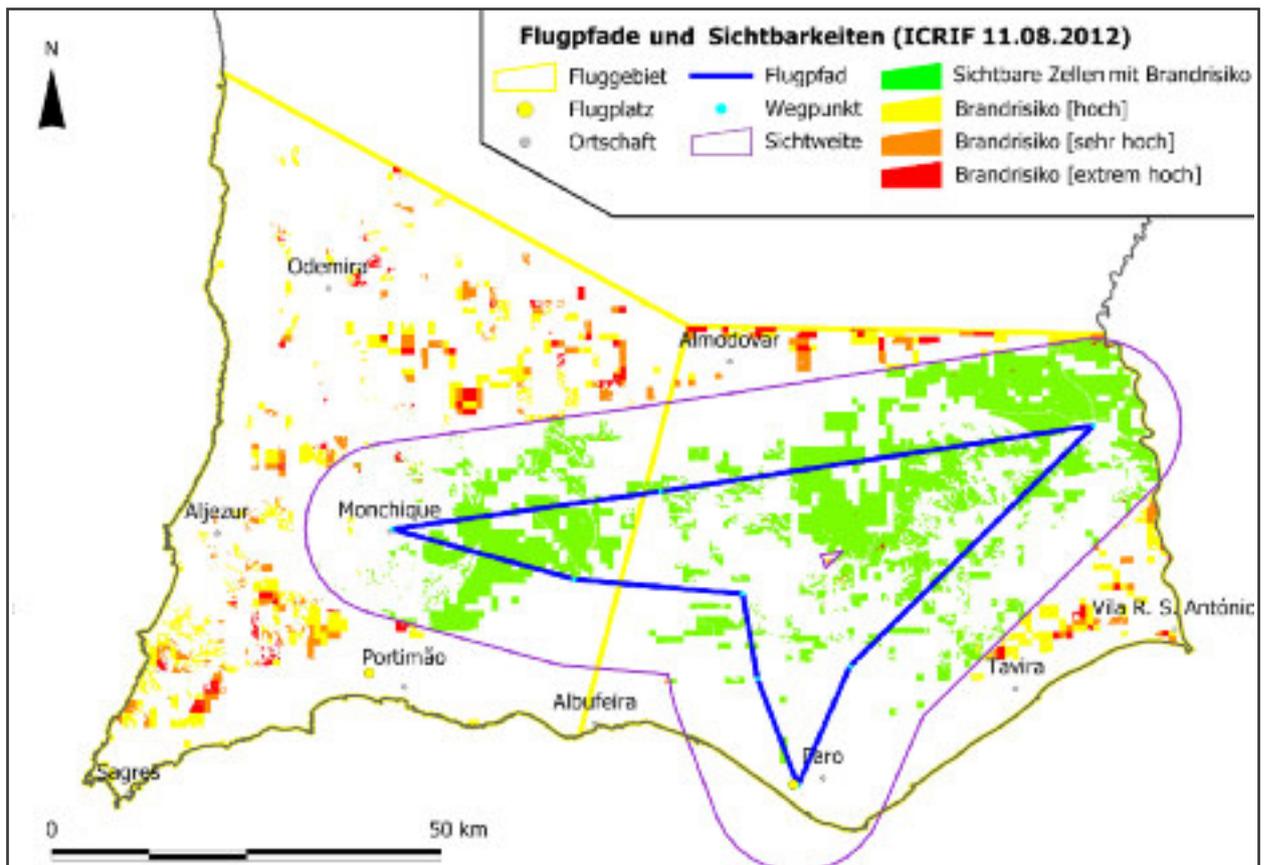


Abbildung 51: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für den Referenzflugpfad (ICRIF 11.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

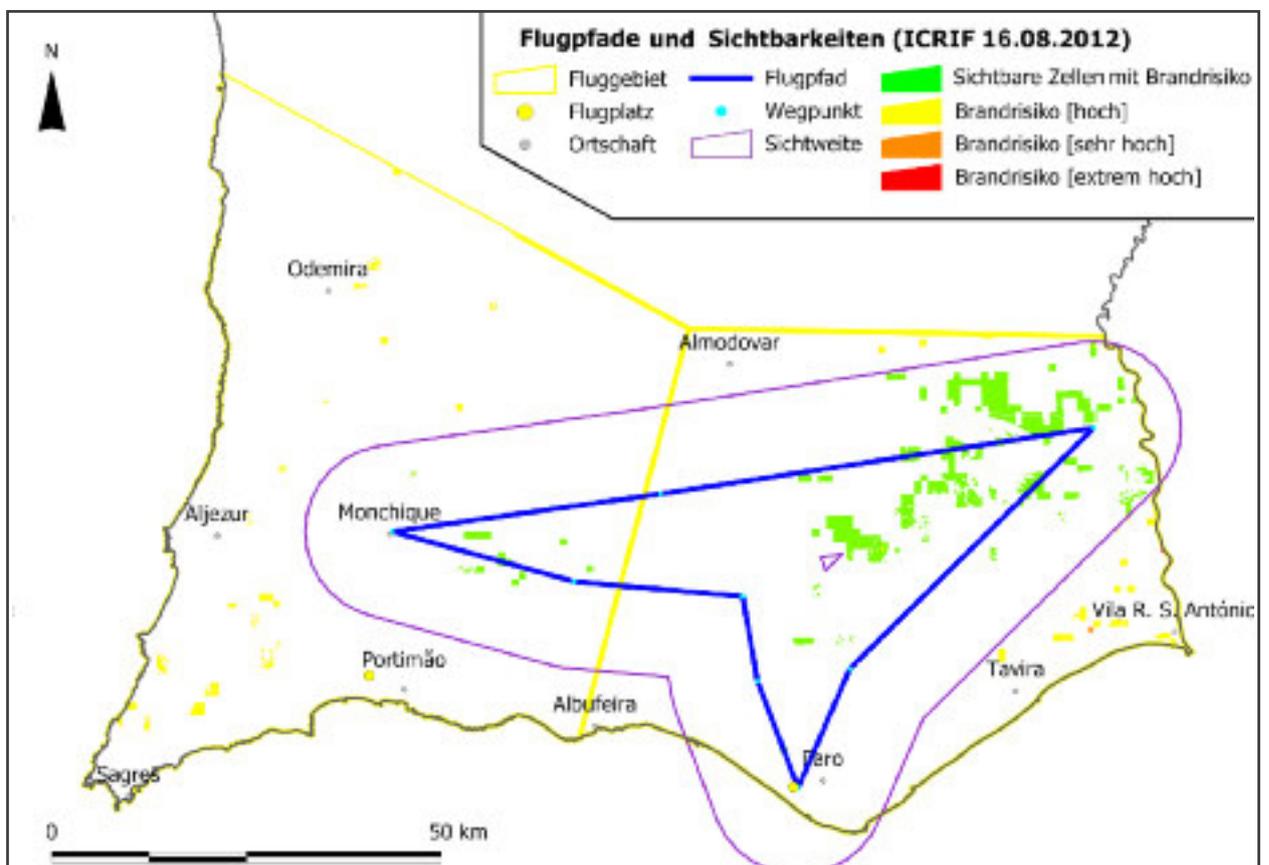


Abbildung 52: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für den Referenzflugpfad (ICRIF 16.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

Waldbrandgefahr, würde die Referenzflugroute aufgrund der günstigen räumlichen Verteilung der Gefahrengebiete mit 80,9 % einen nennenswert hohen Prozentsatz an Fläche abdecken. Innerhalb des Sichtweitenpolygons wären 99,1 % beziehungsweise 99,5 % der Risikozellen mindestens ein Mal sichtbar gewesen. Da die Waldbrandrisikogebiete des ICRIF 11.08.2012 Szenarios außerhalb des Sichtpolygons der Referenzflugroute gleichmäßig über die Gesamtfläche beider Fluggebiete verteilt sind, gelten hinsichtlich der fehlenden Einsehbarkeit auf diese Gebiete die gleichen Aussagen wie für das CRIF 2011 Szenario. Die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Szenarien ICRIF 11.08.2012 und 16.08.2012 sind in den Abbildungen 51 und 52 graphisch dargestellt.

6.2 Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugrouten der 270 NM Klasse

Durch die Limitierung der maximalen Waldbranddetektionssichtweite auf 11.200 Meter ergab sich aufgrund der Größe des Untersuchungsgebietes von vornherein die Notwendigkeit, die Überwachung der waldbrandgefährdeten Gebiete durch zwei Überwachungsflüge innerhalb von zwei Flugzonen zu gewährleisten. Im ersten Schritt der Analysen sollte zunächst festgestellt werden, ob zwei Flugrouten definiert werden können, die eine lückenlose Überwachung ermöglichen, aber gleichzeitig eine maximale Pfadlänge von 270 nautischen Meilen nicht überschreiten (siehe dazu Kapitel 5.4).

Für die drei Waldbrandrisikoszenarien wurden 6 Flugrouten berechnet. Die Flugrouten für das Waldbrandrisikoszenarium ICRIF 11.08.2012 sind in Abbildung 53 die Flugrouten der beiden anderen Szenarien in den Abbildungen 57 und 58 im Anhang 9.3 dargestellt.

Wesentliches Charakteristikum aller 6 Flugrouten ist, dass die Gebiete mit erhöhter Brandgefahr zu 100 % einsehbar sind. Trotz ihrer Länge und der großen Anzahl an Wegpunkten wurden Routen berechnet, die sich nicht überkreuzen und für die aufgrund ihres Verlaufes und der Abstände zwischen den einzelnen Wegpunkten ein Einsatz zumindest nicht unmöglich erscheint. Mit einer Länge von 466,3 km (ca. 252 nautische Meilen) bleibt auch die längste Route unter einer Flugzeit von drei Stunden. Somit ist belegt, dass zumindest für die drei vorliegenden Waldbrandrisikoszenarien das gesamte Überwachungsgebiet durch zwei Flugrouten lückenlos überwachbar ist.

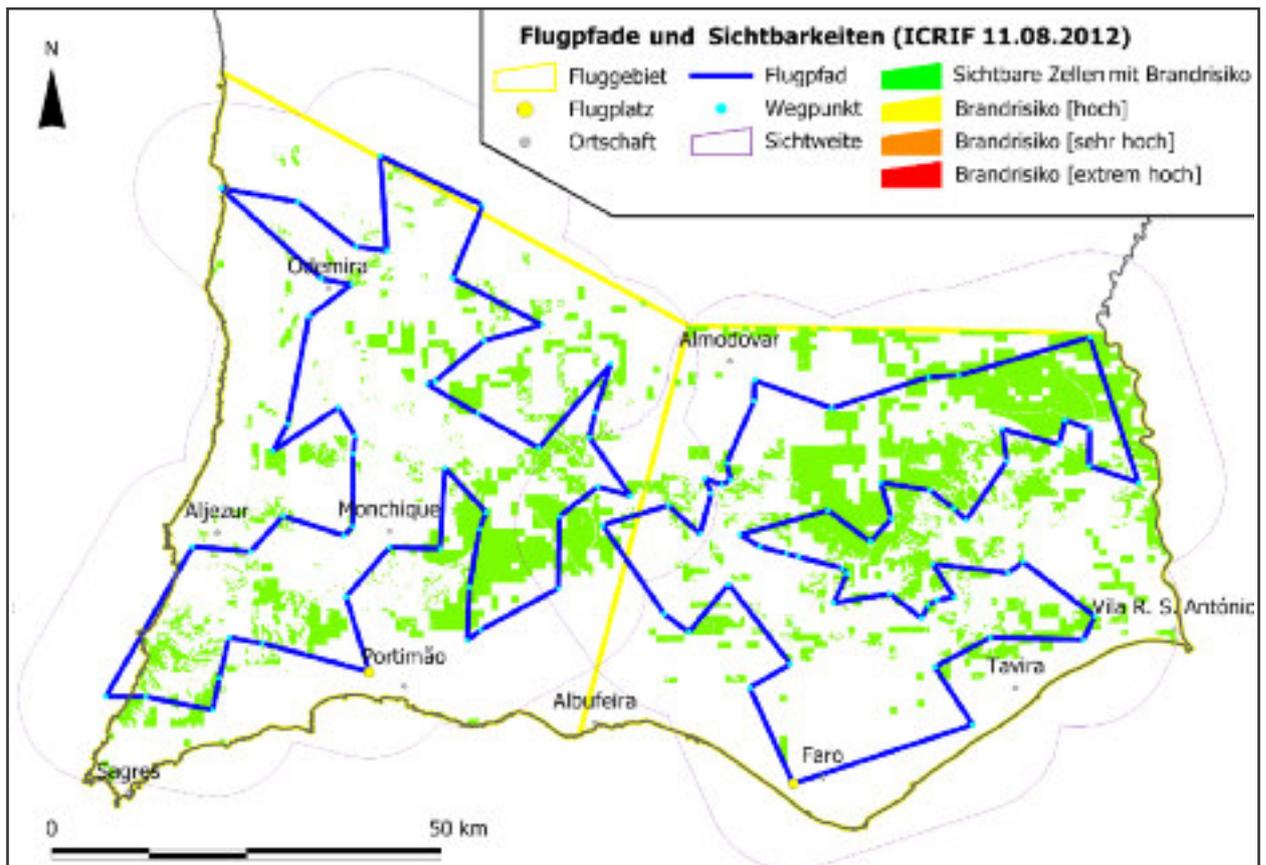


Abbildung 53: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 270 NM (ICRIF 11.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

6.3 Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugrouten der 120 NM Klasse

Mit der Limitierung der Flugroutenlänge auf 120 nautische Meilen sollen der Referenzflugpfad und die Flugpfadalternativen direkt untereinander vergleichbar gemacht werden. Die Ergebnisse der Berechnungen für das ICRIF 11.08.2012 Szenario sind in den Abbildungen 54 und 55 dargestellt, die Ergebnisse der beiden anderen Szenarien in den Abbildungen 59 und 60 im Kapitel 9.3 im Anhang.

Der Unterschied zu den Sichtbarkeitskarten der Flugrouten aus der 270 NM Klasse ist augenscheinlich. Für das CRIF 2011 Szenario kann der gesamte zentrale Bereich der Flugzone Portimão durch die Flugroute überwacht werden. Die Gebiete um die Ortschaft *Odemira* in Nordwesten und in der Nähe der Stadt *Sagres* im Südwesten bleiben allerdings zur Gänze ausgespart. Auch ein kleiner Bereich im Nordosten der Flugzone in der Nähe der Ortschaft *Almodovar* ist nicht sichtbar. Außer für das Nordwestliche Gebiet um *Odemira*, wo vor allem Waldflächen vorherrschen, handelt es sich bei den anderen nicht einsehbaren Flächen hauptsächlich um landwirtschaftliche Flächen und um naturnahe Flächen im Küstenbereich. Die Flugroute der Flugzone Faro deckt den zentralen

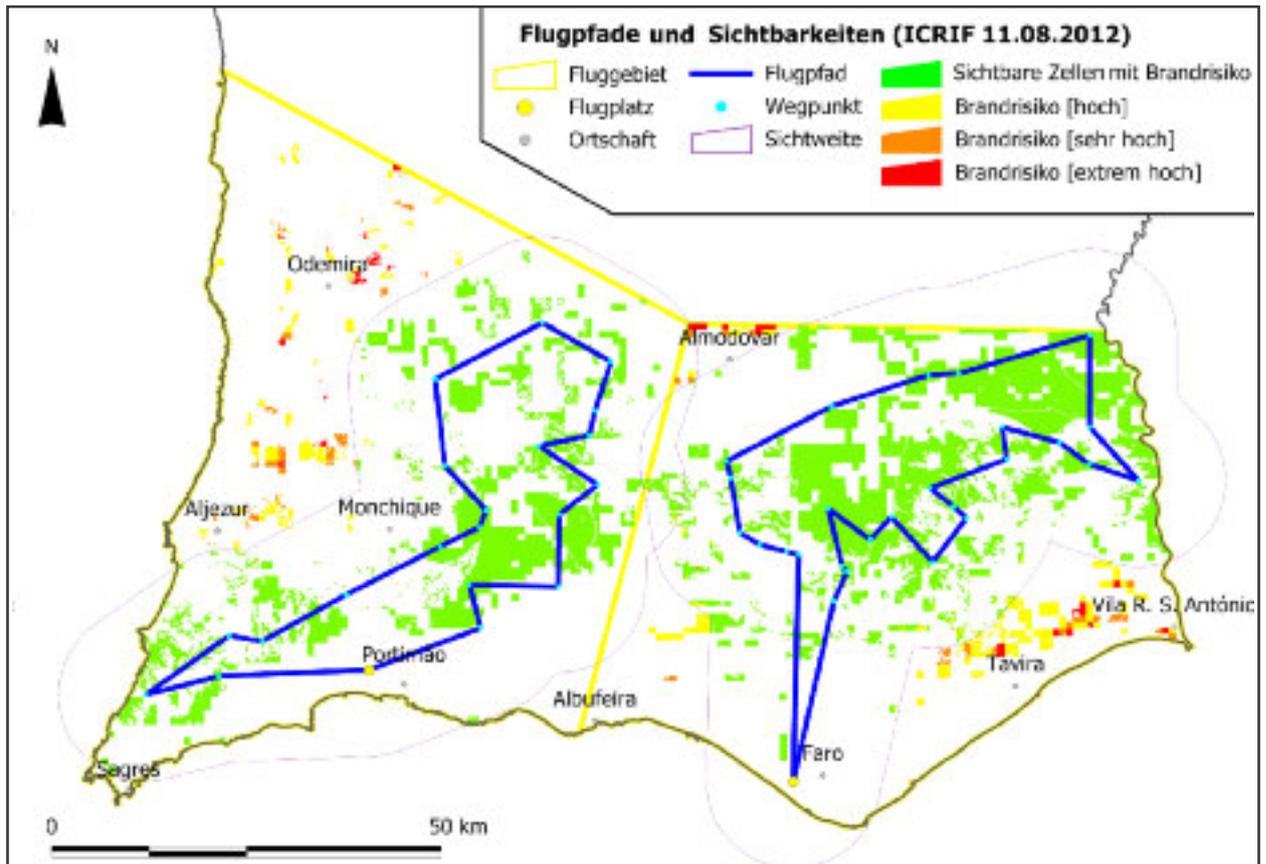


Abbildung 54: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 120 NM (ICRIF 11.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

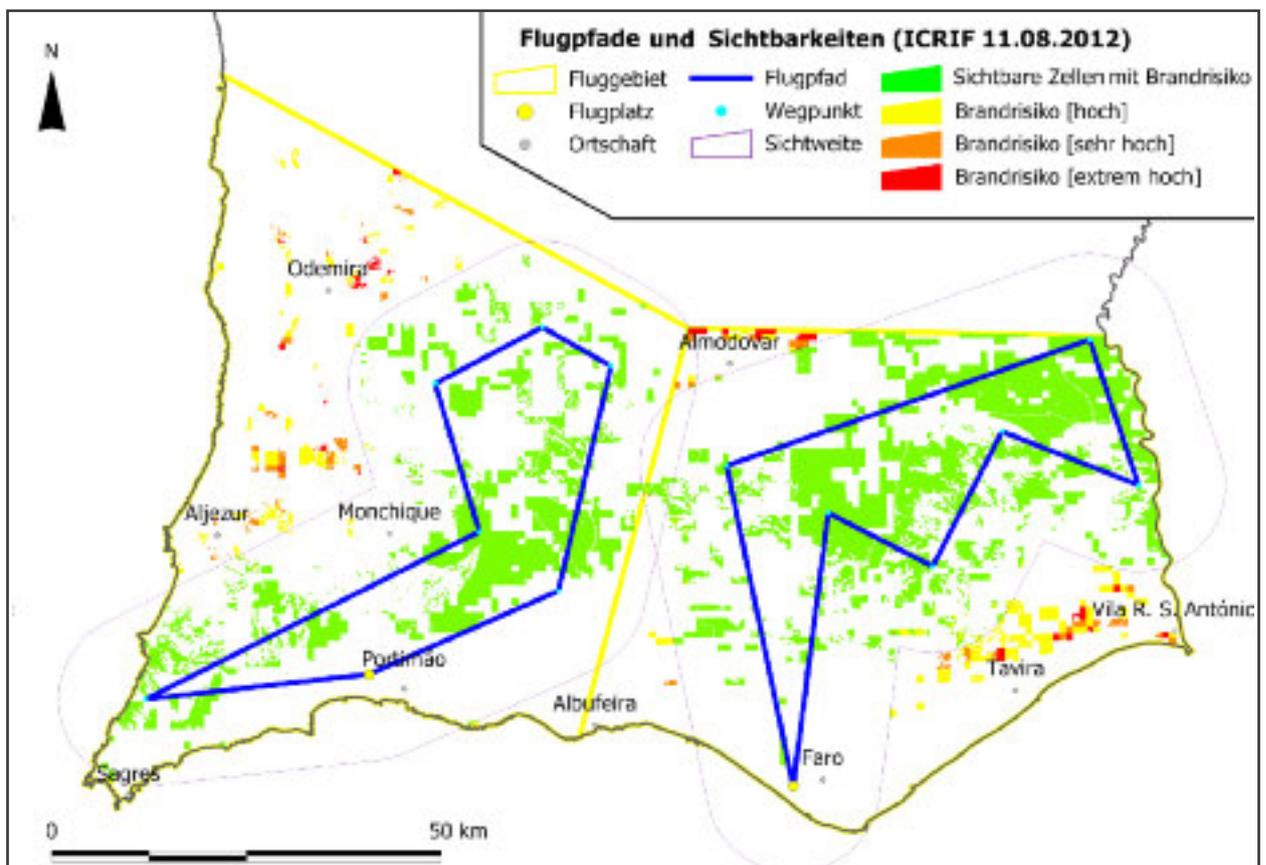


Abbildung 55: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die vereinfachten Flugpfade der Klasse 120 NM (ICRIF 11.08.2012). Vom Flugzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

und südlichen Bereich der Zone zur fast zur Gänze ab. Lediglich zwei Waldflächen südlich der Stadt Vila R. S. António sind nicht sichtbar. Zudem bleibt annähernd der ganze nördliche Bereich der Flugzone Faro unüberwacht. Besonders die Waldgebiete der Ausläufer der Serra do Caldeirão, südlich von Almodovar, der landwirtschaftlich geprägten Gebiete des Südalentejos und der naturnahen Gebiete in Nordosten der Zone sind davon betroffen. Im Einzelnen sind von der Flugroute Portimão 79,7 % und von der Flugroute Faro 72,7 % der Gebiete mit erhöhtem Brandrisiko sichtbar. Zusammen können durch beide Flugrouten 76,1 % der Risikoflächen erfolgreich überwacht werden. Im Vergleich dazu sind es bei der Referenzflugroute gerade einmal 56,1 %, also rund 20 % weniger. Innerhalb der Sichtweitenpolygone sind 99,4 % (Flugroute LPPM) beziehungsweise 99,5 % (Flugroute LPFR) der Risikozellen mindestens ein Mal sichtbar.

Aufgrund der deutlich besseren Sichtmöglichkeiten ist für das Waldbrandrisikoszenarium CRIF 2011 den zwei Alternativrouten gegenüber der Referenzflugroute eindeutig den Vorzug zu geben.

Abbildung 54 zeigt das Ergebnis der Sichtbarkeitsanalysen für das Brandrisikoszenarium ICRIF 11.08.2012. Beide Flugrouten decken mit 88,3 % (LPPM) und 88,0 % (LPFR) einen Großteil der einzelnen Flugzonen und mit zusammen 88,1 % einen Großteil des gesamten Überwachungsgebietes ab. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 55 die Flugrouten der durch manuelles Editieren vereinfachten Flugrouten. Der Überdeckungsgrad der vereinfachten Flugrouten ist mit 87,9 % in allen drei Fällen (LPPM, LPFR und LPPM+LPFR) nur geringfügig schlechter als bei den Ausgangsflugrouten. Für alle vier Flugrouten gilt, dass der gesamte nordwestliche Teil von Flugzone Portimão in einem Band von *Aljezur* bis nach *Odemira* nicht sichtbar ist. Gleiches gilt für einen kleinen landwirtschaftlich geprägten Teil bei *Almodovar* sowie einer parallel zur Küste verlaufenden Zone von *Tavira* bis *Vila R. S. António* mit landwirtschaftlichem und naturnahem Charakter. Innerhalb der Sichtweitenpolygone sind 99,5 % (Gesamtflugroute und vereinfachte Flugroute LPPM) sowie 99,0 % (Gesamtflugroute und vereinfachte Flugroute LPFR) der Risikozellen mindestens ein Mal sichtbar. Mit Sichtbarkeitswerten von rund 88 % für alle vier Flugrouten sind auch für das Waldbrandrisikoszenarium ICRIF 11.08.2012 im Vergleich zur Referenzflugroute rund 20 % mehr brandgefährdete Gebiete direkt sichtbar. Auch hier ist den Alternativrouten gegenüber der Referenzflugroute eindeutig den Vorzug zu geben.

Abbildung 56 zeigt schließlich die Situation für das Waldbrandrisikoszenarium ICRIF 16.08.2012. Die Flugrouten entsprechen zu 100 % jenen der 270 NM Klasse. Der Grund liegt auf der Hand: Mit einer Flugpfadlänge von 191,1 km (Flugroute LPPM) und 217,0 km (Flugroute

LPFR), ergaben sich im Zuge der Flugpfadberechnungen für die 270 NM Klasse zwei Flugrouten, die auch gleich der Begrenzung auf maximal 120 nautische Meilen entsprechen. Im Vergleich zur Referenzflugroute mit einem Abdeckungsgrad von 80,9 % weisen die Alternativrouten einen um 19,1 % höheren Abdeckungsgrad aus, nämlich 100 %. Auch in diesem Fall zeigt sich der Vorteil zweier Flugrouten zur Überwachung des Untersuchungsgebietes.

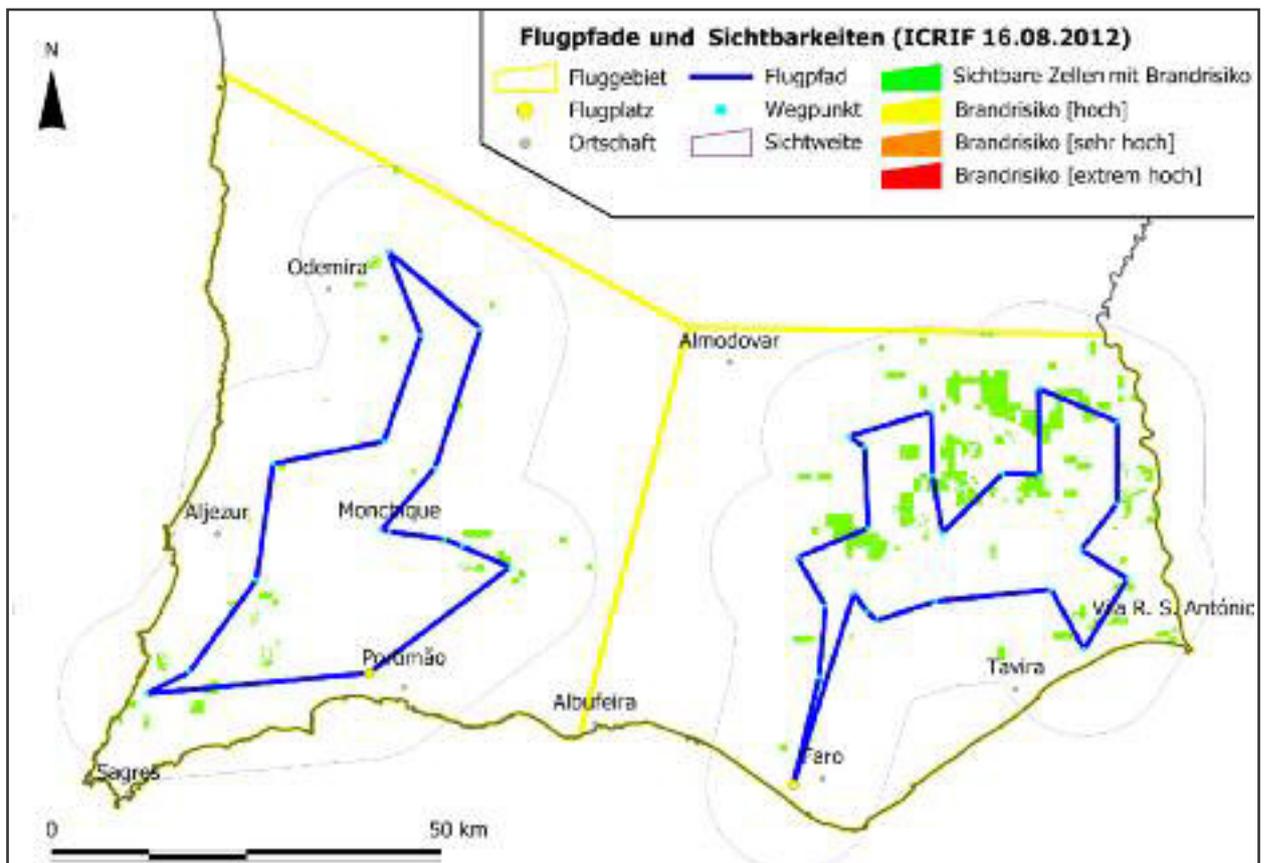


Abbildung 56: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die vereinfachten Flugpfade der Klasse 120 NM (ICRIF 16.08.2012). Vom Flugzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die grundlegende Idee zu dieser Diplomarbeit ergab sich aus eigenen Erfahrungen, die im Zuge der luftgestützten Waldbranddetektion für die Region Algarve in Südportugal gesammelt wurden. Eine große Anzahl an Überwachungsflügen wurde in den letzten Jahren auf unterschiedlichen Flugrouten durchgeführt, und immer wieder stellte sich die Frage nach den Grundlagen der Routenführung. Besonders jene Streckenabschnitte, die über längere Zeiträume über fast vegetationslose Gebiete führten, boten immer wieder Anlass zur Hinterfragung des Flugroutenverlaufs.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit ein Konzept zur GIS basierten Flugroutenoptimierung ausgearbeitet. Primäres Ziel war die Entwicklung einer Methodik, die die Berechnung von optimierten Flugrouten mit Hilfe von frei verfügbaren Geodaten unter geringst möglichem Zeitaufwand erlaubt. Als gleichrangiges, zweites Ziel sollten für ein reales Observationsgebiet in Südportugal Flugrouten gefunden werden, die eine seit 2006 bestehende und jeden Sommer geflogene Referenzflugroute ersetzen können. Die Beschreibung der Güte einer Alternativroute erfolgt dabei über ein einfaches Sichtbarkeitskriterium sowie über die Routenlänge, die ein bestimmtes Maß nicht überschreiten darf. Eine Flugroute wird dann als Alternative zur aktuellen Referenzflugroute gewertet, wenn ihre Routenführung bei realistischer Routenlänge und realistischem Verlauf eine lückenlose Überwachung der waldbrandgefährdeten Gebiete ermöglicht oder wenn über die Routenführung der Alternativroute im Vergleich zur Referenzflugroute mehr Geländefläche direkt überwacht werden kann.

Die Marschrichtung zur Entwicklung einer Methodik für die Flugroutenoptimierung war damit recht schnell klar. Mit Hilfe von Sichtbarkeitsanalysen werden die Flugrouten entworfen, auf ihre Eignung zur Überwachung von waldbrandgefährdeten Gebieten überprüft und mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen wird die Flugroutenlänge auf ein Mindestmaß reduziert. Als Optimierungsalgorithmen bieten sich genetische Algorithmen an. Sie zählen zu den heuristischen Verfahren und ermöglichen die Berechnung von optimierten Lösungen in einem vertretbaren Zeitrahmen.

In einem ersten großen Schritt wurde ein Softwarepaket basierend auf der Programmiersprache `c#` entwickelt, das sich im Wesentlichen aus vier Komponenten zusammensetzt: Eine Komponente zur Zusammenfassung von Rasterzellen des Untersuchungsgebietes zu Clustern, eine Komponente zur Verknüpfung der Clusterzentren zu Flugpfaden mit Hilfe des Optimierungsalgo-

rithmus, eine weitere Komponente zur Höhenanpassung der einzelnen Wegpunkte des Flugpfades und schließlich eine Komponente für die Sichtbarkeitsanalysen. Im Rahmen der Sichtbarkeitsanalysen wird für jeden Wegpunkt der Flugroute die Sichtbarkeit zum überflogenen Gelände berechnet. Aufgrund des immens hohen Rechenaufwandes für ein durchschnittlich großes Untersuchungsgebiet mussten alle Algorithmen so programmiert werden, dass sie möglichst hohe Effizienz und Performance ermöglichen. Einen wesentlichen Beitrag zur Verkürzung der Rechenzeit liefert in diesem Zusammenhang eine Programmoption, die eine Fraktionierung der Sichtbarkeitsanalysen ermöglicht. Konzeptionell werden dabei jene Bereiche des Untersuchungsgebietes aus dem Suchraum eliminiert, die bereits ein Mal für einen beliebigen Wegpunkt der Flugroute sichtbar waren. Damit reduziert sich mit jedem abgearbeiteten Wegpunkt die Anzahl der Rasterzellen, für die eine Sichtbarkeit berechnet werden muss. Das Programm erlaubt sowohl die Berechnung neuer Flugrouten als auch die Berechnung von Sichtbarkeitsanalysen bestehender Flugrouten.

Als Eingangsdatensatz wird ein Datensatz benötigt, der neben den geographischen Koordinaten und der Höhe des Geländemodells auch einen Waldbrandrisikoindex als Attributinformation mitführt. In der vorliegenden Arbeit werden drei Indexmethoden zur Abschätzung des Waldbrandrisikos vorgestellt, wie sie auch durch portugiesische Institutionen verwendet werden. Eine der drei Methoden basiert auf physiogeographischen Elementen und ermöglicht damit die Erstellung einer Waldbrandrisikokarte für Portugal, die für einen längeren Zeitraum gültig ist. Die zwei anderen Indexmethoden basieren im Wesentlichen auf meteorologischen Daten. Aufgrund der Variabilität des Wetters sind die Waldbrandrisikokarten der zwei meteorologisch definierten Indexmethoden nur über einen begrenzten Zeitraum von einem oder wenigen Tagen gültig. Die Berechnung der optimierten Flugpfade erfolgt damit auf Basis von zwei unterschiedlichen Waldbrandrisikodatenätzen. Für drei Waldbrandrisikoszenarien wurden im zweiten großen Schritt dieser Diplomarbeit insgesamt 17 Flugrouten für zwei unterschiedliche Distanzklassen gerechnet. Trotz des Einsatzes leistungsfähiger Computer zogen sich die Berechnungen über mehrere Wochen hin. Die Ergebnisse der Berechnungen sind aber umso zufrieden stellender.

In einem letzten Schritt erfolgte dann die Auswertung der Berechnungsergebnisse in einem GIS. Für jede der 17 Flugrouten wurde zunächst der prozentuelle Anteil an direkt einsehbaren Rasterzellen des Geländemodells ermittelt. Der anschließende Vergleich mit den Werten der Referenzflugroute ergab, dass für jede Routenoption gut 20 % mehr Rasterzellen direkt einsehbar sind als für die Referenzflugroute. Sämtliche Routenverläufe sind im Hauptteil beziehungsweise im Anhang dieser Arbeit graphisch dargestellt. Alle wesentlichen methodischen Grundlagen zur Programmier-

arbeit sind in dieser Diplomarbeit ebenfalls detailliert beschrieben.

Somit konnten grundsätzlich beide Hauptziele der Diplomarbeit erreicht werden. Zum einen wurde eine Methodik entwickelt, die die Berechnung von optimierten Flugpfaden erlaubt und zum anderen wurden Flugpfadvarianten berechnet, die im Vergleich zur bestehenden Flugüberwachungsroute eine wirkungsvollere Überwachung der waldbrandgefährdeten Gebiete Südportugals ermöglichen.

Ein Teilaspekt der Routenberechnung und -optimierung konnte allerdings nicht umgesetzt werden. Obwohl es kein Hauptziel war, sollte nach Möglichkeit ein operationelles System entwickelt werden, das einen zumindest teilautomatischen Ablauf der Routenberechnung innerhalb weniger Stunden ermöglicht. Keine der beiden Vorgaben konnte umgesetzt werden. Zum einen sind auf der Seite der Datenvorbereitung in einem GIS umfangreiche Arbeitsschritte notwendig, die einen beträchtlichen Zeitaufwand erfordern. Dieser Aufwand kann aber durch den Einsatz von Skripten deutlich reduziert werden. Eine fast vollautomatische Datenvorbereitung ist in Abhängigkeit von dem verwendeten GIS durchaus möglich.

Als weitaus schwieriger zu lösendes Problem erweist sich die Sichtbarkeitsanalyse selber. Um tagesbasierte Flugrouten zu berechnen, deren Grundlage meteorologisch definierte Waldbrandrisikoindexdaten sind, benötigt man Programme und Computer, die die Abarbeitung von Millionen von Rechenoperationen innerhalb von kurzen Zeitspannen ermöglichen. Weder kommerzielle oder freie GIS Systeme noch das im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellte Programmpaket sind in der Lage, Tausende Sichtbarkeitsanalysen für Tausende Wegpunkte einer Flugroute innerhalb von wenigen Stunden zu rechnen. Inwieweit der Einsatz von Parallelrechnern oder die Entwicklung neuer Technologien in der näheren Zukunft hierfür Abhilfe schaffen können, bleibt offen.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Ahlenius, H. (2008):** World map of forest distribution. UNEP/GRID-Arendal, {http://www.grida.no/graphicslib/detail/world-map-of-forest-distribution-natural-resources-forests_1277} (27.09.2013).
- Almeida, R.; Caridade; Redinha, J.; Grilo, F., M.; António, R.; Castro, M.; Vinagre, P.; Pinheiro, D.; Guerreiro, J.; Sousa C. und Mendoça, M. (1995):** Relatório do Projecto Piloto de Produção de Cartografia de Risco de Incêndio Florestal. Centro Nacional de Informação Geográfica, Lisboa, 60 pp.
- Almeida, R. (1998-2009):** Sistema Nacional de Detecção de Incêndios Florestais. Grupo CRISE (1998-2009), {<http://scrif.igeo.pt/documentacao/ralmeida/SNDIF.pdf>} (07.06.2014).
- Andrei, B.; Utkin, A. F.; Simões, F.; Lavrov, A. und Vilar R. (2003):** Feasibility of forest-fire smoke detection using lidar. *International Journal of Wildland Fire* 12(2) 159 – 166. Published: 27 June 2003.
- Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Furmans, K. und Tempelmeier H. (2008):** VDI-Handbuch der Logistik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Aronoff, S. (1989):** Geographic Information Systems: A management Perspective, WDL Publications, Ottawa.
- Baker, J. E. (1987):** Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. In: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and their application. Mahwah, NJ, USA : Lawrence Erlbaum Associates, Inc. ISBN 0–8058–0158–8, S. 14–21.
- Barbosa, P.; Amatulli, G.; Boca, R.; Camia, A.; Kucera, J.; Libertà, G.; San-Miguel Ayanz, J.; Schmuck, G.; Schulte E. und Dierks, H.-H. (2007):** Forest Fires in Europe 2006. EUR 22931 EN – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, EUR, Scientific and Technical Research series, ISSN 1018-5593.
- Biron, D. (2006):** The Traveling Salesman Problem: Deceptively Easy to State; Notoriously Hard to Solve. Senior Honors Theses. Paper 188.
- Bugalho, L. und Pessanha, L. (2007):** The forest fire risk index (ICRIF) operational processing and validation. 4th International Wildland Fire Conference, 13th-17th May 2007, Seville, Spain.
- Bugalho, L. und Pessanha, L. (2009):** Análise Estatística dos Incêndios Florestais em Portugal e Avaliação do Índice ICRIF. *Territorium* n°16 2009 Rev. da Associação Port. de Riscos Prevenção e Segurança.
- Bugalho, L. (2012):** An example of a fire risk applied to Portugal: Forest Fire Combined Risk Index (ICRIF). IPMA. Polar Satellites Week EUMETRAIN (5 to 9 November 2012).
- Bugalho, L. (2013):** Persönlicher e-mail Verkehr vom 23. Juni 2013 bis zum 12. August 2013. Lourdes.Bugalho@ipma.pt. Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Rua C do Aeroporto, 1749-077 Lisboa.
- Brown, A. A. und Davis, K. P. (1973):** Forest fire – Control and use (2nd edition). McGraw-Hill, New York.
- Bruce, H. D. (1941):** Theoretical analysis of smoke-column visibility. *Journal of Agricultural Research* 62(3): 161-178. Washington.

- Bruce, H. D. (1944):** Observations on the Visibility of a Small Smoke. Society of American Foresters. Journal of Forestry, Volume 42, Number 6, 1 June 1944, pp. 426-434(9). Society of American Foresters.
- Byram, G. M. (1936):** Physical factors affecting the visibility of small smoke columns. U.S. Weather Bur. Monthly Weather Rev. 64:259-264.
- Byram, G. M. und Jemison, G. M. (1948):** Some Principles of Visibility and Their Application To Forest Fire Detection. Technical Bulletin No. 954, United States Department of Agriculture Washington, D. C.
- Caruana, R. und Freitag, D. (1994):** Greedy attribute selection. Proc. ML-94. Morgan Kaufmann.
- Catry, F. X. (2002):** Estudo da visibilidade em postos de vigia e da sua influência na vigilância de incêndios florestais. Relatório do Trabalho de Fim de Curso da Licenciatura de Engenharia Florestal. ESA – IPCB.
- Catry, F. X.; Almeida, R. M. und Rego, F. C. (2004):** Produção de Cartografia de Visibilidades para Portugal Continental: A Importância da sua Utilização na Vigilância Contra Incêndios Florestais. Silva Lus. [online]. 2004, vol.12, n.2, pp. 227-241. ISSN 0870-6352.
- Catry, F. X.; Rego, F. C.; Santos, T.; Almeida, J. und Relvas P. (2007):** Forest Fires Prevention in Portugal - Using GIS to Help Improving Early Fire Detection Effectiveness. Proceedings of the 4th International Wildland Fire Conference. CD Rom (12 pp.). Seville, Spain.
- Cessna Aircraft Company (1979):** Information Manual. Cessna Model 152. Cessna Aircraft Company. Wichita, Kansas, USA. D1170-13-RPC-100000-12/79.
- Champion, K. S. W.; Cole, A. E. und Kantor, A. J. (1985):** Standard and reference atmosphere, in Handbook of Geophysics and the Space Environment, edited by A.S.Jursa, pp.14-1 - 14-43, AirForce Geophys. Lab., Bedford, Mass.
- Chandler, C.; Cheney, P.; Thomas, P.; Trabaud, L. und Williams, D. (1983):** Fire in forestry – Volume II: Forest fire management and organization. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Chuvieco, E. und Congalton, R.G. (1989):** Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. Remote Sensing of Environment 29: 147-160.
- Clarke, K. C. (1990):** Analytical and Computer Cartography, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New York
- Commission of the European Communities (1995):** CORINE Land Cover. {<http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>} (12.06.2014)
- Conselho de Ministros (2005):** Resolução do Conselho de Ministros que aprova o plano operacional de prevenção e combate aos incêndios florestais. Comunicado do Conselho de Ministros de 6 de Janeiro de 2005. Portal do Governo, {<http://www.portugal.gov.pt>} (10.06.2014).
- Corine Land Cover (1995):** Commission of the European Communities. {<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version-3>} (06.06.2014).
- Costa, J. P. (2009):** Análise da Rede Nacional de Postos de Vigia - Identificação dos seus elementos com maior interesse para a AFOCELCA. Relatório de Estágio. Instituto Politécnico de Coimbra. Escola Superior Agrária. Licenciatura em Engenharia dos Recursos Florestais
- Davis, K. P. (1959):** Forest Fire. Control and Use. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York. 584pp

- Davis, K.P.; Byram G. M. und Krumm, W. R. (1959):** Detection. In Forest fire. Control and use. McGraw-Hill, New York, pp. 282-303.
- De Floriani, L. und Magillo, P. (2003):** Algorithms for visibility computation on terrains: a survey. Environment and Planning B: Planning and Design 30(5) 709 – 728.
- Delattre, E. (1993):** Forest Fires in Southern Europe – Overview of the EC Actions: Towards an International Cooperation? The European Parliament. PE 177.697.
- Deutsche Wikipedia: Algarve.** {<http://de.wikipedia.org/wiki/Algarve>} (05.06.2014).
- Deutsche Wikipedia: Desoxyribonukleinsäure.** {<http://de.wikipedia.org/wiki/DNA>} (05.05.2014).
- Deutsche Wikipedia: Evolution.** {<http://de.wikipedia.org/wiki/Evolution>} (05.05.2014).
- Deutsche Wikipedia: Fluggeschwindigkeit.** {<http://de.wikipedia.org/wiki/Fluggeschwindigkeit>} (15.06.2014).
- Deutsche Wikipedia: Gen.** {<http://de.wikipedia.org/wiki/Gen>} (05.05.2014).
- Domschke, W. und Scholl, A. (2006):** Heuristische Verfahren. Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft. Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena. ISSN 1611-1311.
- Dowding, S.; Kuuskivi, T. und Li, X. (2004):** Void fill of SRTM elevation data—principles, processes and performance. Proceedings of the conference “ASPRS Images to Decision: Remote Sensing Foundation for GIS Applications”, Kansas City, MO, September 12–16.
- Duggal, S. K. (2004).** Surveying. Tata McGraw-Hill Education, Band 2.
- Englische Wikipedia: International Standard Atmosphere.** {http://en.wikipedia.org/wiki/International_Standard_Atmosphere} (15.06.2014)
- Escorial, D.; Tourne, I. F. und Reina, F. J. (2003):** Fuego: a Dedicated Constellation of Small Satellites to Detect and Monitor Forest Fires. Acta Astronautica, 52(9-12):765-775.
- ESRI (2002):** ArcInfo 8 Help. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- EU Verordnung Nr. 1178/2011 der Kommission (2011):** EU Verordnung Nr. 1178/2011 der Kommission vom 3. November 2011 zur Festlegung technischer Vorschriften und von Verwaltungsverfahren in Bezug auf das fliegende Personal in der Zivilluftfahrt gemäß der Verordnung (EG) Nr. 216/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates Text von Bedeutung für den EWR. {eur-lex.europa.eu} (24.06.2014).
- European Environment Agency (2007):** CLC2006 technical guidelines. Technical report No 17/2007. Office for Official Publications of the European Communities
- European Environment Agency (2012):** Mean precipitation (CLIM 002). {http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/european-precipitation-1/ds_resolveuid/27f6f100c22b448780403824cf30cf3a} (30.09.2013).
- European Environment Agency (2013):** Global and European temperature (CSI 012/CLIM 001/CLIM 003). {http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature/ds_resolveuid/6f7963c558e848778854afba1c6066dc} (30.09.2013).

- Falkenauer, E. (1998):** Genetic Algorithms and Grouping Problems. John Wiley, Chichester, New York et al.
- FAO (2001):** La detección. In Guide Technique International. Protection des forêts contre l'incendie - Fiches techniques pour les pays du bassin méditerranéen. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, pp. 71-76.
- FAO (2007):** Fire management global assessment 2006. Thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2010):** Global Forest Resources Assessment 2010 – Main Report. FAO Forestry Paper No. 163. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (2012):** State of the World's Forests 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, ISBN 978-92-5-107292-9.
- Farr, T. G.; Rosen, P. A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S.; Kobrick, M.; Paller, M.; Rodriguez, E.; Roth, L.; Seal, D.; Shaffer, S.; Shimada, J.; Umland, J.; Werner, M.; Oskin, M.; Burbank, D. und Alsdorf D. (2007):** The Shuttle Radar Topography Mission, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Feltl, H. (2003):** Ein Genetischer Algorithmus für das Generalized Assignment Problem. Diplomarbeit am Institut für Computergraphik und Algorithmen der Technischen Universität Wien.
- Feo, T. A. und Resende, M. G. C. (1995):** Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, in: Journal of Global Optimization, Vol.6, pp. 109-133.
- Ferreira-Leite, F.; Bento-Gonçalves, A.; Lourenço, L. und Úbeda, X. (2012):** Problemas metodológicos no estudos dos incêndios florestais em portugal Continental : o caso dos grandes incêndios florestais. Respuestas de la Geografía Ibérica a la crisis actual 857-866 Universidade de Santiago de Compostela isbn:978-84-940469-7-1.
- Fischer, E. M. und Schär, C. (2010):** Consistent geographical patterns of changes in highimpact European heatwaves. Nature Geoscience 3, 398 – 403.
- Fisher, P. F. (1991):** First experiments in viewshed uncertainty: The accuracy of the viewshed area. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 57(10): 1321-1327.
- Fisher, P. F. (1992):** First Experiments in Viewshed Uncertainty: Simulating Fuzzy Viewsheds. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 58(3):345-352.
- Fisher, P. F. (1993):** Algorithm and Implementation Uncertainty in Viewshed Analysis. International Journal of Geographical Information Systems, 7(4): 331-347.
- Fisher, P. F. (1996a):** Extending the Applicability of Viewsheds in Landscape Planning. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 62(11):1297-1302.
- Fisher, P. F. (1996b):** Reconsideration of the Viewshed Function in Terrain Modeling. Geographical Systems, 3:33-58.
- Frost, D. H. (1997):** Algorithms and Heuristics for Constraint Satisfaction Problems Dissertation, University of California, Irvine.

- Garey, M. R. und Johnson, D. S. (1979):** Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness, W. H. Freeman, ISBN 0-7167-1045-5
- Germano, A.; Salgueiro, A.; Guiomar N. und Almeida R. (2010):** Aerial Forest Monitoring: A Portuguese decision support system to develop firefight strategies. VI International Conference on Forest Fire Research. D. X. Viegas (Ed.), 2010.
- Ginsberg, M. L. und Harvey, W. D. (1990):** Iterative broadening. In AAAI, pages 216–220.
- Glover, F. und Laguna, M. (1993):** Tabu search, in Reeves, C. (ed.): Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Blackwell, Oxford, pp. 70-141.
- Glover, F. und Laguna, M. (1997):** Tabu search. Kluwer, Boston.
- Goldberg, D. E. (1989):** Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading.
- Goldberg, D. E. (1990):** Deb, Kalyanmoy: A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms. FOGA, S. 69–93.
- Gonçalves, A.; Bento, J.; Luciano, L. und da Silva, J. D. (2007):** Manifestação do risco de incêndio florestal. Causas e investigação criminal. Territorium. 14 (2007) 81-87. ISSN: 0872-8941.
- Goodchild, M. F. und Lee J. (1989):** Coverage Problems and Visibility Regions on Topographic Surfaces. Annals of Operations Research, 18:1i5-186.
- Gorokhovich, Y. und Voustianiouk, A. (2006):** Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. Remote Sensing of Environment 104 (2006) 409–415. Science Direct. Elsevier.
- Goward, S.N.; Markham, B.; Dye, D.G.; Dulaney, W. und Yang, J. (1991):** Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. Remote Sensing of Environment. 35 (2-3): 257-278.
- Greco, F. (2008):** Travelling Salesman Problem. I-Tech Education and Publishing KG, Vienna, Austria (In-Teh)
- Grötschel, M. (2005):** Schnelle Rundreisen: Das Travelling Salesman-Problem. Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, ZIB-Report 05-57
- Grupo CRISE (1998-2011a):** Cartas de Risco de Incêndio Florestal. Nova CRIF2011 - versão provisória. Direcção de Serviços de Investigação e Gestão de Informação Geográfica, Instituto Geográfico Português, {http://scrif.igeo.pt/servicos/pvigia/Carta_visibilidades.htm} (21.05.2014)
- Grupo CRISE (1998-2011b):** Nova Carta de Visibilidade da RNPV. Direcção de Serviços de Investigação e Gestão de Informação Geográfica, Instituto Geográfico Português, {<http://scrif.igeo.pt/cartografiacrif/2007/metodologia.html>} (07.06.2014).
- Grupo CRISE (1998-2009):** Projecto Crise. Direcção de Serviços de Investigação e Gestão de Informação Geográfica, Instituto Geográfico Português, {<http://scrif.igeo.pt/crise/>} (13.06.2014).
- Harbich, S. (2007):** Einführung genetischer Algorithmen mit Anwendungsbeispiel. {http://www-e.uni-magdeburg.de/harbich/download.php?f=genetische_algorithmen/genetische_algorithmen.pdf} (05.05.2014)

- Harris, H. K. und Fahnestock, G. R. (1954):** Aerial Observer Versus Lookout. Fire Control Notes - a periodical devoted to the technique of forest fire control Vol.15, Nr.2. Forest
- Hart, J. P. und Shogan, A. W. (1987):** Semi-greedy Heuristics: An Empirical Study, Operations Research Letters, Vol. 6, pp. 107-114. Service, US Department of Agriculture.
- Holland, J. H. (1975):** Adaption in natural and artificial systems. Ann Arbor, University of Michigan Press.
- ICNF (2014):** Base de dados nacional de incêndios florestais, 1980 – 2012. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, I. P., {<http://www.icnf.pt/portal/florestas/dfci/inc/estatisticas>} (04.06.2014).
- INOV (2008):** Ciclope - Sistema Integrado de Videovigilância Florestal. Instituto de Novas Tecnologias INOV INESC INOVAÇÃO, {http://inov.pt/pages/monitorizacao/documents/Ciclope_Generic_PT.pdf} (08.06.2014).
- Instituto Nacional de Estatística (2011):** Censos 2011. Offizielles Statistkportal, {<http://mapas.ine.pt/map.phtml>} (06.06.2014)
- International Civil Aviation Organization (2005):** Rules of the Air. Annex 2 to the Convention on International Civil Aviation. Tenth Edition, July 2005.
- International Civil Aviation Organization (2008):** Operation of Aircraft. Annex 6 to the Convention on International Civil Aviation, Part II International General Aviation — Aeroplanes. Seventh Edition, July 2008.
- Jarvis, A.; Reuter, H. I.; Nelson, A. und Guevara, E. (2008):** Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. {<http://srtm.csi.cgiar.org>} (11.06.2014).
- Joereßen, A. und Sebastian, H.-J. (1998):** Problemlösung mit Modellen und Algorithmen, Teubner Verlag, Stuttgart 1988, S. 239 ff.
- Jungnickel, D. (1999):** Graphs, Networks and Algorithms. Springer, Berlin u. a. 1999, ISBN 3-540-63760-5, (Algorithms and computation in mathematics 5), S. 444ff.
- Kirkpatrick, S.; Gelatt Jr., C. D. und Vecchi, M. P. (1983):** Optimization by Simulated Annealing, in: Science, Vol. 220, pp. 671-680.
- Klein, R. und Scholl, A. (2004):** Planung und Entscheidung. Vahlen, München.
- Kuhn, C. H. (2001):** Praktische Anwendungender Suchstrategie Tabu Search - ein Überblick. Seminararbeit an der Fernuniversität Hagen - Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik.
- Korf, R. E. (1985):** Depth-first iterative-deepening: An optimal admissible tree search. Artif. Intell., 27(1):97–109.
- Korte, B. und Vygen, J. (2008):** Kombinatorische Optimierung. Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-76918-7.
- LaLena, M. (2006):** Traveling Salesman Problem Using Genetic Algorithms. C# Programm mit source Code. {www.lalena.com} (06.06.2013).
- Lee, J. (1991):** Analyses of Visibility Sites on Topographic Surfaces. International Journal of Geographical Information Systems, 5(4):413-429.
- Lin, S. (1965):** Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem. Bell System Technical Journal, Volume 44, Issue 10, ISSN 0005-8580, pages 2245–2269.

- Lin, S. und Kernighan, B. W. (1973):** An effective heuristic algorithm for the travelling salesman problem. *Operations research* 31. S. 489–516.
- Lopes, F. und Monteiro, A. (2010):** Modelado cársico no concelho de Loulé. {<http://sapiens.no.sapo.pt>} (15.05.2014).
- Lourenço, L.; Fernandes, S.; Bento-Gonçalves, A.; Castro, A.; Nunes, A. und Vieira, A. (2012):** Causas de incêndios florestais em Portugal continental. Análise estatística da investigação efetuada no último quinquénio (1996 a 2010). *Cadernos de Geografia* nº 30/31 - 2011/12, Coimbra, FLUC - pp. 61-80.
- Luftverkehrs-Ordnung (1999):** § 6 Sicherheitsmindesthöhe, Mindesthöhe bei Überlandflügen nach Sichtflugregeln. FNA: 96-1-2; 9 Post- und Fernmeldewesen, Verkehrswesen, Bundeswasserstraßen 96 Luftverkehr, {<http://www.buzer.de/gesetz/3772/a53040.htm>} (16.09.2013).
- Manthey, B.; Arpe, J.; Jakoby, A. und Reischuk, R. (2004):** Theoretische Informatik und das Problem des Handlungsreisenden. Universität zu Lübeck, Institut für Theoretische Informatik. FOCUS MUL 21, Heft 3/4, Seiten 195–198.
- Maloy, M. A und Dean, D. J. (2001):** An Accuracy Assessment of Various GIS-Based Viewshed Delineation Techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67, No. 11, November 2001, pp. 1293-1298.
- Matthews, S.; Sullivan, A.; Gould, J.; Hurley, R.; Ellis, P. und Larmour J. (2010):** Evaluation of three fire detection systems. Report Number: CSE-BDA-002. Bushfire Cooperative Research Centre. CSIRO Sustainable Ecosystems. GPO Box 284, Canberra, ACT Australia.
- McAlpine, R. S. und Eiber, T. G. (1985):** The Canadian Forest Fire Weather Index System as a predictor of total soil moisture content as estimated by the Thornthwaite water balance. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 1194-1195.
- McArdle, R. E. (1936):** Some visibility factors controlling the efficient location and operation of forest fire lookout stations. *Jour. Forestry* 34: 802-811, illus.
- Mees, R. M. (1978):** Seen areas and the distribution of fires about a lookout. General Technical Report PSW-26/1978, US Department of Agriculture - Forest Service.
- Mitchell, M. (1996):** An Introduction to Genetic Algorithms. MIT Press.
- Moritz, M. A.; Parisien, M-A.; Batllori, E.; Krawchuk, M. A.; Van Dorn, J.; Ganz, D. J. und Hayhoe K. (2012):** Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere* art49, {<http://dx.doi.org/10.1890/ES11-00345.1>} (29.09.2013).
- Morris, W. G. (1946):** A preliminary survey of factors of visibility of small smokes in aerial detection. *Fire Control Notes - a periodical devoted to the technique of forest fire control* Vol.7, Nr.2. Forest Service, US Department of Agriculture.
- Mühlenbein, H. und Schlierkamp-Voosen, D. (1993):** Predictive models for the breeder genetic algorithm, I.: continuous parameter optimization. *Evol. Comput.* 1 Nr. 1, S. 25–49. – ISSN 1063–6560.
- Natário, R. (2005):** Centro de Prevenção e Detecção 015 – Tomar. Relatório Final. Abrantes. 28p.
- Natário, R. und Ribeiro, A.L. (2003):** Funcionamento da rede nacional de postos de vigia no Ribatejo e Oeste. Relatório Final 2003. DRARO. Santarém.

- Papadimitriou, C. H. (1993):** Computational Complexity. Addison Wesley Pub Co Inc; Auflage: New. (30. November 1993).
- Plano Nacional: Defesa da Floresta Contra Incêndios (2005):** Proposta Técnica de Plano Nacional de Defesa da Floresta contra Incêndio. Estudo Técnico I -Diagnóstico, Visão e Objectivos Estratégicos – aprovado pela APIF em 07/03/05. Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal.
- Portela, J. L. (1993):** Floresta e indústrias da fileira florestal. Estudos e documentos n.º 6. Caixa Geral de Depósitos. 112 p.
- Portugiesische Wikipedia:** Distrito de Beja. {http://pt.wikipedia.org/wiki/Distrito_de_Beja} (05.06.2014).
- Portugiesische Wikipedia:** Serra do Caldeirão. {http://pt.wikipedia.org/wiki/Serra_do_Caldeir%C3%A3o} (06.06.2014).
- Rechenberg, I. (1973):** Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann-Holzboog Verlag, Stuttgart.
- Rego, F. C. und Catry, F. X. (2006):** Modelling the effects of distance on the probability of fire detection from lookouts. International Journal of Wildland Fire, 2006, 15, 197–202.
- Rego, F. C.; Catry, F. X.; Montiel, C. und Karlsson, O. (2012):** Influence of territorial variables on the performance of wildfire detection systems in the Iberian Peninsula. Forest Policy and Economics, Volume 29, April 2013, Pages 26–35.
- Reis, R.M. (1998):** Determinação do risco de incêndio à escala nacional - Integração de informação proveniente de um índice meteorológico e do risco regional. Instituto de Meteorologia, Lisboa.
- Relvas, P.; Almeida, J.; Rego, F. und Catry, F. (2005):** Estudo para implementação de um sistema de videovigilância florestal no distrito de Viseu (apresentação de poster). Silva, R. e Páscoa, F. (Eds.) Actas do 5º Congresso Florestal Nacional: CD Rom (8 pp.). SPCF, Viseu.
- Resolução do Conselho de Ministros (2006):** nº 65/2006 de 26-05-2006. Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios §3.3.1. Diário da República nº 102 Série I Parte B de 26/05/2006.
- Rodríguez, E. ; Morris, C. S. ; Belz, J. E.; Chapin, E. C.; Martin, J. M.; Daffer, W. und Hensley S. (2005):** An Assessment of the SRTM Topographic Products, Technical Report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, NASA, Pasadena, California
- San-Miguel-Ayanz, J.; Ravail N.; Kelha, V. und Ollero, A. (2005):** Active Fire Detection for Fire Emergency Management: Potential and Limitations for the Operational Use of Remote Sensing. Natural Hazards (2005) 35: 361–376. DOI 10.1007/s11069-004-1797-2.
- Schrijver, A. (2005):** On the history of combinatorial optimization (till 1960). Handbooks in Operations Research and Management.
- Schroeder, D. (2004):** Evaluation of three wildfire smoke detection systems. Wildland Fire Operations Research Group. Advantage, Vol. 5 No. 24.
- Schroeder, D. (2005):** Use of a smoke generator and smoke plots to aid fire lookout personnel. Wildland Fire Operations Research Group. Advantage, Vol. 6 No. 9.
- Schwefel, H.-P. (1995):** Evolution and Optimum Seeking. John Wiley & Sons, New York.

- Shank, H. M. (1931):** Visibility maps by field sketching. *Jour. Forestry*, 29: 526-532.
- Sorensen, P.A. und Lanter, D. P. (1993):** Two Algorithms for Determining Partial Visibility and Reducing Data Structure Induced Error in Viewshed Analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59(7):1149-1160.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014a):** Zensus 2011 - Bevölkerung & Haushalte. Übersicht über Merkmale und Merkmalsausprägungen, Definitionen. Begleitmaterial Ergebnisse, {https://www.zensus2011.de/DE/Infothek/Begleitmaterial_Ergebnisse/Begleitmaterial_node.html} (12.06.2014).
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014b):** Zensus 2011 - Gebäude und Wohnungen. Übersicht über Merkmale und Merkmalsausprägungen, Definitionen. Begleitmaterial Ergebnisse, {https://www.zensus2011.de/DE/Infothek/Begleitmaterial_Ergebnisse/Begleitmaterial_node.html} (12.06.2014).
- Tedim, F.; Remelgado, R. und Carvalho, S. (2013):** Os grandes incêndios florestais em portugal desafios para a gestão do risco. VII Encontro de Geografia Física e Ambiente -Grandes incêndios florestais, erosão, degradação e medidas de recuperação dos solos.
- The World Bank (2009):** Forests Sourcebook. Practical Guidance for Sustaining forests in Development Cooperation. The World Bank e-library. {<http://siteresources.worldbank.org/EXTFORSOUBOOK/Resources/completoforestssourcebookapril2008.pdf>} (16.06.2014).
- The World Bank (2011):** World Development Indicators – Forest area (% of land area). World DataBank, {http://search.worldbank.org/quickview?view_url=http%3A%2F%2Fdatbanksearch.worldbank.org%2FDataSearch%2FLoadReport.aspx%3Fdb%3D2%26cntrycode%3D%26sercode%3DAG.LND.FRS.T.ZS%26yr%3DYR2011www.worldbank.org} (12.09.2013).
- Thies, C.; Rosoman, G.; Cotter, J. und Meaden, S. (2011):** Intact forest landscapes - Why it is crucial to protect them from industrial exploitation. Greenpeace Research Laboratories, Technical Note, no. 5.
- Trejo, D. A. R. (1996):** Detección. In *Incendios forestales*. Universidad Autónoma Chapingo, México, pp. 335-339.
- Turner, J. A. und Lawson, B. D. (1978):** Weather in the Canadian Forest Fire Danger Rating System. A user guide to national standards and practices. Victoria, British Columbia: Environment Canada, Centre de recherches forestières du Pacifique.
- Van der Linden, P. und Mitchell, J. F. B. (2009):** ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Technical report (FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK: Met Office Hadley Centre, http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf) (30.09.2013).
- Van Wagner, C.E. (1987):** Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35, Ottawa.
- Verde, J. C. (2008):** Avaliação da perigosidade de incêndio florestal. Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität von Lissabon.

- Viegas, D. X.; Sol, B.; Bovio, G.; Nosenzo, A. und Ferreira, A. D. (1994):** Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe. Proceedings of the II International Conference on Forest Fire Research, pp.571-590, Coimbra.
- Viegas, D. X.; Bovio, G.; Ferreira, A.; Nosenzo A. und Sol, B. (1999):** Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe. International Journal of Wildland Fire 9(4): 235-246.
- Viegas, D. X.; Reis, R. M.; Cruz M. G. und Viegas M. T. (2004):** Calibração do Sistema Canadiano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal. Silva Lusitana 12(1): 77 - 93, EFN, Lisboa. Portugal.
- Wegener, I. (2005):** Simulated Annealing Beats Metropolis in Combinatorial Optimization. In: Lecture Notes in Computer Science. 3580, Springer, Berlin/Heidelberg 2005, ISBN 978-3-540-27580-0, S. 589-60.
- Whitley, D. (2001):** An overview of evolutionary algorithms: Practical issues and common pitfalls. Information and Software Technology Special Issue on Software Engineering using Metaheuristic Innovative Algorithms.
- Windisch, A. (2007):** Vergleichende Analyse von Genetischen Algorithmen und der Particle Swarm Optimization für den Evolutionären Strukturtest. Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin.
- Wood, J. D. und Fisher, P. F. (1993):** Assessing interpolation accuracy in elevation models. IEEE Computer Graphics And Applications, 13:48–56.
- WWF (2011):** Wälder in Flammen. {<http://www.wwf.de/waelder-in-flammen/>} (29.09.2013).
- Zimmerman, E. W. (1969):** Forest Fire Detection. Forest Service. U.S. Department of Agriculture. 25p.

9 Anhang

9.1 CLC Klassen mit Nomenklatur und CLC Code

Level 1	Level 2	Level 3
1 Artificial surfaces	11 Urban fabric	111 Continuous urban fabric
		112 Discontinuous urban fabric
	12 Industrial, commercial and transport units	121 Industrial or commercial units
		122 Road and rail networks and associated land
123 Port areas		
124 Airports		
13 Mine, dump and construction sites	131 Mineral extraction sites	
	132 Dump sites	
	133 Construction sites	
	14 Artificial, non-agricultural vegetated areas	141 Green urban areas
142 Sport and leisure facilities		
2 Agricultural areas	21 Arable land	211 Non-irrigated arable land
		212 Permanently irrigated land
		213 Rice fields
	22 Permanent crops	221 Vineyards
		222 Fruit trees and berry plantations
		223 Olive groves
	23 Pastures	231 Pastures
	24 Heterogeneous agricultural areas	241 Annual crops associated with permanent crops
242 Complex cultivation patterns		
243 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation		
244 Agro-forestry areas		
3 Forest and semi-natural areas	31 Forests	311 Broad-leaved forest
		312 Coniferous forest
		313 Mixed forest
	32 Scrub and/or herbaceous vegetation associations	321 Natural grasslands
		322 Moors and heathland
		323 Sclerophyllous vegetation
		324 Transitional woodland-shrub
	33 Open spaces with little or no vegetation	331 Beaches, dunes, sands
		332 Bare rocks
		333 Sparsely vegetated areas
		334 Burnt areas
		335 Glaciers and perpetual snow
4 Wetlands	41 Inland wetlands	411 Inland marshes
		412 Peat bogs
	42 Maritime wetlands	421 Salt marshes
	422 Salines	
	423 Intertidal flats	
5 Water bodies	51 Inland waters	511 Water courses
		512 Water bodies
	52 Marine waters	521 Coastal lagoons
	522 Estuaries	
	523 Sea and ocean	

Tabelle 11: CLC Klassen mit Nomenklatur und CLC Code

Flugzone: LPPM Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 50. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
1	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	85	79	493.966
2	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	85	79	493.966
3	100.000	3	5	10.000.000	5	90	0	85	78	499.886
4	20.000	3	5	10.000.000	7	90	0	85	78	491.005
5	50.000	4	5	5.000.000	6	90	0	85	76	485.116
6	15.000	3	6	10.000.000	5	90	0	85	75	480.463
7	10.000	3	5	10.000.000	4	90	0	85	73	473.878
8	10.000	3	5	10.000.000	5	85	0	85	75	482.425
9	50.000	3	6	7.000.000	6	90	0	85	77	493.092
10	110.000	4	5	10.000.000	6	85	0	85	83	499.104
Flugzone: LPPM Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 75. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
11	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	86	80	490.440
12	20.000	3	5	10.000.000	5	90	0	86	83	485.994
13	20.000	3	5	5.000.000	10	90	0	86	85	498.473
14	30.000	3	5	5.000.000	10	90	0	86	85	500.036
15	20.000	3	5	5.000.000	15	90	0	86	81	472.949
16	20.000	6	5	5.000.000	10	90	0	86	84	495.154
17	20.000	3	5	5.000.000	11	90	0	86	84	489.228
18	20.000	3	5	5.000.000	8	90	0	86	82	475.471
19	20.000	3	5	5.000.000	9	90	0	86	82	482.209
20	20.000	3	8	5.000.000	10	90	0	86	82	479.491
Flugzone: LPPM Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 100. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
21	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	83	80	470.472
22	20.000	3	5	10.000.000	5	90	0	83	83	488.151
23	20.000	3	5	5.000.000	10	90	0	83	83	478.346
24	30.000	3	5	5.000.000	10	90	0	83	82	475.775
25	10.000	5	5	10.000.000	5	90	0	83	82	484.786
26	100.000	3	5	10.000.000	5	90	0	83	83	466.324
27	100.000	4	5	10.000.000	5	90	0	83	83	479.126
28	100.000	3	5	10.000.000	10	90	0	83	83	477.170
29	150.000	2	5	10.000.000	15	90	0	83	83	475.156
30	200.000	10	5	10.000.000	20	90	0	83	83	476.455

Tabelle 12: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m]). Die optimalen Pfade sind blau eingefärbt

9.2 TSP Berechnungsvarianten

Flugzone: LPPM Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 125. Zelle											
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]	
31	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	85	78	496.451	
32	20.000	3	5	10.000.000	5	90	0	85	78	479.179	
33	150.000	3	5	5.000.000	5	90	0	85	83	498.488	
34	180.000	3	5	5.000.000	5	90	0	85	77	498.678	
35	150.000	3	5	10.000.000	10	90	0	85	82	499.503	
36	150.000	3	5	10.000.000	6	90	0	85	82	493.529	
37	150.000	3	7	5.000.000	5	90	0	85	81	493.386	
38	160.000	3	5	10.000.000	5	85	0	85	80	496.636	
39	150.000	10	5	5.000.000	6	90	0	85	79	482.464	
40	150.000	4	4	5.000.000	5	85	0	85	78	497.313	
Flugzone: LPPM Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 150. Zelle											
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]	
41	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	83	80	483.694	
42	20.000	3	5	10.000.000	5	90	0	83	82	497.167	
43	100.000	3	5	5.000.000	5	90	0	83	82	490.147	
44	100.000	3	5	5.000.000	6	90	0	83	82	488.022	
45	100.000	3	5	5.000.000	7	90	0	83	81	472.003	
46	150.000	3	5	5.000.000	6	90	0	83	80	475.317	
47	100.000	4	5	5.000.000	6	90	0	83	82	489.617	
48	110.000	3	5	5.000.000	6	90	0	83	81	487.145	
49	150.000	4	5	5.000.000	6	90	0	83	81	497.641	
50	100.000	3	6	5.000.000	6	85	0	83	82	498.043	
Flugzone: LPFR Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 50. Zelle											
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]	
51	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	68	68	446.197	
52	20.000	3	5	10.000.000	5	90	0	68	68	435.770	
53	20.000	3	5	5.000.000	10	90	0	68	68	427.699	
54	30.000	3	5	5.000.000	10	90	0	68	68	425.226	
55	20.000	3	5	5.000.000	15	90	0	68	68	422.617	
56	20.000	6	5	5.000.000	15	90	0	68	68	422.076	
57	30.000	6	5	5.000.000	15	90	0	68	68	420.830	
58	40.000	6	5	5.000.000	15	90	0	68	68	420.235	
59	50.000	6	5	5.000.000	15	90	0	68	68	415.012	
60	60.000	6	5	5.000.000	15	90	0	68	68	411.792	

Tabelle 13: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m])

Flugzone: LPFR Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 75. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
61	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	65	65	417.377
62	100.000	3	5	5.000.000	5	90	0	65	65	385.766
63	110.000	3	5	5.000.000	5	90	0	65	65	385.766
64	110.000	4	5	5.000.000	5	90	0	65	65	389.339
65	20.000	3	5	5.000.000	15	90	0	65	65	386.273
66	20.000	6	6	5.000.000	15	90	0	65	65	385.871
67	30.000	6	5	5.000.000	15	90	0	65	65	386.206
68	40.000	6	5	5.000.000	15	90	0	65	65	385.870
69	50.000	6	6	5.000.000	15	90	0	65	65	393.107
70	60.000	6	5	5.000.000	15	85	0	65	65	397.454
Flugzone: LPFR Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 100. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
71	20.000	3	5	10.000.000	5	90	0	68	68	408.992
72	20.000	3	5	5.000.000	10	90	0	68	68	426.181
73	30.000	3	5	5.000.000	10	90	0	68	68	418.256
74	20.000	3	5	10.000.000	6	90	0	68	68	425.406
75	80.000	10	5	10.000.000	5	90	0	68	68	423.771
76	20.000	3	5	10.000.000	5	80	0	68	68	419.133
77	20.000	2	5	10.000.000	5	90	0	68	68	431.567
78	20.000	3	5	10.000.000	5	90	10	68	68	421.854
79	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	68	68	426.193
80	10.000	3	5	10.000.000	15	90	0	68	68	436.182
Flugzone: LPFR Flugpfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 125. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
81	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	65	65	414.745
82	200.000	3	5	10.000.000	15	90	0	65	65	393.146
83	200.000	3	5	10.000.000	10	90	0	65	65	391.395
84	200.000	3	5	10.000.000	5	90	0	65	65	398.559
85	200.000	3	5	10.000.000	11	90	0	65	65	391.551
86	200.000	3	5	10.000.000	9	90	0	65	65	394.298
87	200.000	4	5	10.000.000	11	90	0	65	65	391.551
88	250.000	3	5	10.000.000	10	90	0	65	65	393.146
89	200.000	2	5	10.000.000	10	90	0	65	65	399.542
90	200.000	4	5	10.000.000	10	90	0	65	65	397.943

Tabelle 14: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m]). Die optimalen Pfade sind blau eingefärbt

Flugzone: LPFR Flugfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 150. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
91	10.000	3	5	10.000.000	5	90	0	67	67	397.095
92	20.000	3	5	10.000.000	5	90	0	67	67	401.960
93	200.000	3	5	10.000.000	5	90	0	67	67	385.610
94	210.000	3	5	10.000.000	5	90	0	67	67	390.201
95	190.000	3	5	10.000.000	5	90	0	67	67	375.443
96	190.000	3	5	10.000.000	6	90	0	67	67	380.246
97	190.000	3	5	10.000.000	4	90	0	67	67	384.399
98	180.000	3	5	10.000.000	5	90	0	67	67	384.832
99	190.000	3	5	10.000.000	10	90	0	67	67	377.754
100	190.000	4	5	10.000.000	8	90	0	67	67	381.762
Flugzone: LPPM Flugfadklasse: 120 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 100. Zelle										
Pfad-Nr	Population size	Mutation	Group size	Max generations	# Nearby WP	# Near WP Odds	Random Seed	# Wegpunkte	# Wegpunkte nach TSP	Pfadlänge [m]
101	100.000	3	5	10.000.000	5	90	0	83	31	220.636
Flugzone: LPPM Flugfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 11.08. # footprint2 Zellen: Jede 100. Zelle										
102	100.000	3	5	10.000.000	5	90	0	49	49	395.961
Flugzone: LPPM Flugfadklasse: 120 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 11.08. # footprint2 Zellen: Jede 100. Zelle										
103	100.000	3	5	10.000.000	5	90	0	49	21	199.509
Flugzone: LPPM Flugfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 16.08. # footprint2 Zellen: Jede 100. Zelle										
104	100.000	3	5	10.000.000	5	90	0	14	14	191.086
Flugzone: LPPM Flugfadklasse: 120 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 16.08. # footprint2 Zellen: Jede 100. Zelle										
105	100.000	3	5	10.000.000	5	90	0	14	14	191.086
Flugzone: LPFR Flugfadklasse: 120 NM Brandrisikoszenarium: CRIF 2011 # footprint2 Zellen: Jede 75. Zelle										
22	100.000	3	5	5.000.000	5	90	0	65	31	220.289
Flugzone: LPFR Flugfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 11.08. # footprint2 Zellen: Jede 75. Zelle										
24	100.000	3	5	5.000.000	5	90	54	54	82	364.637
Flugzone: LPFR Flugfadklasse: 120 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 11.08. # footprint2 Zellen: Jede 75. Zelle										
26	100.000	3	5	5.000.000	5	90	54	27	83	220.777
Flugzone: LPFR Flugfadklasse: 270 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 16.08. # footprint2 Zellen: Jede 75. Zelle										
28	100.000	3	5	5.000.000	5	90	0	23	23	217.027
Flugzone: LPFR Flugfadklasse: 120 NM Brandrisikoszenarium: ICRIF 16.08. # footprint2 Zellen: Jede 75. Zelle										
30	100.000	3	5	5.000.000	5	90	0	23	23	217.027

Tabelle 15: FPO Programmeinstellungen und Ergebnisse der TSP Berechnungen (Anzahl der Wegpunkte nach der TSP Kalkulation und die Pfadlänge [m]. Die optimalen Pfade sind blau eingefärbt

9.3 Flugpfade und Sichtbarkeiten der Alternativrouten

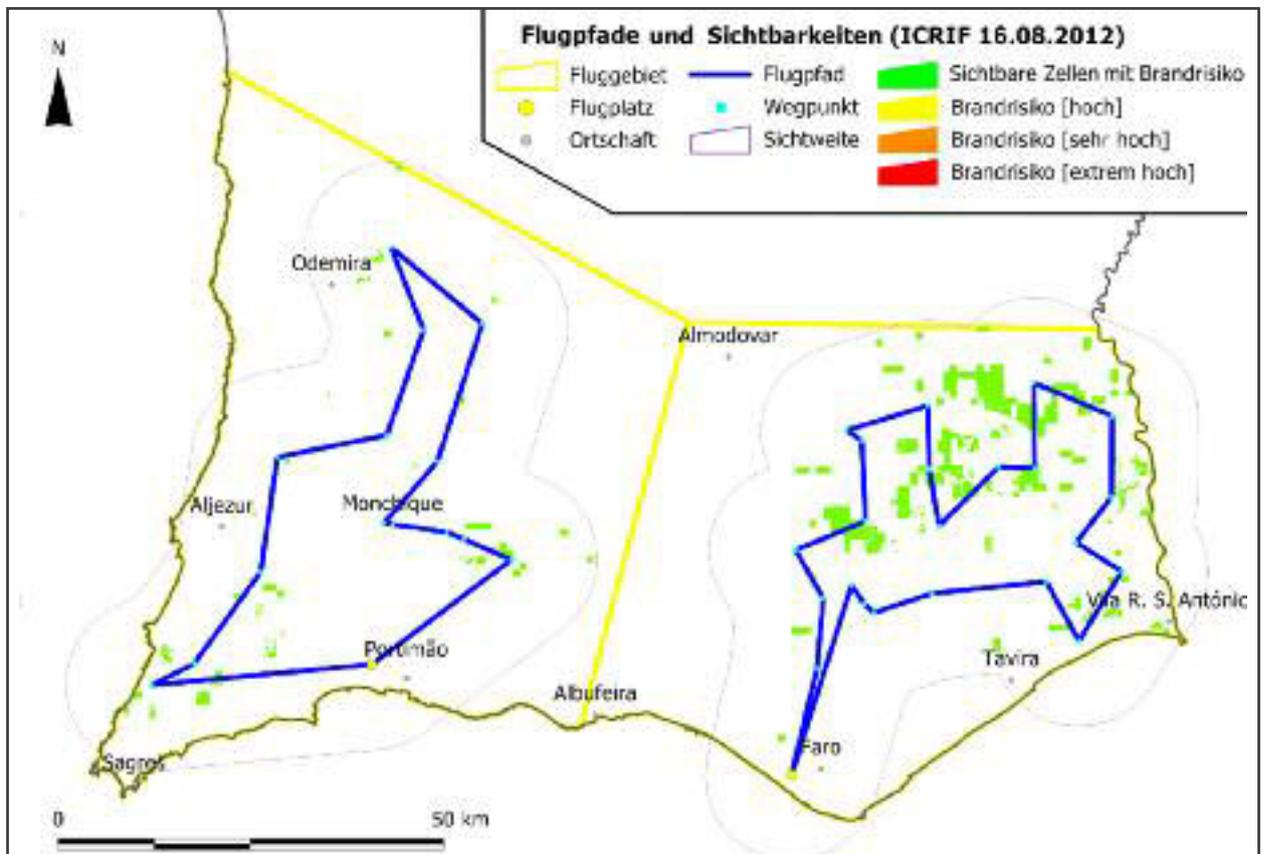
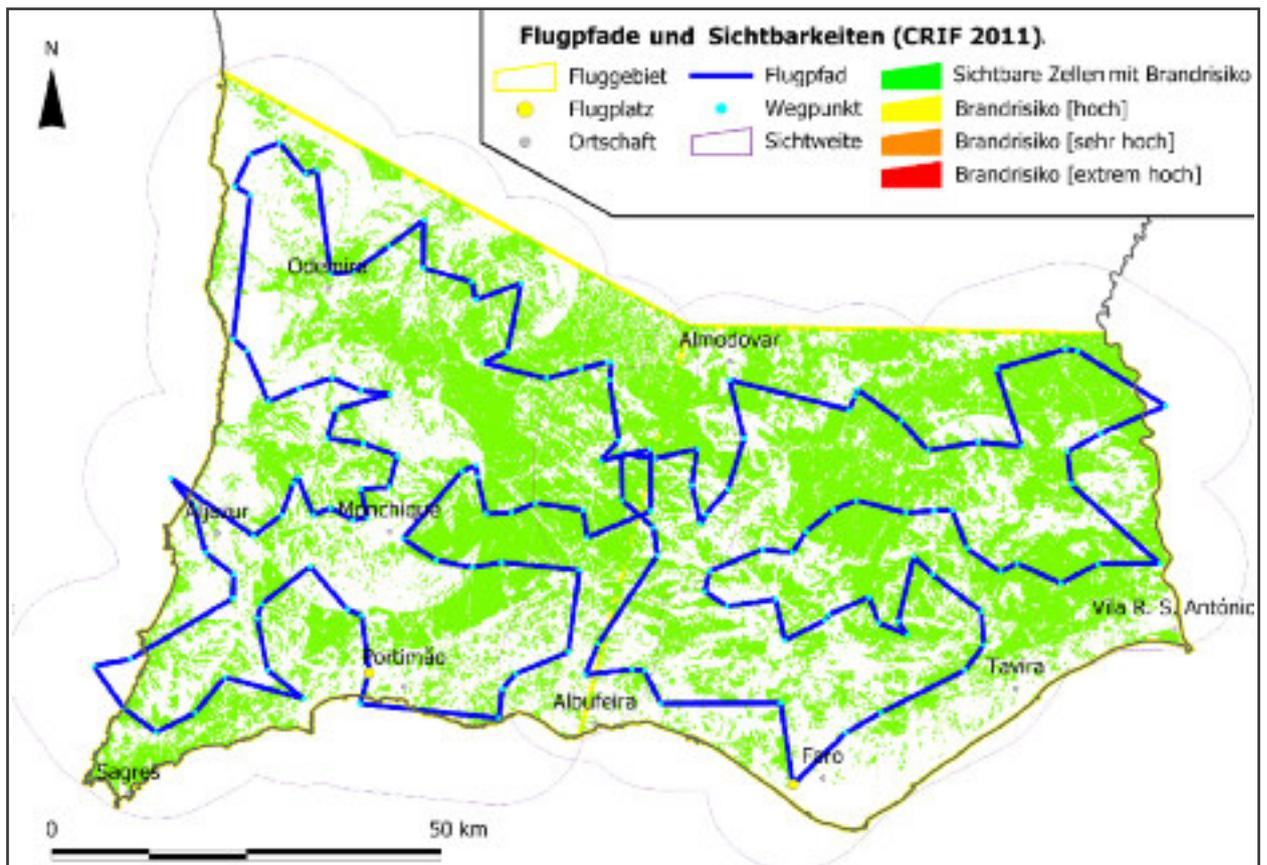


Abbildung 57 (oben) und 58 (unten): Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugpfade der Klasse 270 NM (CRIF 2011 und ICRIF 16.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

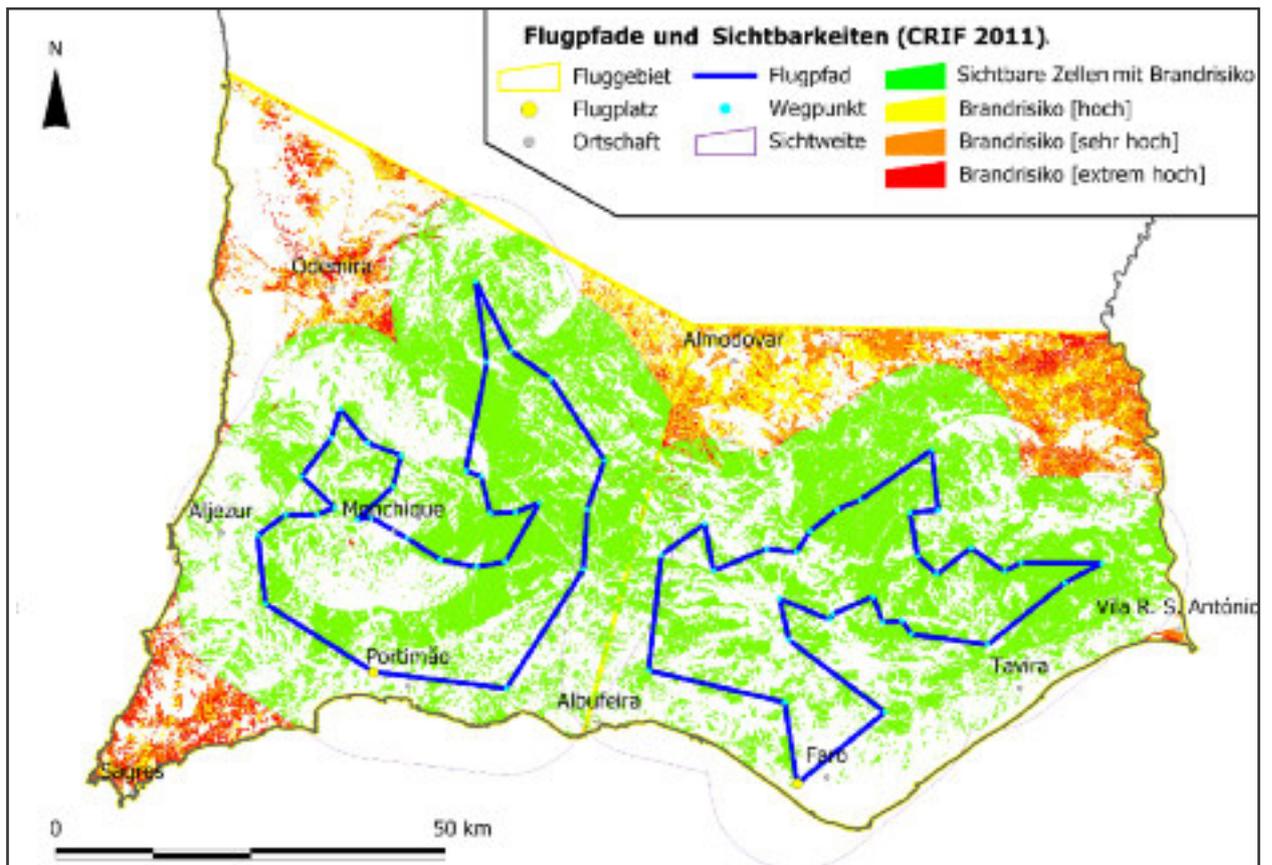


Abbildung 59: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugfahde der Klasse 120 NM (CRIF 2011). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt

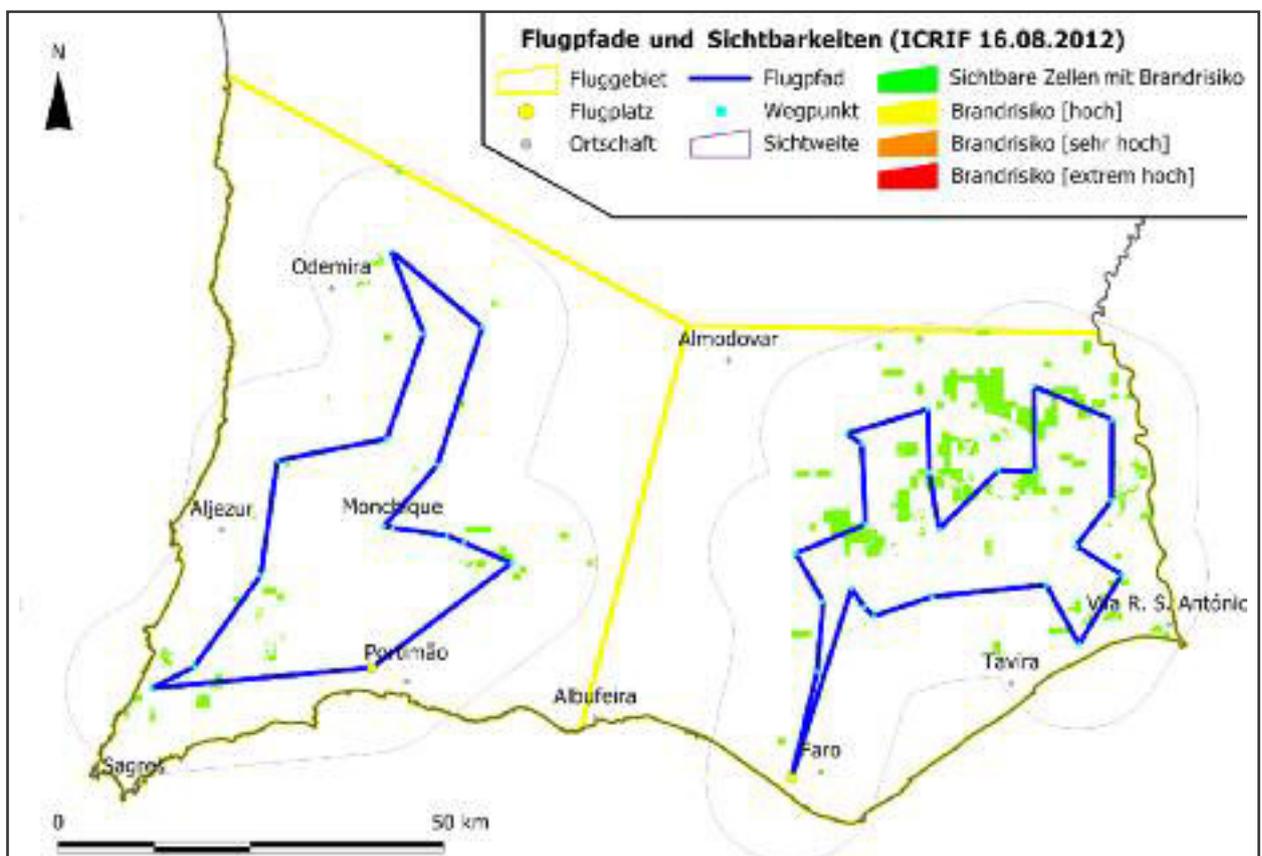


Abbildung 60: Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalysen für die Flugfahde der Klasse 120 NM (ICRIF 16.08.2012). Vom Luftfahrzeug aus sichtbare Gebiete mit erhöhtem Waldbrandrisiko sind grün eingefärbt