Impressum:

Angewandte Fernerkundung mit der Google Earth Engine

Georg Stauch (Hrsg.)

Geographisches Institut der RWTH Aachen

Templergraben 55

52056 Aachen

Aachen, 2024

120 S.

Verfügbar über das institutionelle Repositorium der RWTH Aachen University:

DOI: 10.18154/RWTH-2024-03408

CC BY 4.0 Deed | Attribution 4.0 International | Creative Commons

Dieser Sammelband wird lizenziert unter der CC-BY Lizenz, ausgenommen hiervon sind Teile oder Werke, die ausdrücklich unter einer anderen Lizenz stehen.

Buschbrandmonitoring auf Grundlage von optischen Fernerkundungsdaten im Bundesstaat Victoria (Australien) – Vegetationsregeneration auf Brandflächen

Eileen Berg, Justus Buschmeier und Tobias Hüsgen

Abstract

Buschbrände sind integrale Bestandteile des natürlichen biologischen Zyklus des australischen Bundesstaates Victoria und prägen die Landschaft sowie dessen Vegetation maßgeblich. Die Analyse mittels MODIS-Daten (MCD43A4_006_NDVI) hat gezeigt, dass zwischen den beobachteten Landnutzungsklassen (Grasflächen, Buschflächen, Waldflächen) im Jahresverlauf saisonale Schwankungen zu erkennen sind, die sich hinsichtlich ihrer Amplitude, aber auch ihrer Wellenlänge stark voneinander unterscheiden. Durch die Verschneidung mit Daten zu Brandereignissen (FireCCI51: MODIS Fire_cci Burned Area Pixel Product, Version5.1) und Klimadaten (ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY, UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY) konnte zudem gezeigt werden, dass sich Grasflächen nach einem Brandereignis schneller erholen als Busch- und Waldbestände. Das Recovery-Verhalten eines Pflanzenbestandes ist demnach abhängig von der Vegetationsart, der Stärke des Brandereignisses sowie den klimatischen Bedingungen während und nach eines Brandereignisses.

1 Einleitung

Die Brandereignisse in Australien sind Teil eines natürlichen biologischen Zykluses und notwendig für die dort bestehenden Ökosysteme (Sharples et al. 2016). Dennoch verursachen sie an anthropogener Infrastruktur und Bebauung jedes Jahr erhebliche Schäden (State Government of Victoria 2023a). Da sie ein schnelles Ausbreitungsniveau haben und lebensgefährlich sind, ist die Detektion und Bekämpfung von Brandereignissen, insbesondere in anthropogen dicht besiedelten oder in wirtschaftlich wertvollen Gebieten, eine wesentliche Aufgabe der Bundesstaaten in Australien (Sharples et al. 2016). In dieser Studie liegt der Fokus auf dem Bundesstaat Victoria, welcher beim Management der Brandereignisse das Office of Bushfire Risk Management sowie speziell für die Bekämpfung von Waldbränden das Forest Fire Management Victoria eingerichtet hat (State Government of Victoria 2023c; 2023d). Die Dokumentation und Analyse der Brandereignisse in Australien hat auch in der Wissenschaft eine hohe Relevanz und Aktualitätsbezug. Neben der Analyse von Auswirkungen auf Ökosysteme

werden die Themenbereiche seit Jahren wesentlich diverser. Grund ist die Abschätzung des Klimawandels auf die Frequenz und Magnitude von Brandereignissen (Biddle et al. 2020, Sharples et al. 2016, Vardoulakis et al. 2020), aber ebenso das Aufkommen und die Verarbeitung von Remote Sensing Daten bei der Dokumentation und Analyse von Brandereignissen (Demir 2020, Partheepan et al. 2023, Sharma et al. 2022, Sharma et al. 2023). Auch die Regierungen setzen zunehmend Remote Sensing Daten für die Detektion und Aufarbeitung von Brandereignissen ein (McRae 2022, s. a. AIDR 2022).

Diese Studie knüpft an die Thematik und den Stand der Forschung an. Insbesondere an die Studie von Sharma et al. (2023). Neben der Bestimmung der Brandintensität mit Hilfe von zwei unterschiedlichen Indizes, ist die Forschungsfrage der Sharma-Studie die Ermittlung der Vegetationsregeneration nach einem extremen Brandereignis anhand des normalized difference vegetation index (NDVI) sowie die Einordnung der Ergebnisse in einen klimatischen und topographischen Bezug. Die Methoden und Ergebnisse von Sharma et al. (2023), insbesondere zur Vegetationsregneration, werden in diese Studie aufgenommen und durch das wesentlich großräumigere skalierte Untersuchungsgebiet des Bundesstaates Victoria in einen neuen räumlichen Kontext gestellt. Die Google Earth Engine (GEE) ist dabei Hauptbestandteil für die Datenbeschaffung von Brandflächen, Klimadaten sowie der Ermittlung des NDVIs.

Dabei sollen folgende Forschungsfragen beantworten werden:

1) *Inwiefern lassen sich Brandereignisse und die vegetative Regeneration für die Landnutzungsklassen Gras, Busch und Wald über eine NDVI-Zeitreihe ermitteln?*
2) *Welchen Einfluss nehmen zeitliche und räumliche mesoklimatische Verhältnisse auf die Entstehung von Bränden und die vegetative Regeneration für die Landnutzungsklassen Gras, Busch und Wald?*

2 Untersuchungsgebiet

2.1 Räumliche Einordnung

Das Untersuchungsgebiet dieser Studie stellt der Bundesstaat Victoria im Südosten Australiens dar, welcher im Norden an New South Wales, im Westen an South Australia und im Süden an die Tasmanische See angrenzt (Abb. 1). Die Reliefenergie in diesem Gebiet liegt zwischen - 61 und 1.951 m ü. NHN. Der Mount Bogong ist der höchstgelegene Gipfel dieses Gebietes und liegt im Gebirgszug des Great Dividing Range. Die bis zu - 61 m tiefen Werte sind anthropogenen Ursprungs, da in Victoria Braunkohle in Tagebauen abgebaut wird (Abb. 1, Rees 1962:61f.). Mit 6,7 Millionen Einwohner weist Victoria die

zweithöchste Bevölkerungsdichte der Bundesstaaten Australiens auf (ABS 2022). Die bevölkerungsreichste Stadt mit 5 Millionen Einwohnern ist die Hauptstadt Melbourne (ABS 2021-2022).

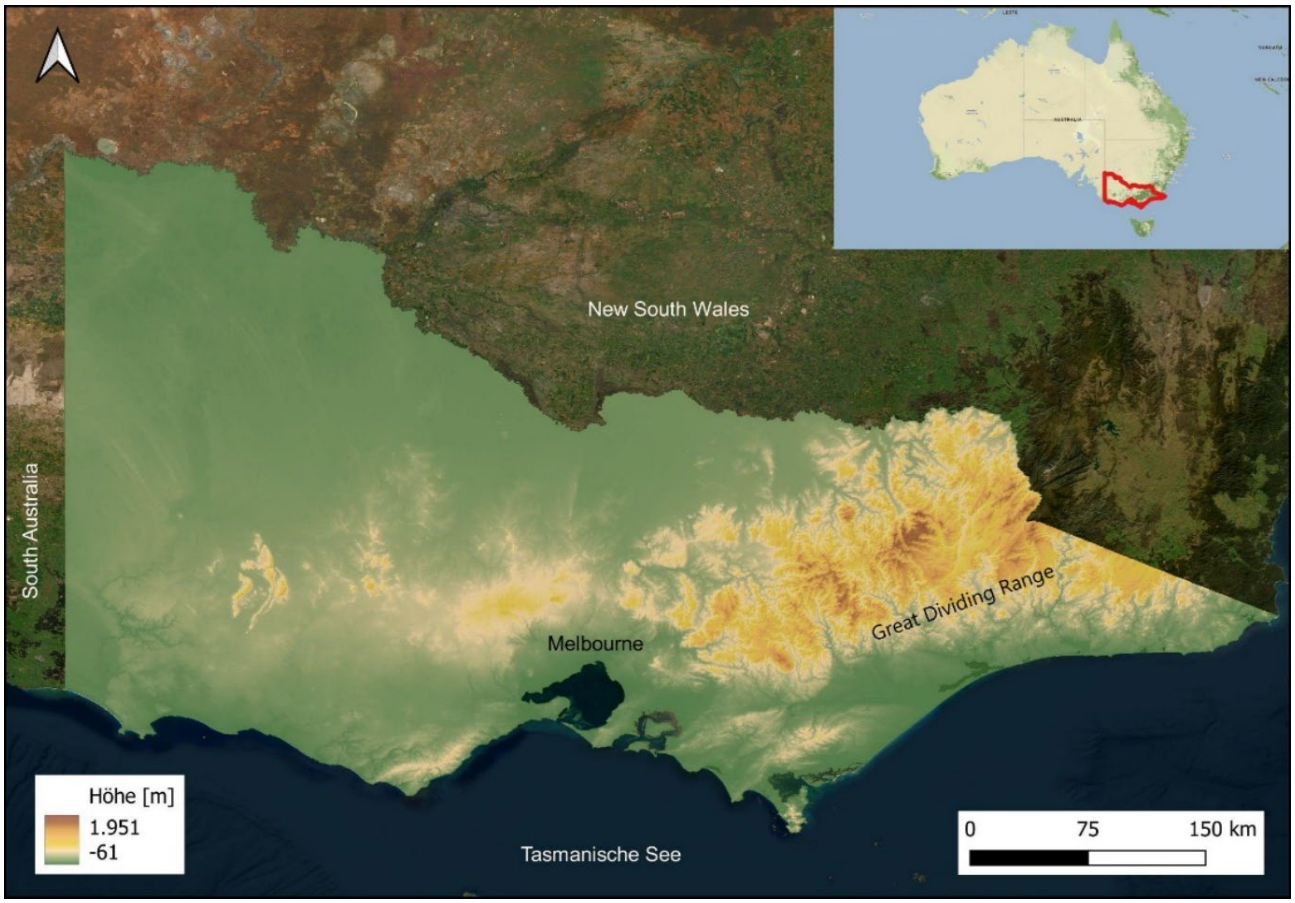

Abb. 1: Reliefkarte des Bundesstaates Victoria. Google Earth Engine (2023). Datensatz: CGIAR/SRTM90_V4. Kartenhintergrund: Esri Satellite, Stamen Terrain, Copyright © 2020 Esri und dessen Lizenzgeber. Alle Rechte vorbehalten.

2.2 Jahreszeitliche und räumliche klimatische Verhältnisse

Eine übersichtliche Klimaklassifikation bietet das modifizierte Modell von Köppen-Geiger, welches Victoria in drei Bereiche gliedert (Peel et al. 2007):

- gemäßigte Breite mit warmen Sommern (Cfb) am Küstensaum,
- aride kalte Steppe (BSk), welche die großräumige inländische heiße Steppe und heiße Wüste von den gemäßigten Breiten abgrenzt sowie
- gemäßigte Breite mit heißen Sommern (Cfa) zwischen Küstensaum und ari-der kalter Steppe.

Die Klimaklassifikations-Einteilung nach Köppen-Geiger im Untersuchungsgebiet wird weiter gestützt durch die Abbildung 2, welche gemittelte Temperatur- und Niederschlagsdaten innerhalb von 20 Jahren visuell darstellt. Demnach sind die Küstenbereiche und insbesondere der Great Dividing Range Gebirgszug kühler sowie deutlich feuchter als das Hinterland.

2.3 Landnutzung

Die Landnutzung bzw. die Vegetationsbedeckung in Victoria ist in Abbildung 4 dargestellt. Mit einer Flächengröße von ca. 227 km² kann Victoria in 9 Landnutzungsklassen nach dem Datensatz der ESA Worldcover (10m v200) eingeteilt werden. Dabei sind im Untersuchungsgebiet hauptsächlich die Landnutzungen Wald und Gras

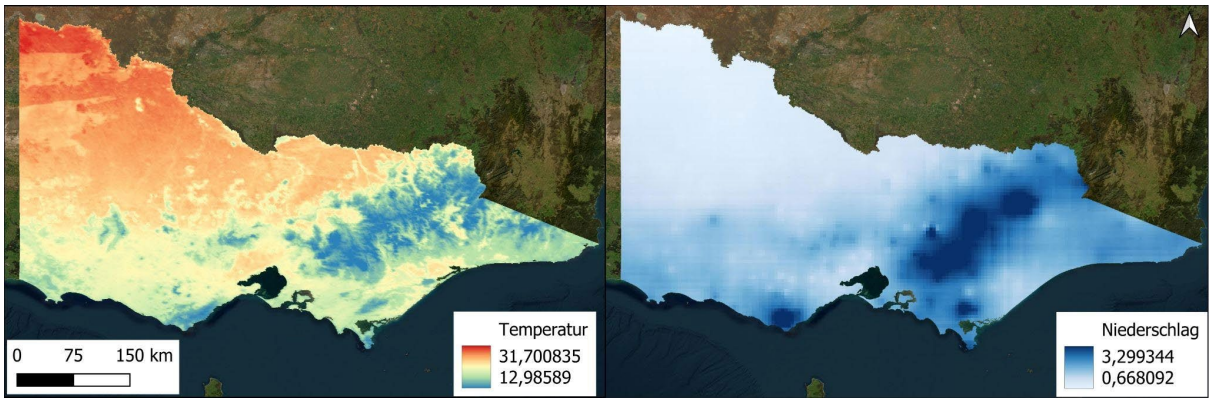

Abb. 2: Auf 20 Jahre gemittelte visuelle Darstellung von Temperatur und Niederschlag im Untersuchungsgebiet. Google Earth Engine (2023). Datensätze: MODIS/006/MOD11A2, UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY. Kartenhintergrund: Esri Satellite, Copyright © 2020 Esri und dessen Lizenzgeber. Alle Rechte vorbehalten.

Abbildung 3 zeigt ein Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Victoria mit Niederschlags- und Temperaturdaten über 20 Jahre gemittelt. Im Winter (Juni-August) fallen die höchsten Niederschlagssummen von teilweise mehr als 60 mm. Gemittelt liegen die Monate April bis November in einem humiden Klima, der Sommer und der Anfang vom Herbst (Dezember bis März) in einem ariden Klima. Hier steigen die gemittelten Temperaturen auf bis zu 36 °C an, wobei sie im Winter auch unter 10 °C erreichen. Der Niederschlag findet im Dezember mit knapp über 30 mm sein Minimum.

mit jeweils ca. 34 % an der Gesamtfläche vertreten. Die aride kalte Steppe im Nordwesten von Victoria wird großflächig ackerbaulich genutzt. Das Ackergebiet wird an der westlichen Grenze zum Bundesstaat South Australia jedoch durch Buschvegetation aufgeteilt.

Weiterhin umrahmt der urbane Raum der Hauptstadt Melbourne die Bucht Port Phillip im Süden des Untersuchungsgebietes und grenzt in seiner maximalen nordöstlichen Ausdehnung unmittelbar an die Ausläufer des Great Dividing Range.

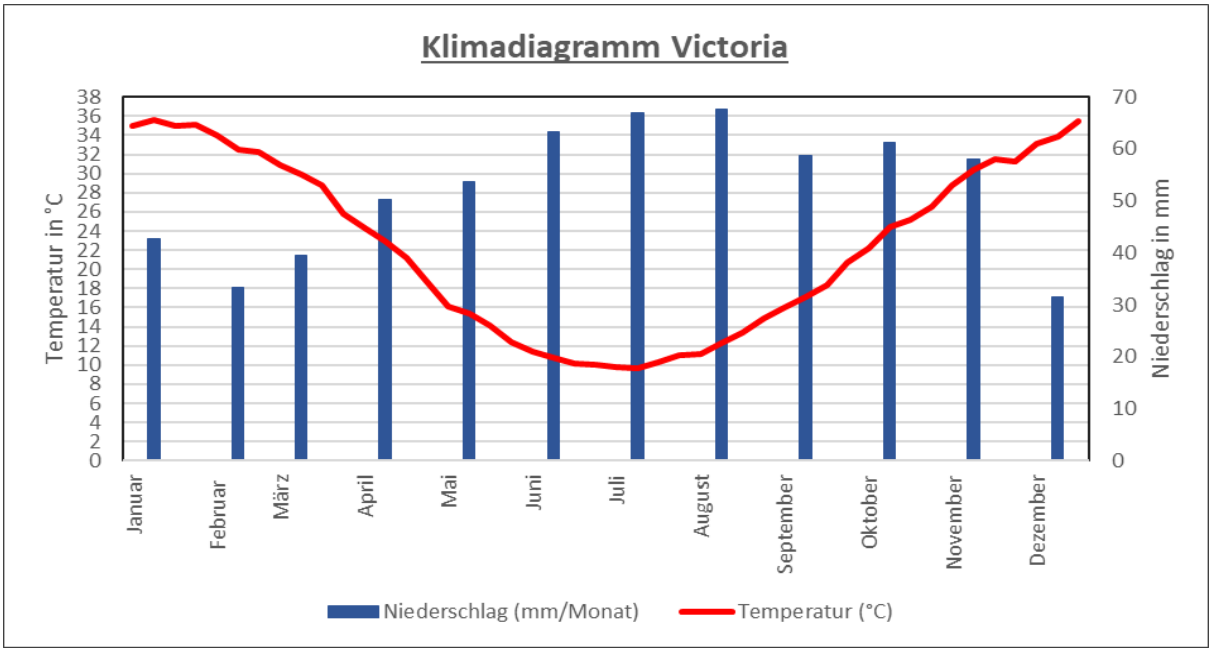

Abb. 3: Auf 20 Jahre gemittelte Niederschlags- und Temperaturverläufe innerhalb eines Jahres im Untersuchungsgebiet. Google Earth Engine (2023). Datensätze: MODIS/006/MOD11A2, UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY.

Kleinere Siedlungen sind insbesondere an der Küste vorzufinden. Lediglich die Städte Ballarat, Bendigo und Shepparton sind im peripheren, meist kleinräumig, ackerbaulich oder als Grasland genutzten Hinterland von Victoria in Abbildung 4 zu erkennen.

2.4 Vegetationsbedeckung

Neben der Betrachtung der Landnutzung ist auch die Analyse der vorkommenden terrestrischen Bioregionen bzw. Vegetationseinheiten für die Fragestellung dieser Studie relevant. Bedingt durch eine vielfältige Geodiversität, ist Victoria nach dem State Government (2023b) in 28 Bioregionen unterteilt. Eine ausführliche Dokumentation der bestehenden rezenten Vegetationsvorkommen ist der Literatur von Beadle (1981) sowie dem State Government (2023b) zu entnehmen.

Wie bereits in Abbildung 4 zu sehen ist, befindet sich das Buschland lediglich an der westlichen Grenze zu South Australia, welches als Lowan Mallee (LoM) Bioregion ausgewiesen ist. Kennzeichnend sind hier wandernde Dünen, welche mit Vegetationsgesellschaften der Mallee-Vegetation bewachsen sind. Typisch sind Arten aus der Familie Eucalyptus (trockener Flügel) oder auch Callitris (The State of Victoria Department of Sustainability and Environment 2004a). Die Waldgebiete sind großflächig im Great Dividing Range Gebirgszug vorzufinden. Durch die teilweise kleinräumigen Unterschiede der Höhenlagen lassen sich 3 unterschiedliche Bioregionen ableiten (nach State Government of Victoria 2023b):

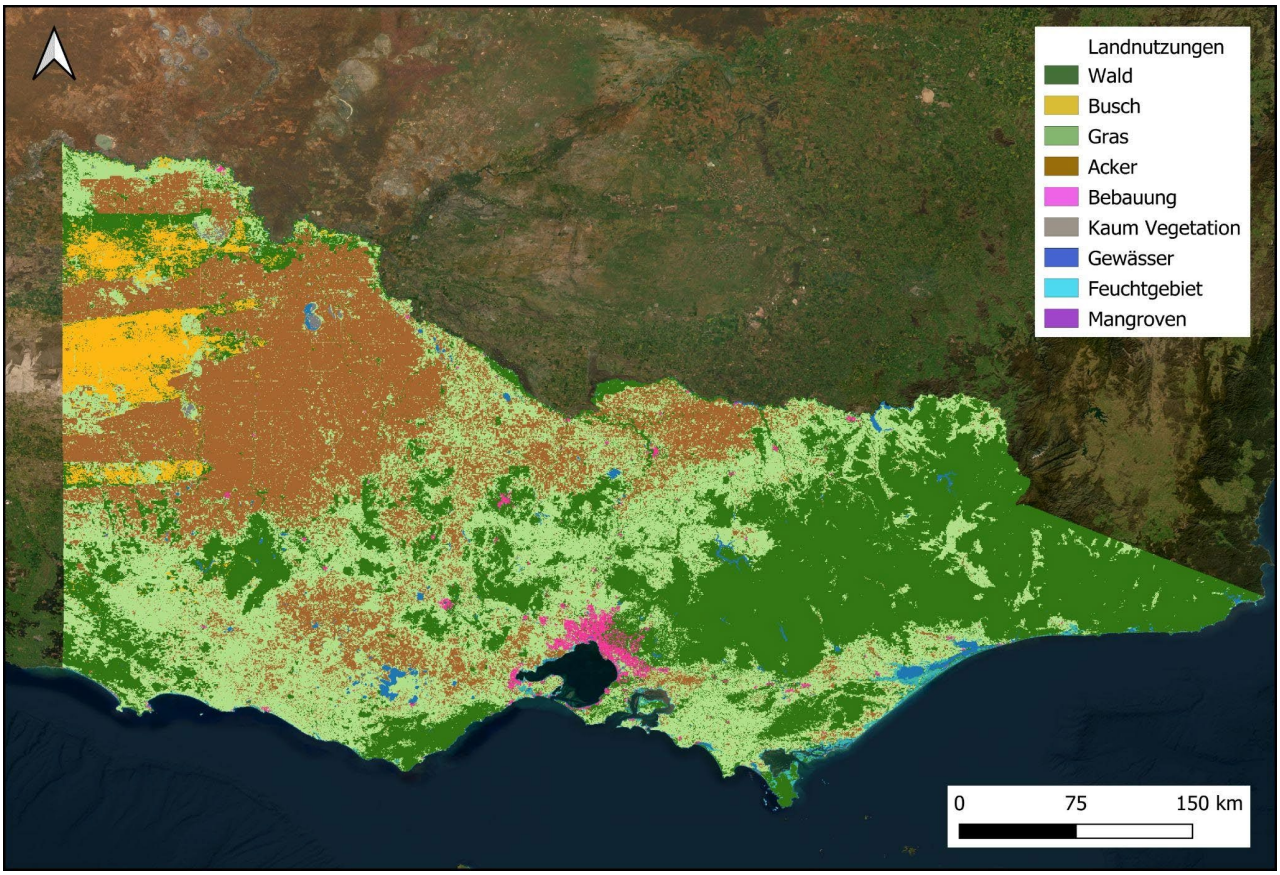

Abb. 4: Einteilung des Untersuchungsgebietes in 9 Landnutzungsklassen. Google Earth Engine (2023). Datensatz: ESA WorldCover 10m v200. Kartenhintergrund: Esri Satellite, Copyright © 2020 Esri und dessen Lizenzgeber. Alle Rechte vorbehalten.

- Victorian Alps auf den Gipfeln und Hochplateaus, charakteristisch für diese Bioregion sind subalpine Vegetationsgesellschaften bspw. aus der Familie Eucalyptus (nasser/kalter Flügel).
- Highlands - Southern Fall sind gekennzeichnet durch strauchige Trockenwälder und feuchte Wälder sowie kühltemperierte Regenwälder in den Tälern. Die Höhenlagen sind dominierend gekennzeichnet durch montane Waldgesellschaften.
- Highlands - Northern Fall weisen eine breite Amplitude an kleinräumigen Vegetationsgesellschaften auf. Neben Hangwäldern und strauchigen Trockengebieten sind auch in den höheren Bereichen montane Trockenwälder und Heidewälder vertreten.

Auffällig bei der Betrachtung der Vegetation im Untersuchungsgebiet ist die breite Vielfalt an Eukalyptusarten, welche sich in nahezu jeder Bioregion den abiotischen Faktoren angepasst haben und typisierte Gesellschaften dort ausbilden. Die insgesamt vielfältig auftretenden Vegetationstypen in Victoria sind an Brandereignisse adaptiert und brauchen diese bspw. auch für eine Fortpflanzung über Samen sowie für die Freisetzung von Nährstoffen (Beadle 1981).

2.5 Verbrannte Flächen in Victoria seit 2002

Eine Übersicht über die von 2002 bis 2022 auftretenden Brände liefert die Abbildung 5. Dort ist insbesondere die hohe Konzentration an Brandereignissen im Great Dividing Range zu verzeichnen, was ebenfalls für die Bereiche der Buschregion im nordwestlichen Teil des Untersuchungsgebietes gilt. In den Regionen zwischen diesen konzentrierten Brandbereichen lassen sich hauptsächlich nur kleinräumige Brandereignisse in der Landnutzungsklasse Wald identifizieren.

Durch die Verschneidung der Landnutzungsklassen mit den seit 20 Jahren auftretenden Brandereignissen ist erkennbar, dass die Landnutzungen Wald und Busch für die Analysezwecke dieser Studie sinnvoll sind und weiter untersucht werden. Außerdem wird auch die Landnutzungsklasse Gras weiterhin betrachtet, welche mit dem hohen Flächenanteil an der Gesamtfläche von Victoria begründet ist.

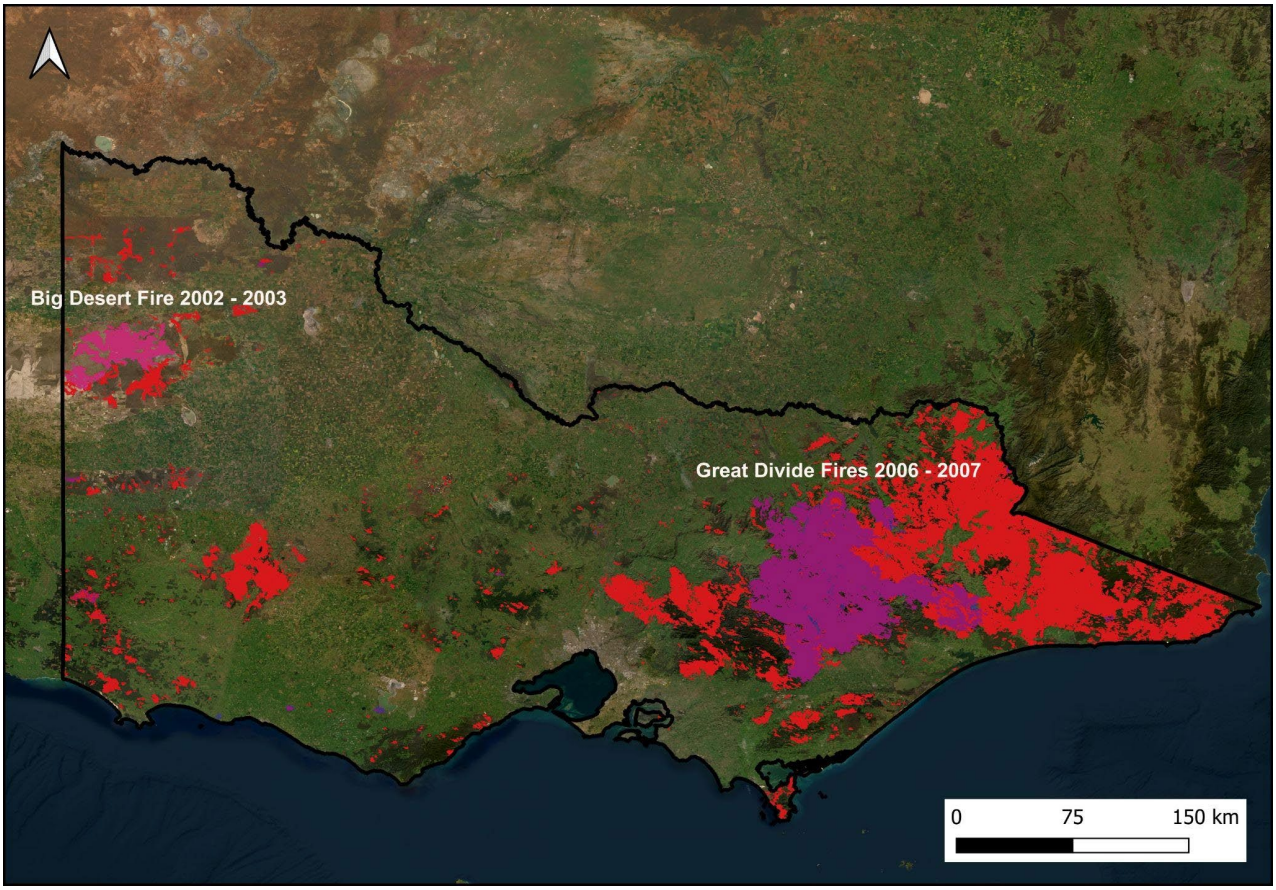

Abb. 5: Rot: Maximale Ausdehnung der Brandereignisse von 2002 bis 2022 im Untersuchungsgebiet. Pink: Maximale Ausdehnung des "Big Desert Fire" in den Jahren 2002/03. Lila: Maximale Ausdehnung der "Great Divide Fires" in den Jahren 2006/07. Google Earth Engine (2023). Datensatz: FireCCI51: MODIS Fire_cci Burned Area Pixel Product, Version 5.1. Kartenhintergrund: Esri Satellite, Copyright © 2020 Esri und dessen Lizenzgeber. Alle Rechte vorbehalten.

Aus der Literatur geht hervor, dass großflächige Brandereignisse in folgenden Zeiträumen in Victoria aufgetreten sind: 2002/03 "Big Desert Fire" sowie 2006/07 "Great Divide Fires" (State Government of Victoria 2023a). Die maximale Ausdehnung der beiden Brände ist in Abbildung 5 zu sehen. Nach dem AIDR (2022) beträgt die maximale Ausdehnung des "Big Desert Fire" 181.400 ha sowie für das "Great Divide Fires" mehr als 1.200.000 ha.

Die beiden großen Brandereignisse lassen sich außerdem anhand der Abbildung 6 verifizieren. Im Jahr 2002 hat die Landnutzungsklasse Busch mit ca. 200.000 ha deutlich höhere Werte erreicht als in den darauffolgenden Jahren. Der "Great Divide Fires"-Komplex im Jahr 2006 und 2007 hinterließ ca. 850.000 ha verbrannte Fläche in der Landnutzungsklasse Wald, im darauffolgenden Jahr nochmals ca. 200.000 ha. Nur das Jahr 2003 weist einen ebenso hohen Wert auf.

Bei Betrachtung der darauffolgenden Jahre sind die Jahre 2009, 2013/14 und 2019/20 mit hohen Anteilen an verbrannter Fläche zu erwähnen. Verglichen mit Wald und Busch sind die Brände in der Landnutzungsklasse Gras kleinräumiger und lokaler, aufgrund der Heterogenität dieser Landnutzungsklasse im Untersuchungsgebiet. Im Jahr 2011 brannte beispielsweise eine Fläche von lediglich ca. 40.000 ha an Grasbestand auf lokalen kleinräumigen Flächen.

Die detektierten Brandereignisse (s. Abb. 5) in den Jahren 2002/03 für die Landnutzungsklasse

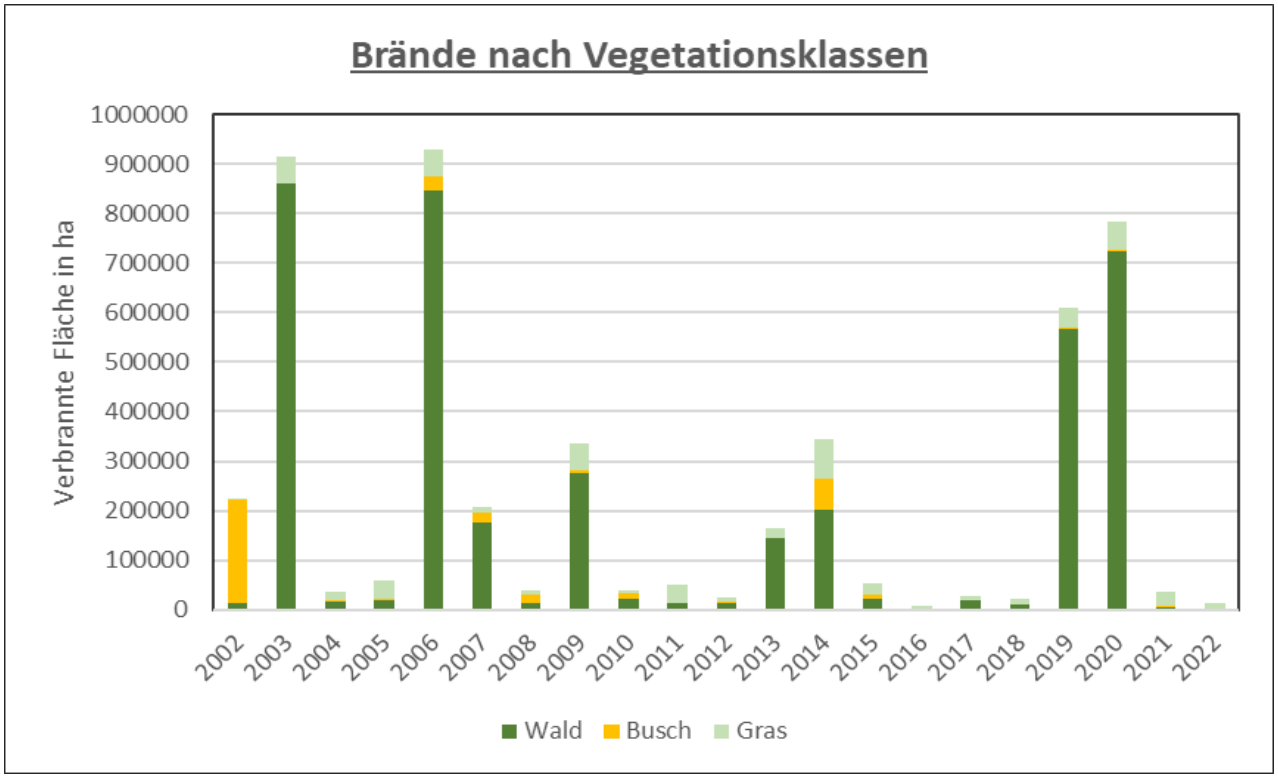

Abb. 6: Verbrannte Fläche in ha (y-Achse) aufgeteilt in die Landnutzungsklassen Wald, Busch und Gras über 20 Jahre (x-Achse). Google Earth Engine (2023). Datensatz: FireCCI51: MODIS Fire_cci Burned Area Pixel Product, Version 5.1 und ESA World-Cover 10m v200.

Busch und 2006/07 für die Landnutzungsklasse Wald werden in den nachfolgenden Analyseschritten für die Vegetationsregeneration weiterhin betrachtet, da sie eine hohe Einwirkung auf die jeweilige Landnutzungsklasse hatten.

3 Methoden und Datengrundlagen

Um die Vegetationsentwicklung auf ehemaligen Brandflächen innerhalb unterschiedlicher Vegetationsbestände zu untersuchen, wurde größtenteils auf den cloudbasierten Code Editor der Google Earth Engine zurückgegriffen. Dieser ermöglicht es, eine Vielzahl von unterschiedlichen Datensätzen zu nutzen. Zudem bietet dies die Möglichkeit, große Datenmengen zu bearbeiten und komplexe Berechnungen durchzuführen. Zur besseren Visualisierung wurden die in der Google Earth Engine generierten Daten mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms (Excel) sowie einem Geographischen Informationssystem (GIS) grafisch aufbereitet. In der folgenden Tabelle sind alle genutzten Datensätze aufgelistet (Tab. 1).

Um die Vegetationsregeneration in unterschiedlichen Vegetationsbeständen auf ehemaligen Brandflächen zu untersuchen, wurde der NDVI als Vegetationsindex ausgewählt.

Dieser Index zur Bestimmung der Pflanzenvitalität errechnet sich aus dem Verhältnis des von der Pflanze reflektierten roten sowie nahen infraroten Anteil des Spektrums wie folgt:

$$NDVI = \frac{NIR-ROT}{NIR+ROT}$$

Tab. 1: Verwendete Datensätze aus der GEE in dieser Studie (Eigene Darstellung 2023).

Datensatz	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Aufnahmezeitraum des Datensatzes
FireCCI51: MODIS Fire_cci Burned Area Pixel Product, Version5.1	250m	monatlich	01.01.2001-01.12.2020
MODIS/MCD43A4_006_NDVI	463m	täglich	24.02.2000-10.02.2023
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2	30m	8 Tage	18.03.2013-19.06.2023
CGIAR/SRTM90_V4	90m	-	11.02.2000-22.02.2000
MODIS/006/MOD11A2	1.000m	8 Tage	18.02.2000-09.11.2022
ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY	11.132m	monatlich	01.01.1981-01.03.2023
ESA WorldCover 10m v200	10m	-	01.01.2021-01.01.2022
FAO/GAUL_SIMPLIFIED_500m/2015/level1	500m	-	19.12.2014
UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY	5566m	täglich	01.01.1981-heute

Da es sich bei dem infraroten Spektrum um einen für das menschliche Auge nicht sichtbaren Wellenlängenbereich handelt, werden diese Reflexionen durch bestimmte Sensoren erfasst und gemessen. Dabei können Werte zwischen -1 und 1 gemessen werden. Negative Werte sind ein Anzeichen für eine geringe photosynthesische Aktivität (kranke oder kaum Vegetation), positive wiederum Anzeichen für eine hohe photosynthetische Aktivität der Vegetation. Zudem schreiben Sharma et al. (2023:209), dass sich dieser Index besonders gut für die Detektierung von Brandflächen eignet, da bei solchen Ereignissen die NDVI-Werte besonders stark schwanken. Anhand dieser Eigenschaft sollen die weiteren Untersuchungen durchgeführt werden.

Allerdings gibt es je nach verwendeten Sensor Unterschiede hinsichtlich der gemessenen NDVI-Werte. So beschreiben Huang et al. (2021:4), dass gemessene NDVI-Werte von Waldbeständen in einem Wertebereich von 0,3 und 0,85 liegen. Als Grund für diese starke Abweichung werden die jeweiligen Aufnahmekanäle der Satelliten genannt, die sich (wenn auch nur minimal) in ihren Wellenlängenbereichen unterscheiden. Die für diese Arbeit genutzten MODIS Datensätze (Moderate Resolution Imaging Spectrometers) sind auf den beiden Satelliten Terra und Aqua verbaut, welche die Erde in einer sonnensynchronen Umlaufbahn auf einer Höhe von 705 km umkreisen. Insgesamt besitzen diese jeweils 36 spektrale Kanäle, die den reflektierten Anteil des Lichts messen. Dabei wird ein Wellenlängenbereich von 0,405 bis 14,385 µm abgedeckt (Justice et al. 2002:4). Der für die Messung des NDVIs relevante rote Teil des Spektrums wird auf dem ersten Band (620 - 670 nm) gemessen. Der infrarote Teil des Spektrums wird auf dem zweiten Band (841 - 876 nm) gemessen (Huete et al. 2002:201).

Das in Abbildung 7 dargestellte Workflow-Diagramm stellt die durchgeführten Arbeitsschritte grafisch dar. Parallel dazu werden im weiteren Verlauf des Kapitels die jeweiligen Herangehensweisen näher erläutert.

Zunächst wurden mit Hilfe des Landcover-Datensatzes (ESA WorldCover 10m v200) die Landnutzungsklassen im Gras-/ Busch- und Waldflächen unterteilt und auf das Untersuchungsgebiet zugeschnitten (s. Abb. 4). Darauf aufbauend wurde für jede Landnutzungsklasse eine Referenzperiode erstellt. Diese Referenzperioden wurden auf Grundlage des MODIS Datensatzes (MODIS/MCD43A4_006_NDVI) innerhalb des Beobachtungszeitraumes (2002 - 2022) berechnet und stellt die saisonale Schwankung der NDVI-Werte innerhalb eines Jahres für jede Landnutzungsklasse dar. Diese saisonalen Schwankungen dienen dazu, mögliche vegetationsspezifische Schwankungen vor dem Hintergrund der Brandjahrermittlung zu validieren. Des Weiteren sollen diese Daten im späteren Verlauf der Arbeit dazu genutzt werden, um die zeitliche Regeneration auf den ausgewählten Brandflächen zu validieren. Zudem war es aufgrund der

bereits vorprozessierten Daten nicht weiter notwendig mögliche Störfaktoren wie Wolkenbedeckung oder Schatten herauszurechnen. Es konnte direkt auf das vorhandene NDVI-Band zugegriffen werden.

Im nächsten Schritt galt es, für jede Vegetationsklasse potenzielle Brandereignisse im Untersuchungszeitraum zu ermitteln. Dafür wurde der MODIS Datensatz (MODIS/MCD43A4_006_NDVI) genutzt, um für jede Landnutzungsklasse eine NDVI-Langzeitreihe zu erstellen. Diese NDVI-Langzeitreihen stellen absolute NDVI-Messwerte über den zuvor definierten Beobachtungszeitraum von 20 Jahren dar. Anhand dieser lassen sich bestimmte Schwankungen (sowohl positiv als auch negativ) im Verlauf des Beobachtungszeitraumes detektieren. Werteentwicklungen, welche plötzlich auftreten und starke negative Ausbrüche aufweisen, können zunächst als Anomalie innerhalb der Zeitreihe interpretiert werden, an denen ein mögliches Brandereignis stattgefunden haben könnte. Um diese Anomalien als wirkliche Brandereignisse identifizieren zu können, wurde daraufhin mit dem MO-DIS/006/MCD64A1 Datensatz die verbrannte Fläche für jede Landnutzungsart in Hektar berechnet. Als Resultat erhält man die jährliche Verteilung der verbrannten Flächen (von 2002 - 2022) in Abhängigkeit der jeweiligen Vegetationsarten (siehe Abb. 6). Kombiniert man diese Ergebnisse miteinander, so können eindeutige Brandjahre innerhalb des Beobachtungszeitraumes klassifiziert werden. Diese Brandereignisse wurden zudem graphisch mittels des ESA/FireCCI51 Datensatzes dargestellt, um die räumliche Lage sowie die Ausdehnung der Brandereignisse besser nachvollziehen zu können (Abb. 5).

Für die Untersuchung der Vegetationsregeneration wird auf Grundlage des MODIS/MCD43A4_006_NDVI-Datensatzes die räumliche Entwicklung der NDVI-Werte auf den zuvor definierten Brandflächen für bestimmte Brandjahre mittels des Differenz-NDVI ermittelt. Dafür wird ein NDVI-Wert für das zuvor ausgewählte Brandjahr und ein NDVI-Wert für das Folgejahr bestimmt. Dabei bleibt die betrachtete Brandfläche gleich, um Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Lediglich der Beobachtungszeitraum ändert sich. Um den Differenz-NDVI zu erhalten, werden die beiden NDVI-Werte voneinander abgezogen. Der so errechnete Differenz-NDVI sagt aus, wie sich die Vegetation auf den Flächen entwickelt hat und stellt diese Entwicklung differenziert auf der Fläche dar. Positive Werte definieren eine positive NDVI-Entwicklung zwischen Brand- und Folgejahr und negative Werte stellen wiederum eine negative Entwicklung dar.

Um die Vegetationsregeneration auch auf der zeitlichen Skala zu untersuchen wird analysiert, wie lange es dauert, bis die NDVI-Werte nach dem Brandereignis wieder den Ausgangswert erreicht haben, der bei den Landnutzungsklassen vor dem Brand gemessen wurden.

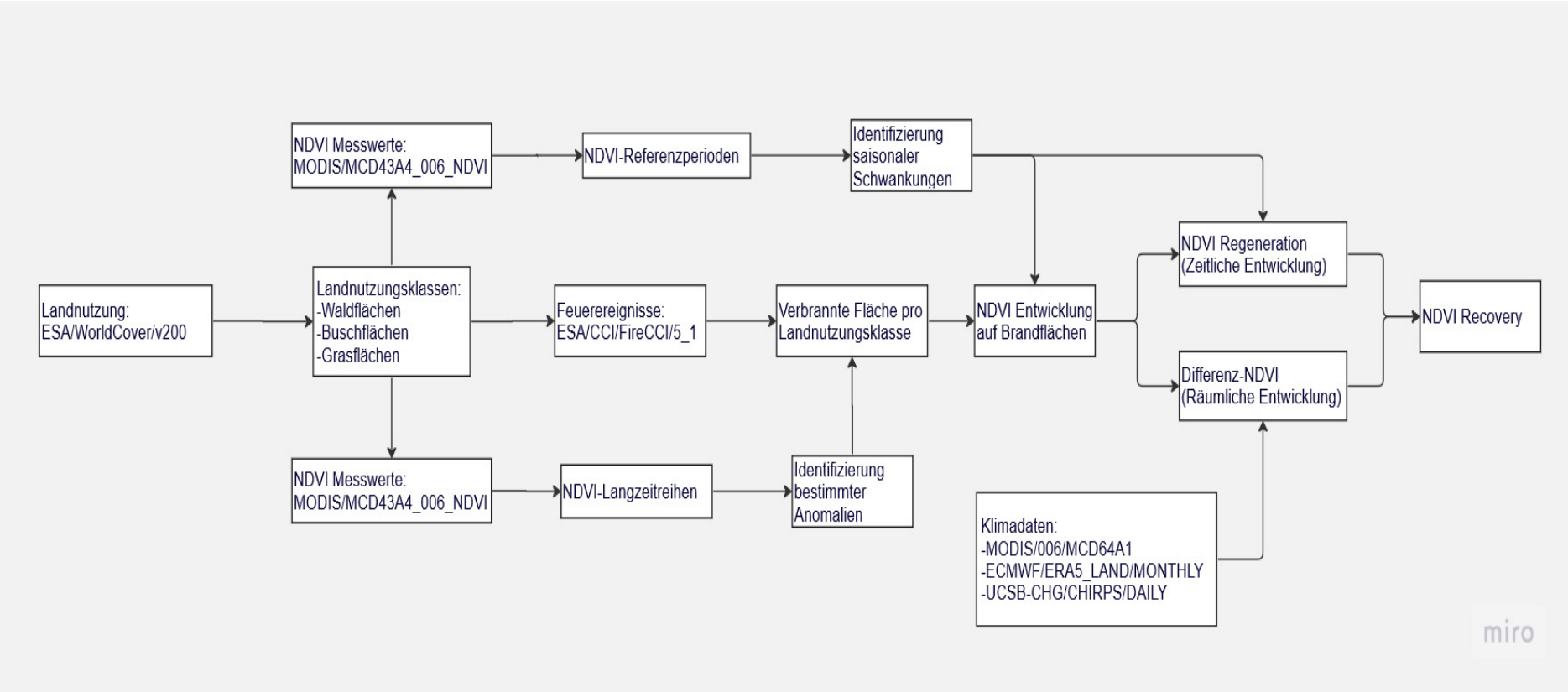

Abb. 7: Überblick über den Arbeitsvorgang dieser Studie.

4 Saisonale und zeitliche Entwicklung des NDVI nach Landnutzung

Nachdem die methodische Vorgehensweise zur zeitlichen Bestimmung der Brände und der Regeneration der Vegetation beschrieben und veranschaulicht wurde, folgt in diesem Kapitel die Ergebnisfindung. Dabei wird zunächst die saisonale Schwankung der vegetativen Klassen (Gras, Busch und Wald) dargestellt und anschließend wird mittels einer NDVI-Zeitreihe der genaue Zeitpunkt der Brände bestimmt. Nachdem der genaue Zeitpunkt der Brände bestimmt wurde, erfolgt die zeitliche Analyse der Regenerationszeiten der unterschiedlichen Vegetationsklassen. Nach der zeitlichen Analyse der Regenerationszeiten werden die Brandzeiten sowie die Regenerationszeiten in einen Kontext zu den vorherrschenden klimatischen Bedingungen gesetzt und deren Einfluss untersucht.

4.1 Saisonalität der Vegetation

Bevor eine Betrachtung der vegetativen Entwicklung in einer Zeitreihe von 20 Jahren (2002-2022) erfolgt, wird zunächst der gemittelte NDVI über den gleichen Zeitraum pro Tag in der GEE berechnet, um die Saisonalität der Vegetation im Untersuchungsgebiet (Victoria) zu analysieren. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Berechnung dargestellt. Der Mittelwert für die Zeitreihe wurde für die drei Landnutzungsklassen Gras, Busch und Wald ermittelt.

Die Ergebnisse in Abbildung 8 zeigen saisonale Schwankungen für alle drei gewählten vegetativen Landnutzungsklassen. Die Klasse Gras hat dabei die höchsten saisonalen Schwankungen im NDVI mit einer Schwankungsbreite von 0,35 bis 0,7. Im Februar sind dabei die geringsten Werte zu beobachten, dann kommt es zu einem Anstieg, bis ein Hoch zwischen September und Oktober erreicht wird. Nachdem das saisonale Hoch erreicht wurde, folgt eine im Verhältnis zur Zunahme der Biomasse zeitlich schnellere Abnahme der Biomasse.

Während der jährliche NDVI-Verlauf von Gras in der Referenzperiode eine hohe Amplitude mit zeitlich schnellen Abnahmen und Zunahmen der NDVI-Werte aufweist, zeigt sich für die Landnutzungsklassen Busch und Wald ein anderer Verlauf in Abbildung 8. Die NDVI-Entwicklung Busch und Wald läuft nahezu parallel zueinander. Allerdings weist die Klasse Busch eine höhere Amplitude (0,3-0,45) auf als die der Klasse Wald (0,6-0,72). Im Gegensatz zu der Amplitude der Klasse Gras (0,35-0,7) scheinen die Amplituden dennoch gering. Der zeitliche Verlauf der Zu- und Abnahme der Biomasse für Wald und Busch unterliegt denselben jahreszeitlichen Schwankungen. Es kommt zu einer Zunahme ab Februar, das saisonale Hoch wird im Juni erreicht und anschließend nehmen die NDVI-Werte wieder ab.

In Kapitel 2 wurde ein Klimadiagramm für das Untersuchungsgebiet erstellt. Das Diagramm zeigt für die Monate von November bis Februar hohe Temperaturen und geringe Niederschläge und für die Monate März bis Juni eine Abnahme der Temperatur bis zum Tiefpunkt im Monat Juli sowie verhältnismäßig hohe Niederschläge in Victoria. Daraus ergibt sich, dass die Zunahme der Biomasse mit der Abnahme der Temperaturen und der Zunahme der Niederschläge erfolgt und es zu einer Abnahme der Biomasse in allen drei Klassen bei steigenden Temperaturen und abnehmenden Niederschlägen kommt.

Insgesamt ergibt sich damit eine Saisonalität für alle drei Landnutzungsklassen (Gras, Busch und Wald), wobei die saisonale Schwankung für die Grasflächen deutlich höher ausfällt als die der anderen beiden Klassen Busch und Wald. Der Anstieg der Biomasse erfolgt insbesondere für Busch und Wald mit der Abnahme der Temperatur und der Zunahme der Niederschläge. Für die Landnutzungsklasse Gras kommt es zu einem Anstieg der Biomassen mit steigenden Niederschlagsmengen und abfallenden Temperaturen, wobei die Zunahme und Abnahme der Biomasse einen ähnlichen zeitlichen Verlauf nimmt, wie die der Niederschläge. Hingegen erfolgt die Zu- und Abnahme der Biomasse von Busch und Wald entgegengesetzt des jahreszeitlichen Temperaturverlaufs.

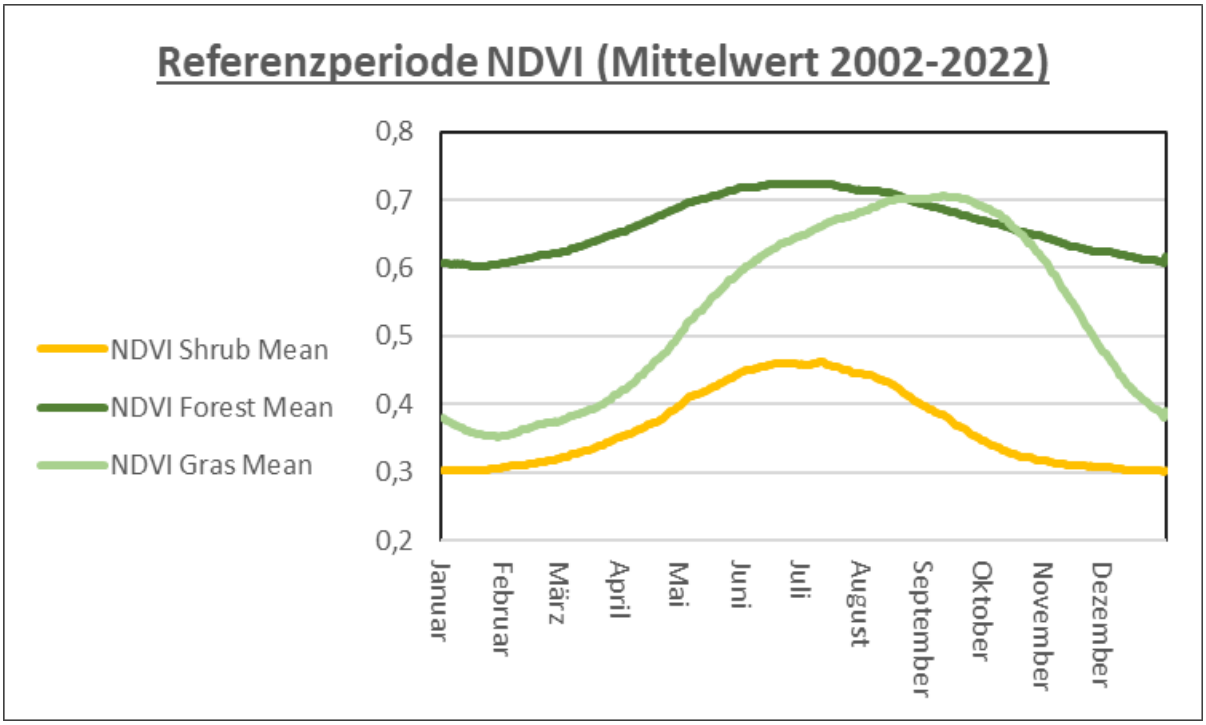

Abb. 8: Mittlerer NDVI über die Referenzperiode von 20 Jahren in Victoria. Google Earth Engine (2023). Datensatz: MODIS/MCD43A4_006_NDVI.

4.2 Zeitreihe für die Vegetationsentwicklung nach Landnutzungsklassen

Anschließend an die Betrachtung der saisonalen Entwicklung der drei gewählten Landnutzungsklassen für die gemittelten Werte der Referenzperiode erfolgt in diesem Kapitel die Darstellung und Analyse der NDVI-Entwicklung über die gewählte 20 Jahresperiode in einer Zeitreihe. Mithilfe der Zeitreihe über 20 Jahre können Extremereignisse herausgefiltert werden, um in den anschließenden Kapiteln Zusammenhänge zwischen den klimatischen Verhältnissen zum Zeitpunkt des Extremereignisses zu finden und den Einfluss der klimatischen Verhältnisse auf das Extremereignis herauszufinden.

4.2.1 NDVI-Zeitreihe von 2002 bis 2022 für Grasflächen

In Abbildung 9 ist die NDVI-Entwicklung der Grasflächen über den Zeitraum von 2002 bis 2022 dargestellt. Die Amplitude sowie die Frequenz der NDVI-Zeitreihe zeigt, wie bereits die NDVI-Zeitreihe der Referenzperiode in Abbildung 8, eine hohe Saisonalität und schwankende NDVI-Werte. Starke Abweichungen eines Jahres in den Hoch- und Tiefwerten lassen sich kaum identifizieren. Lediglich in den Jahren 2003 und 2007 erreichte der NDVI-Werte unterhalb von 0,3 und zeigt Tendenzen eines Brandes auf. Die geringen NDVI-Werte decken sich mit den in der Literatur ausgewiesenen Zeiträumen von Bränden aus Kapitel 2. Die NDVI-Werte für den Zeitraum von 2019 bis 2020 erreichen keine Werte unterhalb von 0,3.

Ein weiteres besonderes Ereignis scheint zwischen den Jahren 2010 bis 2012 gewesen zu sein. Der NDVI ist entgegen seiner Saisonalität, speziell im Jahr 2011, ungewöhnlich hoch. Aus Abbildung 6 geht hervor, dass im Jahr 2011 insbesondere Grasflächen gebrannt haben. Aufgrund der geringen Abweichung des NDVI in den aus der Literatur entnommen Zeiträumen zu anderen Referenzjahren, scheint eine zeitliche Bestimmung eines Brandzeitraumes mittels des NDVI bei Grasflächen nur geringfügig möglich.

4.2.2 NDVI-Zeitreihe von 2002 bis 2022 für Buschflächen

Anschließend erfolgt die Betrachtung der NDVI-Zeitreihe und deren Entwicklung für die Buschflächen im Untersuchungsgebiet. Dafür wurde mittels eines MODIS-Datensatzes (Tab. 1) der NDVI für die Buschflächen im Untersuchungsgebiet ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt. Der NDVI der Buschflächen schwankt dabei deutlich geringer, als die Zeitreihe für die Grasflächen und erreicht Minimalwerte von knapp 0,25 sowie Maximalwerte von knapp 0,55. Die Brandzeiträume von 2002 bis 2003 und 2006 bis 2007 lassen sich in der NDVI-Zeitreihe der Buschflächen besser ermitteln, als es für die Grasflächen der Fall war. Allerdings lassen sich auch hier Extremereignisse im Mini-

malbereich nur schwierig über die NDVI-Zeitreihe bestimmen und Rückschlüsse auf Brandereignisse zu. Die Regeneration der Vegetation nach dem Brandereignis von 2002 bis 2003 wird im nachfolgenden Kapitel 4.2.3. genauer betrachtet.

Des Weiteren erscheint der Zeitraum von 2010 bis 2012 mit verhältnismäßig hohen NDVI-Werten für die Minimalwerte sowie für die Maximalwerte erneut durch besondere Einflussfaktoren geprägt wird und daher in Kapitel 6 nochmals mit den klimatischen Verhältnissen abgeglichen wird. Der Brandzeitraum von 2019 bis 2020 lässt sich aus der vorliegenden NDVI-Zeitreihe aufgrund besonders geringer NDVI-Werte für diesen Zeitraum nicht entnehmen.

4.2.3 NDVI-Zeitreihe von 2002 bis 2022 für Waldflächen

Nachdem die NDVI-Entwicklung von Gras und Busch beschrieben und untersucht wurde, folgt schlussendlich die Betrachtung der NDVI-Zeitreihe für die Landnutzungsklasse Wald, welche in Abbildung 9 dargestellt ist. Die NDVI-Werte liegen auf einem höheren Niveau, als es bei der Landnutzungsklasse Busch der Fall war. Die Maximalwerte erreichen Werte von über 0,8 und im Minimum werden Werte von knapp 0,5 erreicht. Somit stellt sich erneut eine geringere Saisonalität der NDVI-Werte für Wald heraus als für die anderen beiden Klassen. Demnach lassen sich Extremereignisse, wie die Brandereignisse von 2002 bis 2003, 2006 bis 2007 und 2019 bis 2022, besser aus der NDVI-Zeitreihe ablesen.

In diesen Jahren sinken die NDVI-Werte deutlich und liegen unterhalb der anderen Minimalwerte in der Zeitreihe und stellen somit ein Extremereignis für die vorliegende Vegetation dar. Außerdem sind wieder die vergleichsweisen hohen NDVI-Werte, welche auch in den anderen beiden Klassen zu beobachten waren, zwischen den Jahren 2010 bis 2012 zu beobachten. Eine weitere Untersuchung der Klimadaten zu diesem Zeitpunkt erfolgt daher im Kapitel 6, da die hohen NDVI-Werte möglicherweise auf besondere klimatische Verhältnisse zurückzuführen sind, welche dazu führen, dass sich die Biomasse auf einem hohen Niveau hält und sich nicht derart verhält, wie in der Referenzperiode (Abb. 8). Durch die Betrachtung dieses Zeitraumes können Rückschlüsse auf das Verhalten der Regeneration der Vegetation nach Brandereignissen gezogen werden.

Insgesamt ergeben sich damit diverse und unterschiedliche Ergebnisse nach der Betrachtung der NDVI-Zeitreihen von Gras, Busch und Wald. Die Zeitreihen zeigen dieselben Tendenzen und Verläufe auf, wobei die Zeitreihe für die Grasflächen durch eine hohe Saisonalität und einen hohen Schwankungsverlauf geprägt ist und sich Extremereignisse nur geringfügig aus der NDVI-Zeitreihe ableiten lassen. Ähnliches gilt für die NDVI-Zeitreihe der Landnutzungsklasse Busch, auch wenn diese durch einen deutlich geringeren

Wertebereich geprägt ist. Die NDVI-Zeitreihe für Buschflächen erlaubt nur eine geringfügig bessere Ableitung von Extremereignissen im Minimalbereich der NDVI-Werte. Hingegen können Extremereignisse, die zu einer Abnahme der Biomasse im gewählten Gebiet führen, für die Landnutzungsklasse Wald ermittelt werden. Die Zeiträume für Brandereignisse aus der Literatur und die extremen Minimalwerte stimmen dabei überein, sodass scheinbar insbesondere eine historische Auswertung der Regeneration nach Waldbränden in Victoria über die NDVI-Zeitreihe möglich ist.

5 Räumliche und zeitliche Regeneration der Vegetation nach Brandereignissen

5.1 Räumliche Regeneration von Busch- und Waldflächen

Im folgenden Kapitel werden zwei ausgewählte Brandereignisse in zeitlicher und räumlicher Auflösung betrachtet. Es wurde ein Brandereignis exemplarisch für Buschflächen ausgewählt und ein weiteres für Waldflächen. Für die Buschflächen wurde das "Big Desert Fire" in dem Zeitraum 2002 bis 2003 gewählt und für die Waldflächen die "Great Divide Fires" von 2006 bis 2007, welche räumlich in Abbildung 5 und 10 dargestellt sind. Für die Grasflächen konnte aufgrund des heterogenen und räumlich diversen Auftretens im Untersuchungsgebiet (Kapitel 2) keine großräumige Brandfläche ermittelt werden. Eine noch kleinere räumliche Einteilung könnte nur schwierig mit den Klimadaten abgeglichen werden. Außerdem konnte bei der Betrachtung der NDVI-Zeitreihen von Grasflächen keine längere Regenerationszeit durch Brandereignisse (beispielsweise 2011) nachgewiesen werden. Dies könnte zum einen mit den hohen saisonalen Schwankungen zusammenhängen, zum anderen auch mit dem generell schnellen Aufbau von Biomasse auf Grasflächen. Daher erfolgt in diesem Kapitel keine weitere Betrachtung der Regenerationszeit von Grasflächen nach Brandereignissen.

Die in Abbildung 10 dargestellten NDVI-Differenzen zeigen die räumliche Regeneration der Busch- bzw. Waldflächen nach einem Jahr nach Auftreten des jeweiligen Brandereignisses (2002 -2003 bzw. 2006-2007). Rötlich gefärbte Flächen zeigen dabei eine Abnahme der Vegetation nach den Brandereignissen und bläuliche Flächen eine Zunahme der Vegetation. Für eine weitere Untersuchung der einzelnen Brandflächen erfolgt zunächst die Betrachtung des "Big Desert Fire" und anschließend des "Great Divide Fires". Aus Abbildung 10 kann eine negative NDVI-Entwicklung besonders für die Außenbereiche der Brandfläche des Buschbrandes identifiziert werden. Allerdings bewegt sich die negative NDVI-Entwicklung auf einem sehr geringen Niveau, welche vernachlässigbar erscheint. Hingegen haben sich die Regionen nach dem Brandereignis im inneren Bereich des Gebietes positiv entwickelt.

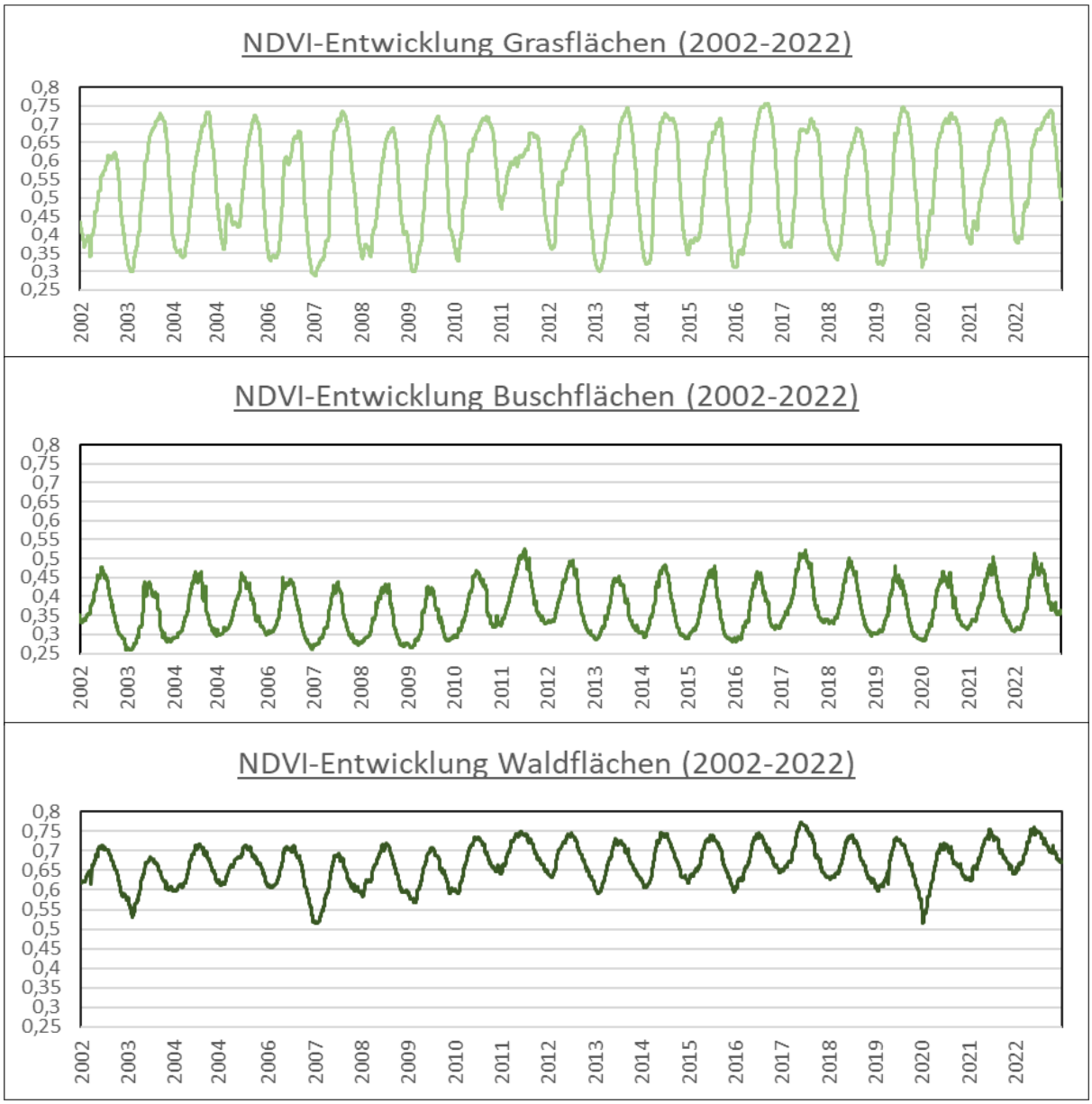

Abb. 9: NDVI-Entwicklung für Gras-, Busch- und Waldflächen in Victoria. Google Earth Engine (2023). Datensatz: MODIS/MCD43A4_006_NDVI.

Für das Gebiet der "Great Divide Fires" zeigt sich eine höhere Zunahme der NDVI-Werte in den Waldgebieten, im Vergleich zu den bereits beschrieben Buschflächen. Die Regeneration der Vegetation scheint zwar innerhalb eines Jahres höher zu sein, allerdings sollte beachtet werden, dass die NDVI-Werte nach Brandereignissen in Waldgebieten stärker abnehmen als bei Buschflächen (Kapitel 4.2) und eine schnellere Zunahme von NDVI-Werten somit nicht zwangsläufig zu einer schnelleren Re-generation der Waldgebiete führt. Die negative NDVI-Entwicklung ist nach dem Ab-gleich des DGM (Abb. 1) besonders in den Höhenlagen des Gebirges zu verordnen, während positive Entwicklungen besonders in den Tiefenlagen zu beobachten sind.

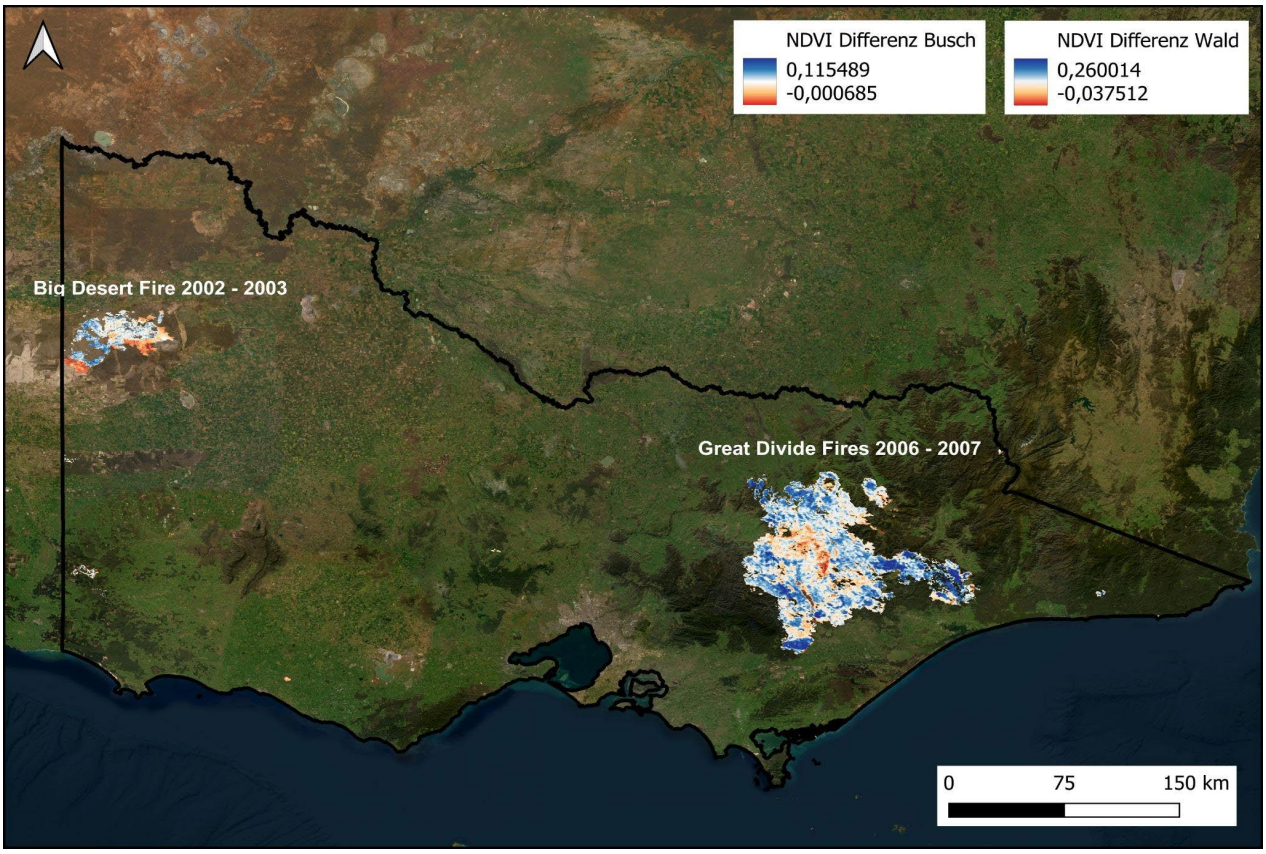

Abb. 10: NDVI-Differenz für ausgewählte Wald- und Buschflächen. Google Earth Engine (2023). Datensätze: MODIS/MCD43A4_006_NDVI, FireCCI51: MODIS Fire_cci Burned Area Pixel Product, Version 5.1. Kartenhintergrund: Esri Satellite, Copyright © 2020 Esri und dessen Lizenzgeber. Alle Rechte vorbehalten.

Ein weiterer Grund für die stärkere Zunahme von Biomasse in den Waldgebieten könnten die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse in den beiden Gebieten sein. Während das Gebirge ein feuchteres und kälteres Klima aufweist, ist das Gebiet des "Big Desert Fire" durch ein trockeneres und wärmeres Mesoklima geprägt. Möglicherweise fördert somit ein feuchteres und kühleres Klima den Aufbau von Biomasse und ermöglicht damit eine bessere Regenerationszeit. In Kapitel 6 erfolgt daher eine weitere Betrachtung des Einflusses der klimatischen Verhältnisse auf den Aufbau von Biomasse und die Regenerationszeit der Biomasse nach Brandereignissen.

5.2 Zeitliche Vegetationsregeneration von Busch- und Waldflächen

Nachdem die räumliche und zeitliche Regeneration nach einem Jahr von den Busch- und Waldflächen in den beiden ausgewählten Gebieten erfolgt ist, wird in diesem Kapitel eine längere Zeitreihe der NDVI-Entwicklung betrachtet. Dafür wurde für Busch und Wald jeweils ein Zeitraum von drei Jahren gewählt. In Abbildung 11 und 12 sind die jeweiligen Zeiträume und deren NDVI-Verlauf sowie der gemittelte NDVI-Ver-

lauf über den Zeitraum von 2002 bis 2022 dargestellt. Der gemittelte NDVI der Referenzperiode (Abb. 8) wurde somit für die jeweilige Klasse in eine Zeitreihe gesetzt und bildet damit die Bewertungsgrundlage für eine regenerierte Vegetationsfläche. Die NDVI-Zeitreihe zeigt dabei die Entwicklung der in Abbildung 10 dargestellten exemplarischen Gebiete für Busch- und Waldflächen.

5.2.1 Regeneration von Buschflächen exemplarisch am "Big Desert Fire"

In Abbildung 11 ist die NDVI-Entwicklung von 2002 bis 2005 im Verhältnis zur Referenzperiode dargestellt. Aus der Abbildung kann entnommen werden, dass die NDVI-Werte in den warmen Monaten von November bis Januar aufgrund eines Brandereignisses deutlich abnehmen und der NDVI vor dem Brandereignis ungefähr der gemittelten Referenzperiode entsprach und sich somit auf einem normalen Niveau befand.

Unmittelbar nach dem Brandereignis (Anfang 2003) liegen die NDVI-Werte um 0,1 unterhalb der Kurve der Referenzperiode. Somit kann daraus geschlossen werden, dass das Brandereignis "Big Desert Fire" zu einer Abnahme der Biomasse im gewählten Gebiet geführt hat. Nach dem Brandereignis erholt sich die Vegetation auf-grund der saisonalen Schwankungen, welche in Kapitel 4.2.2 dargestellt wurden, zunächst nicht. Allerdings befinden sich die saisonalen Minimalwerte des NDVI zu diesem Zeitpunkt auf einem geringen Niveau. Während der saisonalen Zunahme von Biomasse erholen sich die NDVI-Werte und nehmen mit dem weiteren Verlauf wieder ab. Allerdings wird ein höheres Ni-

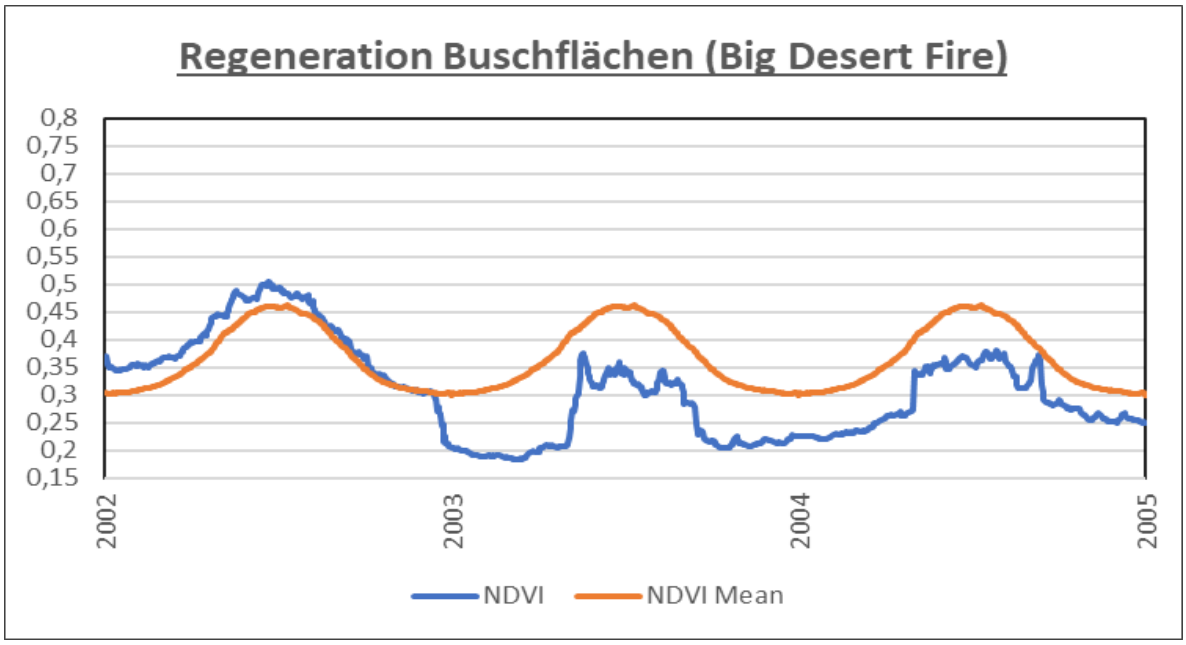

Abb. 11: Regenerationszeit der Buschflächen exemplarisch am "Big Desert Fire" in Victoria von 2002 bis 2005. Google Earth Engine (2023). Datensatz: MODIS/MCD43A4_006_NDVI.

veau in den Minimalwerten nach der ersten Saison erreicht. Das höhere Niveau der Minimalwerte zeigt damit eine Erholung der Vegetationsflächen der Buschgebiete nach dem

Es ist anzumerken, dass die Regeneration der Vegetation unter anderen klimatischen Bedingungen oder einer geringeren bzw. höheren Feuerintensität als bei dem "Big Desert Fire"-Ereignis zu

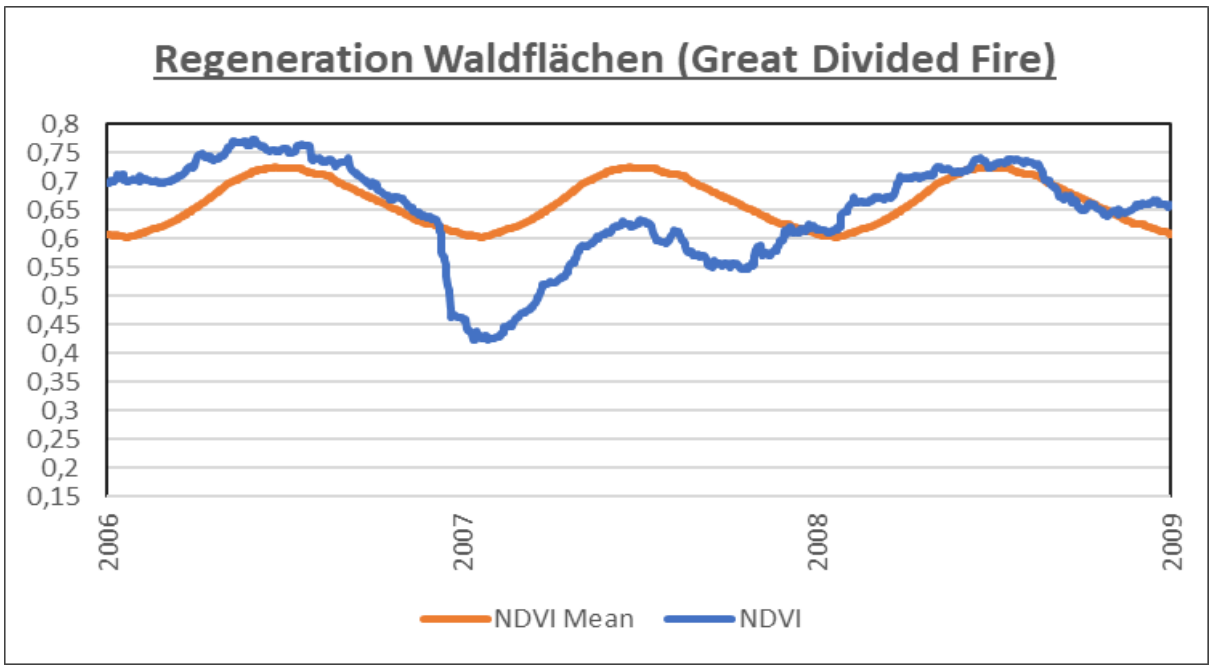

Abb. 12: Regenerationszeit der Waldflächen exemplarisch am "Great Divide Fires" in Victoria von 2006 bis 2009. Google Earth Engine (2023). Datensatz: MODIS/MCD43A4_006_NDVI.

"Big Desert Fire". Es folgt eine weitere Erholung während die saisonalen Minimalwerte und eine weitere Angleichung in Richtung der Referenzperiode erreicht wird, welche somit eine weitere Erholung der Vegetation aufzeigt. Allerdings erreichen die NDVI-Werte im letzten Jahr des Betrachtungszeitraumes noch nicht die NDVI-Werte der Referenzperiode, somit ist eine vollständige Regeneration der Buschflächen, nach dem "Big Desert Fire", noch nicht im Betrachtungszeitraum erreicht. Die vollständige Regeneration wird wahrscheinlich erst in den darauffolgenden ein bis zwei Jahren erreicht werden.

einer schnelleren bzw. langsameren Regeneration der Vegetation führen kann. Allerdings können mit den vorliegenden Daten keine Aussagen über eine solche Entwicklung erfolgen. In Kapitel 6 erfolgt eine weitere Betrachtung der Regeneration mittels der Klimadaten im gewählten Zeitraum.

5.2.2 Regeneration von Waldflächen exemplarisch am "Great Divide Fires"

In Anlehnung an die Regeneration der Buschflächen nach dem "Great Desert Fire" erfolgt die Betrachtung der Regeneration von Waldflächen exemplarisch für das "Great Divide Fires". Dafür

ist in Abbildung 12 die NDVI-Entwicklung in dem ausgewählten Gebiet für Waldflächen aus Abbildung 10 dargestellt. Als Referenz für die vollständige Regeneration der Vegetation im Waldgebiet wurde wieder die Referenzkurve aus Abbildung 8 für Waldflächen verwendet und auf den gewählten Zeitraum multipliziert.

Zwischen den Jahren 2006 und 2007 sind die NDVI-Werte auf einem ähnlichen Niveau, wie die der Referenzperiode. Lediglich die Maximalwerte in diesem Jahr überschreiten die der Referenzperiode, während ein ähnlicher Kurvenverlauf während des saisonalen Abschwungs zu beobachten ist. Zur Jahreswende von 2006 auf 2007 kam es zu einer rapiden Abnahme der NDVI-Werte für die Waldgebiete. Zu diesem Zeitpunkt setzt das in der Literatur beschriebene Brandereignis ein. Somit basiert die Abnahme der NDVI-Werte auf dem Brandereignis, welches zur Jahreswende von 2006 auf 2007 einsetzte. Der erreichte Minimalwert von 0,4 liegt damit deutlich unterhalb des Minimalwertes der Referenzperiode (0,6). Die erste Erholung der vegetativen Flächen setzt unmittelbar nach dem Brandereignis ein und es kommt zu einer zunehmenden Erholung während der normalen saisonalen Zunahme von Biomasse.

Allerdings werden die saisonalen Maximalwerte der Referenzperiode in dem Zeitraum zwischen 2007 und 2008 nicht erreicht. Es besteht auch während der saisonalen Maximalwerte weiterhin eine Differenz der NDVI-Werte zur Referenzperiode von 0,175. Aufgrund der verringerten Differenz der NDVI-Werte zwischen den saisona-len Maximalwerten und den Minimalwerten unmittelbar nach dem Brandereignis scheint eine Erholung der Vegetation bereits in der ersten Saison einzusetzen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den beschriebenen Ergebnissen aus Kapitel 5.1 in dem der Differenz-NDVI betrachtet wurde. Nachdem die saisonalen Maximalwerte im Jahr 2007 erreicht wurden, kommt es wieder zu einer saisonalen Abnahme der NDVI-Werte. Allerdings sind die darauffolgenden Minimalwerte kurz vor der Jahreswende 2007/08 auf einem höheren Niveau als im Vorjahr. Dies kann als eine Erholung der Vegetation betrachtet werden. Im nachfolgenden Jahr 2008 erreichen die NDVI-Werte nahezu wieder die Werte der Referenzperiode und die Vegetation im gewählten Gebiet hat sich damit zwei Jahre nach Einsetzen des Brandereignisses nahezu erholt und unterliegt wieder den normalen saisonalen Schwankungen.

Insgesamt stellt sich damit eine schnellere Erholung der Waldgebiete als der Buschgebiete nach Brandereignissen heraus, obwohl die Abnahme der Biomasse in dem Waldgebiet höher liegt als in den Buschgebieten. Veränderte klimatische oder anthropogene Einflussfaktoren könnten die Erholung der Vegetation in anderen Zeiträumen nach Brandereignissen verändern und zu anderen Ergebnissen führen. Die untersuchten Ergebnisse

sind daher exemplarisch für den gewählten Zeitraum und das gewählte Gebiet anwendbar. Auf die klimatischen Verhältnisse während der gewählten Zeiträume und deren Anomalie wird im nachfolgenden Kapitel weiter eingegangen. Es wird ein Kontext der Klimadaten zum selben Zeitraum wie der gewählten Referenzperiode gezogen und auf Anomalien sowie scheinbare Extremereignisse eingegangen, um den möglichen Einfluss auf die Regeneration der Vegetation und die Entstehung der Brände durch klimatische Einflussfaktoren zu ermitteln.

6 Brandereignisse und vegetative Regeneration: Der Einfluss des Klimas

In diesem Kapitel findet die abschließende Ergebnisfindung durch die Betrachtung der klimatischen Verhältnisse in den letzten 20 Jahren in Victoria statt. Dafür wurden zwei Zeitreihen von 2002 bis 2022 für die Temperatur und den Niederschlag ermittelt. Anschließend wurde der Mittelwert für die Zeitreihe berechnet. Um die Abweichung zu bestimmen, wurden die monatlichen Istwerte mit dem Jahresmittelwert subtrahiert. Die Abweichungen wurden ermittelt, um Extremereignisse besser aus der Zeitreihe herausfiltern zu können. In den Abbildungen 13 und 14 wurde der Mittelwert anschließend als Nullwert für die Abzisse festgelegt. Somit entspricht der Nullwert der Abzisse dem Mittelwert für jeweils die Temperatur bzw. den Niederschlag über die Zeitreihe (2002 bis 2022) von 20 Jahren.

Die in Abbildung 13 dargestellte Zeitreihe für die Temperatur zeigt saisonal schwankende Abweichungen von Mittelwert im Zeitverlauf. Die Werte schwanken sowohl im positiven als auch

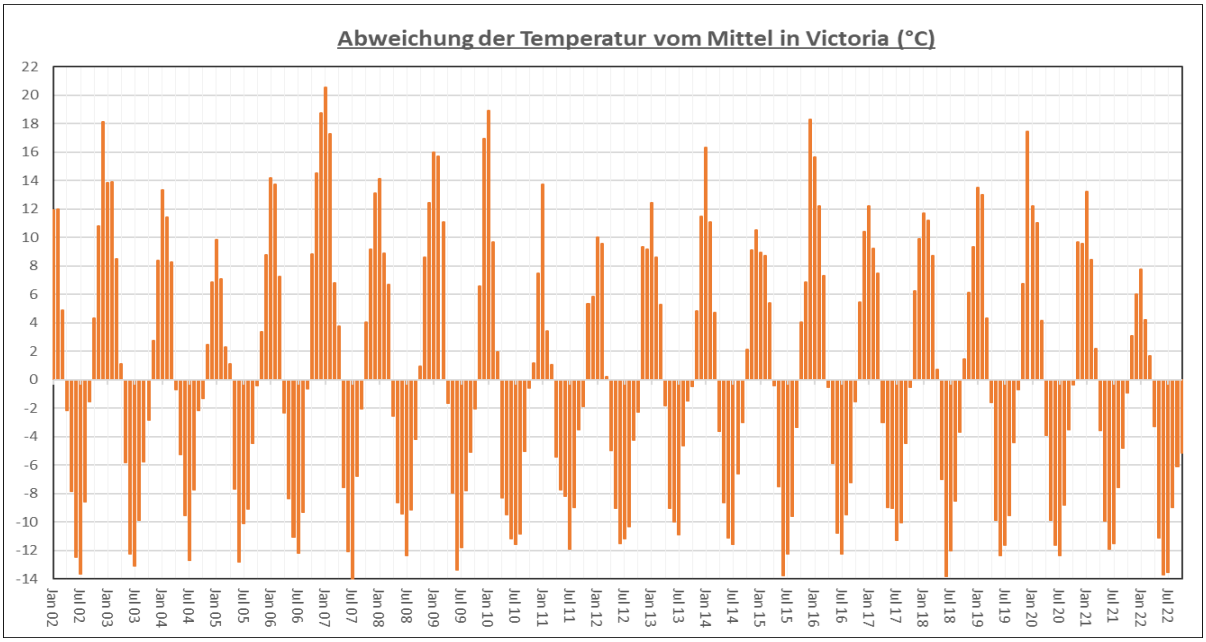

Abb. 13: Abweichung der Temperatur vom 20 Jahresmittel in Victoria. Google Earth Engine (2023). Datensatz: ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY.

im negativen Bereich in den Extremwerten. Gleiches gilt auch für die Dauer von Wärmeperioden und Kälteperioden im Untersuchungsgebiet. In einigen Jahren halten sich die Werte über einen längeren Zeitraum im positiven, als auch im negativen Wertebereich. Nachfolgend werden insbesondere die Dauer und die Extremwerte im positiven Bereich, aufgrund der in der Referenzperiode herausgestellten saisonalen Schwankungen, betrachtet. Außerdem liegt die zeitliche Entstehung der Brandereignisse in den Zeiträumen, in denen positive Werte für die Temperatur zu beobachten sind. Für die nachfolgende Untersuchung des Einflus-ses der Temperatur auf Brandereignisse und der Regeneration der Vegetation nach diesen werden die Zeiträume des "Big Desert Fire" und des "Great Divide Fires" betrachtet sowie der Zeitraum von 2010 bis 2012 aufgrund der außergewöhnlich hohen NDVI-Werte während dieses Zeitraumes. Für die Niederschlagswerte in Abbildung 14 werden anschließend dieselben Zeiträume betrachtet. Außerdem erfolgt ein Abgleich der genannten Zeiträume zu Zeiträumen, in denen es nicht gebrannt hat, um den Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Entstehung von Bränden sowie die nachfolgende Vegetationsregeneration zu erhalten.

Für die Zeiträume 2002 bis 2003 und insbesondere für den Zeitraum von 2006 bis 2007 sind erhöhte positive Werte für Temperatur aus Abbildung 13 zu entnehmen. Die Wärmeperiode war zu diesen Zeitpunkten ebenfalls ein wenig länger als bei den anderen Referenzjahren. Die Temperaturwerte erreichen besonders zum Jahreswechsel von 2006 zu 2007 die höchsten Werte

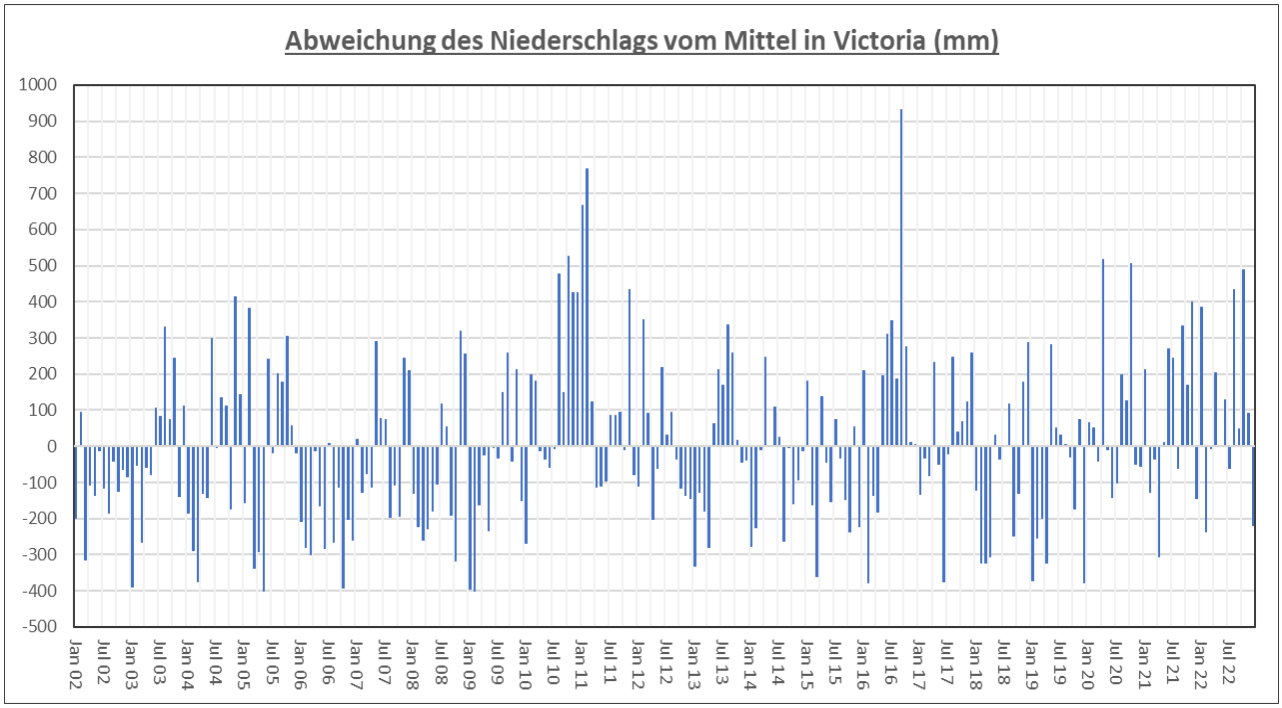

Abb. 14: Abweichung des Niederschlags vom 20 Jahresmittel in Victoria. Google Earth Engine (2023). Datensatz: ECMWF/ERA5_LAND/MONTHLY.

innerhalb der Zeitreihe. Somit könnten hohe Temperaturen vor und während der Brandereignisse Einfluss auf die Entstehung von Bränden genommen haben. Insgesamt zeichnen sich neben den saisonalen Schwankungen auch im Zeitverlauf Schwankungen über 4 bis 6 Jahresperioden ab. In einigen Perioden sind die Temperaturen über die Periode höher als in anderen Jahresperioden. Die betrachteten Brandereignisse sind beide in den eher warmen Perioden aufgetreten. Eine Berechnung der Korrelation zwischen den hohen Temperaturen und der NDVI-Entwicklung könnte weiter Aufschluss über einen statistischen Zusammenhang geben.

In dem Zeitraum von 2010 bis 2012, in welchem ungewöhnlich hohe NDVI-Werte beobachtet werden konnten, ist die Temperatur im Gegensatz deutlich geringer als in den anderen Referenzjahren. Zudem halten sich die positiven Werte über eine kürzere Zeit im positiven Bereich, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die saisonalen klimatischen Schwankungen in diesem Zeitraum geringer ausgefallen sind, als in den anderen Jahren der Zeitreihe. Es scheint, als würden kurze Wärmeperioden mit geringen Temperaturen einen positiven Einfluss auf die Entwicklung der NDVI-Werte nehmen. Sodass die NDVI-Werte aufgrund der geringeren Hitze nicht so stark abnehmen und die Saisonalität verringert wird.

Nachdem die Abweichung der Temperatur vom 20-Jahresmittel untersucht wurde, erfolgt ein Abgleich mit den Niederschlagswerten für denselben Zeitraum. Die Niederschlagswerte wurden mit derselben Methodik ermittelt, wie die der Temperatur. Anschließend folgt ein Abgleich der Temperatur- und Niederschlagswerte, um eventuelle Trockenheit oder Feuchte im Untersuchungsgebiet zu bestimmen. Die in Abbildung 14 dargestellten Abweichung vom Mittel zeigen insbesondere während der Brandereignisse 2002 bis 2003 und 2006 bis 2007 Niederschlagsabweichungen im negativen Bereich. In diesen Zeiträumen ist die Niederschlagsmenge geringer ausgefallen, als es im Mittel der Fall war. Nicht nur die Niederschlagsmenge ist in den einzelnen Monaten geringer ausgefallen, sondern auch der Zeitraum mit geringeren Niederschlägen, als im Mittel ist vergleichsweise lang. Im Gegensatz dazu stehen die hohen und zeitlich relativ langanhaltenden Niederschlagsmengen zwischen 2010 und 2012. Die Abweichungswerte erreichen Höchstwerte und halten sich auf diesem hohen Niveau vergleichsweise lange.

Abschließend erfolgt die gemeinsame Untersuchung der Temperatur- und der Niederschlagsabweichung für die bereits definierten Zeiträume. Es lässt sich festhalten, dass die Zeiträume, in denen die Brandereignisse aufgetreten sind, ungewöhnlich hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum anzutreffen waren. Somit könnten die vergleichsweise hohen und anhaltenden Tem-

peraturen Einfluss auf die Entstehung der Brandereignisse gehabt haben. Zudem waren die Niederschläge zur gleichen Zeit deutlich geringer, als es im Mittel der Fall war. Die anhaltenden hohen Temperaturen in Kombination mit den geringen Niederschlagswerten über einen vergleichsweisen langen Zeitraum könnten zu Trockenheit im Gebiet geführt haben und somit die Entstehung der Brände begünstigt haben.

Für den Zeitraum von 2010 bis 2012 sind hingegen milde Temperaturen mit hohen Niederschlagsmengen zu beobachten, welche die Saisonalität der vegetativen Flächen scheinbar beeinflusst haben. Es kam nicht zu einer deutlich geringeren Abnahme der NDVI-Werte in allen drei Landnutzungsklassen Gras, Busch und Wald. Wie bereits in Kapitel 4.1 herausgestellt wurde, erfolgt der saisonale Abschwung mit steigenden Temperaturwerten im Untersuchungsgebiet trotz zunehmender Niederschlagswerte. Somit scheint die Vegetation im Untersuchungsgebiet besonders auf den Anstieg der Temperatur mit einem Abbau der Biomasse zu reagieren. Für die Regenerationszeit nach Brandereignissen könnte das bedeuten, dass eine schnelle Regeneration der Vegetation insbesondere dann erfolgt, wenn in Folgejahren nach den Brandereignissen vergleichsweise geringe Temperaturen vorherrschen. Die vergleichsweise hohen Niederschlagswerte könnten ebenfalls einen positiven Einfluss auf die Regeneration nehmen. In einer weiteren Untersuchung könnten die statistischen Zusammenhänge mittels Korrelations- und Regressionsanalyse herausgestellt werden.

7 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Detektion von Brandereignissen mit dem NDVI sowie die Vegetationsregeneration nach besonders starken Brandereignissen mithilfe von frei zugänglichen Daten aus der GEE auch auf einen großräumigen Maßstab anzuwenden sind. Außerdem wurde untersucht, wie sich die Branddetektion und die Ausbreitung auf unterschiedlichen Vegetationsklassen aufteilt und wie sich die klimatischen Verhältnisse auf die Vegetationsregeneration auswirken.

7.1 Methodenkritik

Die in dieser Studie verwendete Methodik, welche in Kapitel 3 vorgestellt wurde, hat ihre Stärken in der zeitlichen Bestimmung der Brandereignisse aufgrund der möglichen Ermittlung des Eintretens mittels einer NDVI-Zeitreihe und den Daten zu den verbrannten Flächen über den Codeeditor der GEE. Die GEE bietet somit eine kostenlose Möglichkeit, Brandereignisse und die darauffolgende Regeneration der Vegetation mittels optischen Fernerkundungsdaten zu untersuchen und anschließend den Einfluss der klimatischen Verhältnisse auf diese zu ermitteln. Außerdem scheint der Abgleich der NDVI-Entwicklung mit einer gemittelten Referenzperiode sinnvoll, da Extremereignisse innerhalb der Zeitreihe

identifiziert werden können und vor dem Hintergrund der natürlichen Wachstumseigenschaften der Pflanzen abgeglichen werden können. Auch Nolde et al. (2021) konnten mit einer ähnlichen Methode Brandereignisse im Osten Australiens und deren Folgen für die Natur untersuchen.

Die verwendeten Fernerkundungsdatensätze dieser Arbeit stellen räumlich teilweise niedrige Auflösungen dar, was zu einem Informationsverlust kleinräumiger Ereignisse führt. Weiter führen Unterschiede in der zeitlichen Auflösung der verwendeten Datensätze zu einer Verkomplizierung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Um einen Informationsverlust bei zukünftigen Datenerhebungen zu vermeiden, bietet es sich an, Datensätze mit einer höheren räumlichen, wie auch zeitlichen Auflösung zu wählen und auf kleinere Untersuchungsgebiete zuzuschneiden. Dabei ist der Vorteil, dass besonders kleinräumige und kurzfristige Änderungen im jeweiligen Untersuchungsgebiet detektiert und untersucht werden können. Weiter kann die Verwendung von Radardaten dazu genutzt werden, um die Brandereignisse und deren Dynamik während Zeitperioden zu untersuchen bei denen optische Sensoren aufgrund von atmosphärischen Störfaktoren wie Rauch oder Wolken keine validen Messdaten liefern können. Weiter stellt die Verwendung zusätzlicher Indizes wie dem Burned Area Index (BAI) wie bei Sharma et al. (2022), eine Chance dar, die gemessenen Daten zu validieren und Messfehler einfacher zu identifizieren. Hinsichtlich der verwendeten klimatischen Daten sollten auch Messdaten, welche vor Ort ermittelt wurden mit in die Untersuchungen mit einbezogen werden.

Eine Korrelations- und Regressionsanalyse würde die Repräsentativität der gemessenen Daten zudem erhöhen. Neben den klimatischen Verhältnissen sollten außerdem die topographischen, hydrologischen und anthropogenen Einflüsse auf das Gebiet untersucht werden, um ein umfangreicheres Verständnis der Regeneration der betroffenen Vegetationsflächen zu erhalten.

Außerdem sollte geprüft werden, inwiefern ein anthropogener Einfluss auf die Regeneration der Vegetationsbestände besteht. Insbesondere gilt dies für die Vegetationsklassen von Busch und Wald aufgrund der deutlich größeren Flächenausdehnung und der langsameren sowie saisonalen höheren vegetativen Regeneration als bei Grasflächen. Die ausgeprägten saisonalen Schwankungen von Grasflächen führen zu einer schwierigen Detektion von Brandereignissen über den NDVI. Die NDVI-Werte steigen nach dem Brandereignis zunehmend dynamisch an und Extremereignisse im unteren NDVI-Bereich lassen sich nur geringfügig erkennen. Eine Detektion mittels verbrannter Flächen kann ebenfalls nur als Indikator für eine ungefähre zeitliche Einordnung des Brandereignisses genutzt wer-

den, denn verbrannte Flächen zeigen schlussendlich nur den Status quo nach dem Brandereignis und nicht den Zeitpunkt des Eintretens.

Zudem könnte eine längere Zeitreihe genutzt werden, um die Validität der gemittelten Referenzperiode zu erhöhen und eine höhere Anzahl an großräumigen Brandereignissen zu erhalten, welche in ihrer Regenerationszeit und den vorherrschenden klimatischen Verhältnissen verglichen werden könnten.

7.2 Branddetektion in unterschiedlichen Landnutzungsklassen

Die Detektion der Brandereignisse in Victoria erfolgte mithilfe der Langzeitvergleiche der NDVIs (Abb. 9). Durch den Vergleich der rapide absteigenden NDVI-Werte in den Datenreihen mit den gemeldeten Brandereignissen des State Government of Victoria (2023a) konnten die Brände "Big Desert Fire" für die Landnutzungsklasse Busch in den Jahren 2002/03 und die "Great Divide Fires" für die Landnutzungs-klasse Wald in den Jahren 2006/07 detektiert werden (s. a. Abb. 5). An diese Methode angelehnte Studien wurden häufig außerhalb von Australien und auch in großmaßstäbigen Untersuchungsgebieten angewendet (Panuju et al. 2010, Rem-mel & Perera 2001). Eine weitere Methode zur Detektion von Bränden durch Remote Sensing Daten auf Grundlage von Umweltreaktionen stellt die Studie von Boer et al. (2008) vor, welche den Leaf Area Index (LAI) nutzte.

Aktuelle Studien nutzen häufig Brandindizes, wie den Relative differenced Normalized Burn Ratio (RdNBR) oder den differenced Normalized Burn Ratio (dNBR), um Brandereignisse zu identifizieren (Ndalila et al. 2018, Sharma et al. 2022, Sharma et al. 2023). Ein Vorteil dieser Indizes ist es, neben den Ereignissen auch die Brandintensität zu analysieren. Gegenüber der Detektion auf Grundlage von Umweltreaktionen bieten die Indizes für die Fragestellung der Vegetationsregeneration in einem großmaßstäbigen Untersuchungsgebiet jedoch einige Nachteile. Zum einen ist die Empfindlichkeit gegenüber der Brandintensität herabgesenkt, da die Indizes auf Veränderungen im spektralen Verhalten nach und vor einem Brand reagieren. Da der NDVI die spektrale Veränderung der Vegetation auch über einen langfristigen Zeitraum misst, sind auch geringe Veränderungen durch einen Brand detektierbar. Weiterhin sind die genauen zeitlichen Auflösungen eines Brandes nicht in einem Brandindex enthalten, welche jedoch essenziell für die Vegetationsregenerationsanalyse und somit für die Fragestellung dieser Studie sind.

Die Analyse von Branddetektionen in unterschiedlichen Landnutzungsklassen bzw. konkret in den Vegetationseinheiten Wald, Busch und Gras in dieser Studie zeigt eine sinnvolle Abgrenzung zur Detektion von Brandereignissen. In den Ergebnissen der Langzeit-NDVI-Zeitreihe sind insbesondere die Brandauswirkungen in der

Vegetationsklasse Wald deutlich erkennbar. Häufig werden in den aktuellen Studien schon konkrete Brandereignisse vorgestellt, wie der Black Friday Brand in Victoria im Jahr 2009 und nicht erst mithilfe von Remote Sensing Daten detektiert (Sharma et al. 2022, Sharma et al. 2023). Diese Studie zeigt wiederum, dass die Detektion von Brandereignissen in Abhängigkeit der Umweltreaktion auch auf Gebiete anwendbar wäre, welche keine historischen Aufzeichnungen vorweisen.

Konkret ist zu sagen, dass Unterschiede in der Detektion und Ausbreitung von Brandereignissen innerhalb unterschiedlicher Vegetationsklassen mithilfe des Langzeit-NDVIs festgestellt wurden.

7.3 Vegetationsregeneration

Die Analyse einer Vegetationsregeneration in dieser Studie stellte der NDVI-Wert vor, während, nach und 2 Jahre nach dem Brandereignis im Vergleich zum Langzeit-NDVI dar. Die Vegetationsklassen Busch und Wald wurden in den mit den Langzeit-NDVI detektierten Großbrandereignissen "Big Desert Fire" und "Great Divide Fires" analysiert. Dabei sind wesentliche Unterschiede in der Regeneration von Busch und Wald festzustellen. Der NDVI-Verlauf für die Klasse Wald liegt ein Jahr nach dem Brandereignis annähernd wieder auf dem Niveau, wie kurz vor dem Brand. Bei dem Brandereignis in der Klasse Busch erholt sich der Vegetationstyp direkt im Brandjahr kurzfristig wieder, ist aber auch im darauffolgenden Jahr noch auf einem niedrigen Niveau und erreicht nicht den vor dem Brandereignis festgestellten NDVI-Wert.

Wie Sharma et al. (2023) ermittelte, scheint es auch in dieser Studie eine Korrelation zwischen den Klimadaten und der Vegetationsregeneration. Insbesondere das Jahr 2011, welches im Untersuchungsgebiet besonders feucht und mild im Vergleich zu den anderen Jahren ausfiel, hatte einen positiven Einfluss auf die Wald-Vegetationsregneration. Diese Beobachtung stellte auch die Sharma-Studie fest und identifizierte günstige Niederschlagsmengen und Temperaturen nach einem Brandereignis als wesentliche Faktoren für eine erfolgreiche Vegetationsregeneration.

Im Gegensatz zur Sharma-Studie (2023), welche auch den Einfluss der Topographie analysierte, fokussierte sich diese Studie auf die klimatischen Prozesse und deren Auswirkungen auf die Vegetationsregeneration. Aus diesem Grund ist nicht auszuschließen, dass auch in den betrachteten Gebieten der Einfluss der Topographie noch miteinbezogen werden muss. Außerdem ist eine weitere ungeklärte Variable die tatsächliche Ausbreitung der vorhandenen Vegetation in diesem Bereich, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Vegetationsregeneration hat. Hier wäre eventuell auch eine weitere Erklärung des Unterschiedes zwischen der Regeneration des Waldes und des Busches zu finden. Es ist bewiesen, dass insbesondere die Arten aus der Familie Eucalyptus in gewissen Maßen Feuer adaptiert sind, diese

treten jedoch mit unterschiedlichen Artausprägungen in beiden Vegetationsklassen auf. Weitere Studien könnten die Arten kategorisieren, die sich besonders gut von einem Brandereignis erholen.

8 Fazit und Ausblick

Abschließend werden die Ergebnisse dieser Studie gesammelt zusammengefasst und beschrieben. Insgesamt bietet die GEE eine geeignete Plattform, um Satellitendaten zu verarbeiten und mit diesen sowohl vergangene Brandereignisse als auch die anschließende Regeneration der Vegetation zu untersuchen. Insbesondere für Waldflächen ist die Ermittlung der Brandereignisse über die NDVI-Entwicklung möglich und lässt sich anschließend mittels verbrannter Flächen räumlich verordnen. Die Brandereignisse treten insbesondere in den warmen und trockenen Monaten auf. In dieser Studie konnten besonders die Brandereignisse 2002/03, 2006/07 und 2019/20 über den NDVI der Waldflächen detektiert werden. Ebenso können die Zeitreihen von der NDVI-Entwicklung und die Zeitreihen der klimatischen Verhältnisse abgeglichen werden, um deren Einfluss auf die Brandereignisse und die Regeneration der Vegetationsflächen zu bemessen.

Für die einzelnen Vegetationsflächen (Gras, Busch, Wald) lässt sich festhalten, dass alle drei Klassen saisonalen Schwankungen unterliegen und die NDVI-Werte mit fallenden Temperaturen und zunehmenden Niederschlagsmengen im Jahresverlauf zunehmen. Insbesondere bei Grasflächen nimmt der NDVI bei fallenden Temperaturen und steigenden Niederschlägen verstärkt zu. Die NDVI-Werte von Busch- und Waldflächen haben einen ähnlichen saisonalen Verlauf und befinden sich im Maximum, wenn die Temperatur in der Nähe des Minimums liegt und die Niederschlagsmenge ihr Hoch erreicht.

Grasflächen erholen sich von Brandereignissen besonders schnell und sind räumlich heterogen im Untersuchungsgebiet verteilt. Die Brandflächen treten somit eher kleinräumig und verteilt über das Untersuchungsgebiet auf. Die Buschflächen erholen sich am langsamsten nach Brandereignissen und liegen in den Tieflagen des Untersuchungsgebietes unter dem Einfluss eines verhältnismäßig trockenen und warmen Klimas. Die Waldflächen sind eher in den Hochlagen des Untersuchungsgebietes vorzufinden und unterstehen einem verhältnismäßig kühleren und feuchteren Klima. Die lokal geringeren Temperaturen und die höheren Niederschläge scheinen die Regeneration der Waldflächen positiv zu beeinflussen.

Insgesamt sind die großräumigen Brände in den Klassen Wald und Busch ein natürlicher Zyklus in den Ökosystemen Australiens. Dennoch sollten, auch im Hinblick auf den Klimawandel und der Veränderung von Magnitude und Frequenz, die Brände weiterhin beobachtet werden.

Literaturverzeichnis

Australian Bureau of Statistics (ABS, 2021-2022): Regional population [https://www.abs.gov.au/statistics/people/population/regional-population/latest-release] zuletzt geprüft am 26.06.2023.

Australian Bureau of Statistics (ABS, 2022): National, state and territory population. [https://www.abs.gov.au/statistics/people/population/national-state-and-territory-population/latest-release] zuletzt geprüft am 26.06.2023.

Australian Disaster Resilience (AIDR) (2022): Remotely mapping fires. [https://knowledge.aidr.org.au/resources/ajem-april-2022-remotely-mapping-fires/] zuletzt geprüft am 29.06.2023.

Beadle, N. C. W. (1981): The Vegetation of Australia. In: Walter, H. & Breckle, S.-W. (1981): Vegetationsmonographien der einzelnen Großräume - Band IV. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart - New York.

Biddle, N., Bryant, C., Gray, M. & Marasinghe, D. (2020): Measuring the economic impact of early bushfire detection. In: The Australian National University Centre for Social Research and Methods.

Boer, M. M., Macfarlane, C., Norris, J., Sadler, R. J., Wallace, J. & Grierson, P. F. (2008): Mapping burned areas and burn severity patterns in SW Australian eucalypt forest using remotely sensed changes in leaf area index. In: Remote Sensing of Environment Volume 112, Issue 12, 4358-4369.

Demir, N. (2020): NDVI Analysis of Australian Bushfires with Cloud Computing. In: Turkish Journal of Remote Sensing and GIS 1(2): 78-84.

Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y. & Shao, G. (2021): A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. In: Journal of Forestry research. Band: 32.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. & Ferreira, L.G. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. In: Remote Sensing of Environment. Band: 83. Ausgabe: 1-2. 195–213.

Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Vermote, E.F., Masuoka, E., Wolfe, R.E., Saleous, N., Roy, D.P. & Morisette, J.T. (2002): An overview of MODIS Land data processing and product status. In: Remote Sensing of Environment. Band: 83.

McRae, R. (2022): Remotely mapping fires. In: Australian Journal of Emergency Management, Volume 37 No. 2.

Ndalila, M. N., Williamson, G. J. & Bowman D. M. J. S. (2018): Geographic Patterns of Fire Severity Following an Extreme Eucalyptus Forest Fire in Southern Australia: 2013 Forcett-Dunalley Fire. In: Fire 2018, 1, 40.

Nolde, M., Mueller, N., Strunz, G., Riedlinger, T. (2021): Assessment of Wildfire Activity Development Trends for Eastern Australia Using Multi-Sensor Earth Observation Data. In: Remote Sens. 2021; 13, 4975.

Panuju D. R., Trisasongko, B. H., Susetyo, B., Raimadoya, M. A. & Lees, B. G. (2010): Historical Fire Detection of Tropical Forest from NDVI Time-series Data: Case Study on Jambi, Indonesia. In: ITB J. Sci. Vol. 42 A, No. 1, 49-66.

Partheepan, S., Sanati, F. & Hassan, J. (2023): Autonomous Unmanned Aerial Vehicles in Bushfire Management: Challenges and Opportunities. In: Drones 2023, 7(1), 47.

Peel, M. C., Finlayson, B. I. & McMahon, T. A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. In: Hydrology and Earth System Sciences, 11, 1633–1644.

Rees, H. (1962): Australasia - Australia, New Zealand and the Pacific Islands. In: The New Certificate Geography Series. MacDonald & Evan, London.

Remmel, T. K. & Perera, A. H. (2001): Fire mapping in a northern boreal forest: assessing AVHRR/NDVI methods of change detection. In: Forest Ecology and Management 152 (2001) 119-129.

Sharma, S. K., Aryal, J. & Rajabifard, A. (2022): Remote Sensing and Meterological Data Fusion in Predicting Bushfire Severity: A Case Study from Victoria, Australia. In: Remote Sensing 2022, 14, 1645.

Sharma, S. K., Aryal, J. & Rajabifard, A. (2023): Leveraging Google Earth Engine (GEE) and Landsat Images to Assess Bushfire Severity and Postfire Short-Term Vegetation Recovery - A Case Study of Victoria, Australia. In: Pandey, P. C. & Arellano, P. (2023): Advances in Remote Sensing for Forest Monitoring. Wiley, 196 - 220.

Sharples, J. J., Cary, G. J., Fox-Hughes, P., Mooney, S., Evans, J. P., Fletcher, M.-S., Fromm, M., Grierson, P. F., McRae, R. & Baker, P. (2016): Natural hazard in Australia: extreme bushfire. In: Climatic Change 139: 85 - 99. Springer Science + Business Media Dordrecht.

State Government of Victoria (2023a): Past bushfires - A chronology of major bushfires in Victoria from 2020 back to 1851. [https://www.ffm.vic.gov.au/history-and-incidents/past-bushfires] zuletzt geprüft am 26.06.2023.

State Government of Victoria (2023b): Bioregions and EVC benchmarks. [https://www.environment.vic.gov.au/biodiversity/bioregions-and-evc-benchmarks] zuletzt geprüft am 27.06.2023.

State Government of Victoria (2023c): About the Office of Bushfire Risk Management. [https://www.vic.gov.au/about-office-of-bushfire-risk-management] zuletzt geprüft am 30.06.2023.

State Government of Victoria (2023d): Forest Fire Management Victoria. [https://www.ffm.vic.gov.au/who-we-are/forest-fire-management-victoria] zuletzt geprüft am 30.06.2023.

The State of Victoria Department of Sustainability and Environment (2004a): Ecological Vegetation Class Benchmarks of the Lowan Mallee Bioregion. Download unter: [https://www.environment.vic.gov.au/biodiversity/bioregions-and-evc-benchmarks].

Vardoulakis, S., Marks, G. & Abramson, M. J. (2020): Lessons Learned from the Australian Bushfires - Climate Change, Air Pollution, and Public Health. In: JAMA Intern Med. 2020; 180(5): 635-636.

Berg, E., Buschmeier, J. & Hüsgen, T. (2024): Buschbrandmonitoring auf Grundlage von optischen Fernerkundungsdaten im Bundesstaat Victoria (Australien) – Vegetationsregeneration auf Brandflächen. In Stauch, G. (Hrsg.): Angewandte Fernerkundung mit der Google Earth Engine. S. 66 – 98.

DOI: 10.18154/RWTH-2024-03416