



NMVOC-Emissionen der Waldflächen in der Schweiz

Zeitreihe 1990–2016, langfristige Entwicklung, Sensitivitätsanalyse für zwei Extremtage

Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien
Kontaktperson	Dr. Beat Müller
Adresse	3003 Bern
Datum	30.01.2019
Aktuelle Version	Schlussbericht
Ältere Versionen	05.06.2018 16.11.2017 Bericht Vorstudie, 09.05.2017
Projektnummer	16_085
Datei	Bericht_NMVOC_biogen_v190130
Erstellt durch	Simon Albrecht-Widler, Beat Rihm, Jan Remund
Kontrolliert durch	21.01.2019 Beat Rihm
Genehmigt durch	22.01.2019 René Cattin
Hinweis	Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.
Gewährleistung	Meteotest gewährleistet ihren Kunden eine sorgfältige und fachgerechte Auftragsbearbeitung. Jegliche Haftung, insbesondere auch für Folgeschäden, wird im Rahmen des gesetzlich Zulässigen wegbedungen.

Abkürzungen

BA	Vorherrschende Baumart gemäss LFI (VORHERBA)
CC	Combined categories: Arealstatistik-Codes im Treibhausgasinventar
EEA	European Environment Agency
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EMIS	Emissionsinformationssystem der Schweiz
LF11	Landesforstinventar, Ersterhebung 1982–1986
LF13	Landesforstinventar, Dritterhebung 2004–2006
mtl	Monoterpen-Emissionstyp ("light") licht- und temperaturabhängig
mts	Monoterpen-Emissionstyp ("stores") temperaturabhängig
NMVOC	Non-methane volatile compounds
OVOC	Oxygenated volatile organic compounds
VOC	Volatile organic compounds
WMG	Waldmischungsgrad

Zusammenfassung

Im vorliegenden Dokument wird eine aktualisierte Methode zur Berechnung der biogenen NMVOC-Emissionen aus Wäldern für das EMIS beschrieben.

Mit Hilfe neu erstellter Inputkarten für Temperatur, Vegetationsperiode und Baumarten wurden die biogenen NMVOC-Emissionen aus Wäldern monatlich und für jede Baumart separat für die Jahre 1990–2016 berechnet. Zur Anwendung kam eine vereinfachte Methode gemäss EMEP/EEA (2003). Mit der eingesetzten Methode konnten die Emissionen für Isopren, Monoterpen und OVOC (oxygenated volatile organic compounds) räumlich hoch aufgelöst auf einem Raster von 100 x 100 m für jeden Monat berechnet werden.

Die Ergebnisse liegen in derselben Grössenordnung wie bisherige Studien. Die Emissionen betragen 1990 60.8 kt NMVOC und nahmen bis 2016 im Mittel um 0.34% pro Jahr zu (Abbildung S1). Die Zunahme ist zu rund einem Drittel auf den Zuwachs bei der Waldfläche zurückzuführen und zu zwei Dritteln auf steigende Temperaturen, welche eine Verlängerung der Vegetationsperioden und eine Erhöhung des Korrekturfaktors der Temperatur bewirken. Die Summe der NMVOC-Emissionen variiert von Jahr zu Jahr um etwa 20%. Dies ist hauptsächlich auf die Schwankung der Temperatur und der Sonnenstunden zurückzuführen, wobei die Sommertemperatur für die Variation von Jahr zu Jahr wichtiger ist als die Jahresmitteltemperatur.

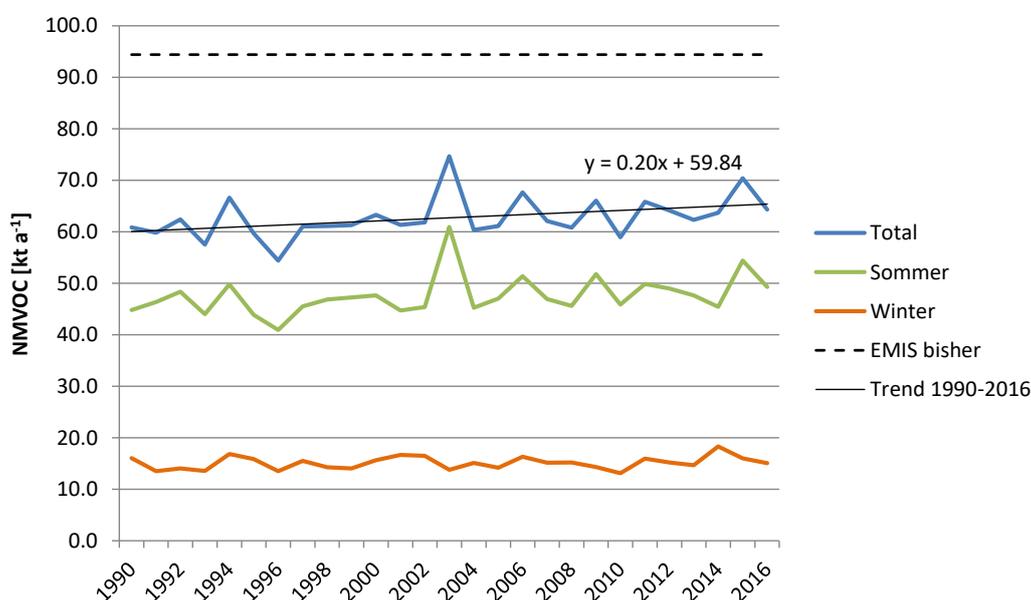


Abbildung S1: Zeitreihe der NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1990–2016 sowie Vergleich gegenüber bisheriger Zeitreihe in EMIS (gestrichelt exkl. Waldbrand von 0.61 kt a⁻¹).

Eine Aufschlüsselung der Ergebnisse nach Baumart zeigt, dass aufgrund ihres hohen Flächenanteils und Emissionspotentials Fichten und Tannen zusammen

gut 80% zur Gesamtemission beitragen. Die höchste durchschnittliche Emission pro Hektare hat die Eiche infolge ihres hohen Emissionspotentials für Isopren.

Die langfristige Entwicklung wurde durch Anwendung der gleichen Methode für die Jahre 1900 und 2100 abgeschätzt. Im Jahr 1900 werden etwa 75% der heutigen Emissionen erreicht. Die Differenz zu heute ist zu je etwa der Hälfte auf den Zuwachs der Waldfläche (siehe Kapitel 3.1.2) und den Klimawandel (Temperatur) zurückzuführen. Mit 93.8 kt im Jahr 2100 erreichen die Emissionen einen Wert, welcher heute als konstanter Wert im Emissionsinventar aufgeführt ist. In der gesamten Zeitperiode von 1900 bis 2100 kommt es gemäss den Modellrechnungen zu einer Verdoppelung der Emissionen.

Bei einer Sensitivitätsanalyse wurden die Emissionen an zwei Extremtagen im Juli 2014 verglichen. Die Emissionen an einem sonnigen/heissen Tag sind rund zwei- bis dreimal so hoch wie an einem bewölkten/kühlen Tag.

Generell ist bei der Berechnung von biogenen NMVOC-Emissionen eine Unsicherheit von einem Faktor drei zu erwarten (EMEP/EEA, 2016). Durch die Verwendung von räumlich gut aufgelösten Vegetationskarten und nationalen Biomassedaten in der vorliegenden Studie dürfte ein Faktor zwei zu erwarten sein. Damit würde die mittlere NMVOC-Emission der untersuchten Jahre 63 kt VOC (Bereich 30 bis 128 kt VOC) betragen. Wie Oderbolz et al. (2013) erwähnen, ist es wichtig, die Baumarten auf Stufe Spezies (und nicht nur die Gattung) zu kartieren. So variieren z.B. die Emissionspotentiale von Isopren für verschiedene Eichenarten um mehrere Grössenordnungen. Der in der vorliegenden Arbeit aufgeführte Wert ist aber für die drei häufigsten Eichenarten der Schweiz (Stieleiche, Traubeneiche, Flaumeiche) gültig.

Résumé

Le présent document décrit une méthode actualisée de calcul des émissions de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) biogènes provenant des forêts conçue pour alimenter la banque de données du Système d'information sur les émissions en Suisse (EMIS).

À l'aide de nouvelles cartes des températures, des périodes de végétation et des essences, les émissions mensuelles de COVNM biogènes des forêts ont été calculées séparément pour chaque essence pour les années 1990 à 2016. Une méthode simplifiée selon EMEP/EEA (2003) a été appliquée. Elle a permis de calculer les émissions d'isoprène, de monoterpène et de composés organiques volatils oxygénés (COVO) sur une grille à haute résolution de 100 x 100 m pour chaque mois.

Les résultats se situent dans le même ordre de grandeur que ceux des études réalisées à ce jour. En 1990, les émissions se sont montées à 60,8 kt COVNM et ont augmenté en moyenne de 0,34 % par année jusqu'en 2016 (figure S1). L'augmentation est le fait, pour un tiers environ, de la croissance de la surface forestière et, pour deux tiers, de la hausse des températures, qui prolonge les périodes de végétation et implique une augmentation du facteur de correction de la température. La somme des émissions de COVNM varie de 20 % environ d'une année à l'autre. Ce fait est essentiellement dû aux variations de la température et des heures d'ensoleillement. La température estivale est cependant plus importante pour la variation d'une année à l'autre que la température annuelle moyenne.

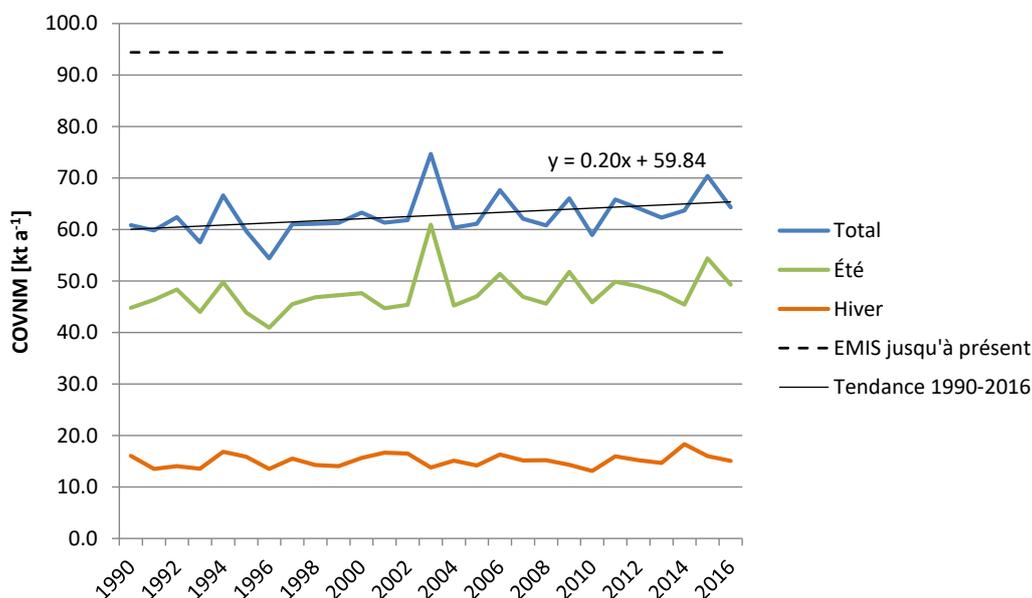


Figure S1 : Série chronologique des émissions de COVNM des surfaces forestières de 1990 à 2016 et comparaison par rapport à la série temporelle dans EMIS (en pointillé, sans incendie de forêt de 0,61 kt a⁻¹).

Une répartition des résultats par essence montre que, en raison de la part de superficie importante qu'ils occupent et de leur potentiel d'émissions, les épicéas et les sapins contribuent ensemble à près de 80 % des émissions totales. Le chêne présente l'émission moyenne par hectare la plus élevée en raison de son potentiel d'émission d'isoprène important.

L'évolution à long terme a été estimée pour les années 1900 et 2100 au moyen de la même méthode. En 1900, les émissions atteignaient environ 75 % des émissions actuelles. La différence par rapport à aujourd'hui est due pour moitié à la croissance de la surface forestière (voir point 3.1.2) et pour moitié au changement climatique (température). Avec un total de 93,8 kt en 2100, les émissions atteignent une valeur qui figure aujourd'hui comme valeur constante dans l'inventaire des émissions. Sur l'ensemble de la période de 1900 à 2100, les modèles indiquent une multiplication des émissions par deux.

Une analyse de sensibilité a comparé les émissions enregistrées lors de deux journées extrêmes de juillet 2014. Les émissions produites lors d'une journée ensoleillée et chaude sont environ deux à trois fois plus élevées que celles d'une journée nuageuse et fraîche.

De manière générale, il faut tenir compte d'une incertitude de facteur trois dans le calcul des émissions de COVNM biogènes (EMEP/EEA, 2016). En raison de l'utilisation, dans la présente étude, de cartes de végétation présentant une résolution spatiale élevée et de données de biomasse nationales, un facteur deux devrait suffire. De cette manière, l'émission moyenne de COVNM des années examinées devrait se monter à 63 kt COV (fourchette de 30 à 128 kt COV). Comme l'indiquent Oderbolz et al. (2013), il est important que les essences soient cartographiées au niveau de l'espèce (et pas seulement du genre). Ainsi, par exemple, les potentiels d'émission d'isoprène varient fortement d'une espèce de chêne à l'autre. La valeur figurant dans le présent travail est toutefois valable pour les trois espèces de chênes les plus courantes en Suisse (chêne pédonculé, chêne rouvre, chêne pubescent).

Inhalt

1	Einleitung	11
2	Methodik zur Berechnung der Emissionen	12
3	Datengrundlagen	14
3.1	Erstellung der Baumarten-Karten.....	14
3.1.1	Baumarten-Karten 1990–2016.....	14
3.1.2	Baumarten-Karte 1900	18
3.1.3	Baumarten-Karte 2100	19
3.2	Berechnung der Klimakarten.....	19
3.2.1	Temperaturkarten 1990–2016	19
3.2.2	Temperaturkarte 1900	21
3.2.3	Temperaturkarte 2100	22
3.2.4	Karten der Vegetationsperioden	22
4	Resultate	25
4.1	Zeitreihe.....	25
4.2	Vergleich sonniger vs. trüber Tag	34
4.3	Langfristige Entwicklung Klima und Wald.....	37
5	Unsicherheiten	40
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	41
7	Referenzen	42

Tabellen

Tabelle 1:	Die Kategorien der "vorherrschenden Baumart" (BA) aus dem LFI 1, Dichte der Blatt-Biomasse sowie die Standard-Emissionspotenziale (ϵ) pro Blattbiomasse gemäss EMEP/EEA (2016).....	16
Tabelle 2:	Waldfläche der Schweiz 1880–2000 (nach Ginzler et al. 2011) pro LFI-Region.....	19
Tabelle 3:	Monatswerte für tfactor und Anzahl Tageslichtstunden.....	21
Tabelle 4:	Monatswerte für tfactor_Min.	21
Tabelle 5:	Total der NMVOC-Emissionen des Waldes in der Schweiz für die Jahre 2003, 2009 und 2014 in kt C pro Jahr sowie der Vergleich zu den Emissionen aus anderen Studien.	26
Tabelle 6:	Total der NMVOC-Emissionen des Waldes in der Schweiz für das Jahr 2014 in kt C aufgeschlüsselt nach Baumart sowie die mittleren Emissionen in kg C pro Hektare pro Baumart.....	27
Tabelle 7:	Zeitreihe der NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1990–2016, aufgeteilt auf Sommer (April bis September) und Winter (Oktober bis März).....	31

Tabelle 8:	Übersicht über die untersuchten Baumarten an den gewählten Standorten.....	35
Tabelle 9:	Tagessummen der NMVOC-Emissionen. Vergleich der beiden Beispieltage für ausgewählte Baumarten.....	37
Tabelle 10:	Vergleich der Beispieltage mit dem Monatsmittel des Juli 2014....	37
Tabelle 11:	NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1900 und 2100, aufgeteilt auf Sommer (April bis September) und Winter (Oktober bis März).	39

Abbildungen

Abbildung 1:	Monatsmittelwerte der Lufttemperatur der drei gewählten Jahre für die ganze Schweiz (Quelle: MeteoSchweiz).	12
Abbildung 2:	Verteilung der Baumarten (Hektar-Raster) für das Jahr 2016.	17
Abbildung 3:	Berechnete Entwicklung der Waldfläche auf dem Hektar-Raster für ausgewählte Jahre. Im Gebiet von Locarno werden, ausgehend von der Waldfläche 1990, die bis 1997 bzw. bis 2016 neu dazu gekommenen Flächen dargestellt.	17
Abbildung 4:	Karte der fünf LFI-Regionen (Daten: Schweizerisches Landesforstinventar, © 2012 Eidg. Forschungsanstalt WSL, CH-8903 Birmensdorf; Grundlagen: swisstopo, © 1990). Hintergrund: Drei Klassen der Höhe über Meer (Elevation).....	18
Abbildung 5:	Anzahl Tageslichtstunden und tfactor im Jahresverlauf.	20
Abbildung 6:	Länge der Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Monat) auf den Waldflächen, am Beispiel des Jahres 2016 (April bis November von links oben nach rechts unten).	23
Abbildung 7:	Länge der Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Monat) auf den Waldflächen für April und Oktober ausgewählter Jahre	24
Abbildung 8:	Entwicklung der biogenen NMVOC-Emissionen in kt C im Jahresverlauf für 2003, 2009 und 2014.	25
Abbildung 9:	Total der biogenen NMVOC-Emissionen in kt C für die Jahre 2003, 2009 und 2014.	25
Abbildung 10:	Emission von Isopren für die Jahre 2003, 2009 und 2014.	28
Abbildung 11:	Emission von Monoterpenen für die Jahre 2003, 2009 und 2014.	29
Abbildung 12:	OVOC -Emissionen für die Jahre 2003, 2009 und 2014.	30
Abbildung 13:	Zeitreihe der NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1990–2016 sowie Vergleich gegenüber bisheriger Zeitreihe in EMIS (gestrichelt exkl. Waldbrand von 0.61 kt a ⁻¹).....	31
Abbildung 14:	Total der NMVOC-Emissionen für die Jahre 2003, 2009 und 2014.	33
Abbildung 15:	Vergleich der NMVOC-Emissionen für das Sommer- und das Winterhalbjahr der Jahre 2003, 2009 und 2014.	34

Abbildung 16: Globalstrahlung (oben) und Temperatur (unten) für einen sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014, links) und einen bewölkten/kühlen Tag (8. Juli 2014, rechts) an drei ausgewählten Messstationen.	35
Abbildung 17: Vergleich der NMVOC-Emissionen der Buche an einem sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014) gegenüber einem bewölkten/kühlen Tag (8. Juli 2014) am Standort Payerne	36
Abbildung 18: Vergleich der NMVOC-Emissionen der Fichte an einem sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014) gegenüber einem bewölkten/kühlen Tag (8. Juli 2014) am Standort Davos	36
Abbildung 19: Vergleich der NMVOC-Emissionen der Kastanie an einem sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014) gegenüber einem bewölkten/kühlen Tag (8. Juli 2014) am Standort Magadino	36
Abbildung 20: Zeitreihe der NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1990–2016 sowie Vergleich gegenüber bisheriger Zeitreihe in EMIS (gestrichelt exkl. Waldbrand von 0.61 kt a^{-1}) sowie den Werten für 1900 und 2100.	38

1 Einleitung

In EMIS werden die biogenen NMVOC-Emissionen aus naturnahen Flächen wie Wald oder Alpweiden bisher als zeitlich konstante Werte geführt. Die Emissionen des Waldes betragen 95.01 kt/Jahr und diejenigen von naturnahem Grasland 0.51 kt/Jahr (BUWAL 1996); Wald ist also die dominante Quelle. Die Emissionswerte für Wald beruhen im Prinzip auf der Studie von Andreani-Aksoyoglu & Keller (1995) und wurden gemäss BUWAL (1996) und gemäss dem EMIS-Kommentar "Laubwald" (welcher auch Nadelwald abdeckt) auf die gesamte Waldfläche inkl. Gebüschwald des Jahres 1990 hochgerechnet; sie enthalten zudem noch 0.61 kt aus Waldbrand.

Die biogenen NMVOC-Emissionen sollen daher auf der Basis aktueller Methoden und Datengrundlagen neu modelliert werden (siehe Kapitel 2). Im Rahmen einer Vorstudie wurde anhand von drei klimatisch unterschiedlichen Jahren (2003, 2009, 2014) die Berechnungsmethodik gemäss EMEP-Guidebook (EMEP/EEA, 2016) auf Basis von Monatswerten umgesetzt¹.

Für den vorliegenden Bericht wurde die Methodik auf die gesamte Zeitreihe 1990-2016 angewendet. Zudem wurden die Berechnungen mit zeitlich wie auch räumlich differenzierten Karten der Vegetationsperiode sowie der Baumarten und der Waldflächen erweitert.

Schliesslich werfen wir einen Blick auf die langfristige Entwicklung mit einer Einschätzung zu den Emissionen für die Jahre 1900 und 2100.

Die kurzfristigen Schwankungen der Emissionen werden anhand zweier ausgewählter Sommertage, welche sich bezüglich Witterung stark unterscheiden, illustriert.

¹ Meteotest, 2017: NMVOC-Emissionen natürlicher Flächen in der Schweiz. Vorstudie für die Jahre 2003, 2009 und 2014. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt.

2 Methodik zur Berechnung der Emissionen

Das "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook" (EMEP/EEA, 2016) beschreibt ein vereinfachtes Emissionsmodell auf der Basis von klimatischen Monatswerten (Temperatur, Strahlung, Wachstumsperioden) und Baumarten. In der vorliegenden Studie wurde diese Berechnungsmethode für den Schweizer Wald umgesetzt. Die Ergebnisse wurden mit den Resultaten anderer Arbeiten verglichen.

Methodisch werden in erster Linie die wichtigsten Quellen (Nadel- und Laubbäume) bearbeitet. Weniger relevante Quellen (wie z.B. natürliches Grasland, siehe Spirig und Neftel, 2002) werden nicht betrachtet.

Die Modellierung der NMVOC-Emissionen für die naturnahen Flächen erfolgt auf dem Raster von 100 x 100 m. Die Berechnungsabläufe werden mit der Software ArcGIS² durchgeführt. In der Vorstudie wurden drei klimatisch verschiedene Jahre exemplarisch modelliert (siehe Abbildung 1):

- 2003: überdurchschnittlich heisser Sommer;
- 2009: eher kühles Jahr, aber mit warmem Sommer;
- 2014: warmes Jahr, aber mit kühlem Sommer.

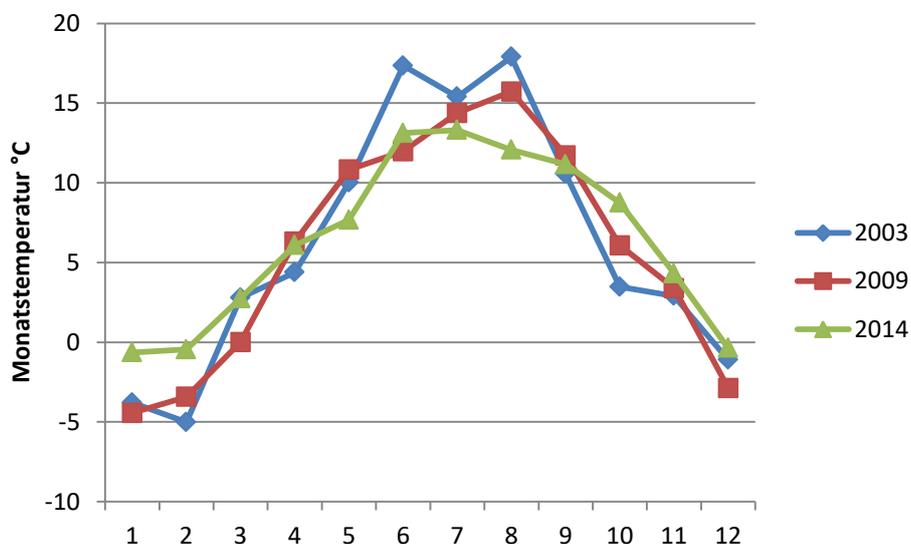


Abbildung 1: Monatsmittelwerte der Lufttemperatur der drei gewählten Jahre für die ganze Schweiz (Quelle: MeteoSchweiz).

Im Wesentlichen wird die Berechnung der Emissionen durch folgende Gleichung beschrieben (Details siehe EMEP/EEA, 2016):

² ArcGIS® Esri Inc. Redlands, USA

$$Emission [\mu g/m^2] = \sum_{mm=mm1}^{mm2} A * D * \gamma * \varepsilon * N_d * N_L$$

- mm1/2* Start/Ende der Wachstumsperiode (orts- und jahresspezifisch, nicht baumartspezifisch)
A Waldfläche [m²]
D Dichte der Blatt-Biomasse, variabel je nach Baumart [g m⁻²]
γ dimensionsloser Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Effekts kurzzeitiger Temperatur und Strahlungsänderungen auf die Emissionen
ε Standard-Emissionspotential [μg g⁻¹ h⁻¹], Emission pro Gramm Blatt-Biomasse
N_d Anzahl Tage pro Monat (Vegetationsperiode)
N_L Anzahl Tageslichtstunden pro Monat (mittlerer Wert eines Monats)

Hinweis: Das Standard-Emissionspotential ε fehlt fälschlicherweise in den Formeln des Guidebooks.

Werte für die Emissionspotentiale ε werden in der Literatur für Isopren, Monoterpene und OVOC (oxygenated volatile organic compounds) angegeben, wobei sich die verschiedenen Baumarten stark unterscheiden. Die Werte für die in der Schweiz kartierten Baumarten sind in Tabelle 1 aufgeführt. Wie Oderbolz et al. (2013) erwähnen, ist es wichtig, die Baumarten auf Stufe Spezies (und nicht nur die Gattung) zu kartieren. So variieren z.B. die Emissionspotentiale von Isopren für verschiedene Eichenarten um mehrere Größenordnungen. Der in Tabelle 1 aufgeführte Wert ist aber für die drei häufigsten Eichenarten der Schweiz (Stieleiche, Traubeneiche, Flaumeiche) gültig.

Für Isopren ist der Korrekturfaktor γ eine Funktion von Licht und Temperatur (γ_{iso}), d.h. die Emission findet nur während den Tageslichtstunden in der Vegetationsperiode statt. Für die meisten Baumarten hängt γ für Monoterpene (γ_{mts}) und OVOC (γ_{ovoc}) nur von der Temperatur ab, d.h. die Emissionen finden ganzjährig während 24 h pro Tag statt, werden jedoch durch tiefe Temperaturen gedämpft. Gewisse Baumarten – in der Schweiz vor allem die Fichte – zeigen auch für Monoterpene ein lichtabhängiges Emissionsverhalten (γ_{mtl}) (Oderbolz et al., 2013). Entsprechend wurden für die Fichte die beiden Emissionstypen für Monoterpene (γ_{mts} und γ_{mtl}) addiert. Luftfeuchtigkeit oder andere meteorologische Parameter werden in der Berechnungsmethodik nach EMEP/EEA (2016) nicht berücksichtigt.

Die verschiedenen chemischen Komponenten der NMVOC werden für die Verarbeitung in der EMIS-Datenbank als Summe von Isopren, Monoterpene und OVOC angegeben, so wie sie aufgrund der Emissionspotenziale berechnet werden. Für Quervergleiche und andere Auswertungen wird NMVOC in Kohlenstoff umgerechnet. Dabei wurde ein Faktor von 0.88 (60/68) für Isopren und Monoterpene verwendet, für OVOC ein Faktor von 0.42.

3 Datengrundlagen

3.1 Erstellung der Baumarten-Karten

3.1.1 Baumarten-Karten 1990–2016

Da sich die Emissionsberechnung je nach Baumart unterscheidet, wird eine Karte der Baumartenverteilung benötigt. Die Waldfläche nimmt in der Periode 1990–2016 von Jahr zu Jahr zu, wie die Arealstatistik des Bundesamtes für Statistik zeigt (FOEN 2018); dieser Effekt soll bei den jährlichen Emissionsberechnungen berücksichtigt werden. Zudem kann sich die Zusammensetzung der Baumarten auf den bestehenden Waldflächen verändern. Dieser Effekt wurde durch eine Analyse der vorherrschenden Baumarten im ersten und im dritten Landesforstinventar (LFI1 bzw. LFI3) untersucht, wobei er sich insgesamt als relativ klein herausstellte und deshalb vernachlässigt wurde.

Zur Berechnung der jährlichen Baumarten-Karten wurden somit folgende Datensätze verwendet:

- Vorherrschende Baumart (BA) auf dem 1x1 km Raster aus einem Datenbankauszug (LFI 1990/92) des ersten Landesforstinventars (EAFV/BFL 1988). Die BA weist 12 Kategorien auf (siehe Tabelle 1).
- Vorherrschende Baumart auf dem 1.4x1.4 km Raster aus einem Datenbankauszug des dritten Landesforstinventars (WSL 2017) mit den gleichen 12 Kategorien wie in LFI1.
- Waldmischungsgrad (WMG) des Bundesamts für Statistik (BFS/GEOSTAT) auf dem 100x100 m Raster. Der WMG wird in vier Klassen ausgedrückt: 1 = Nadelwald, 2 = Nadelmischwald (Mischwald mit dominantem Nadelwaldanteil), 3 = Laubmischwald (Mischwald mit dominantem Laubwaldanteil), 4 = Laubwald.
- Arealstatistik Schweiz 1979–1985 (AREA1) des Bundesamts für Statistik (BFS/GEOSTAT) auf dem 100x100 m Raster. Für die Identifizierung der Waldfläche wurde die gleiche Codierung verwendet, wie in FOEN (2018), nämlich die "combined categories" (CC) 11, 12 und 13.
- Arealstatistik Schweiz 2004–2009 (AREA3) des Bundesamts für Statistik (BFS/GEOSTAT) auf dem 100x100 m Raster. Auch hier wurde die Waldfläche mithilfe von CC 11, 12 und 13 definiert.

Die Baumartenkarten (siehe Beispiel in Abbildung 2) wurden auf einem Hektar-Raster (100x100 m) berechnet. Das Vorgehen war zusammengefasst wie folgt:

1. Die Baumarten-Daten von LFI1 und LFI3 wurden miteinander verknüpft, um die Veränderungen der Artenzusammensetzung innerhalb der Waldfläche zu

- analysieren. Ergebnis: Zwar wurde die Fichte z.T. durch Buche und andere Laubbäume verdrängt, aber auf den neu entstandenen Waldflächen ist dafür die Fichte vorherrschend. Die beiden Effekte gleichen sich zu einem grossen Teil wieder aus, sodass sich die BA-Verteilung nicht stark ändert. Deshalb wurde für die folgenden Arbeitsschritte mit einer zeitlich konstanten Verteilungskarte gerechnet.
2. Getrennt für Nadelhölzer und Laubhölzer wurde die auf den ca. 11'000 LFI1-Stichprobenpunkten vorhandene Information zur vorherrschenden Baumart (BA) in die Fläche ausgedehnt (bis 5 km Distanz).
 3. Auf den Flächen, die gemäss Waldmischungsgrad vorwiegend Nadelbäume aufweisen (WMG = [1, 2]), wurde die BA-Information des Nadelholz-Layers aus Schritt 2 übernommen. Auf den Flächen, die gemäss Waldmischungsgrad vorwiegend Laubbäume aufweisen (WMG = [3, 4]), wurde die BA-Information des Laubholz-Layers aus Schritt 2 übernommen. Auf diese Weise wurde das zeitlich konstante Hektarraster der vorherrschenden Baumarten erstellt.
 4. Die Arealstatistiken AREA1 und AREA3 wurden benutzt, um jährliche Karten der Waldfläche zu erstellen. Dabei wurde ähnlich vorgegangen wie bei der Berechnung der Flächendaten im Sektor LULUCF des Treibhausgasinventars (FOEN 2018). Das heisst:
 5. Für die Periode 1990–2006 wurde zwischen AREA1 und AREA3 interpoliert, indem die im Durchschnitt jährlich dazu wachsende Waldfläche mit einem Zufallsgenerator den in AREA3 neu entstandenen Wald-Rasterzellen zugeordnet wurde (siehe Beispiel in Abbildung 3). Auf die gleiche Art wurden die zwischen AREA1 und AREA3 entwaldeten Gebiete in Jahresschritten eliminiert. Das Jahr 2006 entspricht dem mittleren Flugjahr der Luftbilder, die in AREA3 ausgewertet wurden, und wurde deshalb als Endpunkt für die zeitliche Interpolation gewählt.
 6. Für die Periode 2007–2016 wurde ausgehend von AREA3 die Waldfläche in Jahresschritten vergrössert, so dass sie 2016 die im Treibhausgasinventar verwendete Waldfläche (FOEN 2018) erreicht. Dabei wurden als potentielle Zuwachsflächen die an bestehenden Wald angrenzenden Hektar-Zellen über 1200 m Meereshöhe definiert (Vergandung von Alpweiden, Anstieg Waldgrenze³) und per Zufallsgenerator die benötigte Anzahl Hektarzellen daraus selektiert. Siehe Beispiel in Abbildung 3.

Die in den Schritten 5 und 6 erstellten Waldflächenkarten entsprechen somit weitgehend den im NIR (FOEN 2018) rapportierten Waldflächen, welche von 1990 bis 2016 von 1215.0 kha auf 1255.0 kha um 3.3% zunehmen; die Abweichungen betragen zwischen 0.01% (2016) und 0.28% (1990).

³ <http://arcg.is/28Rwfi5> zeigt die neuen Waldflächen (Code 1) in einer Demo-Karte von Meteotest.

Die jährlichen Baumartenkarten sind schliesslich durch Kombination der zeitlich konstanten Baumartenverteilung (Schritt 3) mit der Waldfläche des betreffenden Jahres (Schritte 5 und 6) erstellt worden (Beispiel Jahr 2016 siehe Beispiel in Abbildung 3).

Tabelle 1: Die Kategorien der "vorherrschenden Baumart" (BA) aus dem LFI 1, Dichte der Blatt-Biomasse sowie die Standard-Emissionspotenziale (ϵ) pro Blattbiomasse gemäss EMEP/EEA (2016).

BA Code	Name Deutsch	Name Latein, häufigste Art	Dichte Blatt-Biomasse [g m ⁻²]	Emissionspotential [µg g ⁻¹ h ⁻¹]			
				Iso-pren	Mono-terpene Licht (mtl)	Mono-terpene Temp. (mts)	OVOC
1	Fichte	<i>Picea abies</i>	1'465–1'980 ³	1	1.5	1.5	1.5
2	Tanne	<i>Abies alba</i>	1'260 ³	0	0	3	1.5
3	Föhre	<i>Pinus sylvestris</i>	510 ³	0	0	1.5	1.5
4	Lärche	<i>Larix decidua</i>	300 ³	0	0	1.5	1.5
5	Arve	<i>Pinus cembra</i>	510 ³	0	0	1.5	1.5
6	übrige Nadelhölzer ¹		1'465–1'980 ³	1	1.5	1.5	1.5
7	Buche	<i>Fagus sylvatica</i>	320 ⁴	0	0	0.65	1.5
8	Ahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i>	320 ⁴	0	0	3	1.5
9	Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>	320 ⁴	0	0	0	1.5
10	Eiche	<i>Quercus robur</i>	530 ³	60	0	0.2	1.5
11	Kastanie ²	<i>Castanea sativa</i>	320 ⁴	0	0	0.65	1.5
12	übrige Laubhölzer ²		320 ⁴	0	0	0.65	1.5

¹ wie Fichte behandelt, da für diese Baumart keine Informationen im Guidebook.

² wie Buche behandelt, da für diese Baumart keine Informationen im Guidebook.

³ Quelle: Andreani-Aksoyoglu & Keller (1995)

⁴ Quelle: EMEP/EEA (2016)

Bemerkung zum Emissionsfaktor für Eiche: dieser ist gegenüber den anderen Baumarten sehr hoch. Andere Studien wie z.B. Karl et al. (2009) stützen diesen Wert jedoch. Wie Karl et al. (2009) zeigen, variiert der Faktor je nach Unterart stark. Für die in der Schweiz vorherrschenden Arten (*Quercus robur*, *Q. petraea*, *Q. pubescens*) ist der Wert in dieser Höhe gerechtfertigt.

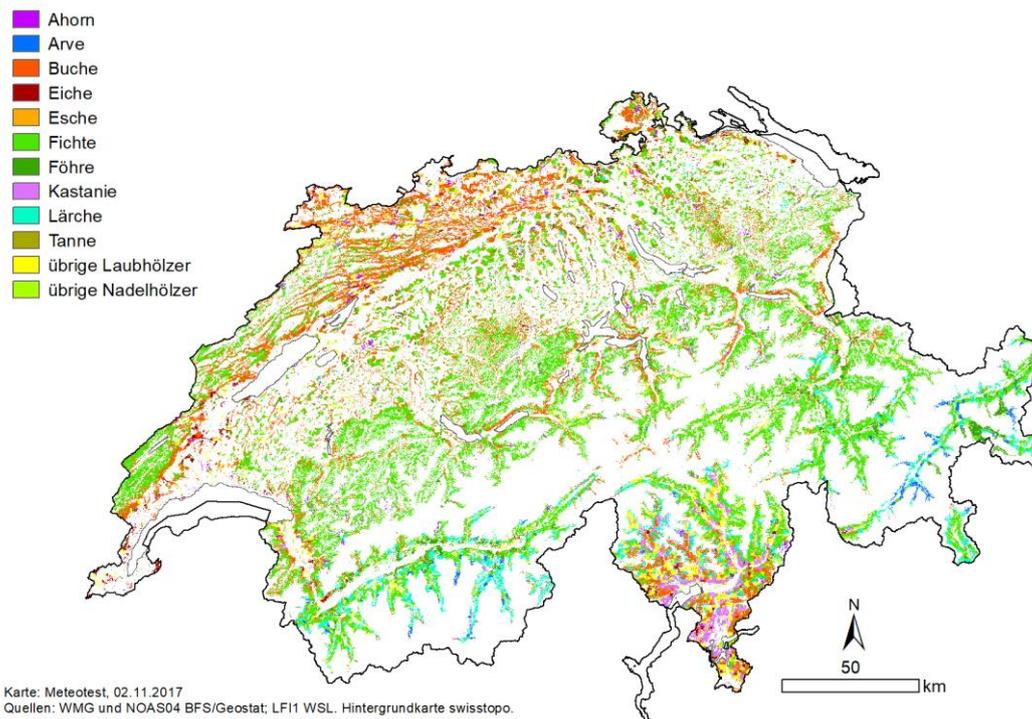


Abbildung 2: Verteilung der Baumarten (Hektar-Raster) für das Jahr 2016.

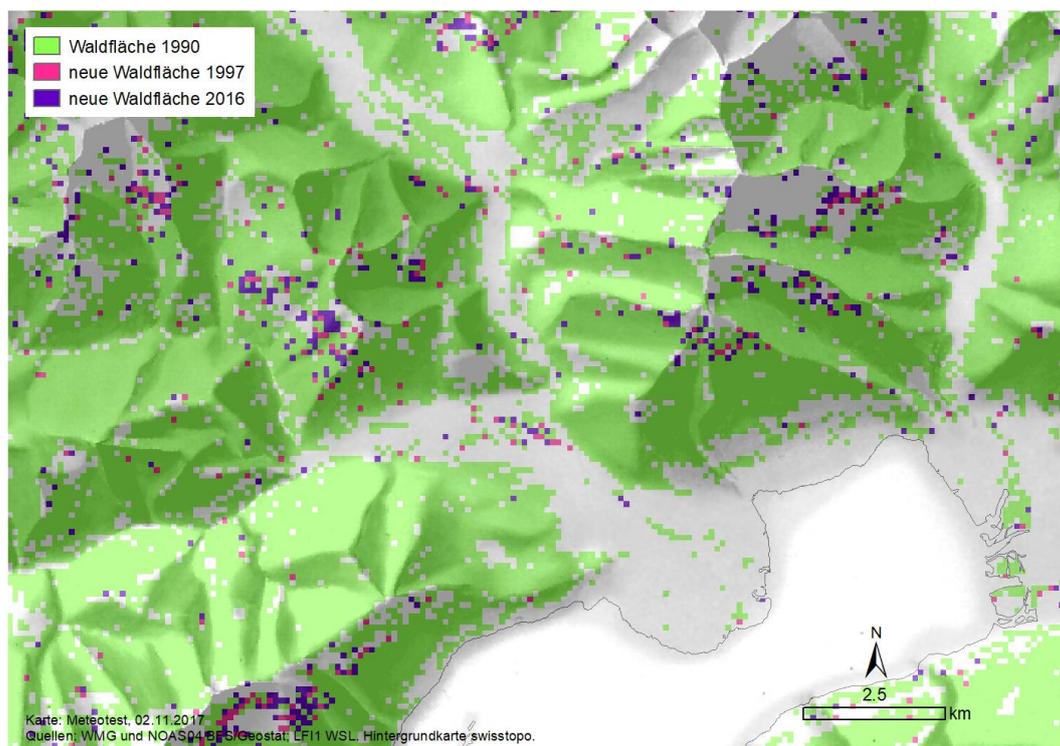


Abbildung 3: Berechnete Entwicklung der Waldfläche auf dem Hektar-Raster für ausgewählte Jahre. Im Gebiet von Locarno werden, ausgehend von der Waldfläche 1990, die bis 1997 bzw. bis 2016 neu dazu gekommenen Flächen dargestellt.

3.1.2 Baumarten-Karte 1900

Die Entwicklung der Waldfläche in der Schweiz seit 1880 wurde von Ginzler et al. (2011) ausführlich untersucht. In ihrer Publikation geben sie die Ergebnisse pro Wirtschaftsregion an. Wir haben diese auf die fünf LFI-Regionen (Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite, gemäss Abbildung 4) aggregiert, zudem wurde das Jahr 1900 zwischen den in der Studie untersuchten Jahren 1880 und 1915 interpoliert (siehe Tabelle 2). Schliesslich wurde das für jede LFI-Region ermittelte Verhältnis der Waldflächen von 1900 zu 2000 verwendet, um die Waldfläche des Jahres 2000 (siehe Kapitel 3.1.1) entsprechend zu verkleinern. Dabei wurden die zu reduzierenden Flächen nach dem Zufallsprinzip ausgewählt.

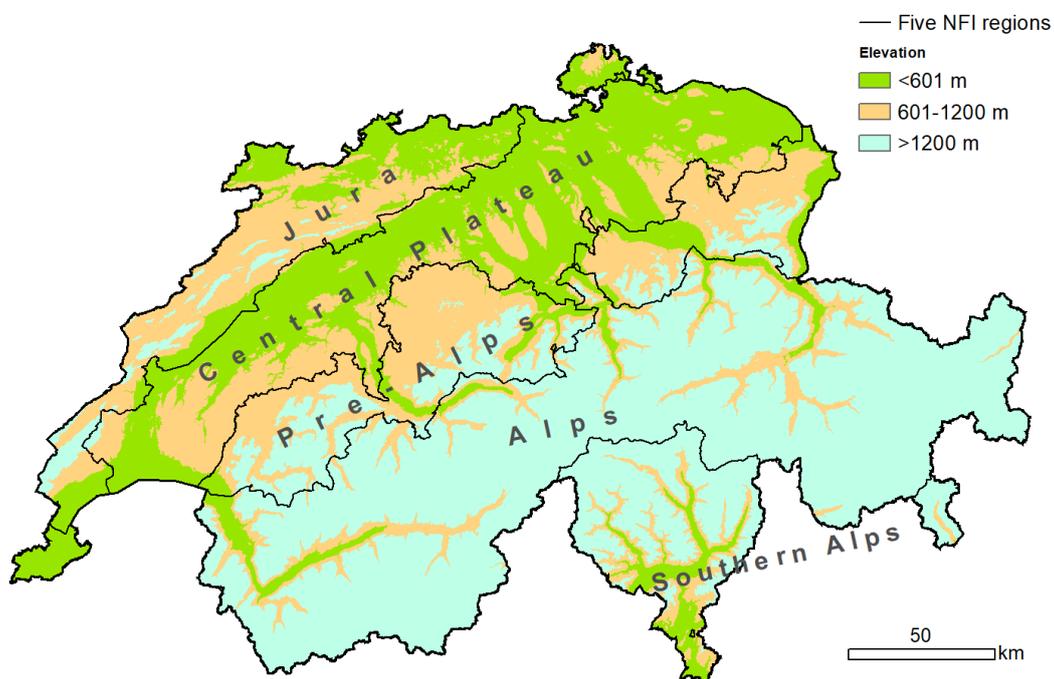


Abbildung 4: Karte der fünf LFI-Regionen (Daten: Schweizerisches Landesforstinventar, © 2012 Eidg. Forschungsanstalt WSL, CH-8903 Birmensdorf; Grundlagen: swisstopo, © 1990). Hintergrund: Drei Klassen der Höhe über Meer (Elevation).

Im Jahr 1900 war die Waldfläche im Durchschnitt 16% kleiner als 2000 (Tabelle 2), mit grossen regionalen Unterschieden: So hat sie sich in der Südschweiz (LFI-Region 5) in diesem Zeitraum fast verdoppelt.

Tabelle 2: Waldfläche der Schweiz 1880–2000 (nach Ginzler et al. 2011) pro LFI-Region.

LFI-Region	1880	1900	1915	1940	2000	1900:2000
1	182	185	188	190	193	0.96
2	226	227	227	224	230	0.99
3	173	178	182	188	205	0.87
4	252	262	269	282	331	0.79
5	66	69	71	83	133	0.52
Total	899	921	937	967	1092	0.84

Betreffend Baumartenzusammensetzung sind gemäss Auskunft der WSL⁴ keine quantitativen Informationen für das Jahr 1900 bekannt. Deshalb wurde die gleiche Zusammensetzung angenommen wie 1990–2016.

3.1.3 Baumarten-Karte 2100

Im Rahmen des Forschungsprogrammes Wald und Klimawandel wurden verschiedene Studien zur zukünftigen Entwicklung des Waldes bzw. zur Veränderung der Standorteigenschaften und der Standorteignungen durchgeführt. Zimmermann et al. (2016) publizierten Karten der "habitat suitability" 2021-2050 sowie 2051-2080 für zahlreiche Baumarten. Ein Hauptresultat ist, dass die Eignung für Buche und Fichte in den tiefen Lagen des Mittellandes zurückgehen wird. Es wird erwartet, dass diese Arten teilweise durch trockenresistentere Arten wie z.B. Eichen oder Kirschen ersetzt werden.

Auch die Karten von Abenis AG (zitiert in Allgaier et al., 2017) weisen darauf hin, dass sich die Vegetationshöhenstufen gegen Ende des 21. Jahrhunderts in Richtung trockener und wärmer verschieben werden.

Es war jedoch nicht möglich, aus den vorhandenen Informationen auf einfache Weise eine Karte der Baumartenzusammensetzung für das Jahr 2100 herzuleiten. Es wurde daher beschlossen, die NMVOC-Emissionen für das Jahr 2100 auf der Grundlage der Baumartenkarte 2016 zu berechnen. Auf diese Weise lassen sich die Unterschiede bei den Emissionen zwischen 2016 und 2100 als Einfluss des veränderten Klimas interpretieren.

3.2 Berechnung der Klimakarten

3.2.1 Temperaturkarten 1990–2016

Für die Berechnung der lichtabhängigen Emissionen (Isopren und gewisse Monoterpene) werden zwei unterschiedliche Temperaturparameter benötigt:

⁴ persönliche Mitteilung von Christian Ginzler, Gruppenleiter Landschaftsdynamik/Fernerkundung, WSL, 10.12.2018.

Karten der Monatsmittelwerte (t_t) sowie Karten der Monatsmittelwerte während Tageslicht (t_{daytime}). Diese beiden fließen bei der Emissionsgleichung in den Korrekturfaktor γ ein. Die Daten wurden aus Messdaten der Stationen von MeteoSchweiz für die gesamte Schweiz mit einer Gitterweite von 250x250 m interpoliert (vgl. Remund et al., 2011).

T_{daytime} wird mit den Hilfsgrößen Tagesmaximum T_{Max} und Tagesminimum T_{Min} sowie einem Faktor t_{factor} berechnet:

$$t_{\text{daytime}} = (T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}) * t_{\text{factor}}_{\text{Monat}} + T_{\text{Min}}$$

wobei $t_{\text{factor}}_{\text{Monat}}$ das Verhältnis beschreibt, wie nahe die Tagesmitteltemperatur am Tagesminimum, resp. -maximum liegt. Ein Faktor von 1 würde bedeuten, dass die Tagesmitteltemperatur dem Tagesmaximum entspricht (siehe Tabelle 3 und Abbildung 5). Die Werte wurden von den fünf Standorten Sion, Luzern, Basel, Bern und Lugano für die fünf Jahre 2010–2014 abgeleitet. Der Fehler der daraus resultierenden t_{daytime} ist klein (ca. 0.2–0.3°C = Standardabweichung).

Als Zwischenschritt für t_{daytime} wird die mittlere Anzahl Tageslichtstunden pro Monat berechnet, abgeleitet aus 10-Minuten-Daten $> 50 \text{ W/m}^2$ der SwissMetNet-Station Bern-Zollikofen (siehe Tabelle 3 und Abbildung 5)⁵.

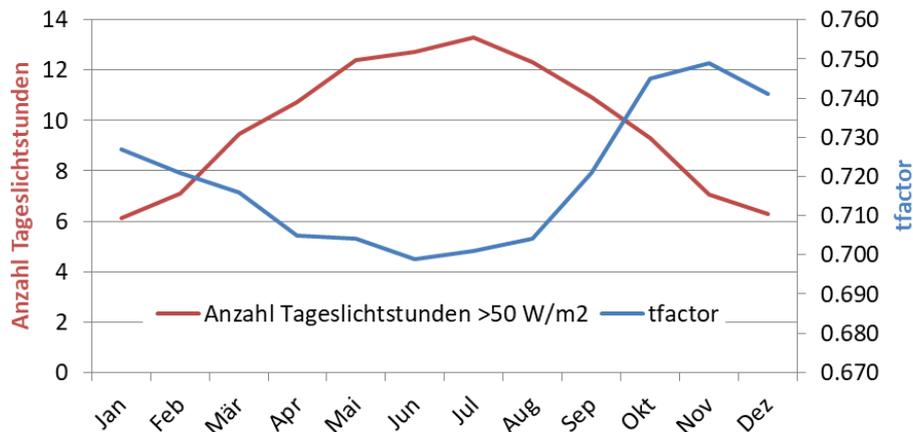


Abbildung 5: Anzahl Tageslichtstunden und tfactor im Jahresverlauf.

⁵ Im Guidebook (EMEP/EEA, 2016) wird ein Schwellenwert von $\text{PAR} > 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ angegeben (PAR = photosynthetisch aktive Strahlung). Dies entspräche rund 100 W/m^2 Globalstrahlung (50% von PAR), was ein sehr hoher Wert ist. Wir gehen davon aus, dass die Angabe im Guidebook falsch ist und es korrekterweise Globalstrahlung $> 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ heissen sollte. Dies entspricht den hier angewendeten 50 W/m^2 und wird beispielsweise auch im Mapping Manual (UNECE, 2016) so ausgewiesen. Zudem kommen die so berechneten Tageslichtstunden denjenigen im Guidebook (vgl. Table 5-1) sehr nahe.

Tabelle 3: Monatswerte für tfactor und Anzahl Tageslichtstunden.

Monat	tfactor	Anzahl Tageslichtstunden (Monatsmittel)
Januar	0.727	6.13
Februar	0.721	7.09
März	0.716	9.48
April	0.705	10.74
Mai	0.704	12.38
Juni	0.699	12.72
Juli	0.701	13.31
August	0.704	12.32
September	0.721	10.95
Oktober	0.745	9.32
November	0.749	7.05
Dezember	0.741	6.27

3.2.2 Temperaturkarte 1900

Für dieses Jahr standen keine Daten der MeteoSchweiz zur Verfügung. Die Interpolation basierte daher auf den Werten der Climate Research Unit (CRU)⁶ der Universität East Anglia. Diese enthalten Werte der Monatsmitteltemperatur sowie der Differenz zwischen Tagesmaximum und –minimum. Das Tagesminimum selbst – benötigt für unsere Methode – musste deshalb in einem Zwischenschritt wie folgt berechnet werden:

$$T_{\text{Min}} = T_{\text{Mittel}} - (T_{\text{Range}}) * \text{tfactor_Min}_{\text{Monat}}$$

wobei T_{Range} für die Spannweite zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum steht. Der Faktor, bestimmt aus bestehenden Messwerten, ist in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Monatswerte für tfactor_Min.

Monat	tfactor_Min	Monat	tfactor_Min
Januar	0.469	Juli	0.487
Februar	0.468	August	0.477
März	0.470	September	0.463
April	0.479	Oktober	0.455
Mai	0.490	November	0.456
Juni	0.490	Dezember	0.468

⁶ <http://www.cru.uea.ac.uk/data>

Aus den Monatswerten für 1901–1910 wurde schliesslich ein Mittel für die Monate des Jahres 1900 gebildet.

3.2.3 Temperaturkarte 2100

Die Werte für diese Periode basieren auf dem regionalen Klimamodell CLM und dem Szenario A1B (Remund et al., 2016). Die Karten der Tagesminima und der Tagesmittelwerte werden mittels statistischem Downscaling (Remund et al., 2016) berechnet.

Es wurde die gleiche Methode wie für die historische Periode 1990-2016 verwendet.

Aus den Monatswerten für 2090–2099 wurde schliesslich ein Mittel für die Monate des Jahres 2100 gebildet.

3.2.4 Karten der Vegetationsperioden

Die Berechnung der Vegetationsperiode basiert auf den Temperaturwerten und auf den Methoden des Projekts Wald&Klimawandel (Remund et al., 2016). Als Annäherung für die Vegetationsperiode wurde die Belaubung von Laubbäumen modelliert. Als Vorlage diente das Modell von Alterra (Klap et al., 2000) und dem SWAP-Modell (van Dam et al., 2008). Da als Input (flächendeckend) nur Monatswerte vorhanden waren, das Modell aber Tageswerte benötigt, wurden die Monatswerte mittels kubischer Interpolation auf ein theoretisches Jahr mit 360 Tagen (à 12 Monaten mit 30 Tagen) hochgerechnet.

Der Belaubungsbeginn wird auf Grund von Kälte- ($< 9^\circ$) und Wärmesummen⁷ ($> 6^\circ\text{C}$) bestimmt. Der Laubfall wird auf Grund von Kältewerten (vier aufeinander folgende Tage mit Tagesmittel-Temperaturen unter 9°C) bestimmt.

Die Kartenserie in Abbildung 6 zeigt für das Jahr 1990 die Länge der mit dieser Methode berechneten Vegetationsperioden pro Monat. Für jede Wald-Rasterzelle ist angegeben, an wie vielen Tagen pro Monat die Vegetation belaubt ist.

Um die Jahr-zu-Jahr Variabilität von Beginn und Ende der Vegetationsperiode aufzuzeigen, sind in Abbildung 7 die Anzahl Vegetationstage in den Monaten April und Oktober für verschiedene Jahre einander gegenübergestellt. Für diese beiden Übergangsmonate wurde in der Vorstudie ein konstanter Wert von 15 Tagen für alle Rasterzellen verwendet.

Für die Berechnung der langfristigen Entwicklung (Jahre 1900 und 2100, siehe Kapitel 4.3) wurden die Karten der Jahre 1990 (für 1900) sowie 2016 (für 2100) verwendet. Dies stellt zwar eine Vereinfachung der Methodik dar, erfüllt aber

⁷ Summen der Tagesmitteltemperaturen ab 1.1. (Wärmesumme), resp. 1.11. (Kältesumme)

dennoch den Zweck, eine Grössenordnung der Emissionen in diesem Zeithorizont zu berechnen.

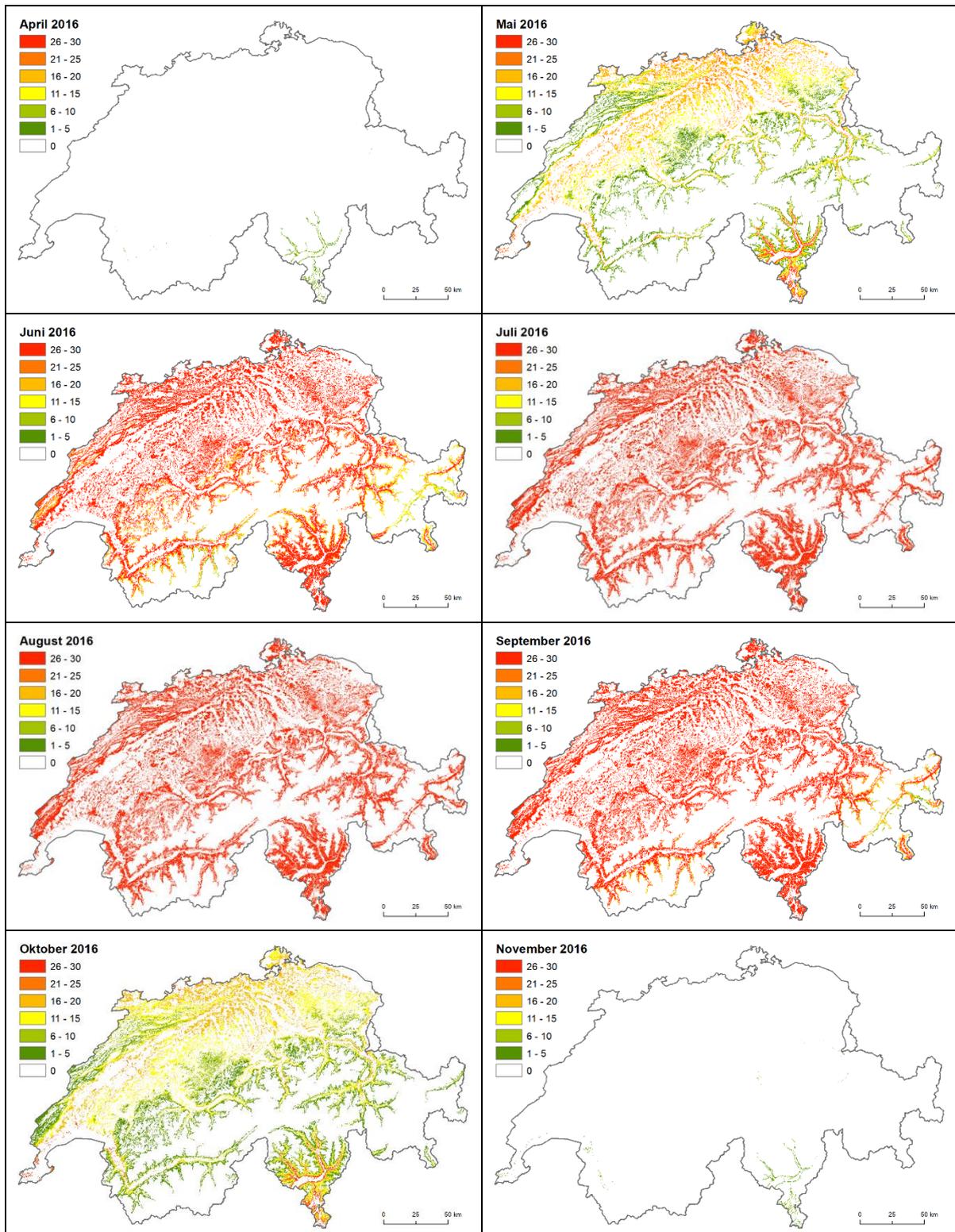


Abbildung 6: Länge der Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Monat) auf den Waldflächen, am Beispiel des Jahres **2016** (April bis November von links oben nach rechts unten).

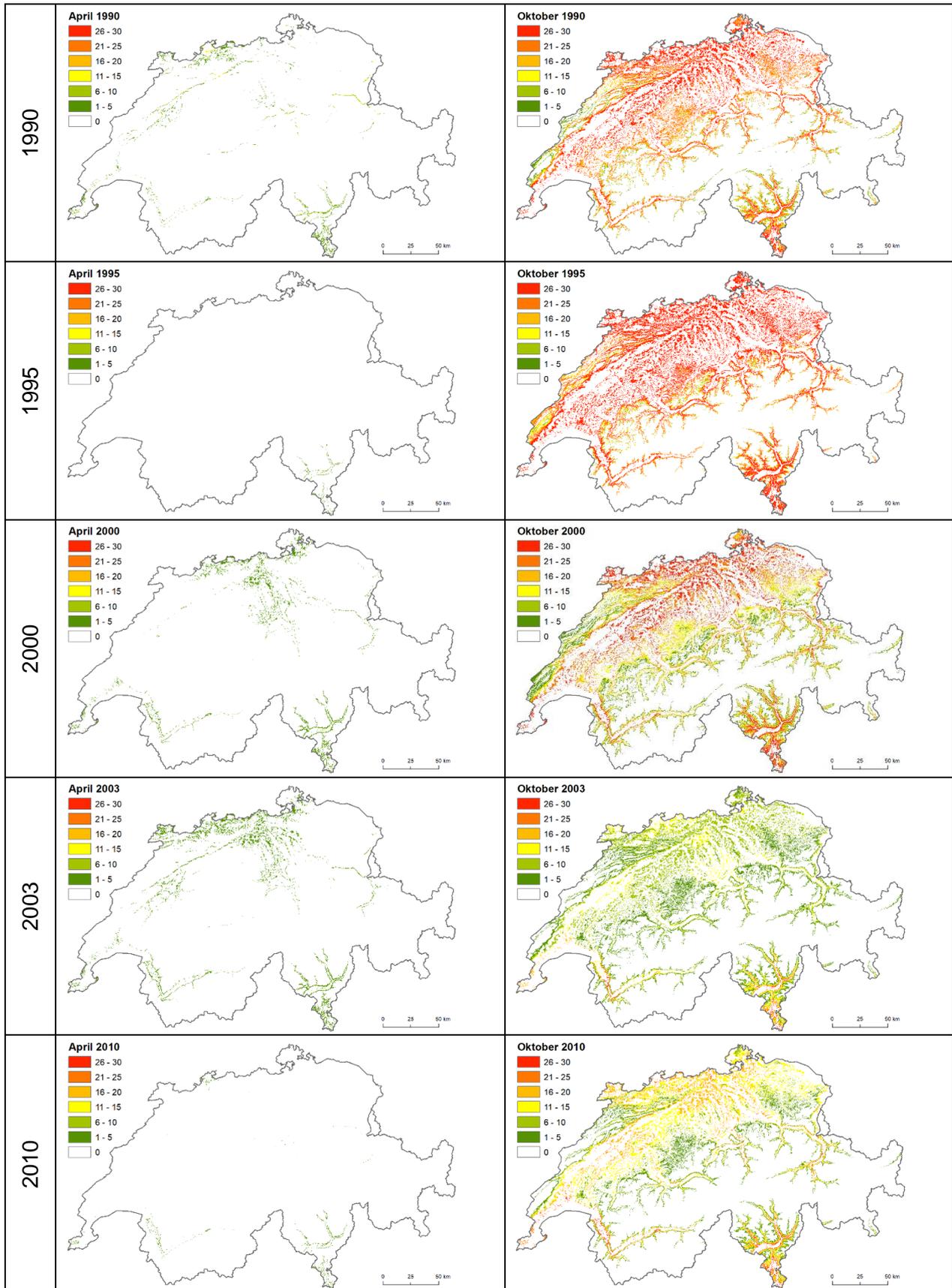


Abbildung 7: Länge der Vegetationsperiode (Anzahl Tage pro Monat) auf den Waldflächen für April und Oktober ausgewählter Jahre.

4 Resultate

4.1 Zeitreihe

Die Emissionen von Isopren und Monoterpenen wurden mit einem Faktor von 0.88 (60/68, gemäss stöchiometrischem Anteil von C in Isopren und Monoterpenen) in Kohlenstoff umgerechnet. Für OVOC beträgt der Umrechnungsfaktor 0.42, wenn man den Komponenten-Mix gemäss Steinbrecher et al. (2009) zugrunde legt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 sowie in Tabelle 5 dargestellt.

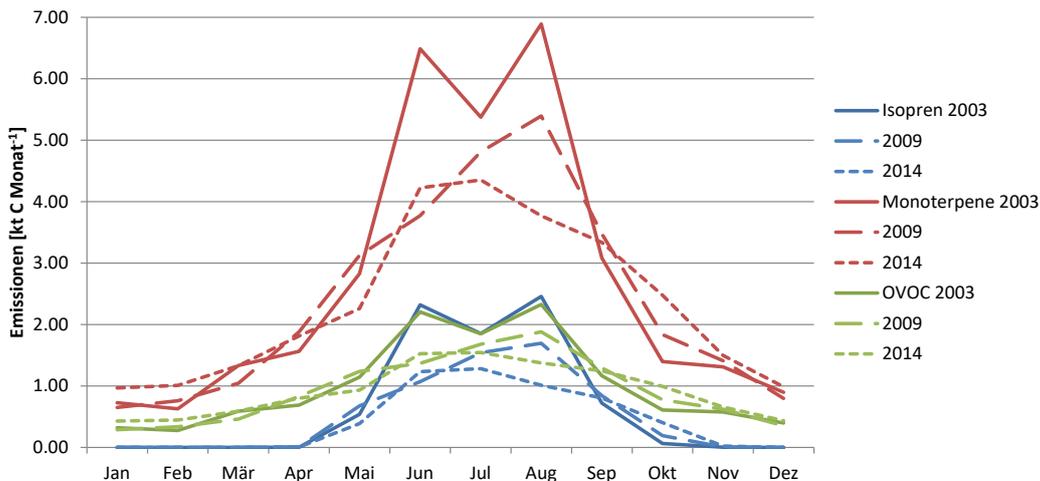


Abbildung 8: Entwicklung der biogenen NMVOC-Emissionen in kt C im Jahresverlauf für 2003, 2009 und 2014.

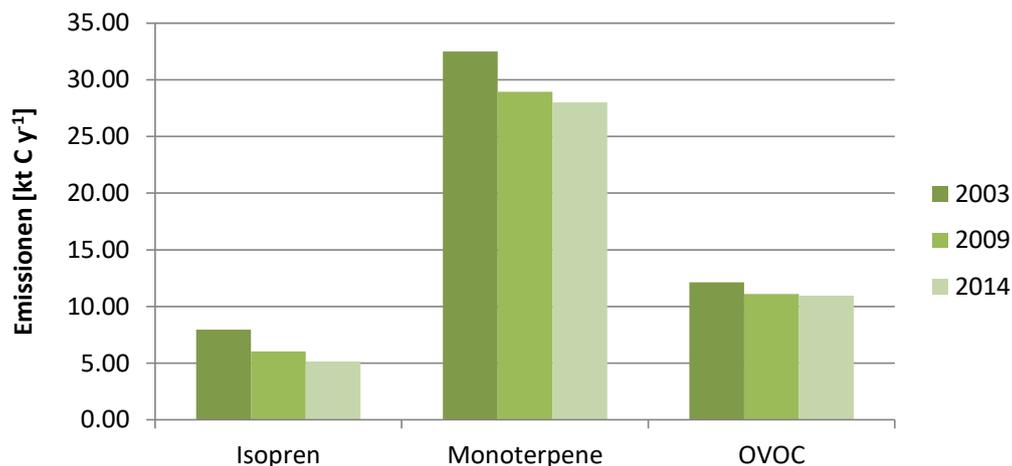


Abbildung 9: Total der biogenen NMVOC-Emissionen in kt C für die Jahre 2003, 2009 und 2014.

Die Abweichung der gesamten NMVOC-Emissionen zwischen dem sehr heissen Jahr 2003 und dem eher kühlen Jahr 2014 (bezüglich Sommertemperaturen, siehe Abbildung 1) beträgt etwa 20%. Die Sommertemperatur ist für die Variation von Jahr zu Jahr wichtiger als die Jahresmitteltemperatur. Die Sonneneinstrahlung fliesst indirekt über den Parameter der Tageslichttemperatur in die Berechnung ein und spielt bei der Variation ebenfalls, wenn auch eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 5: Total der NMVOC-Emissionen des Waldes in der Schweiz für die Jahre 2003, 2009 und 2014 in kt C pro Jahr sowie der Vergleich zu den Emissionen aus anderen Studien.

Jahr/Quelle	Isopren kt C	Monoterpene kt C	OVOC kt C	Total kt C	Total kt NMVOC
2003 diese Studie	8.0	32.5	12.1	52.6	74.7
2009 diese Studie	6.0	28.9	11.1	46.1	66.1
2014 diese Studie	5.1	28.0	11.0	44.1	63.7
EMEP/EEA (2016)	4.4	30	7.1	41.5	56.0
Andreani-Aksoyoglu & Keller (1995)	77.1		-	77.1	87.4
Oderbolz et al. (2013)	2-4	8-10	10-13	20-27	34-45

Oderbolz et al. (2013) berechnen zusätzlich Sesquiterpene (SQT); die emittierten Mengen in der Schweiz sind jedoch gering (1 kt/Jahr).

Die Ergebnisse liegen in der gleichen Grössenordnung wie andere Studien. Sie sind deutlich tiefer als diejenigen von Andreani-Aksoyoglu & Keller (1995), deutlich höher als diejenigen von Oderbolz et al. (2013) und im Vergleich mit EMEP/EEA (2016) in der Summe in Anbetracht der zu erwartenden Unsicherheiten bei den Emissionspotenzialen (siehe Kapitel 5) ähnlich. Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bieten Karl et al. (2009) (nicht dargestellt). Bei diesen Vergleichen zu beachten ist, dass es sich bei Oderbolz et al. (2013) um eine europäische Studie auf einem gröberen Raster als die vorliegende Auswertung handelt und dadurch bereits rein methodische Differenzen auftreten können. Die Publikation von Andreani-Aksoyoglu & Keller (1995) wiederum liegt bereits über 20 Jahre zurück, wohingegen EMEP/EEA (2016) auf aktuelleren Erkenntnissen beruhen dürfte.

Tabelle 6 zeigt die Emissionen separat für jede Baumart am Beispiel des Jahres 2014. Zudem wurden die in Abbildung 2 dargestellten Flächen pro Baumarten aufsummiert und damit eine mittlere Emission pro Hektare für jede Baumart berechnet, um das Emissionspotenzial der einzelnen Baumarten aufzuzeigen (letzte Spalte in Tabelle 6, zum Beispiel emittiert eine Hektare Fichtenbestand im Durchschnitt $50.67 \text{ kg C ha}^{-1}$ in Form von NMVOC).

Tabelle 6: Total der NMVOC-Emissionen des Waldes in der Schweiz für das Jahr 2014 in kt C aufgeschlüsselt nach Baumart sowie die mittleren Emissionen in kg C pro Hektare pro Baumart.

Baumart	Fläche [ha]	Isopren [kt C]	Mono- terpene [kt C]	OVOC [kt C]	Total [kt C]	Emissionen pro Hektare [kg C ha ⁻¹]
Fichte	574'751	2.10	19.33	7.69	29.12	50.67
Tanne	139'130	0.00	6.54	1.56	8.10	58.22
Föhre	50'821	0.00	0.46	0.22	0.68	13.41
Lärche	79'894	0.00	0.34	0.16	0.51	6.35
Arve	12'106	0.00	0.07	0.03	0.10	8.54
übrige Nadelhölzer	3'285	0.02	0.15	0.06	0.23	71.35
Buche	231'153	0.00	0.63	0.69	1.31	5.68
Ahorn	15'931	0.00	0.19	0.04	0.23	14.63
Esche	29'016	0.00	0.00	0.09	0.09	3.10
Eiche	25'027	3.02	0.04	0.14	3.20	127.74
Kastanie	27'685	0.00	0.08	0.09	0.18	6.38
übrige Laubhölzer	63'064	0.00	0.17	0.19	0.35	5.62
Total	1'251'863	5.14	28.01	10.96	44.11	
Mittelwert						35.23

Die nachfolgenden Karten zeigen die Resultate separat nach Schadstoff und Jahr (nicht in C umgerechnet).

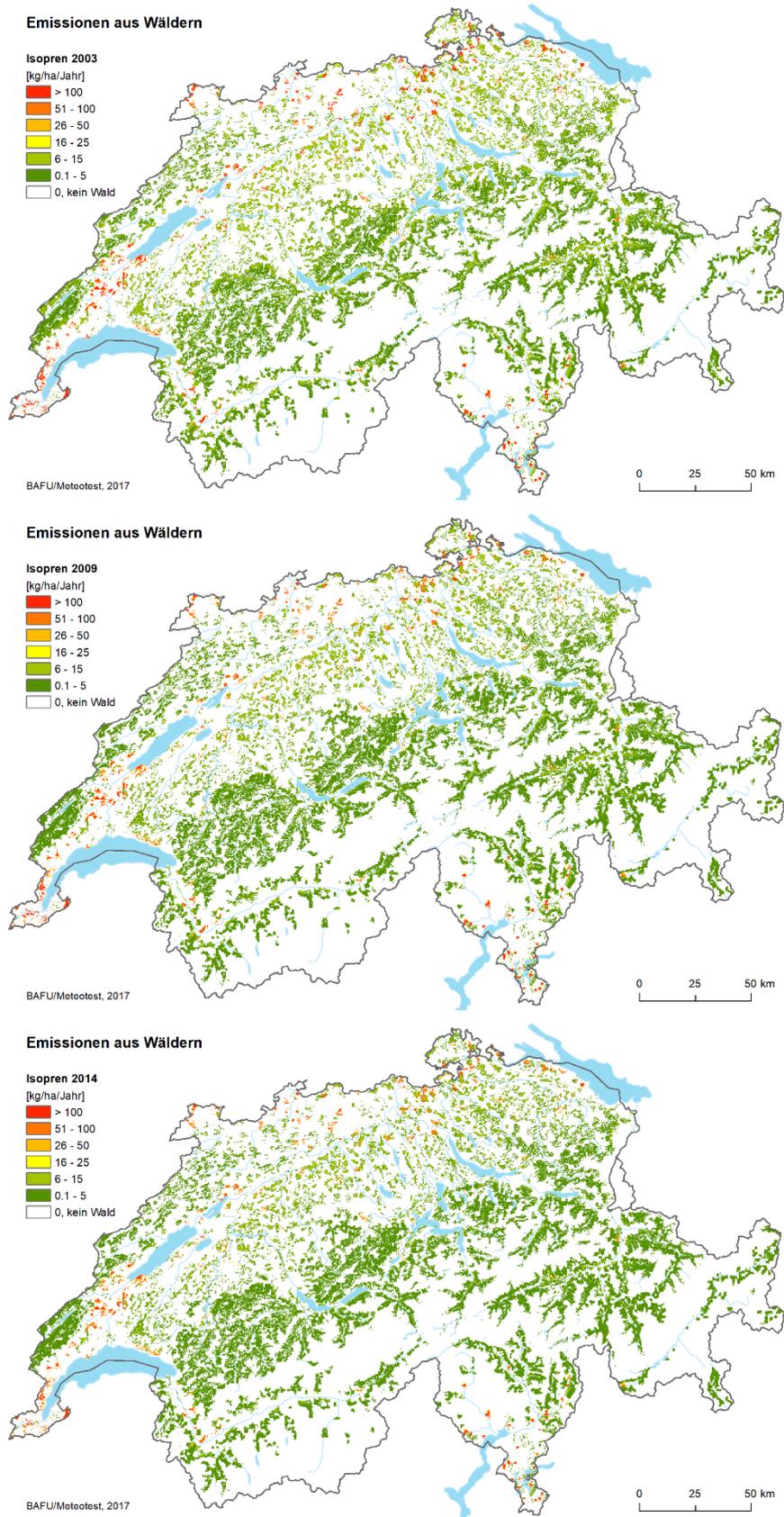


Abbildung 10: Emission von **Isopren** für die Jahre 2003, 2009 und 2014.

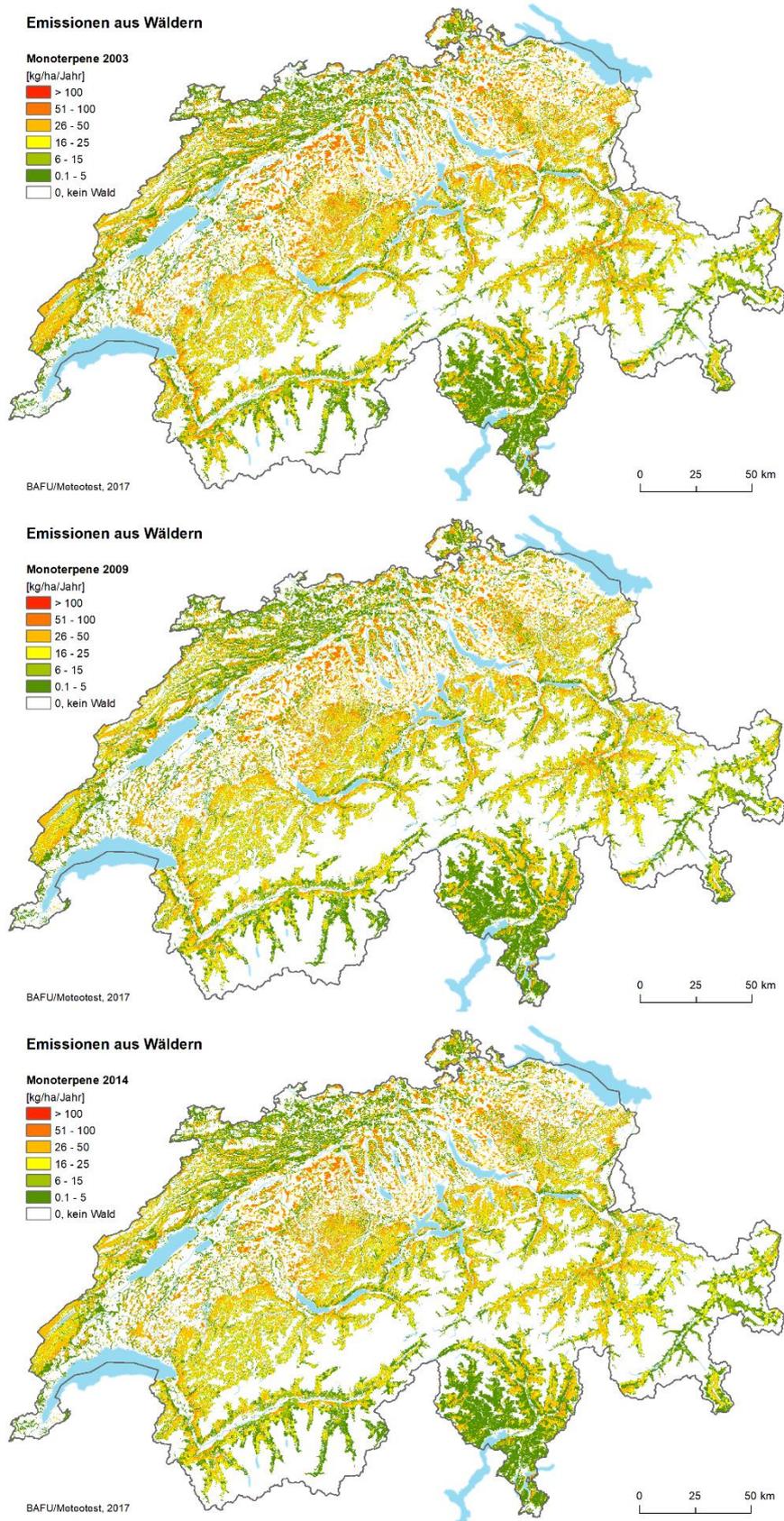


Abbildung 11: Emission von **Monoterpenen** für die Jahre 2003, 2009 und 2014.

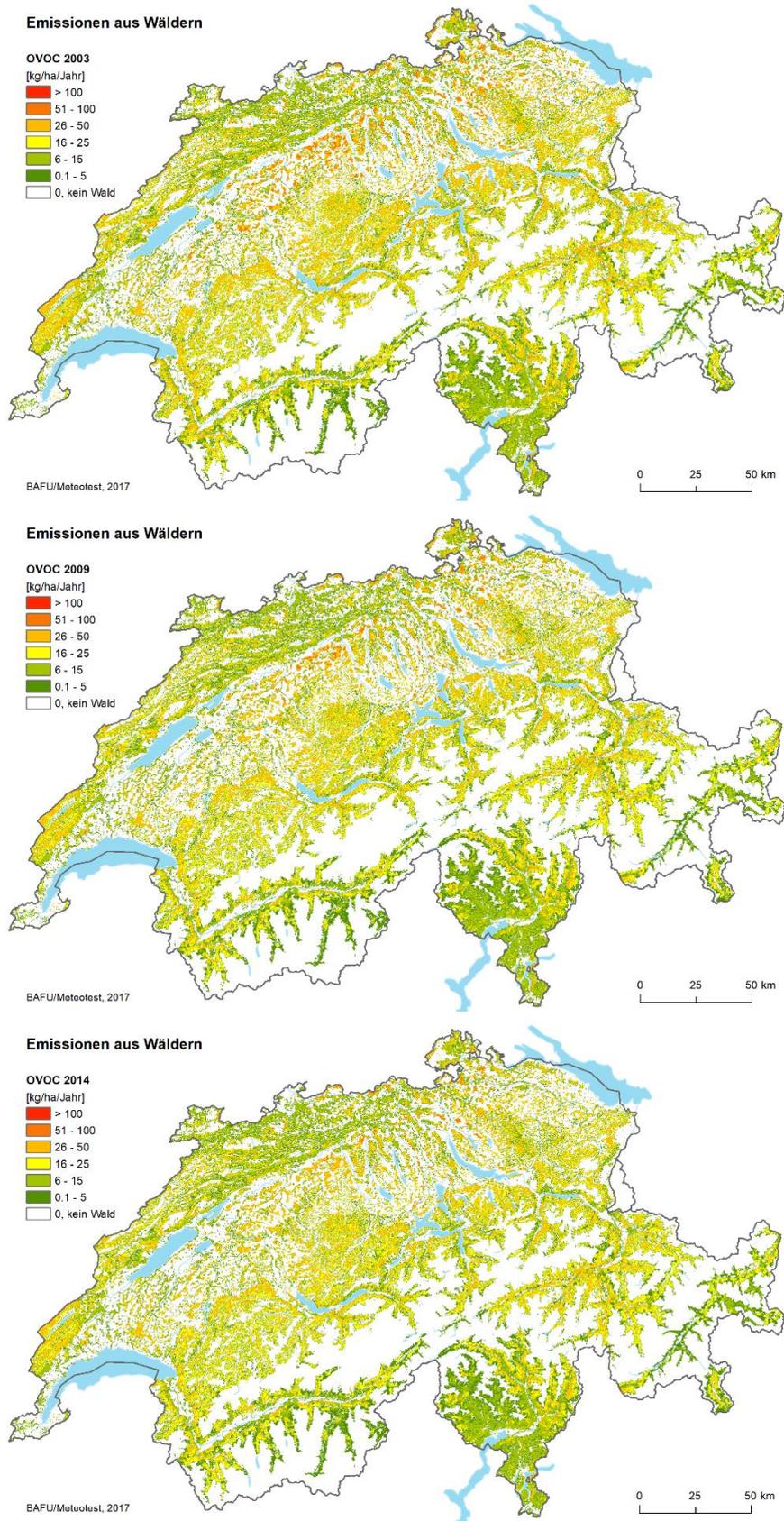


Abbildung 12: **OVOC**-Emissionen für die Jahre 2003, 2009 und 2014.

Die Emissionskarten von Isopren, Monoterpen und OVOC wurden zu einem Jahreswert aufsummiert. Daraus ergibt sich die finale NMVOC-Zeitreihe für das Emissionsinventar, dargestellt in Abbildung 13 bis Abbildung 15 und in Tabelle 7. Das Ergebnis ist zudem in ein Sommer- (April–September) und ein Winterhalbjahr (Oktober–März) aufgeteilt.

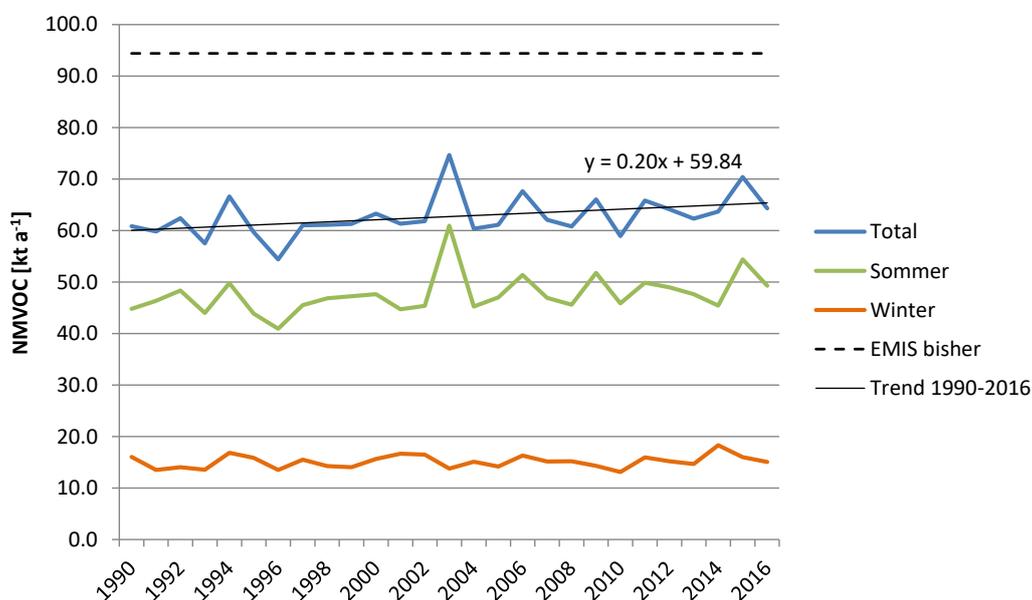


Abbildung 13: Zeitreihe der NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1990–2016 sowie Vergleich gegenüber bisheriger Zeitreihe in EMIS (gestrichelt exkl. Waldbrand von 0.61 kt a^{-1}).

Tabelle 7: Zeitreihe der NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1990–2016, aufgeteilt auf Sommer (April bis September) und Winter (Oktober bis März).

Jahr	Total	Sommer	Winter
1990	60.8	44.8	16.1
1991	59.8	46.3	13.5
1992	62.4	48.3	14.0
1993	57.5	44.0	13.5
1994	66.6	49.8	16.9
1995	59.7	43.8	15.8
1996	54.4	40.9	13.5
1997	61.0	45.5	15.5
1998	61.1	46.8	14.3
1999	61.3	47.2	14.0
2000	63.3	47.6	15.7
2001	61.3	44.7	16.6

Jahr	Total	Sommer	Winter
2002	61.8	45.3	16.5
2003	74.7	60.9	13.8
2004	60.3	45.2	15.1
2005	61.1	47.0	14.1
2006	67.6	51.4	16.3
2007	62.1	46.9	15.1
2008	60.8	45.6	15.2
2009	66.0	51.7	14.3
2010	58.9	45.8	13.1
2011	65.8	49.9	15.9
2012	64.1	48.9	15.2
2013	62.3	47.7	14.7
2014	63.7	45.4	18.3
2015	70.4	54.4	16.0
2016	64.3	49.3	15.0

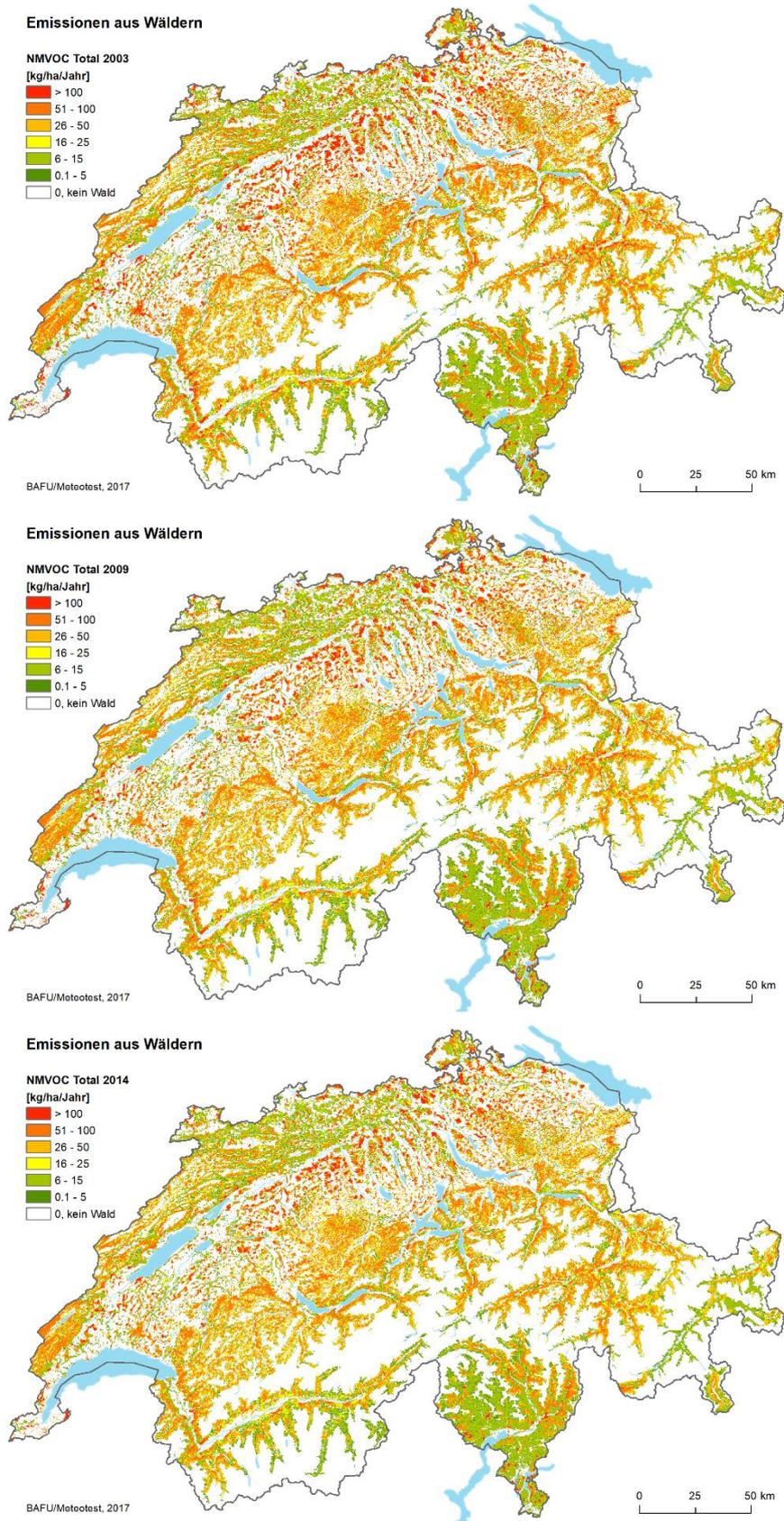


Abbildung 14: Total der NMVOC-Emissionen für die Jahre 2003, 2009 und 2014.

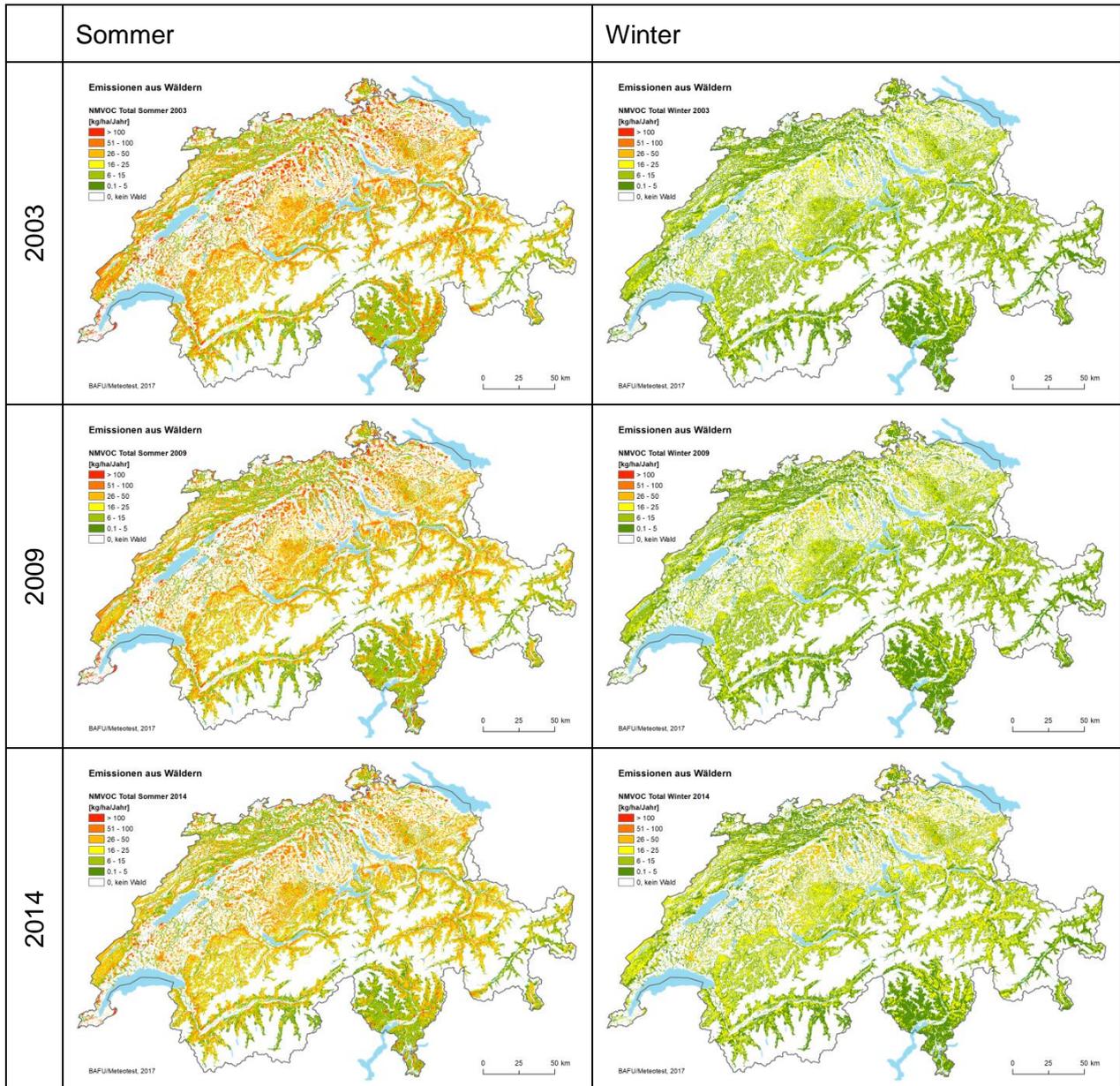


Abbildung 15: Vergleich der NMVOG-Emissionen für das Sommer- und das Winterhalbjahr der Jahre 2003, 2009 und 2014.

4.2 Vergleich sonniger vs. trüber Tag

NMVOG-Emissionen sind eine relevante Vorläufersubstanz für Ozon. Daher wurden die NMVOG-Emissionen für einen sonnigen Sommertag (18. Juli 2014) mit potenziell hohen Ozonwerten und für einen stark bewölkten Tag (8. Juli 2014) gegenübergestellt. Abbildung 16 zeigt die Temperatur- und Strahlungsdaten für die drei ausgewählten Standorte Payerne (PAY), Davos (DAV) und Magadino (MAG).

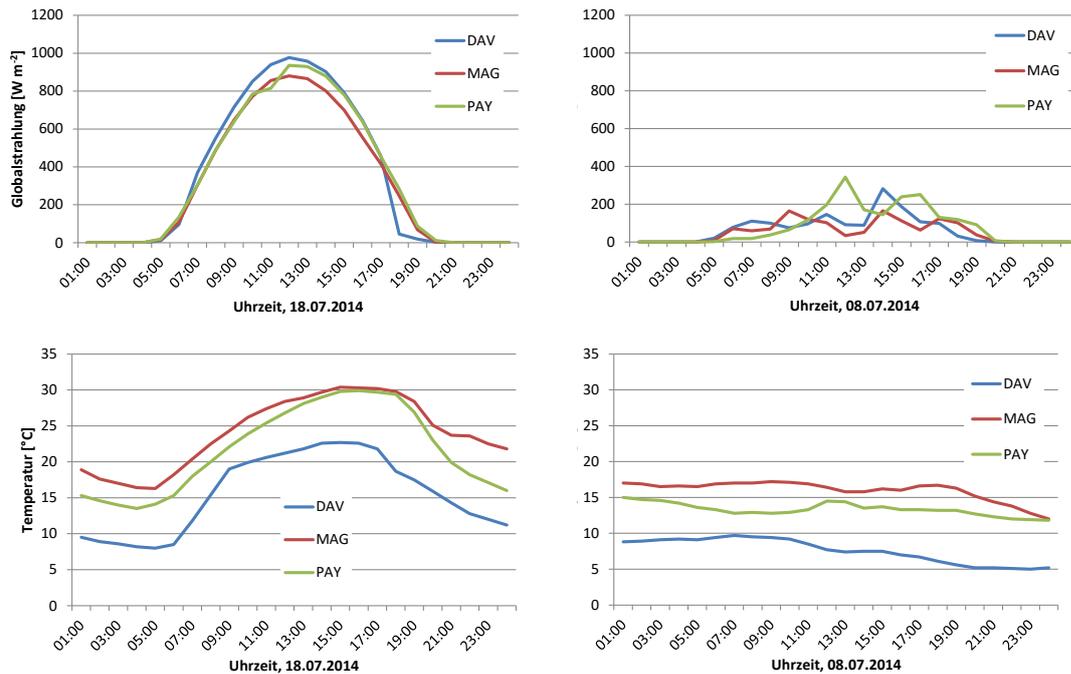


Abbildung 16: Globalstrahlung (oben) und Temperatur (unten) für einen sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014, links) und einen bewölkten/kühlen Tag (8. Juli 2014, rechts) an drei ausgewählten Messstationen.

Für die Emissionsberechnung dieser zwei Beispieltage wurden die auf Stundenwerten von Temperatur und Strahlung basierenden Gleichungen aus dem Guidebook verwendet. Die Berechnung wurde für die drei Baumarten Buche, Fichte und Kastanie gemäss Tabelle 8 durchgeführt.

Tabelle 8: Übersicht über die untersuchten Baumarten an den gewählten Standorten.

Standort / Meteo	Baumart
Payerne	Buche
Davos	Fichte
Magadino	Kastanie

Abbildung 17 bis Abbildung 19 zeigen die grafischen Resultate für die drei Standorte.

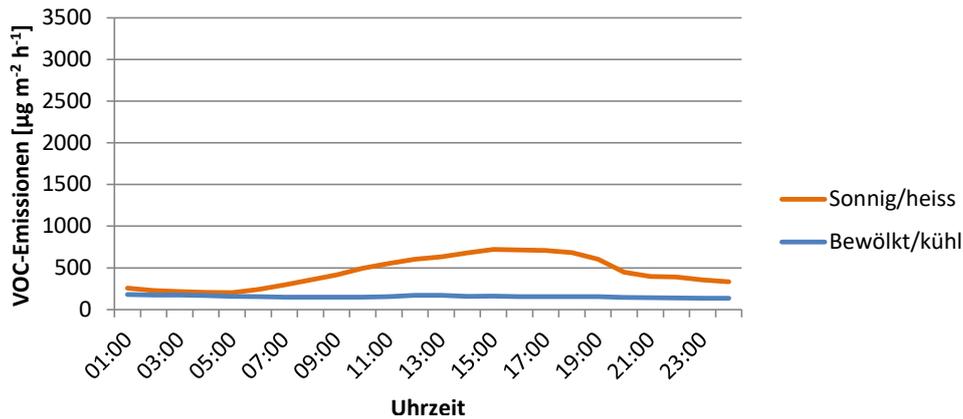


Abbildung 17: Vergleich der NMVOC-Emissionen der **Buche** an einem sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014) gegenüber einem bewölkt/kühlen Tag (8. Juli 2014) am Standort **Payerne**.

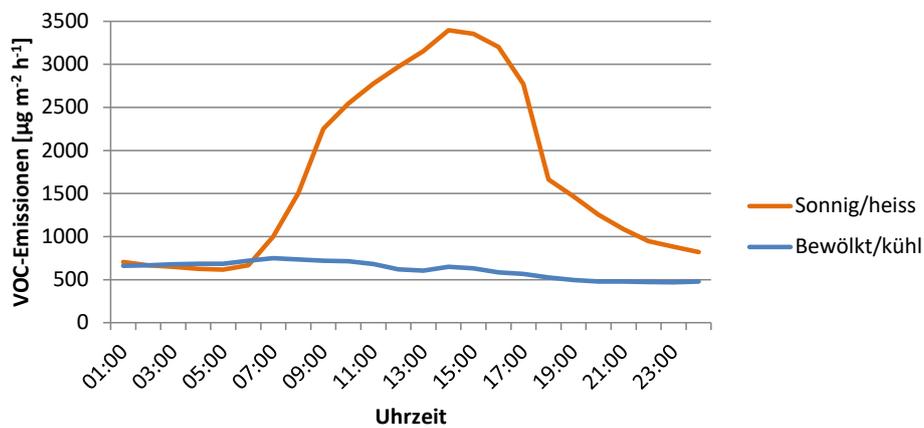


Abbildung 18: Vergleich der NMVOC-Emissionen der **Fichte** an einem sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014) gegenüber einem bewölkt/kühlen Tag (8. Juli 2014) am Standort **Davos**.

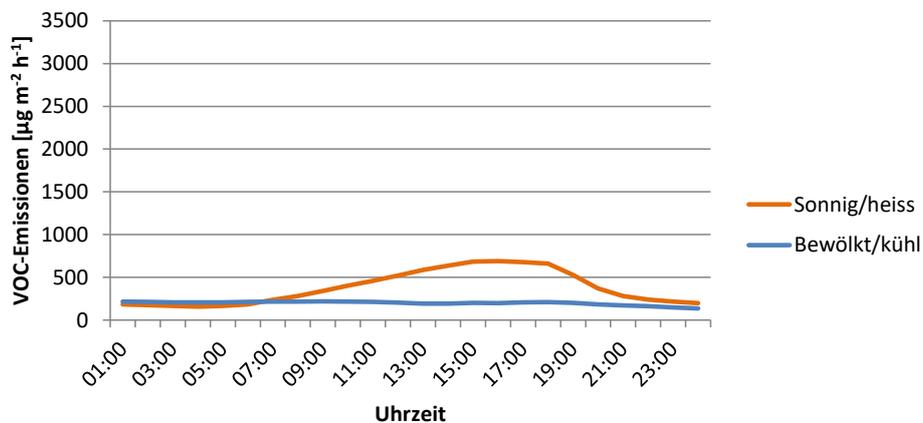


Abbildung 19: Vergleich der NMVOC-Emissionen der **Kastanie** an einem sonnig/heissen Tag (18. Juli 2014) gegenüber einem bewölkt/kühlen Tag (8. Juli 2014) am Standort **Magadino**.

Tabelle 9: Tagessummen der NMVOC-Emissionen. Vergleich der beiden Beispieltage für ausgewählte Baumarten.

Standort/Baumart	sonnig/heiss [$\mu\text{g m}^{-2} \text{Tag}^{-1}$]	bewölkt/kühl [$\mu\text{g m}^{-2} \text{Tag}^{-1}$]	Verhältnis sonnig/heiss zu bewölkt/kühl
Payerne (Buche)	10'742	3'745	2.9
Davos (Fichte)	40'974	14'755	2.8
Magadino (Kastanie)	9'063	4'774	1.9

Die grössten Differenzen treten erwartungsgemäss Mitte des Nachmittags auf, wenn die Sonne noch relativ hoch steht und die Lufttemperatur ihr Maximum erreicht. An den beiden Beispieltagen sind die Emissionen des sonnigen/heissen Tages rund zwei- bis dreimal so hoch wie an einem bewölkten/kühlen Tag (siehe Tabelle 9). Oder anders ausgedrückt: an einem bewölkten/kühlen Tag werden lediglich 20% bis 30% der Werte eines sonnigen/heissen Tag emittiert.

Zur Plausibilisierung der Stundenwerte wurden die für die Beispieltage berechneten Tageswerte der Emissionen mit 30 multipliziert und den mit den monatlichen Klimawerten berechneten Emissionen vom Juli 2014 gegenübergestellt (siehe Tabelle 10). Beim Vergleich der beiden Ergebnisse ist zu beachten, dass die zugrundeliegenden Meteodaten nicht dieselben sind. Wäre es den gesamten Juli 2014 sonnig/heiss gewesen, würden die Emissionen um 127% bis 141% höher ausfallen als für das Monatsmittel in Kapitel 4.1 tatsächlich berechnet wurde. Wäre der gesamte Juli 2014 kühl/bewölkt resultierten nur 44% bis 74% der berechneten Monatssumme.

Tabelle 10: Vergleich der Beispieltage mit dem Monatsmittel des Juli 2014.

	Monatssumme Juli 2014 [$\mu\text{g m}^{-2} \text{monat}^{-1}$]	Aufsummierte Stundenwerte (Tagessumme 8./18. Juli 2014 x 30) [$\mu\text{g m}^{-2} \text{monat}^{-1}$]		Relativer Vergleich 30x Tageswert vs. Monatswert	
		sonnig/ heiss	bewölkt/ kühl	sonnig/ heiss	bewölkt/ kühl
Payerne (Buche)	253'087	322'253	112'339	127%	44%
Davos (Fichte)	906'486	1'229'217	442'652	136%	49%
Magadino (Kastanie)	193'236	271'888	143'207	141%	74%

4.3 Langfristige Entwicklung Klima und Wald

Wie die Ergebnisse in Kapitel 4.1 und 4.2 gezeigt haben, variieren die Emissionen je nach Baumart und Witterung stark. Die Artenzusammensetzung und das Klima verändern sich im Verlauf der Zeit und haben daher einen Einfluss auf die Emissionsbilanz.

Mit Hilfe der unter Kapitel 3 beschriebenen Datengrundlagen wurde eine Schätzung der Emissionen für die Jahre 1900 und 2100 berechnet. Wie Abbildung 20 und Tabelle 11 zeigen, werden unter diesen Voraussetzungen 1900 etwa 75% der heutigen Emissionen erreicht. Der Unterschied ist etwa je zur Hälfte auf den Zuwachs der Waldfläche (siehe Kapitel 3.1.2) und den Klimawandel (Temperatur) zurückzuführen. Mit 93.8 kt im Jahr 2100 erreichen die Emissionen einen Wert, welcher heute als konstanter Wert im Emissionsinventar aufgeführt ist. In der gesamten Zeitperiode von 1900 bis 2100 kommt es gemäss den Modellrechnungen zu einer Verdoppelung der Emissionen.

Die berechnete Zunahme der Emissionen zwischen 2016 und 2100 ist nur durch die unterschiedlichen Klima-Inputdaten bedingt. Nimmt man noch die zukünftige Veränderung des Waldes (sowohl bzgl. Zusammensetzung wie Ausdehnung) hinzu, ist ein noch stärkerer Anstieg der NMVOC-Emissionen bis zum Jahr 2100 möglich. So scheint es plausibel, dass die Gesamtfläche des Waldes durch den Anstieg der Waldgrenze auf Kosten von subalpinem Grünland weiter zunimmt. Die in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Veränderungen der Standorteigenschaften weisen zudem darauf hin, dass sich z.B. die Eiche, welche gemäss Tabelle 6 die höchsten Emissionen pro Hektare aufweist, weiter ausbreiten könnte. Es sind aber auch andere Prozesse denkbar, die zu einer Verringerung der zukünftigen Emissionen führen könnten, z.B. eine Abnahme der Blatt-Biomasse (siehe Tabelle 1) infolge Wassermangels während der Vegetationsperiode.

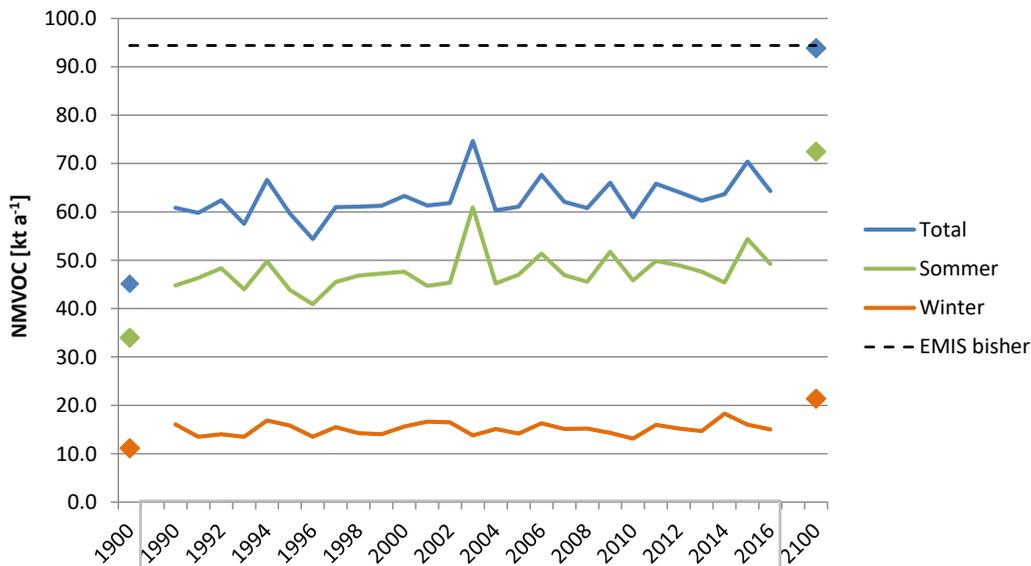


Abbildung 20: Zeitreihe der NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1990–2016 sowie Vergleich gegenüber bisheriger Zeitreihe in EMIS (gestrichelt exkl. Waldbrand von 0.61 kt a⁻¹) sowie den Werten für 1900 und 2100.

Tabelle 11: NMVOC-Emissionen der Waldflächen 1900 und 2100, aufgeteilt auf Sommer (April bis September) und Winter (Oktober bis März).

Jahr	Total	Sommer	Winter
1900	45.1	34.0	11.1
2100	93.8	72.5	21.4
Mittel 1990 bis 2016	62.7	47.6	15.1

5 Unsicherheiten

Gemäss Kapitel 10 des Guidebook sind die grössten Unsicherheiten bei den Emissionspotenzialen, Vegetationskarten und Biomassedaten zu finden. Sehr unsicher ist das Emissionspotenzial für OVOC: Es beträgt für alle Baumarten $1.5 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$, dies ist jedoch ein mittlerer Wert aus dem Bereich von 0.5–5.0, welcher aus Feldstudien abgeleitet wurde. Bei OVOC ist auch der Anteil einzelner chemischer Komponenten noch sehr unsicher.

Generell ist bei der Berechnung von biogenen NMVOC eine Unsicherheit von einem Faktor drei zu erwarten (EMEP/EEA, 2016). Durch die Verwendung von räumlich gut aufgelösten Vegetationskarten und nationalen Biomassedaten in der vorliegenden Studie dürfte ein Faktor zwei zu erwarten sein. Damit würde die mittlere NMVOC-Emission der untersuchten Jahre 63 kt VOC (Bereich 30 bis 128 kt VOC) betragen.

Die für das Jahr 1900 berechneten Emissionen bzw. die Entwicklung von 1900 bis 2000 sind relativ zuverlässig, da die Waldfläche und das Klima für diese Periode auf gut abgestützten Grundlagen beruht. Eine Unsicherheit besteht bei der Baumartenzusammensetzung 1900, für welche die gleiche Zusammensetzung wie 2000 angenommen wurde.

Die Ergebnisse für 2100 stellen nur ein Szenario einer möglichen zukünftigen Entwicklung dar. Wir erachten aber die Wahrscheinlichkeit als gross, dass die Emissionen in Zukunft zunehmen, da die aufgrund der verschiedenen Klimadaten modellierte Zunahme sehr deutlich ist.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

In grösseren europäischen Projekten (z.B. Oderbolz et al. 2013) werden die Berechnungen meist auf Basis von Stundenwerten durchgeführt. In der vorliegenden Studie wurde in Absprache mit dem Auftraggeber die vereinfachte Berechnungsmethode mit Monatswerten gemäss EMEP/EEA (2016) angewendet. Die Vereinfachung auf der Zeitachse verringert den Berechnungsaufwand stark und ermöglichte damit innerhalb der verfügbaren Ressourcen eine räumlich hoch aufgelöste Berechnung auf dem Hektarraster. Die räumliche Auflösung ist in der steilen Topografie der Alpen wichtig, um die stark von der Höhe abhängigen Temperatur-Korrekturen den Waldbeständen und den Baumarten korrekt zuzuordnen.

Von Jahr zu Jahr zeigt sich eine gewisse Variabilität der NMVOC-Emissionen des Waldes aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen sowie der damit verbundenen Länge der Vegetationsperiode. Zudem weisen die Emissionen einen deutlichen Trend auf (siehe Trendlinie des Totals in Abbildung 13): Im Durchschnitt beträgt die jährliche Zunahme 0.20 kt (0.34%), in der ganzen Periode 1990–2016 also insgesamt 9%. Im gleichen Zeitraum wuchs die Waldfläche um gut 3%, sodass etwa ein Zuwachs von 6% auf den Klimawandel zurückzuführen ist.

Die modellierte Zunahme zwischen 1900 und 2000 beträgt ca. 30% und kann etwa zur Hälfte auf die Zunahme der Waldfläche und auf die veränderten Klimabedingungen zurückgeführt werden.

Die Entwicklung der Emissionen bis 2100 zeigt eine deutliche Zunahme, wenn man im Modell nur die Klima-Inputdaten anpasst. Es gibt jedoch zahlreiche Einflüsse, auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden konnte, wie z.B. Veränderung der Waldausdehnung, Baumartenverschiebungen oder Veränderungen bei Blattbiomassen, da in diesen Bereichen noch kaum für die Modellierung direkt verwendbare Daten oder Erkenntnisse zur Verfügung standen.

Der Aufwand für die Nachführung der jährlichen Emissionen mit der hier umgesetzten Methode ist überschaubar. Folgende Raster-Datensätze müssen jährlich aktualisiert werden:

- Klimakarten
- Baumarten / Waldfläche
- Emissionen

Alternativ könnte man als Näherung den Trend bis 2020 fortschreiben.

7 Referenzen

- Allgaier Leuch B., Streit K., Brang P. 2017: Der Schweizer Wald im Klimawandel: Welche Entwicklungen kommen auf uns zu? Merkblatt für die Praxis 59, August 2017, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf
<https://www.wsl.ch/de/publikationen/der-schweizer-wald-im-klimawandel-welche-entwicklungen-kommen-auf-uns-zu.html>
- Andreani-Aksoyoglu S., Keller J., 1995: Estimates of monoterpene and isoprene emissions from the forests in Switzerland. J. Atmos. Chem. Vol. 20, p. 71
- BUWAL, 1996: Luftschadstoff-Emissionen aus natürlichen Quellen der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt, Nr. 257. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- EAFV (Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen) / BFL (Bundesamt für Forstwesen und Landschaftsschutz) (eds.) 1988: Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986.
<http://www.lfi.ch/publikationen/publ/lfi1-en/php> (09.05.2017)
- EMEP/EEA, 2016: air pollutant emission inventory guidebook. B1101 Non-managed & managed forests.
<https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016>
- FOEN, 2018: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2016: National Inventory Report, CRF-tables. Submission of April 2018 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment, Bern.
<http://www.climatereporting.ch>
- Ginzler C., Brändli U.-B., Hägeli M., 2011: Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 162 (2011) 9: 337–343.
- Karl M., Guenther A., Köble R., Leip A., Seufert G., 2009: A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models. Biogeosciences, 6, 1059–1087.
www.biogeosciences.net/6/1059/2009/ (09.05.2017)
- Klap J.M., Reinds G.J., Bleeker A. and de Vries W., 2000: Environmental stress in German forests. Alterra Report Nr. 134, Green World Research. ISSN 1566- 7197.
- LFI, 1990/92: Schweizerisches Landesforstinventar (LFI), Datenbankauszüge vom 30. Mai 1990 und vom 8. Dezember 1992. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
- Oderbolz D. C., Aksoyoglu S., Keller J., Barmpadimos I., Steinbrecher R., Skjøth C. A., Plaß-Dülmer C., Prévôt A. S. H., 2013: A comprehensive emission inventory of biogenic volatile organic compounds in Europe: improved sea-

- sonality and land-cover. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1689–1712.
<http://www.atmos-chem-phys.net/13/1689/2013/doi:10.5194/acp-13-1689-2013>
- Remund J., Frehner, M., Walthert, L., Kägi, M., Rihm, B., 2011: Schätzung standortspezifischer Trockenstressrisiken in Schweizer Wäldern. Schlussbericht/Version 2.3. Auftraggeber WSL, Forschungsprogramm „Wald und Klimawandel“. 56 S.
http://www.monikafrehner.ch/joomla/trockenstress_wald_v23.pdf
(17.05.2018)
- Remund, J., von Arx, G., Gallien, L., Rebetez, M., Huber, B., & Zimmermann, N. E. (2016). Klimawandel in der Schweiz – Entwicklung walddrelevanter Klimagrößen. In A. Plüss, S. Augustin, & P. Brang (Eds.), *Wald im Klimawandel* (pp. 23–27). Haupt.
- Spirig C., Neftel, A., 2002: Biogene VOC und Aerosole. Schriftenreihe der FAL 42. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz.
- Steinbrecher, R., Smiatek, G., Köble, R., Seufert, G., Theloke, J., Hauff, K., Cicioli, P., Vautard, R., and Curci, G., 2009: Intra- and inter-annual variability of VOC emissions from natural and semi-natural vegetation in Europe and neighbouring countries, *Atmos. Environ.*, 43, 1380–1391,
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.072> (09.05.2017)
- UNECE 2016: Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Distributed and updated at the joint Session of the Steering Body to the EMEP and the Working Group on Effects in September 2016. On the internet at
http://www.icpmapping.org/Latest_update_Mapping_Manual (09.05.2017)
- Van Dam, J.C., P. Groenendijk, R.F.A. Hendriks and J.G. Kroes, 2008: Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone J.*, Vol.7, No.2, May 2008.
- WSL, 2017: Schweizerisches Landesforstinventar LFI. Daten der Erhebung 2004/06 (LFI3), Datenbankauszug vom 1. September 2017 (Fabrizio Cioldi). Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Zimmermann N.E., Normand S., Psomas A. 2016: PORTREE Final Report. A project funded by the BAFU-WSL program on Forests and Climate Change in Switzerland. Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf.
<https://www.wsl.ch/lud/portree>