

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
DEPARTEMENT LIFE SCIENCE UND FACILITY MANAGEMENT  
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

## **Schutz der Nacht**

**Lichtemissionen im UNESCO-Welterbe Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch**

Bachelorarbeit

Von

Hänni Jacob

UI20

Abgabedatum:

06.07.2023

FachkorrektorIn:

Prof. Dr. Patrick Laube

ZHAW Life Sciences und Facility Management

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Grüentalstrasse 14

8820 Wädenswil

Alessandra Lochmatter

UNESCO-Welterbe Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch

Bahnhofstrasse 9a

3904 Naters

## Abstract

The development of electric lighting in the 20th century has led to widespread artificial light at night. The alteration of the natural brightness at night is called light pollution and has direct or indirect effects on human health, animals and ecosystems. This study focuses on the assessment of light pollution in the UNESCO World Heritage Swiss Alps Jungfrau-Aletsch using nighttime satellite data. Data from the Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) satellite were analyzed using the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band (VIIRS DNB) from 2012 to 2021. The results indicate minimal light pollution within the World Heritage area, which can be attributed to the low level of infrastructure. There was a decrease in light emissions in urban areas around the World Heritage, which can be mainly attributed to the sensor's insensitivity to the blue light emitted from white LEDs. However, expanding industrial sites such as Lonza in Visp and the Rhone Valley floor showed a significant increase in light emissions. Negative ecological impacts could not be identified within the World Heritage based on light emission levels. However, a newly developed hazard assessment revealed isolated vulnerable sites at the edge of the area near human settlements. Further monitoring is recommended for areas such as Ausserberg on the Lötschberg south ramp and the "Schwarzmonch" wildlife reserve in the Lauterbrunnen Valley. Although nighttime satellite data proved useful for assessing light pollution, limitations were also noted. Incomplete detection of white LEDs, which can increase ecological impacts, was a significant constraint. Inconsistencies in the satellite data and the need for intercalibration were also noted. Additional data sets and local measurements are suggested to increase accuracy. The results indicate that light pollution within the World Heritage Site is minimal, but should be further observed in some areas. By understanding the extent and potential impact of light pollution, effective measures can be developed to protect the unique natural and cultural landscape of the UNESCO World Heritage Swiss Alps Jungfrau-Aletsch.

## Zusammenfassung

Die Entwicklung der elektrischen Beleuchtung im 20. Jahrhundert hat zu einer starken Verbreitung von künstlichem Licht in der Nacht geführt. Die Veränderung der natürlichen nächtlichen Helligkeit wird als Lichtverschmutzung bezeichnet und hat direkte oder indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Tiere und Ökosysteme. Diese Studie konzentriert sich auf die Bewertung der Lichtverschmutzung im UNESCO-Welterbe Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch anhand von nächtlichen Satellitendaten. Es wurden Daten des Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) Satelliten mit dem Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band (VIIRS DNB) von 2012 bis 2021 analysiert. Die Ergebnisse deuten auf eine minimale Lichtverschmutzung innerhalb des Welterbe-Gebiets hin, was auf die geringe Infrastruktur zurückzuführen ist. In städtischen Gebieten um die Welterbe-Region war ein Rückgang der Lichtemissionen zu verzeichnen, was hauptsächlich mit der Unempfindlichkeit des Sensors gegenüber blauem Licht von weisser LED-Beleuchtung begründet werden kann. Expandierende Industriestandorte wie die Lonza in Visp und der Rhonetalboden wiesen jedoch eine deutliche Zunahme der Lichtemissionen auf. Negative ökologische Auswirkungen konnten im Welterbe-Gebiet anhand der Lichtemissionswerte nicht festgestellt werden. Eine neu entwickelte Gefährdungsabschätzung ergab jedoch vereinzelte gefährdete Standorte am Rande des Gebiets in der Nähe menschlicher Siedlungen. Für Gebiete wie Ausserberg an der Lötschberg-Südrampe und der Wildruhezone «Schwarzmonch» im Lauterbrunnental wird ein weiteres Monitoring empfohlen. Obwohl sich die nächtlichen Satellitendaten für die Beurteilung der Lichtverschmutzung als nützlich erwiesen, wurden auch Limitationen festgestellt. Die unvollständige Erfassung weisser LEDs, welche die ökologischen Auswirkungen verstärken können, stellte eine erhebliche Einschränkung dar. Unstimmigkeiten in den Satellitendaten und die Notwendigkeit einer Kalibrierung wurden ebenfalls festgestellt. Zusätzliche Datensätze und lokale Messungen werden vorgeschlagen, um die Genauigkeit zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lichtverschmutzung innerhalb des Welterbes minimal ist, aber in einigen Bereichen Anlass zur Sorge gibt. Durch das Verständnis des Ausmasses und der möglichen Auswirkungen der Lichtverschmutzung können wirksame Massnahmen zum Schutz der einzigartigen Natur- und Kulturlandschaft des UNESCO-Welterbes Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch entwickelt werden.

## Danksagung

Herzlichen Dank an meinen Betreuer Patrick Laube, welcher mir mit zielgerichteten Inputs während der Arbeit beim Lösen einiger Knoten behilflich war. Auch bei Alessandra Lochmatter möchte ich mich bedanken, welche mit Korrekturlesen und wichtigen Informationen und Daten von grosser Hilfe war. An sie und die gesamte Stiftung SAJA auch einen grossen Dank für das Interesse an dieser Thematik und für die wertvolle Arbeit, welche sie zum Schutz des schönen UNESCO-Welterbes Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch leisten. Zu guter Letzt auch Danke an meine Familie und Freunde, welche mich während dieser Arbeit und während dem gesamten Studium in den richtigen Momenten motivieren oder auch ablenken konnten und dazu beigetragen haben, dass ich das Ziel nicht aus den Augen verloren habe.

Ohne Euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen, vielen Dank!



## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung .....	5
2. Literaturrecherche .....	8
2.1. Lichtemissionen .....	8
2.2. Massnahmen.....	9
2.3. Grundlegende Arbeiten .....	10
3. Daten und Methoden.....	12
3.1. Untersuchungsperimeter .....	12
3.2. Verfügbare und Verwendete Daten .....	14
3.2.1. Vektordaten.....	14
3.2.2. Rasterdaten/Lichtemissionsdaten.....	16
3.3. Methoden .....	19
3.3.1. Ist-Zustand .....	19
3.3.2. Trendanalyse .....	20
3.3.3. Gefährdungsabschätzung .....	21
4. Resultate .....	24
4.1. Ist-Zustand .....	24
4.2. Trendanalyse .....	27
4.3. Gefährdungsabschätzung .....	32
5. Diskussion und Schlussfolgerung.....	38
5.1. Interpretation der Resultate .....	38
5.1.1. Ist-Zustand und Trendanalyse.....	38
5.1.2. Gefährdungsabschätzung .....	39
5.2. Diskussion der Methoden .....	41
5.2.1. Ist-Zustand und Trendanalyse.....	41
5.2.2. Gefährdungsabschätzung .....	42
5.3. Schlussfolgerung.....	44
6. Literaturverzeichnis .....	46
7. Anhangsverzeichnis .....	51

# 1. Einleitung

Die Entwicklung der elektrischen Beleuchtung und das starke Wachstum der menschlichen Siedlungen, Verkehrsinfrastruktur und Wirtschaftstätigkeit im 20. Jahrhundert haben dazu geführt, dass ein grosser Teil der Erdoberfläche in der Nacht unter dem Einfluss von künstlichem Licht steht (Bennie et al., 2014). Die daraus resultierende Lichtverschmutzung, definiert als die Veränderung des natürlichen nächtlichen Beleuchtungspegels verursacht durch anthropogene Lichtquellen (Falchi et al., 2016), ist in den letzten Jahren neben der Wasser-, Luft- und Lärmverschmutzung zu einem viel diskutierten Umweltthema geworden (Jiang et al., 2017). Lichtverschmutzung entsteht sowohl durch direkte Beleuchtung als auch durch diffuse Streuung des Lichts in der Atmosphäre (Bennie et al., 2014). Heutzutage lebt rund 80 % der globalen Bevölkerung unter lichtverschmutztem Himmel, in Europa sogar 99 % (Widmer et al., 2022).

Studien haben ergeben, dass Lichtverschmutzung direkte oder indirekte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, Tiere und Ökosysteme haben kann (Jiang et al., 2017). Beispielsweise wurde ein Zusammenhang zwischen künstlicher Lichteinwirkung und Brustkrebs sowie Übergewichtigkeit festgestellt (Zhao et al., 2019). Des Weiteren kann die Melatonin-Produktion unterdrückt werden, was zu Schlafstörungen führt (Levin et al., 2020). Bei Tieren konnten Auswirkungen auf nacht-, wie auch tagaktive Spezies gefunden werden. Diese können charakterisiert werden als Einflüsse auf das natürliche Lichtregime einerseits als Ressource, welche die Photosynthese oder die Aktivitätsaufteilung zwischen Tag und Nacht verändern kann, andererseits als Informationsquelle, welche Effekte auf den zirkadianen Rhythmus, die visuelle Wahrnehmung und die räumliche Orientierung mit sich bringen (Duffy et al., 2015). Die Störung des natürlichen Hell-Dunkel-Zyklus kann sich auf Organismenebene auf die Physiologie, das Verhalten, die Migration, die Fortpflanzung und die Sterblichkeit der Arten auswirken und in Verbindung mit anderen Belastungen auch auf die Struktur, die Funktion und die biologische Vielfalt des Ökosystems (Jiang et al., 2018).

Mit dem anhaltenden Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, der Ausdehnung von urbanen Gebieten und der Entwicklung von effizienteren Belichtungstechnologien wird erwartet, dass auch die Lichtverschmutzung weiter ansteigt und sich in bisher weniger stark betroffene Gebiete ausdehnt (Bennie et al., 2014; Widmer et al., 2022). Durch das zunehmende Wissen über negative Auswirkungen und Besorgnisse über die Energiesicherheit steigt jedoch auch das Interesse, die Anwendung von künstlichem Licht zu regulieren und deren Entwicklung zu beobachten. In der Schweiz fallen Lichtemissionen in den Geltungsbereich des Umweltschutzgesetzes (USG; SR 814.01), welches zum Ziel hat, Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen zu schützen. Wenn schützenswerte Naturräume oder Habitate von

lichtempfindlichen Tiergruppen betroffen sind, müssen auch die Vorgaben des Natur- und Heimatschutzgesetzes (NHG; SR 451), des Jagdgesetzes (JSG; SR 922.0) oder des Bundesgesetzes über die Fischerei (BGF; SR 923.0) berücksichtigt werden (BAFU, 2021).

Mit der Erschliessung eines digitalen Archivs der "National Oceanic and Atmospheric Administration/National Geophysical Data Center" (NOAA/NGDC) im Jahr 1992 wurden Nachtsatellitendaten, aufgenommen mit dem "Defense Meteorological Satellite Program Operational Line Scanner" (DMSP/OLS), frei verfügbar für Forschungszwecke (Huang et al., 2014). 2011 wurde mit dem Start des Satelliten "Suomi National Polar-orbiting Partnership" (Suomi NPP) der NASA und NOAA, ausgerüstet mit einem "Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band" (VIIRS DNB), die Qualität von Nachtaufnahmen drastisch verbessert (Huang et al., 2014; Kyba et al., 2014). Seither konnte die Nutzbarkeit solcher Nachtsatellitendaten beispielsweise zur Schätzung von sozioökonomischen Parametern oder zur Beobachtung von Urbanisierungsprozessen, Konflikten, Krisen, Ökologie und Umwelt aufgezeigt werden (Jiang et al., 2018).

Besonders die entlegeneren Gebiete in den Alpen gehören in Mitteleuropa zu den letzten verbleibenden Naturräumen mit einer relativ natürlichen Nachtdunkelheit, und sind somit gegenüber zunehmenden Störungen wie Lichtemissionen sehr empfindlich (Mountain Wilderness Schweiz, 2016). Darunter zählen auch grosse Teile des UNESCO-Welterbe Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch (SAJA), in welchem eine immense Vielfalt an alpinen und subalpinen Lebensräumen und schätzungsweise 700 der rund 3'600 besonders gefährdeten und seltenen Arten der Schweiz zu finden sind (Mäder & Leiggener, 2022). Durch ein Mosaik aus natürlichen Lebensräumen in Kombination mit den angrenzenden Kulturlandschaften ist eine reiche Biodiversität vorzufinden, im Gebiet sind 60 % der in der Schweiz vorkommenden Tier-, Pilz- und Pflanzenarten anzutreffen, insgesamt 7'200 Arten (Oehler, 2021). Die für das Welterbe zuständige Stiftung SAJA setzt sich für den Erhalt dieser einzigartigen Natur- und Kulturlandschaft ein und ist daran interessiert, mögliche Einflüsse auf die Welterbe-Region durch Lichtemissionen zu untersuchen. In dieser Arbeit wird, angelehnt an die Bachelorarbeiten von Flükiger (2018) und Bieri (2019), der Thematik mit folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- 1. Wie stark ist die UNESCO-Welterbe-Region durch Lichtverschmutzung betroffen?**
- 2. Welche Veränderungen sind in der UNESCO-Welterbe-Region festzustellen und welche sind in Zukunft zu erwarten?**
- 3. Wie können durch Lichtemissionen gefährdete Standorte dargestellt werden und gibt es solche Standorte im Welterbe-Gebiet?**

- 4. Wie nützlich sind GIS- und Remote Sensing Anwendungen zur Erfassung von ökologischen Auswirkungen durch Lichtemissionen und wo befinden sich Schwachstellen?**
- 5. Welche Massnahmen können in betroffenen Gebieten getroffen werden?**

## 2. Literaturrecherche

### 2.1. Lichtemissionen

Im Umweltschutz wird zwischen Emissionen und Immissionen unterschieden. Emissionen sind das gesamte von einer Quelle abgestrahlte Licht, welches im Idealfall nur dem vorgesehenen Beleuchtungszweck dient. Immissionen sind das Licht, welches von einer oder mehreren Quellen an einem Ort ankommt. In der Praxis gelangt ein Teil der Emissionen oft direkt in den Himmel oder neben die Flächen, welche beleuchtet werden sollen. Dieser Anteil wird als unnötige Emission bezeichnet, welche es nach Möglichkeit zu vermeiden gilt (BAFU, 2021). Diese Begriffe sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

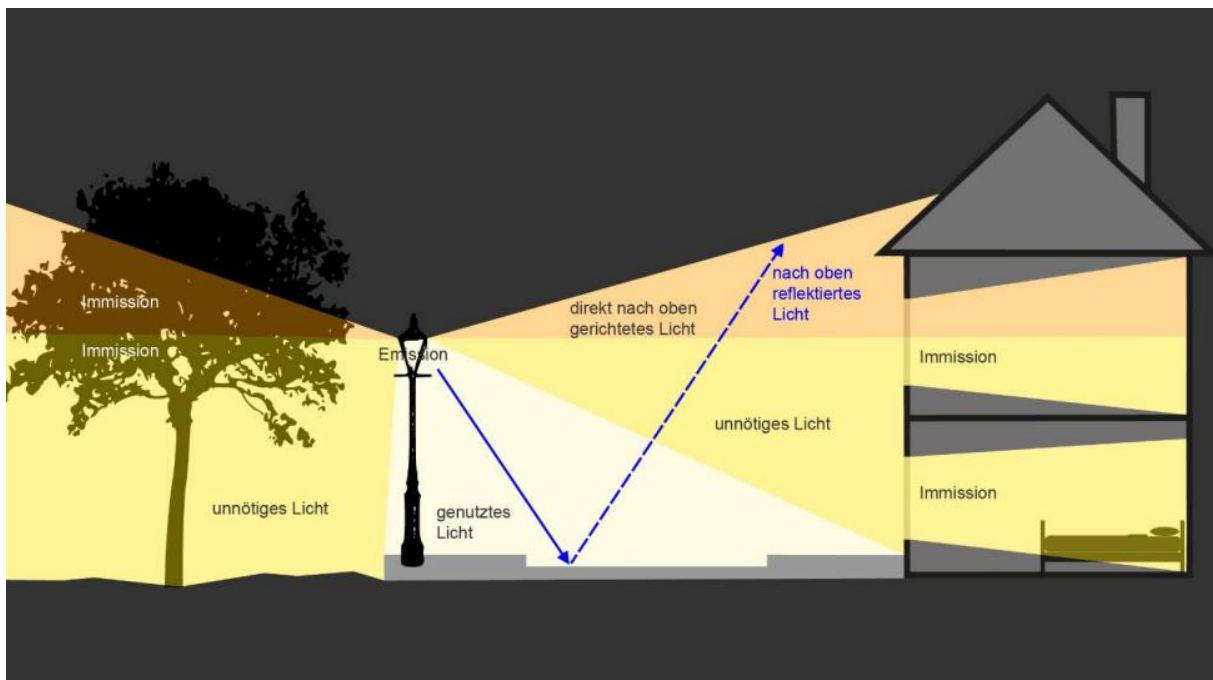


Abbildung 1 Schema Lichtemissionen und -immissionen (BAFU, 2021)

Die Auswirkungen von künstlichem Licht auf Mensch und Umwelt ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Einerseits spielt die Beschaffenheit der Umgebung, in welcher Immissionen auftreten, eine Rolle, andererseits auch die Intensität, die spektrale Zusammensetzung, der Zeitpunkt, die Dauer, die Periodizität sowie die Richtung der Beleuchtung (BAFU, 2021).

Als Reaktion auf den anhaltenden Klimawandel konzentrieren sich moderne Beleuchtungsstrategien eher auf energieeffiziente Systeme mit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dies führt dazu, dass viele Länder von konventionellen Lichtquellen zu LED-Beleuchtungen wechseln, die einen höheren Output von kürzeren Wellenlängen haben und Licht im blauen Teil des Spektrums ausstrahlen. LED produziert helleres Licht und ist somit energieeffizienter, kann sich aber auch negativ auf die natürliche Helligkeit des Nachthimmels auswirken und hat das Potenzial, die negativen ökologischen Auswirkungen der Lichtverschmutzung weit über die städtischen Zentren hinaus zu verbreiten (Widmer et al., 2022).

## 2.2. Massnahmen

Die Umsetzung von Vorschriften und Massnahmen zur Eindämmung der Auswirkungen von Lichtemissionen ist ein langsamer Prozess, der für die politischen Entscheidungsträger eher zweitrangig ist. Jedoch gibt es Ansätze, welche von unverbindlichen Empfehlungen und Normen bis hin zu strengen und verbindlichen Vorschriften reichen (Schönberger, 2021). Artikel 11 Absatz 1 des USG besagt, dass Lichtemissionen in erster Linie mit Massnahmen an der Quelle zu begrenzen sind (BAFU, 2021). Umgesetzte Massnahmen beinhalten das Ausschalten nicht notwendiger Lichter in der Nacht, die Abschirmung von Lichtquellen, die Installation regulierbarer Beleuchtungen mit Dimmern, intelligente Beleuchtung mit Bewegungsmeldern, die Umstellung der Lichtquelle auf natur- und menschenfreundliche Amber-LEDs sowie die Einrichtung von Schutzgebieten für den dunklen Himmel und Sterneparks. Bisher gibt es jedoch keine Evaluation dieser Massnahmen, weshalb unklar ist, welche die Lichtverschmutzung am gewinnbringendsten Eindämmen kann (Schönberger, 2021).

Die Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen des BAFU (2021) beinhalten, neben einer Relevanzmatrix zur Einschätzung der Lichtemissionen einer Anlage und der Verhältnismässigkeit von vorsorglichen Massnahmen, auch einen 7-Punkte-Plan zur Begrenzung von Lichtemissionen. Dessen Grundsätze mit den dazugehörigen Fragestellungen sehen folgendermassen aus:

1. Notwendigkeit: Braucht es eine Beleuchtung?
2. Intensität/Helligkeit: Wie hell muss die Beleuchtung sein?
3. Lichtspektrum/Lichtfarbe: Ist das Lichtspektrum richtig gewählt?
4. Auswahl und Platzierung der Leuchten: Ist der passende Leuchtentyp gewählt und geeignet platziert?
5. Ausrichtung: Sind die Leuchten optimal ausgerichtet?
6. Zeitmanagement/Steuerung: Wann braucht es welche Beleuchtung? Kann die Beleuchtung zeitweise ausgeschaltet oder reduziert werden?
7. Abschirmungen: Sind Abschirmungen vorzusehen?

Die international anerkannte Koordinationsstelle für Lichtverschmutzung ist die International Dark Sky Association (IDA), die 1988 gegründet wurde und seither das öffentliche Bewusstsein für die Gefahren der Lichtverschmutzung fördert. Das erste Gesetz zur Limitierung von Lichtemissionen wurde 1988 auf den Kanarischen Inseln eingeführt, um den Einfluss auf die lokalen Sternwarten zu verringern, woraufhin weitere wichtige Sternwarten ähnliche Restriktionen implementierten. Unabhängig von Sternwarten war die italienische

Region Veneto 1997 das erste grössere Gebiet, in welchem Rechtsvorschriften zur Lichtverschmutzung verabschiedet wurden. Im Jahr 2002 hat die Tschechische Republik als erstes Land ein landesweites Gesetz erlassen, in dem Lichtverschmutzung ausdrücklich erwähnt wird. Die Einhaltung ist jedoch nicht verpflichtend, so dass die Empfehlungen nur in sehr begrenztem Umfang befolgt werden (Aubrecht et al., 2010).

### 2.3. Grundlegende Arbeiten

In der Bachelorarbeit von Flükiger (2018) wurde der Naturpark Gantrisch auf Lichtemissionen untersucht. Der Naturpark strebt eine Zertifizierung als Sternenpark der IDA an, wozu eine Zonierung des Naturparks in Kern- und Pufferzonen durchgeführt wurde. Dazu wurden mittels Esri ArcGIS Pro Lichtemissionsdaten, Daten von schützenswerten Lebensräumen und Daten der lokalen Infrastruktur miteinander verrechnet, zusätzlich abgestützt durch Interviews mit Experten. Die Arbeit zeigt ausserdem ein mögliches Beleuchtungskonzept für den Naturpark auf. Es wird erwähnt, dass bei Projekten zum Schutz der Nachtdunkelheit oft Interessensdifferenzen zwischen der Astronomie, dem Naturschutz und der Tourismusbranche gibt, was zu Unterschieden bei einer möglichen Zonierung führen kann. Hale et al. (2018) haben ebenfalls im Naturpark Gantrisch die Auswirkungen der künstlichen Beleuchtung auf seltene Arten untersucht. In der Studie wurden die Quellen der Lichtverschmutzung ermittelt, die Wichtigkeit der Forschung über nachtaktive Säugetiere hervorgehoben und einen präventiven Ansatz für die Beleuchtung in der Nähe wichtiger Lebensräume, insbesondere von Gewässern, empfohlen.

In der Bachelorarbeit von Bieri (2019) wurde dieselbe Thematik im Jurapark Aargau behandelt. Auch hier wurden Daten von Lichtemissionen, Schutzgebieten und Infrastruktur verrechnet, jedoch mit dem Ziel, Dunkelflächen und -korridore im Gebiet zu definieren. Weiter wurde die Veränderung der Lichtemissionen im Zeitraum von 1992 bis 2012 untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Lichtemissionen in diesem Zeitraum zugenommen haben, jedoch deutlich stärker in den urbanen Gebieten ausserhalb des Parks. Es wurde darauf geschlossen, dass die Lichtemissionen stark korrelieren mit Siedlungsgebieten und teilweise auch mit der Verkehrsinfrastruktur. Auch scheint es in flachen Gebieten mehr Lichtemissionen zu geben als in hügeligen, und Gebiete in der Nähe vom Wald sind dunkler als solche im Offenland. Zusätzlich wurden Lebensräume von Fledermäusen, Amphibien und Vögel mit den Lichtemissionsdaten abgeglichen, was ergeben hat, dass einige Lebensräume durch Lichtemissionen tangiert werden.

Es wurden weitere Publikationen beigezogen, welche verschiedene Aspekte der Lichtemissionen behandelt und untersucht haben. Han et al. (2014) analysierten Trends der Lichtverschmutzung in China anhand von nächtlichen Satellitenbildern und untersuchten Veränderungen der Lichtverschmutzungswerte, -muster und der räumlichen Verteilung im

Zeitraum von 1992 bis 2012. Jiang et al. (2017) analysierten Satellitenbilder, um die Verteilung und Intensität der Lichtverschmutzung in verschiedenen Regionen Chinas zu quantifizieren und Jiang et al. (2018) untersuchten die Trends der Lichtverschmutzung in Schutzgebieten. In diesen Arbeiten wurde ein lineares Regressionsmodell zur Interkalibrierung und Untersuchung der Nachlichtdaten verwendet. Diese Methode wurde entwickelt von Elvidge et al. (2009), welche in ihrer Arbeit nächtliche Satellitendaten über einen Zeitraum von fünfzehn Jahren analysierten, um die zeitlichen und räumlichen Muster des weltweiten Abfackelns von Erdgas zu untersuchen. Elvidge et al. (2020) untersuchten Satellitendaten um festzustellen, ob Schwankungen oder Veränderungen der nächtlichen Beleuchtung Aufschluss über die Instabilität der Stromversorgung in bestimmten Gebieten geben können. Bennie et al. (2014) nutzten Nachtaufnahmen, um die Schwankungen der Lichtverschmutzung in verschiedenen europäischen Regionen zu vergleichen und zu analysieren.



### 3. Daten und Methoden

#### 3.1. Untersuchungsperimeter

Im Dezember 2001 wurde die «Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn»-Region von der UNESCO als erstes Weltnaturerbe des Alpenbogens in die Welterbeliste aufgenommen (Mäder & Leiggener, 2022). Dies erfolgte aufgrund drei von insgesamt zehn Welterbe-Kriterien:

1. Kriterium (vii): Aussergewöhnliche Naturschönheit und ästhetische Bedeutung; 2. Kriterium (viii): Aussergewöhnliches Beispiel in Gang befindlicher ökologischer und biologischer Prozesse, und 3. Kriterium (ix): Aussergewöhnliches Beispiel der Hauptstufen der Erdgeschichte.

2005 ging das Netzwerk «Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn» in die Stiftung SAJA über (Managementzentrum UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch, 2020). Abbildung 2 zeigt eine Übersichtskarte der untersuchten Region. Es wird zwischen dem Welterbe-Gebiet und der Welterbe-Region unterschieden. Das Welterbe-Gebiet weist eine Fläche von 824 km<sup>2</sup> auf und umfasst das Territorium von 23 Gemeinden, wovon sich acht im Kanton Bern und fünfzehn im Kanton Wallis befinden. Das Gebiet ist beinahe vollständig durch das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von Nationaler Bedeutung (BLN) geschützt. Es ist nicht oder nur saisonal bewohnt, im Gebiet befinden sich SAC-Hütten, Viehalpen und die Forschungsstation und Bahnstation Jungfrauoch, ausserdem wird das hintere Lauterbrunnental und die Lötschberg-Südrampe bewohnt und landwirtschaftlich bedient (Managementzentrum UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch, 2020). Ansonsten ist das Gebiet geprägt durch alpine und hochalpine Landschaften, und beherbergt das am meisten vergletscherte Gebiet der Alpen mit dem bekannten Grossen Aletschgletscher (Mäder & Leiggener, 2022).

Die Welterbe-Region besteht aus dem gesamten Gemeindegebiet der 23 Standortgemeinden mit einer Fläche von 1748 km<sup>2</sup>. In der Welterbe-Region ausserhalb des Welterbe-Gebiets sind auch dicht bewohnte Siedlungen und intensiv genutzte Landwirtschaft anzutreffen (Managementzentrum UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch, 2020). Mit dem Managementplan 2030 der Stiftung SAJA wurde die Strategie für die Betreuung, Erhaltung und Stärkung der Welterbestätte festgelegt. Besonders in Anbetracht der steigenden Nachfrage für Infrastruktur der Tourismusbranche und für die Gewinnung erneuerbarer Energien soll das UNESCO-Welterbe SAJA längerfristig geschützt und dessen aussergewöhnlichen universellen Wert bestmöglich erhalten werden. Dazu wurden die folgenden sechs übergeordneten Ziele zur nachhaltigen Entwicklung definiert (Managementzentrum UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch, 2020):

1. Bewahrung von Schönheit, Vielfalt und Eigenart;
2. Erhalt und Förderung von natürlichen Lebensgemeinschaften;

3. Erhalt und Förderung von wertvollen Kulturlandschaften;
4. Nachhaltige wirtschaftliche Nutzung;
5. Angemessenheit des Zugangs und der Nutzung, und
6. Vermittlung der Werte des Raumes.

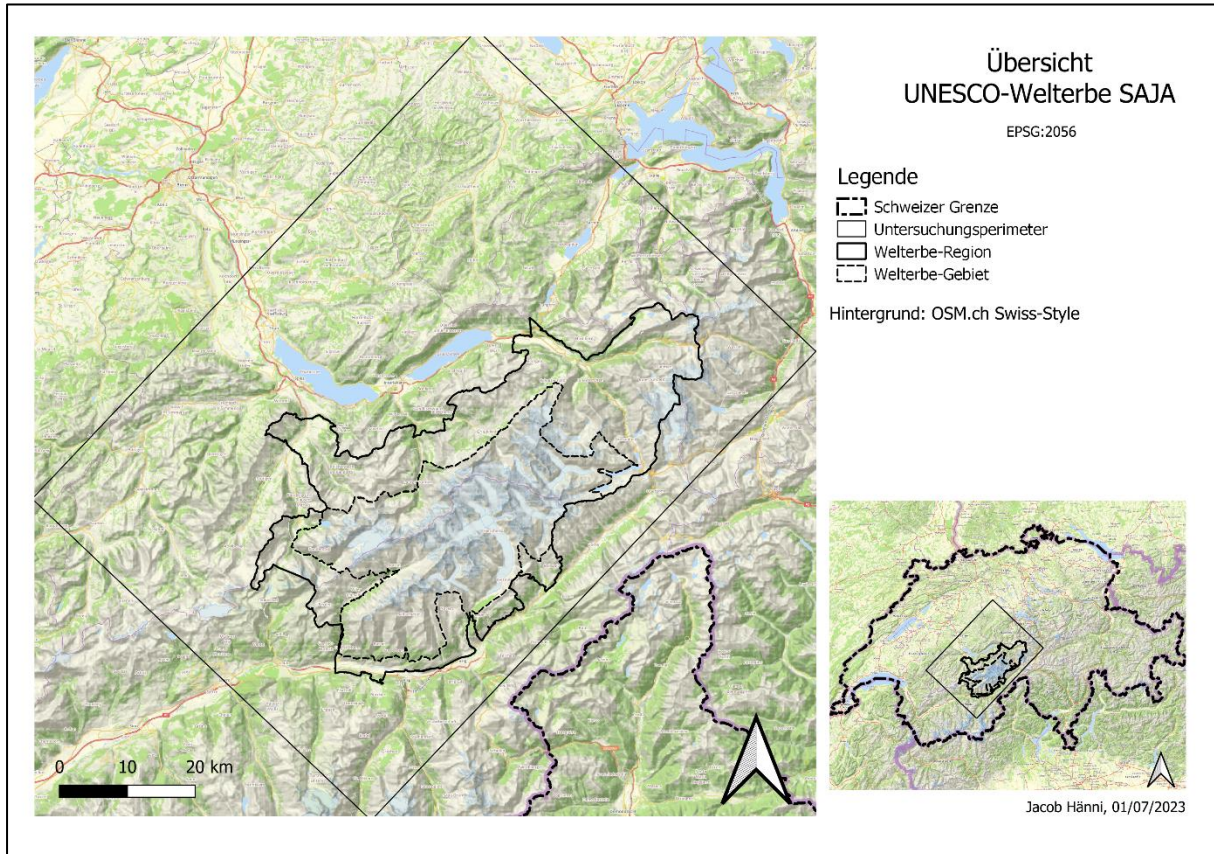


Abbildung 2 Übersichtskarte des UNESCO-Welterbes SAJA (QGIS)

## 3.2. Verfügbare und Verwendete Daten

### 3.2.1. Vektordaten

Um empfindliche und schützenswerte Gebiete darzustellen, wurden für die Analyse öffentlich zugängliche Datensätze von Schutzzonen hinzugezogen. Dabei handelt es sich auf kantonaler Ebene um die Wildruhezonen, auf nationaler Ebene um überregionale Wildtierkorridore sowie die Bundesinventare der Auengebiete, Amphibienlaichgebiete, Moorlandschaften, Flachmoore und Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung. Dem SwissTLM 3D wurden Gebäude-Polygone entnommen, um Regionen mit einer hohen oder tiefen Siedlungsdichte festzustellen. Die verwendeten Datensätze und ihre Quellen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

*Tabelle 1 Verwendete Vektordaten mit Quellen*

Name	Ebene	Quelle	Bezugsdatum
Wildruhezonen BE, VS, UR, NW, OW, LU	Kantonal	<a href="https://www.geodienste.ch/services/wildruhezonen">https://www.geodienste.ch/services/wildruhezonen</a>	27.04.2023
Wildtierkorridore Überregional	National (BAFU)	<a href="https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.funa-wildtierkorridor-national/">https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.funa-wildtierkorridor-national/</a>	07.04.2023
Bundesinventar der Auengebiete von nationaler Bedeutung	National (BAFU)	<a href="https://data.geo.admin.ch/browser/index.html#/collections/ch.bafu.bundesinventare-auen/items/bundesinventare-auen?.language=en">https://data.geo.admin.ch/browser/index.html#/collections/ch.bafu.bundesinventare-auen/items/bundesinventare-auen?.language=en</a>	07.04.2023
Bundesinventar der Amphibienlaichgebiete von nationaler Bedeutung – Ortsfeste Objekte	National (BAFU)	<a href="https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-amphibien/">https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-amphibien/</a>	07.04.2023

Bundesinventar der Moorlandschaften von besonderer Schönheit und nationaler Bedeutung	National (BAFU)	<a href="https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-moorlandschaften/">https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-moorlandschaften/</a>	07.04.2023
Bundesinventar der Flachmoore von nationaler Bedeutung	National (BAFU)	<a href="https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-flachmoore/">https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-flachmoore/</a>	07.04.2023
Bundesinventar der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung	National (BAFU)	<a href="https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-hochmoore/">https://data.geo.admin.ch/ch.bafu.bundesinventare-hochmoore/</a>	07.04.2023
swissTLM3D, Gebäude	National (swisstopo)	<a href="https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html">https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html</a>	07.04.2023
swissBOUNDARIES 3D, Schweizer Grenze	National (swisstopo)	<a href="https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/boundaries3d.html">https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/boundaries3d.html</a>	07.04.2023
SAJA Region	-	Alessandra Lochmatter, Stiftung SAJA	02.02.2023
SAJA Gebiet	-	Alessandra Lochmatter, Stiftung SAJA	02.02.2023

### 3.2.2. Rasterdaten/Lichtemissionsdaten

Mit jährlichen Daten von 1992 bis 2013 sind DMSP/OLS-Aufnahmen die längste verfügbare Datenreihe der nächtlichen Fernerkundung von menschlichen Aktivitäten (EOG, 2021a). Der DMSP-Satellit liefert alle 24 Stunden eine globale Nachtdeckung, und die lokale Überflugzeit schwankt in der Regel zwischen 19:30 und 21:30 Uhr. Von wissenschaftlichem Interesse ist besonders die Version 4 Zeitreihe, welche aus 33 jährlichen Kompositaufnahmen besteht, aufgenommen von den sechs Satelliten F10, F12, F14, F15, F16, und F18 (Zhao et al., 2019). Die Aufnahmen haben eine Auflösung von 30 Winkelsekunden (arcsec), was am Äquator ungefähr 1 km entspricht. Die Lichtintensitäten werden normalerweise als digitale Nummern mit Werten von 0-63 angegeben (EOG, 2021a). Die verwendeten Aufnahmen wurden von der Website der Earth Observation Group heruntergeladen, welche die Aufnahmen zur vereinfachten Verwendung aufbereiten und zur Verfügung stellen. Es sind auch weitere Datenreihen verfügbar, beispielsweise monatliche Zeitreihen oder Aufnahmen, bei welchen die digitalen Nummern in die entsprechende Strahlung umgewandelt wurde (EOG, 2021a). In Abbildung 3 ist eine solche Aufnahme der Jahre 2010 und 2011 ersichtlich.

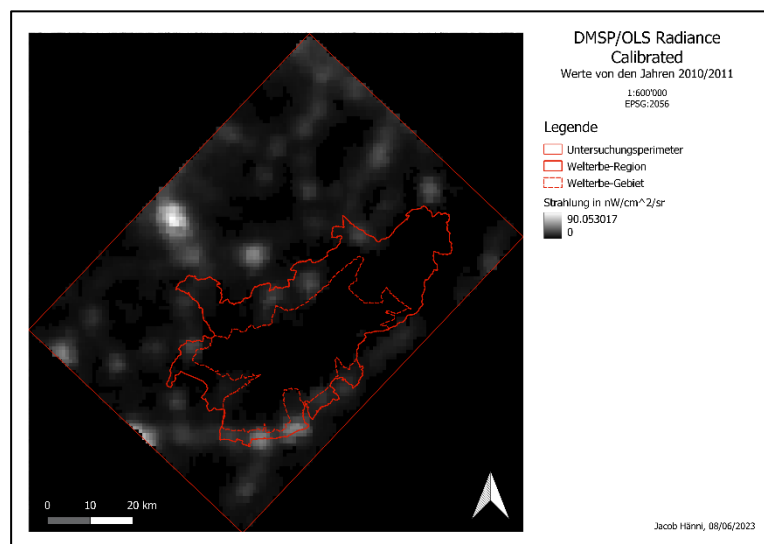


Abbildung 3 DMSP/OLS 2010 und 2011 (QGIS)

Der Suomi NPP-Satellit mit dem VIIRS DNB-Sensor nimmt die globalen Nachtlichter wie der DMSP/OLS alle 24 Stunden auf, jedoch mit einer Überflugzeit etwa um 01:30 Uhr (Zhao et al., 2019). Mit einer höheren Auflösung von 15 arcsec (ungefähr 500 m am Äquator) und einer direkten Messung der Lichtintensität in nW/cm<sup>2</sup>/sr konnte die Qualität der Nachtaufnahmen verbessert werden, vor allem auch die Detektion von tieferen Lichtintensitäten (EOG, 2021b). Auch die VIIRS-Aufnahmen sind auf der Webseite der EOG verfügbar, als jährliche oder monatliche Datenreihen mit unterschiedlichen Aufbereitungsmethoden. Als Beispiel ist in Abbildung 4 ein Raster aus der Zeitreihe «Annual VIIRS Nighttime Lights V2 (Annual VNL V2)» zu sehen, welches den durchschnittlichen Strahlungswert des Jahres 2013 darstellt. Die Annual VNL V2 wurden aus monatlichen wolkenfreien Aufnahmen von 2012 bis 2021 für das

jeweilige Jahr gemittelt, mit zusätzlicher Entfernung von sonnen-, mond- und wolkenbeschienenen Pixeln und von Ausreissern mit hoher und niedriger Strahlungsintensität, um den Hintergrund zu isolieren (EOG, 2021b). Diese Daten wurden auch für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet.

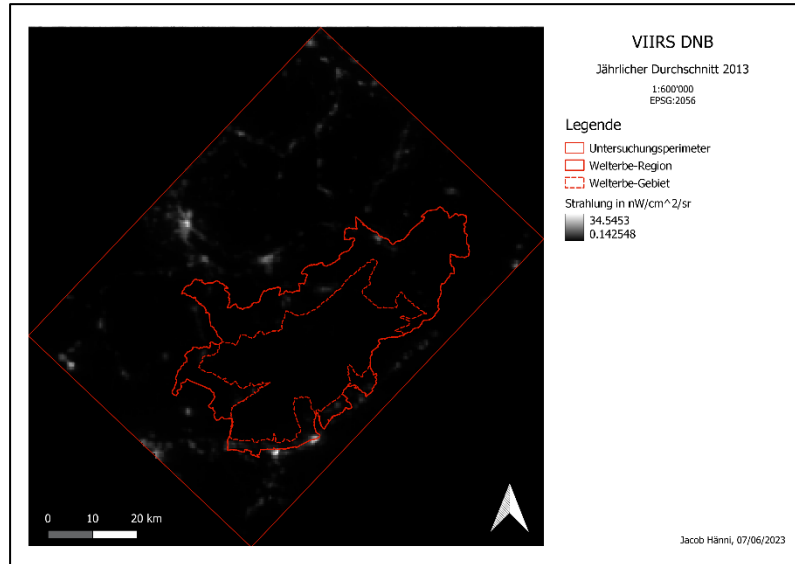


Abbildung 4 VIIRS DNB 2013 (QGIS)

Um das volle Potenzial der VIIRS-DNB-Zeitreihenaufzeichnung für NTL-Anwendungen auszuschöpfen, wurde von der NASA die Black Marble-Datenreihe entwickelt, welche dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Da ebenfalls die Aufnahmen des Suomi NPP-Satelliten verwendet werden, ist auch die Auflösung und die Überflugzeit die gleiche (Román et al., 2018). Die Aufnahmen werden um atmosphärische, Gelände-, Vegetations-, Schnee-, Mond- und Streulichteffekte auf die gemessene Strahlung korrigiert und wolkenbehaftete Pixel werden entfernt. Des Weiteren werden die Aufnahmen jahresübergreifend kalibriert, anhand von Bodenmessungen validiert und enthalten Qualitätsindikatoren, damit sie in wissenschaftlichen und anwendungsbezogenen Studien effektiv eingesetzt werden können (NASA, 2023). Die Daten sind über die Webseite der LAADS DAAC (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center) frei verfügbar unter: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/2/VNP46A4--5000>). In Abbildung 5 ist die durchschnittliche Lichtintensität des Jahres 2022 ersichtlich. Da diese Datenreihe erst in einem späteren Zeitpunkt gefunden wurde und sie mit einer zeitintensiven Methode mittels Python verwendbar gemacht werden musste, wurden die Black Marble Produkte in dieser Arbeit nicht weiter verwendet.



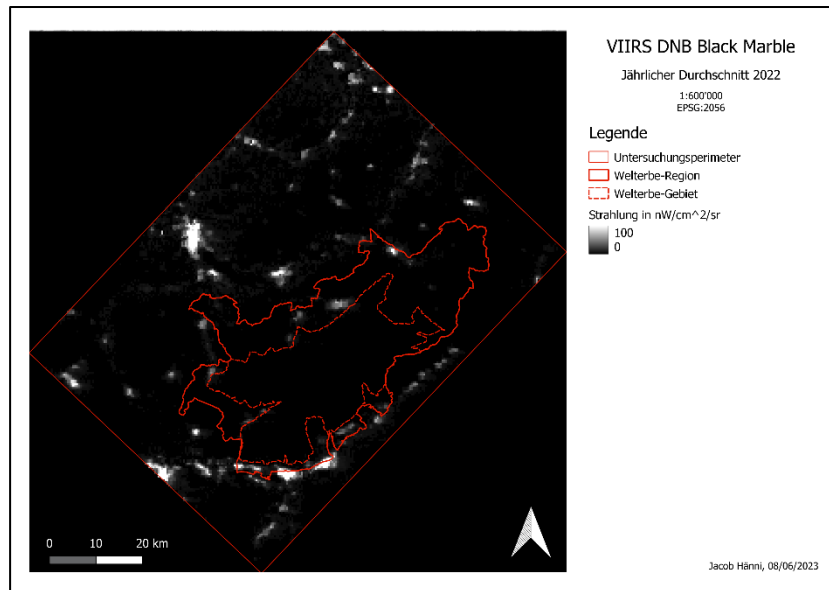


Abbildung 5 NASA Black Marble 2022 (QGIS)

Ein weiteres Beispiel für frei verfügbare Nachtsatellitendaten sind die Aufnahmen des Kleinsatelliten LuoJia 1-01 der Universität Wuhan in China, welcher 2018 gestartet ist (Krebs, n.d.). Die Aufnahmen mit einer Auflösung von 130 m sind über die Webseite des Hubei Daten- und Anwendungszentrums (<http://59.175.109.173:8888/app/login.html>) erhältlich, die mit digitalen Nummern aufgezeichneten Lichtintensitäten wurden mit einer Umrechnungsformel in  $nW/cm^2/sr$  umgewandelt. Die breite Anwendung dieser Daten ist momentan durch den Mangel an multitemporalen Bildern und die Auswirkungen von Wolken und Mondlicht noch beschränkt (Zhao et al., 2019), jedoch könnten solche hochauflösende Aufnahmen in Zukunft eine grössere Rolle spielen. Eine Aufnahme vom 29.06.2018 des Untersuchungspereimeters ist in Abbildung 6 zu sehen.

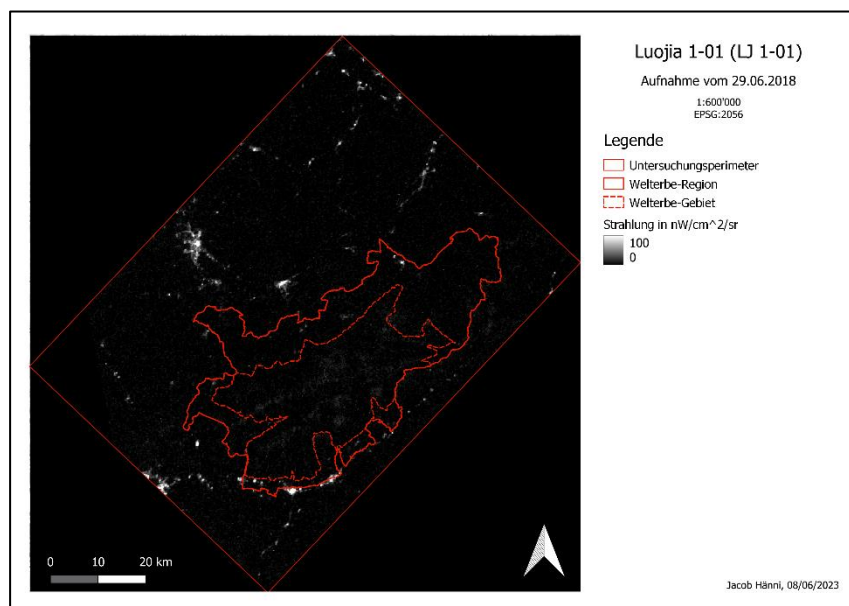


Abbildung 6 LJ 1-01 29.06.2018 (QGIS)

### 3.3. Methoden

#### 3.3.1. Ist-Zustand

Um einen ersten Überblick über den momentanen Umfang der Lichtemissionen im Untersuchungsperimeter zu erhalten, wurden die Satellitendaten des Jahres 2021 der Annual VNL V2 Zeitreihe verwendet. Diese wurden auf den Untersuchungsperimeter zugeschnitten und zunächst ohne Veränderungen dargestellt. Widmer et al. (2022) haben eine Einteilung der Lichtemissionswerte in fünf Klassen definiert, ersichtlich in Tabelle 2, welche auch in dieser Arbeit verwendet wurde. Die Lichtemissionsdaten wurden somit in eine Skala von 0–4 eingeteilt. Es ist wichtig zu erwähnen, dass ab  $2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ , also ab tiefen Lichtemissionswerten oder der Klasse 2, die ersten negativen ökologischen Auswirkungen erwartet werden (Hale et al., 2018). Der unterste Wert von  $0.5 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$  wurde gewählt, da dieser laut Widmer et al. (2022) ungefähr der natürlichen Helligkeit des Nachthimmels entspricht.

*Tabelle 2 Klassifikation Lichtemissionsraster anhand Widmer et al. (2022) mit Beschreibung*

Lichtemissionen [ $\text{nW/cm}^2/\text{sr}$ ]	Beschreibung	Klassifikation
<0.5	Natürliche Lichtemissionswerte	0
0.5–2	Sehr tiefe Lichtemissionswerte	1
2–10	Tiefe Lichtemissionswerte	2
10–20	Mittlere Lichtemissionswerte	3
>20	Hohe Lichtemissionswerte	4

Im weiteren Verlauf wurden die Lichtemissionsdaten noch auf ihre ökologischen Auswirkungen klassifiziert, sichtbar in Tabelle 3. Diese wurde definiert anhand der Erläuterung von Hale et al. (2018), wonach ab  $2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$  erste negative ökologische Auswirkungen auftreten können. Diese Klassifikation unterscheidet sich von der vorherigen nur darin, dass die Klassen 0 und 1 zusammengefasst werden, soll jedoch dazu dienen, Gebiete mit potenziellen Auswirkungen besser hervorzuheben.



Tabelle 3 Klassifikation Auswirkungsraster mit Beschreibung

Lichtemissionen [nW/cm <sup>2</sup> /sr]	Beschreibung	Klassifikation
<2	Keine ökologischen Auswirkungen	0
2–10	Wenig ökologische Auswirkungen	1
10–20	Mittlere ökologische Auswirkungen	2
>20	Starke ökologische Auswirkungen	3

### 3.3.2. Trendanalyse

Die Trendanalyse wurde vorwiegend in Esri ArcGIS Pro 2.9.5 durchgeführt. Innerhalb der ArcGIS-Erweiterung «Image Analyst» befindet sich ein Werkzeug, mit welchem ein Trend-Raster kreiert werden kann, anhand welchem auch eine Vorhersage abgeleitet werden kann. Um diese Funktionen anzuwenden, muss der Datensatz multidimensional sein. Multidimensionale Daten stellen Daten dar, die zu mehreren Zeitpunkten oder in mehreren Tiefen oder Höhen erfasst wurden (Esri, n.d.). Die zu untersuchenden Daten in dieser Arbeit sind die VIIRS VNL V2 Daten von 2012 bis 2021, welche, klassifiziert nach Tabelle 2, im Anhang 1 zu finden sind. Diese mussten zuerst in einem Mosaik-Datensatz zusammengefügt werden, in welchem in einem nächsten Schritt die multidimensionalen Informationen definiert werden konnten. Dazu musste die untersuchte Variable angegeben werden, hier also die Lichtintensität in nW/cm<sup>2</sup>/sr, und die zeitliche Komponente, also die Jahre der einzelnen Datensätze. Anschliessend wurde ein lineares und ein harmonisches Trend-Raster erstellt, sichtbar in Anhang 2. Da sich diese Modelle nur geringfügig unterschieden haben, wurde beschlossen, mit dem linearen Trend-Raster weiterzuarbeiten. Es wurde eine Vorhersage für die Jahre 2022 bis 2025 getroffen. Die verwendeten Werkzeuge und deren Abfolge sah wie folgt aus: 1. Create Mosaic Dataset; 2. Add Raster to Mosaic Dataset; 3. Build Multidimensional Info; 4. Create Trend Raster; 5. Predict using Trend Raster.

An Punkten von Interesse, beispielsweise mit einem hohen Wachstum oder innerhalb des Welterbe-Gebiets bzw. der Welterbe-Region, wurde noch der zeitliche Verlauf über die zehn Jahre herausgelesen. Des Weiteren wurde, um die Veränderung über die untersuchte Zeit noch anders darzustellen, die Differenz des Rasters von 2021 zum Raster von 2012 berechnet. Auch wurde die Klassifikation nach Tabelle 3 zur Darstellung der ökologischen Auswirkungen auf die gesamte Zeitreihe angewendet, ersichtlich in Anhang 3. Um eine einheitliche Gestaltung des Kartenmaterials zu ermöglichen, wurden die Resultate der Trendanalyse in QGIS exportiert und dort dargestellt.

### 3.3.3. Gefährdungsabschätzung

Zur Ausscheidung von potenziell gefährdeten Gebieten im Untersuchungsperimeter wurde eine neue Methode entwickelt. Diese basiert lose auf einer Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren, bei welcher Geodatenätze der Gefährdung mit Daten zur Bodennutzung überlagert werden, um Schutzdefizite festzustellen (BUWAL, 1999). Statt einer Gefährdung des Menschen durch Naturgefahren soll hier jedoch die Gefährdung von natürlichen Lebensräumen durch anthropogene Lichtemissionen untersucht werden. Es konnten keine Arbeiten gefunden werden, in welchen eine ähnliche Untersuchung durchgeführt wurde, weshalb diese Methode mit viel Ausprobieren erarbeitet wurde. Wie auch bei den Arbeiten von Flükiger (2018) und Bieri (2019) wurden die vorher beschriebenen Lichtemissionsdaten mit Schutzzonendaten und Gebäudedaten verrechnet, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind. Diese Arbeiten haben jedoch mit der Ausscheidung von Kern- und Pufferzonen sowie Dunkelflächen und -korridore andere Ziele verfolgt.

Im Open-Source-Programm QGIS wurde für die Gefährdungsabschätzung eine Multikriterienanalyse (MKA) durchgeführt. Eine MKA dient der Entscheidungsfindung, indem alternative Optionen oder Szenarien auf der Grundlage mehrerer Kriterien oder Faktoren bewertet und eingestuft werden. Sie hilft bei der Analyse komplexer Probleme durch die gleichzeitige Berücksichtigung verschiedener räumlicher Attribute (Malczewski & Rinner, 2015). Um die Datensätze zu den Lichtemissionen, den Gebäuden und den Schutzzonen zusammenzubringen und zu verrechnen, mussten diese vergleichbar gestaltet werden. Um die Verrechnung möglich zu machen, ist zusätzlich notwendig, eine numerische Skala zu definieren, mit welcher alle Datensätze beschrieben werden können. Die Umwandlung von Daten in solche numerischen Skalen wird meist als Standardisierung bezeichnet (Eastman, 1999). Die Lichtemissionsdaten mit der Klassifikation gemäss Widmer et al. (2022), ersichtlich in Tabelle 2, dienten als Vorlage für die beiden anderen Datensätze.

Die Daten der Schutzgebiete wie auch der Gebäude mussten also einerseits in Rasterdaten umgewandelt, andererseits in fünf Klassen eingeteilt werden. In einem ersten Schritt wurden diese Datensätze auf den Untersuchungsperimeter zugeschnitten. Die Gebäude, welche als einzelne Polygone dargestellt sind, wurden mit dem «Centroids»-Tool zu Punkten umgewandelt. Dabei handelt es sich um die Mittelpunkte der jeweiligen Polygone. Mit dem Werkzeug «Heatmap» kann die Anzahl an Punkten innerhalb eines Radius ermittelt werden, wobei ein Raster-Datensatz entsteht. Mit einem Radius von 564.19 m konnte so die Anzahl an Gebäuden pro Quadratkilometer festgestellt werden, also die Gebäudedichte. Für diese konnte, anders als bei den Lichtemissionen, keine vergleichbare Klassifikation gefunden werden, weshalb diese mit einigem Ausprobieren erreicht wurde und in Tabelle 4 dargestellt

ist. Im Verlauf der Untersuchung wurden die Klassifikationswerte noch umgedreht, um Gebiete mit einer tiefen Gebäudedichte hervorzuheben.

Tabelle 4 Klassifikation Gebäudedichteraster normal und umgekehrt mit Beschreibung

Gebäude/km <sup>2</sup>	Beschreibung	Klassifikation Normal/Umgekehrt
0	Keine Gebäude	0 / 4
0–20	Kleine Siedlung	1 / 3
20–200	Dorf	2 / 2
200–600	Vorstadt	3 / 1
>600	Stadt	4 / 0

Für die Schutzgebiete gestaltete sich die Standardisierung etwas schwieriger, da diese Polygone, anders als die Gebäudedaten, auch grössere Flächen darstellen und somit nicht durch die Mittelpunkte dargestellt werden konnten. Zusätzlich gibt es Standorte, an welchen mehrere Schutzgebiete übereinander liegen, was bei der Feststellung der ökologischen Wichtigkeit höher gewertet und somit auch miteinbezogen werden muss. Also wurden in einem ersten Schritt alle Schutzgebiete von Vektor- zu Rasterdaten umgewandelt, wobei einem Pixel eine 1 zugewiesen wurde, wenn sich dieser in einer Schutzzone befindet und eine 0, wenn nicht. Mit dem Raster Calculator wurden dann diese Raster addiert, womit ein Raster entstand mit einem Maximalwert von 5, was bedeutet das an einigen Orten fünf Schutzzonen übereinander liegen. Im weiteren Verlauf wurde versucht, ähnlich wie bei den Gebäuden eine «Dichte» darzustellen und auch Gebiete nahe von Schutzzonen miteinzubeziehen. Dazu wurden mit dem «Create Grid»-Werkzeug alle 500 m horizontal und vertikal Punkte erstellt, welche dann mit den kombinierten Schutzzonen geschnitten wurde. Grossflächige Schutzgebiete beinhalteten nun viele Punkte, jedoch gingen kleinere Gebiete damit verloren. Aus diesem Grund wurde ebenfalls das «Centroids»-Werkzeug angewandt, um die kleineren Gebiete mit dem Mittelpunkt darzustellen. Daraufhin wurde wiederum das Heatmap-Werkzeug verwendet, in diesem Fall mit einem Radius von 977.2 m für eine Fläche von 2 km<sup>2</sup>. Das resultierende Raster wurde anschliessend mit dem aufsummierten Schutzzonenraster mit der nachfolgenden Formel zusammengerechnet:

$$\text{Schutzzonenraster} = \frac{\text{Dichteraster} + (2 * \text{Summeraster})}{2}$$

Das Resultat wurde zur Standardisierung anhand Tabelle 5 klassifiziert.

Tabelle 5 Klassifikation Schutzzonenraster mit Beschreibung

Schutzzonendichte	Beschreibung	Klassifikation
0	Keine Schutzzone	0
0–2	Geringe Schutzzonendichte	1
2–4	Mittlere Schutzzonendichte	2
4–6	Hohe Schutzzonendichte	3
>6	Sehr hohe Schutzzonendichte	4

Die vorbereiteten und klassifizierten Raster sind in Anhang 4 ersichtlich, bis auf das Lichtraster, welches in Abbildung 9 und Anhang 1 zu sehen ist. Die Raster wurden mittels dem Raster Calculator miteinander verrechnet, was die resultierenden Gefährdungsraster ergab. Die Grundformel dazu war:

*Gefährdungsraster*

$$= \frac{a * \text{Lichtraster}(LR) + b * \text{Gebäuderaster}(GR) + c * \text{Schutzzonenraster}(SR)}{a + b + c}$$

So konnten die jeweiligen Raster noch unterschiedlich gewichtet werden und die Resultate ergaben Werte zwischen 0 und 4. Diese wurden schlussendlich nach Tabelle 6 klassifiziert.

Tabelle 6 Klassifikation Gefährdungsraster mit Beschreibung

Berechnet	Beschreibung	Klassifikation
0	Keine Gefährdung	0
0–1	Sehr schwache Gefährdung	1
1–2	Schwache Gefährdung	2
2–3	Starke Gefährdung	3
3–4	Sehr starke Gefährdung	4

## 4. Resultate

### 4.1. Ist-Zustand

In Abbildung 7 ist das unveränderte Raster des Jahres 2021 der VIIRS VNL V2 Zeitreihe ersichtlich. Die urbanen Gebiete innerhalb des Untersuchungsperimeters stechen heraus, namentlich Thun, Spiez und Interlaken nördlich der Welterbe-Region und Visp und Brig am südlichen Rand der Region. Innerhalb der Region sind schwächere Erhellungen sichtbar, das Welterbe-Gebiet erscheint dunkel.

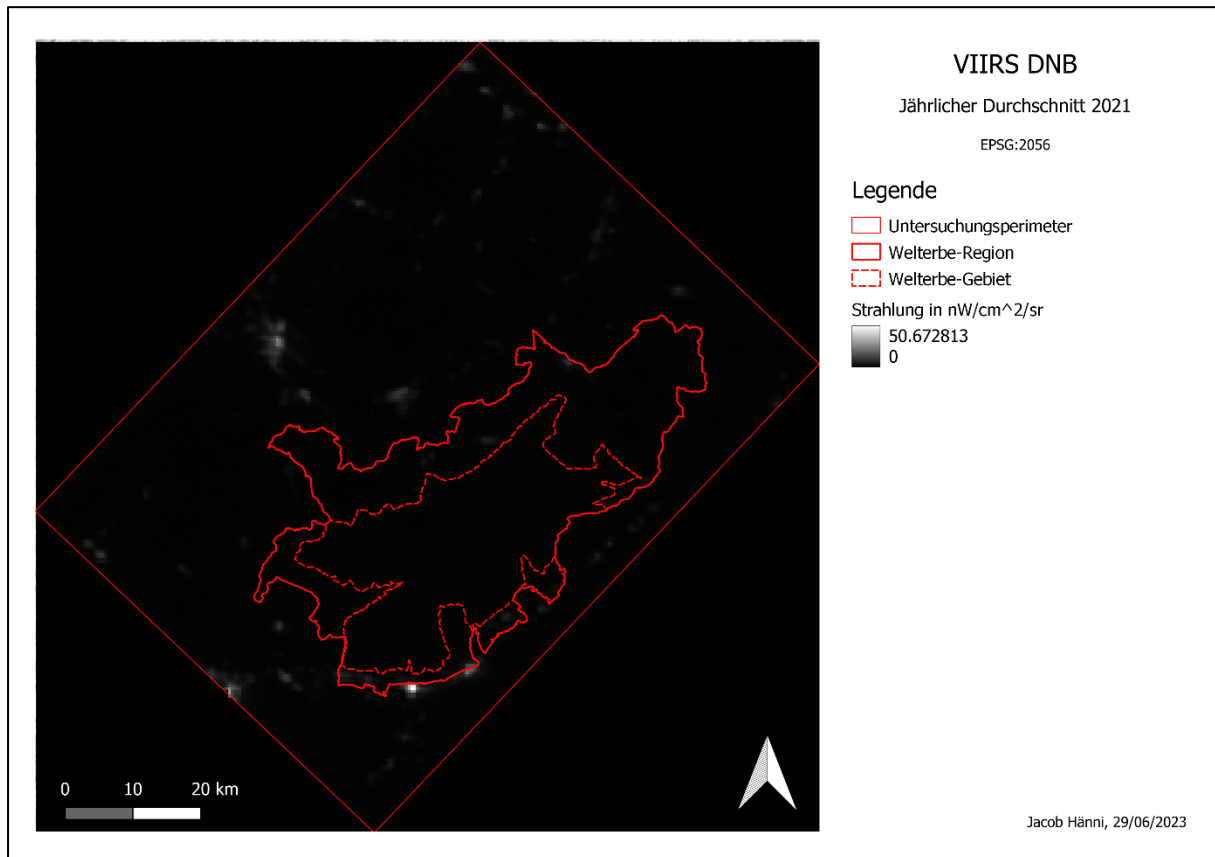


Abbildung 7 VIIRS DNB 2021 (QGIS)

Das anhand Tabelle 2 klassifizierte Lichtraster des Jahres 2021 ist in Abbildung 9 zu sehen. Das klassifizierte Raster des Jahres 2012 in Abbildung 8 wird im folgenden Abschnitt der Trendanalyse beschrieben. Im Raster von 2021 sind wiederum die urbanen Gebiete gut ersichtlich, jedoch sind auch in weniger urbanen Gebieten Lichtemissionen auszumachen. Besonders Lichtemissionen der Klasse 1 ( $0.5-2 nW/cm^2/sr$ ) sind weitreichend und kommen sogar im Welterbe Gebiet vor. Das Raster der ökologischen Auswirkungen des Jahres 2021, klassifiziert nach Tabelle 3, ist in Abbildung 11 ersichtlich, mit dem Raster von 2012 für die Trendanalyse in Abbildung 10. Die mittleren und starken ökologischen Auswirkungen konzentrieren sich auf die urbanen Gebiete, es hat aber auch vereinzelte Standorte mit wenig ökologischen Auswirkungen innerhalb der Welterbe-Region, jedoch nicht im Welterbe-Gebiet.

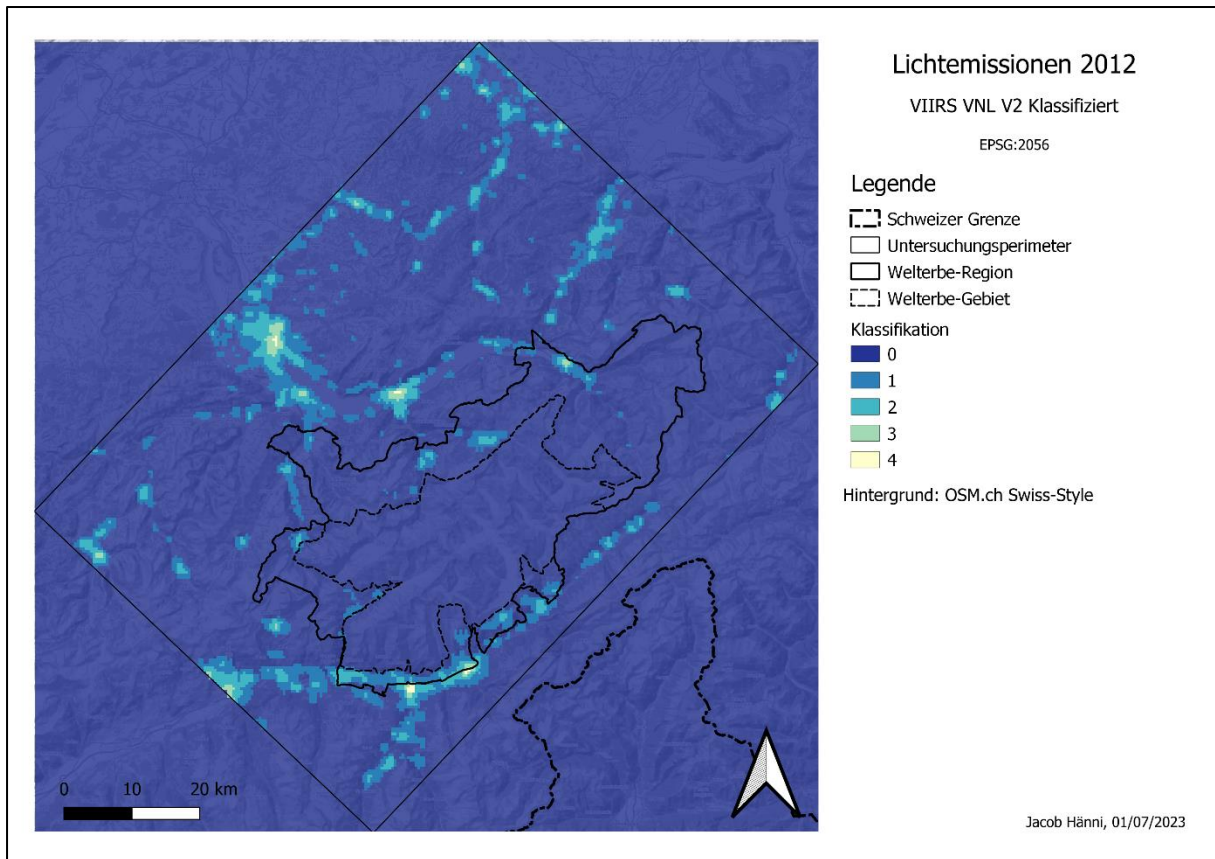


Abbildung 8 Lichtemissionen 2012 Klassifiziert (QGIS)

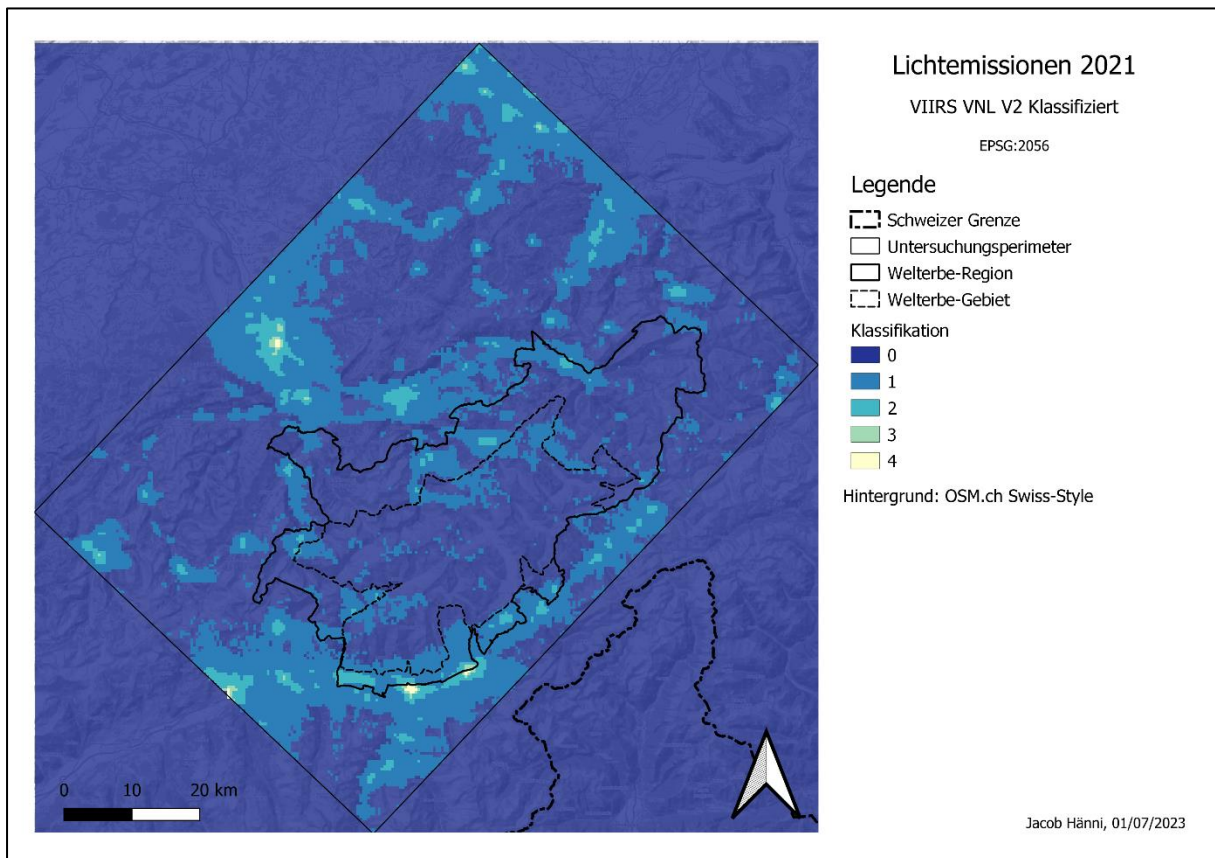


Abbildung 9 Lichtemissionen 2021 Klassifiziert (QGIS)



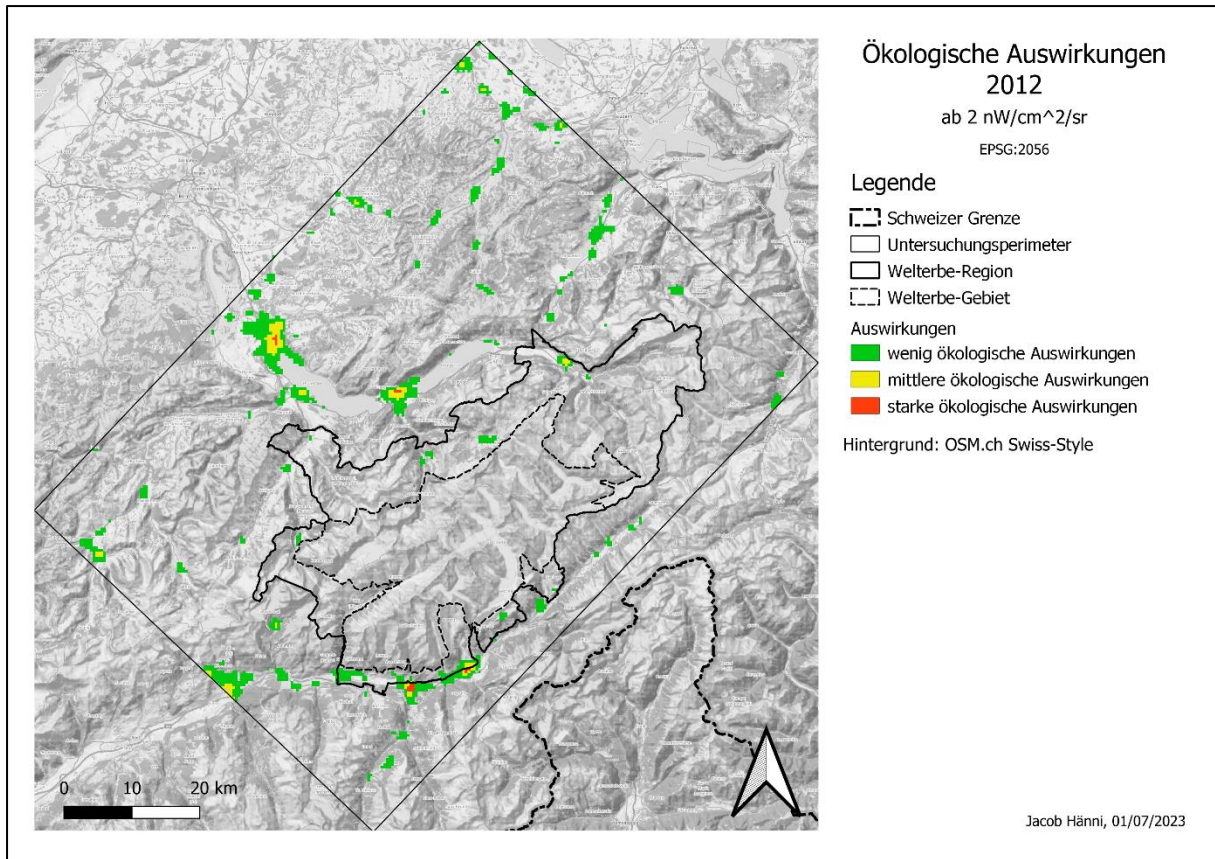


Abbildung 10 Ökologische Auswirkungen 2012 (QGIS)

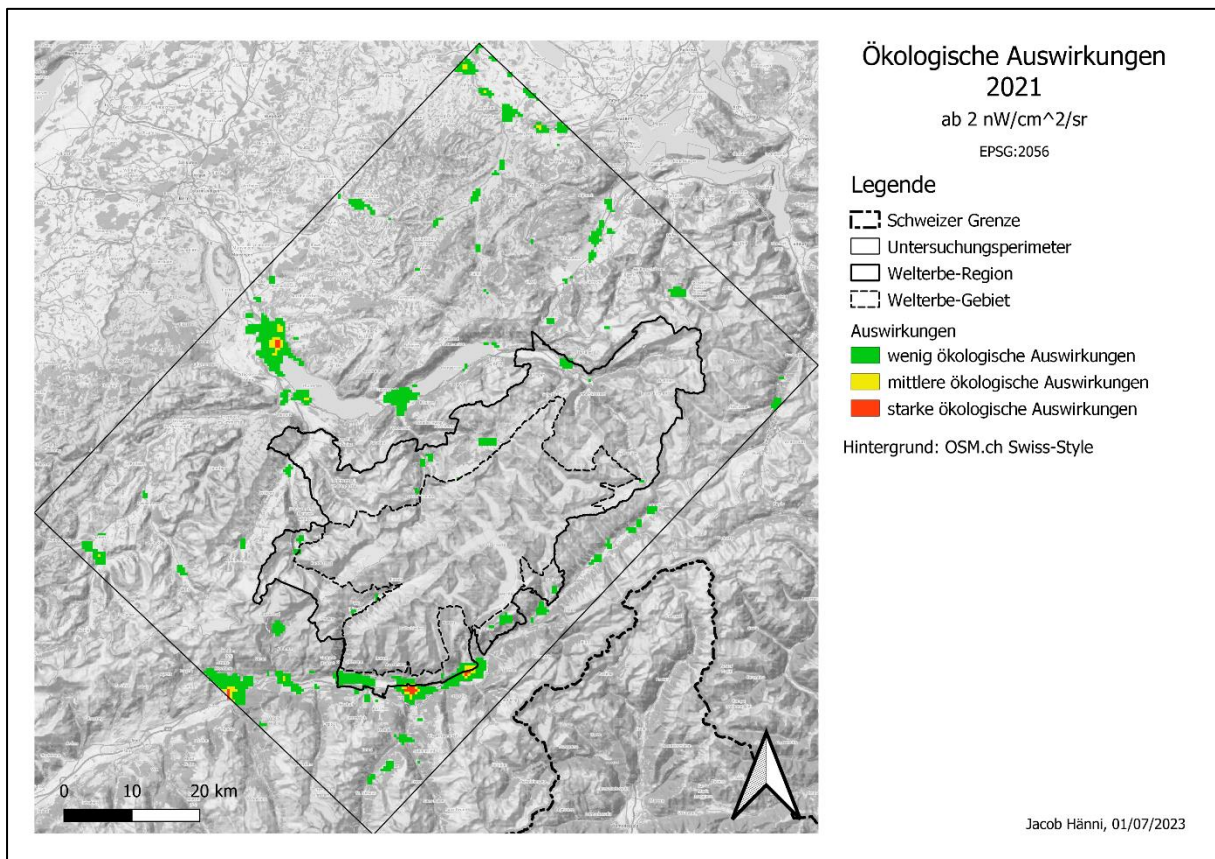


Abbildung 11 Ökologische Auswirkungen 2021 (QGIS)

## 4.2. Trendanalyse

Abbildung 8Abbildung 9 zeigen die klassifizierte Lichtemissionsraster der Jahre 2012 und 2021. Die gesamte Zeitreihe von 2012 bis 2021 ist in Anhang 1 zu finden. Es fällt auf, dass sich besonders Lichtemissionen der Klasse 1 stark ausgedehnt haben. Bei der Betrachtung der gesamten Zeitreihe ist ersichtlich, dass diese Ausdehnung 2017 beginnt und ab 2020 in Gebieten mit wenig bis gar keiner Infrastruktur auftritt. In den Zentren von Thun, Spiez und Interlaken haben die Lichtemissionen leicht abgenommen, in den Städten im Walliser Haupttal haben sich die Lichtemissionen der Klasse 2 und höher jedoch nur wenig verändert. Dies ist auch ersichtlich im Vergleich der ökologischen Auswirkungen in Abbildung 10Abbildung 11. In Anhang 3 sind die ökologischen Auswirkungen für alle Jahre von 2012 bis 2021 zu finden. Es kann auch festgestellt werden, dass sich in diesem Zeitraum die Lichtemissionen der Klassen 2, 3 und 4 nur wenig verändert und auch nicht ausgedehnt haben.

Die Vorhersagen für die Jahre 2022 bis 2025, welche anhand des linearen Trend-Rasters in Anhang 2 berechnet wurden, sind in Abbildung 12,Abbildung 13Abbildung 14Abbildung 15 ersichtlich. Die Klassifikation erfolgte anhand Tabelle 2. Die Vorhersage für das Jahr 2022 weicht noch nicht stark vom Lichtemissionsraster des Jahres 2021 in Abbildung 9 ab, die kontinuierliche Ausdehnung der Lichtemissionen der Klasse 1 ist jedoch auszumachen. Diese verstärkt sich in den weiteren Jahren, bis in der Vorhersage von 2025 nahezu der gesamte Untersuchungs-perimeter ausgefüllt ist. Bei den anderen Klassen sind keine grossen Veränderungen auszumachen, in den Zentren der urbanen Gebiete deuten sich jedoch kleinere Abnahmen an.



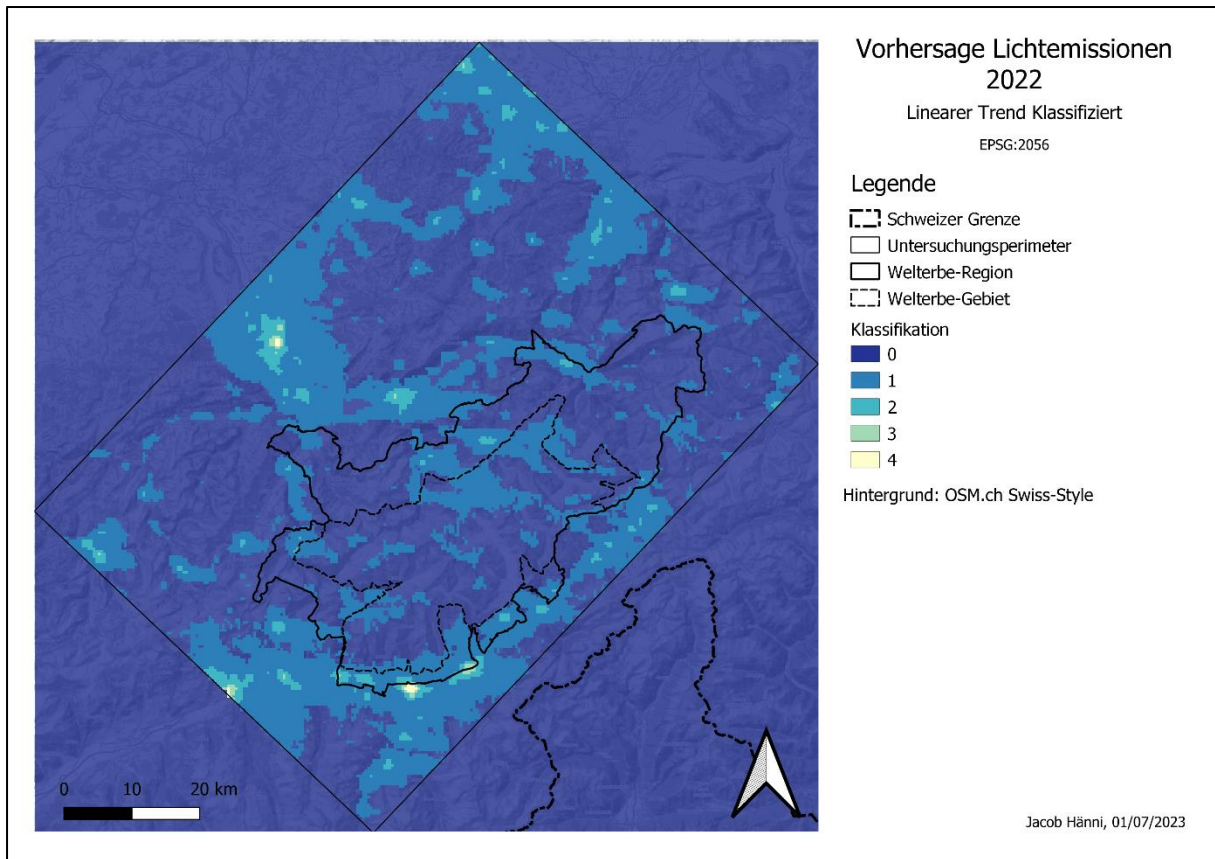


Abbildung 12 Vorhersage 2022 Klassifiziert (QGIS)

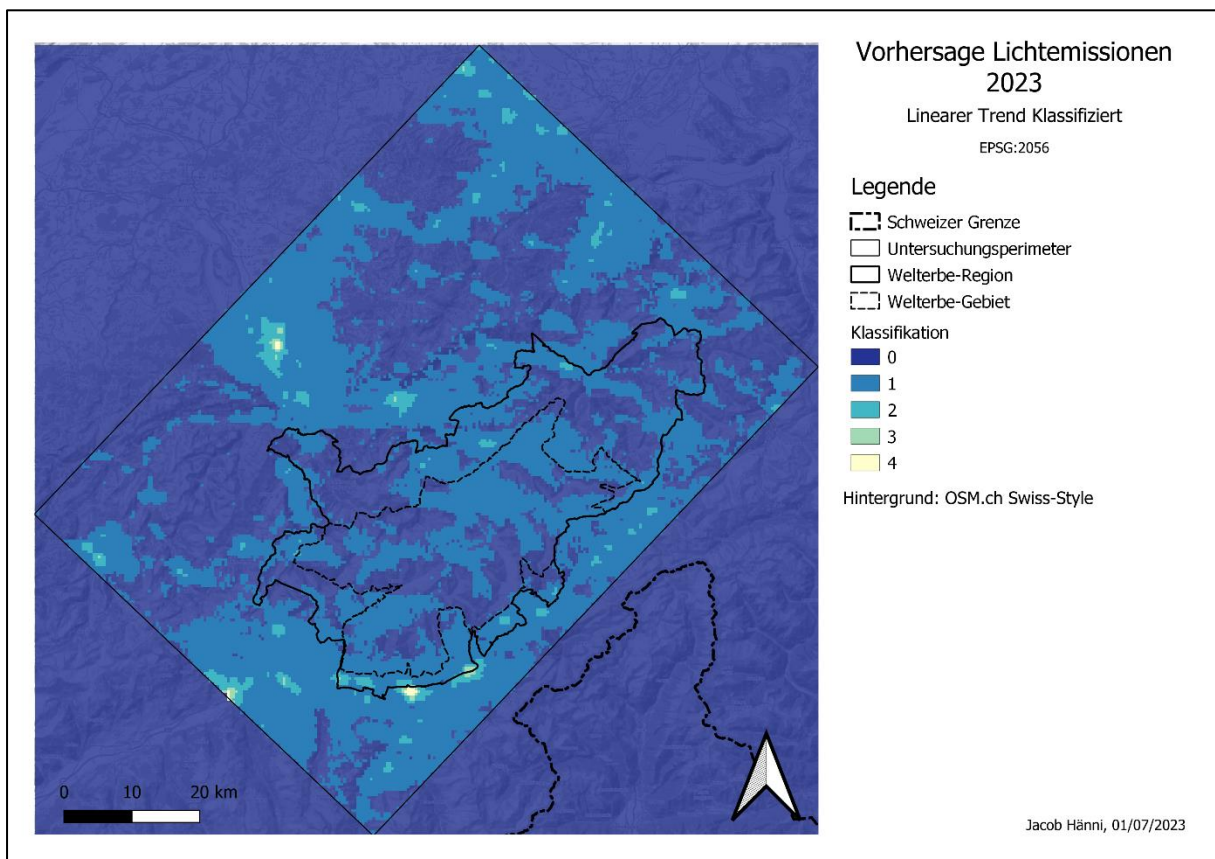


Abbildung 13 Vorhersage 2023 Klassifiziert (QGIS)

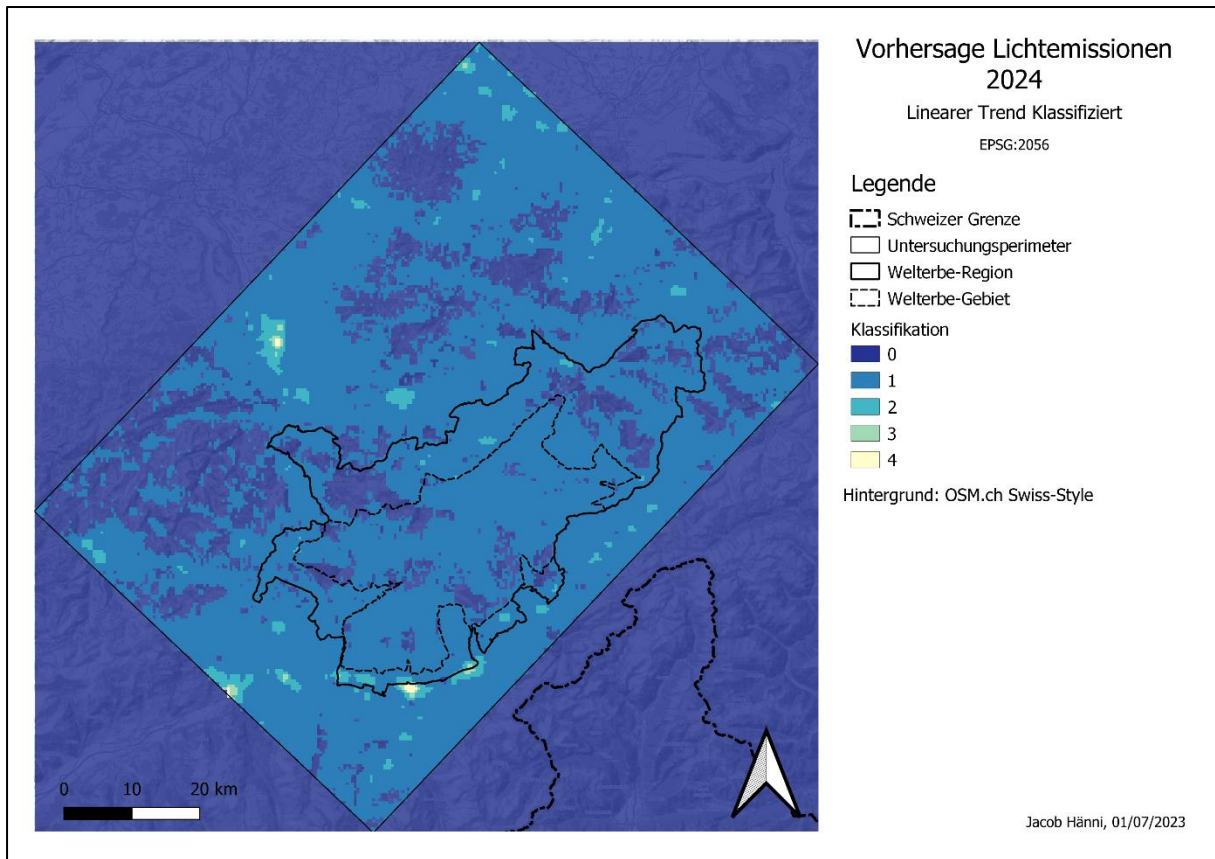


Abbildung 14 Vorhersage 2024 Klassifiziert (QGIS)

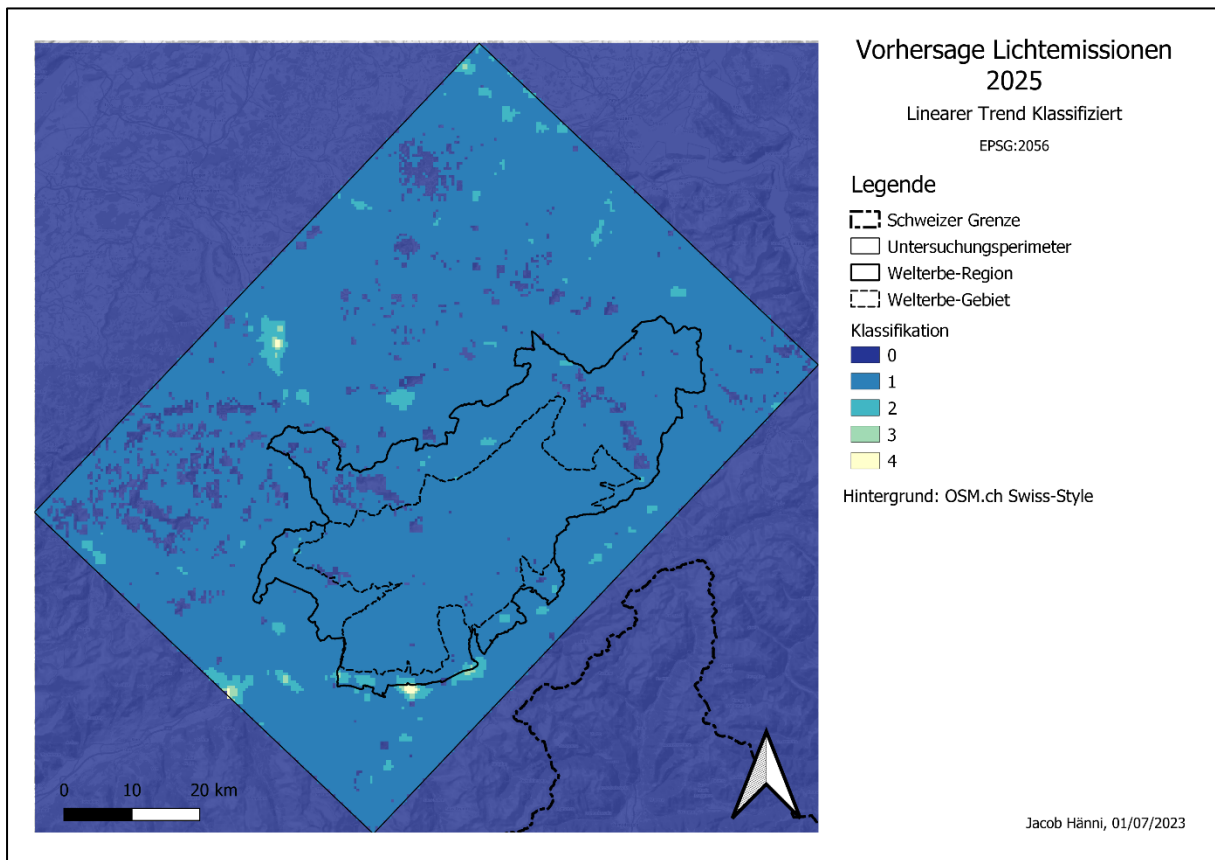


Abbildung 15 Vorhersage 2025 Klassifiziert (QGIS)



Abbildung 16 zeigt die Differenz des Lichtemissionsrasters aus 2021 zum Raster aus 2012. Zusätzlich sind die Punkte dargestellt, an welchen die Veränderung über die Zeit genauer untersucht wurde. Die stärksten Abnahmen sind in Thun und Interlaken auszumachen, auch im Zentrum von Brig sind kleinere Abnahmen festzustellen. Die stärkste Zunahme befindet sich in unmittelbarer Nähe von Visp am Standort der Lonza. Der Bereich des Rhonetals um Visp und Brig ist in Abbildung 18 vergrössert dargestellt. Im gesamten Talgrund sind Zunahmen von 0.5 bis 5 nW/cm<sup>2</sup>/sr ersichtlich. Innerhalb des Welterbe-Gebiets sind weder Zu- noch Abnahmen festzustellen, innerhalb der Welterbe-Region jedoch schon. Beispielsweise sind an der Lötschberg-Südrampe leichte Zunahmen ersichtlich, auch in Kandersteg, Lauterbrunnen und Grindelwald sind Veränderungen wahrzunehmen.

Die Grafik mit der Veränderung der Lichtemissionen ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Einheit für die Lichtintensität ist nW/cm<sup>2</sup>/sr. Die einzelnen Grafiken der jeweiligen Punkte sind in Anhang 5 zu finden. Es ist ersichtlich, wie die Lichtemissionen in Visp stark zugenommen, in Interlaken und Brig dahingegen abgenommen haben. Punkte 4 und 5 stellen die Entwicklung im und unmittelbar um das Welterbe-Gebiet dar. Dort haben sich die Lichtemissionen in den untersuchten Jahren kaum bis gar nicht verändert.

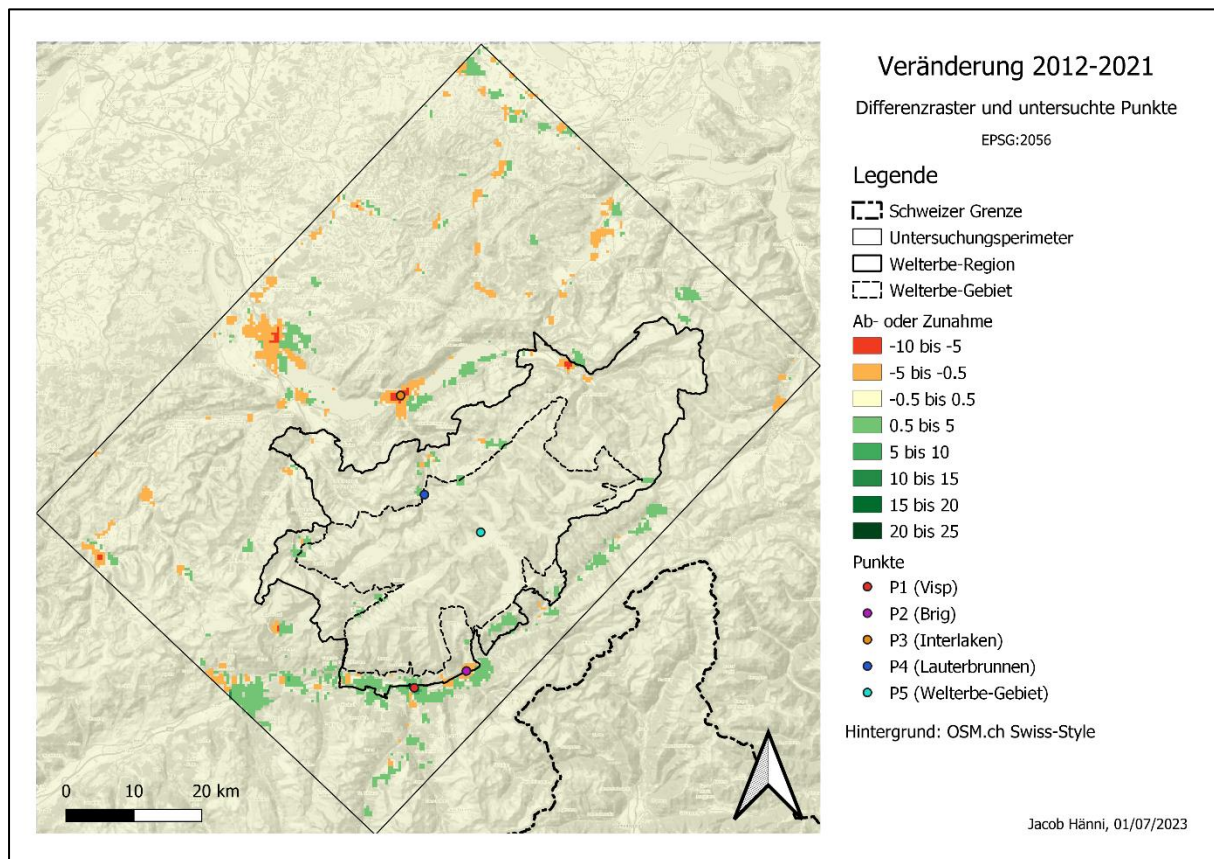


Abbildung 16 Differenzraster 21-12 mit Punkten (QGIS)

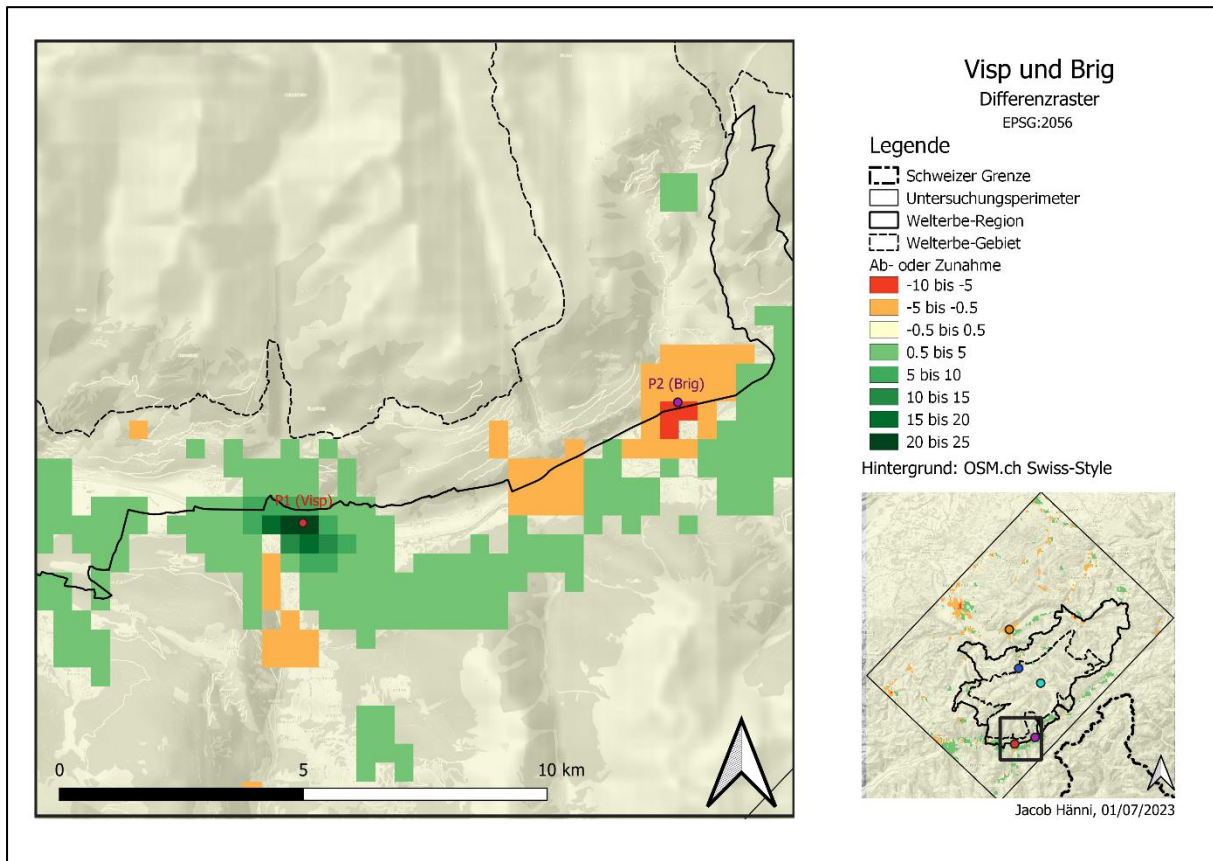


Abbildung 18 Differenzraster Visp und Brig (QGIS)

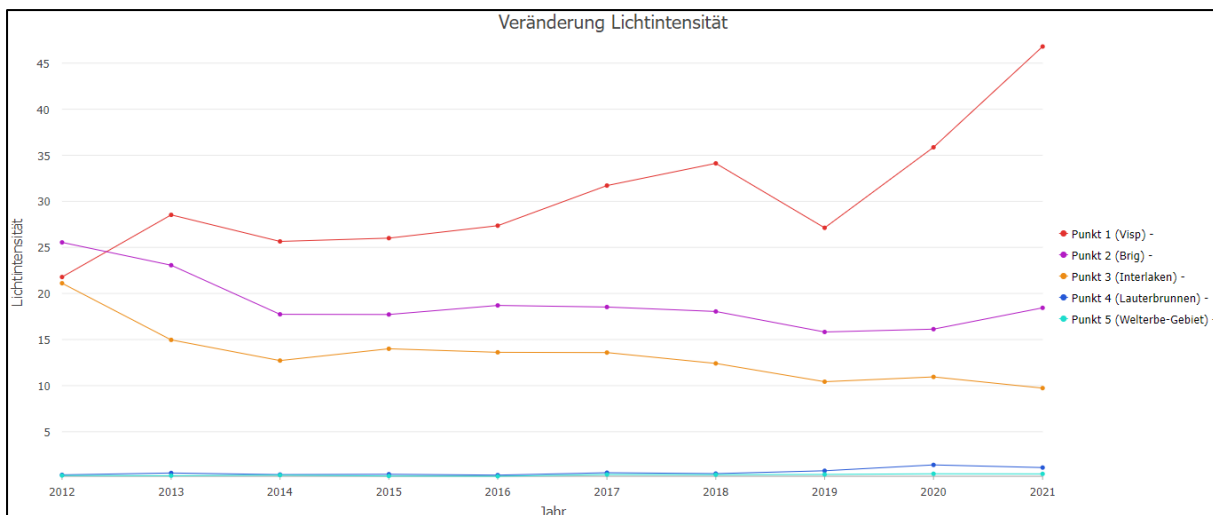


Abbildung 17 Veränderung Lichtintensität der Punkte (ArcGIS)

### 4.3. Gefährdungsabschätzung

Im Folgenden werden die Resultate der MKA dargestellt. Die Raster sind abgekürzt als LR für das Lichtemissionsraster, GR für das Gebäudedichteraster, (GR) für das umgekehrte Gebäudedichteraster und SR für das Schutzzonenraster. Abbildung 19 zeigt die Gefährdungsabschätzung mit einer gleichmässigen Gewichtung der drei Raster. Es fällt auf, dass beinahe der gesamte Untersuchungsperimeter als sehr schwach gefährdet eingestuft wird, mit Ausnahme des Welterbe-Gebiets, welches nur spärlich bedeckt ist. Die urbanen Gebiete sind auch deutlich auszumachen und enthalten die höchsten Werte, mit einer starken Gefährdung in den Zentren von Thun, Visp und Brig. Ein ähnliches Bild ergibt sich mit einer doppelten Gewichtung des Schutzzonenrasters, ersichtlich in Abbildung 20. Hier sticht jedoch der nördliche Bereich des Untersuchungsperimeters heraus, in welchem sich nach Betrachtung des Schutzzonenrasters in Anhang 4 auch eine hohe Anzahl an Schutzgebieten befindet.

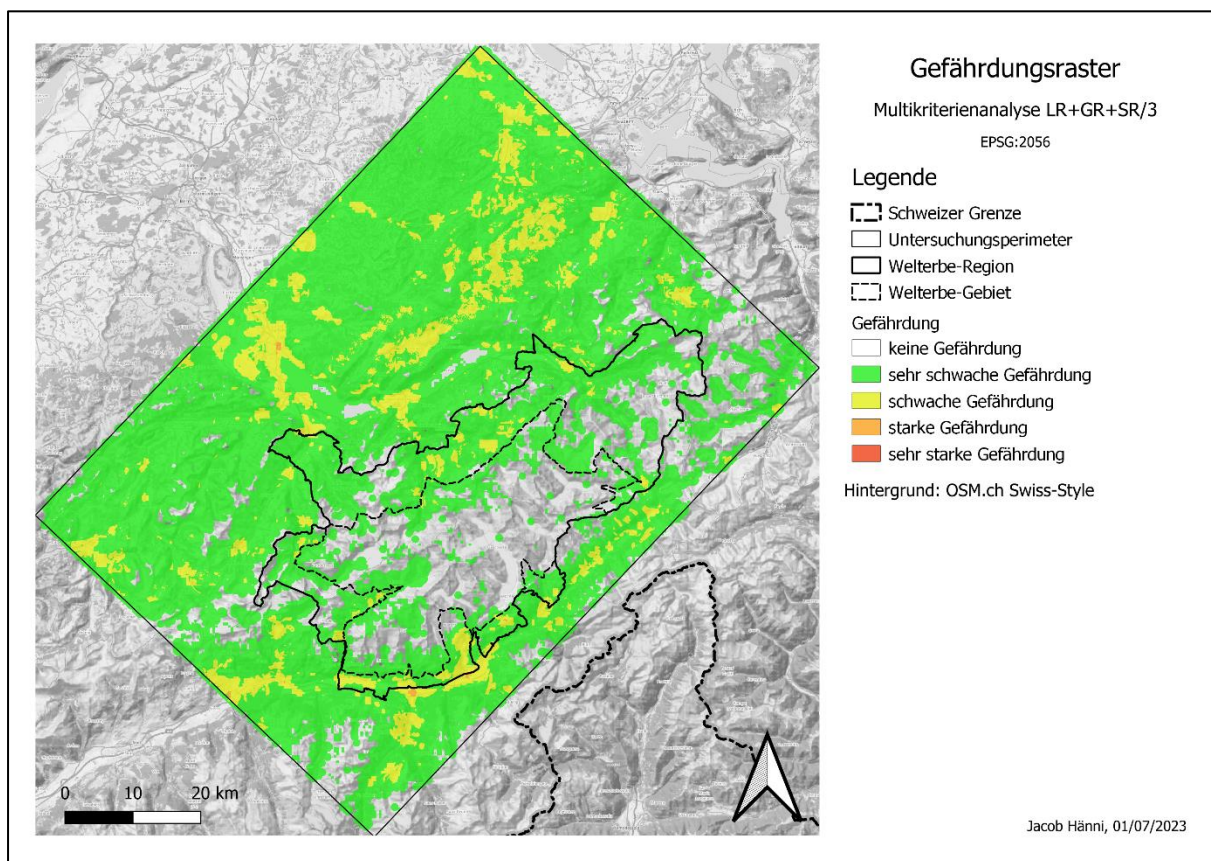


Abbildung 19 Gefährdungs raster LR+GR+SR/3 (QGIS)



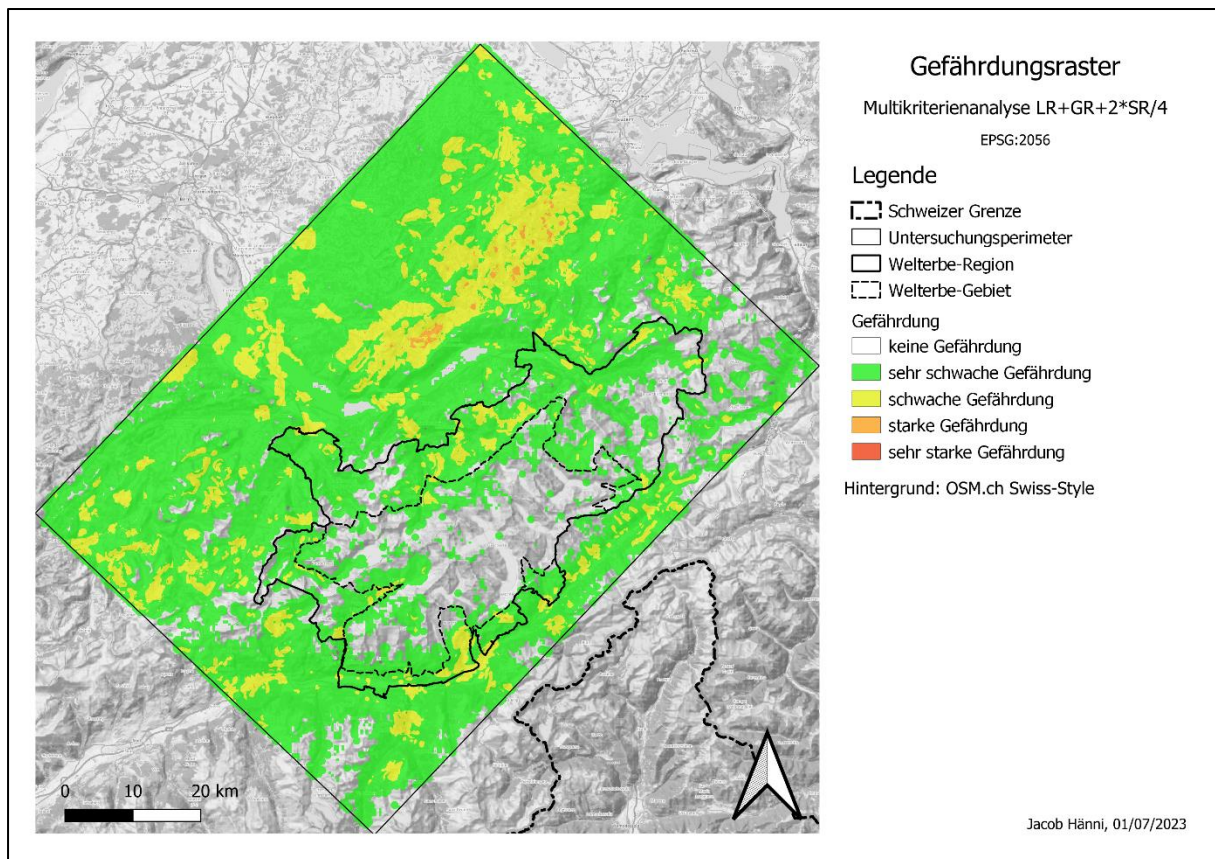


Abbildung 20 Gefährdungsraster LR+GR+2\*SR/4 (QGIS)

In Abbildung 21 ist das Gefährdungsraster mit dem umgekehrten Gebäuderaster und einer doppelten Gewichtung der Schutzzonen ersichtlich. Der Untersuchungsperimeter ist nicht mehr ausgefüllt mit Gefährdungszonen, auch konzentrieren sich diese nicht mehr auf die urbanen Gebiete. Mit dieser Berechnung befinden sich innerhalb des Welterbe-Gebiets einige schwach gefährdete Bereiche, welche sich vorwiegend in den Randgebieten befinden. Ein kleines Gebiet im Lauterbrunnental ist sogar stark gefährdet, vergrössert in Abbildung 22. In Abbildung 23 ist der südliche Bereich im Rhonetal auch detailliert abgebildet.

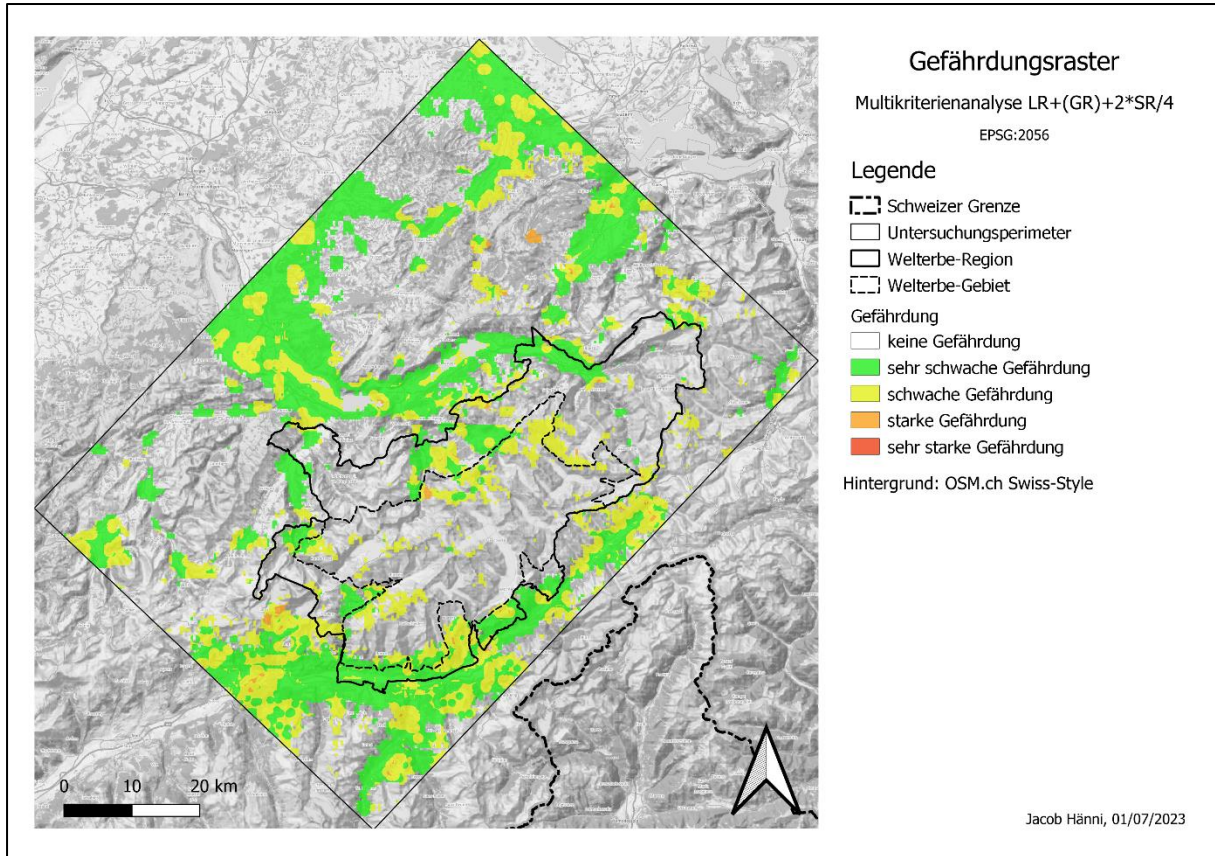


Abbildung 21 Gefährdungsraster LR+(GR)+2\*SR/4 (QGIS)

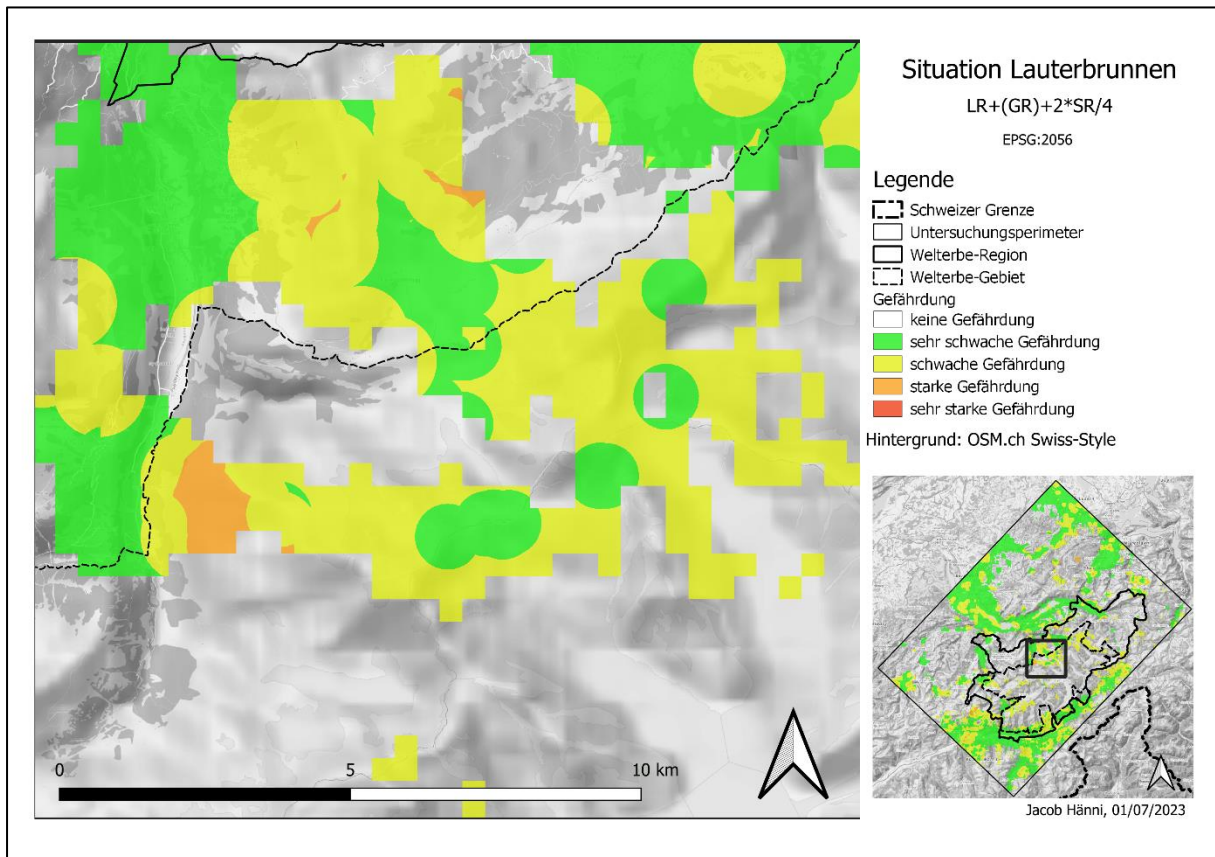


Abbildung 22 Gefährdungsraster LR+(GR)+2\*SR/4 Lauterbrunnen (QGIS)



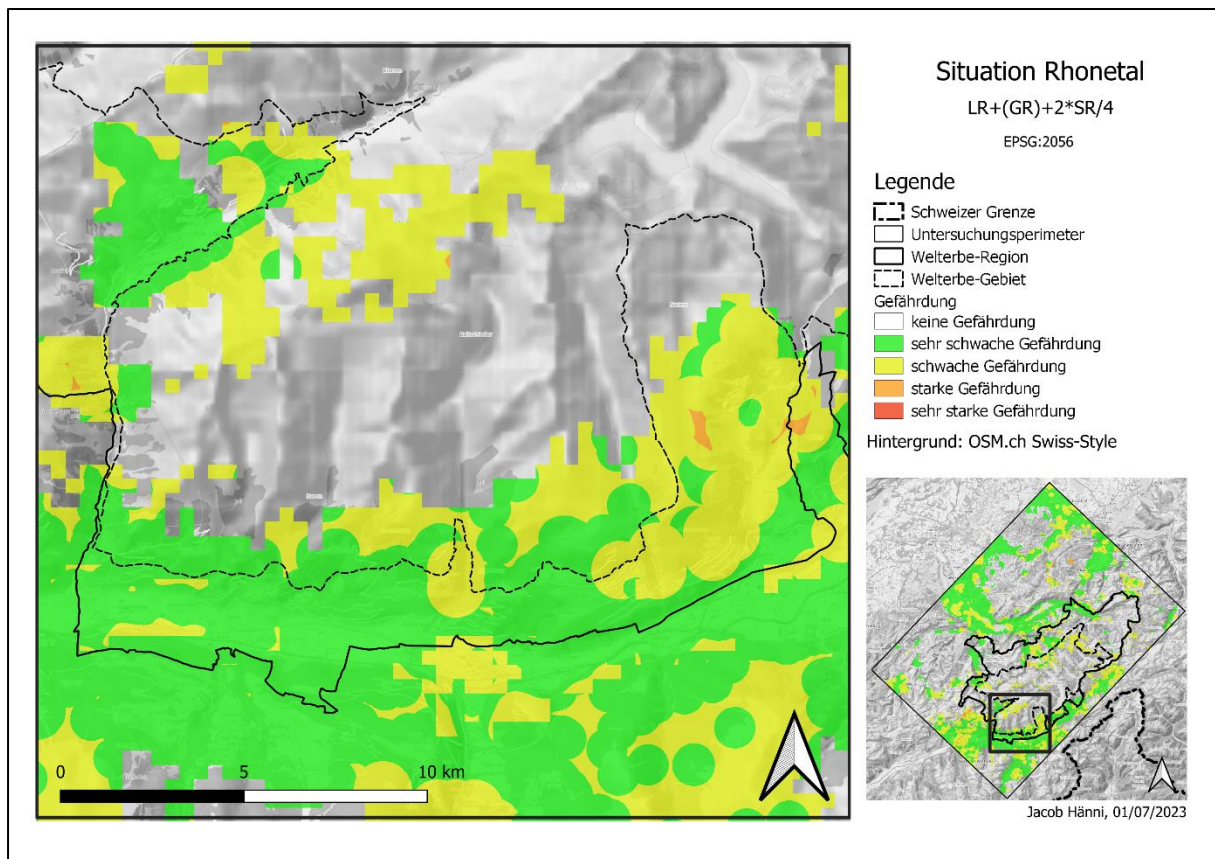


Abbildung 23 Gefährdungsraster LR+(GR)+2\*SR/4 Rhonetal (QGIS)

Für das Gefährdungsraster in Abbildung 24 wurden nur das Lichtemissionsraster und das Schutzzonenraster miteinander verrechnet. Es befinden sich deutlich weniger Gefährdungszonen im Untersuchungsperimeter als mit den vorangegangenen Berechnungen. Das Welterbe-Gebiet beinhaltet bis auf den vorher erwähnten Bereich im Lauterbrunnental auch keine gefährdeten Bereiche. In Anhang 6 sind noch weitere durchgeführte Berechnungen mit unterschiedlichen Gewichtungen zu finden. Abbildung 25 Abbildung 26 zeigen noch den Vergleich des Welterbe-Gebiets mit der UNESCO Biosphäre Entlebuch, welche mit den Gefährdungsraster in Abbildung 20 Abbildung 24 dargestellt sind. Innerhalb der Biosphäre Entlebuch sind deutlich mehr gefährdete Bereiche ersichtlich als im Welterbe-Gebiet.



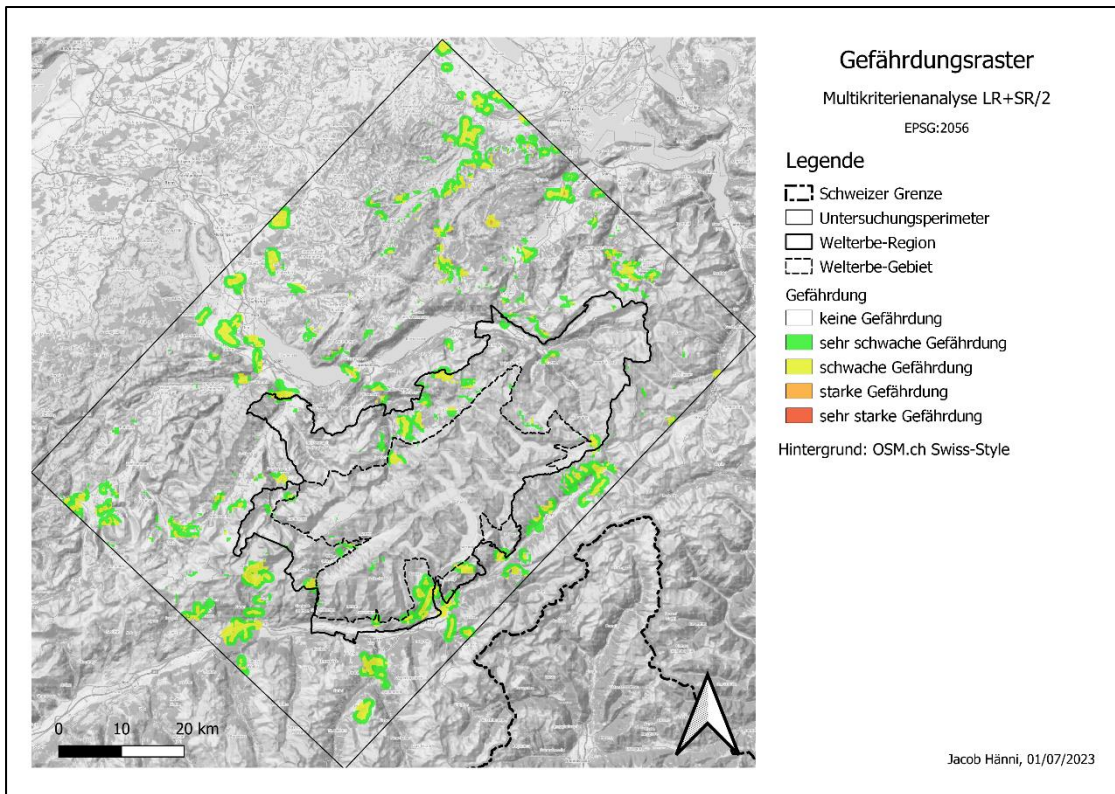


Abbildung 24 Gefährdungsraster LR+SR/2 (QGIS)

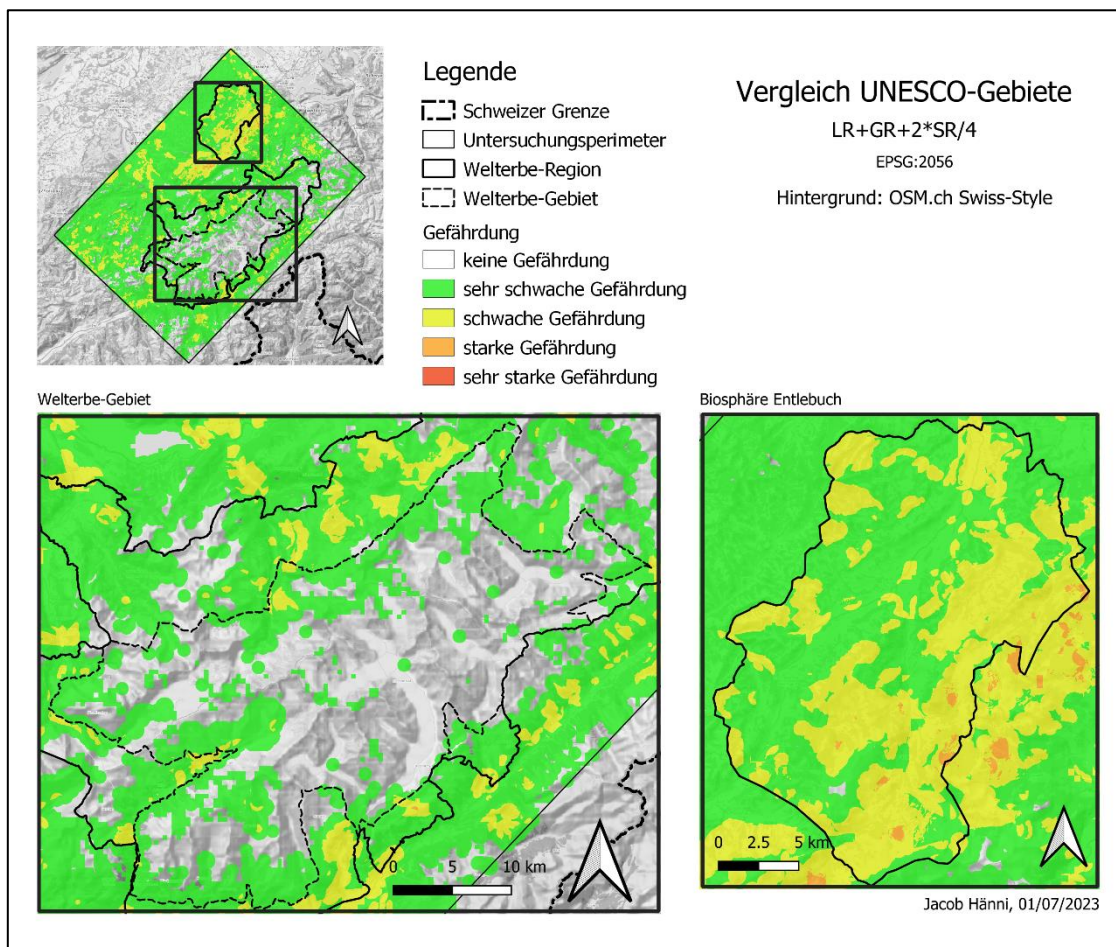


Abbildung 25 Vergleich des UNESCO-Welterbe-Gebiets und der UNESCO Biosphäre Entlebuch LR+GR+2\*SR/4 (QGIS)

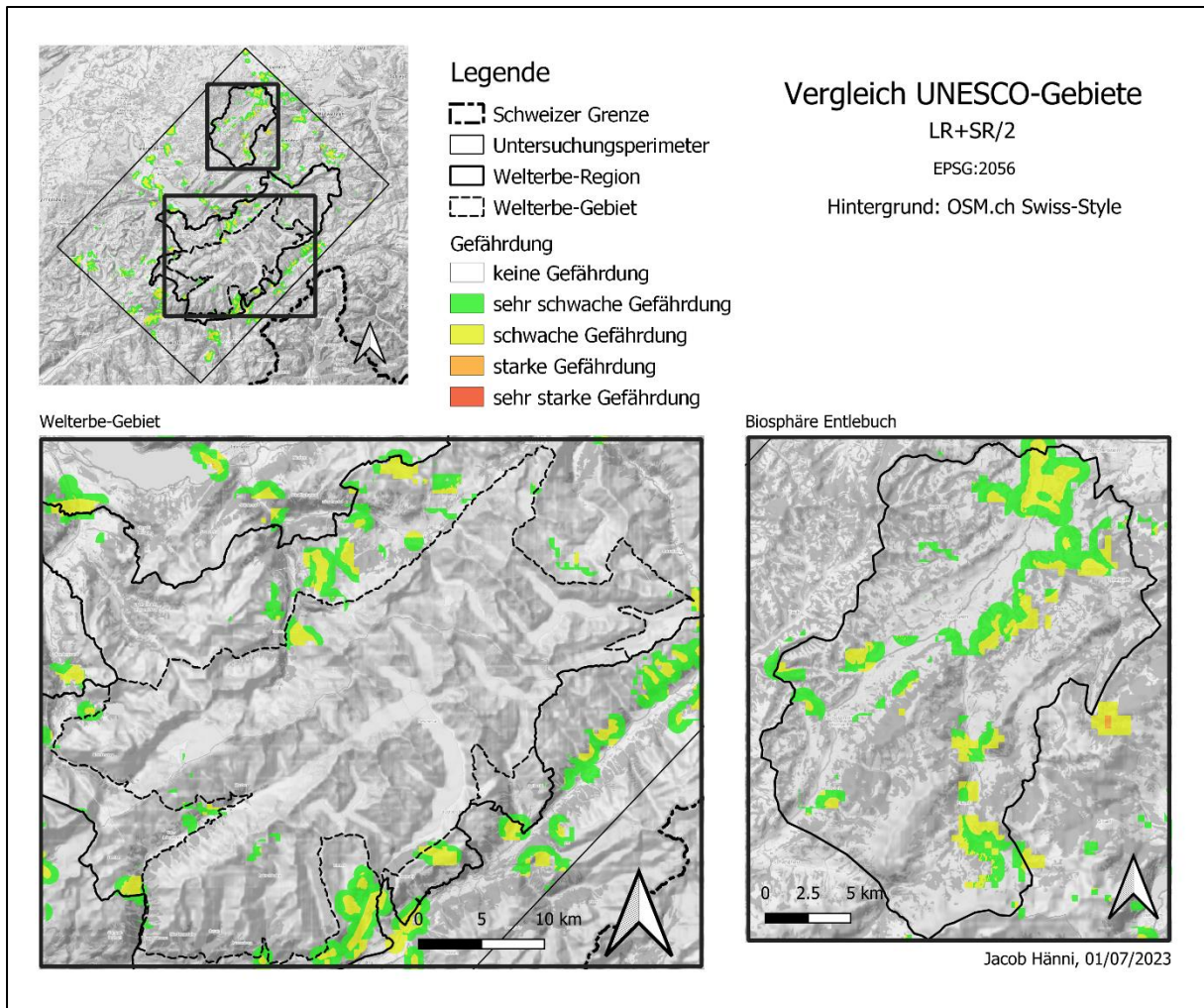


Abbildung 26 Vergleich des UNESCO-Welterbe-Gebiets und der UNESCO Biosphäre Entlebuch LR+SR/2 (QGIS)

## 5. Diskussion und Schlussfolgerung

### 5.1. Interpretation der Resultate

#### 5.1.1. Ist-Zustand und Trendanalyse

#### **Wie stark ist die UNESCO-Welterbe-Region durch Lichtverschmutzung betroffen?**

Die Raster in Abbildung 9 und Abbildung 11 zeigen auf, dass die Welterbe-Region im Vergleich mit den umliegenden Gebieten nur schwach von Lichtemissionen betroffen ist. Einzig die Klasse 1 ( $0.5-2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ ), welche in Abbildung 11 entfernt wurde, ist in der Welterbe-Region und sogar im Welterbe-Gebiet vertreten. Die Ursache dafür, besonders innerhalb des unbewohnten Welterbe-Gebiets, ist unbekannt und wird in den folgenden Abschnitten weiter diskutiert. Innerhalb der Welterbe-Region sind Flächen mit wenig ökologischen Auswirkungen zu finden, welche sich auf die Randgebiete des stärker besiedelten Talgrunds im Rhonetal und auf Tourismusdestinationen wie Grindelwald oder Lauterbrunnen konzentrieren. Besonders im Rhonetal könnten diese Lichtemissionen neben kleineren Siedlungen auch auf Streulicht aus dem Talgrund auf die sich am Hang befindlichen Flächen zurückzuführen sein.

#### **Welche Veränderungen sind in der UNESCO-Welterbe-Region festzustellen und welche sind in Zukunft zu erwarten?**

Wird die Veränderung der Lichtemissionen von 2012 bis 2021 betrachtet, fällt auf, dass sich besonders die Werte der Klasse 1 stark ausdehnen. Diese Ausdehnung wird noch stärker bei der Vorhersage für die Jahre 2022 bis 2025, bis es 2025 kaum noch Flächen gibt, die der Klasse 0 angehören. Dies lässt an der Zuverlässigkeit der Vorhersage zweifeln, wirft aber auch Fragen zu den verwendeten Rasterdaten auf, welche in Anhang 1 zu sehen sind: Weshalb dehnt sich die Klasse 1 ab 2017 bemerklich von den urbanen Gebieten aus, und tritt ab 2020 sogar in Gebieten auf, in welchen fast keine Infrastruktur vorhanden ist?

Eine mögliche Erklärung ist die Umstellung der Strassenbeleuchtung zu LED-Lampen, was eine weitere Streuung und mehr Lichtemissionen mit sich bringen könnte. Jedoch konnte nicht herausgefunden werden, wann diese Umstellung in der Schweiz stattgefunden hat oder ob sie immer noch am Laufen ist. Um dies genauer zu untersuchen, müssten die Lichtspektren anhand von Satellitendaten untersucht werden, wie dies beispielsweise Gaston & Sánchez De Miguel (2022) in ihrer Studie gemacht haben. Die Werte der Klasse 1 innerhalb des Welterbe-Gebiets ab dem Jahr 2020 könnten zurückzuführen sein auf Reflektionen von artifiziellen oder natürlichen Lichtquellen auf Schneeflächen (Wang et al., 2021). Dabei ist jedoch unklar, weshalb die Daten vor 2020 nicht davon betroffen sind. Es sind weitere Untersuchungen notwendig, um definitive Aussagen über die Ursache der Ausbreitung dieser tiefen Lichtemissionswerte zu machen und ob sich diese in Zukunft weiter ausbreiten.



Bei der Betrachtung der Veränderung der ökologischen Auswirkungen scheinen sich die Lichtemissionswerte über die zehn Jahre nicht verstärkt zu haben. Die Auswirkungen sind in den Städten Thun, Interlaken und Brig sogar zurückgegangen, was auch im Differenzraster deutlich ersichtlich ist. Gemäss Falchi et al. (2016) liegt dies daran, dass der VIIRS DNB Sensor eine mangelnde Empfindlichkeit für Wellenlängen unter 500 nm hat und somit den Peak des Blaulicht-Anteils von weissen LED-Beleuchtungen nicht erfasst. Besonders in urbanen Gebieten, wo in den letzten Jahren ein Wechsel zu LEDs stattgefunden hat, kommt also mit diesen Daten die Illusion auf, dass die Lichtemissionen abgenommen haben. In Wirklichkeit könnten sich diese jedoch deutlich verstärkt haben. In der Stadt Thun wurden bereits erste Massnahmen gegen Lichtemissionen implementiert. Als Teil der Kampagne (<http://lichtaus.ch/>) wird insbesondere gewerbliches Licht im Stadtzentrum in der Nacht versucht zu vermeiden. Mit den fehlenden Informationen der LED-Beleuchtung ist es aber schwierig, diese Implementationen festzustellen.

Im Gegensatz dazu sind in Visp die grössten Zunahmen im gesamten Untersuchungsperimeter zu sehen, ersichtlich in Abbildung 18. Diese durch Punkt 1 dargestellten Zunahmen sind auf den Ausbau der Lonza zurückzuführen, und sollten im Auge behalten werden, da mögliche Auswirkungen durch Streulicht auf Flächen innerhalb der Welterbe-Region nicht auszuschliessen sind. Generell sind im gesamten Talgrund leichte Zunahmen wahrzunehmen. Dies ist auf einen starken Ausbau der Infrastruktur zurückzuführen, konkret könnte auch der Bau der Autobahn eine Rolle spielen. Fährt der Ausbau der Lonza und der Infrastruktur so fort, muss in den kommenden Jahren auch mit einer Verstärkung der Lichtemissionen gerechnet werden.

#### 5.1.2. Gefährdungsabschätzung

##### **Wie können durch Lichtemissionen gefährdete Standorte dargestellt werden und gibt es solche Standorte im Welterbe-Gebiet?**

Bei der Betrachtung der verschiedenen Berechnungen fällt auf, dass die urbanen Gebiete wie Thun oder Interlaken nördlich und Sierre, Visp und Brig südlich der Welterbe-Region immer als mindestens sehr schwach gefährdet klassifiziert wurden. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die Lichtemissionen, welche in jeder Berechnung angewendet wurden, in diesen Gebieten auch am höchsten sind. Innerhalb der Welterbe-Region fallen besonders touristische Gebiete auf, wie beispielsweise die Gemeinden Grindelwald und Lauterbrunnen im nördlichen Bereich oder Kandersteg im Westen. Auch die Bereiche im Walliser Rhonetal um Visp und Brig weisen höhere Werte auf, wie auch die Tourismusdestinationen Riederalp und Belalp. Das Welterbe-Gebiet ist in den meisten Berechnungen wenig bis gar nicht gefährdet. Ausnahmen befinden sich in den Randgebieten, beispielsweise der südliche Bereich im Rhonetal oder der Bereich im Lauterbrunnental.

Das Gebiet im Rhonetal in Abbildung 23 befindet sich an der Lötschberg-Südrampe und beinhaltet einige kleinere Siedlungen, wie beispielsweise Ausserberg, welche die erhöhten Werte erklären können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass das Gebiet durch Lichtemissionen der erhöhten Infrastruktur im Talgrund um Visp und Brig betroffen ist. Im Lötschentäl im oberen Bereich der Abbildung scheint eine ähnliche Problematik vorzuliegen. Die Situation im Lauterbrunnental in Abbildung 22 weist einige Parallelen auf, mit der angewandten Berechnung ist hier jedoch ein Bereich sogar stark gefährdet. Nach Untersuchung der Schutzzonen konnte festgestellt werden, dass sich dort die Wildruhezone «Schwarzmonch» befindet, in welcher potenzielle Einwirkungen durch Lichtemission zu erwarten sind. In beiden Beispielen befinden sich innerhalb des Welterbe-Gebiets ausschliesslich Lichtemissionswerte der Klasse 1 ( $0.5-2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$ ). Da laut Hale et al. (2018) erst ab  $2 \text{ nW/cm}^2/\text{sr}$  bzw. der Klasse 2 ökologischen Auswirkungen erwartet werden, ist dies auf den ersten Blick nicht besorgniserregend. In unmittelbarer Nähe befinden sich jedoch Bereiche der Klasse 2 ausserhalb des Welterbe-Gebiets. Wie gross deren Auswirkungen auf die Bereiche innerhalb des Gebiets sein können, ist schwierig zu beurteilen. Aus diesem Grund sollten diese Bereiche weiter beobachtet werden, wenn möglich unterstützt durch lokale Messgeräte. Mit der unvollständigen Erfassung von LEDs fehlt ausserdem ein grosser Teil der modernen Beleuchtung, welcher gemäss Widmer et al. (2022) verstärkte ökologische Auswirkungen mit sich bringen könnte.

Im Managementplan 2030 werden Lichtemissionen nicht explizit erwähnt, können jedoch einigen der übergeordneten Ziele zugewiesen werden. Die Erhaltung eines ungestörten Nachthimmels fällt beispielsweise unter Ziel 1, die Bewahrung von Schönheit, Vielfalt und Eigenart. Für das 2. Ziel, der Erhalt und die Förderung von natürlichen Lebensgemeinschaften, müssen anthropogene Einflüsse so gut wie möglich eingeschränkt werden, darunter auch Lichtemissionen. Die Gebiete innerhalb der Welterbe-Region aber ausserhalb des Welterbe-Gebiets scheinen deutlich stärker betroffen zu sein. Dies liegt an einer räumlichen Differenzierung der übergeordneten Ziele. Die ökologischen Ziele haben, auch durch den Schutzstatus im BLN, einen besonders hohen Stellenwert innerhalb des Welterbe-Gebiets, während in der Welterbe-Region eher die Ziele zur nachhaltigen Bewirtschaftung und Entwicklung priorisiert werden (Managementzentrum UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch, 2020).

Die UNESCO Biosphäre Entlebuch, welche sich im Norden des Untersuchungsperimeters befindet, weist im Vergleich zum Welterbe-Gebiet nach den Berechnungen deutlich mehr untersuchungsbedürftige Bereiche auf. Dieser Unterschied ist zurückzuführen auf die deutlich höhere Siedlungsdichte in der Biosphäre Entlebuch (siehe Anhang 4 Gebäudedichteraster). Der Vergleich soll keineswegs abwertend gegen die Biosphäre wirken, im Gegenteil zeigt

dieser noch einmal auf, wie gering die Gefährdung des Welterbe-Gebiets durch Lichtemissionen ist und wie stark diese abhängig ist von der Siedlungsdichte.

### **Welche Massnahmen können in betroffenen Gebieten getroffen werden?**

In den Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen des BAFU (2021) wird erwähnt, dass Massnahmen vorwiegend an der Quelle getätigt werden sollten. Da diese mit der Methode in dieser Arbeit schwierig zu erfassen sind, sind weitere Untersuchungen und Messungen notwendig. In grösseren Orten wie auch in den erwähnten Tourismusgebieten ist die Abstellung von Lichtquellen, die durch die Nacht nicht benötigt werden, zu empfehlen. Auch grössere Industriebetriebe wie die Lonza könnten mit einer Reduktion der Lichtemissionen neben den Betriebszeiten stark zu einer Verbesserung beitragen. Die von Schönberger (2021) erwähnten Amber-LEDs, welche weniger negative Auswirkungen auf Mensch und Tier haben, scheinen auch eine interessante Lösung zu sein. Auch Hale et al. (2018) propagieren die Verwendung dieser Beleuchtungen, betonen jedoch auch, dass diese genauer untersucht werden müssen, bevor eine breite Anwendung möglich ist.

## **5.2. Diskussion der Methoden**

### **Wie nützlich sind GIS- und Remote Sensing Anwendungen bei Lichtemissionen und wo befinden sich Schwachstellen?**

#### **5.2.1. Ist-Zustand und Trendanalyse**

Dadurch, dass bereits in den Rastern der Lichtemissionen von 2012 bis 2021 kleinere Unstimmigkeiten festzustellen sind, sind die Resultate der Vorhersagen in ArcGIS kritisch zu betrachten. Gemäss Elvidge et al. (2020) gab es im Jahr 2017 einen Wechsel, wie die Lichtdaten von Suomi-NPP an Bord des Satelliten kalibriert wurden. Fortan konnten auch tiefere Lichtemissionswerte aufgenommen werden, was zu den leichten Veränderungen führte. In Anbetracht dieser Information wird für eine mögliche weitere Untersuchung solcher Daten vorgeschlagen, mit den Black Marble-Daten zu arbeiten, welche aneinander angepasst sind und unter anderem auch von Schneereflektionen bereinigt wurde. Eine grosse Limitation der verwendeten VIIRS-Daten, die auch den Black Marble-Daten als Grundlage dienen, ist die vorgängig erwähnte fehlende Sensitivität für den Blaulichtanteil von weissen LEDs. Laut Cao und Bai (2014) werden rund 34 % der Strahlungsleistung von LEDs damit nicht erfasst. Da diese Lichter ein wichtiger Teil der modernen Beleuchtung sind, muss diese Schwachstelle für weitere Studien dringend berücksichtigt und adressiert werden. Román et al. (2018) erwähnen als mögliche Lösung für dieses Problem eine Verschiebung der relativen spektralen Hellempfindlichkeit in den blauen Bereich des Farbspektrums, was jedoch wiederum zu weiteren Verunreinigungen der Aufnahmen führen kann.

Eine Erstellung von Vorhersagen könnte verbessert werden, indem zusätzliche Daten beigezogen werden. Da Lichtemissionen abhängig sind von der Siedlungsdichte, könnten Daten zum Ausbau der Infrastruktur in den gleichen Jahren die zukünftige Veränderung präzisieren. Mit der Verwendung von Raumplanungskarten könnte zusätzlich eine Übersicht über potenziell bebaubare Gebiete geschaffen werden. Generell sind jedoch solche Vorhersagen mit Rasterdaten schwierig, da jeder Pixel einzeln berechnet werden muss. Die Analyse mit Betrachtung von einzelnen interessanten Punkten oder der Erstellung eines Differenzrasters ist um einiges sinnvoller. Allenfalls sollten hierzu auch noch DMSP-OLS Aufnahmen hinzugezogen werden, um die Veränderung über einen längeren Zeitraum festzustellen. Diese unterscheiden sich jedoch stark von den VIIRS-Daten und könnten nur mit einer Kreuzkalibrierung verwendet werden. Des Weiteren wäre eine zusätzliche Untersuchung der saisonalen Veränderung interessant. Somit könnten Aussagen über den Einfluss des Tourismus getroffen werden, welcher in gewissen Bereichen des Untersuchungsperimeters stark ausgeprägt ist.

#### 5.2.2. Gefährdungsabschätzung

Mit den Resultaten der MKA definitive Aussagen zu treffen ist schwierig, da einige Unsicherheiten in Bezug auf die verwendeten Daten, deren Gewichtungen und Berechnungen vorhanden sind. Die Lichtemissionsdaten, welche den Durchschnitt des Jahres 2021 darstellen, konnten sinnvoll und durch Literatur gestützt klassifiziert werden. Bei den Daten der Schutzzonen war dies weniger der Fall. Da die Schutzgebiete nur bestimmte prioritäre Lebensräume darstellen, welche nicht unbedingt mit den effektiven Habitaten übereinstimmen, werden bestimmte Tiergruppen wie beispielsweise Vögel, Fledermäuse oder Insekten fast gar nicht berücksichtigt in dieser Analyse. Möglicherweise könnten die Schutzzonen kombiniert werden mit verschiedenen Biotoptypen wie Wald, Gewässer, Offenland, etc. und dann gestützt auf Untersuchungen zur Lichtempfindlichkeit der Arten in den jeweiligen Biotopen diese zu klassifizieren. Eine zusätzliche Verwendung von Fledermausquartieren oder ornithologisch wertvollen Gebieten wie bei Bieri (2019) ist auch sinnvoll, falls diese vorhanden sind.

Auch bei den Gebäudedaten hätten weitere Aspekte miteinbezogen werden können. Beispielsweise hätte mit Einbezug von Strassen- bzw. Strassenbeleuchtungsdaten der Umfang der Infrastruktur besser abgedeckt werden können. Da die Gebäudedichten generell mit den Lichtemissionsdaten übereinstimmen, wurde im Verlauf der Arbeit hinterfragt, ob sie überhaupt notwendig sind für diese Analyse. Mit der Umkehrung der Klassifikation konnten sie dennoch gewinnbringend eingesetzt werden, um Gebiete mit einer tiefen Siedlungsdichte aber hohen Lichtemissionen hervorzuheben. Die Unsicherheit bezüglich weissen LEDs könnte besonders in urbanen Gebieten mit einem Korrekturfaktor ausgeglichen werden. Es ist bekannt, dass ungefähr 34 % der Strahlungsleistung nicht erfasst wird (Cao & Bai, 2014). Wo

der Wechsel zu LEDs wie weit fortgeschritten ist, ist jedoch unbekannt, womit eine Unsicherheit bestehen bleibt.

Die Berechnungen mit der normal klassifizierten Gebäudedichte, sichtbar in Abbildung 19/Abbildung 20, scheinen fast zu viele ökologisch gefährdete Flächen aufzuweisen, zusätzlich konzentrieren sich diese vorwiegend auf urbane Gebiete. Dort können auch Lebensräume durch Lichtemissionen beeinträchtigt sein, jedoch sollen mit dieser Untersuchung auch Flächen ausserhalb der Siedlungsgebiete, welche potenziell gefährdet sind, erfasst werden. Das Gefährdungsraster in Abbildung 21 mit der umgekehrten Gebäudedichte scheint dies etwas besser zu erfassen. Auch werden mit der doppelten Gewichtung die Schutzzonen stärker hervorgehoben. In den erwähnten Abbildungen und in den weiteren Berechnungen in Anhang 6 ist ersichtlich, dass die Gefährdungszonen je nach Gewichtung und Verwendung der Inputraster stark abweichen. Um eine weitreichende Verwendung dieses Modells zu ermöglichen, müssten die Gefährdungsraster mit lokalen Messungen abgeglichen werden. Die Berechnung ohne das Gebäuderaster in Abbildung 24 hat deutlich weniger gefährdete Flächen als die anderen Gefährdungsraster, was für eine erste Priorisierung der untersuchungsbedürftigen Flächen ein Vorteil sein könnte. Eine mögliche Optimierung der Gefährdungsabschätzung wäre ausserdem die Verwendung des Auswirkungsrasters in Abbildung 11, um die tieferen und weniger gefährlichen Lichtemissionen von der Berechnung auszuschliessen.

In Bezug auf die ökologischen Auswirkungen muss berücksichtigt werden, dass mittels Satellitendaten nur die nach oben gerichtete Lichtstrahlung untersucht werden kann. Direkte Immissionen oder auch punktuelle, wie z.B. Autoscheinwerfer, können nicht festgestellt werden. Auch ist unbekannt, wie stark in den Himmel gerichtete Lichtemissionen mit ökologischen Immissionen korrelieren. Grundsätzlich eignet sich diese Methode gut, um erste Abschätzungen im untersuchten Gebiet zu machen. Um präzisere Schlüsse zu ziehen, müssten im weiteren Verlauf jedoch lokale Messungen vorgenommen werden, um die Quellen und das Ausmass der Lichtverschmutzung festzustellen. Anhand von diesen Informationen kann dann auch eruiert werden, ob und welche Massnahmen vollzogen werden. Zusätzlich können solche Messungen zur Optimierung dieser Gefährdungsabschätzung beitragen.



### 5.3. Schlussfolgerung

In dieser Arbeit wurde versucht, anhand von Nachtsatellitendaten das Ausmass der Lichtverschmutzung innerhalb des UNESCO-Welterbes Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch festzustellen. Dazu wurden Datensätze aufgenommen vom Satelliten Suomi NPP verwendet, welche die durchschnittlichen Lichtemissionswerte der Jahre 2012 bis 2021 darstellen. Die Daten des Jahres 2021 wurden mit verschiedenen Klassifikationen dargestellt, um den aktuellen Stand der Lichtverschmutzung in und um die Welterbe-Region zu eruieren. Zusätzlich wurden die Daten in Esri ArcGIS Pro als multidimensionale Zeitreihe zusammengefügt, um einerseits die zeitliche Veränderung über die zehn Jahre festzustellen und andererseits eine Vorhersage zu machen, wie sich die Lichtemissionen in Zukunft weiterentwickeln könnten. In QGIS wurde das Raster des Jahres 2021 mit Daten von Schutzzonen und Gebäuden in einer Multikriterienanalyse verrechnet, um eine Gefährdungsabschätzung zu tätigen.

Anhand der Daten von 2021 ist ersichtlich, dass das Welterbe-Gebiet wenig bis gar nicht von Lichtemissionen betroffen ist. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass diese sehr stark von der Infrastruktur abhängig sind, welche innerhalb des Welterbe-Gebiets nur sehr spärlich vorhanden ist. Die Trendanalyse hat ergeben, dass die Lichtemissionen in urbanen Gebieten wie Thun, Interlaken und Brig in den untersuchten Jahren abgenommen haben. Dies ist auf eine mangelnde Empfindlichkeit des Sensors auf blaues Licht zurückzuführen. So werden 34 % der Strahlungsleistung von weissen LED-Beleuchtungen nicht erfasst, welche in den letzten Jahren vor allem im städtischen Raum herkömmliche Beleuchtungen abgelöst haben. Deutliche Zunahmen konnten am Standort der Lonza bei Visp festgestellt werden, welche in den vergangenen Jahren fortlaufend ausgebaut wurde. Auch sonst sind im Talgrund des Rhonetals kleinere Zunahmen ersichtlich, welche mit dem Bau der Autobahn erklärt werden könnte. Innerhalb des Welterbe-Gebiets sind keine grösseren Veränderungen festzustellen, und auch bei der Betrachtung der Lichtemissionswerte mit potenziellen ökologischen Auswirkungen können im untersuchten Gebiet keine besorgniserregenden Veränderungen ausgemacht werden.

Mit den verschiedenen Berechnungen der Gefährdungsabschätzung sind im Welterbe-Gebiet nur vereinzelte gefährdete Standorte festgestellt worden. Diese sind vorwiegend in den Randgebieten zu finden, in welchen sich unmittelbar ausserhalb des Gebiets Siedlungen befinden. Dabei sollte besonders das Gebiet an der Lötschberg-Südrampe um Ausserberg sowie die Wildruhezone «Schwarzmonch» im Lauterbrunnental weiter beobachtet werden. In einem Vergleich mit der nördlich liegenden UNESCO Biosphäre Entlebuch hat sich gezeigt, dass diese mehr untersuchungsbedürftige Standorte beinhaltet als das Welterbe-Gebiet, was auf eine erhöhte Siedlungsdichte zurückzuführen ist. Gefährdete Standorte sollten weiter

untersucht werden, wenn möglich unterstützt durch lokale Messungen. So kann die Quelle der Immissionen herausgefunden werden und bestimmt werden, ob und welche Massnahmen notwendig sind.

Die Trendanalyse in ArcGIS hat sich gut geeignet, um punktuelle Veränderungen der Rasterdaten festzustellen. Um jedoch eine verlässliche Vorhersage zu tätigen, müssten mehr Daten oder weitere Aspekte wie bebaubare Gebiete berücksichtigt werden. Die verwendeten Satellitendaten weisen ausserdem kleinere Unterschiede und Unstimmigkeiten auf, was auf Schneereflektionen und eine Veränderung der Kalibration zurückzuführen sein könnte. Der fehlende Blau-Anteil von weissen LEDs, welche zu verstärkten ökologischen Auswirkungen führen könnte, ist eine grosse Limitation der Daten und dieser Arbeit, welche in einer weiteren Arbeit adressiert werden muss. Auch wird die Verwendung der NASA Black Marble-Daten empfohlen, da diese besser korrigiert und aneinander angepasst sind. Bei der Gefährdungsabschätzung könnten die Daten der Schutzzonen und Gebäude weiter optimiert werden. Beispielsweise könnten weitere Biotope hinzugefügt werden, welche anhand der Lichtempfindlichkeit der darin enthaltenen Tiergruppen klassifiziert werden, oder der Gebäudedatensatz könnte mit Strassen- oder Strassenbeleuchtungsdaten ergänzt werden. Die vorgestellte Methode müsste ausserdem mit lokalen Messungen verifiziert werden.

Grundsätzlich eignen sich Nachtsatellitendaten sehr gut, um die Lichtverschmutzung zu analysieren. Gerade für die Untersuchung der ökologischen Auswirkungen ist jedoch unklar, wie gut die nach oben gerichtete aufgenommene Strahlung mit direkten oder indirekten Immissionen korreliert. Zusätzlich können punktuelle Emissionen, wie beispielsweise durch Autoscheinwerfer, kaum erfasst werden und es bestehen Unsicherheiten in Bezug auf weisse LEDs. Die Satellitendaten sind nützlich, um einen ersten groben Überblick zu erhalten und mögliche Risikogebiete festzustellen. In diesen müssten im weiteren Verlauf zusätzliche Aufnahmen gemacht werden, bis konkrete Aussagen getroffen werden können. Für eine zeitliche Untersuchung sind diese Daten optimal und könnten auch für saisonale Veränderungen angewendet werden. Interessant wäre auch eine Untersuchung der DMSP-OLS-Daten, um die Veränderungen von 1992 bis 2012 festzustellen.

## 6. Literaturverzeichnis

- Aubrecht, C., Stojan-Dolar, M., de Sherbinin, A., Jaiteh, M. S., Longcore, T., & Elvidge, C. D. (2010). *Lighting governance for protected areas and beyond – Identifying the urgent need for sustainable management of artificial light at night* (NASA Earthzine).  
<https://earthzine.org/lighting-governance-for-protected-areas-and-beyond-identifying-the-urgent-need-for-sustainable-management-of-artificial-light-at-night/>
- BAFU. (2021). *Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen. 1. Aktualisierte Auflage 2021. Erstausgabe 2005* (Umwelt-Vollzug Nr. 2117; p. 169). Bundesamt für Umwelt.
- Bennie, J., Davies, T. W., Duffy, J. P., Inger, R., & Gaston, K. J. (2014). Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights. *Scientific Reports*, 4(1), 3789. <https://doi.org/10.1038/srep03789>
- Bieri, Y. (2019). Künstliche Lichtemissionen im Jurapark Aargau [Application/pdf].  
*Bachelorarbeit*, 62 p. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000370212>
- BUWAL. (1999). *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Methode* (Nr. 107/I; Umwelt-Materialien). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.  
[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/risikoanalyse\\_beigravitativennaturgefahrenband1methode.pdf.download.pdf/risikoanalyse\\_beigravitativennaturgefahrenband1methode.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/risikoanalyse_beigravitativennaturgefahrenband1methode.pdf.download.pdf/risikoanalyse_beigravitativennaturgefahrenband1methode.pdf)
- Cao, C., & Bai, Y. (2014). Quantitative Analysis of VIIRS DNB Nightlight Point Source for Light Power Estimation and Stability Monitoring. *Remote Sensing*, 6(12), 11915–11935. <https://doi.org/10.3390/rs61211915>
- Duffy, J. P., Bennie, J., Durán, A. P., & Gaston, K. J. (2015). Mammalian ranges are experiencing erosion of natural darkness. *Scientific Reports*, 5(1), 12042.  
<https://doi.org/10.1038/srep12042>
- Eastman, J. R. (1999). Multi-criteria evaluation and GIS. In P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, & D. W. Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems* (pp. 493–502). John Wiley and Sons.

- Elvidge, C. D., Hsu, F.-C., Zhizhin, M., Ghosh, T., Taneja, J., & Bazilian, M. (2020). Indicators of Electric Power Instability from Satellite Observed Nighttime Lights. *Remote Sensing*, 12(19), 3194. <https://doi.org/10.3390/rs12193194>
- Elvidge, C. D., Ziskin, D., Baugh, K., Tuttle, B., Ghosh, T., Pack, D., Erwin, E., & Zhizhin, M. (2009). A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data. *Energies*, 2(3), 595–622. <https://doi.org/10.3390/en20300595>
- EOG. (2021a). *DMSP Nighttime Lights*. Besucht am 06.06.2023 auf: [https://eogdata.mines.edu/products/dmsp/#rad\\_cal](https://eogdata.mines.edu/products/dmsp/#rad_cal)
- EOG. (2021b). *VIIRS Nighttime Lights*. Besucht am 06.06.2023 auf: <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>
- Esri. (n.d.). *Multidimensionale Raster-Daten*. ArcGIS Pro Dokumentation. Retrieved June 12, 2023, from Besucht am 08.06.2023 auf: <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/help/data/imagery/an-overview-of-multidimensional-raster-data.htm>
- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600377>
- Flükiger, L. (2018). Zonendefinition für Nachtdunkelheit des Sterneparks Gantrisch. *Bachelorarbeit*.
- Gaston, K. J., & Sánchez De Miguel, A. (2022). Environmental Impacts of Artificial Light at Night. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 373–398. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112420-014438>
- Hale, J., Blumenstein, C., Carannante, D., & Arlettaz, R. (2018). *Ecological light pollution in the Naturpark Gantrisch* (Technical report V3).
- Han, P., Huang, J., Li, R., Wang, L., Hu, Y., Wang, J., & Huang, W. (2014). Monitoring Trends in Light Pollution in China Based on Nighttime Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 6(6), 5541–5558. <https://doi.org/10.3390/rs6065541>

- Huang, Q., Yang, X., Gao, B., Yang, Y., & Zhao, Y. (2014). Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images: A Meta-Analysis and a Systematic Literature Review. *Remote Sensing*, 6(8), 6844–6866. <https://doi.org/10.3390/rs6086844>
- Jiang, W., He, G., Leng, W., Long, T., Wang, G., Liu, H., Peng, Y., Yin, R., & Guo, H. (2018). Characterizing Light Pollution Trends across Protected Areas in China Using Nighttime Light Remote Sensing Data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), 243. <https://doi.org/10.3390/ijgi7070243>
- Jiang, W., He, G., Long, T., Wang, C., Ni, Y., & Ma, R. (2017). Assessing Light Pollution in China Based on Nighttime Light Imagery. *Remote Sensing*, 9(2), 135. <https://doi.org/10.3390/rs9020135>
- Krebs, G. D. (n.d.). *Luojia 1-01 (LJ 1-01)*. Gunter's Space Page. Retrieved June 8, 2023, from Besucht am 08.06.2023 auf: [https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/luojia-1.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/luojia-1.htm)
- Kyba, C., Garz, S., Kuechly, H., De Miguel, A., Zamorano, J., Fischer, J., & Hölker, F. (2014). High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges. *Remote Sensing*, 7(1), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs70100001>
- Levin, N., Kyba, C. C. M., Zhang, Q., Sánchez De Miguel, A., Román, M. O., Li, X., Portnov, B. A., Molthan, A. L., Jechow, A., Miller, S. D., Wang, Z., Shrestha, R. M., & Elvidge, C. D. (2020). Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111443>
- Mäder, B., & Leiggener, H.-C. (2022). *UNESCO-Welterbemagazin* (p. 52). Stiftung UNESCO-Welterbe Schweizer Alpen Jungfrau-Aletsch. [https://jungfraualetsch.ch/Welterbemagazin\\_2022/epaper/UNESCO-Welterbemagazin.pdf](https://jungfraualetsch.ch/Welterbemagazin_2022/epaper/UNESCO-Welterbemagazin.pdf)
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science* (1st ed. 2015). Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>



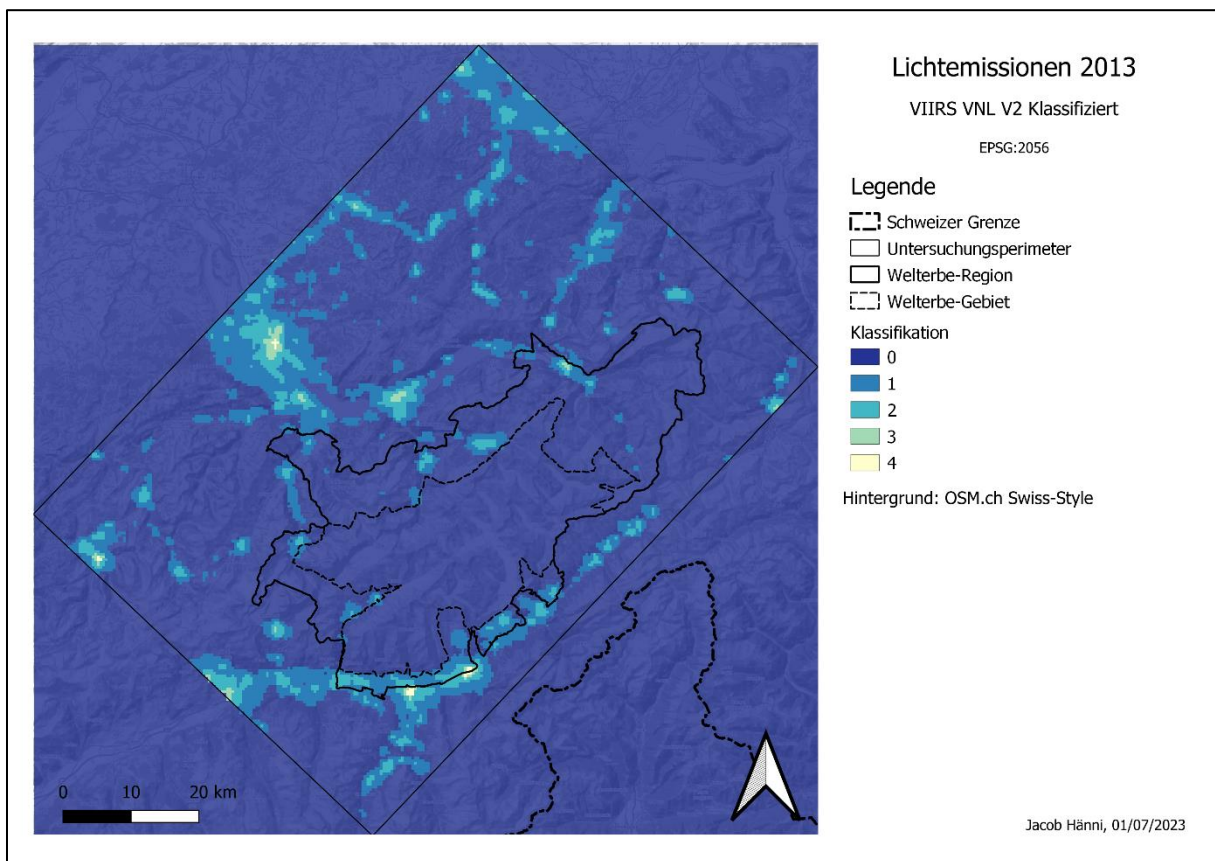
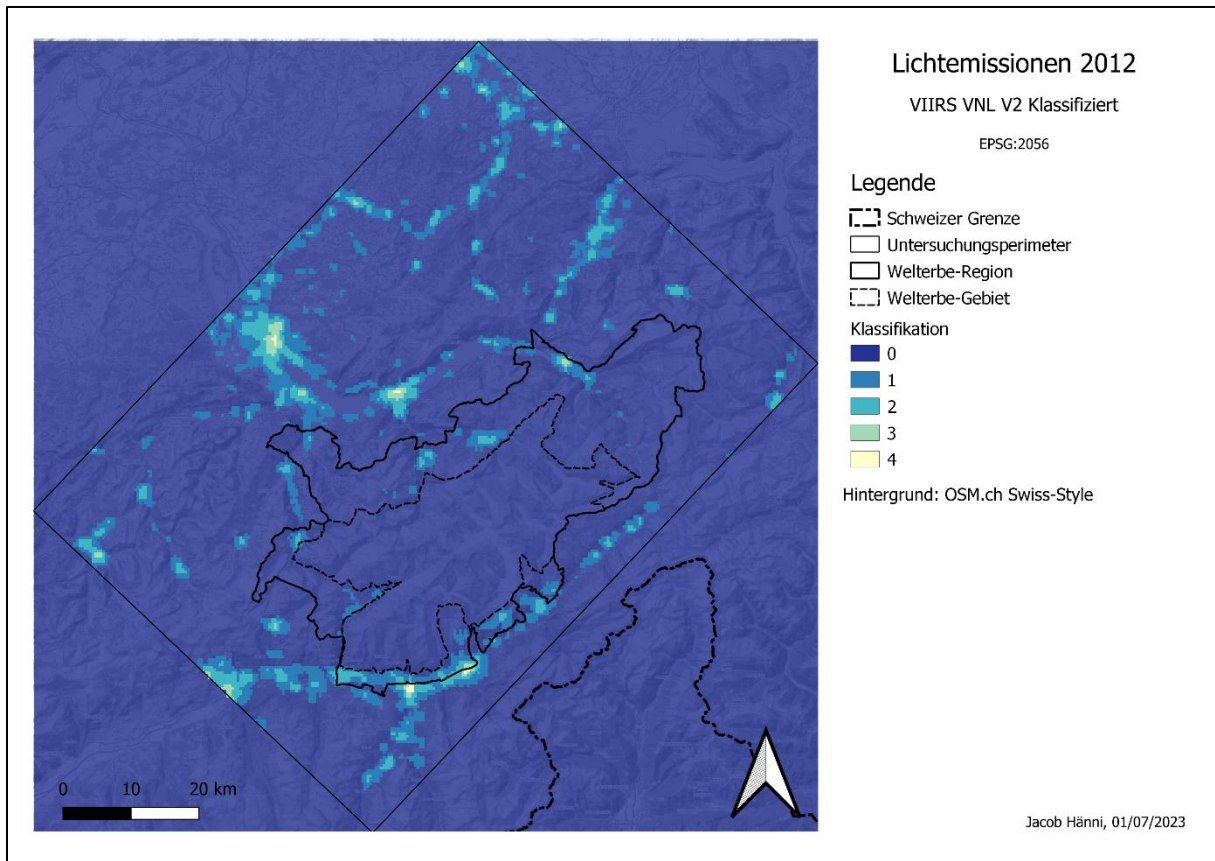
- Managementzentrum UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch. (2020). *UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch – Managementplan 2030*. Trägerschaft UNESCO-Welterbe Swiss Alps Jungfrau-Aletsch.
- Mountain Wilderness Schweiz. (2016). *Positionspapier Lichtverschmutzung*.  
[https://mountainwilderness.ch/fileadmin/user\\_upload/Dokumente/1\\_Alpenschutz/Positionspapier\\_Alpenschutz/161205\\_Positionspapier\\_Lichtverschmutzung.pdf](https://mountainwilderness.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente/1_Alpenschutz/Positionspapier_Alpenschutz/161205_Positionspapier_Lichtverschmutzung.pdf)
- NASA. (2023). *NASA's Black Marble*. Besucht am 08.06.2023 auf:  
<https://blackmarble.gsfc.nasa.gov/>
- Oehler, J. (2021). The UNESCO World Heritage Swiss Alps Jungfrau-Aletsch – protecting the cultural landscape by preserving the traditional irrigation system in the Upper Valais. *Eco.Mont (Journal on Protected Mountain Areas Research)*, 14(1), 33–37.  
<https://doi.org/10.1553/eco.mont-14-1s33>
- Román, M. O., Wang, Z., Sun, Q., Kalb, V., Miller, S. D., Molthan, A., Schultz, L., Bell, J., Stokes, E. C., Pandey, B., Seto, K. C., Hall, D., Oda, T., Wolfe, R. E., Lin, G., Golpayegani, N., Devadiga, S., Davidson, C., Sarkar, S., ... Masuoka, E. J. (2018). NASA's Black Marble nighttime lights product suite. *Remote Sensing of Environment*, 210, 113–143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.017>
- Schönberger, L. (2021). *A New Challenge for Spatial Planning: Light Pollution in Switzerland*.  
[http://www.darksky.ch/dss/wp-content/uploads/2021/02/2021.02.05\\_Lichtverschmutzung\\_Liliana-Schoenberger.pdf](http://www.darksky.ch/dss/wp-content/uploads/2021/02/2021.02.05_Lichtverschmutzung_Liliana-Schoenberger.pdf)
- Wang, Z., Román, M. O., Kalb, V. L., Miller, S. D., Zhang, J., & Shrestha, R. M. (2021). Quantifying uncertainties in nighttime light retrievals from Suomi-NPP and NOAA-20 VIIRS Day/Night Band data. *Remote Sensing of Environment*, 263, 112557.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112557>
- Widmer, K., Beloconi, A., Marnane, I., & Vounatsou, P. (2022). *Review and Assessment of Available Information on Light Pollution in Europe* (Eionet Report – ETC HE 2022/8). ETC HE c/o NILU.

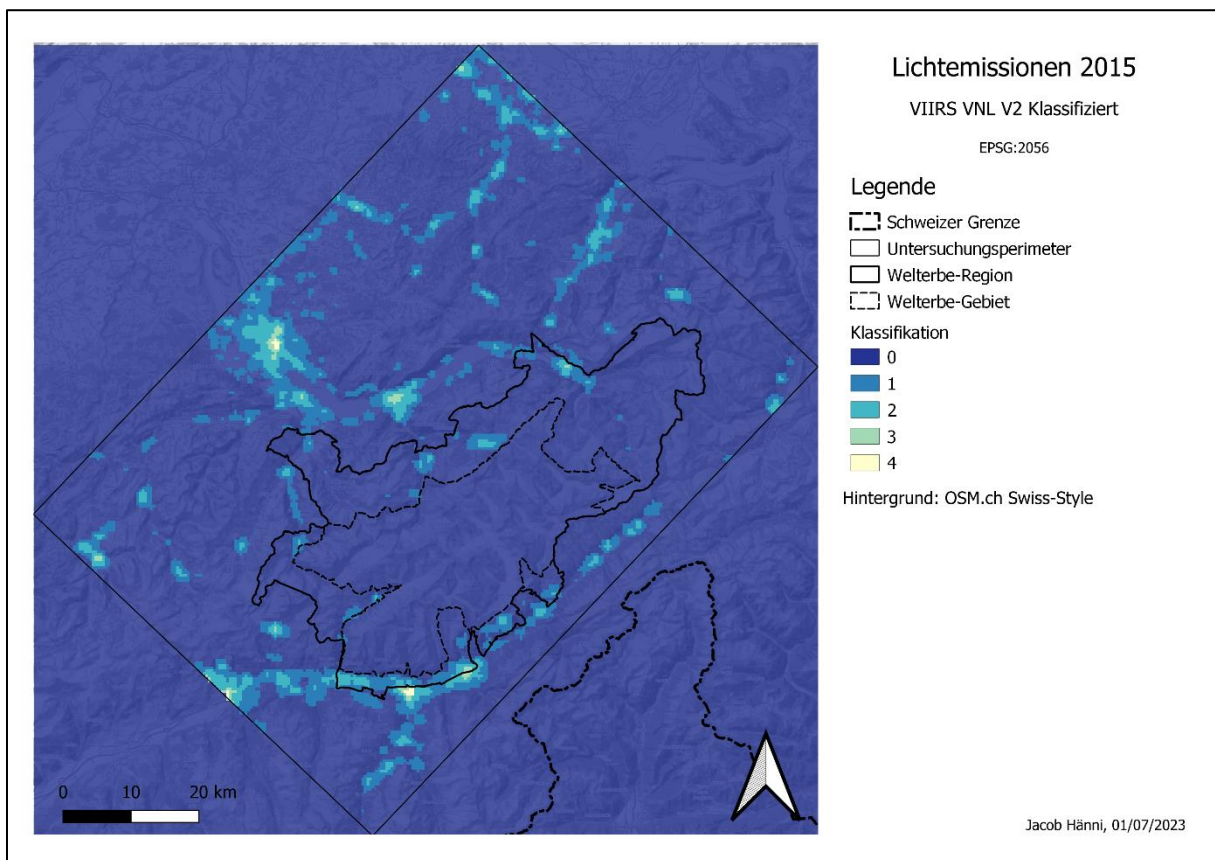
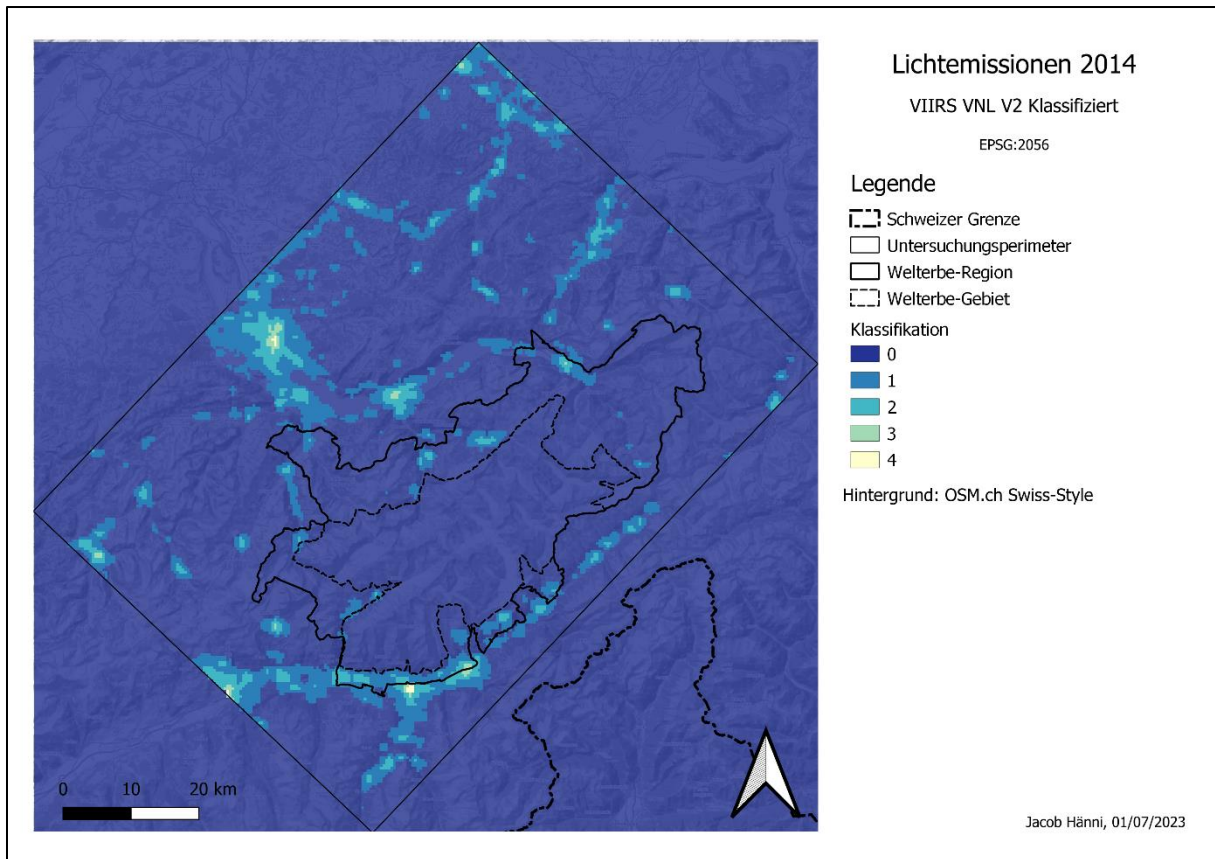
Zhao, M., Zhou, Y., Li, X., Cao, W., He, C., Yu, B., Li, X., Elvidge, C. D., Cheng, W., & Zhou, C. (2019). Applications of Satellite Remote Sensing of Nighttime Light Observations: Advances, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*, 11(17), 1971.  
<https://doi.org/10.3390/rs11171971>

## 7. Anhangsverzeichnis

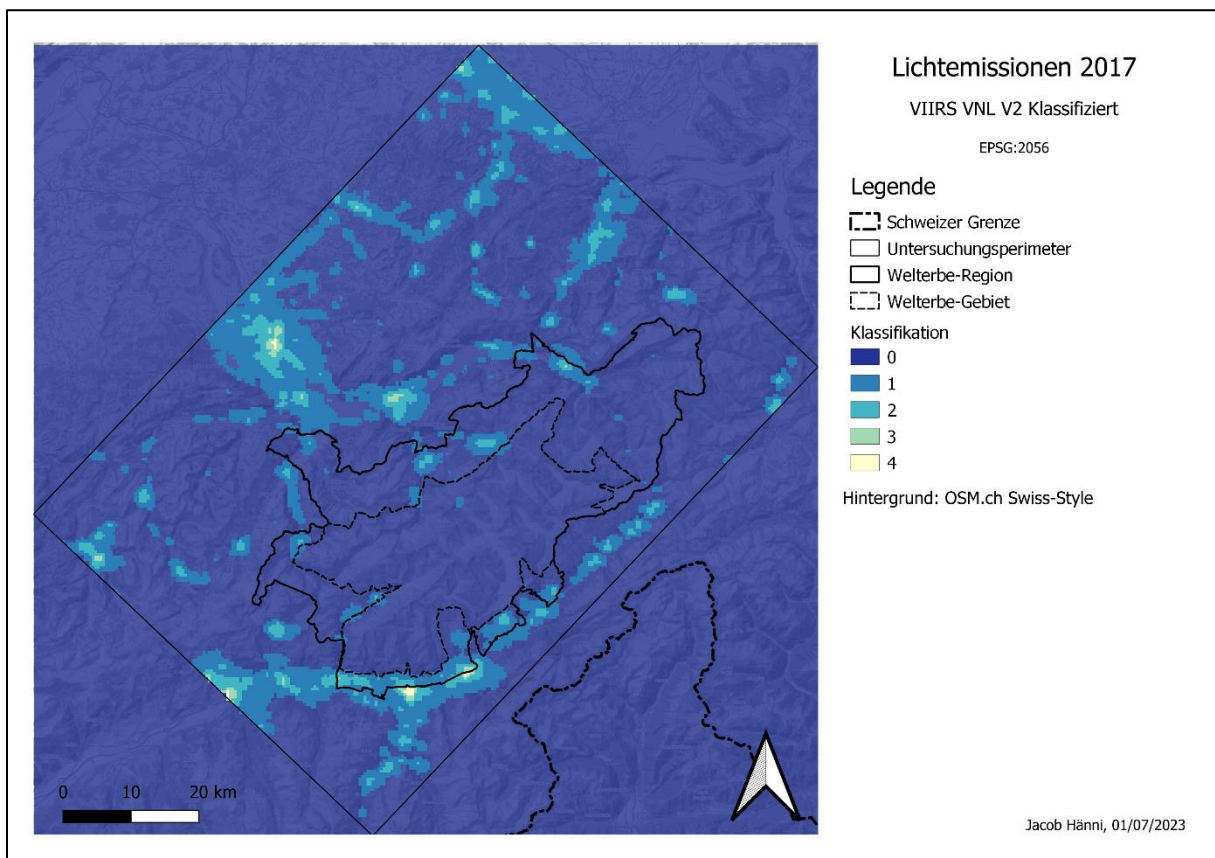
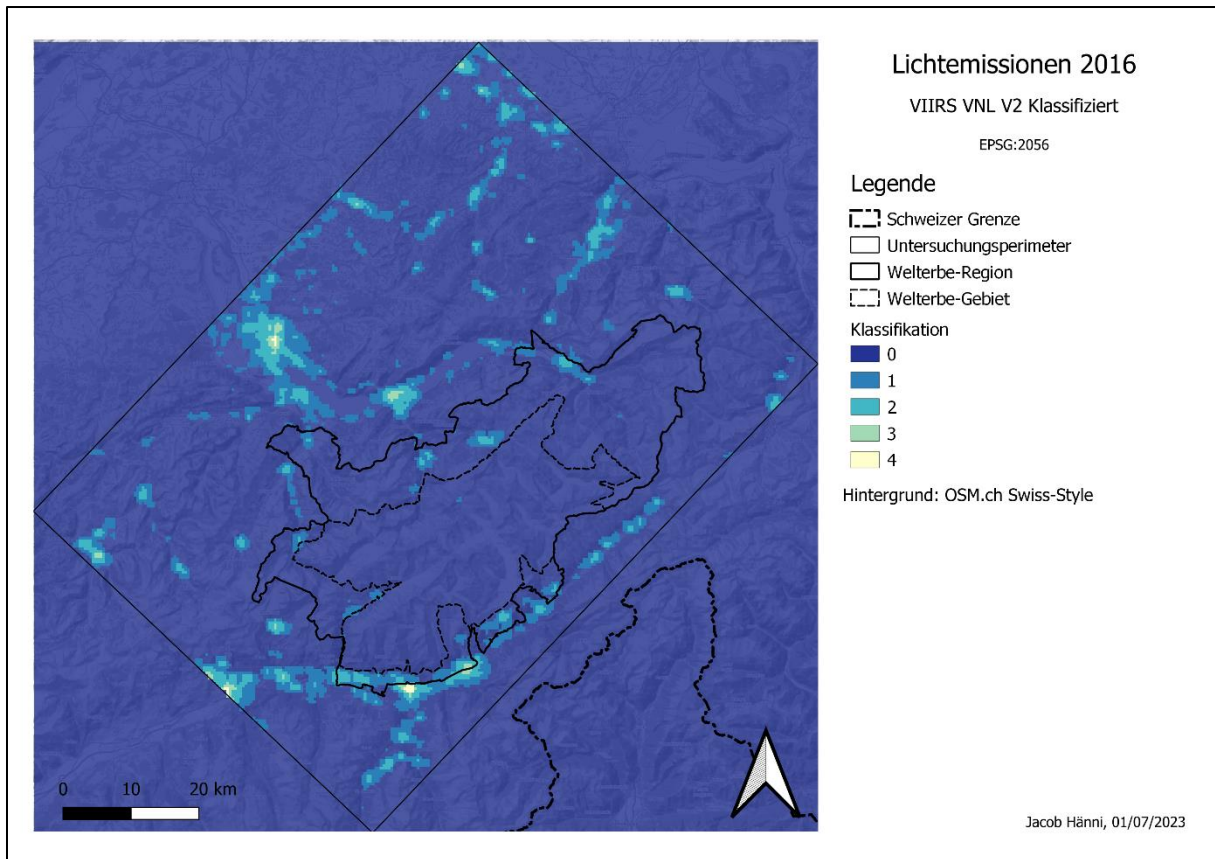
- Anhang 1: Lichtemissionen 2012-2021 Klassifiziert
- Anhang 2: Trend-Raster
- Anhang 3: Ökologische Auswirkungen 2012-2021
- Anhang 4: Vorbereitete und Klassifizierte Raster
- Anhang 5: Veränderungs-Grafiken
- Anhang 6: Weitere Gefährdungsraster

# Anhang 1: Lichtemissionen 2012-2021 Klassifiziert

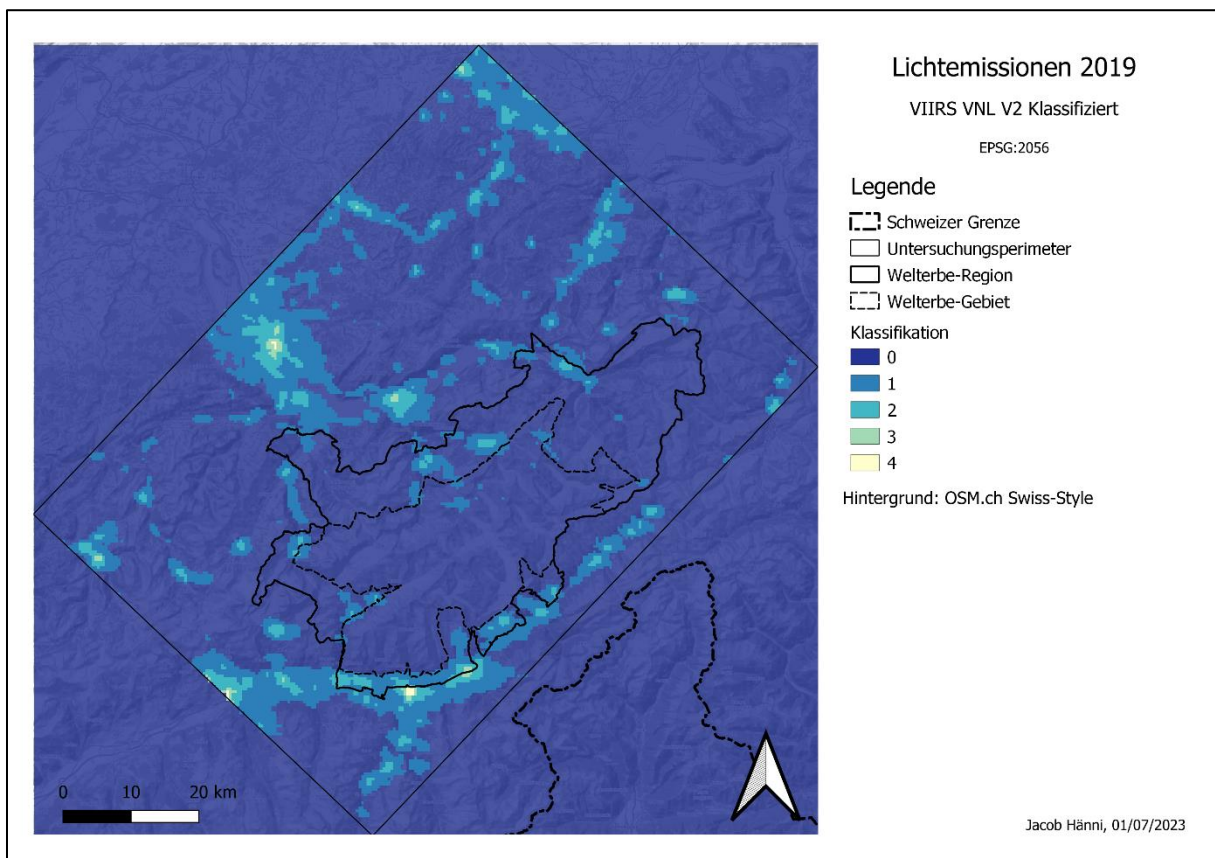
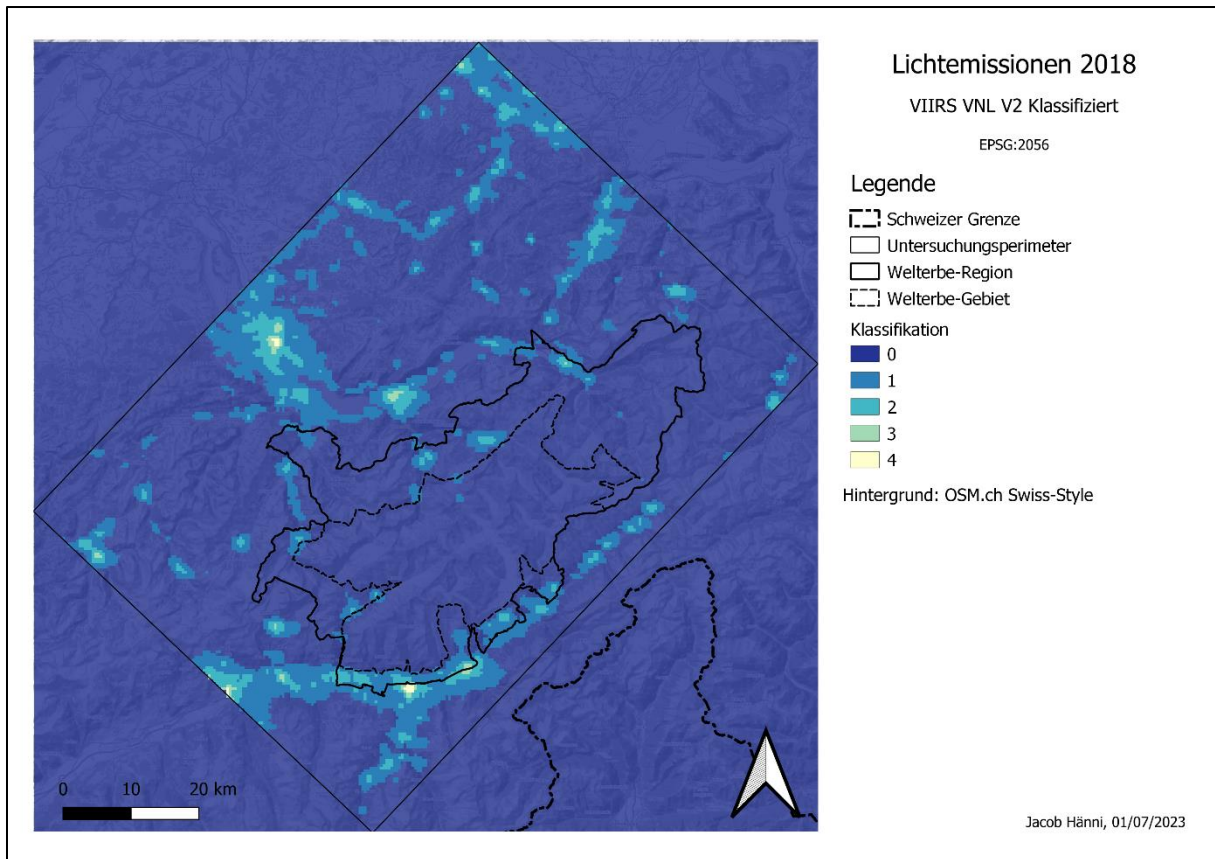


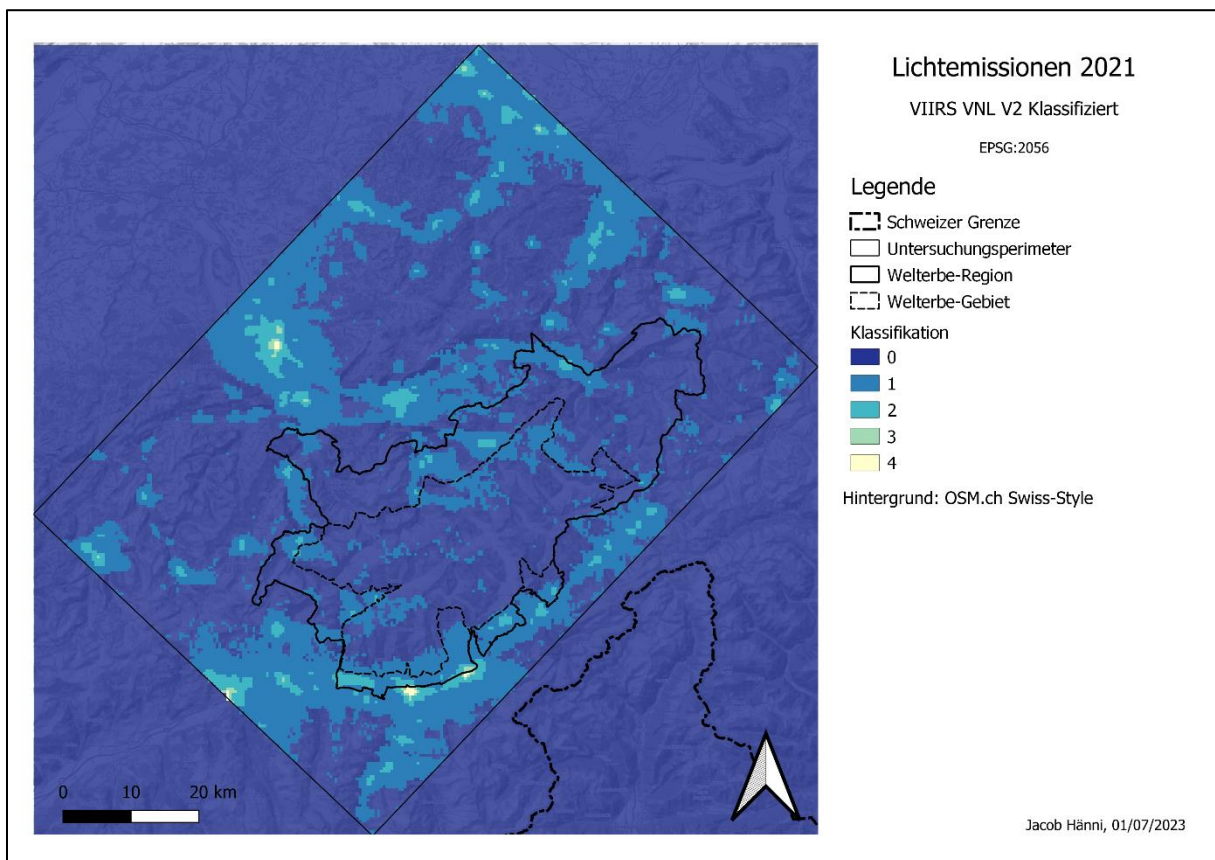
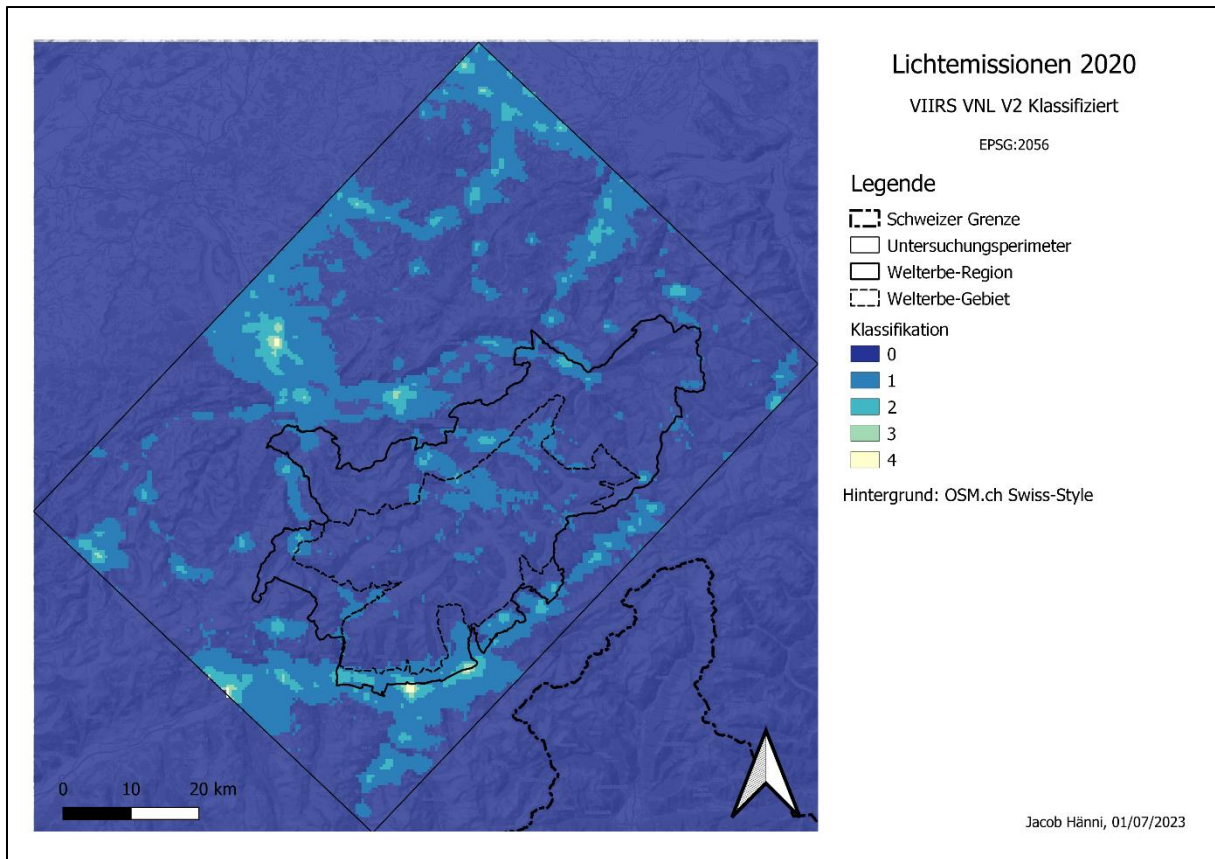






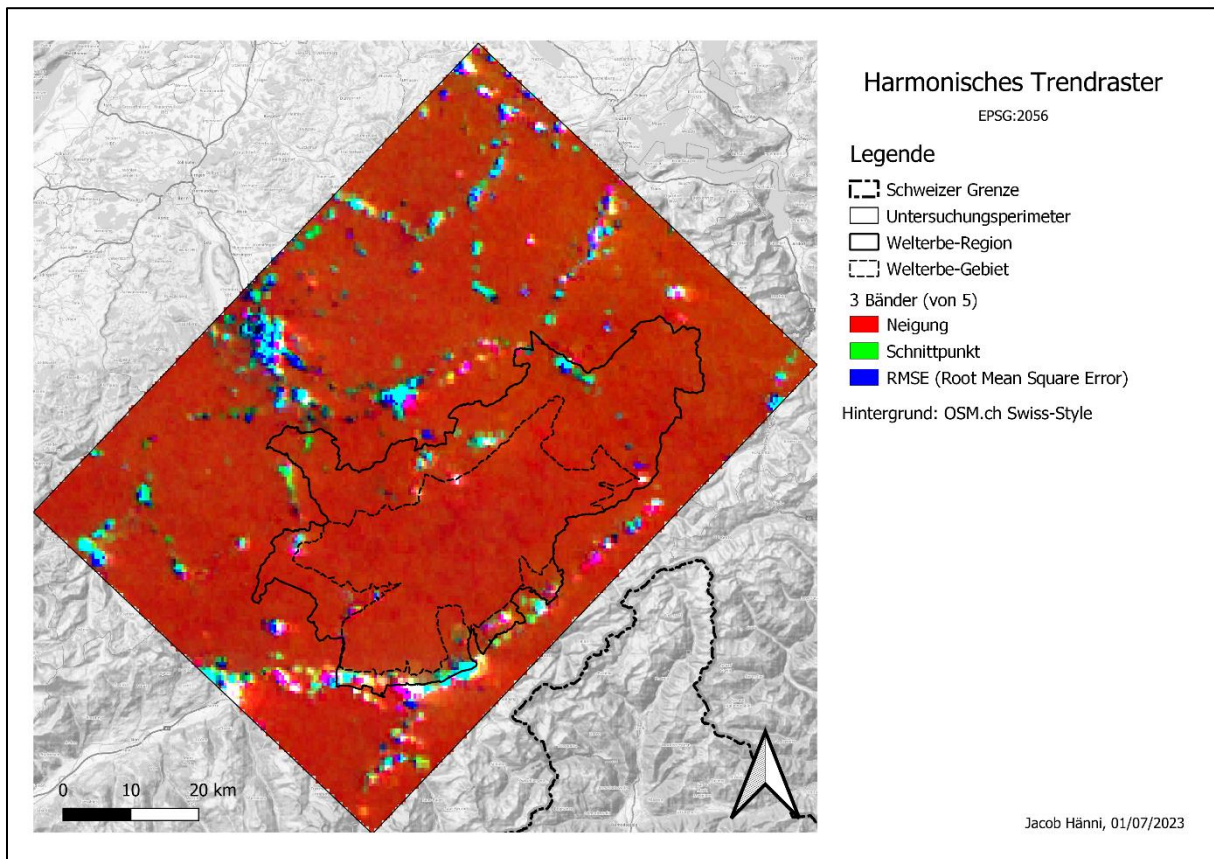
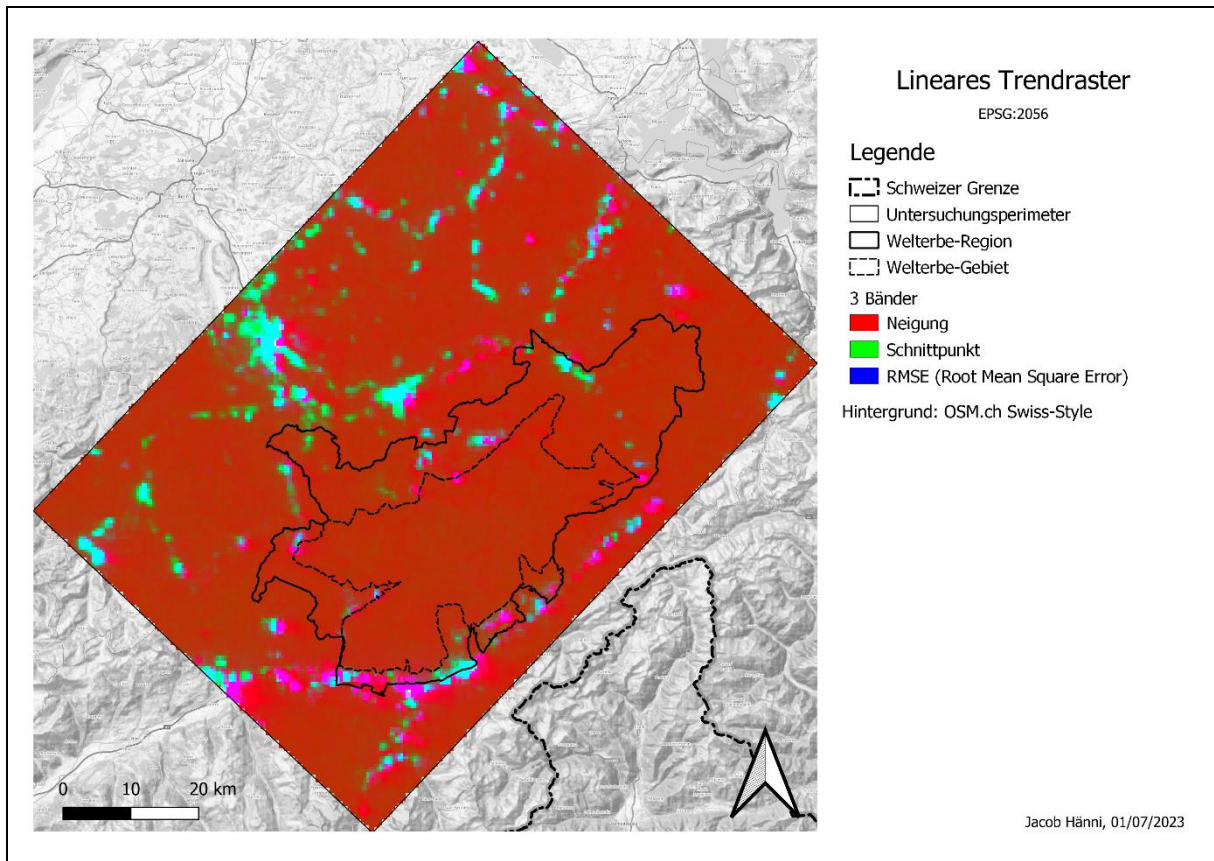






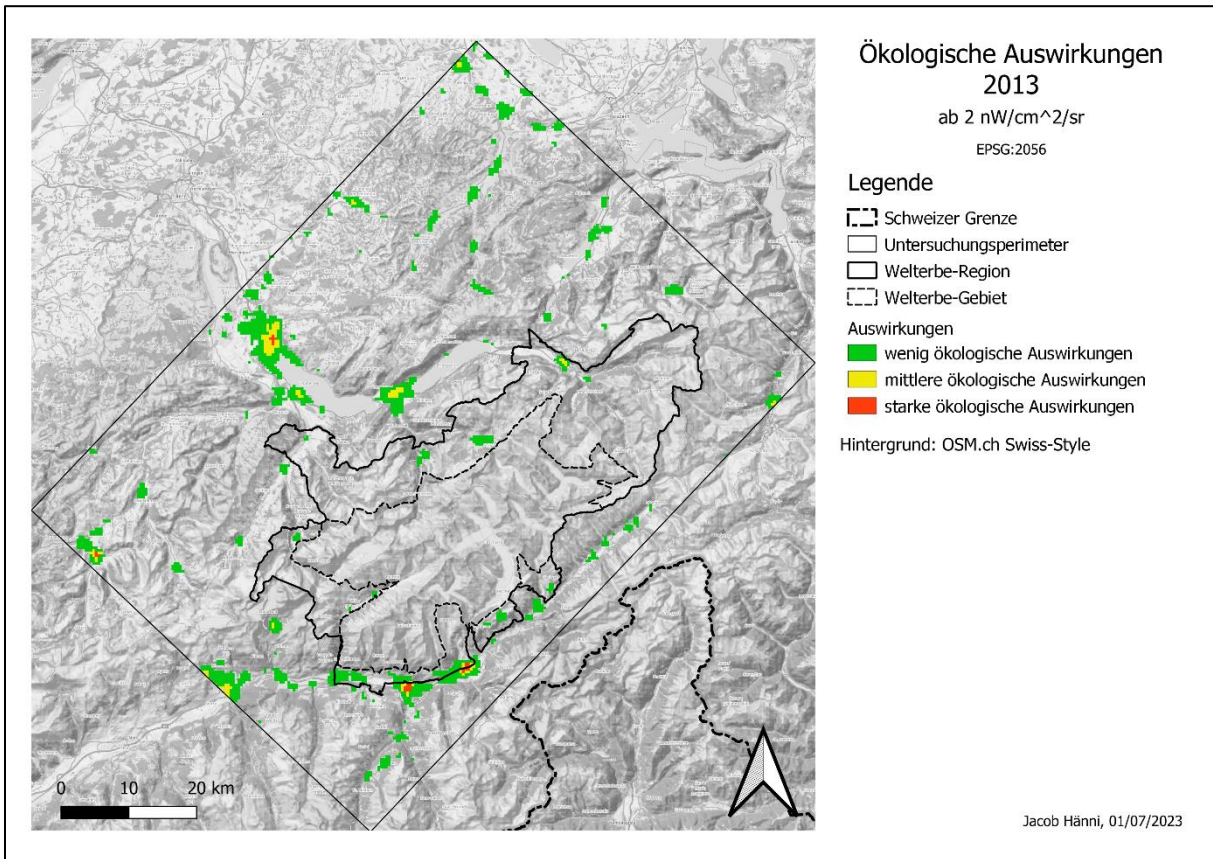
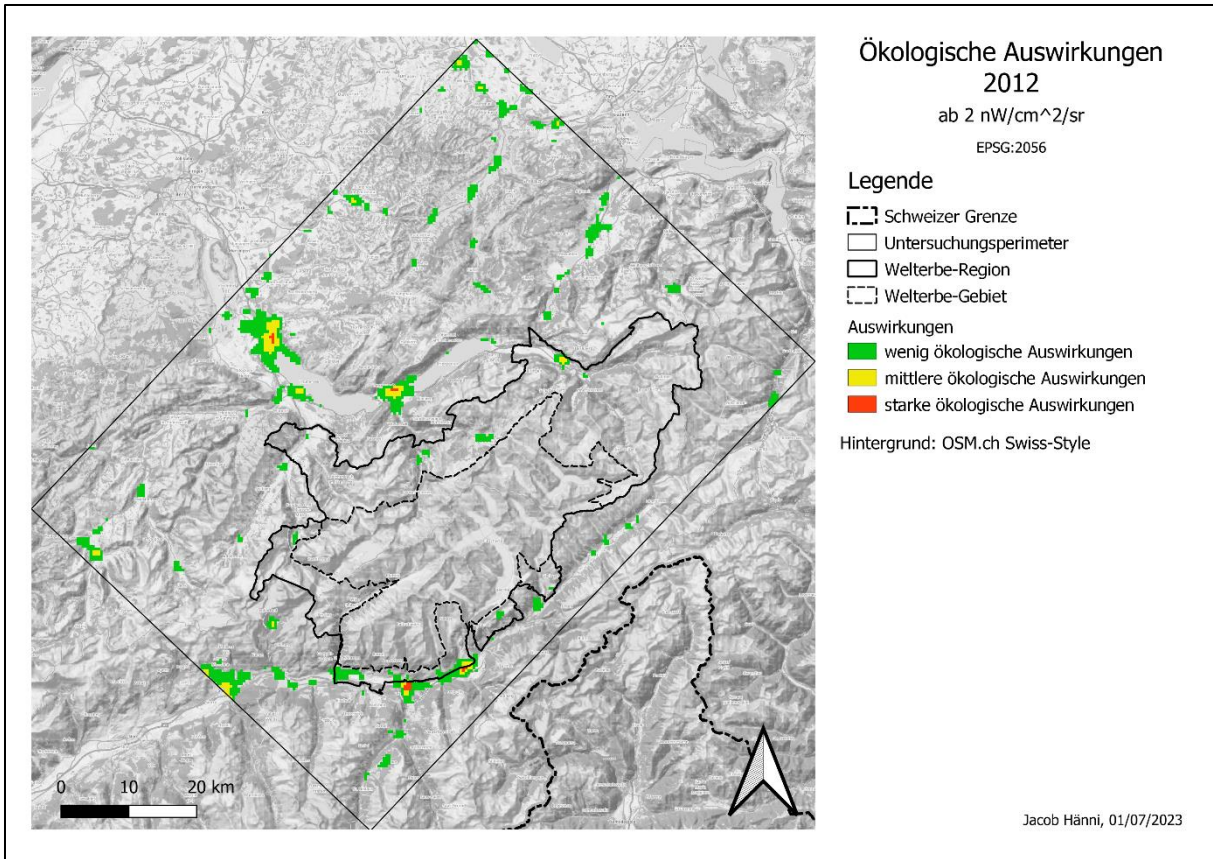


## Anhang 2: Trend-Raster

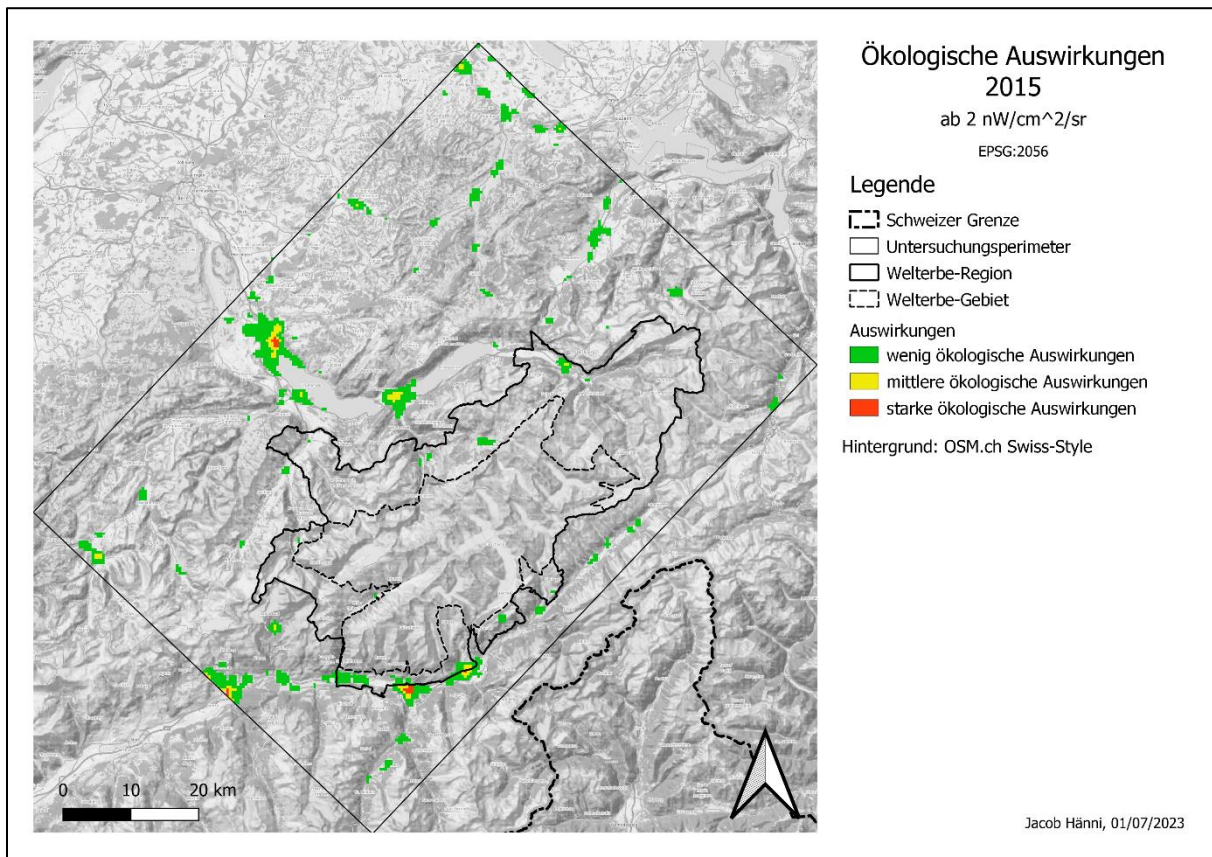
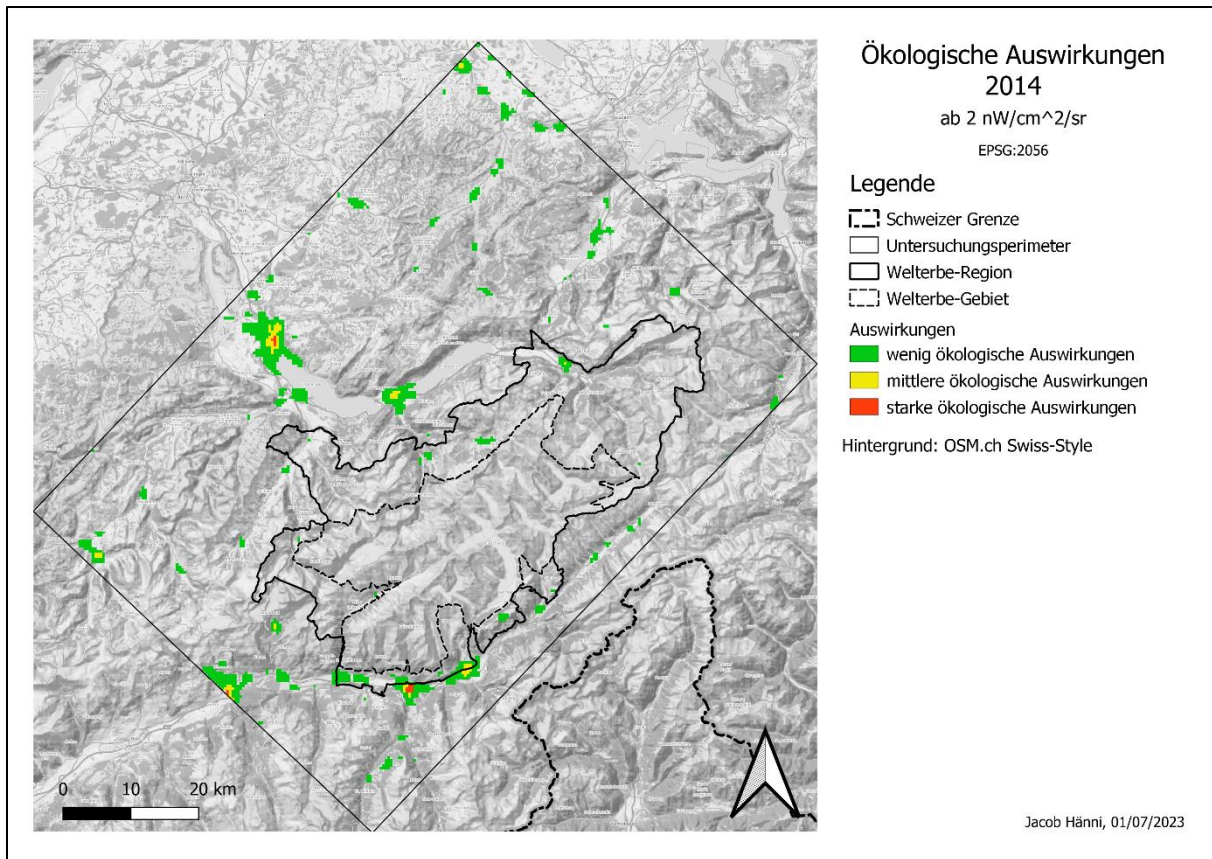




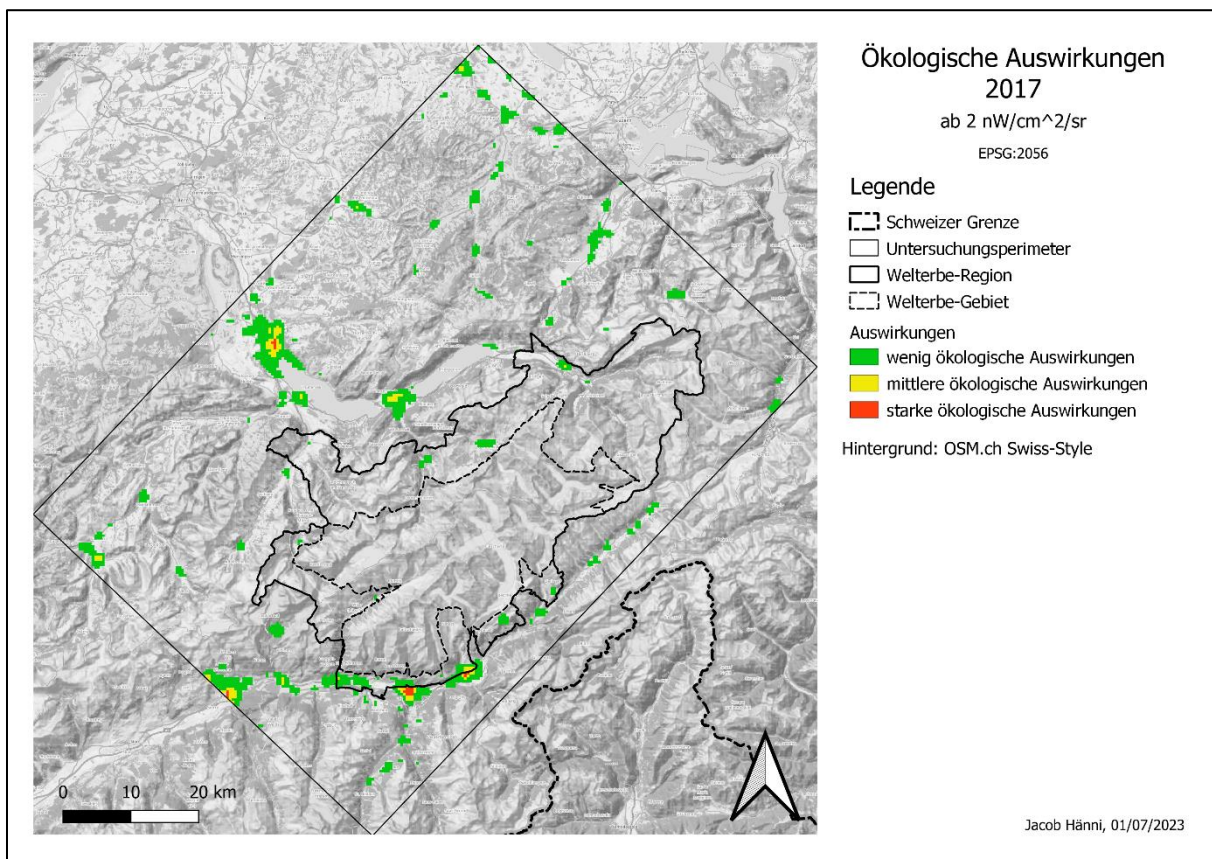
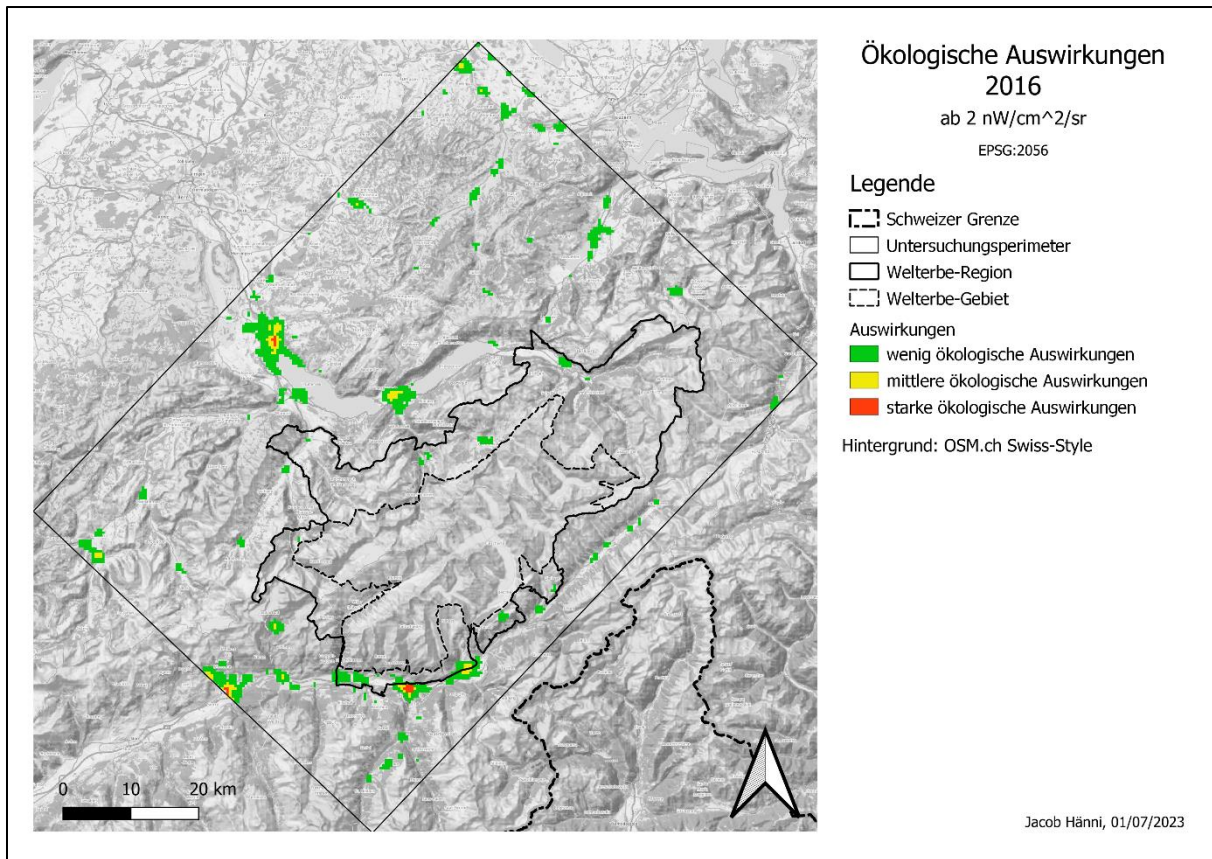
# Anhang 3: Ökologische Auswirkungen 2012-2021



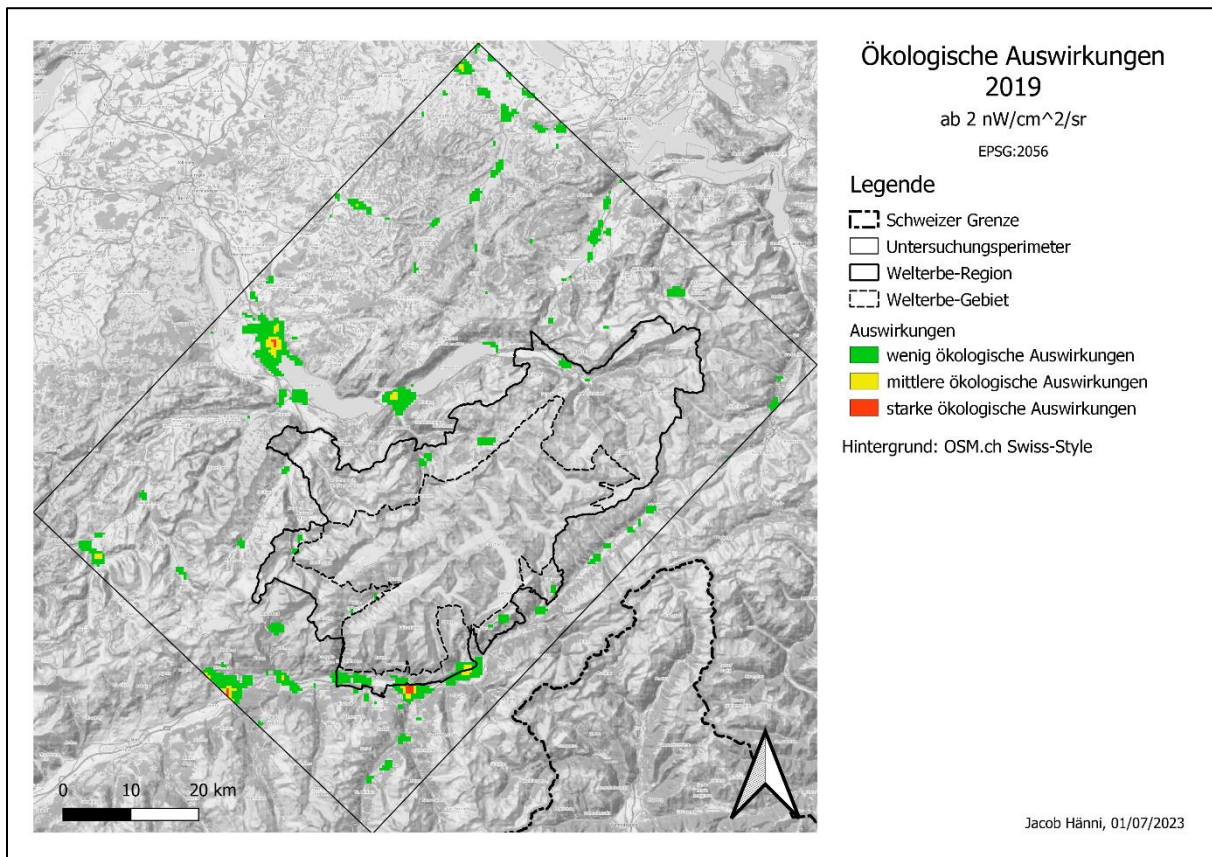
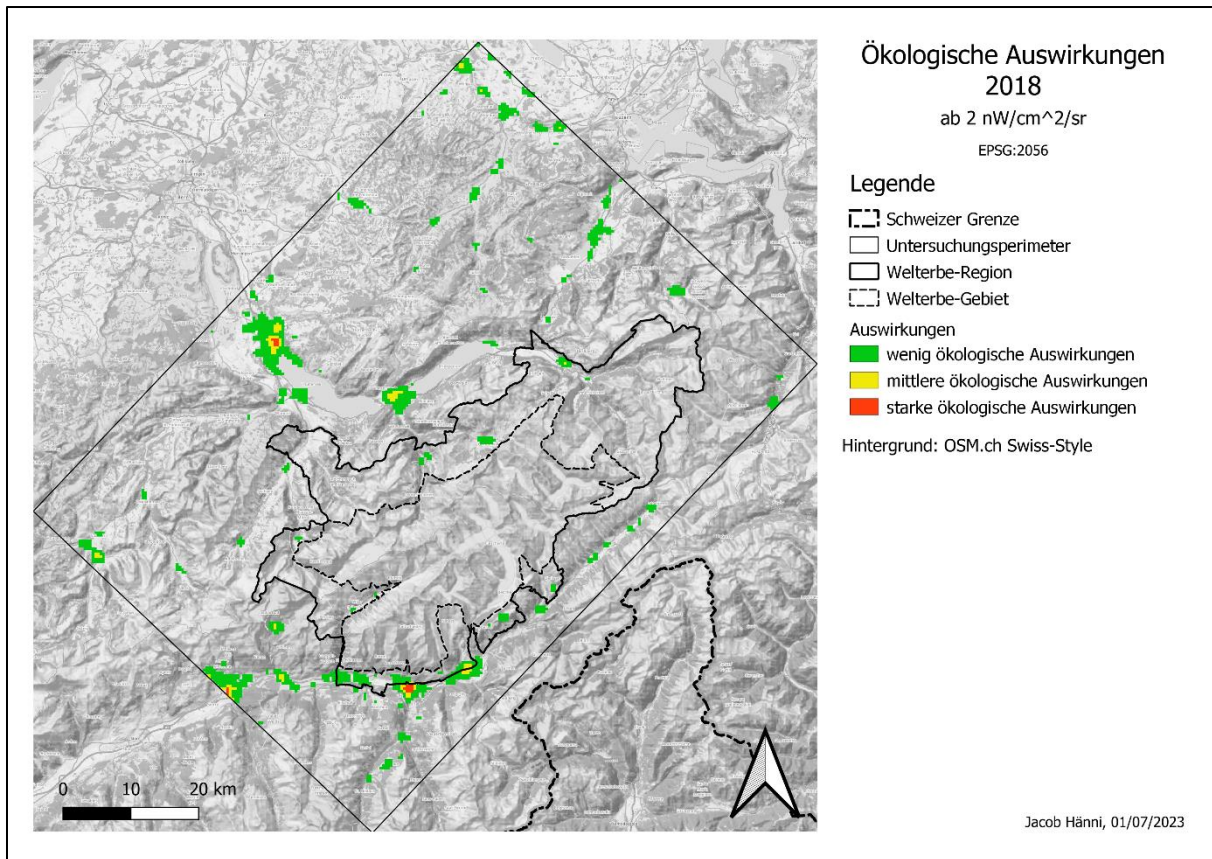




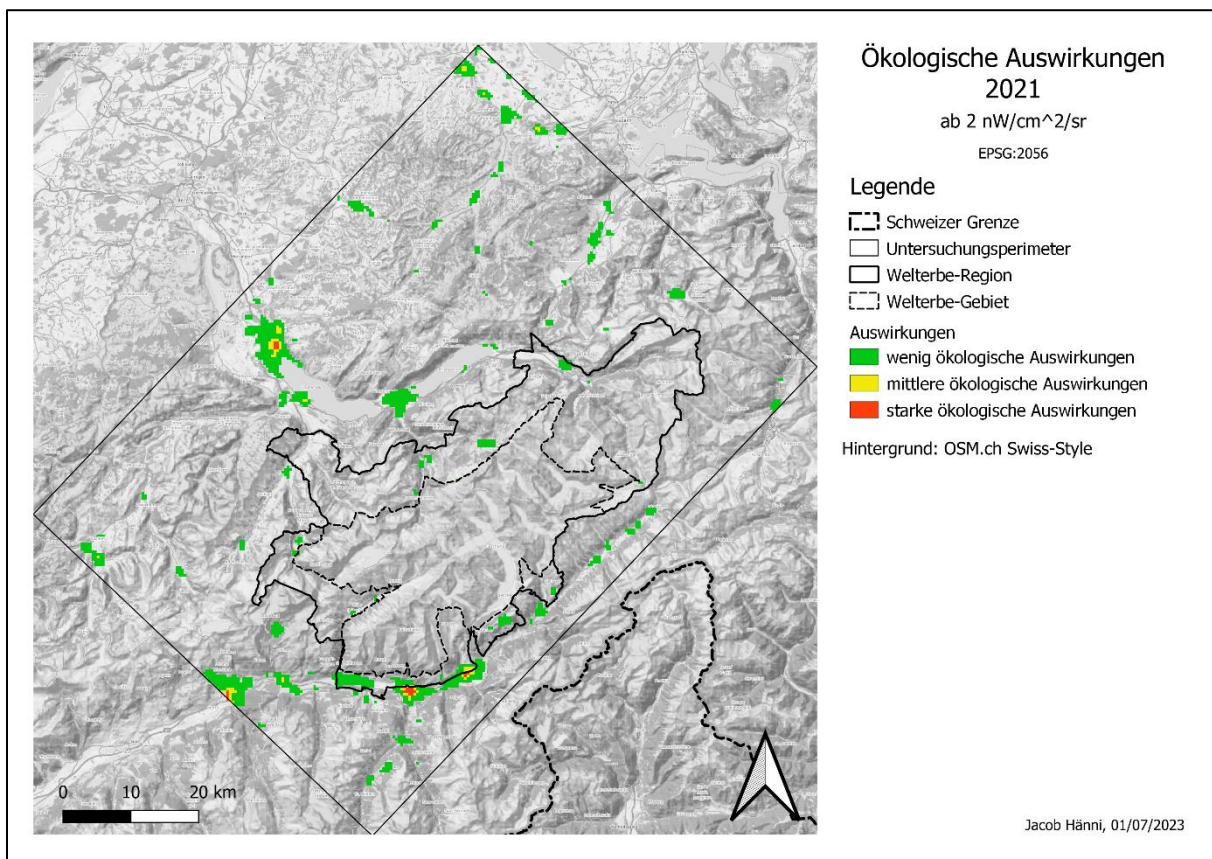
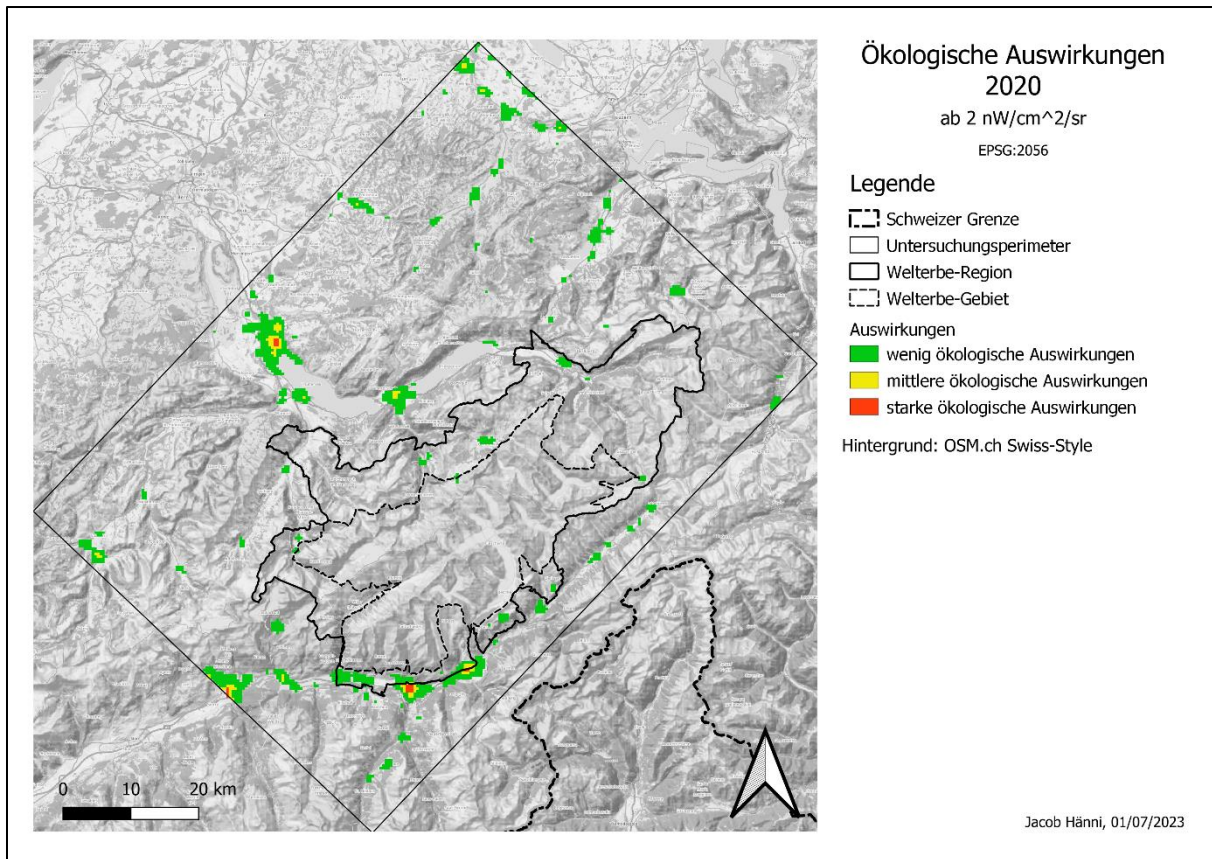




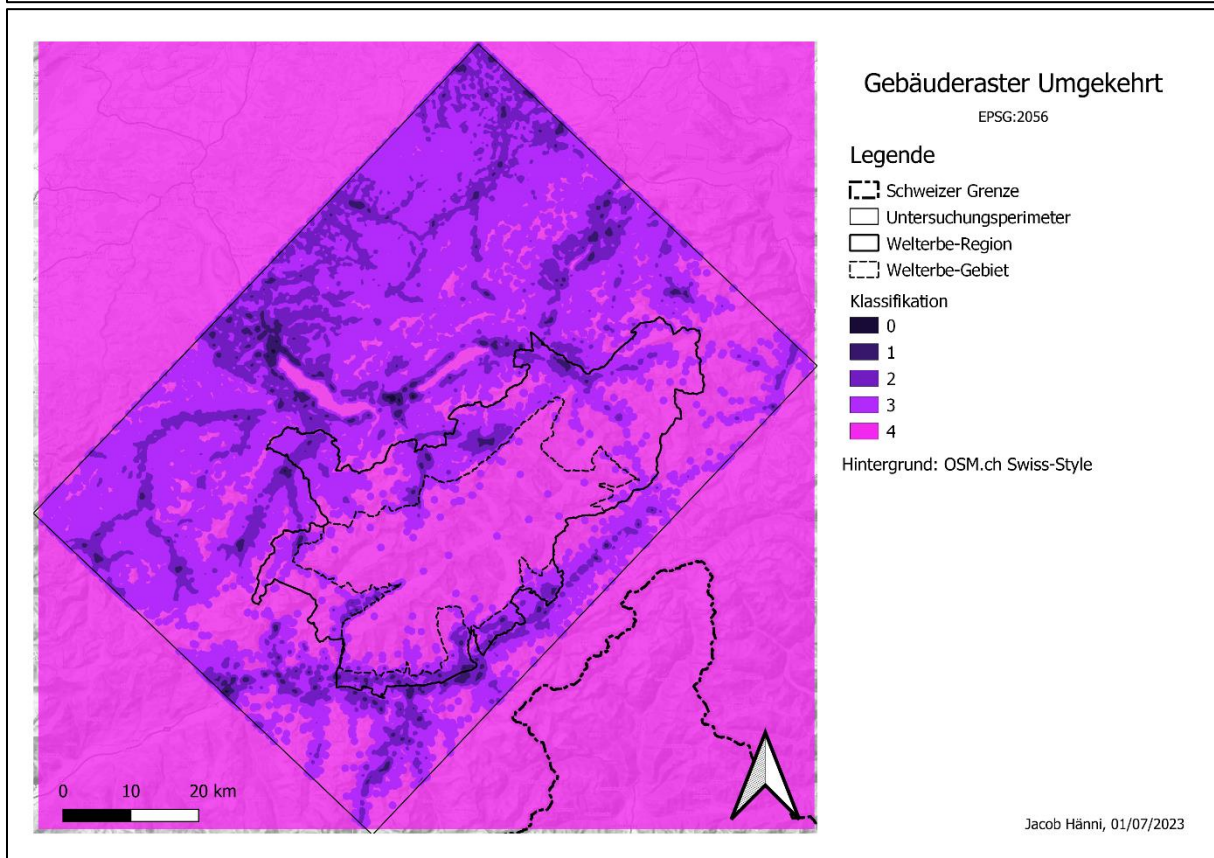
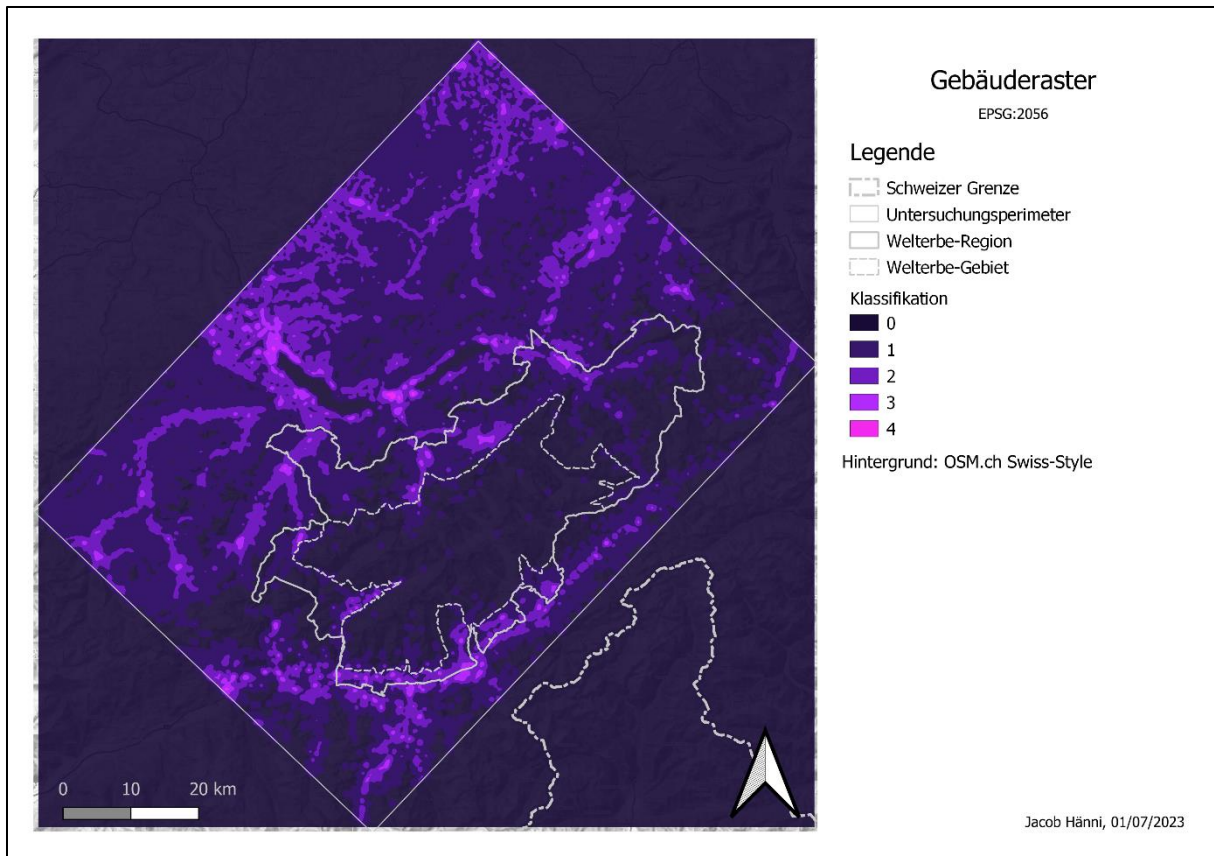




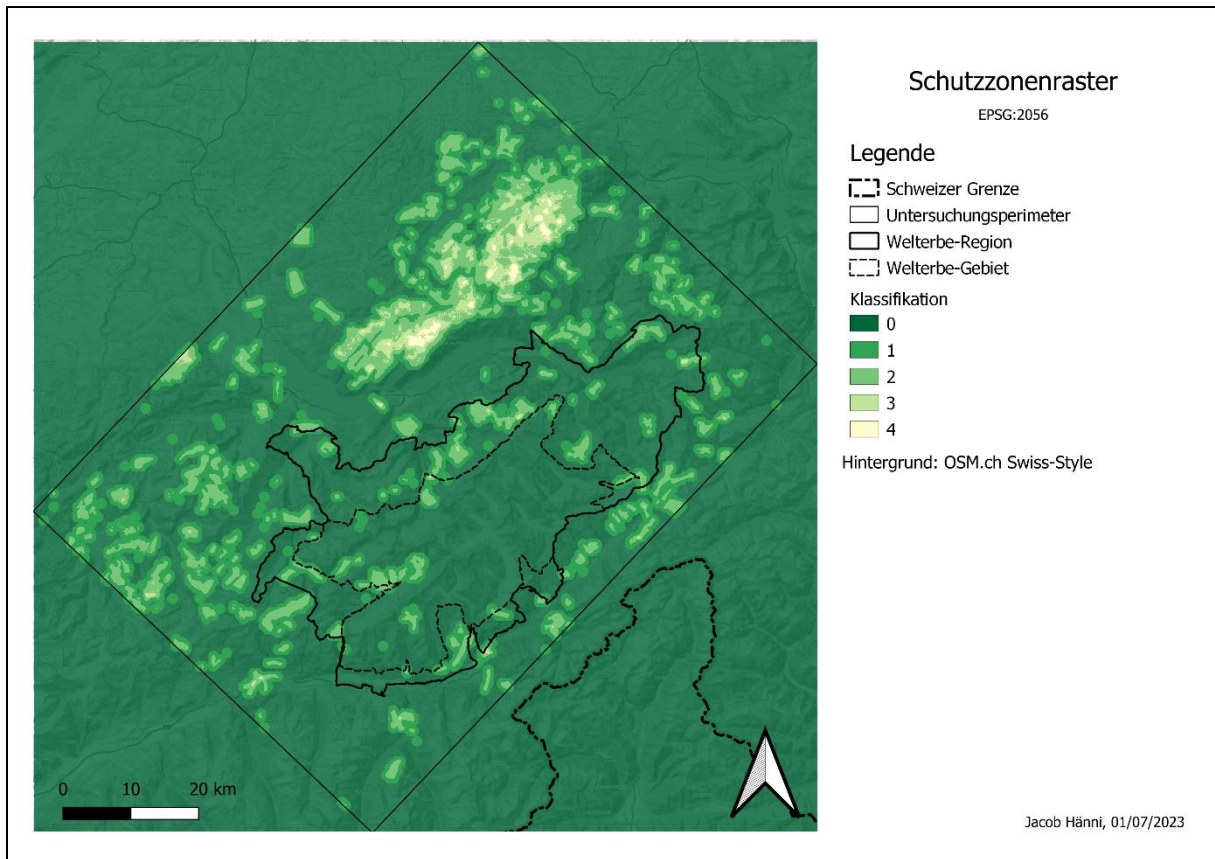




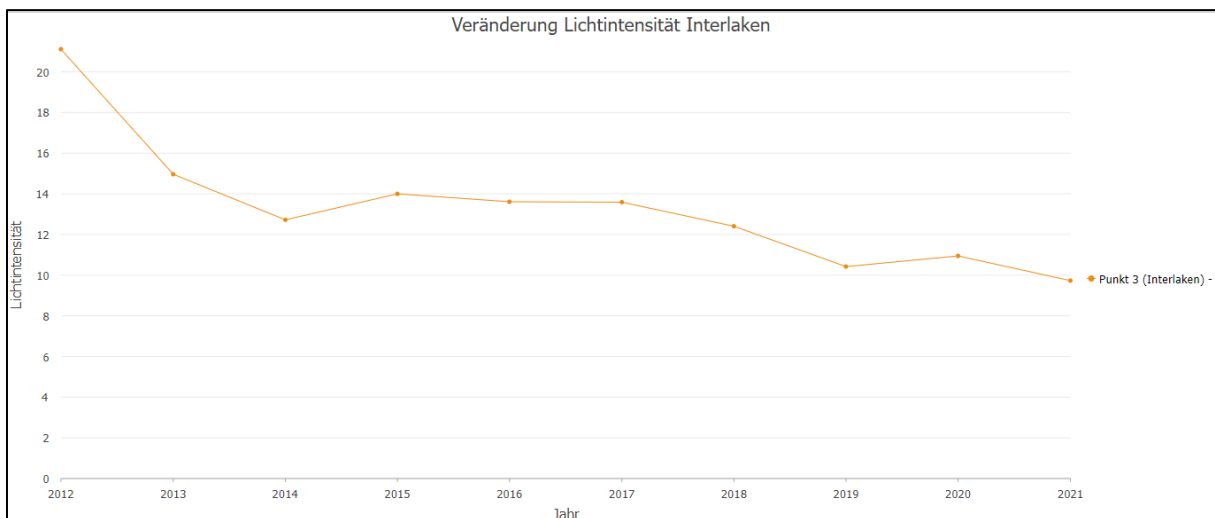
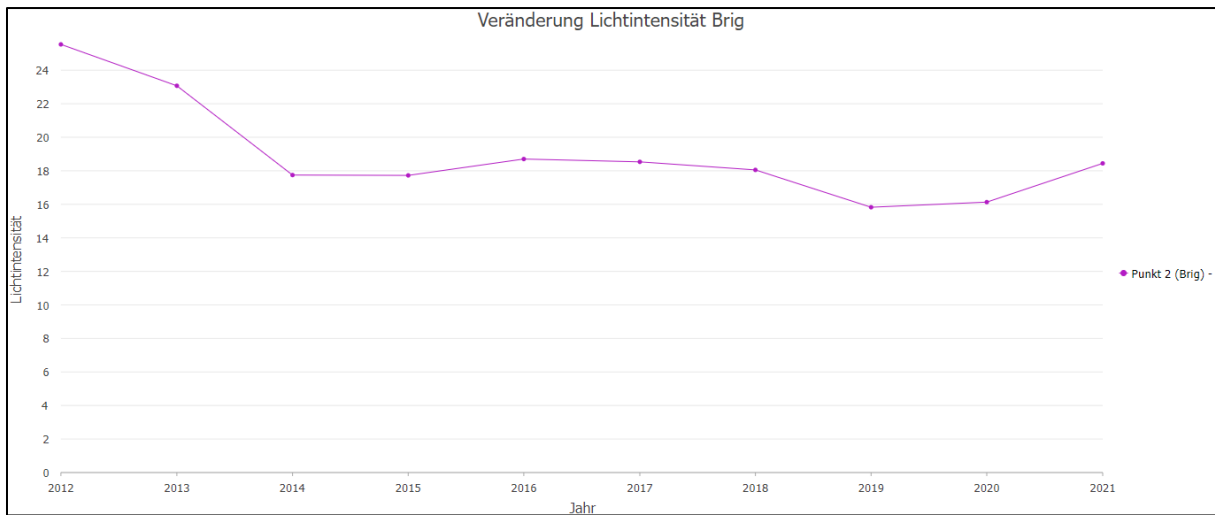
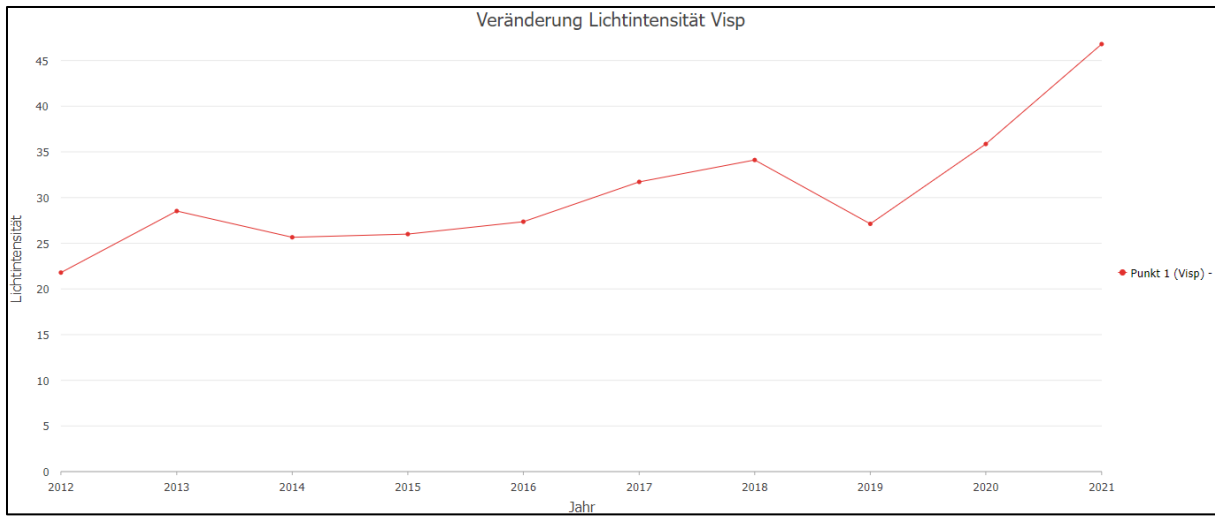
# Anhang 4: Vorbereitete und Klassifizierte Raster

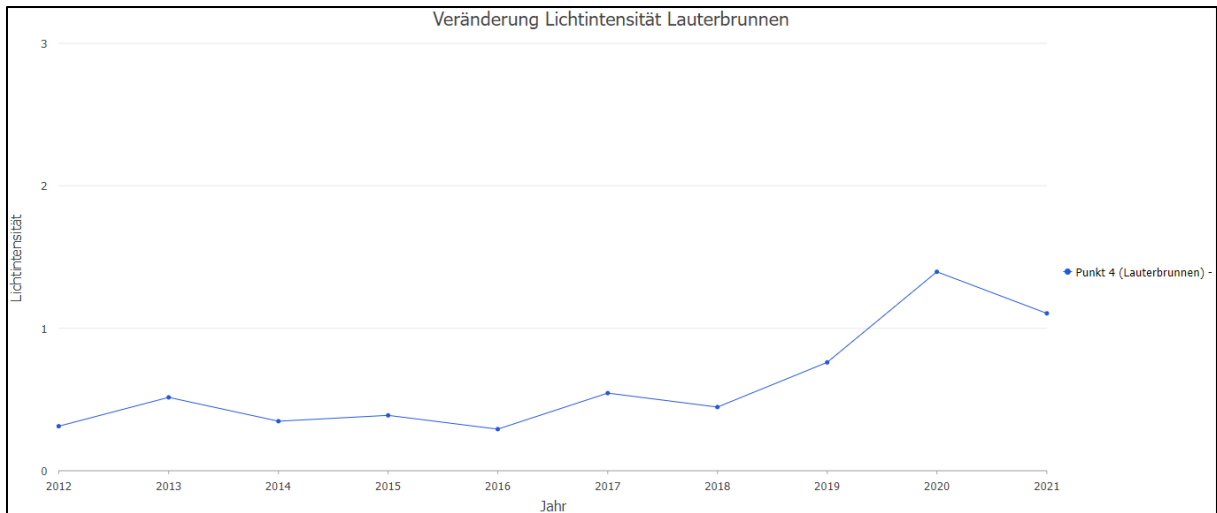






## Anhang 5: Veränderungs-Grafiken







# Anhang 6: Weitere Gefährdungsraster

