
Studie über Lichtemissionen in Luxemburg

- A Land, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016
- B Land, Lichtemissionen, Trend 2012-2016
- C Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016
- D Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, Trend 2012-2016
- E Analyse

Zusammenarbeit:

Dark-Sky Switzerland
Postfach
8135 Langnau am Albis
Switzerland

xirrus GmbH
Lukas Schuler
Buchzelgstrasse 36
8053 Zürich
Switzerland

Ministère du Développement durable et des Infrastructures
Département de l'Environnement
Olaf Münichsdorfer
4, place de l'Europe
2918 Luxembourg
Luxembourg

Autor des Berichts:
Lukas D. Schuler

Interne Kontrolle:
Christian D. Berweger

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
2	Vorgehen	4
2.1	A Land, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016	4
2.2	A+ Land, Leuchtdichte in Vollmonden, 2. Quartal 2016	4
2.3	B Land, Lichtemissionen, Trend 2012-2016	5
2.4	B+ Land, Leuchtdichte in Anzahl Vollmonden, Trend 2012-2016	5
2.5	C Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016	5
2.6	D Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, Trend 2012-2016	6
2.7	Weshalb wir die Summe der Lichtmenge pro Gemeinde auswerten	6
2.8	Die durchschnittliche Leuchtdichte vergleichbar gemacht	7
3	Resultate	7
3.1	A Land, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016	7
3.2	A+ Land, Leuchtdichte in Vollmonden, 2. Quartal 2016	12
3.3	B Land, Lichtemissionen, Trend 2012-2016	17
3.4	B+ Land, Leuchtdichte in Vollmonden, absoluter Trend 2012-2016	20
3.5	C Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016	23
3.6	D Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, Trend 2012-2016	34
4	E Analyse und Diskussion	45
4.1	A Aktuelle Situation Land Luxemburg, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016	45
4.2	A+ Aktuelle Situation Land Luxemburg, Leuchtdichte in Anzahl Vollmonden, 2. Quartal 2016	45
4.3	B Langzeittrend Situation Lichtemissionen Land Luxemburg April 2012 bis Juni 2016	45
4.4	B+ Langzeittrend Situation Leuchtdichte Land Luxemburg April 2012 bis Juni 2016	46
4.5	C Aktuelle Situation ausgewählte Gemeinden 2. Quartal 2016	46
4.6	D Langzeittrend ausgewählte Gemeinden April 2012 bis Juni 2016	48
4.7	Schlussfolgerung	50
4.8	Massnahmenkatalog	51
	Einbezug umweltfreundlicherer Beleuchtung in die Energiestrategie	51
	Baubehörde, Baubewilligungen, Bau- und Zonenordnung	53
	Empfehlungen an Gewerbetreibende oder Einführung einer Nachtruheverordnung	53
	Bewilligung von Schaufensterbeleuchtungen und Leuchtreklamen	53
	Polizeiverordnung, Nachtruhe	53
5	Anhang	54
5.1	Gedanken von Dark-Sky Switzerland zum Thema Lichtverschmutzung	54
5.2	Normen für öffentliche Strassenbeleuchtung und Lichtschutzzonen durch LEED	54
	Strassenklassen ME1 bis ME6, EN 13201-1: Leitfaden zur Auswahl der Beleuchtungsklassen	54
	Lichtschutzzonen LZ0 bis LZ4 nach LEED	55
5.3	Weitere Normen und Empfehlungen, relevant für Beleuchtung im Aussenraum	56
	In Luxemburg anwendbare Normen	56
	Weiterführende Normen und Empfehlungen aus anderen Ländern als Unterstützung	57
5.4	Technische Anmerkungen	57

1 Einführung

Wie in vielen anderen Ländern in Europa hat auch in Luxemburg die Lichtverschmutzung in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Das Ministerium für nachhaltige Entwicklung und Infrastrukturen in Luxemburg ist an einer langfristigen Reduktion der Lichtverschmutzung interessiert. Die Lichtverschmutzung bezeichnet den unnötigen Anteil der Lichtemissionen (auch Lichtabfall genannt), welcher Störungen in der Umwelt verursacht und aus ökonomischer Sicht eine Verschwendung darstellt. Zu den Installationskosten für Aussenbeleuchtung kommen unnötige Betriebskosten durch Lichtabfall oder Dauerbetrieb hinzu, und allfällige Folgekosten durch Immissionen und deren Korrekturen fallen an. Daher ist eine gute Planung der Aussenbeleuchtung unter Berücksichtigung der Umweltproblematik immer erstrebenswert. Sie erspart spätere Umtriebe und reduziert die Folgekosten der unerwünschten Wirkungen. Doch bevor man über Wirkungen und Massnahmen diskutieren kann, sollte man den Ist-Zustand erfassen. Neben dem Ist-Zustand hilft auch eine erste Trendanalyse aus den letzten Jahren weiter. Das wurde in diesem Bericht gemacht.

Um die unnötigen Lichtemissionen (Lichtverschmutzung) über längere Zeit systematisch zu beobachten gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Man kann die künstliche Aufhellung des Nachthimmels messen. Dies geschieht normalerweise ortsgebunden durch Messung der Himmeshelligkeit über dem Beobachter mit einem sogenannten Sky Quality Meter (SQM).¹ In der Schweiz betreibt der Kanton Tessin ein fest installiertes Messnetz zu diesem Zweck mit zur Zeit zehn Messstationen.² Die Geräte haben eine gute Qualität zum moderaten Preis und lassen sich in Datennetze einbinden, aber eine flächendeckende Erfassung der Situation ist so kaum denkbar. Zudem ist die Datenaufbereitung zur Beseitigung von Witterungseinflüssen (Bewölkung, Regen) und Störlicht auch nicht ganz einfach.
- Eine alternative Technik sind geeichte All-Sky-Kameras. Mit diesen Fotokameras kann man ebenfalls ortsgebundene Aufnahmen der gesamten Umgebung und ihrer Leuchtdichte machen. Die Technik ist teurer und eher für Einzelbeobachtungen und Forschung geeignet.
- Statt bodengebunden die indirekte Aufhellung des Nachthimmels zu studieren, kann man auch auf das Lichtquellenstudium aus grosser Höhe setzen. Luftaufnahmen sind dafür kostspielig und begrenzt. Drohnen könnten kleinräumig guten Ersatz leisten, müssen aber noch einige technische und administrative Hürden überwinden bis es soweit ist.
Als letztes bleibt der Umweltsatellit NPP Suomi, der sichtbares Licht und teilweise Wärmestrahlung erfasst. Wenn die Atmosphäre über Luxemburg wolkenlos ist, registriert er die Helligkeit des Landes und zeichnet sie auf. Der Satellit ist selbstredend über dem ganzen Globus unterwegs und erfasst fast alle Gebiete (ausser die Polkappen). Er erfasst kontinuierlich und systematisch und daher vergleichbar die Lichtemissionen. Zudem sind die Messdaten zugänglich. Aus den Messdaten des Umweltsatelliten können wir Rückschlüsse auf die Menge Kunstlicht in Luxemburg und auf Veränderungen innerhalb von Gemeinden ziehen.

Unsere Analyse der Lichtemissionen von Luxemburg (Staat) und zehn ausgewählten Gemeinden im Detail basiert also auf den Messungen des Umweltsatelliten NPP Suomi im sichtbaren Licht (VIS) und nahen Infrarot (IR) von 500-900 nm Wellenlänge. Mehr über die Details der technischen Überlegungen dazu befinden sich im Anhang S. 57.

2 Vorgehen

- S. 8 Aus der Statistik vom 2. Quartal (Monate April bis Juni) 2016 konnten wir den aktuellen Zustand der Lichtemissionen in Luxemburg abdecken (A, Landeskarte der Lichtemissionen).
- S. 13 Zusätzlich wurde die durchschnittliche Leuchtdichte ausgewertet, d.h. die Lichtstärke pro Fläche und diese durch die Leuchtdichte des Vollmondes geteilt, so dass die Anzahl Vollmonde als einprägsameres Mass resultiert.
- S. 18 Aus der Statistik über den ganzen Messzeitraum des Satelliten seit Inbetriebnahme, das heisst inklusive der Beta-Phase der Auswertungen, konnten wir vom April 2012 bis Juni 2016 den Trend der Zu- oder Abnahme der Lichtemissionen auswerten (B, Langzeittrend, absolute und relative jährliche Zu- oder Abnahme).
- S. 21 Aus der Statistik über den ganzen Messzeitraum des Satelliten seit Inbetriebnahme, das heisst inklusive der Beta-Phase der Auswertungen, konnten wir vom April 2012 bis Juni 2016 den Trend der Zu- oder Abnahme der Leuchtdichte in Anzahl Vollmonden auswerten (B, Langzeittrend, absolute jährliche Zu- oder Abnahme).
- S. 24 Für zehn Gemeinden (Bertrange, Hesperange, Kopstal, Leudelange, Luxembourg, Niederanven, Sandweiler, Steinsel, Strassen, Walferdange) wurden die Lichtemissionen des 2. Quartals gesondert dargestellt (C, Kommunalen Atlas für zehn Gemeinden, 2. Quartal 2016).
- S. 35 Ausserdem wurde auch der Langzeittrend in diesen zehn Gemeinden gesondert erfasst (D, Kommunalen Atlas Entwicklung der zehn Gemeinden, April 2012 bis Juni 2016).
- S. 45 Im letzten Teil wird die Interpretation schriftlich mitgeliefert (E, Kommentare zu Auffälligkeiten und Interpretation).

2.1 A Land, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016

1. Wir summieren die Leuchtdichte über die Gemeindefläche und erhalten die Anzahl Candela, welche diese Gemeinde emittiert.
2. Wir bilden den Durchschnitt der drei Monate im 2. Quartal (April bis Juni 2016) und stellen die Werte auf einer Übersichtskarte dar. Die monatlichen Messungen des Satelliten beruhen auf Nächten in den zwei Wochen um Neumond und wurden nur ausgewertet, wenn es keine Bewölkung gibt. Pro Monat existiert eine Karte, welche wir auswerten.
3. Wir berechnen die Standardabweichung der drei Monate für den Fehlerbalken in den Ranglisten.
4. Wir listen die Gemeinden in einer Rangliste auf und eruieren die Gewinner und Verlierer der Rangliste (top/bottom ten) separat.

2.2 A+ Land, Leuchtdichte in Vollmonden, 2. Quartal 2016

1. Wir ermitteln die Leuchtdichte in der Gemeinde und teilen diese durch die Leuchtdichte des Vollmondes auf der Erde ($0.020868 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$).
2. Wir bilden den Durchschnitt der drei Monate im 2. Quartal (April bis Juni 2016) und stellen die Werte auf einer Übersichtskarte dar. Die monatlichen Messungen des Satelliten beruhen auf Nächten in den zwei Wochen um Neumond und wurden nur ausgewertet, wenn es keine Bewölkung gibt. Pro Monat existiert eine Karte, welche wir auswerten.
3. Wir berechnen die Standardabweichung der drei Monate für den Fehlerbalken in den Ranglisten.

4. Wir listen die Gemeinden in einer Rangliste auf und eruieren die Gewinner und Verlierer der Rangliste (top/bottom ten) separat.

2.3 B Land, Lichtemissionen, Trend 2012-2016

1. Wir summieren die Leuchtdichte über die Gemeindefläche und erhalten die Anzahl Candela, welche diese Gemeinde emittiert.
2. Wir bilden die Zeitreihe über alle Messwerte (April 2012 bis Juni 2016) und machen eine lineare Regression. Wir berechnen die Veränderung der Summe pro Jahr absolut, d. h. in Candela pro Jahr und relativ, d. h. in Prozent pro Jahr. Im Jahr 2012 gibt es zwei Messwerte (April und Oktober), im Jahr 2013 einen (Januar), da dies noch die Testphase des Satelliten war. Ab 2014 erfolgten die Messungen monatlich regelmässig. Für den Trend nehmen wir alle verfügbaren Zeitwerte bis 2016, Juni mit. Die zeitliche Auflösung für die Regression wurde in halben Monaten festgelegt (Beispiel: Messung im Januar = Jahreszahl + 0.5/12).
3. Wir stellen die Veränderung als Werte auf einer Landeskarte dar.

2.4 B+ Land, Leuchtdichte in Anzahl Vollmonden, Trend 2012-2016

1. Wir ermitteln die Leuchtdichte in der Gemeinde und teilen diese durch die Leuchtdichte des Vollmondes auf der Erde ($0.020868 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$).
2. Wir bilden die Zeitreihe über alle Messwerte (April 2012 bis Juni 2016) und machen eine lineare Regression. Wir berechnen die Veränderung der Leuchtdichte pro Jahr absolut, d. h. in Vollmonden pro Jahr. Im Jahr 2012 gibt es zwei Messwerte (April und Oktober), im Jahr 2013 einen (Januar), da dies noch die Testphase des Satelliten war. Ab 2014 erfolgten die Messungen monatlich regelmässig. Für den Trend nehmen wir alle verfügbaren Zeitwerte bis 2016, Juni mit. Die zeitliche Auflösung für die Regression wurde in halben Monaten festgelegt (Beispiel: Messung im Januar = Jahreszahl + 0.5/12).
3. Wir stellen die Veränderung als Werte auf einer Landeskarte dar.

2.5 C Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016

1. Wir stellen die Leuchtdichte in der maximal erhältlichen Auflösung (ein Pixel = $300 \times 460 \text{ m}$) für jede der ausgewählten Gemeinden auf einer Karte in Landeskoordinaten dar. Wir ergänzen die Skala mit dem natürlichen Vollmond, um normierte Grenzen der Europäischen Beleuchtungsklassen für Strassen (ME1 bis ME6, EN13201) und um die Lichtschutzzonen der Empfehlungen der Leadership in Energy and Environmental Design (LEED, LZ1-LZ4,³). So kann man Gebiete mit Handlungsbedarf lokalisieren. Die Klassen und Zonen haben wir fürs Verständnis im Anhang durch Beschreibungen ergänzt S. 54.
2. Angrenzende Gemeinden werden in Graustufen abgebildet, damit man die Fortsetzung von Licht erahnen kann, und sie werden in eine relative Rangliste gebracht und aufgeführt, damit man die eigenen Position der Gemeinde abschätzen kann.
3. Zusätzlich bilden wir das Histogramm für die Gemeinde ab, das ein Gespür für die Verteilung der Leuchtdichten und den Bestand an naturnahem Licht (Dunkel) gibt. Das gibt ein Mass für den Handlungsbedarf.
4. Ähnlich wie Lichtschutzzonen werden die Lichtmengen in aufsteigende Klassen unterteilt, welche die Dringlichkeit für Massnahmen zum Schutz der Umwelt nahelegen.
5. Für die hellere Stadt Luxemburg haben wir auf Wunsch die Zonenuntergrenzen aus dem Histogramm farbig in die Karte übertragen.

2.6 D Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, Trend 2012-2016

1. Wir bilden die Zeitreihe über alle Messwerte (April 2012 bis Juni 2016) und machen eine lineare Regression auf jedem Messpixel. Wir berechnen die Veränderung der Leuchtdichte pro Jahr pro Messpixel für jede ausgewählte Gemeinde.
2. Wir stellen die Veränderung als Werte auf einer Gemeindekarte dar. Die Unsicherheit der Trends als Ganzes ist jedoch beachtlich, wie man an den Ranglisten von B erkennt. Keine Veränderung wird grau dargestellt, damit die Karte lesbar bleibt.
3. Die Skala umfasst nur die zentrale Gemeinde und nicht das umliegende Land.
4. Angrenzende Gemeinden werden nur schwach gefärbt in Grau abgebildet, damit man die Fortsetzung des Trends erahnen kann. Die Farben werden auf der Skala um dunkleres Blaugrün und Dunkelrot ergänzt, falls die zentrale Farbskala unter oder überschritten wird. Umliegende Gemeinden werden in eine relative Rangliste gebracht und aufgeführt, damit man die eigene Position der Gemeinde im Trend abschätzen kann.
5. Zusätzlich bilden wir das Histogramm für die Gemeinde ab, das ein Gespür für die flächigen Anteile am Trend gibt.

2.7 Weshalb wir die Summe der Lichtmenge pro Gemeinde auswerten

Wieso wird die künstliche Lichtmenge in Bezug zur politischen Einheit gesetzt und nicht in Bezug auf die Fläche oder in Bezug auf die Anzahl Einwohner? Diese Frage wurde uns schon oft gestellt und deshalb hier unsere Antwort darauf: Die Leuchtdichte oder Lichtmenge pro Kopf kann jederzeit aus den statistischen Eckwerten der Gemeinde ausgewertet werden. Die Aussage die dadurch entsteht, wäre jedoch jeweils eine andere. Mit Licht pro Fläche, also der Leuchtdichte, lässt sich die örtliche Aufhellung gut beschreiben, daher verwenden wir diese in C für die Gemeindekarten. Eine Unterscheidung von Siedlungsgebieten und Freiräumen ist rasch möglich, da wir hier die Lichtquellen betrachten. Aber als durchschnittliche Leuchtdichte pro Gemeindegebiet wird sie nahezu wertlos, da Gemeindeflächen in der Regel mehrere Quadratkilometer umfassen. Dies wäre, wie wenn man die Bevölkerungsdichte pro Gemeinde angeben würde, statt die Einwohnerzahl. Würde man die Lichtmenge pro Einwohner berechnen, wäre das eine Aussage zum Einsatz von Licht, ob er haushälterisch oder verschwenderisch erfolgt. Das erinnert aber eher an die Energiepolitik als an die Störwirkung auf die Umwelt.

Mit der Lichtmenge pro Gemeinde erhalten politisch Verantwortliche eine vergleichbare Angabe zu den Nachbarn, welche unabhängig von der eigenen Gemeindegrösse (Fläche, Einwohner) betrachtet werden soll, da die Fernwirkung auf die Umwelt (Lichtglocke) ausschliesslich von der freigesetzten Lichtmenge abhängt. Jede Gemeinde ist damit für ihre gesamte emittierte Lichtmenge verantwortlich, die nicht durch eine grosse Fläche oder Einwohnerzahl gemildert wird.

Der Blick von oben (vom Satelliten) ist ein guter Ansatz, um unnötige Lichtemissionen besser zu sehen (z. B. Skybeamer, Gewächshäuser, hell erleuchtete Plätze). Alles Licht, was vom Satelliten einsehbar ist, erfüllt am Himmel keinen Zweck, sondern trägt zur Lichtverschmutzung (Aufhellung der Umwelt) bei. Von Städten wie Zürich oder Luxemburg ist eine Verdoppelung der natürlichen Himmelhelligkeit durch künstliche Aufhellung im Umkreis von etwa 25 km nachgewiesen (Falchi et al., Daten und Eichung von 2015⁴). Jedoch gibt es kein Licht, das nicht wenigstens indirekt zur Lichtverschmutzung beiträgt. Um eine Strasse sehen zu können, wird sie beleuchtet. Eine beleuchtete Strasse emittiert immer auch Licht nach oben und hellt den Himmel mit auf. Daher ist es vernünftig, Strassen gemäss Normen dort und dann zu beleuchten, wo und wann es für die Verkehrssicherheit erforderlich ist und in dem Mass, das die Norm vorschreibt und nicht viel heller. Mit moderner Technik ist es möglich den Lichtstrom elektronisch konstant zu regeln, so dass die Alterung der Lichtquellen

kompensiert wird. Es muss daher nicht mehr heller beleuchtet werden, damit der Wert am Ende der Lebensdauer erreicht wird.

2.8 Die durchschnittliche Leuchtdichte vergleichbar gemacht

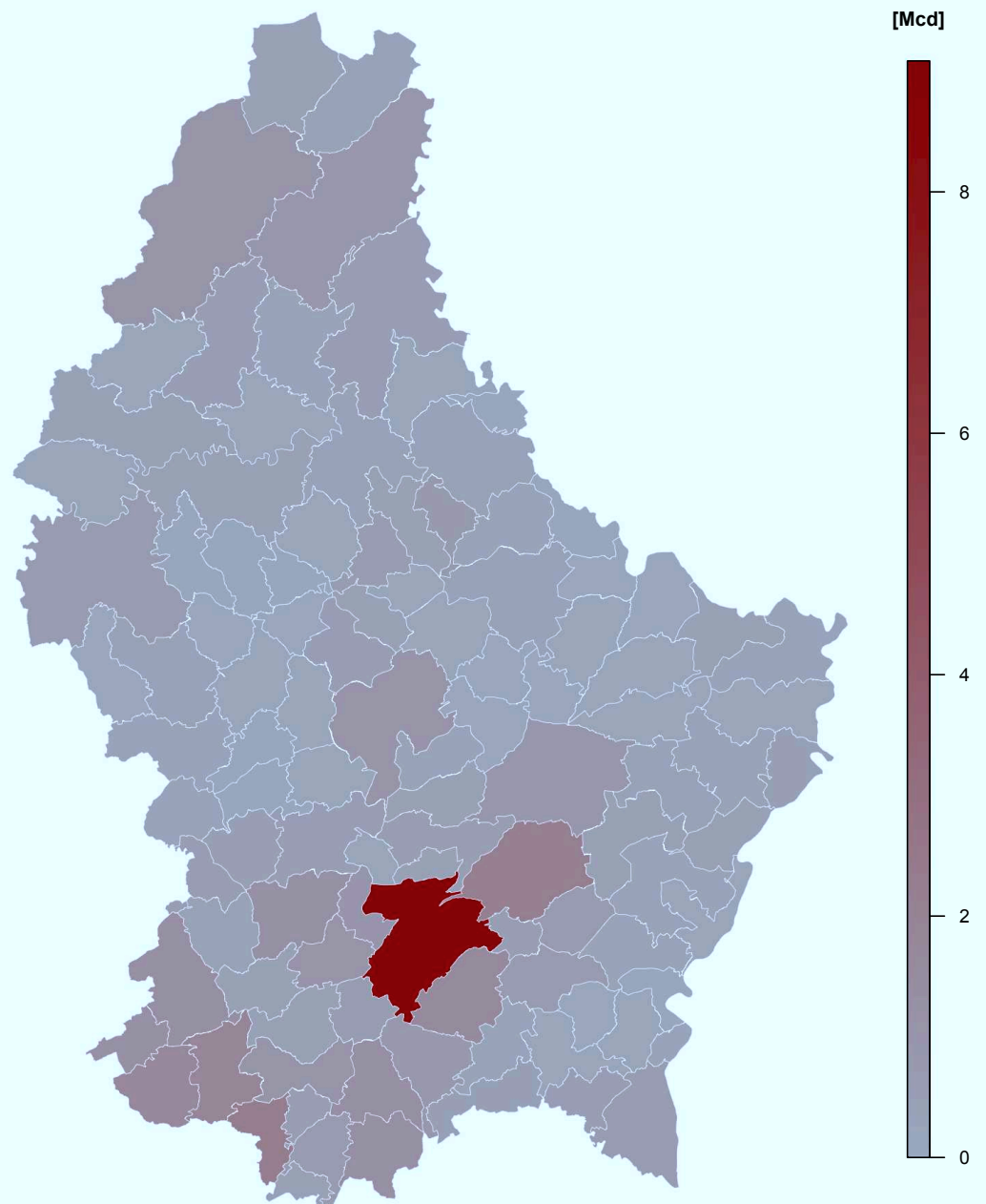
Wenn man die Lichtstärke in Candela auf die Fläche in Quadratmeter bezieht, erhält man die Leuchtdichte [cd/m^2]. Nun sind die natürlichen Leuchtdichten in der Nacht sehr gering (im Bereich von Null bis $0.02 \text{ cd}/\text{m}^2$), da maximal der Vollmond die Szenerie beleuchtet und eine maximale Reflexion von Schnee oder Eis (Reflexionsgrad 0.3-0.85) ist die vom Satellit gemessene Dunkelheit auf tiefem Niveau. Das Material mit der durchschnittlichen Leuchtdichte wurde ab S. 13 publiziert. Dies jedoch als Vielfaches des Vollmondes, da uns Menschen Leuchtdichten so wenig vertraut sind. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie Extreme vermeidet. Das heisst eine grosse Fläche mit wenig Licht reduziert die Verantwortung, eine hohe Leuchtdichte auf dem ganzen Gebiet fällt dennoch ins Gewicht. Dieses Material kann möglicherweise eine Einschätzung für die Schlafgesundheit geben.

3 Resultate

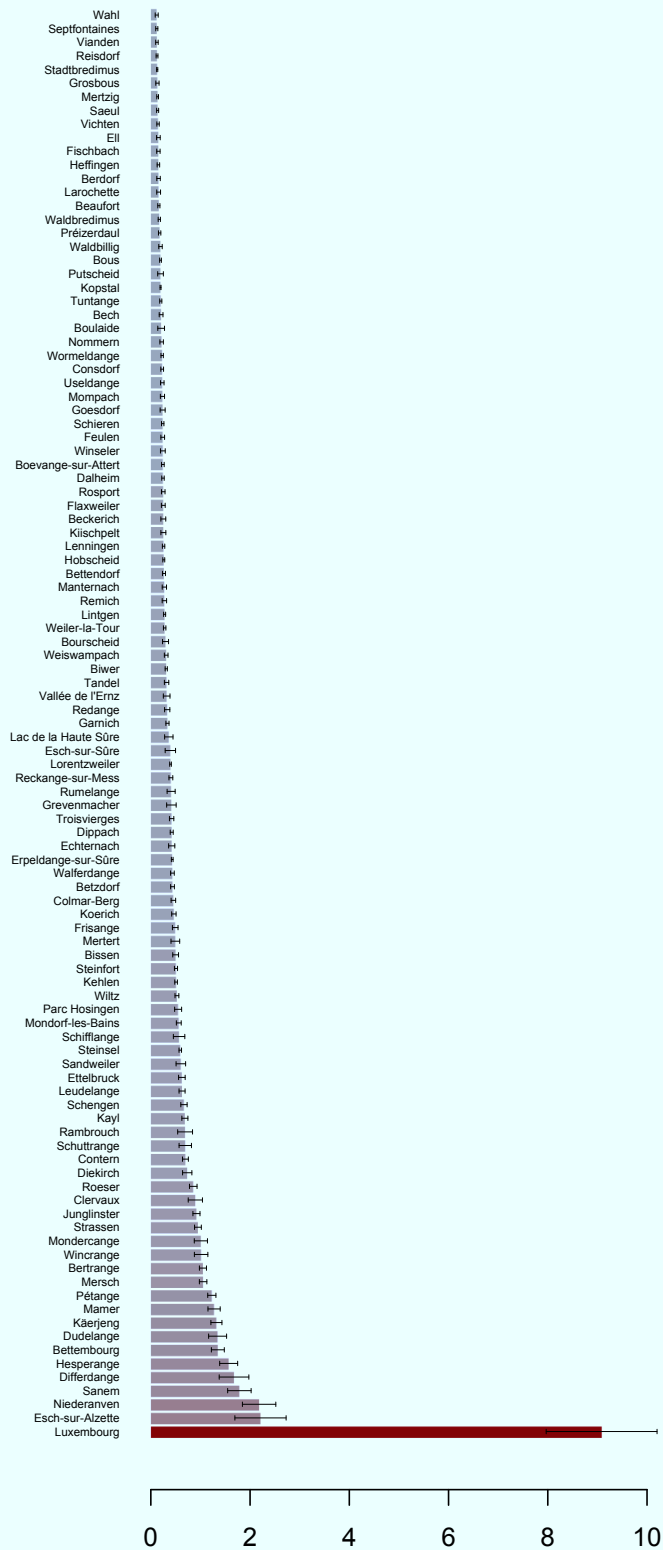
3.1 A Land, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016

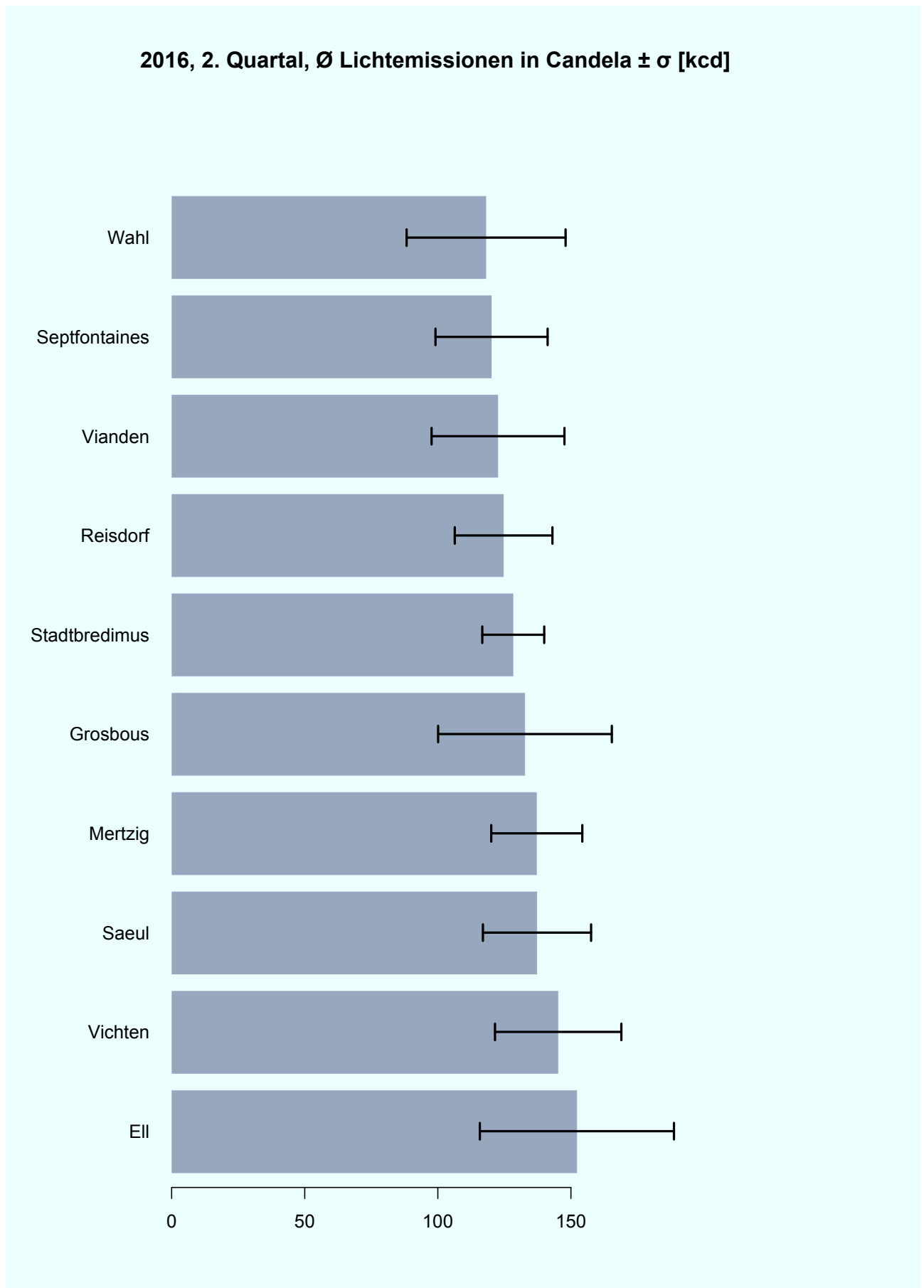
- S. 8 Landkarte mit Lichtemissionen in Candela pro Gemeinde, Durchschnittswert vom 2. Quartal 2016
- S. 9 Rangliste mit Lichtemissionen in Candela pro Gemeinde, Durchschnittswerte vom 2. Quartal 2016 inkl. Standardabweichung
- S. 10 Auszug Rangliste top-ten mit Lichtemissionen in Candela pro Gemeinde, Durchschnittswerte vom 2. Quartal 2016 inkl. Standardabweichung
- S. 11 Auszug Rangliste bottom-ten mit Lichtemissionen in Candela pro Gemeinde, Durchschnittswerte vom 2. Quartal 2016 inkl. Standardabweichung

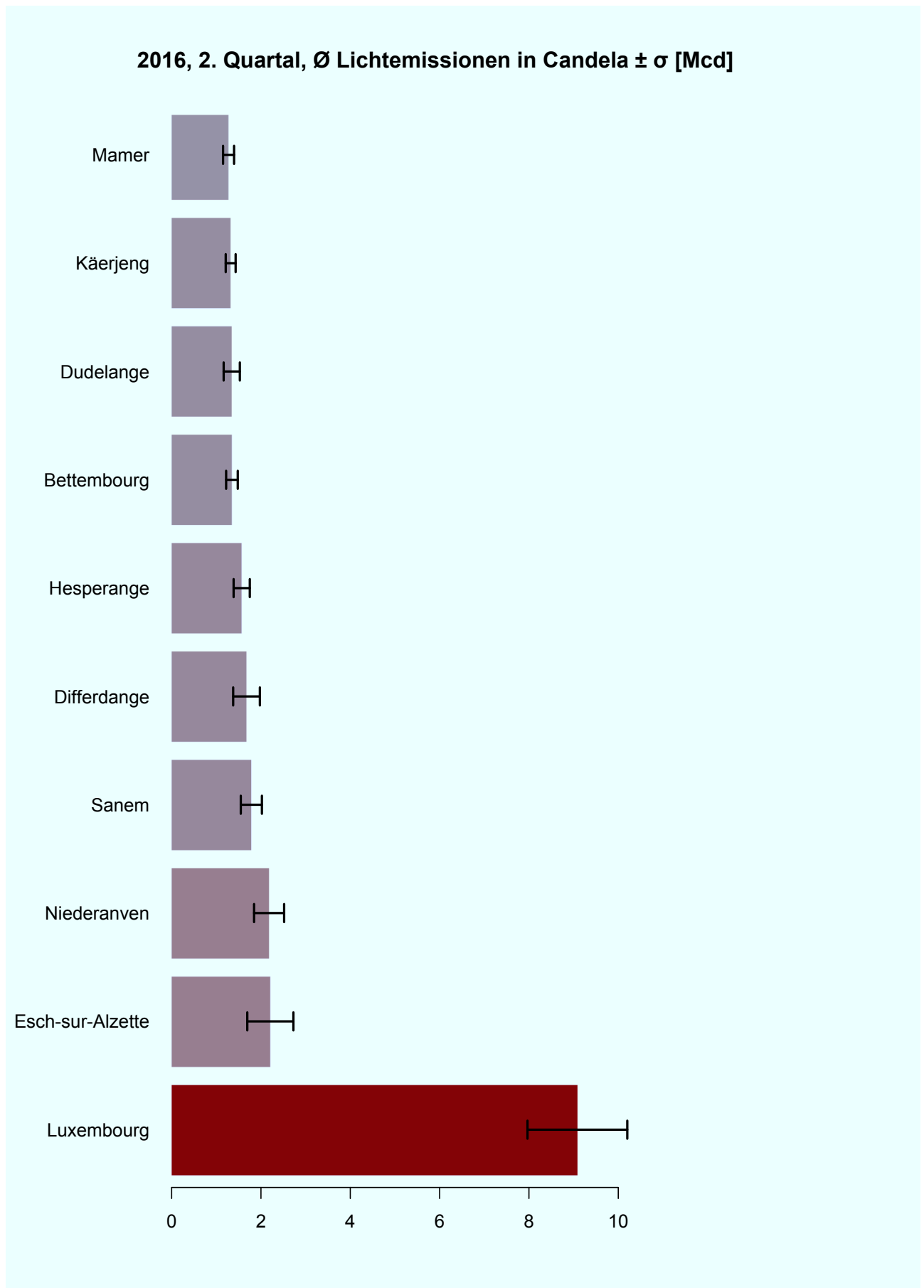
2016, 2. Quartal, Ø Lichtemissionen pro Gemeinde in Candela



2016, 2. Quartal, Ø Lichtemissionen in Candela ± σ [Mcd]



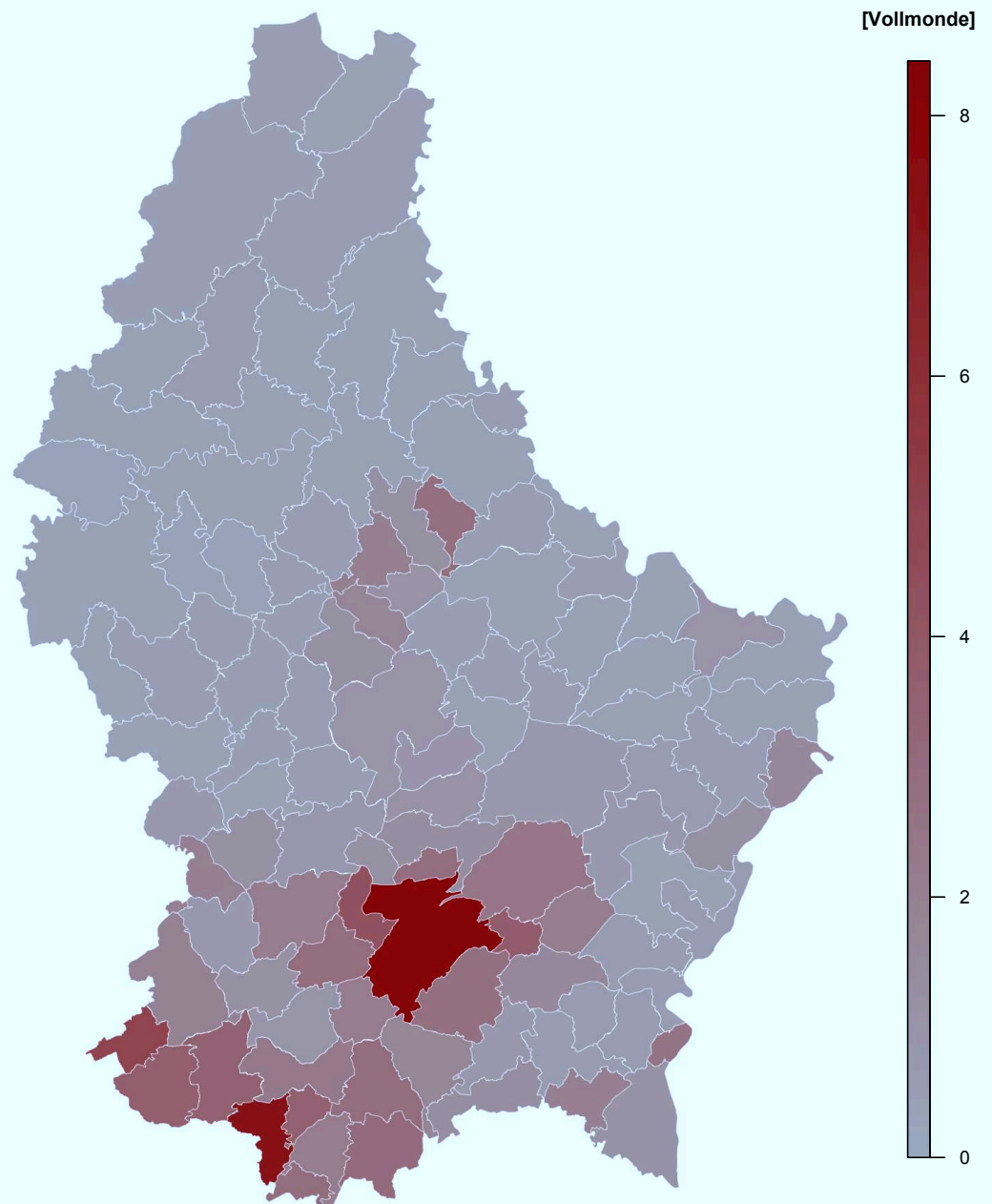




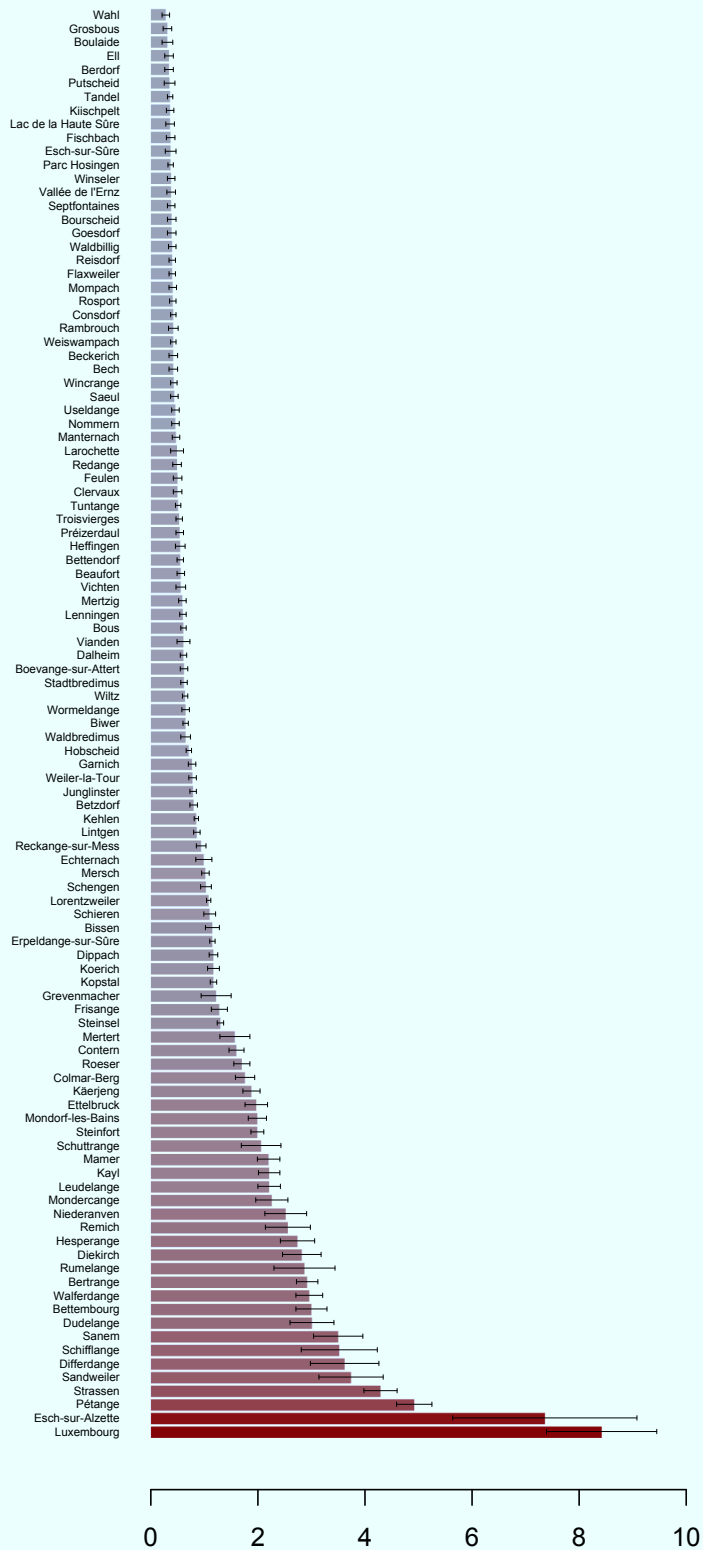
3.2 A+ Land, Leuchtdichte in Vollmonden, 2. Quartal 2016

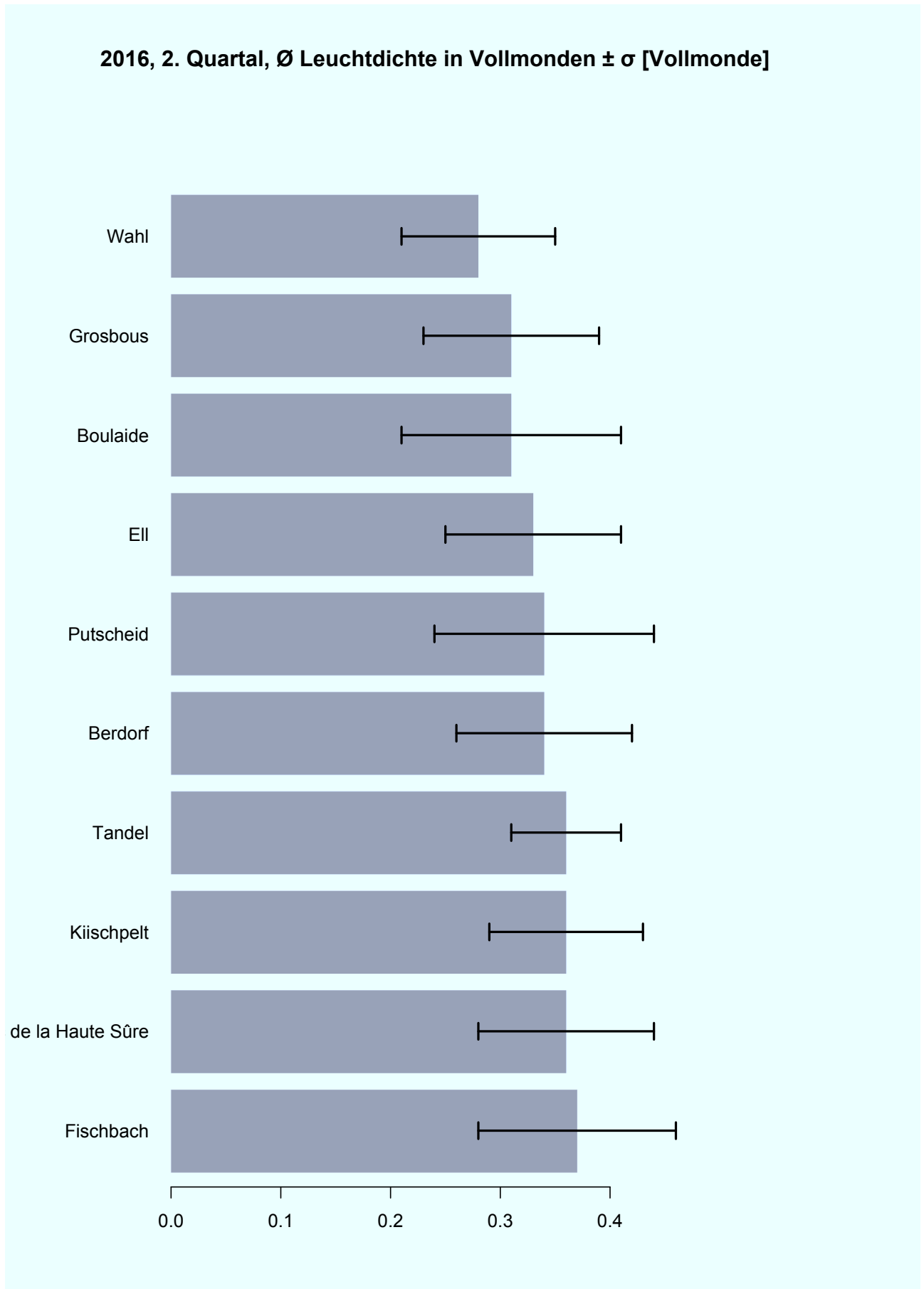
- S. 13 Landeskarte mit Leuchtdichte in Vollmonden pro Gemeinde, Durchschnittswert vom 2. Quartal 2016
- S. 14 Rangliste mit Leuchtdichte in Vollmonden pro Gemeinde, Durchschnittswerte vom 2. Quartal 2016 inkl. Standardabweichung
- S. 15 Auszug Rangliste top-ten mit Leuchtdichte in Vollmonden pro Gemeinde, Durchschnittswerte vom 2. Quartal 2016 inkl. Standardabweichung
- S. 16 Auszug Rangliste bottom-ten mit Leuchtdichte in Vollmonden pro Gemeinde, Durchschnittswerte vom 2. Quartal 2016 inkl. Standardabweichung

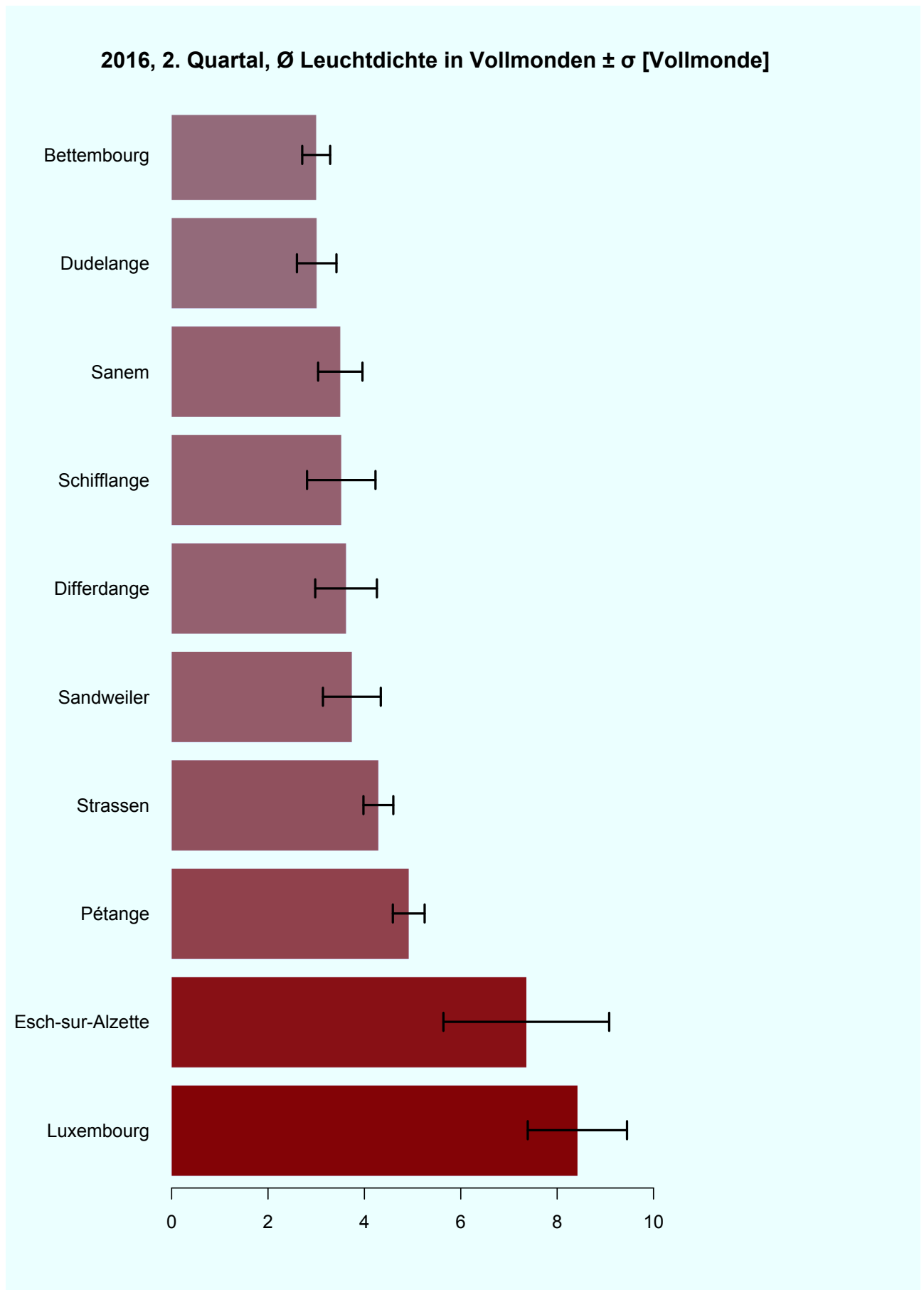
2016, 2. Quartal, Ø Leuchtdichte pro Gemeinde in Vollmonden



2016, 2. Quartal, Ø Leuchtdichte in Vollmonden ± σ [Vollmonde]





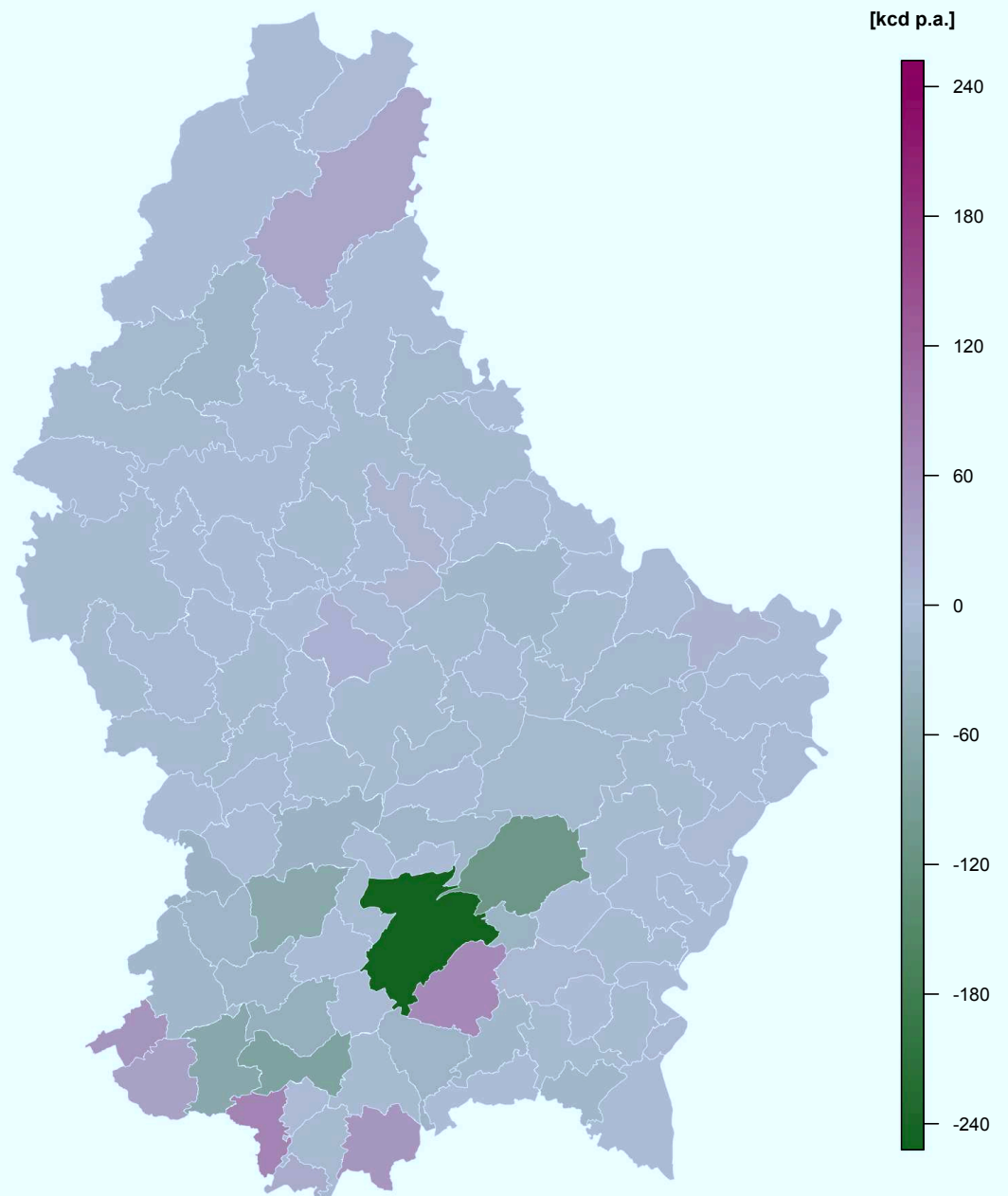


3.3 B Land, Lichtemissionen, Trend 2012-2016

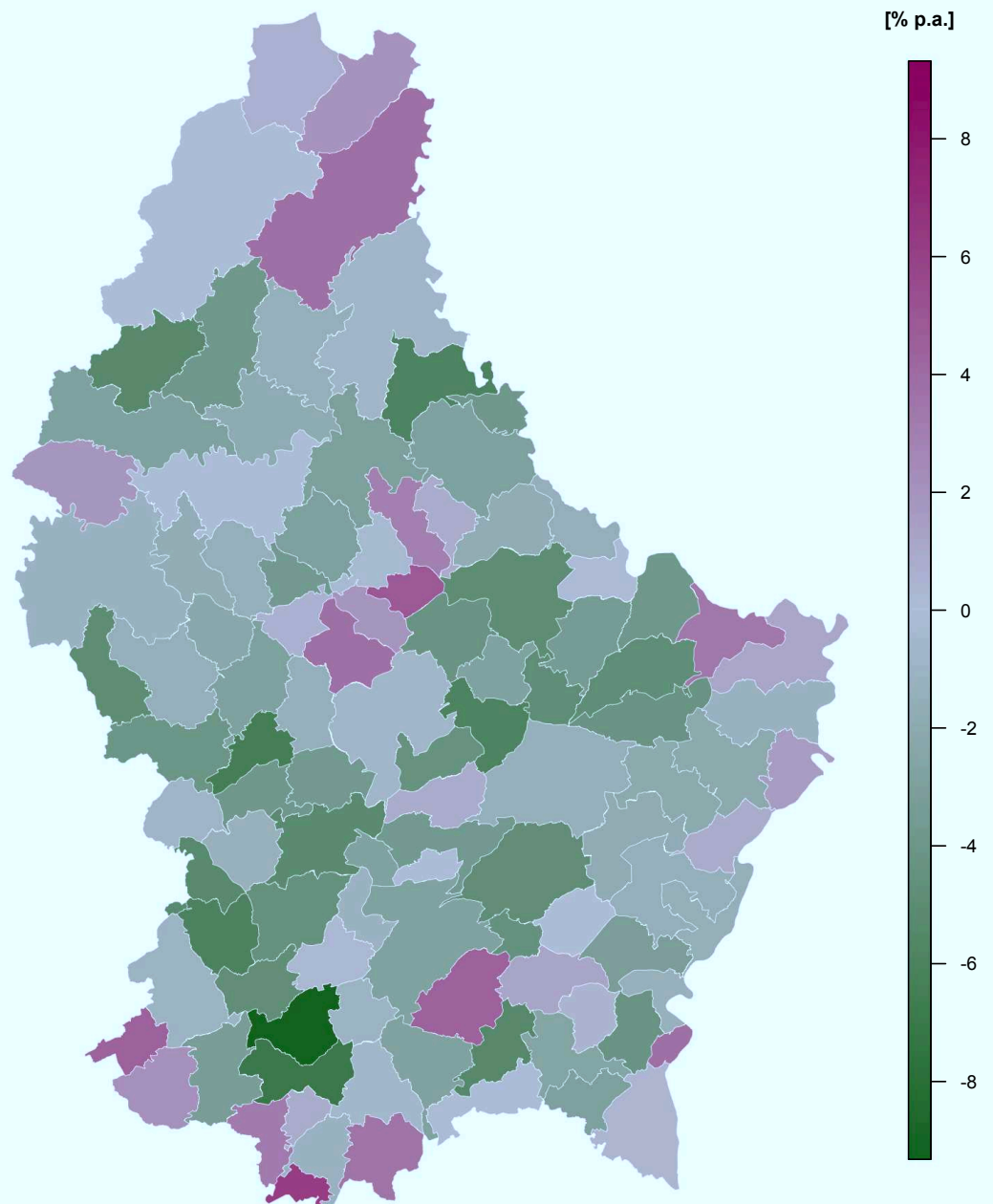
- S. 18 Landeskarte mit durchschnittlicher Änderung der Lichtemissionen in Candela pro Gemeinde pro Jahr, jährliche Zu-/Abnahme von April 2012 bis Juni 2016
- S. 19 Landeskarte mit prozentualer Änderung der Lichtemissionen pro Gemeinde pro Jahr, jährliche relative Zu-/Abnahme von April 2012 bis Juni 2016

Durch vielerlei Faktoren ist die Unsicherheit der Trendanalyse gross. Einerseits fehlten im April 2012 für Streulicht korrigierte Daten des Satelliten und es gab für diese Studie aus den Jahren 2012-2013 nur drei publizierte Testmonate. Andererseits sind auch spätere Messmonate teils grossen saisonalen Schwankungen unterworfen (z.B. Schnee im Winter, Weihnachtsbeleuchtung im Dezember), welche aber durch zu wenige Jahre statistisch noch nicht genügend auseinander dividiert werden können. Ab 2018 sollte es möglich sein, den Trend für saisonale Schwankungen zu korrigieren, da dann genügend Messmonate vorhanden sind.

2012-4 bis 2016-6, Ø Trend der Lichtemissionen pro Gemeinde pro Jahr



2012-4 bis 2016-6, Ø Trend der Lichtemissionen pro Gemeinde pro Jahr

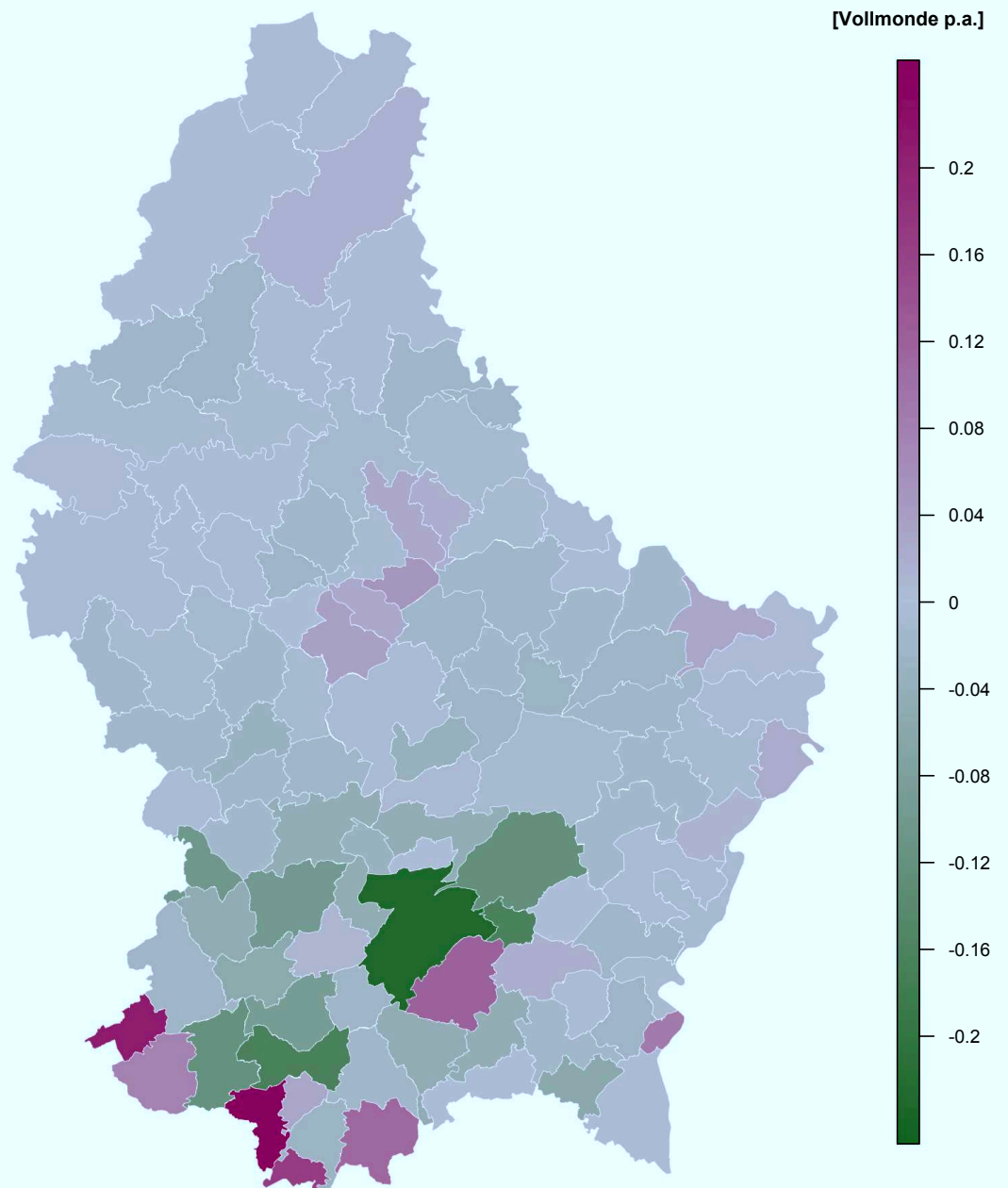


3.4 B+ Land, Leuchtdichte in Vollmonden, absoluter Trend 2012-2016

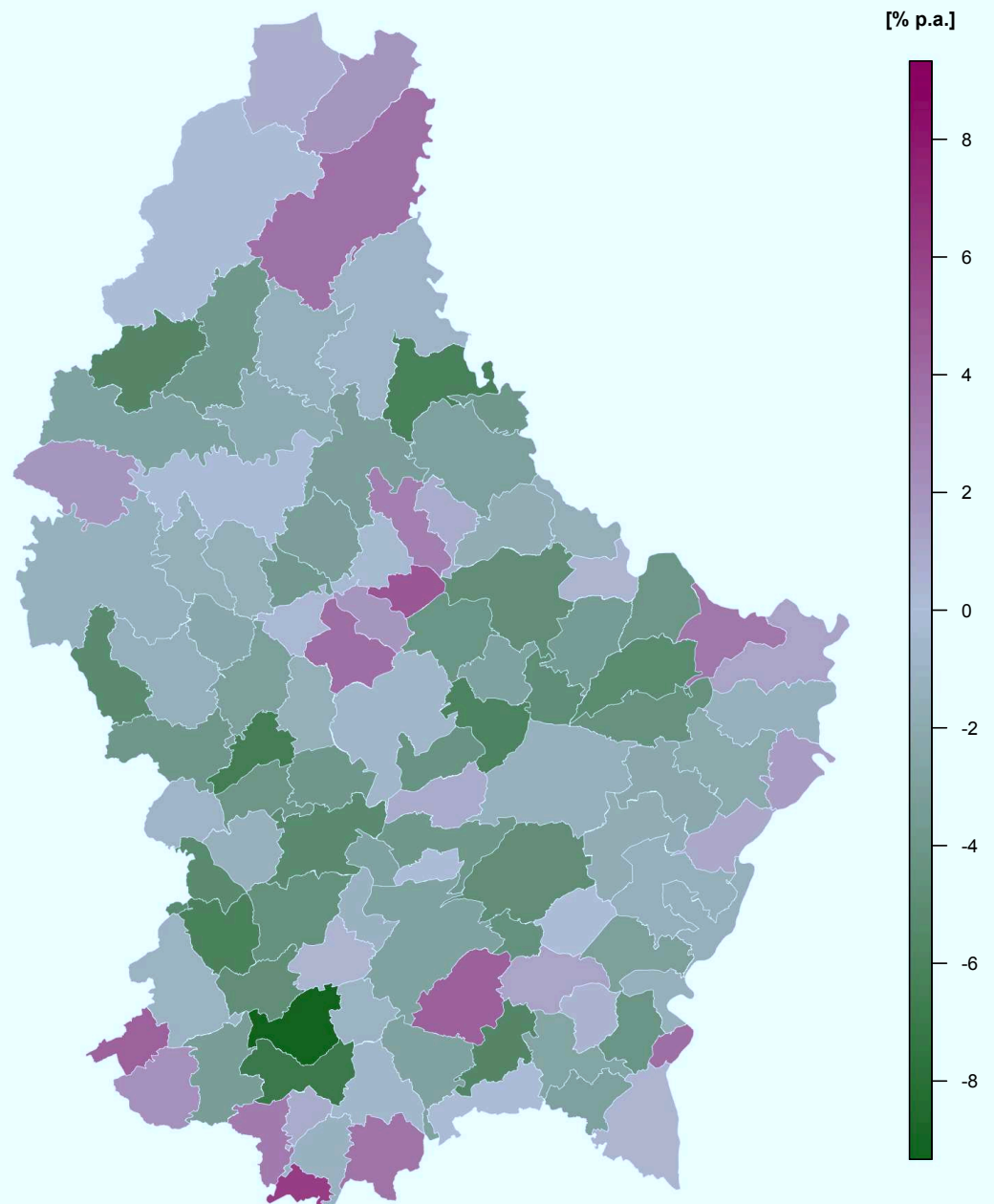
- S. 21 Landeskarte mit durchschnittlicher Änderung der Leuchtdichte in Vollmonden pro Gemeinde pro Jahr, jährliche Zu-/Abnahme von April 2012 bis Juni 2016

Durch vielerlei Faktoren ist die Unsicherheit der Trendanalyse gross. Einerseits fehlten im April 2012 für Streulicht korrigierte Daten des Satelliten und es gab für diese Studie aus den Jahren 2012-2013 nur drei publizierte Testmonate. Andererseits sind auch spätere Messmonate teils grossen saisonalen Schwankungen unterworfen (z.B. Schnee im Winter, Weihnachtsbeleuchtung im Dezember), welche aber durch zu wenige Jahre statistisch noch nicht genügend auseinander dividiert werden können. Ab 2018 sollte es möglich sein, den Trend für saisonale Schwankungen zu korrigieren, da dann genügend Messmonate vorhanden sind.

2012-4 bis 2016-6, Ø Trend der Leuchtdichte pro Gemeinde pro Jahr



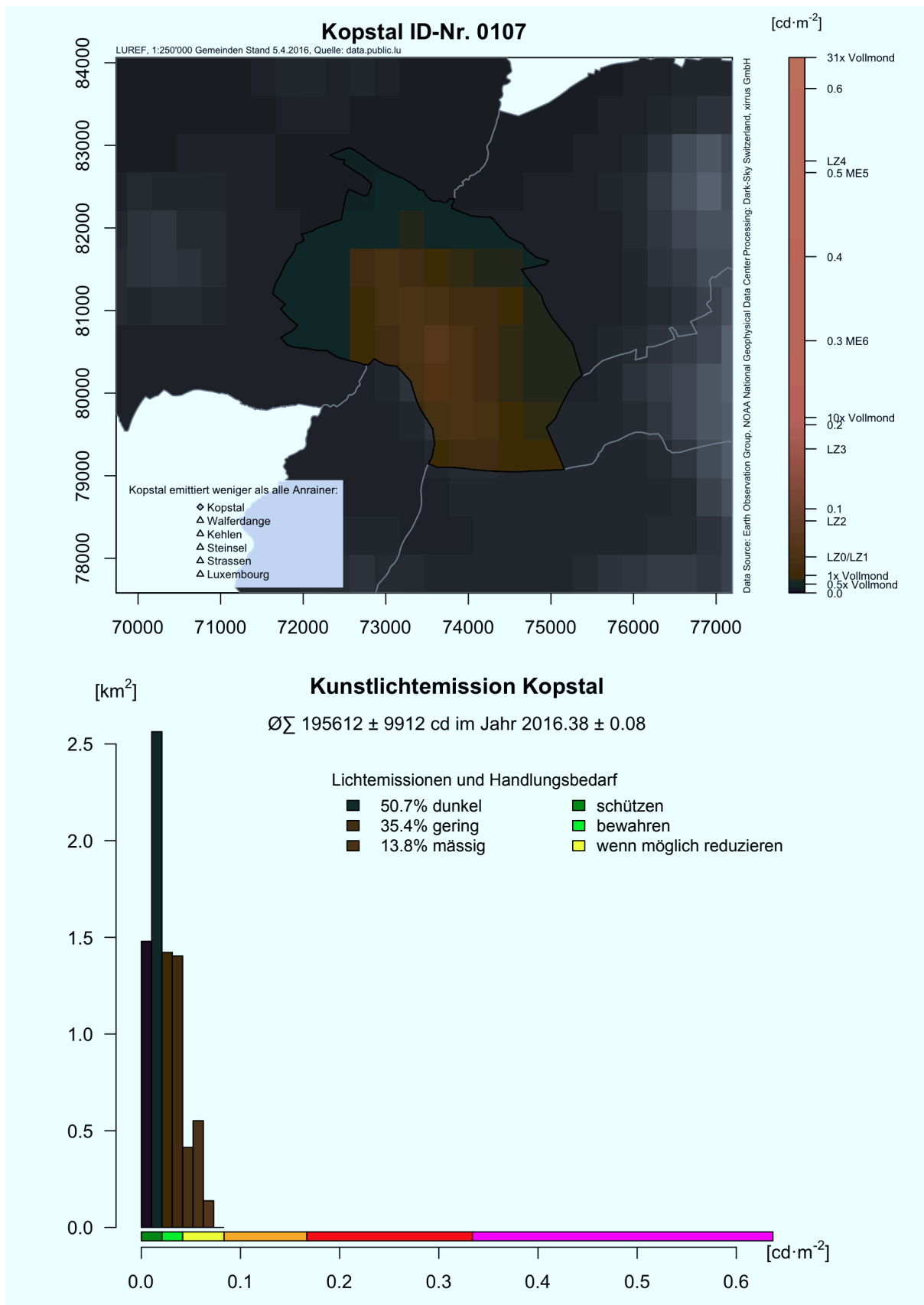
2012-4 bis 2016-6, Ø Trend der Leuchtdichte pro Gemeinde pro Jahr

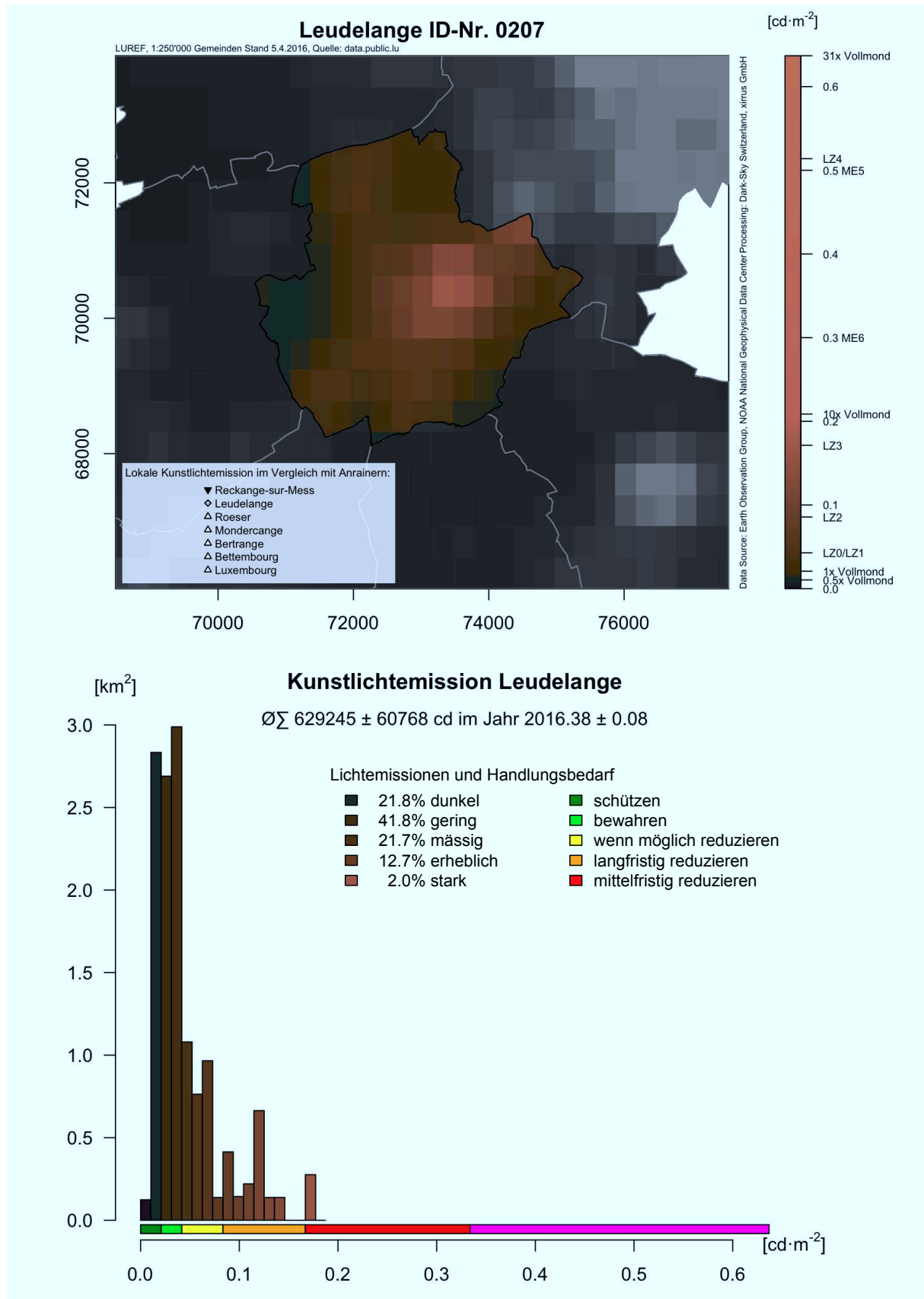


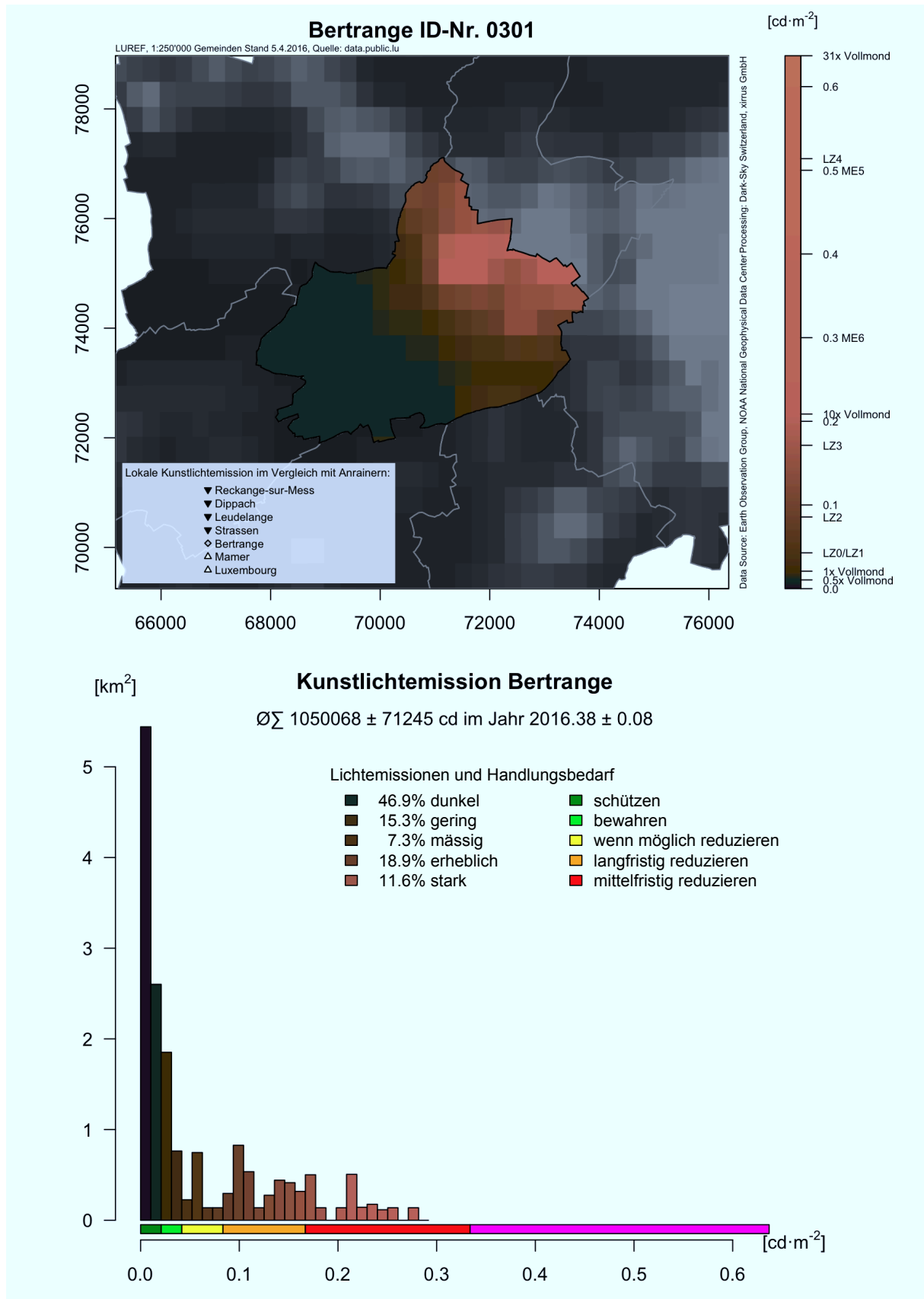
3.5 C Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016

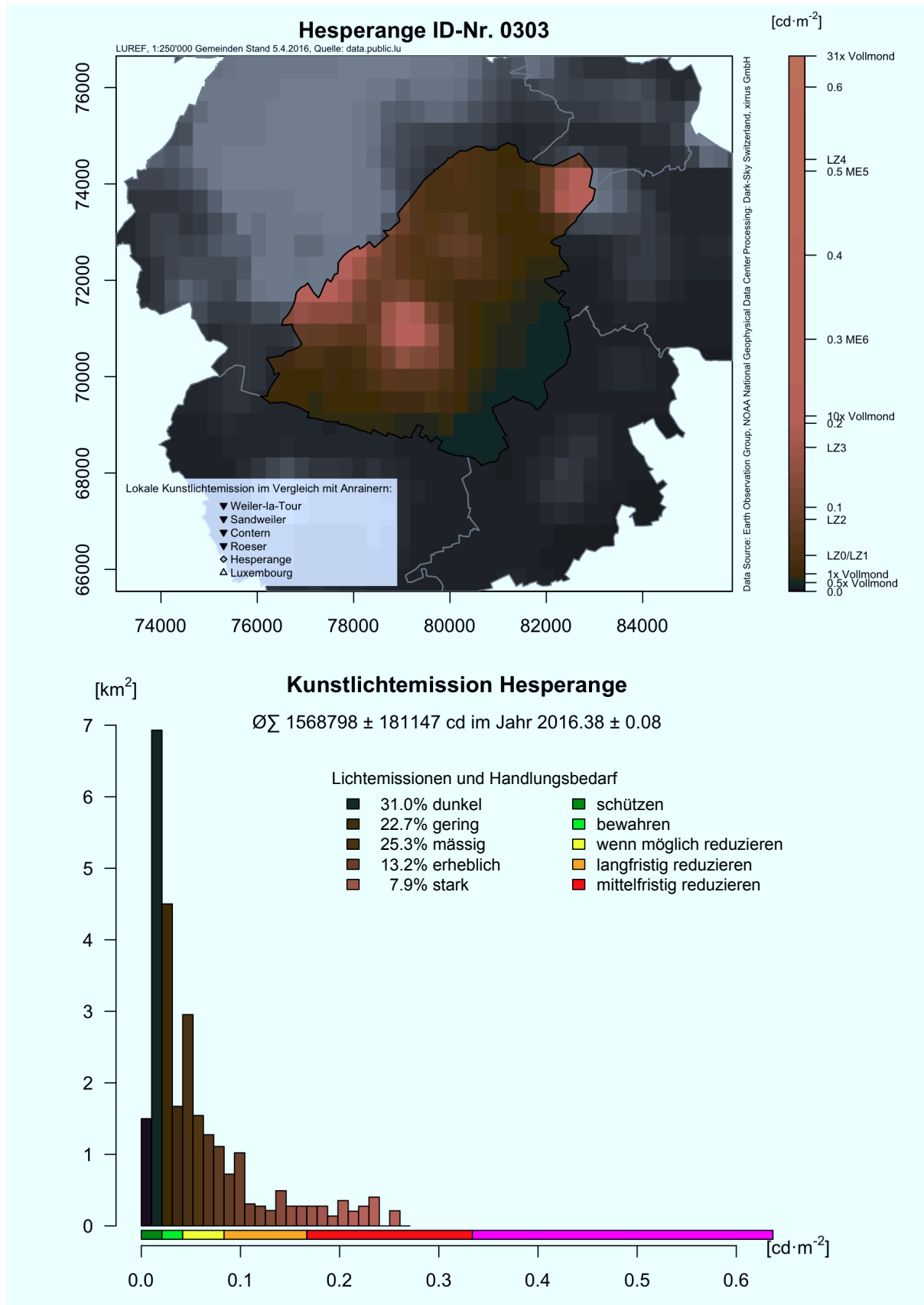
- Die Identifikation und Gemeindegrenzen stammen aus den offiziellen Angaben von data.public.lu.
- Durchschnittlich gemessene Leuchtdichten in $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ mit erweiterter Skala.
- Rangfolge im Vergleich zu den Nachbargemeinden.
- Globale Farbskala, Einschätzung der Lichtemissionen und Handlungsbedarf durch Dark-Sky Switzerland.

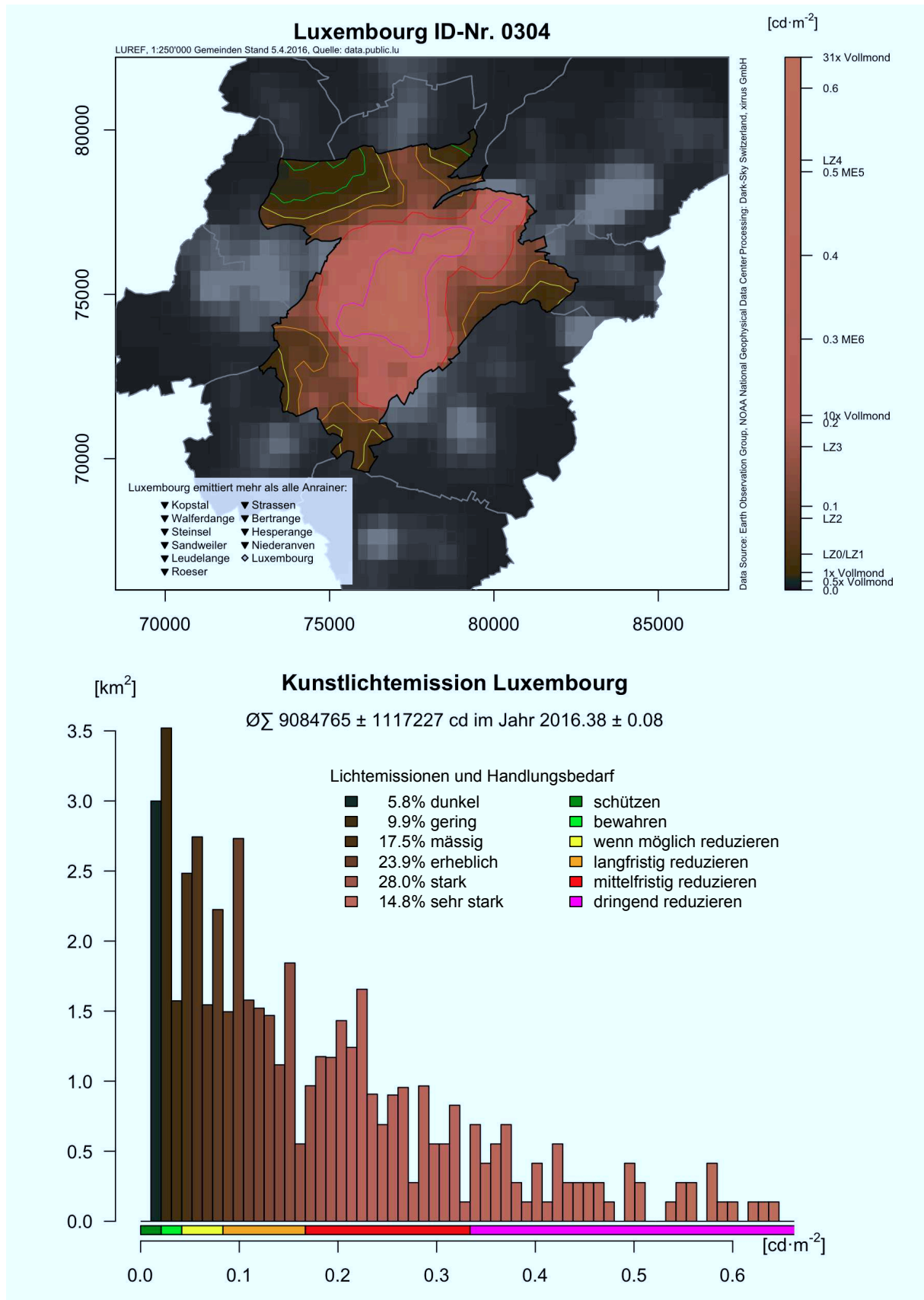
S. 24	Kopstal
S. 25	Leudelange
S. 26	Bertrange
S. 27	Hesperange
S. 28	Luxembourg
S. 29	Niederanven
S. 30	Sandweiler
S. 31	Steinsel
S. 32	Strassen
S. 33	Walferdange

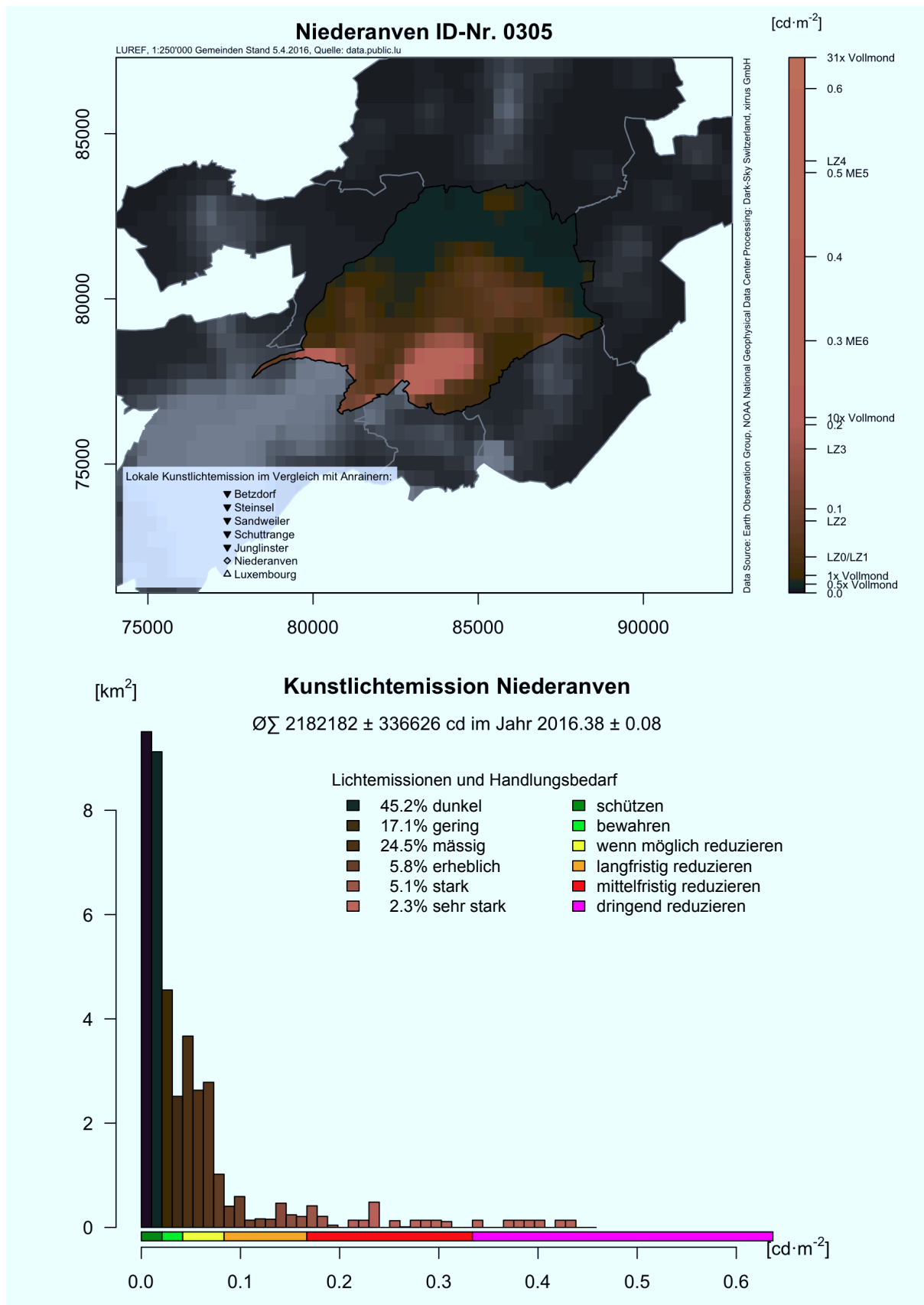


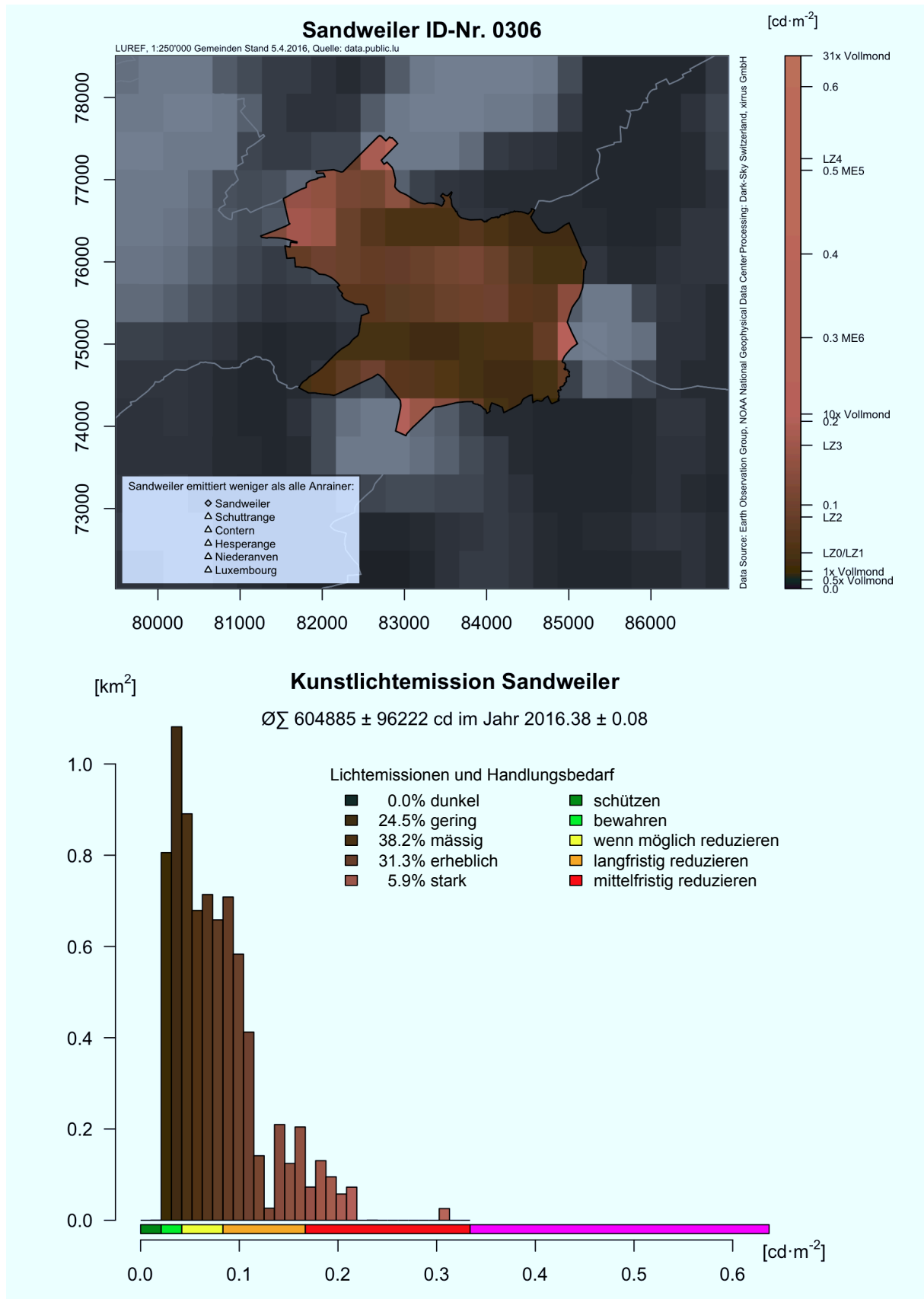


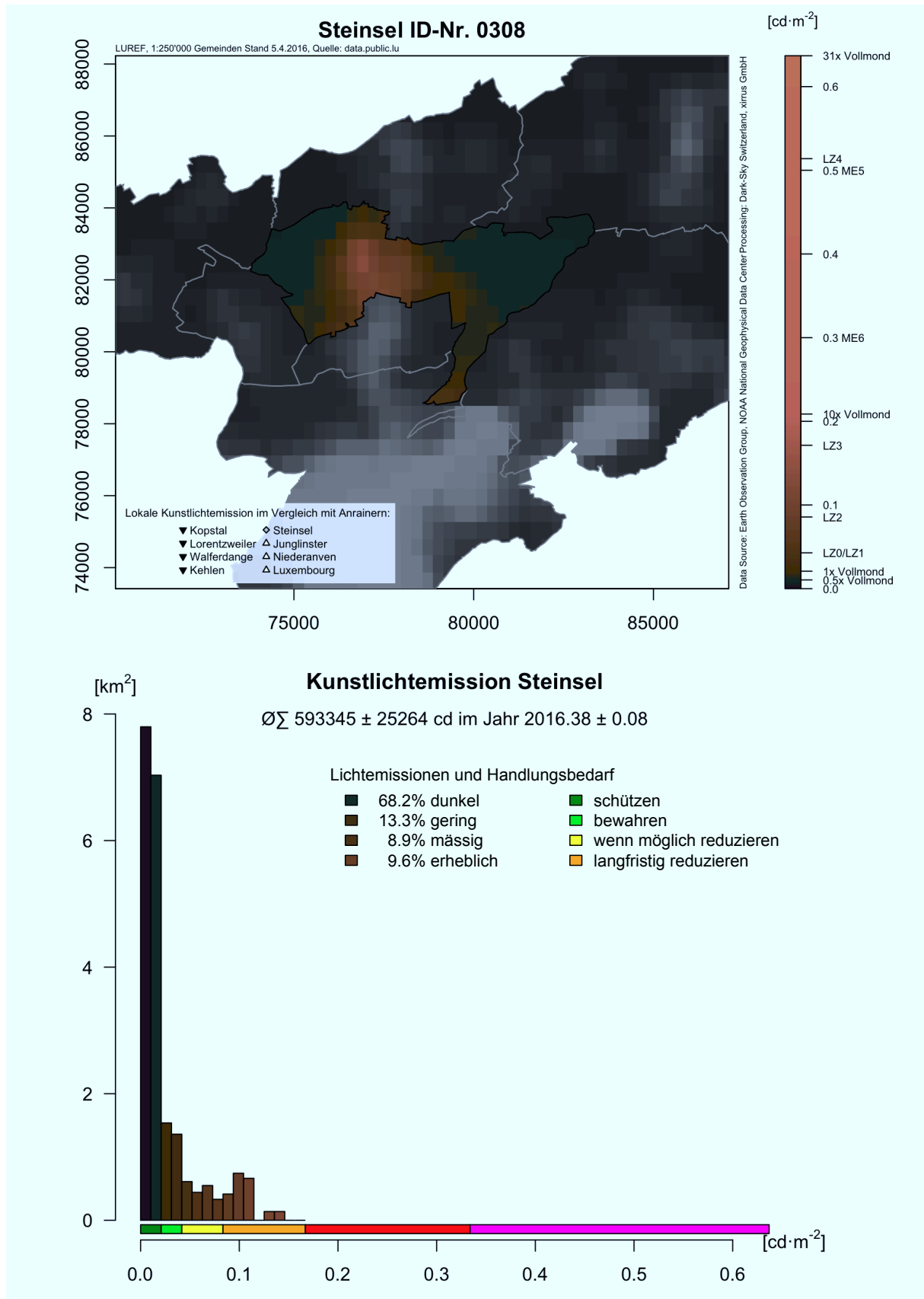


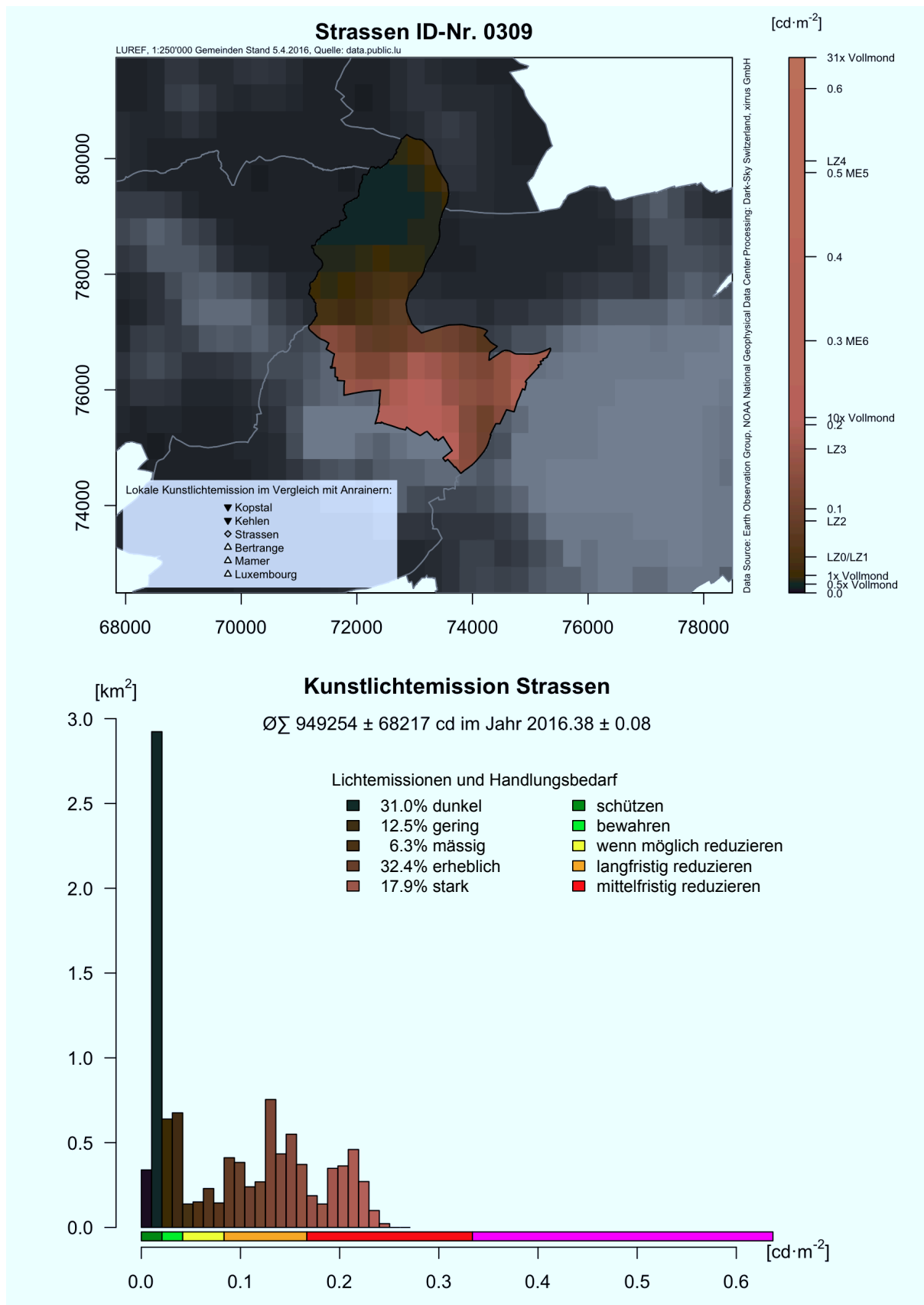


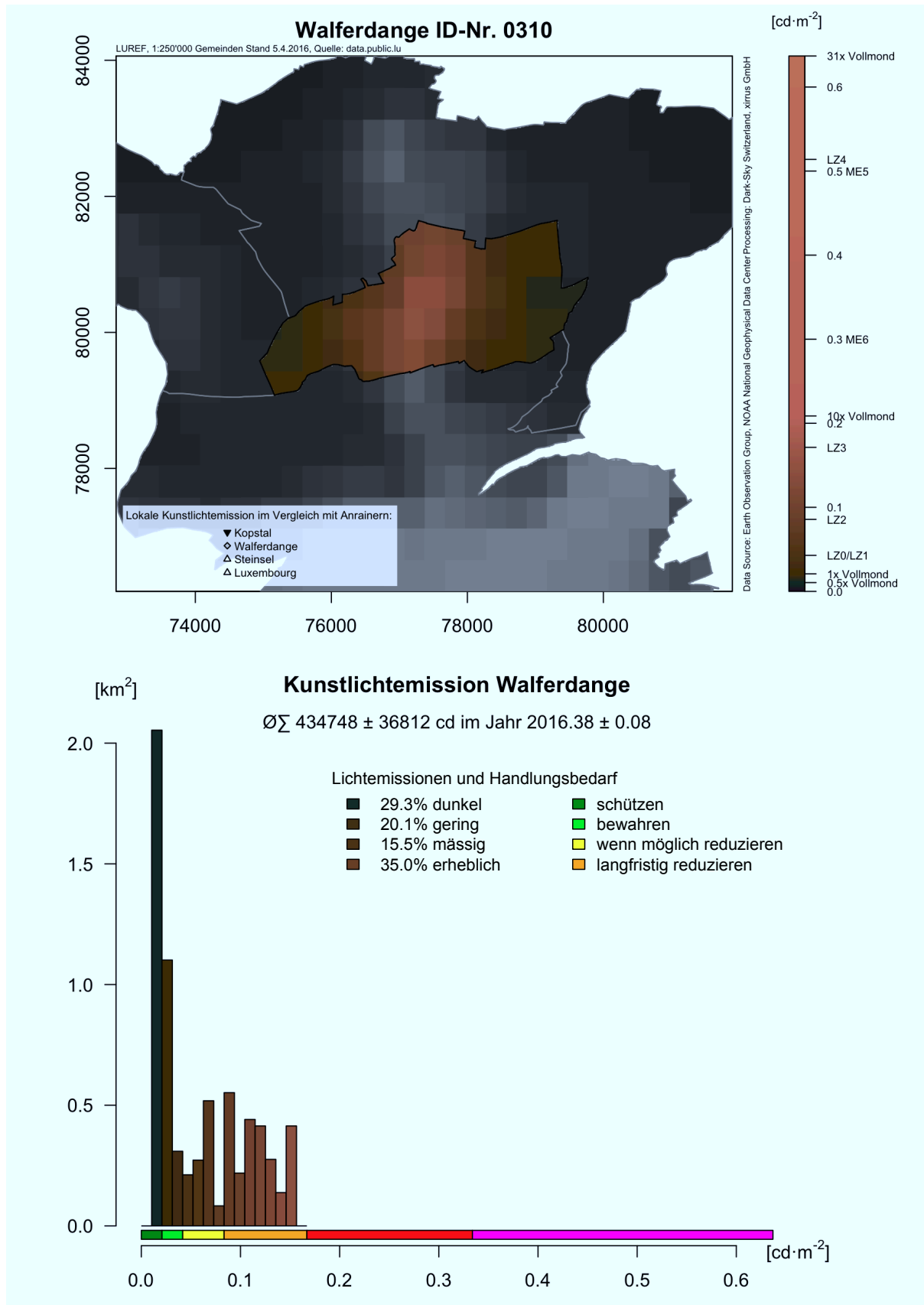








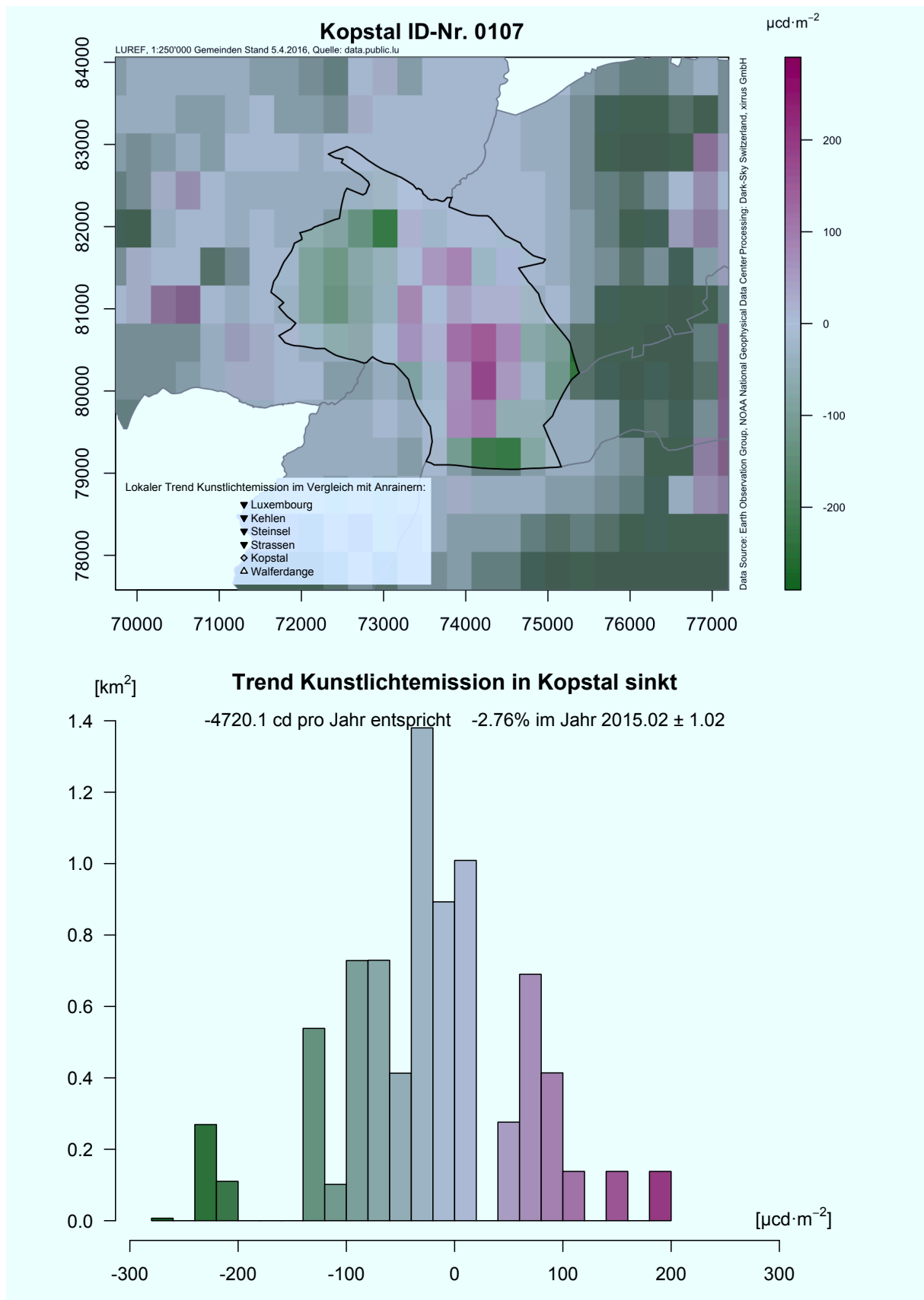


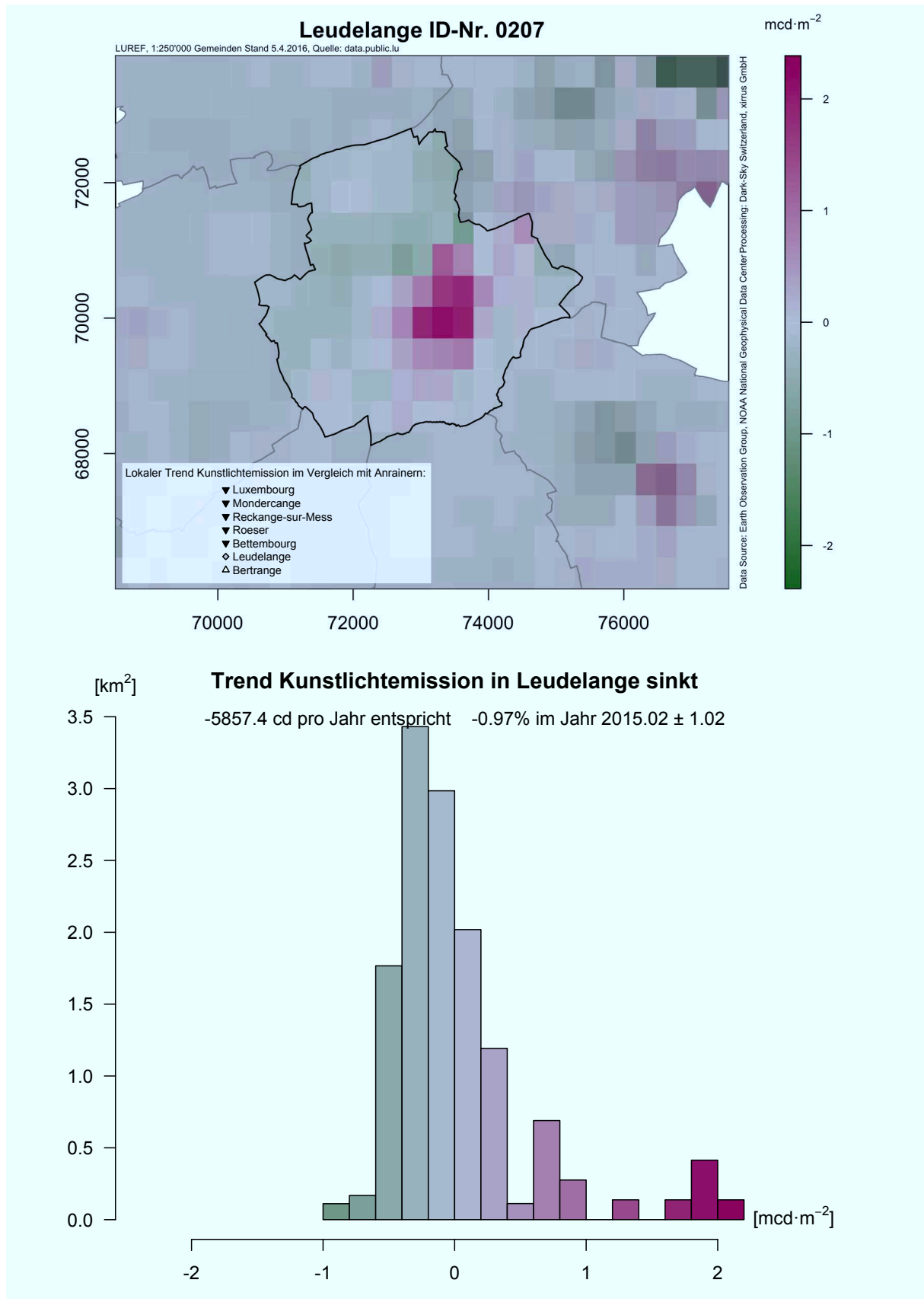


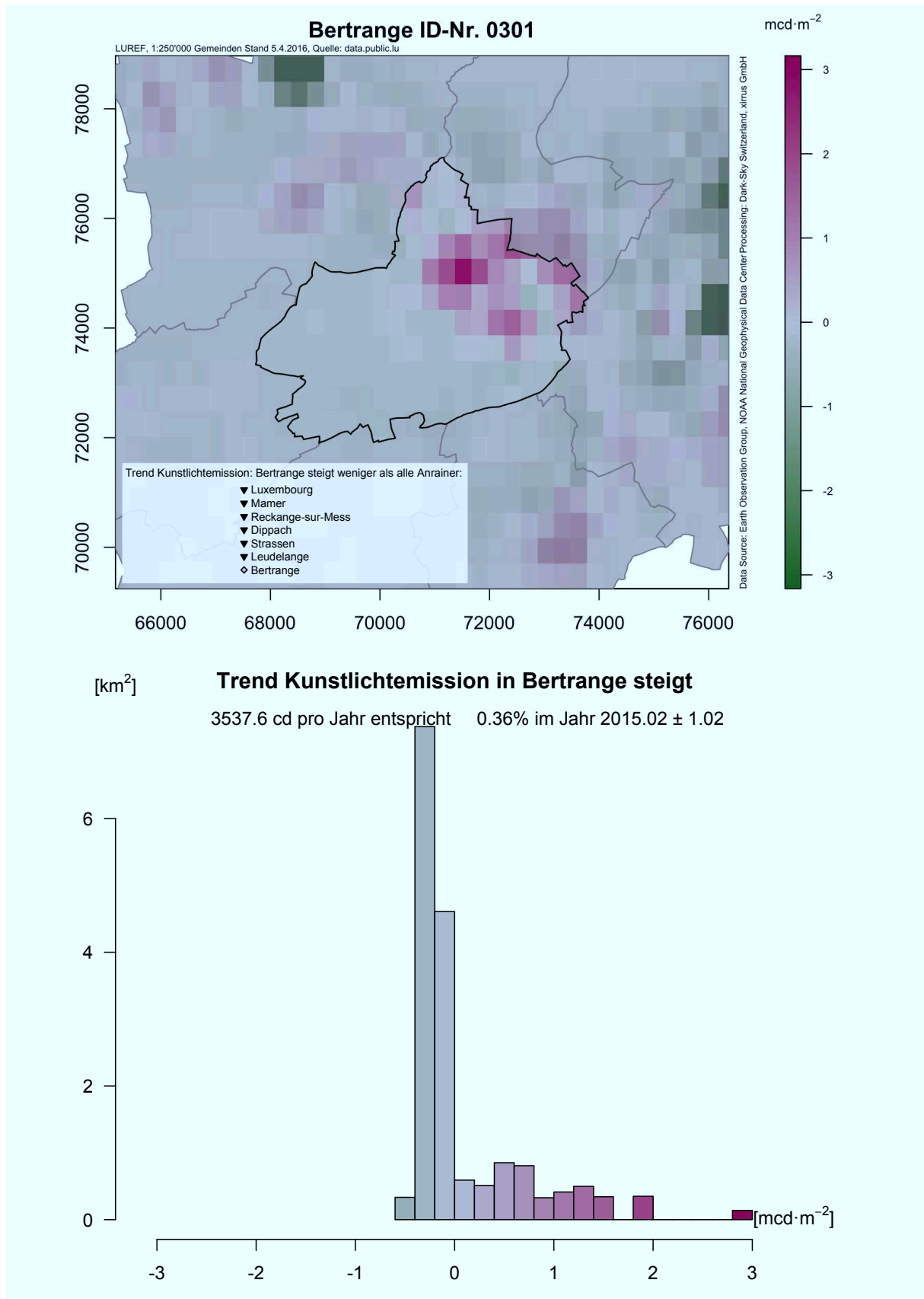
3.6 D Zehn Gemeinden, Lichtemissionen, Trend 2012-2016

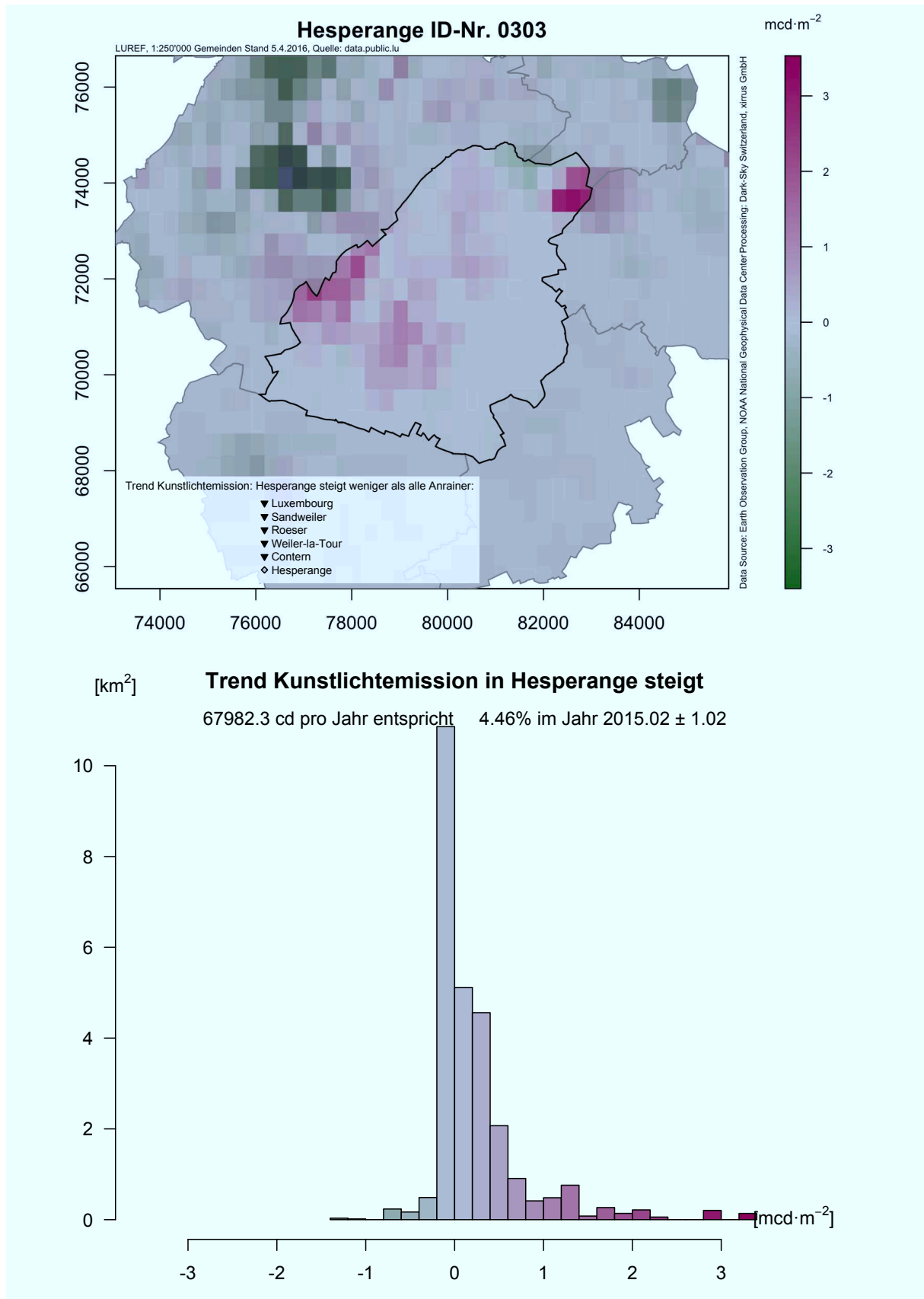
- Trends sind aufgrund monatlicher Schwankungen mit hohem statistischen Fehler behaftet.
- Die örtliche Auflösung scheint dennoch präzise genug, um manche Änderungen der Emissionen Objekten zuzuordnen.
- Zeitraum: von April 2012 bis Juni 2016.
- Die Identifikation und Gemeindegrenzen stammen aus den offiziellen Daten von data.public.lu.
- Abweichungen der gemessenen Leuchtdichten in $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ pro Jahr.
- Rangfolge der Veränderung im Vergleich zu den Nachbargemeinden.
- Verteilung der Lichtemissionen auf Zu- und Abnahmen.

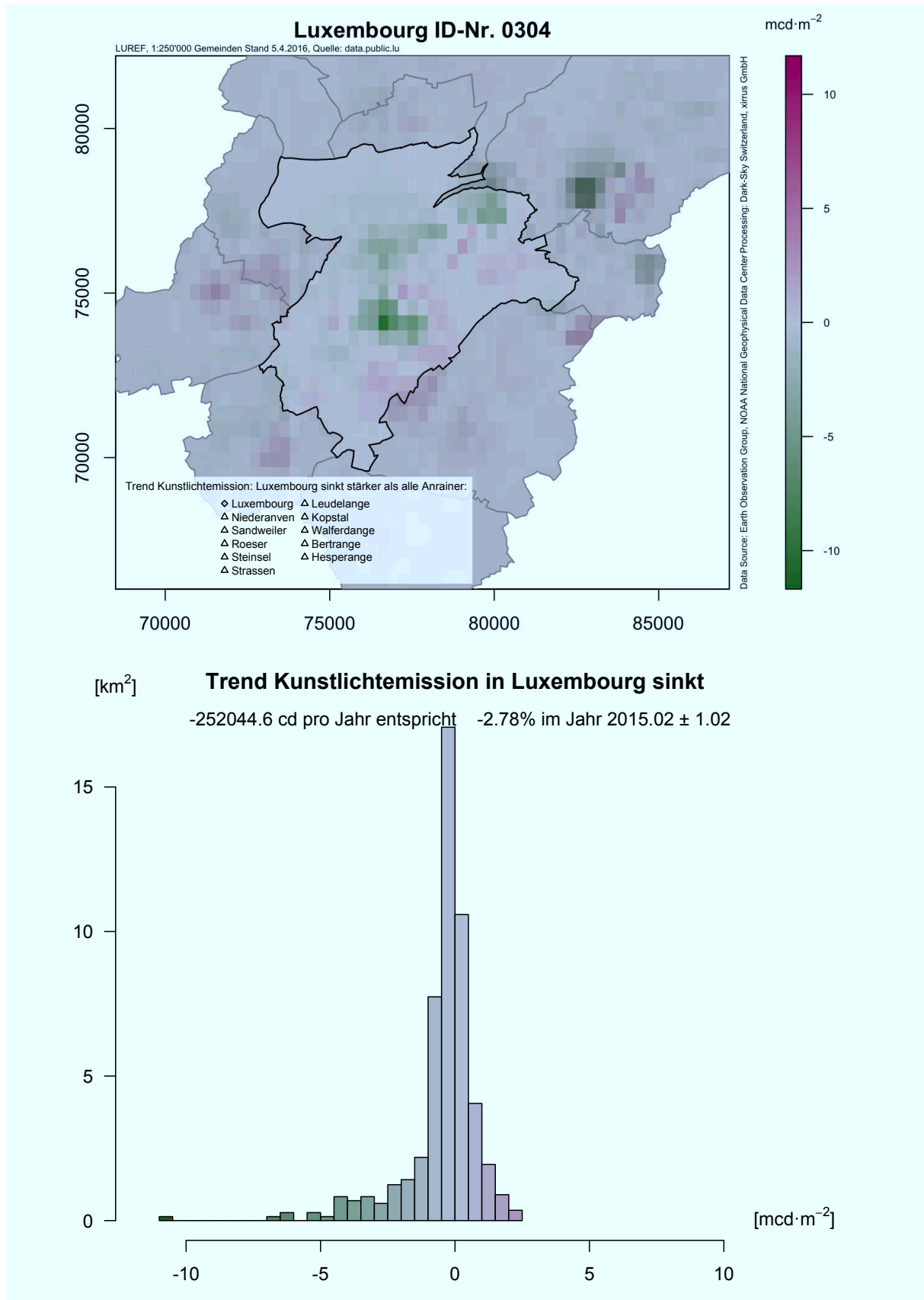
S. 35	Kopstal
S. 36	Leudelange
S. 37	Bertrange
S. 38	Hesperange
S. 39	Luxembourg
S. 40	Niederanven
S. 41	Sandweiler
S. 42	Steinsel
S. 43	Strassen
S. 44	Walferdange

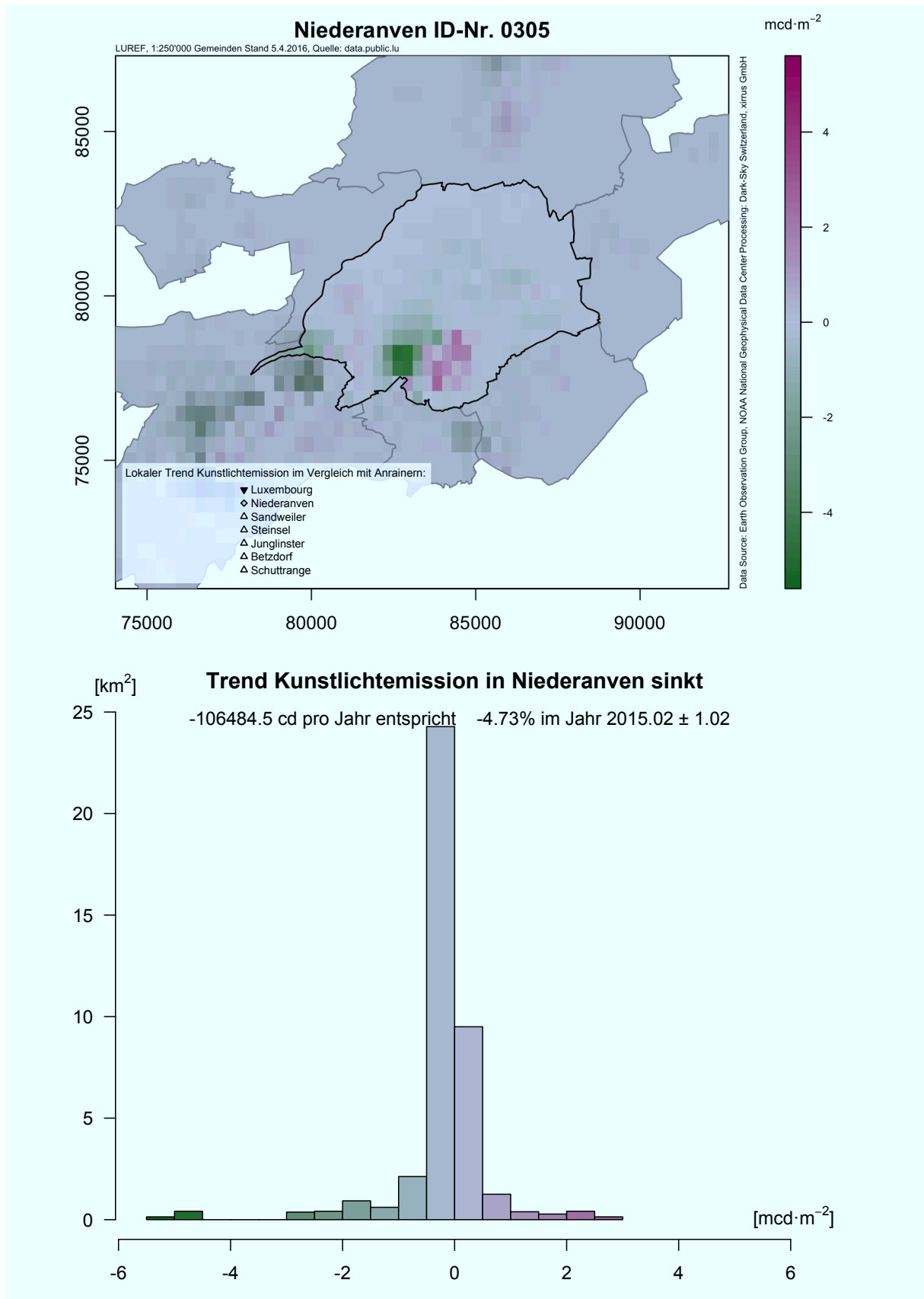


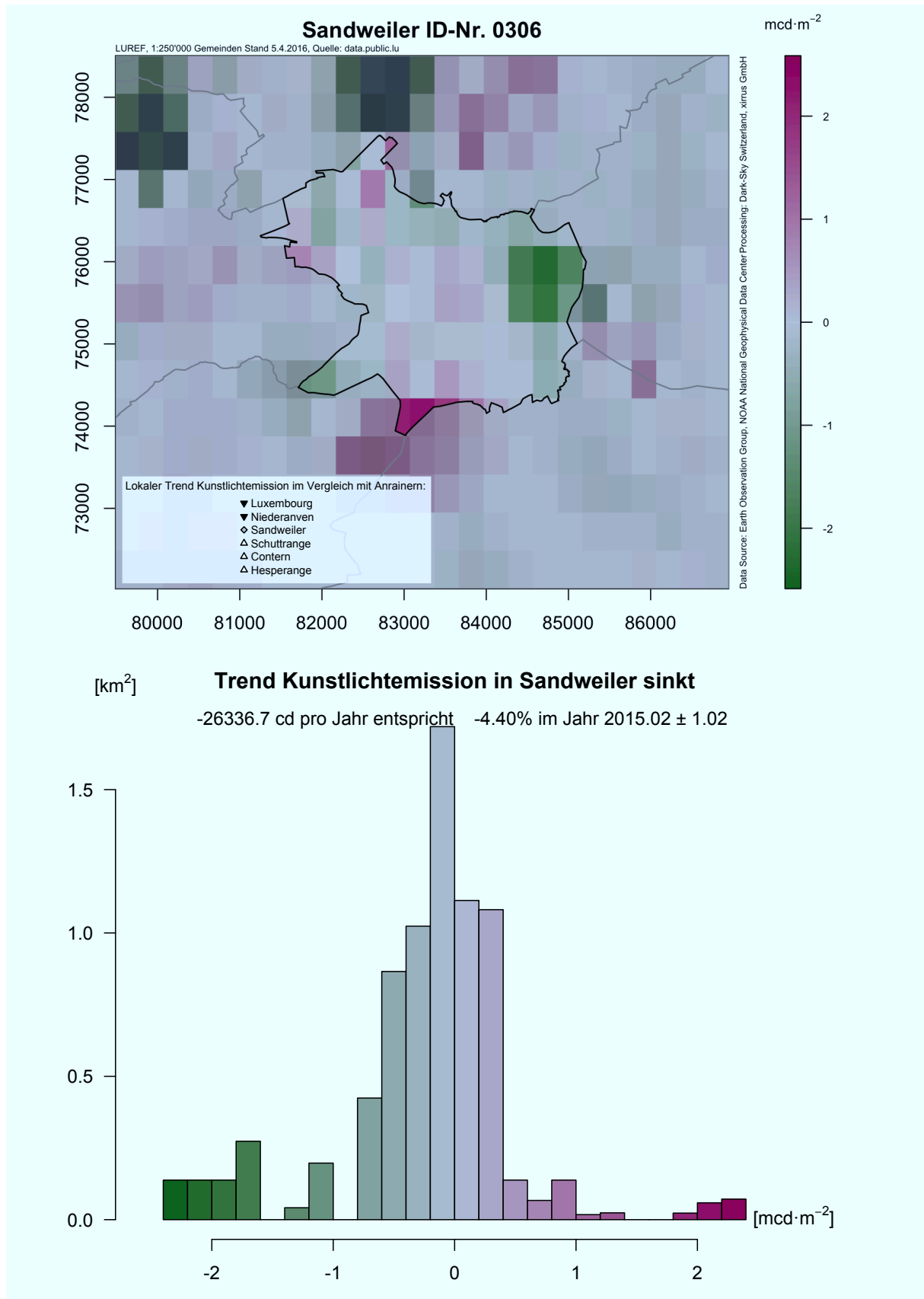


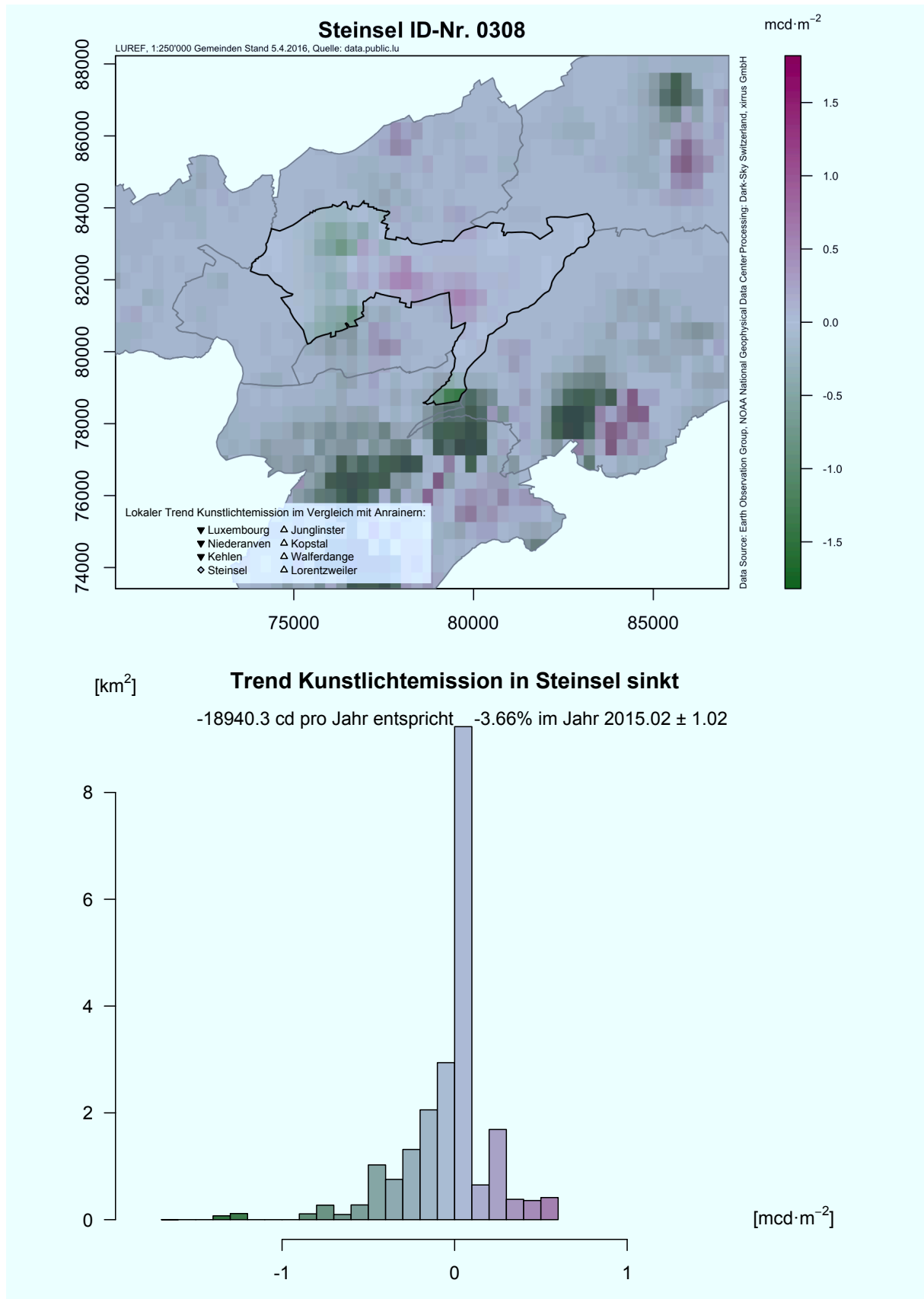


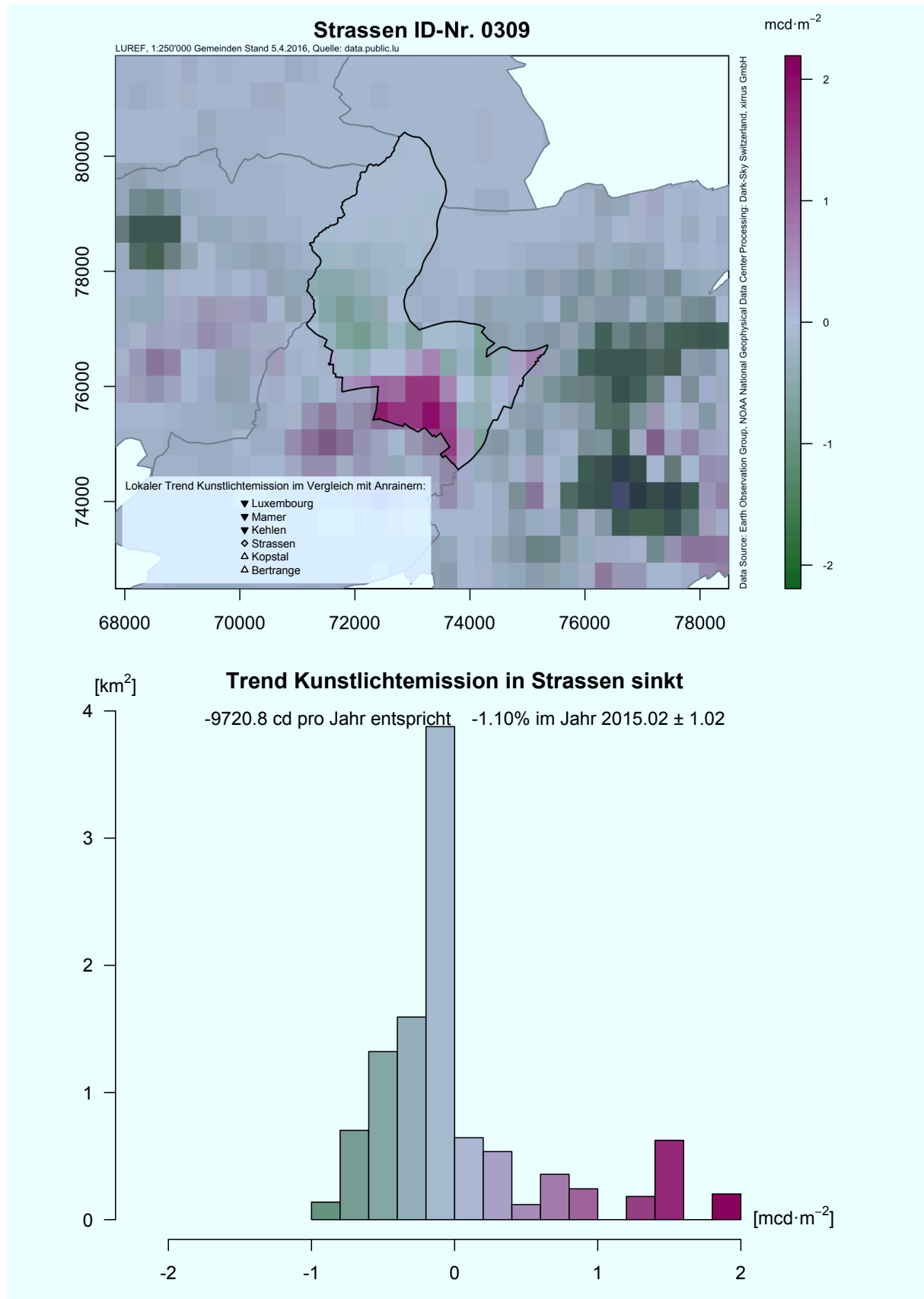


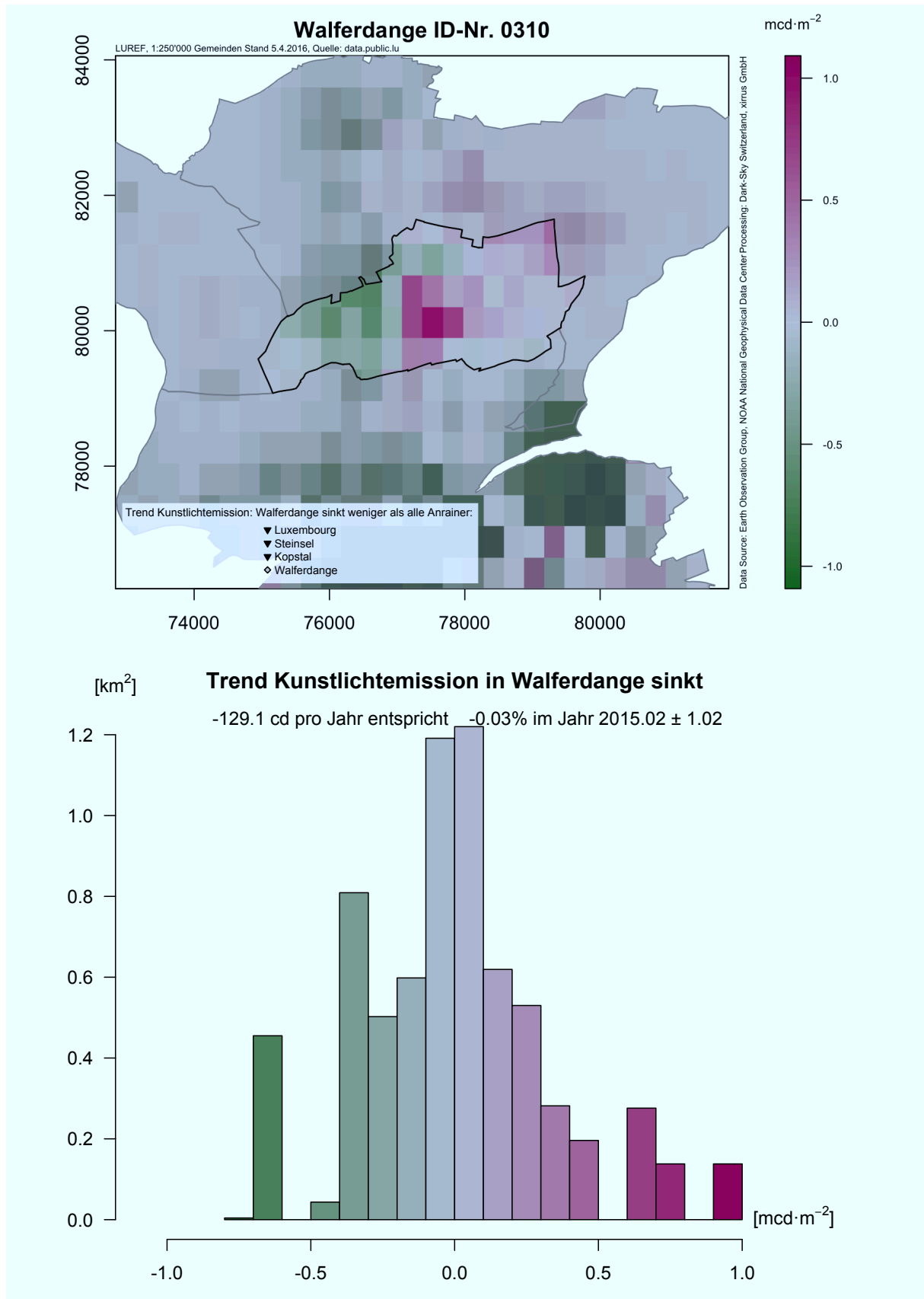












4 E Analyse und Diskussion

4.1 A Aktuelle Situation Land Luxemburg, Lichtemissionen, 2. Quartal 2016

Die Gemeinde Luxemburg weist drei bis vier Mal mehr Lichtemissionen auf als die nachfolgende Gemeinde Esch-sur-Alzette, S. 8, 9, 11.

Luxembourg trägt aktuell zu 14.8 % der gesamten Lichtemissionen des Landes bei, S. 9.

Entlang der Hauptverkehrsachsen und entlang der französischen und belgischen Grenze scheint eher mehr Licht vorhanden als gegenüber Deutschland, S. 8.

Sieger der Rangliste ist Wahl, S. 9 und 10. Wahl ist mit 19.7 km² flächenmässig etwas mehr als ein Drittel so gross wie Luxembourg und erzeugt etwa 62 Mal weniger Licht. Dies wiederum entspricht dann eher dem Vergleich der Einwohnerzahlen: Luxemburg hat etwa 121 Mal mehr Einwohner als Wahl.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, darf aus Sicht von Dark-Sky Switzerland die Grösse einer Gemeinde keine Entschuldigung sein, die Umwelt entsprechend mehr zu belasten, denn die Störwirkung des Lichts reicht über weite Distanzen über eine Gemeinde hinaus. Ausserdem braucht die Bevölkerung Nachtruhe und -dunkelheit für die Schlafgesundheit, die Natur die Dunkelheit für den Erhalt funktionierender Ökosysteme und der Artenvielfalt. Wie wir noch sehen, ist jedoch der Trend in der Gemeinde Luxemburg derzeit abnehmend. Der Langzeittrend ist auch nur schwach an den aktuellen Ist-Zustand gebunden, da er über einen Zeitraum von vier Jahren mit 33 Messmonaten gewonnen wurde, während der Ist-Zustand nur für das 2. Quartal mit drei Messmonaten gilt.

4.2 A+ Aktuelle Situation Land Luxemburg, Leuchtdichte in Anzahl Vollmonden, 2. Quartal 2016

Die Stadt Luxemburg und Nachbargemeinden, sowie der Süden und die Verkehrsachse in den Norden sind so auffälliger bei der Leuchtdichte, als beispielsweise Gemeinden im Norden, S. 13.

Beim Sieger Wahl sind es wenig über ein Viertel Vollmond, S. 14. Das entspricht praktisch einer natürlichen Beleuchtung, da ja maximal von Halbmond bis Halbmond über Neumond nachts gemessen wird, sollte ein Viertelmond herauskommen, wenn es fast kein Kunstlicht gibt. Luxembourg dagegen hat eine durchschnittliche Leuchtdichte von über acht Vollmonden. Bei Esch-sur-Alzette sind es noch über sieben. In Pétange noch knapp fünf, Strassen knapp über vier Vollmonde.

Die Gewinnerliste, S. 15.

Die Verliererliste, S. 16.

4.3 B Langzeittrend Situation Lichtemissionen Land Luxemburg April 2012 bis Juni 2016

Der Trend entspricht der Steigung der linearen Regression der Summe der Lichtemissionen. Die Unsicherheit der Trendaussage ist hoch. Der Fehler der Trendaussage bezieht sich auf den Fehler der Steigung (lineare Regression), welche durch die monatlichen Werte der Lichtemissionen gebildet wird. Die Schwankungen durch Saisonalität (Schnee/Eis, Regen, Laub, und z.B. Weihnachtsbeleuchtung) sind tendenziell hoch, aber der Zeitraum ist noch zu kurz, um saisonale Regelmässigkeiten zu identifizieren und weg zu filtern.

Die Gemeinde Luxemburg zeigte im Langzeittrend die grösste jährliche Abnahme in absoluten Zahlen (Candela), S. 18.

Die Mehrzahl der Gemeinden weist im Zeitraum erfreulicherweise eine Abnahme auf.

Zunahmen können durchaus auch auf ein Bevölkerungswachstum hinweisen, da jede neue Siedlung ebenfalls neue Aussenbeleuchtungen installiert.

4.4 B+ Langzeittrend Situation Leuchtdichte Land Luxemburg April 2012 bis Juni 2016

Der Trend entspricht der Steigung der linearen Regression der Summe der Lichtemissionen. Die Unsicherheit der Trendaussage ist hoch. Der Fehler der Trendaussage bezieht sich auf den Fehler der Steigung (lineare Regression), welche durch die monatlichen Werte der Lichtemissionen gebildet wird. Die Schwankungen durch Saisonalität (Schnee/Eis, Regen, Laub, und z.B. Weihnachtsbeleuchtung) sind tendenziell hoch, aber der Zeitraum ist noch zu kurz, um saisonale Regelmässigkeiten zu identifizieren und weg zu filtern.

Die Gemeinde Luxemburg zeigte im Langzeittrend die grösste jährliche Abnahme in absoluten Zahlen (Anzahl Vollmonde), S. 21.

Die Mehrzahl der Gemeinden weist im Zeitraum erfreulicherweise eine Abnahme auf.

Bei der Zunahme taucht die Gemeinde Esch-sur-Alzette erneut auf, S. 21. Möglicher Grund für die Schwankung könnte im Bevölkerungszuwachs von 10 % liegen. Auch in Pétange war die Zunahme beachtlich. Auch diese Gemeinde hat eine hohe Einwohnerzahl und der Bevölkerungszuwachs betrug 9% zwischen 2012 und 2016.

4.5 C Aktuelle Situation ausgewählte Gemeinden 2. Quartal 2016

Eine Überprüfung der Resultate muss vor Ort mit entsprechender Ortskenntnis erfolgen.

Die gewählten Gemeinden sind:

S. 24	Kopstal	Kopstal ist die dunkelste ihrer Nachbargemeinden. Sie weist zur Hälfte naturnahe Dunkelheit auf und über ein Drittel ist gering belastet. Im Ortszentrum von Bridel scheint es mit bis $0.07 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ zu 13.8 % mässig hell zu sein (ca. drei Mal Vollmond). Das lässt sich leicht reduzieren, wenn man die Tankstellen dazu motivieren kann, Leuchtreklamen nach Ladenschluss nachts abzuschalten oder zu reduzieren und beleuchtete Parkflächen zu überdachen.
S. 25	Leudelange	Leudelange hat nur ein Fünftel naturnahe Dunkelheit. 42 % sind gering mit Licht belastet. Die maximale Belastung ist stark und umfasst 2 % mit etwa $0.18 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Das entspricht gerade dem achteinhalbfachen Vollmond. Quellen sind die Fachmärkte, Logistik, usw. Hier fragt sich ganz deutlich, wie viel Licht nach Feierabend und während der Nachtruhe noch notwendig ist oder ob all diese Geschäfte 24 Stunden geöffnet sind.
S. 26	Bertrange	Naturnahe Dunkelheit gibt es noch im Westen zu etwa 47 %. Das Ortszentrum und Industrie sind erheblich, teils sogar stark mit Lichtemissionen belastet. Die Maximalwerte bewegen sich um $0.28 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, was fast 14 Vollmonden entspricht. Die Nähe zum helleren Luxemburg verleitete wohl dazu, mehr Licht zu installieren.
S. 27	Hesperange	Im Südosten ist die Gemeinde noch naturnah dunkel zu etwa 31 %. Angrenzend an die Stadt Luxemburg, im Ortszentrum von Hesperange und vor allem auch bei Dupont, wie bei Sandweiler festgestellt, ist es bis zu $0.26 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ hell, also fast 13 Vollmonde. Im Ortszentrum kumulieren wohl Strassenbeleuchtung, Schule, kommerzielle Einrichtungen und die Sportplätze und viele private Beleuchtungen. Wir können es uns sonst schlecht erklären, warum es so hell ist. Vielleicht trägt auch die Architektur mit Dachfenstern und Mansarden einen nicht unerheblichen Teil dazu bei.

-
- S. 28 Luxembourg In Luxemburg können wir gut und gerne von einer Lichtsuppe sprechen. Hier schrumpft die naturnahe Dunkelheit auf unter 6 % und nur etwas mehr, nämlich knapp 10 %, sind gering belastet.
- Zur besseren Orientierung wurden die Kurven aus der Einschätzung der Lichtmengen (Histogramm) in die Karte als Untergrenzen übertragen. Für die dunkelste Zone gibt es diese Untergrenze nicht, da sie Null wäre. Wir würden dort die Mitte der Dunkelheit (1/2 Vollmond) einsetzen, aber das kam in der Stadt Luxemburg nicht mehr vor.
- Über zwei Drittel der Stadt sind mässig (18 %), erheblich (24 %) oder stark (28 %) mit Licht belastet. Es gibt auch eine sehr starke Belastung zu fast 15 %, das heisst im Maximum erreichen wir $0.65 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$, bzw. 31 Vollmonde (daher das Skalenmaximum für ausgewählte Gemeinden in Luxemburg im oberen Bild). Das entspricht innerstädtischen Immissionen von 8 Lux. Zum Vergleich: Der Grenzwert der Lichtimmission in Deutschland und Österreich für Wohnraumaufhellungen wurde auf 1 Lux festgelegt (4 Vollmonde, also mässige Belastung). Dieser Grenzwert ist zwar juristisch verbindlich, wird aber faktisch im dichteren Siedlungsgebiet kaum eingehalten. Er wäre jedoch einklagbar. Beschwerden bei Dark-Sky Switzerland über Wohnraumaufhellungen resultierten bisher meist ab Immissionen von 3 Lux (12 Vollmonde, starke Belastung), denn dann fühlen sich Menschen so gestört, dass sie nicht mehr passiv bleiben wollen.
- Die historische Altstadt, das Bahnhofsquartier und das Kirchberg-Plateau scheinen besonders hell zu sein.
- Die entscheidende Frage aus planerischer Sicht wird sein: Was sind hier für Nachtabschaltungen und Reduktionen möglich, ohne das Ambiente zu zerstören oder die Sicherheit zu gefährden? Andererseits wurde noch nie ein Zusammenhang zwischen Lichtmenge und Kriminalität nachgewiesen (siehe z. B. aus England⁵).
-
- S. 29 Niederaanven Naturnahe Dunkelheit findet man im Norden der Gemeinde zu etwa 45 %.
- Im Süden ist die Gemeinde über 6 % erheblich und 5 % stark belastet, 2 % sogar sehr stark mit bis zu $0.44 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ (das sind 21 Vollmonde). Ursache scheint vor allem der Flughafen mit seinen Betriebsgebäuden. Aus Sicherheitsgründen wird sich da nicht viel machen lassen, solange die Vorschriften und Normen in diesem Bereich nicht ändern. Prüfen kann man sicher die ganzen Nebenbetriebe.
- Ausserdem fällt auf, dass die Luxexpo auf dem Gebiet der Stadt Luxemburg viel Licht in diese Gemeinde abstrahlt. Vielleicht lässt sich da einvernehmlich die Parkplatzbeleuchtung nach unten regulieren, um die angrenzenden Waldgebiete zu schonen.
- Ausserdem: Nähe Autobahnkreuz, Baustelle für zukünftige Betriebsgebäude der Strassenbahn.
-

S. 30	Sandweiler	<p>Sandweiler kennt keine naturnahe Dunkelheit mehr. Nur noch rund ein Viertel ist gering belastet. Sandweiler weist an den exponierten Grenzen wesentlich mehr Lichtemissionen auf als im Zentrum der Gemeinde. In der Nordost-Ecke ist das eindeutig dem Flughafen zuzuschreiben. Im Nordwesten ebenfalls. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Nebengewerbe des Flughafens, wie Hotels, Autovermietungen, Parkflächen usw. Die Pistenbefeuerungen erzeugen weniger Emissionen als die Nebengewerbe. Uns wurde gesagt, dass Luxemburg ein Nachtflugverbot wegen der Stadtnähe einhält. Das zeigt sich hier deutlich. Ausserdem zeichnet sich im Südwesten die Industriezone hell ab, und von den Nachbarn kommt Licht aus dem Süden von Chemie und Logistik und aus dem Osten vom Gefängnis in der Gemeinde Schuttrange.</p> <p>Hier bestätigt sich, dass Licht keine Rücksicht auf Gemeindegrenzen nimmt. Die Lichtemissionen vom Gefängnis übertreffen alle anderen und sind über $0.3 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Das wären etwa 14 Vollmonde. Uns ist auch klar, dass Licht beim Gefängnis als sicherheitsrelevant gilt. Jedoch müsste man abklären, ob man die Blendung auf grosse Distanz reduzieren kann, ohne die Sichtbarkeit zu gefährden. Zweitgrösste Emissionsquelle scheint die Anlage von Dupont de Nemours zu sein.</p> <p>Die grössten beiden Problemzonen liegen in den Nachbargemeinden. Grosse eigene Emissionen hat Sandweiler beim Flughafen.</p>
S. 31	Steinsel	<p>Noch über zwei Drittel der Gemeinde weist naturnahe Dunkelheit auf. Das ist erfreulich.</p> <p>Die Belastung im Ortszentrum ist dennoch bereits erheblich, mit $0.15 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ (sieben Vollmonde). Hier sollten nicht permanent geöffnete Geschäfte oder Restaurants motiviert werden Schaufenster oder Leuchtreklamen nachts abzuschalten. Auch die Beleuchtung des Fussballplatzes könnte wohl mit asymmetrischen Leuchten optimiert werden.</p>
S. 32	Strassen	<p>Etwas weniger als ein Drittel herrscht naturnahe Dunkelheit in der Gemeinde Strassen.</p> <p>Im besiedelten Süden ist die Lichtbelastung in Strassen stark, d.h. mit bis zu $0.25 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ (12 Vollmonde). Einen nicht unerheblichen Beitrag leisten sicher die Therme, die Sportplätze und die Parkplätze für Fitness- und Wellness-Besucher. Aber auch die Siedlungen scheinen hell beleuchtet zu sein. Zudem sind Firmen im Osten und deren Parkplätze neben dem Centre Hospitalier de Luxembourg wohl lange hell erleuchtet.</p>
S. 33	Walferdange	<p>Die Tallage der Hauptsiedlung streut viel Licht an die Hanglagen. Die naturnahe Dunkelheit schrumpft auf unter 30 % Anteil.</p> <p>Etwas ein Drittel ist gering oder mässig mit Licht belastet, etwas über ein Drittel sogar erheblich. Spitzenwerte um $0.16 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ deuten auf etwa siebeneinhalbfaches Vollmondlicht hin. Einkaufsstrasse und Sportanlagen tragen wohl das ihre dazu bei.</p>

4.6 D Langzeittrend ausgewählte Gemeinden April 2012 bis Juni 2016

Langzeitliche durchschnittliche Veränderungen bewegen sich auf recht tiefem Niveau, da sich die Werte über lange Zeit ausgleichen. Dennoch sollte jeweils erkennbar sein, wo eine Zunahme und wo eine Abnahme von Bedeutung sein könnten. Die Schwankungen einzelner Monate können erheblich ausfallen (z. B. durch Weihnachtsbeleuchtung, Baustellen). Daher sind die Fehler der Trendaussagen generell hoch. Die Maxima und Mi-

nima versuchen wir dennoch zu lokalisieren, das hilft wohl, um Lichtquellen-Änderungen der Vergangenheit zu identifizieren und einzuschätzen.

Eine Überprüfung der Resultate muss vor Ort mit entsprechender Ortskenntnis erfolgen.

Die gewählten Gemeinden sind:

S. 35	Kopstal	Grösste Abnahme: Im Wald im Norden. Möglicherweise hat sich dort die Abschirmung der Strasse oder beim ortsansässigen Landschaftsgärtner verbessert oder die wachsende Vegetation oder frühere Forstarbeiten (Flutlicht, Brände) waren die Ursache. Zwischen den Kreiseln im Süden gab es eine deutliche Abnahme, wurde hier die Strassenbeleuchtung erneuert oder früher abgeschaltet? Im Osten von Bridel auf dem freien Gelände gab es die grösste Zunahme. Könnte es da eine Veranstaltung gegeben haben?
S. 36	Leudelange	Die grösste Zunahme gab es in der Nähe der Logdirect SA. Wir wissen nicht, ob die Parkplatzbeleuchtung ausgebaut wurde, oder die Industriehalle nachts inszeniert wird. Generell scheinen alle Firmen in der Gegend von Leudelange die Beleuchtung ausgebaut zu haben, oder es gab einen Zuwachs an Geschäften. Die grösste Abnahme gab es auf dem Acker nördlich davon. Vermutlich wurde nur etwas Dunkleres angebaut (z. B. Klee statt Gerste), was dann weniger Umgebungslicht aus dem Süden reflektierte.
S. 37	Bertrange	Abnahmen waren eher marginal, dafür grossflächig auf die Landwirtschaftsflächen verteilt. Im Ortskern (um das Gemeindezentrum) wurde es deutlich heller. Ausserdem sind die Tankanlagen im Nordosten mehr beleuchtet worden und das Einkaufszentrum im Süden (viele Parkplätze/Leuchtreklamen?). Ebenso hat die Industrie im Osten und die Autobahnein-/ausfahrt zugelegt.
S. 38	Hesperange	Fast ganz Hesperange ist heller geworden. Am deutlichsten ist die Zunahme in der Nordostecke bei Dupont de Nemours. Hingegen scheint die angrenzende Industriezone Rolach leicht dunkler geworden zu sein. Ebenfalls deutlich heller wurde es beim Umspannwerk beim Wasserturm und beim Convent (Kongresszentrum?).
S. 39	Luxembourg	Die deutlichste Abnahme gab es beim Péitruss bei der Internationalen Bank. Hier wurden möglicherweise Bodenleuchten entfernt oder eine Baustelle aufgelöst. Im Grüngürtel um die Stadt, beim Limpertsberg, an der Alzette bei Pafendall und südwestlich vom Parc des Expositions wurde es tendenziell dunkler, ebenso im Bahnhofsquartier. Heller wurde es vor allem in der Altstadt, im Süden der Stadt (Bonneweg, Technikum, Industrie), und unten am Kirchberg Plateau, etwa auf der Achse Universität, Hotel d'Coque, Ecole Privée Notre-Dame Sainte-Sophie.
S. 40	Niederanven	Eine grosse Abnahme ist im Süden beim Golfplatzareal (übereinstimmend mit Sandweiler) erfolgt. Deutliche Zunahme der Beleuchtung beim Flughafen. Eine spürbare Zunahme angrenzend an den Parc des Expositions und mitten im Wald auf den Autobahnen und an den Autobahnkreuzen (Baustelle?). Ausserdem hat das Quartier Mielstrachen ein wenig zugelegt.

S. 41	Sandweiler	Im Wald östlich von Sandweiler war die Abnahme am deutlichsten. Könnte es sein, dass der Wasserturm früher beleuchtet wurde und dann abgeschaltet wurde? Oder wurde dort nachts gearbeitet? Die deutlichste Zunahme befindet sich im südlichen Spitz bei der Industrieanlage von Dupont de Nemours. Ausserdem wurden einige Gebiete beim Flughafen heller, der Golfplatz hingegen deutlich dunkler.
S. 42	Steinsel	Eine grosse Abnahme im Süden an der Route d'Echternach, vielleicht auch durch angrenzende Areale (Sporthotel). Leichte Zunahme im ganzen Ort Heisdorf und entlang anderer Verkehrsachsen (mehr Verkehr gleich mehr Licht).
S. 43	Strassen	Eine leichte Abnahme gab es auf natürlichen und Kulturflächen. Hat man in Strassen bereits auf gerichtetes LED Licht umgerüstet? Die grösste Zunahme gab es nordöstlich von Fitnesscenter und Therme im Quartier. Wir können uns das nicht gut erklären. Bei den südöstlich angrenzenden Tankanlagen scheint es auch mehr Licht gegeben zu haben, wie auch im Ort selber in vielen Strassen und Quartieren.
S. 44	Walferdange	Nördlich von Bereldange wurde es dunkler. Vielleicht hat der Bauernhof etwas umgestellt oder Quartierstrassen wurden anders beleuchtet. Die grösste Zunahme gab es in der Region der Kirchstrasse. Wurde die Strassenbeleuchtung verändert, die Kirchenbeleuchtung erneuert oder verlängert? Allgemein wurde das Ortszentrum entlang der Alzette heller.

4.7 Schlussfolgerung

Die Hauptverursacher von erheblichen Lichtemissionen sind oft auch auf der privaten, nicht nur auf der öffentlichen Seite zu finden. Dafür braucht es Sensibilisierung durch Information und Richtlinien oder Normen, welche die Nachtruhe auch beim Licht verankern. So findet ein Wandel statt, der das öffentliche Interesse auf Nachtruhe höher gewichtet als die Einzelinteressen für private Inszenierungen. Letztere stiften für den privaten Betreiber durch die nachts tiefen Besucherfrequenzen sowieso nur einen verminderten Nutzen. Gerne verweisen wir an dieser Stelle auf die weiteren Normen im Anhang S. 54.

Punktuell identifizierte öffentliche Infrastrukturen aus den zehn analysierten Gemeinden sind: Luxemburg Stadt, Universität Campus Kirchberg, Gefängnis in der Gemeinde Schuttrange, Wassertürme in Sandweiler und Hesperange und Umspannwerk in Hesperange und als ganzes gesehen die öffentliche Strassenbeleuchtung, wo man über ausgedehntere Nachtabschaltung oder Nachtabsenkung diskutieren sollte. Die öffentliche Beleuchtung kostet übrigens meist den grössten Teil des Energiebudgets einer Gemeinde (Angaben von energyview.ch). Hier zu sparen lohnt sich also auch finanziell. Als Gesellschaft müssen wir als Ganzes reagieren. Alle Menschen schlafen gerne tief und gesund und profitieren vom Erholungswert einer intakten Natur.

In Luxemburg Stadt bewegen wir uns bis achtfach über dem derzeitigen Grenzwert für Lichtimmission von Deutschland und Österreich. Dieser Grenzwert ist in Deutschland und Österreich zwar juristisch verbindlich, wird aber faktisch noch kaum eingehalten. Er ist jedoch einklagbar, wenn an der Fensterkante zum eigenen Schlaf- oder Wohnzimmer eine Immission über dem Grenzwert stattfindet.

In der dunkelsten Gemeinde Wahl bleibt überall bei naturnaher Dunkelheit. Man kann sich das noch bildlich vorstellen, dass nirgends mehr als ein Vollmond leuchtet. Sonst ist alles dunkel.

In Luxemburg Stadt müsste jeder Einwohner jede Nacht 78 Kerzen brennen lassen, um auf die durch die Stadt erzeugte Lichtmenge zu kommen. Manchem mag das unerheblich, da zählbar erscheinen, jedoch ist das der aktuelle Durchschnitt im 2. Quartal.

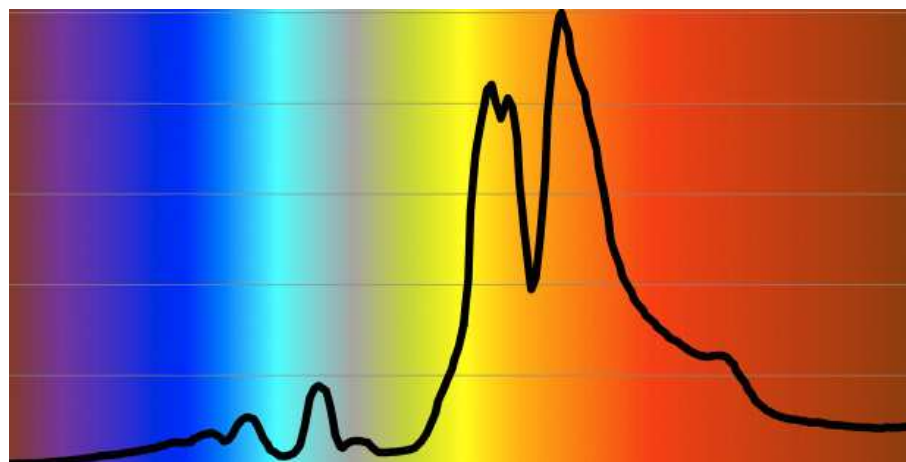


Abbildung 1: Natriumdampflampe, 2000 Kelvin, Quelle: Netzwerk Licht⁷

Zum Vergleich: Bei Vollmond stünde bildlich gesprochen lediglich eine Kerze alle sieben Meter herum, das wären dann insgesamt 9 pro Einwohner.

Der einfachsten und schnellste Gewinn für mehr Schlafgesundheit und die Natur ist durch Nachtabstimmung oder Nachtabenkung zu erreichen. In der Schweizer Baunorm SIA 491 versucht man dies durch die Unterscheidung von funktionalem, d. h. einem Sicherheitszweck dienenden Licht und dem nicht-funktionalen, d. h. nur der Inszenierung dienenden Licht. Letzteres soll die Nachtruhe vom Lärmschutz, in der Schweiz von 22–6 Uhr einhalten und dann ausgeschaltet sein. Die neue Regel gilt in der Schweiz seit März 2013 und muss für Aussenbeleuchtungen und nach aussen dringende Beleuchtungen (Schaufenster) berücksichtigt werden, sie gilt bei allen Neuinstallationen und Renovationen. Zeitschaltuhren kosten nicht viel, aber erleichtern die Umsetzung, besonders wenn sie sogar die Umstellung Sommerzeit/Winterzeit beherrschen.

4.8 Massnahmenkatalog

Empfehlungen zur Vermeidung unnötiger Lichtemissionen und Umsetzung einer Lichtstrategie auf Gemeindeebene.

Einbezug umweltfreundlicherer Beleuchtung in die Energiestrategie

Bei Ersatz bestehender Beleuchtung durch neue LED zu beachten: Nicht die effizienteste LED mit der grössten Leistung (Lumen/Watt) sollte das Rennen machen, sondern die wärmste LED (Farbtemperatur < 3000K, siehe Figur 3). Zu Gunsten der nächtlichen Flora und Fauna, aber auch der Schlafgesundheit des Menschen sollte der Blauanteil von künstlichem Licht reduziert werden. Die orangen Natriumdampflampen (siehe Figur 1) waren aus demselben Grund besser als die Quecksilberdampflampen. Mit den kaltweissen LED fand zunächst ein Effizienzsteigerung, aber eine Verschiebung im Spektrum zu mehr blauem Licht statt (siehe LED 4000K, Figur 2). Die Orientierung in der Nacht findet am Sternenhimmel (bis weit über 15000K) oder am Mondlicht statt (4100K). Das blaue Licht stört vermutlich deshalb das nächtliche Ökosystem stärker und zieht mehr Insekten an. Es blendet Säugetiere stärker und stört den Tag-/Nachtrhythmus. Ausserdem streut es stärker in der Atmosphäre und trägt zu mehr Lichtverschmutzung bei. Für Menschen besteht ein gesundheitliches Risiko durch längeres Wachsein (innere Uhr, Schlafstörung, Brust- oder Prostata-Krebsrisiko) oder Verkehrssicherheitsrisiko durch stärkere Blendung.⁶ Es gibt auch orange RGB-LED Lampen im Handel fast ohne blaues Licht und dennoch vernünftige Farbwiedergabe ($R_a \approx 80$).

Unabhängig von der installierten Beleuchtung können zusätzlich frühere Abschaltzeiten eingeführt werden, wenn diese von der Bevölkerung mitgetragen werden. Für neue Beleuchtung und Planungen kann man sich

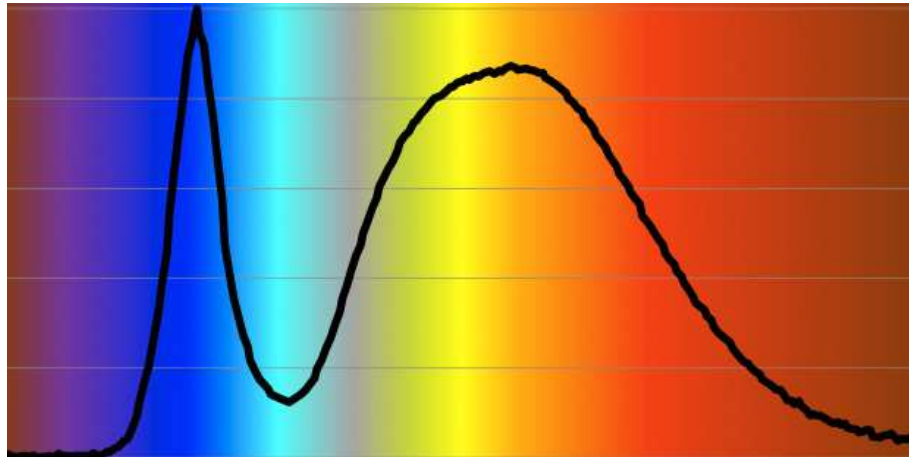


Abbildung 2: LED, 4000 Kelvin, Quelle: Netzwerk Licht⁷

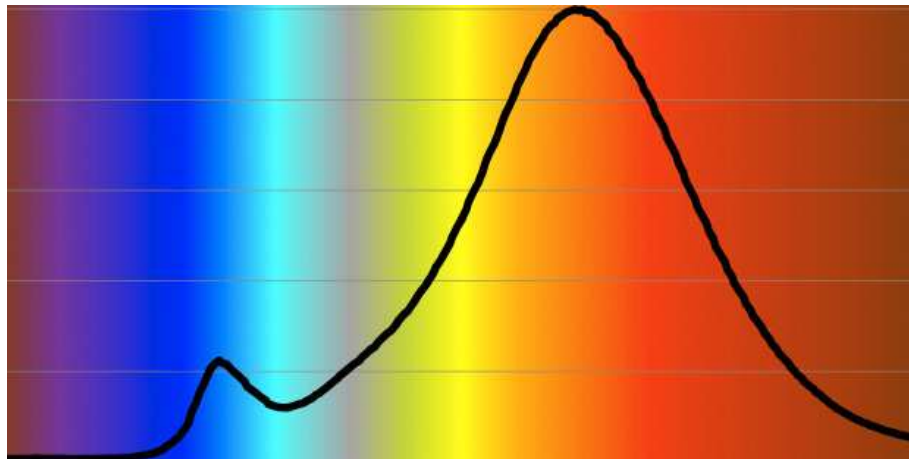


Abbildung 3: LED, 2200 Kelvin, warmes Licht stört weniger, auch wenn es etwas weniger effizient ist (Lichtleistung) als kaltes. Quelle: Netzwerk Licht⁷

Lösungen mit Sensoren (Gehwege) oder Radar (Quartier- und Nebenstrassen), das heisst Licht nach Bedarf, vorstellen und installieren.

Die Erfahrung zeigt, Installateure lassen neue Beleuchtungen oft auf 100 % Leistung angesteuert laufen, auch wenn dies viel zu viel Licht macht, da die neuste Generation LED jeweils noch mehr Lumen/Watt erzeugt als bisherige.

Es ist daher wichtig, bereits bei der Planung darauf hinzuweisen, dass die Normwerte angesteuert und überprüft werden sollen, so dass genau soviel Licht erzeugt wird, wie es braucht und nicht wie oft schon gemessen, dreimal mehr.

Baubehörde, Baubewilligungen, Bau- und Zonenordnung

Einführung von Empfehlungen zur Vermeidung von Lichtemissionen gemäss Normen und Umweltämtern. Zu den Normen siehe auch Seite 56. Als Beispiele hierfür können dienen:

In Baugenehmigungen sollte darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Normwerte nicht überschritten werden sollen (alterskompensierte Elektronik behält konstante Lichtströme bei und braucht keinen Zuschlag zur Einhaltung des Wartungswertes). Es sollte eine nächtliche Nachkontrolle stattfinden, damit falsche Einstellungen korrigiert werden (Dimmen, Nachtabsenkung und -abschaltung nach Bedarf).

Für Bauzonen und Gestaltungspläne können Zuordnungen zu Lichtzonen vereinbart werden, siehe Seite 55, damit umliegende Räume weniger belastet werden (Einhaltung maximaler Lichtstärken an Zonengrenze).

Empfehlungen an Gewerbetreibende oder Einführung einer Nachtruheverordnung

Die Nachtruhe ist ein Gut im öffentlichen Interesse. Wenn es bereits eine Lärmschutzverordnung gibt, welche Zeiten für Nachtruhe vorgibt, kann man analog eine zeitliche Begrenzung von nicht-sicherheitsrelevanter Beleuchtung einführen. Das heisst Schmuckbeleuchtung, Leuchtreklamen, Schaufenster und ähnliches sollen der Nutzung angepasst und im Nachtruhe-Zeitfenster generell ausgeschaltet werden. Der Betreiber im Nachtruhe-Zeitfenster bedarf einer Ausnahmegenehmigung. Diese muss sich auf die Öffnungs- und Betriebszeiten abstützen. Wer also das Geschäft geschlossen hat, hat im Nachtruhe-Zeitfenster kein Anrecht auf Beleuchtung.

Aktion mit Zeitschaltuhren

Diese Aktion hat funktioniert: Wer nachweislich eine Zeitschaltuhr für sein Schaufenster anschafft und die Nachtruhe einprogrammiert, erhält von der Gemeinde eine Gutschrift. Es gibt funkgesteuerte Schaltuhren, welche automatisch Sommer-/Winterzeit umstellen.

Bewilligung von Schaufensterbeleuchtungen und Leuchtreklamen

Wird für Neuinstallationen eine maximale Leuchtdichte vorgeschrieben (z.B. maximal 100 cd/m²), so kann innerhalb einiger Jahrzehnte eine ganze Ladenstrasse auf ein vernünftiges und nahezu einheitliches Niveau gesenkt werden. Das Wettrüsten findet nicht mehr statt und schont die Kasse der Ladenbesitzer.

Polizeiverordnung, Nachtruhe

Anpassung der Polizeiverordnung bezüglich Nachtruhe. Einhaltung der Nachtruhe auch beim Licht. Betroffene Anwohner können wie beim Lärm durch die Polizei Nachtruhe wegen Störung durch Licht einfordern. Als Immissionsgrenzwert sind 1 Lux in Deutschland und Österreich eingeführt. Aus Erfahrung ist über 3 Lux definitiv nicht an normales Einschlafen zu denken (Immissionswert E_v Fensterkante) und Leute beschwerten sich bei Dark-Sky. Für einen ersten Augenschein bei betroffenen Anwohnern reicht ein einfaches Luxmeter, dessen Fehler etwa 10 % beträgt.

5 Anhang

5.1 Gedanken von Dark-Sky Switzerland zum Thema Lichtverschmutzung

Ein Umdenken wird eher möglich durch Vergleiche. Beim Thema Lichtverschmutzung haben wir nämlich das Augenmass verloren. Licht ist schon messtechnisch schwierig zu erfassen, aber die verfügbaren Geräte werden zum Glück besser. Das menschliche Auge kommt schon lange mit Licht recht gut zurecht, es sieht Helligkeitsunterschiede zwischen Tag und Nacht mit dem Faktor von einer halben Million und mehr. Um diese grosse Hell-Dunkel-Dynamik zu bewältigen, hat sich der Sehsinn intern (wie übrigens das Gehör auch) eine logarithmische Skala angeeignet. Das verunmöglicht uns Menschen aber, eine doppelte Lichtmenge gut einzuschätzen. Darum wirken auch viel zu helle Installationen subjektiv noch plausibel, denn wir können ja visuell mit dem Tageslicht recht gut umgehen, selbst in der Nacht, falls wir nicht müde sind. Nur hat das unerwünschte Nebeneffekte. Deshalb finden wir es bei Dark-Sky Switzerland so wichtig, dass wir mit Messungen objektive Belege dafür schaffen, wie die Lichtmengen verteilt sind und dass man dadurch über Massnahmen erst richtig zu diskutieren anfängt, da man eine objektive Grundlage hat.

Diskussionen auf der subjektiven Basis (ich finde das nicht zu hell – dieses Licht stört mich aber) bringen einen nicht weiter. Die anderen Lebewesen (Insekten, Fledermäuse, Zug- oder Brutvögel, Glühwürmchen, usw.) haben alle eine angepasste Wahrnehmung der Umwelt, die von den natürlichen Gegebenheiten ausgeht. So wie wir für uns die Nacht zum Tag machen, so werden auch die anderen Lebewesen darauf reagieren.⁸ Sogar Pflanzen sind betroffen.⁹

Jede Nacht werden an Lampen Hunderte von Insekten gefangen, z. B. Motten.¹⁰ Wenn man es hochrechnet auf ein Land, sind es Millionen oder Milliarden, die Nacht für Nacht nicht ihrer natürlichen Bestimmung nachgehen, und oft verenden.

Brutvögel zum Beispiel nisten nicht in beleuchteten Bäumen.¹¹ Die meisten Fledermausarten brauchen dunkle Korridore entlang von natürlichen Strukturen, um von den Wochenstuben zu den Jagdgebieten zu gelangen.¹² Einige wenige Arten sind Kulturfolger und jagen sogar Insekten in den Lichtkegeln von Strassenlampen. Diese sehen wir dadurch eher und dann denken wir Laien, alle Fledermäuse würden davon profitieren, unter Lampen Insekten zu jagen. Eine Wasserfledermaus zum Beispiel getraut sich niemals nah ans handelsübliche Licht heran, um zu jagen. Beleuchtet man Gewässer falsch, nimmt man ihr das Jagdgebiet weg. Dieses kleine Beispiel zeigt, dass Ökosysteme schwierig zu beurteilen sind.

Darum ist am sichersten, so wenig Licht wie nötig für die tatsächlichen Bedürfnisse zu machen, ansonsten aber darauf zu verzichten. Und wenn man in der Nähe von naturnahen Gebieten beleuchten muss, sind wärmere Lichtquellen dringend zu empfehlen, da diese die meisten Arten weniger stören. Der Grund ist simpel: Die Nacht und auch das Sternen- und Mondlicht sind kühl. Wenn wir ebenfalls kaltes (d. h. blaues Licht über 3000 K) ausstrahlen, stören wir die Orientierung der Nachttiere am meisten. Uns Menschen macht solches Licht wach und blendet uns auch stärker, denn wir sind für am Tag vor Sonnenlicht durch den Pupillenreflex geschützt. Ausserdem empfinden wir wärmeres Licht in der Nacht deutlich angenehmer.

5.2 Normen für öffentliche Strassenbeleuchtung und Lichtschutzzonen durch LEED

Strassenklassen ME1 bis ME6, EN 13201-1: Leitfaden zur Auswahl der Beleuchtungsklassen

Die Beleuchtungsklassen ME1 bis ME6 gelten für Strassen mit mittleren bis höheren Fahrgeschwindigkeiten. Die Güteermale der Beleuchtung entsprechen der Leuchtdichte. Je höher die Zählnummer einer Beleuchtungsklasse ist, zum Beispiel ME3 gegenüber ME1, desto geringer sind die lichttechnischen Anforderungen an die Beleuchtung.

Ein sicherheitstechnischer Grundgedanke der baulichen Situation, sowie die tatsächliche Benutzung von Strassen führen zur Strassenklasse anhand von zahlreichen Kriterien. So wird unterschieden zwischen der Geschwindigkeit des Hauptnutzers, weiteren zugelassenen Nutzern, ausgeschlossenen Nutzern, Trennung der Fahrbahnen, Abstand von Anschlussstellen, Entfernung zwischen Brücken in km, baulichen Massnahmen zur Verkehrs-

beruhigung, Kreuzungen je km, Schwierigkeit der Fahraufgabe, und dem Verkehrsfluss der Fahrzeuge (durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke). Ohne die Basistabellen A1 bis B2 in EN 13201-1 zu studieren, ist es unmöglich, die Strassenklasse festzulegen. Einfach gesagt führt hohes Verkehrsaufkommen (um 25000 DTV) und höhere Geschwindigkeit (> 60 km/h) zu Klassen von ME1 bis ME4, während tiefes Verkehrsaufkommen (< 7000 DTV) und Langsamverkehr (30 bis 60 km/h) zu ME3 bis ME6 tendieren.

Wir haben die Strassenklassen vor allem in unsere Skala aufgenommen, damit wir für die Zukunft gerüstet sind. Falls die Auflösung des Satelliten verbessert wird, oder wir mit Luftaufnahmen arbeiten können, um dem Beleuchtungsfachmann bei seiner Überprüfung zu helfen.

Lichtschutzzonen LZ0 bis LZ4 nach LEED

Lichtzone	Nutzung	Beleuchtungsgrenzen
<p>LZ0, kein Umgebungslicht Räume wo die natürliche Umwelt ernsthaft und nachteilig durch Beleuchtung betroffen wäre. Effekte schliessen die Störung biologischer Zyklen von Flora und Fauna und/oder Störung von Menschen beim Genuss der natürlichen Umwelt ein. Die menschliche Aktivität wird den Ansprüchen der Natur untergeordnet. Das Sehen von Menschen und Nutzern ist dunkeladaptiert und sie erwarten eine sehr spärliche oder keine Beleuchtung. Wo kein Bedarf existiert, sollten die Lichter ausgeschaltet werden.</p>	<p>Schliesst typischerweise naturnahe und offene Räume ein, Wildnis- und Naturparks, Räume um Sternwarten, oder jedes andere Gebiet wo der Schutz der Dunkelheit erforderlich ist.</p>	<p>Anteil des Lichts über Horizont: 0%. Maximale Immission an der Zonengrenze: 0.5 lx.</p>
<p>LZ1, wenig Umgebungslicht Räume wo Beleuchtung Schäden an Flora und Fauna anrichten kann oder den Charakter der Landschaft zerstört. Das Sehen von Menschen und Nutzern ist dunkeladaptiert und an geringes Licht gewöhnt. Beleuchtung kann für Sicherheit und Bequemlichkeit genutzt werden, ist aber nicht einheitlich oder durchgehend notwendig. Bei Nachtruhe sollte die Beleuchtung gelöscht oder reduziert werden, da die Aktivitäten abnehmen.</p>	<p>Schliesst typischerweise Ein- oder Doppelfamilienhäuser, ländliche Ortszentren, Gewerbezone und andere kommerzielle, industrielle oder Lagerräume mit eingeschränkter nächtlicher Aktivität mit ein. Kann auch entwickelte Räume in Parks und anderen natürlichen Umgebungen einschliessen.</p>	<p>Anteil des Lichts über Horizont: 0%. Maximale Immission an der Zonengrenze: 0.5 lx.</p>

<p>LZ2, mittleres Umgebungslicht Räume menschlicher Tätigkeit wo das Sehen der Einwohner und Nutzer an mittleres Umgebungslicht gewöhnt ist. Die Beleuchtung kann für Sicherheit und Bequemlichkeit genutzt werden, ist aber nicht einheitlich oder durchgehend notwendig. Bei Nachtruhe kann die Beleuchtung gelöscht oder reduziert werden, so wie die Aktivitäten abnehmen.</p>	<p>Schliesst typischerweise Mehrfamilienhäuser, Quartiere, Heime, Schulen, Kirchen, Spitäler, Hotels und Läden, oder Gewerbegebiete mit Abendaktivität vorwiegend in Wohngebieten mit ein. Schliesst ebenso nachbarschaftliche Freizeitanlagen, Spielwiesen und gemischte Entwicklungszonen mit vorwiegend Wohngebieten mit ein.</p>	<p>Anteil des Lichts über Horizont: 1.5 %. Maximale Immission an der Zonengrenze: 1 lx.</p>
<p>LZ3, mittelstarkes Umgebungslicht Räume menschlicher Tätigkeit wo das Sehen der Einwohner und Nutzer an mittelstarkes Umgebungslicht gewöhnt ist. Beleuchtung ist allgemein erwünscht für Sicherheit und/oder Bequemlichkeit und ist meist einheitlich und/oder durchgehend. Bei Nachtruhe kann die Beleuchtung in den meisten Räumen ausgeschaltet oder reduziert werden, so wie die Aktivitäten abnehmen.</p>	<p>Schliesst typischerweise Ladenstrassen, vorstädtische Einkaufszentren, Orts- und Stadtzentren, Mehrzonennutzungen, Industriearale und Häfen und Bahnhöfe mit hoher nächtlicher Aktivität mit ein. Beinhaltet ebenso vielbenutzte Erholungs- und Sportplätze, regionale Einkaufszentren, Autohändler, Tankstellen, und andere nächtlich aktiv genutzte Verkaufsareale.</p>	<p>Anteil des Lichts über Horizont: 3 %. Maximale Immission an der Zonengrenze: 2 lx. Ausschaltung nicht sicherheitsrelevanter Beleuchtung: 0.00 bis 6.00 Uhr</p>
<p>LZ4, starkes Umgebungslicht Räume menschlicher Tätigkeit wo das Sehen der Einwohner und Nutzer an starkes Umgebungslicht gewöhnt ist. Beleuchtung wird allgemein als notwendig betrachtet für Sicherheit und/oder Bequemlichkeit und ist meist einheitlich und/oder durchgehend. Bei Nachtruhe kann die Beleuchtung in einigen Räumen ausgeschaltet oder reduziert werden, so wie die Aktivitäten abnehmen.</p>	<p>Räume mit sehr starkem Umgebungslicht gibt es nur in Spezialfällen und sind unangebracht für die meisten Städte. Kann für extrem unübliche Installationen, wie verdichtete Unterhaltungsbezirke und intensive Industrienutzung zur Anwendung kommen (zur Zeit hat nur Times Square, New York diese Zuteilung).</p>	<p>Anteil des Lichts über Horizont: 6 %. Maximale Immission an der Zonengrenze: 6 lx. Ausschaltung nicht sicherheitsrelevanter Beleuchtung: 0.00 bis 6.00 Uhr</p>

5.3 Weitere Normen und Empfehlungen, relevant für Beleuchtung im Aussenraum

In Luxemburg anwendbare Normen

Normen CIE 150–2003: Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light from Outdoor Lighting Installations (Leitfaden zur Begrenzung der Störlichtwirkungen von Aussenbeleuchtungsanlagen).

CIE 126–1997: Guidelines for Minimizing Sky Glow.

EN 12464–2:2014: Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 2: Arbeitsplätze im Freien.

EN 12193:2008: Sportstättenbeleuchtung
 EN 13201-2 bis -4:2004: Strassenbeleuchtung.

Weiterführende Normen und Empfehlungen aus anderen Ländern als Unterstützung

SIA 491:2013 (SN 586 491:2013): Vermeidung unnötiger Lichtimmissionen im Aussenraum.
 Deutsche Lichttechnische Gesellschaft (LiTG) 12.3 2011: Empfehlungen für die Messung, Beurteilung und Minderung von Lichtimmissionen künstlicher Lichtquellen.
 ÖNORM O 1052:2012 Lichtimmissionen: Messung und Beurteilung

5.4 Technische Anmerkungen

Unsere Analyse der Lichtemissionen von Luxemburg (Staat) und zehn ausgewählten Gemeinden (inkl. Luxemburg (Stadt)) basiert auf den Messungen des Umweltsatelliten NPP Suomi im sichtbaren Licht (VIS) und nahen Infrarot (IR) von 500-900 nm. Die NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration aus den USA publizieren zeitversetzt monatliche Messwerte für die ganze Erde aufgeteilt in 6 Felder vom Äquator bis 75° geographische Breite und jeweils 120° Länge. Die Messungen erfolgen kontinuierlich, jedoch werden für die Nacht ausschliesslich Zeilen über wolkenfreien Arealen und in den zwei Wochen um Neumond ausgewertet. Die Messungen erfolgen in Nanowatt pro Quadratcentimeter pro Raumwinkel [$\text{nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$]. Für ein Land wie Luxemburg beträgt die Pixelaufösung des Satelliten am Boden etwa 300×460 Quadratmeter.

Aus den Messdaten des Satelliten ergeben sich folgende Überlegungen: Wir erhalten eine Leistung pro Fläche pro Raumwinkel zwischen 500 und 900 nm Wellenlänge. Der Satellit sieht die Summe aller Quellen auf der Erde und wir gehen davon aus, dass fast jede Quelle auch einen Anteil über 500 nm emittiert. Das gilt z. B. für die grüne und orangen Linien der Quecksilberdampfampe, selbst eine handelsübliche blaue LED hat hellblaue und grüne Anteile oberhalb 500 nm. Wir gehen also davon aus, dass alle künstlichen Lichtquellen ihren Teil zu den Messwerten beitragen und dass die hinzu kommenden Anteile oberhalb 780 nm (fürs menschliche Auge unsichtbare Wärmestrahlung zwischen 780 und 900 nm) mindestens gleich gross sind wie die unterhalb 500 nm wegfallenden Anteile (fürs menschliche Auge sichtbares Licht zwischen 380 und 500 nm). Das menschliche Auge sieht nur zwischen 380 und 780 Nanometer Wellenlänge. Der Satellit zeichnet also je um 120 nm nach rot verschobene Werte auf, aber ein gleich grosses Fenster von 400 nm wie das menschliche Auge, nur mit nahezu linearer Empfindlichkeit. Das menschliche Auge besitzt eine maximale Empfindlichkeit bei 555 nm. Definitionsgemäss sieht es 683 Standardkerzen-Raumwinkel/Watt einer definierten Strahlungsquelle (Schwarzkörperstrahlung). Dieser Wert berücksichtigt die Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges über das Spektrum. Das lässt sich in Standardkerzen pro Fläche, also in die Leuchtdichte umrechnen. Den Fehler durch die Rotverschiebung des Messfensters des Satelliten gegenüber dem menschlichen Sehen vernachlässigen wir aus oben genannten Gründen.

Es gilt:

$$1 \text{ W} = 683 \text{ lm} = 683 \text{ cd}\cdot\text{sr}$$

Wir haben

$$1 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} = 10^{-9} \text{ W}\cdot 10^4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} = 10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$$

Daraus folgt:

$$1 \text{ nW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} = 6.83\cdot 10^2\cdot 10^{-5} \text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1} = 6.83\cdot 10^{-3} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2} = 0.00683 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$$

Die Leuchtdichten rechnen wir auf Quadratmeter um, da dies die gebräuchliche Einheit für Lichtplaner ist. Das ergibt zwar recht kleine Werte für Langzeit-Veränderungen, aber die natürliche Beleuchtung in der Nacht findet auf einem tiefen Niveau statt. So erzeugt der Vollmond auf der Erdoberfläche eine Leuchtdichte von lediglich $0.0209 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Wir haben den Vollmond in unsere Skalen mit einbezogen, da er die maximale natürliche Helligkeit wiedergibt und uns eine Vorstellung gibt, wie stark wir naturnahe Dunkelheit überschreiten. Dies sind grundsätzliche Überlegungen, die wir bereits früher gemacht haben.¹³

In den Sommermonaten von April bis August müssen wir für Länder nördlich der Po-Ebene (Italien) vom Streulicht bereinigte Daten¹⁴ verwenden, da der Polarsommer bis weit in den Süden hinein die Atmosphäre in grosser Höhe aufhellt und manchmal seitliches Sonnenlicht bis zur Optik des Satelliten gelangt. Die korrigierten Messwerte sind wegen dem Streulicht teilweise überkompensiert, d. h. es gibt auch negative Messwerte. Diese betrachten wir als Nullwerte, denn es gibt nicht weniger Licht als kein Licht, sonst würden unsere Summen über die politischen Einheiten falsch berechnet.

Literatur

- [1] “Sky quality meters sold by unihedron”. <http://unihedron.com/>.
- [2] “Oasi ticino”. <http://www.oasi.ti.ch/web/dati/inquinamento-luminoso.html>.
- [3] “Lighting zones by leed”. <http://usgbc.org/credits/ss8/>.
- [4] F. Falchi, P. Cinzano, D. Duriscoe, C. C. M. Kyba, C. D. Elvidge, K. Baugh, B. A. Portnov, N. A. Rybnikova, and R. Furgoni. “The new world atlas of artificial night sky brightness”. *Science Advances*, **2**, (2016) 01–1084.
- [5] R. Steinbach, C. Perkins, L. Tompson, S. Johnson, B. Armstrong, J. Green, C. Grundy, P. Wilkinson, and P. Edwards. “The effect of reduced street lighting on road casualties and crime in england and wales: controlled interrupted time series analysis.” *Journal of Epidemiology & Community Health*, 1118–1124.
- [6] “American medical association adopts guidance to reduce harm from high intensity street lights”. <https://www.ama-assn.org/ama-adopts-guidance-reduce-harm-high-intensity-street-lights>.
- [7] “Netzwerk licht — lichttechnische beratung, roland bodenmann, lichtplaner slg, 5246 scherz, switzerland”. <mailto:info@netzwerklicht.ch>.
- [8] D. M. Dominoni, J. C. Borniger, and R. J. Nelson. “Light at night, clocks and health: from humans to wild organisms”. *Biology Letters*, **12**.
- [9] J. Bennie, T. W. Davies, D. Cruse, and K. J. Gaston. “Ecological effects of artificial light at night on wild plants”. *Journal of Ecology*, **104**, (2016) 611–620.
- [10] T. Degen, O. Mitesser, E. K. Perkin, N.-S. Weiß, M. Oehlert, E. Mattig, and F. Hölker. “Street lighting: sex-independent impacts on moth movement”. *Journal of Animal Ecology*, **85**, (2016) 1352–1360.
- [11] K. Spoelstra, R. H. A. van Grunsven, M. Donners, P. Gienapp, M. E. Huigens, R. Slaterus, F. Berendse, M. E. Visser, and E. Veenendaal. “Experimental illumination of natural habitat—an experimental set-up to assess the direct and indirect ecological consequences of artificial light of different spectral composition”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, **370**.
- [12] A. Fure. “Bats and lighting — six years on”. *The London Naturalist*, 60–88.
- [13] L. D. Schuler. “Lichtverschmutzung”. *Im Fokus zum Thema Licht*, 5 Seiten. www.satw.ch.
- [14] S. Mills, S. Weiss, and C. Liang. “Viirs day/night band (dnb) stray light characterization and correction”. *Proceedings SPIE, Earth Observing Systems XVIII*, **8866**, (2013) 18 pages.