

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch



Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
CH-3003 Bern

Einfluss von Grünflächen im Wohngebiet auf die Verkehrslärmbelästigung

Schlussbericht zum Forschungsprojekt CompenseNSE

Auftrags-Nr.: 5211.01519.200.01 / 5211.01519.100.01

Bericht-Nr.: 5211.01519.200.01 - 1

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU, Trond Maag

Anzahl Seiten: 29

Beilagen: -

Die Verfasser: Beat Schäffer
Felix Schlatter
Stefan Schalcher
Jean Marc Wunderli

Bemerkung: Dieser Bericht basiert auf der englischen, wissenschaftlichen Publikation zu CompenseNSE, zu welcher auch Mark Brink und Danielle Vienneau als Koautoren beitrugen.

Status: genehmigter Bericht

Dübendorf, 27. März 2020

Der Verfasser:

Dr. Beat Schäffer

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Abteilungsleiter:

Dr. Jean Marc Wunderli

Zusammenfassung

Die Belästigung der Menschen durch Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm wird durch Grünflächen in Wohngebieten wirksam reduziert. Die Reduktion der Belästigung kann beim Strassenverkehrslärm mit einer Abnahme des Schallpegels mit bis zu 6 dB und beim Eisenbahnlärm mit bis zu 3 dB gleichgesetzt werden. Dabei gilt: "je grüner desto besser".

Für Fluglärm ist mit einer Zunahme der Belästigung zu rechnen, die einer Erhöhung des Schallpegels von bis zu 10 dB entspricht.

In den letzten Jahren rückten Grünflächen als mögliche Massnahme zur Verminderung der Belästigung durch Verkehrslärm zunehmend in den Fokus von Forschung und Behörden. Gemäss aktueller Literatur spielen dabei verschiedene Aspekte eine Rolle:

- (a) die Begrünung in der unmittelbaren Wohnumgebung ("Wie grün ist das Wohngebiet?");
- (b) die von zuhause aus sichtbare Vegetation;
- (c) das Vorhandensein von grösseren zusammenhängenden Grünflächen wie Parks oder Wälder zur Naherholung in und um Wohngebiete;
- (d) die Erreichbarkeit von Grünflächen und die dort vorhandene Lärmbelastung

Die heute verfügbaren Studien konzentrieren sich hauptsächlich auf die Wirkung von Grünflächen auf die Belästigung durch Strassenverkehrslärm in städtischen Gebieten.

Das Ziel der vorliegenden Studie war, die Untersuchung auf die ganze Schweiz auszudehnen und dabei alle Verkehrslärmarten sowie den Grad der Verstädterung zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurde der Datensatz zur Belästigung durch Verkehrslärm aus dem Projekt "SiRENE" mit einer Reihe von Messgrössen zur Charakterisierung der Grünflächen ergänzt und deren Einfluss auf die Lärmbelastigung untersucht.

Die Analysen zeigen, dass Grünflächen zu einer geringeren Belästigung durch Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm, aber zu einer erhöhten Belästigung durch Fluglärm führen. Letztere Erkenntnis steht im Einklang mit den starken Belästigungsreaktionen, welche bisweilen in ländlichen Gebieten mit Fluglärm beobachtet werden. Weitere Studien zum besseren Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen wären wünschenswert.

Die Begrünung in der unmittelbaren Wohnumgebung und das Vorhandensein von grösseren zusammenhängenden Grünflächen zur Naherholung sind die beiden wichtigsten Kriterien zur Reduktion der Belästigung durch Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm. Dies gilt unabhängig vom Grad der Verstädterung. Die sichtbare Vegetation und die Erreichbarkeit von Grünflächen sind aber in städtischen Gebieten von Bedeutung.

Die vorliegende Studie legt somit nahe, dass Begrünung und Grünflächen in Wohngebieten insbesondere in dicht besiedelten, urbanen Gebieten gefördert werden sollte.

Inhalt

1.	Einleitung.....	4
1.1.	Hintergrund und Auftrag	4
1.2.	Vorgehen – Konzept	4
1.3.	Projektorganisation	5
2.	Literatur – Stand des Wissens.....	6
3.	Material und Methoden.....	7
3.1.	Lärmbelastungsdaten: die SiRENE Feldstudie.....	7
3.2.	Lärmberechnung	8
3.3.	Charakterisierung und Quantifizierung des "Grün"	9
3.4.	Statistische Analyse	12
4.	Resultate	13
4.1.	Grün-Metriken: Korrelationen, Verteilungen.....	13
4.2.	Optimale Perimetergrösse.....	14
4.3.	Vielversprechendste Grün-Metriken.....	14
4.4.	Zusammenhang zwischen "Grün" im Wohngebiet und Lärmbelastung	15
4.5.	Effekt-Modifikation durch Urbanisierungsgrad	17
4.6.	Effektstärke des Grün bei unterschiedlichen Lärmbelastungen	20
5.	Diskussion.....	21
5.1.	Synthese.....	21
5.2.	Stärken und Grenzen	23
5.3.	Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick.....	24
6.	Schlussfolgerungen	25
7.	Dank.....	25
8.	Abkürzungen.....	26
9.	Literatur	27

1. Einleitung

1.1. Hintergrund und Auftrag

In den letzten Jahren rückten Begrünung und Grünflächen wie Parks oder Wälder als potenzielle Massnahme zur Verminderung der Belästigung durch Verkehrslärm zunehmend in den Fokus von Forschung und Behörden. Die Frage wird zunehmend wichtig, da die Urbanisierung (Verstädterung) weiter zunimmt. Dies dürfte mit erhöhter Lärmbelastung der Bewohner einhergehen sowie zu Konflikten zwischen verdichtetem Bauen (um Zersiedelung zu begrenzen) und genügend grösseren zusammenhängenden Grünflächen innerhalb des Siedlungsgebiets zur Naherholung führen.

In der eidgenössischen Kommission für Lärmbekämpfung (EKLB; <https://www.eklb.admin.ch>) wird daher aktuell im Rahmen einer erwünschten Harmonisierung von Lärmbekämpfung und Raumplanung und den teilweise gegenläufigen Interessen von Lärmschutz und raumplanerischer Verdichtung folgende Frage diskutiert:

Kann durch eine Aufwertung des öffentlichen Raumes mittels Erholungszonen eine kompensierende Wirkung in Bezug auf die Schädlichkeit und Lästigkeit von Verkehrslärm erzielt werden?

Um weitere Grundlagen zur Diskussion und Beantwortung dieser Frage zu liefern, erteilte das Bundesamt für Umwelt (BAFU) der Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, den Auftrag zur Durchführung des vorliegenden Projekts CompenSENSE. Das Studienkonzept wurde dabei von der Empa in Zusammenarbeit mit Mark Brink, BAFU, entwickelt.

Auftrag: Beschaffung und Verlinkung raumbezogener Variablen mit dem SiRENE-Survey Sample zwecks Untersuchung der Frage, ob Eigenschaften und Nähe bzw. Erreichbarkeit von Erholungszonen (Parkanlagen, Grünflächen, Wasser, ...) geeignet sind, die Belästigung durch Verkehrslärm zu reduzieren und dadurch indirekt eine kompensierende Wirkung zu erzielen.

Zur Beantwortung dieser Frage sollen folgende Hypothesen getestet werden:

- I. Die Begrünung in Wohngebieten vermindert die Verkehrslärmbelastigung.
- II. Die Erreichbarkeit und Lärmbelastung von Grünflächen beeinflussen deren Wirkung.
- III. Der Urbanisierungsgrad beeinflusst die Wirkung von Begrünung und Grünflächen.

1.2. Vorgehen – Konzept

- 1) Als Ausgangspunkt wird der **Belästigungs-Datensatz** der im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojekts SiRENE (*Short and Long Term Effects of Transportation Noise Exposure*; <http://www.sirene-studie.ch/>) durchgeführten repräsentativen Bevölkerungsbefragung verwendet.
- 2) Ergänzend wird eine Reihe von Messgrössen zur Charakterisierung und Quantifizierung der Begrünung bzw. der Grünflächen und deren Eigenschaften, zur Beschreibung der Wohnumgebung der Studienteilnehmer aus verschiedenen Datensätzen erarbeitet und zusammengestellt.

- 3) Zur zusätzlichen Charakterisierung der Wohnsituation wird der **Urbanisierungsgrad** (Grad der Verstädterung) herbeigezogen.
- 4) Der mit Informationen aus Punkten 2) und 3) erweiterte Original-Datensatz 1) wird mittels **statistischer Ansätze** analysiert. Dabei wird explorativ vorgegangen und geprüft, welche Variablen potenziell einen Einfluss auf das Belästigungsurteil haben. Auf dieser Basis lassen sich Rückschlüsse zur Beantwortung der Fragestellung zu dieser Studie ableiten.
- 5) Die Resultate werden in Form einer wissenschaftlichen Publikation sowie eines Berichtes einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

1.3. Projektorganisation

Die Arbeiten wurden primär durch die Empa durchgeführt, wobei zusätzlich drei Partner eingebunden wurden:

- a) Mark Brink vom BAFU stellte den Belästigungs-Datensatz der SiRENE-Befragung zur Verfügung, unterstützte die Modellentwicklung und trug zur Verfassung der wissenschaftlichen Publikation bei.
- b) Danielle Vienneau vom Swiss TPH steuerte Daten und *Know-How* zur Quantifizierung der Begrünung bzw. von Grünflächen bei und arbeitete an der Publikation mit.
- c) Gian-Luca Polenta von der Firma n-Sphere AG führte die Aussichtsanalyse mit einem Tool durch, welches durch n-Sphere entwickelt worden war.

Bemerkung: Der Text des vorliegenden Berichts beruht auf dem Entwurf der im Rahmen von Compen-SENSE erarbeiteten englischen wissenschaftlichen Publikation. Der Text wurde zur breiteren Verständlichkeit dabei soweit möglich vereinfacht. Für weitere Details verweisen wir auf die Publikation. Die Resultate und Schlussfolgerungen der beiden Dokumente sind dieselben.

Publikation: B. Schäffer, M. Brink, F. Schlatter, D. Vienneau und J. M. Wunderli (2020). *Residential green is associated with reduced annoyance to road traffic and railway noise and increased annoyance to aircraft noise exposure* (Arbeitstitel; Publikation in Arbeit).

2. Literatur – Stand des Wissens

Urbane Gebiete wachsen stetig an Grösse und Einwohnern. Dies geht einher mit zunehmender Lärmbelastung, insbesondere durch Verkehrslärm. In der Schweiz waren im Jahr 2015 über eine Million Personen von schädlichem oder lästigem Verkehrslärm betroffen, und dies besonders im städtischen Kernraum [3]. Eine erhöhte Lärmbelastung kann eine Reihe von Gesundheitsproblemen hervorrufen, welche von Belästigung bis zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen reichen [45, 46]. Da sich das Lärmproblem in Zukunft verschärfen dürfte, stellt sich die Frage, ob negative Auswirkungen auf die Gesundheit durch die Förderung möglicher Erholung von Lärm vermindert werden können. In diesem Zusammenhang scheinen insbesondere die Begrünung und Grünflächen wie Parks im Wohngebiet bzw. in Naherholungszonen potentiell wichtig zu sein.

Der Einfluss von "grünen" (Vegetation, Grünflächen) und/oder "blauen" Landschaftselementen (d.h. Gewässer, als ebenfalls für die Erholung wichtige Landschaftselemente) auf die Lärmbelastung (und weitere Gesundheitsaspekte) können mit verschiedenen Metriken quantifiziert werden, wie NDVI, LU-green, LU-natural oder Aussicht von zuhause auf Vegetation (vgl. Kap. 3.3). Im Nachfolgenden verwenden wir die Begriffe "**Grün**" als Überbegriff für alle Aspekte von grünen bzw. blauen Landschaftselementen (Aussicht auf Vegetation, Begrünung/Vegetation im Wohngebiet, grössere zusammenhängende grüne Naherholungszonen, Gewässer etc.) sowie "**Grün-Metriken**" als Messgrössen zur Charakterisierung und Quantifizierung von grünen und/oder blauen Landschaftselementen.

Aus der aktuellen Literatur geht hervor, dass Grün im Wohngebiet lärmbedingten psychischen und physiologischen Stress [10] und somit eine Vielzahl gesundheitlicher Auswirkungen vermindern kann, von Lärmbelastung [16, 42] (der Fokus der vorliegenden Studie) bis z.B. Mortalität [43]. Dabei spielt nicht nur die Quantität (also wie viele Grünflächen und deren Gesamtanteil am Wohngebiet), sondern auch die Qualität von Grün eine Rolle [41], insbesondere Grösse [24], Vegetationstyp [32], Erreichbarkeit [21] bzw. Nähe [14] oder Lärmbelastung [1].

Die heute verfügbaren Studien konzentrierten sich hauptsächlich auf die Wirkung von Grün auf die Belästigung durch Strassenlärm [13, 42]. Zudem lag der Fokus auf urbanen Gebieten, obwohl die Umgebung (städtisch oder ländlich) ebenfalls eine Rolle spielen dürfte [5]. Schliesslich kennen wir weder Studien, welche den Einfluss der Lärmbelastung innerhalb (grüner) Erholungszonen auf die Lärmbelastung (wohl aber auf die Zufriedenheit [24]), noch Studien, welche die Wirkung von Grün auf nationaler Ebene untersuchten.

In der vorliegenden Studie sollte daher der Einfluss von Grün auf die Belästigung durch Verkehrslärm (Strassenverkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm) für die Schweiz auf nationaler Ebene untersucht werden. Die Hypothesen hierbei waren, dass (i) Grün in Wohngebieten die Verkehrslärmbelastung vermindert, (ii) die Erreichbarkeit und Lärmbelastung von Grünflächen die Wirkung von Grün beeinflussen, und (iii) der Urbanisierungsgrad die Wirkung von Grün beeinflusst. Die Hypothesen wurden getestet, indem der SiRENE Belästigungsdatensatz mit raumbezogenen Variablen (Grün-Metriken, Urbanisierungsgrad) ergänzt und deren Einfluss auf die Lärmbelastung mittels Expositions-Wirkungs-Kurven untersucht wurde.

3. Material und Methoden

3.1. Lärmbelastigungsdaten: die SiRENE Feldstudie

Der in der vorliegenden Studie verwendete Belästigungsdatensatz stammt aus der kürzlich im Rahmen von SiRENE durchgeführten repräsentativen Feldstudie zur Belästigung durch Strassenverkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm. Für diese schweizweite Bevölkerungsbefragung wurde eine nach akustischen Kriterien stratifizierte Stichprobe der Schweizer Bevölkerung gezogen. Details zur Studie finden sich in [6].

Die Befragung wurde in den Jahren 2014 und 2015 durchgeführt. Als Schlüsselement wurde die Lärmbelastigung mittels der 11-Punkte-Skala der ICBEN erfragt [18], woraus die binäre Variable "starke Belästigung" ("*high annoyance*", HA) gewonnen wurde. HA wird für Lästigkeitsurteile von 8, 9 oder 10 auf 1 gesetzt ("*highly annoyed*"), und ansonsten auf 0. Diese Variable ist die Zielgrösse der vorliegenden Untersuchungen. Insgesamt nahmen 5'592 Personen an der Befragung teil, wobei Fälle mit zu geringer Lärmbelastigung (*Day-Evening-Night-Level* $L_{den} < 30$ dB) aus der Studie ausgeschlossen wurden. Die Teilnehmer gaben 1 bis 3 Belästigungsurteile ab (wiederholte Beobachtungen), je nachdem, ob sie einer oder mehreren Lärmquellen ausgesetzt waren. Insgesamt wurden 12'064 Beobachtungen (d.h. Belästigungsurteile) in der Studie berücksichtigt, namentlich 5'431 für Strassen-, 3'536 für Eisenbahn- und 3'097 für Flugverkehr.

Die resultierenden Belästigungsdaten decken die wichtigsten Regionen der Schweiz ab (Abbildung 3-1).

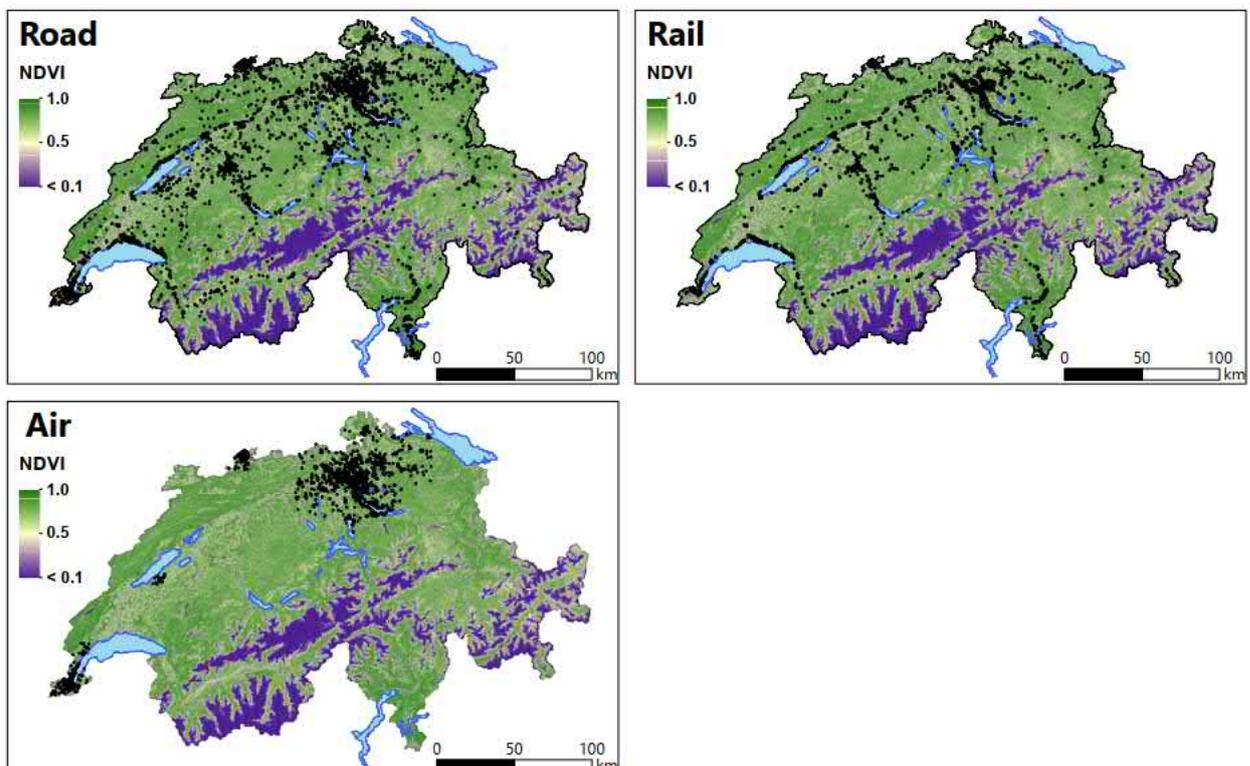


Abbildung 3-1: Verteilung der Teilnehmer der SiRENE-Befragung (schwarze Punkte) für Strassenverkehrs- (ROAD), Eisenbahn- (RAIL) und Fluglärm (AIR). Zudem dargestellt sind der NDVI (vgl. Kap. 3.3) und die wichtigsten Gewässer (in blau).

Auch der Urbanisierungsgrad nach Eurostat wird gut abgedeckt (Abbildung 3-2), obwohl ländliche Gegenden wegen geringerer Bevölkerungsdichte und/oder geringerer Lärmbelastung weniger repräsentiert sind.

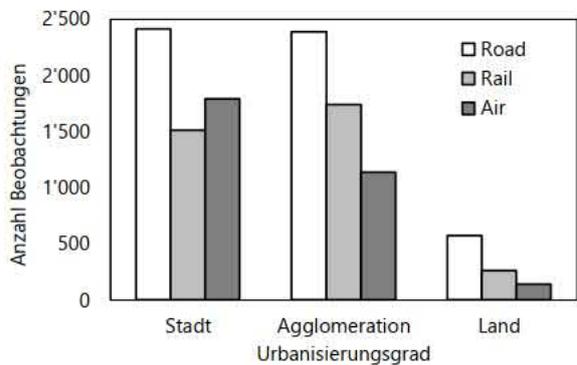


Abbildung 3-2: Verteilung der Teilnehmer der SiRENE-Befragung in Abhängigkeit des Urbanisierungsgrades nach Eurostat [20] für Strassenverkehrs- (Road), Eisenbahn- (Rail) und Fluglärm (Air).

Der Datensatz deckt zudem einen breiten L_{den} -Bereich ab (Abbildung 3-3a). Bereits in den (beobachteten) Rohdaten, aber auch in den modellierten Expositions-Wirkungs-Kurven, zeigt sich deutlich, dass Fluglärm bei einem bestimmten L_{den} deutlich höhere Belästigung hervorruft als Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm (Abbildung 3-3a und b; vgl. auch [6]).

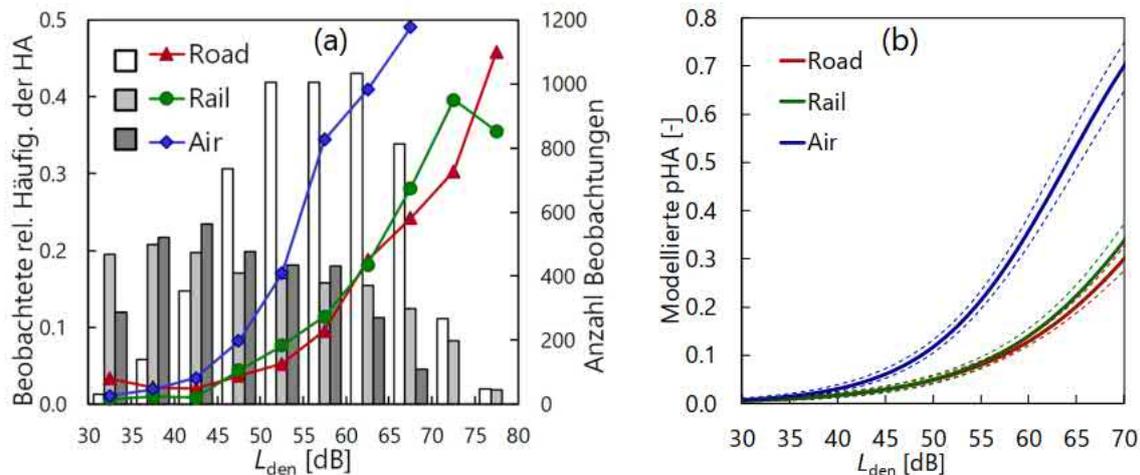


Abbildung 3-3: (a) Beobachtete relative Häufigkeiten der starken Belästigung (HA; Symbole und Linien) und Anzahl Beobachtungen (Balken, Sekundärachse) der SiRENE-Befragung und (b) modellierte Expositions-Wirkungs-Kurven (Referenzmodell, vgl. Kap. 3.4) für die Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung (probability of HA, pHA), in Abhängigkeit des L_{den} [in (a) in 5-dB-Klassen] für Strassenverkehrs- (Road), Eisenbahn- (Rail) und Fluglärm (Air). Man beachte die unterschiedlichen Skalen der Abszisse in (a) und (b).

3.2. Lärmberechnung

Die berechneten Lärmbelastungen waren ebenfalls bereits aus der SiRENE-Befragung verfügbar [6]. Zusammenfassend wurden die Lärmexpositionsberechnungen schweizweit für das Jahr 2011 durchgeführt, separat für Strassenverkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm, und zwar individuell für jede Wohneinheit bzw. jedes Stockwerk pro Teilnehmer, wie im Detail in [26] beschrieben wird. Als akustisches Mass wird hier (wie

auch in [6]) der L_{den} mit den Zeitfenstern 07–19 h (*Day*), 19–23 h (*Evening*) und 23–07 h (*Night*) am Fassadenpunkt der Wohneinheiten mit der jeweils grössten Lärmbelastung verwendet (lauteste Fassade).

3.3. Charakterisierung und Quantifizierung des "Grün"

Im Rahmen dieser Studie wurden verschiedene Grün-Metriken neu entwickelt und/oder verwendet, um grüne und/oder blaue Landschaftselemente im Wohngebiet der Studienteilnehmer zu charakterisieren, namentlich NDVI, LU-green, LU-natural, ruhige und/oder erreichbare Grünflächen, von zuhause aus sichtbare Vegetation, sowie ein Index für die Landschaftsqualität für Naherholung. Die Metriken wurden für die Adressen der Studienteilnehmer berechnet (X- und Y-Koordinaten), und zwar jeweils für vier unterschiedliche kreisförmige Perimetergrössen (sog. *Buffer*), mit Radien von 150 m, 300 m, 500 m und 1'000 m, welche die unmittelbare bis weitere Wohnumgebung repräsentieren. Ähnliche Perimeter wurden bereits in verschiedenen anderen Studien gewählt (z.B. [15, 43]). Nachfolgend werden die Metriken kurz vorgestellt. Details zu den Quantifizierungen finden sich in [17].

- **NDVI:** Der normierte differenzierte Vegetationsindex (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) wird aus Satellitenbildern gewonnen. NDVI ist ein Indikator dafür, wie grün eine Gegend ist. NDVI hat einen Wertebereich von -1 bis $+1$, wobei Werte von < 0.1 karge Flächen (Stein, Sand, Schnee, Gewässer), von 0.2 – 0.3 Busch- und Grasland, und von > 0.3 zunehmend intensiveres Grün (d.h. höheren und dichten Bewuchs, Wälder) repräsentieren [44].
- **LU-green:** Die Grünflächen (bzw. grünen Erholungszonen) wurden aus dem swissTLM^{3D}-Datensatz zur Landnutzung des Bundesamtes für Landestopographie (swisstopo) identifiziert (*land use classification data*, LU-green). LU-green umfasst lokale und nationale Parke sowie Landwirtschafts- und Waldflächen. LU-green weist den Anteil aller Grünflächen an der Perimeterfläche aus ($m^2/m^2_{\text{Perimeter}}$) und hat einen Wertebereich von 0 (keine Grünflächen) bis 1 (100% Grünflächen).
- **LU-natural:** Die Naturflächen stammen aus dem gleichen Datensatz der swisstopo (*land use classification data*, LU-natural) und werden als Summe von LU-green und Gewässern (Seen und Flüsse) berechnet. Der Wertebereich des Anteils an der Perimeterfläche beträgt wie bei LU-green 0 bis 1.
- **Ruhige Grün- und Naturflächen:** Hier werden nur die "ruhigen" Flächenanteile von LU-green und LU-natural mit geringer Verkehrslärmbelastung am Tag berücksichtigt. Die Lärmbelastung wird dabei als energetische Summe ($L_{r_{\text{total}}}$) der Beurteilungspegel (L_r) am Tag für Strassenverkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm charakterisiert. Die nach Lärmschutz-Verordnung LSV [33] ermittelten L_r des Jahres 2011 (gleiches Expositionsjahr wie für die SiRENE-Studie, vgl. Kap. 3.2) wurden der sonBASE [19] entnommen. Zur Quantifizierung wurden nur die Flächenanteile mit $L_{r_{\text{total}}} < 50$, < 45 oder < 40 dB berücksichtigt (d.h. je lauter, desto kleiner die berücksichtigten Flächen). Ruhiges NDVI wurde ebenfalls berechnet, wobei die NDVI-Werte an exponierten Standorten ($L_{r_{\text{total}}} \geq 50$, ≥ 45 oder ≥ 40 dB) zu 0 ("karge Flächen") gesetzt wurden (d.h. je lauter, desto tiefer der NDVI). Die Wertebereiche der ruhigen NDVI, LU-green und LU-natural entsprechen denjenigen ursprünglichen Definitionen.
- **Erreichbare LU-green und LU-natural:** Hier wurde mithilfe des Strassenverkehrsnetzes von OpenStreetMap [39] und unter Berücksichtigung des Gefälles der einzelnen Strassenabschnitte zur Bestim-

mung der Gehgeschwindigkeit mittels der Tobler Wanderfunktion [40] die kürzeste Laufzeit von den Adressen der Studienteilnehmer zu jeder Grün- und Naturfläche innerhalb der Perimeter bestimmt. Die einzelnen Flächen (F_i) wurden danach mit der Laufzeit (t_i) gewichtet (F_i/t_i^2). Für die Gewichtung wurde ein Exponent von 2 gewählt, da die Distanz (bzw. Laufzeit) ein kritischer Faktor ist und ein quadratischer Ansatz auch in der Literatur verbreitet ist [23, 25]. Die Summe der gewichteten Flächen wurden schliesslich so normiert, dass sich ein Wertebereich des Anteils an der Perimeterfläche von 0 (keine erreichbaren Grün-/Naturflächen) bis 1 (100% erreichbare Flächen) ergibt.

- **Ruhige und erreichbare LU-green und LU-natural:** Diese Metriken ergeben sich aus der Kombination der obigen beiden Quantifizierungen.
- **Von zuhause aus sichtbare Vegetation:** Die Aussichtsanalyse quantifiziert für den jeweils lautesten (und leitesten) Fassadenpunkt die Aussicht bis zu einer Distanz von 50 km (Sichtweite bei sehr klarer Wetterbedingung) unter Berücksichtigung von Gebäuden in einem Radius von 500 m, welche die Aussicht verdecken können. Die Analyse verwendet Terrain- (swissALTI^{3D}), Gebäude- (swissBUILDINGS^{3D} oder swissTLM^{3D}) und Landschaftsmodelle (VECTOR25) von swisstopo. Nahe Vegetation (d.h. einzelne Sträucher und Bäume) konnten wegen fehlenden Vegetationsmodellen auf nationaler Ebene nicht berücksichtigt werden. Die Analyse liefert frei sichtbare Landwirtschafts- und Naturflächen in einem Wertebereich von 0 bis 100%.
- **Distanzungsgewichtete Landschaftsqualität für Naherholung (DULN):** Dieser Index, welcher von Kienast *et al.* als schweizweites GIS-Modell basierend auf einer Befragung entwickelt worden war [8, 27], berücksichtigt folgende Landschaftselemente: Distanz zwischen Wohnort und Erholungsgebieten, die Präsenz von offenen Gewässern, Feuchtgebieten, Wäldern, Hügeln, Wanderwegen, erreichbaren Aussichtspunkten, Siedlungen und Einzelobjekten wie z.B. Ruinen, welche für die Erholung im Freien attraktiv sind, die Abwesenheit grosser Strassen, sowie die Vielfalt der Landnutzung. DULN zeigt die Landschaftsqualität in acht Klassen von tief (< 1.5) bis hoch (> 4.5) oder sehr hoch (> 7.5) [8].

Tabelle 3-1 führt den Wertebereich der Grün-Metriken für die Teilnehmer der SiRENE-Studie auf, und Abbildung 3-4 zeigt exemplarisch für die Empa die Grün-Metriken. Die Empa befindet sich in urbanem Raum (Urbanisierungsgrad = 1). Die Umgebung ist ziemlich grün (NDVI >> 0.3) und besteht zu rund einem Viertel aus Grün- bzw. Naturflächen. Allerdings ist nur ein geringer Teil gut erreichbar (<< 1%), und es ist nur wenig Vegetation gegen Südosten sichtbar (~1%). Die Landschaftsqualität für Naherholung ist mit einem Wert von 3.4 mittel.

Tabelle 3-1: Wertebereich der Grün-Metriken für den 500-m-Perimeter der Versuchsteilnehmer der SiRENE-Befragung. Die Werte zeigen die 5%-, 50%- und 95%-Perzentile (erste Zeile) sowie den Wert für die Empa (zweite Zeile, in Klammern). Leere Zellen bedeuten, dass keine Metrik bestimmt wurde.

Grün-Metrik	Alle Flächen	Ruhige Flächen ($L_{r_{total}} < x$ dB)			Erreichbare Flächen	Ruhige ($L_{r_{total}} < x$ dB) & erreichbare Flächen		
		< 50 dB	< 45 dB	< 40 dB		< 50 dB	< 45 dB	< 40 dB
NDVI [-]	0.33 / 0.55 / 0.72 (0.51)	0 / 0.17 / 0.55 (0.04)	0 / 0.04 / 0.43 (0)	0 / 0 / 0.24 (0)				
LU-green [-]	0.01 / 0.26 / 0.8 (0.23)	0 / 0.03 / 0.58 (0)	0 / 0 / 0.43 (0)	0 / 0 / 0.25 (0)	0 / 0 / 0.57 (\ll 0.01)	0 / 0 / 0.33 (0)	0 / 0 / 0.19 (0)	0 / 0 / 0.05 (0)
LU-natural [-]	0 / 0.22 / 0.78 (0.25)	0 / 0.02 / 0.56 (0.01)	0 / 0 / 0.41 (0)	0 / 0 / 0.23 (0)	0 / 0 / 0.56 (\ll 0.01)	0 / 0 / 0.32 (0)	0 / 0 / 0.19 (0)	0 / 0 / 0.05 (0)
Von zuhause sichtbare Vegetation ^a [%]	0 / 0.19 / 8.45 (0.99)							
DULN [-]	1.0 / 3.0 / 8.2 (3.4)							

^a Wert der Empa für eine zufällig ausgewählte Fassade, Blick in Richtung 119° gegen Südosten

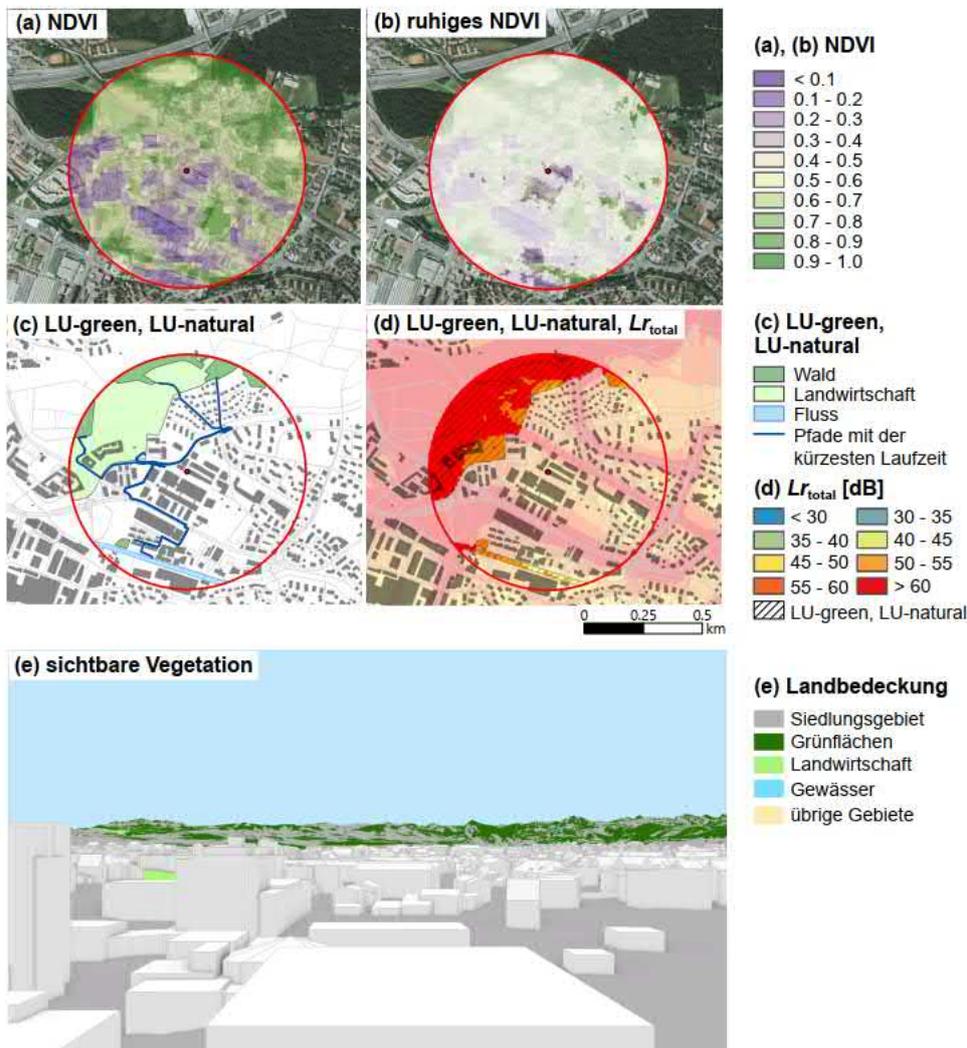


Abbildung 3-4: Grün im Wohngebiet für den 500-m-Perimeter am Beispiel der Empa. (a) NDVI, (b) ruhiges NDVI (satte Farben, mit einem Beurteilungspegel für den Tag $L_{r_{total}} < 50$ dB), (c) LU-green (Wald und Landwirtschaft) und LU-natural (LU-green und Gewässer) sowie Pfade mit der kürzesten Laufzeit, (d) LU-green und LU-natural (schraffierte Flächen, in satte Farben) inkl. Lärmbelastung ($L_{r_{total}}$), und (e) sichtbare Vegetation vom 5. Stock des Schallhauses 2 der Empa in Richtung 119° gegen Südosten.

3.4. Statistische Analyse

Für die vorliegende Studie wurden Expositions-Wirkungs-Kurven (EWK) für den Zusammenhang von starker Belästigung (HA) und Exposition gegenüber Verkehrslärm (L_{den}) und Grün-Metriken (vgl. Tabelle 3-1) erstellt, und zwar separat für Strassen-, Eisenbahn- und Flugverkehr, wobei auch der Urbanisierungsgrad sowie die persönlichen Charakteristiken der Teilnehmer berücksichtigt wurden. Die EWK sagen die Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung voraus (*probability of high annoyance*, pHA).

Die statistischen Analysen wurden mit dem Statistikprogramm IBM SPSS Statistics Version 25 durchgeführt. Die EWK wurden mittels logistischer Regressionsanalyse erstellt, namentlich mittels verallgemeinerter Schätzgleichungen (*generalized estimating equations*, GEE), welche die wiederholten Beobachtungen (1–3 Lästigkeitsurteile pro Teilnehmer vgl. Kap. 3.1) berücksichtigen [38]. Als Referenzmodell wurde ein einfaches Modell entwickelt, welches die Lärmquelle (Strassen-, Eisenbahn- und Flugverkehr), die Lärmbelastung (L_{den}), sowie die Interaktion zwischen den beiden berücksichtigt. Letzteres erlaubt unterschiedlich steile EWK, wie sie in der SiRENE-Studie beobachtet worden waren, nachzubilden [6]. Dieses Referenzmodell ist in Abbildung 3-3b (Kap. 3.1) dargestellt. Darauf aufbauend wurden verschiedene Modellansätze für die EWK entwickelt, wobei die Grün-Metriken seriell, d.h. eine nach der anderen, in die Modelle aufgenommen wurden, um deren Zusammenhang mit der Belästigung zu untersuchen. Zudem wurden Modelle für ausgewählte Grün-Metriken (namentlich NDVI, LU-green, LU-natural sowie erreichbare LU-green und LU-natural) für die vier Perimetergrössen erstellt, um zu untersuchen, ob bzw. wie die Resultate hiervon abhängen. Mittels verschiedener Kriterien (Vollständigkeit, d.h. alle relevanten Variablen werden berücksichtigt; Signifikanz der Effekte, d.h. p -Wert der Nullhypothese ≤ 0.05 ; Sparsamkeit, d.h. möglichst einfaches Modell) wurde ein geeignetes Modell für die EWK identifiziert.

Im Folgenden wird der Einfluss der Lärmbelastung in Kombination mit Grün auf die Belästigung mit dem EWK-Modell gemäss Gleichung (1) beschrieben:

$$\mathbf{pHA} = \mathbf{f}(\mathbf{Lärmquelle, } L_{den}, \mathbf{Grün-Metrik, Urbanisierungsgrad; Interakt.; Pers. Charakt.}) \quad \text{Gleichung (1)}$$

Das Modell beschreibt die Abhängigkeit der Belästigung von der Art der Lärmquelle (Strassen-, Eisenbahn- und Flugverkehr), der Höhe der Lärmbelastung (L_{den}), sowie der Interaktion zwischen den beiden (wie im einfachen Modell, s.o.). Weiter wird die Abhängigkeit von der Grün-Metrik, dem Urbanisierungsgrade, der 3-fach-Interaktion zwischen Lärmquelle, Grün-Metrik und Urbanisierungsgrad, sowie von persönlichen Charakteristiken berücksichtigt. Die 3-fach-Interaktion beschreibt, wie die Wirkung von Grün vom Urbanisierungsgrad abhängt, was wiederum Lärmquellen-spezifisch sein kann. Als wichtige persönliche Charakteristiken wurden Geschlecht, Alter (linearer und quadratischer Term), Wohneigentum und Interview-Sprache (DE vs. FR/IT) berücksichtigt. Interview-Modus (postalisch vs. online) wurde ebenfalls getestet, zeigte aber keinen Einfluss auf die Lärmbelastigung ($p = 0.81$).

4. Resultate

4.1. Grün-Metriken: Korrelationen, Verteilungen

Korrelationsanalysen zeigten, dass die Grün-Metriken von Tabelle 3-1 (ausser DULN) mässig bis hoch miteinander korreliert waren, mit Pearson-Korrelationskoeffizienten (r) von 0.178–0.996, je nach Grün-Metrik und Perimetergrösse. Insbesondere LU-green und LU-natural waren hochkorreliert ($r = 0.927$ – 0.995). Nur DULN war meist gering mit den anderen Metriken korreliert ($r = -0.072$ bis $+0.226$). Weiter waren die Korrelationen für jede Grün-Metrik zwischen den verschiedenen Perimetergrössen hoch (z.B. NDVI: $r = 0.692$ – 0.948), und zwar umso höher, je ähnlicher die Perimetergrössen waren. Zudem waren die Metriken meist nur wenig bis mässig und negativ mit L_{den} korreliert ($r = -0.562$ bis 0.138 für den 500-m-Perimeter), wobei insbesondere die ruhigen Flächen teilweise höhere negative Korrelationen aufwiesen: d.h. je grüner und insbesondere auch je grüner und leiser die Flächen, desto tiefer der L_{den} , und *vice versa*. Schliesslich waren die Grün-Metriken positiv mit dem Urbanisierungsgrad korreliert ($r = 0.036$ – 0.637 für den 500-m-Perimeter), d.h. Grün nimmt in der Reihenfolge Stadt < Agglomeration < Land zu (Abbildung 4-1).

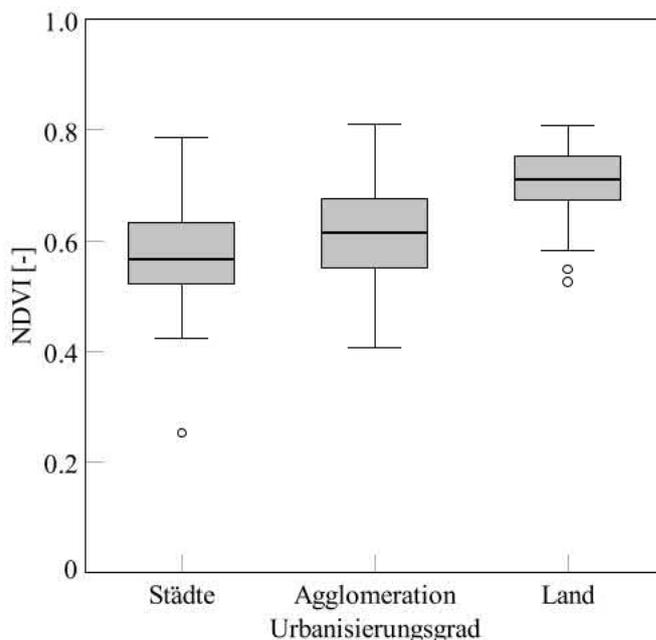


Abbildung 4-1: Boxplots mit Median (50%, horizontale Linien in den Boxen), erstem und drittem Quantil (25% und 75%, untere und obere Begrenzung der Boxen), Antennen, welche maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstands (Boxenhöhe) beinhalten, und Ausreisser (Kreise) für NDVI im 500-m-Perimeter in Abhängigkeit des Urbanisierungsgrades.

Teilweise waren die Grün-Metriken stark schiefverteilt (Abbildung 4-2). Generell nahm die Schiefe der Daten mit abnehmender Perimetergrösse zu (ausser für NDVI, wo die Verteilung recht stabil blieb), wie auch mit zunehmend ruhigeren Flächen (d.h. abnehmendem $L_{r_{total}}$) und/oder mit erreichbaren Flächen.

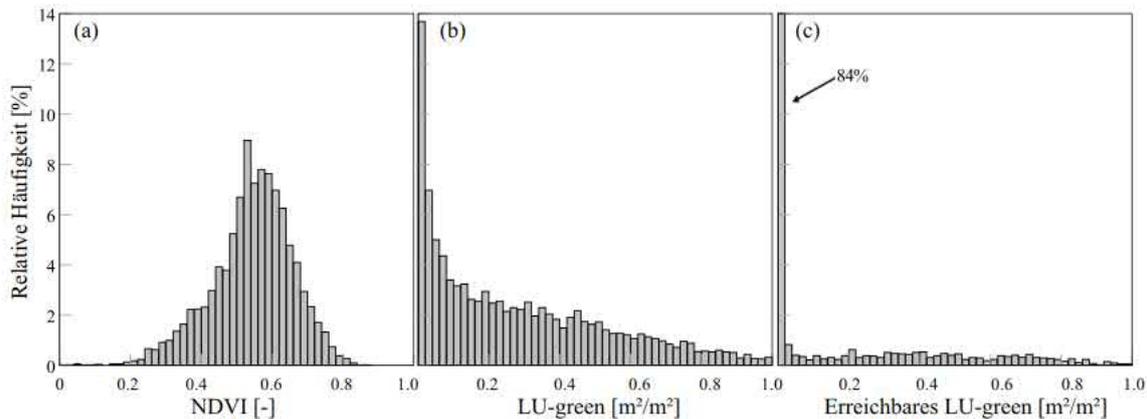


Abbildung 4-2: Häufigkeitsverteilungen (Histogramme) der Grün-Metriken, exemplarisch für (a) NDVI, (b) LU-green und (c) erreichbares LU-green für den 500-m-Perimeter. Man beachte den ersten Balken in (c), welcher mit einem Wert von 84% die Achsenhöhe übersteigt.

4.2. Optimale Perimetergrösse

Grundsätzlich fanden wir für die verschiedenen Perimetergrössen vergleichbare Resultate bezüglich der Wirkung der Grün-Metriken auf die Belästigung. Dennoch zeigte die statistische Analyse, dass für NDVI ein 300-m-Perimeter den stärksten Zusammenhang mit der starken Belästigung HA aufwies (absteigende Modellgüte bezüglich [aufsteigendem] QICu [37] in der Reihenfolge 300 m > 500 m \approx 150 m > 1'000 m). Für LU-green und LU-natural hingegen war der Zusammenhang für den 500-m-Perimeter am stärksten (500 m > 300 m \approx 1'000 m > 150 m), während für erreichbare LU-green und LU-natural die Modellgüte für alle Perimeter ähnlich war. Die Ergebnisse stimmen mit der Literatur überein. So wurde in verschiedenen Studien ein stärkerer Effekt von NDVI für kleinere als grössere Perimeter beobachtet [15, 43]. Zusammenfassend erscheint ein Perimeter von 500 m für alle Grün-Metriken sinnvoll. Im Nachfolgenden zeigen wir daher einheitlich für alle Grün-Metriken die Ergebnisse für den 500-m-Perimeter, welcher auch in der Literatur häufig verwendet wird [15, 16, 43].

4.3. Vielversprechendste Grün-Metriken

Für den gewählten Modellansatz der EWK (Gleichung (1)) zeigten sich folgende Grün-Metriken als besonders geeignet, um die Wirkung von Grün auf die Lärmbelästigung zu beschreiben (absteigende Modellgüte bezüglich [aufsteigendem] QICu [37]): **NDVI > LU-green \approx LU-natural**. Die ähnliche Modellgüte für LU-green und LU-natural ist plausibel, sind die beiden Metriken doch hochkorreliert (vgl. Kap. 4.1). Daneben waren auch das ruhige NDVI ($L_{r\text{total}} < 50$ dB), DULN sowie die ruhigen LU-green und LU-natural ($L_{r\text{total}} < 50$ dB) geeignete Metriken. Die übrigen Grün-Metriken aus Tabelle 3-1 waren zur Quantifizierung der Wirkung von Grün hingegen weniger geeignet.

Interessanterweise hatte die von zuhause von der leisesten Fassade aus sichtbare Vegetation einen schwächeren Zusammenhang mit der Belästigung als von der lautesten Fassade aus. Für ruhige Flächen mit $L_{r\text{total}} < 40$ dB bzw. ruhige erreichbare Flächen mit $L_{r\text{total}} < 45$ dB konnten die EWK nach Gleichung (1) nicht erstellt werden, im ersten Fall wegen sogenannter quasi-vollständiger Trennung der Daten (d.h. Effekte ver-

schiedener Variablen können nicht getrennt werden) und im zweiten Fall wegen ausserordentlich grosser Konfidenzintervalle, d.h. unsicherer Parameter-Schätzungen. (Diese Variablen zeigten auch bei anderen geprüften Modellansätzen eine schlechtere Modellgüte).

Nachfolgend fokussieren wir auf die als besonders geeignet identifizierte Grün-Metriken NDVI und LU-green. Zuerst diskutieren wir die integrale Wirkung von Grün im Wohngebiet auf die Belästigung (Kap. 4.4). Danach untersuchen wir den Einfluss des Urbanisierungsgrades auf die Wirkung von Grün (Kap. 4.5). Schliesslich diskutieren wir, ob die Wirkung von Grün von der Höhe der Lärmbelastung abhängt (Kap. 4.6).

4.4. Zusammenhang zwischen "Grün" im Wohngebiet und Lärmbelästigung

Abbildung 4-3 zeigt die modellierten EWK für die Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung (pHA) als Funktion von Grün in der Wohnumgebung, exemplarisch für eine Lärmbelastung L_{den} von 60 dB. Grün beeinflusst die Lärmbelastigung aller drei Verkehrslärmquellen, wobei NDVI einen deutlich stärkeren Zusammenhang aufweist als LU-green.

Bei **Strassenverkehrslärm** vermindert Grün die Lärmbelastigung deutlich. Dasselbe gilt auch für **Eisenbahnlärm**, wobei eine Belästigungs-mindernde Wirkung nur für NDVI beobachtbar ist. Bei **Fluglärm** hingegen ist Grün in der Wohnumgebung stark mit erhöhter Lärmbelastigung assoziiert. Insbesondere NDVI erhöht bei einem Anstieg von 0 auf 1 die pHA von rund 0.1 auf 0.7. Allerdings bewegen sich 90% des tatsächlich beobachteten Grüns der Studienteilnehmer in einem deutlich engeren Bereich von 0.33–0.72, weshalb auch die tatsächlich auftretende Wirkung in einem engeren Bereich von $pHA \approx 0.2-0.5$ liegt.

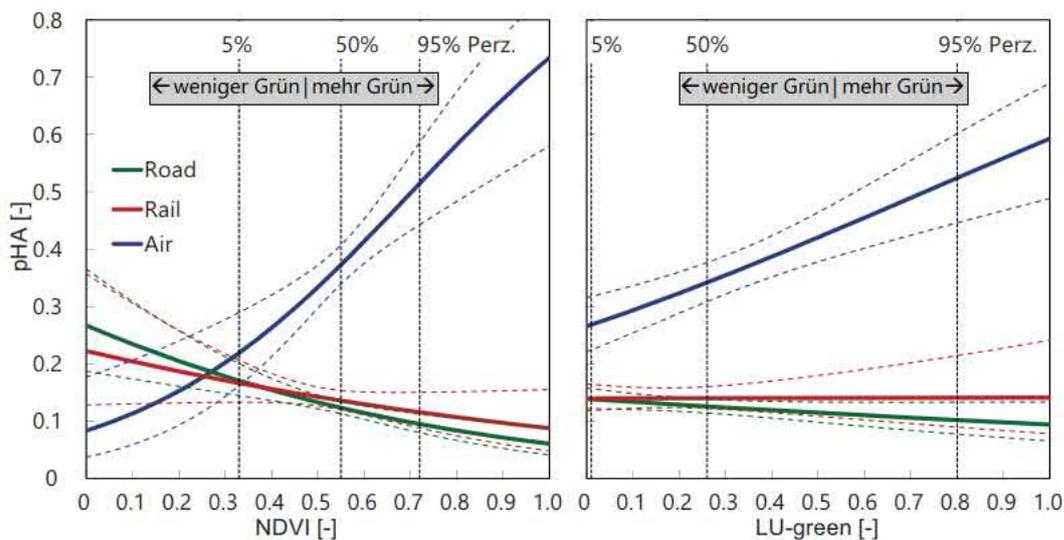


Abbildung 4-3: Expositions-Wirkungs-Kurven für die Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung (pHA) bei einem L_{den} von 60 dB als Funktion von Grün in der Wohnumgebung (links: NDVI, rechts: LU-green) für Strassenverkehrs- (Road), Eisenbahn- (Rail) und Fluglärm (Air), inklusive 95% Konfidenzintervallen. Die Kurven sind auf alle Kovariaten zentriert. Zudem sind die 5%, 50%- und 95%-Perzentile eingezeichnet (Tabelle 3-1).

Abbildung 4-4 zeigt die modellierten EWK für pHA als Funktion des L_{den} und von Grün im Wohngebiet. Es sind jeweils Kurven für die 5%, 50%- und 95%-Perzentile der Grün-Metriken (vgl. Tabelle 3-1) dargestellt, welche Wohngebiete mit wenig, durchschnittlich und viel Grün repräsentieren.

Die starke Wirkung von Grün auf die Lärmbelastigung (Abbildung 4-3) führt zu einer Verschiebung der EWK in Abbildung 4-4 auf der Abszisse (L_{den}), welche als äquivalente Schalldruckpegeländerung (ΔL) interpretiert werden kann. ΔL wird hier als die Verschiebung zwischen den EWK der 5%- und 95%-Perzentile der Grün-Metriken quantifiziert. ΔL hängt von der Lärmquelle und den Grün-Metriken ab (Tabelle 4-1). Als Lesebeispiel: NDVI vermindert die Belästigung durch Strassen- und Eisenbahnlärm, ist aber mit erhöhter Fluglärmbelastigung assoziiert. Die Belästigung durch Strassenlärm war bei den Befragten, deren NDVI-Wert bei nur 5% der Verteilung der Stichprobe lag (d.h. "nicht viel Grün"), bei einem 6.3 dB tieferen L_{den} gleich hoch wie bei denjenigen, deren NDVI bei 95% lag ("viel Grün"). Mit anderen Worten: Diejenigen, deren Grün in der Wohnumgebung nahe dem maximal möglichen Wert lag, waren im Mittel erst bei deutlich höheren L_{den} gleich stark belästigt die diejenigen, deren Grün nahe dem minimal möglichen Wert lag.

Beim **Strassenverkehr** (Abbildung 4-4 links) nimmt die Lärmbelastigung bei gegebener Belastung (L_{den}) mit zunehmendem Grün somit ab. Diese Abnahme entspricht je nach Grün-Metrik einer äquivalenten Pegelreduktion ΔL von -6.3 bis -0.8 dB an (Tabelle 4-1). Interessanterweise ergibt LU-natural etwas geringere Werte für ΔL als LU-green. Auch beim **Eisenbahnlärm** nimmt die Lärmbelastigung mit zunehmendem Grün tendenziell ab (Abbildung 4-4 Mitte). Der Effekt ist jedoch mit ΔL von -3.6 bis $+1.5$ dB weniger deutlich. Bei **Fluglärm** hingegen ist zunehmendes Grün mit deutlich höherer Belästigung assoziiert (Abbildung 4-4 rechts), mit ΔL von $+0.8$ bis $+10.6$ dB.

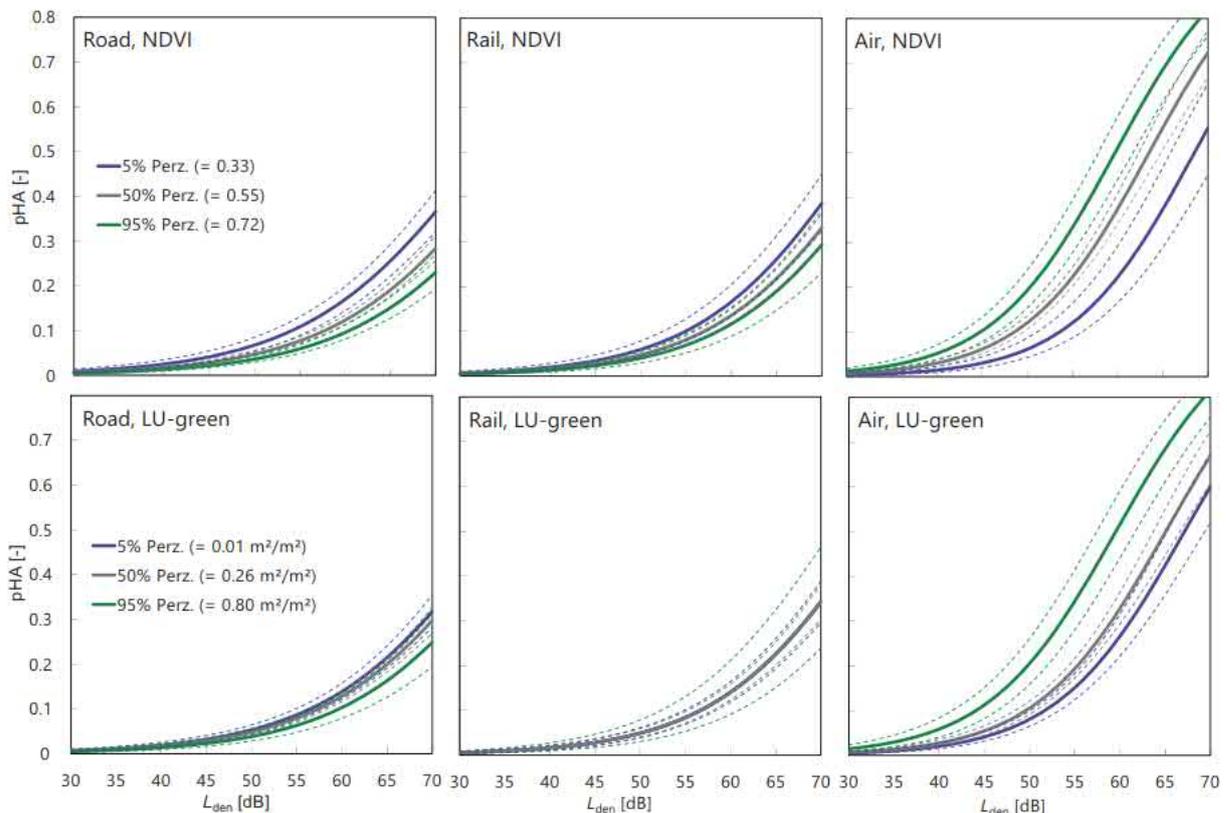


Abbildung 4-4: Expositions-Wirkungs-Kurven für die Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung (pHA) als Funktion des L_{den} und Grün in der Wohnumgebung (oben: NDVI, unten: LU-green) für Strassenverkehrs- (Road), Eisenbahn- (Rail) und Fluglärm (Air), inklusive 95% Konfidenzintervallen. Die drei Kurven pro Plot repräsentieren die 5%, 50% und 95%-Perzentile (Tabelle 3-1). Die Kurven sind auf alle Kovariaten zentriert.

Tabelle 4-1: Äquivalente Schalldruckpegeländerung (ΔL) der Lärmbelastigung bei einem Anstieg von Grün in der Wohnumgebung vom 5%- auf das 95%-Perzentil, separat für die drei Lärmquellen (Road, Rail, Air). Positive Werte bedeuten eine Zunahme und negative Werte eine Abnahme der Lärmbelastigung bei zunehmendem Grün. ΔL zwischen Expositions-Wirkungs-Kurven mit nicht-überlappenden Konfidenzintervallen sind fett, und positive Werte von ΔL sind violett hervorgehoben.

Grün-Metrik	ΔL der Lärmquelle		
	Road	Rail	Air
NDVI	-6.3 *	-3.6 *	+8.8 *
Ruhiges NDVI ($L_{r_{total}} < 50$ dB)	-3.9 *	+0.5	+7.3 *
Ruhiges NDVI ($L_{r_{total}} < 45$ dB)	-1.8 *	+0.5	+7.5 *
LU-green	-3.2 *	+0.1	+7.6 *
Ruhige LU-green ($L_{r_{total}} < 50$ dB)	-3.2 *	-0.4	+9.6 *
Ruhige LU-green ($L_{r_{total}} < 45$ dB)	-3.0 *	+0.3	+10.7 *
Erreichbares LU-green	-4.4	-3.4	+3.5 *
Ruhige & erreichbares LU-green ($L_{r_{total}} < 50$ dB)	-5.5 *	- ^a	+5.1
Ruhige & erreichbares LU-green ($L_{r_{total}} < 45$ dB)	- ^a	- ^a	- ^a
LU-natural	-1.5	+1.3	+7.9 *
Ruhige LU-natural ($L_{r_{total}} < 50$ dB)	-2.0 *	+1.3	+9.3 *
Ruhige LU-natural ($L_{r_{total}} < 45$ dB)	-2.0 *	+1.5	+10.3 *
Erreichbares LU-natural	-4.6	-3.6	+3.5 *
Ruhige & erreichbares LU-natural ($L_{r_{total}} < 50$ dB)	-6.1	- ^a	+5.2
Ruhige & erreichbares LU-natural ($L_{r_{total}} < 45$ dB)	- ^a	- ^a	- ^a
Von zuhause sichtbare Vegetation ^b	-1.6	-1.2	+2.6 *
Landschaftsqualität für Naherholung (DULN)	-0.8	-3.6 *	+0.8 *

^a Modell kann nicht (zuverlässig) geschätzt werden.

^b Ausblick von der lautesten Fassade.

* Signifikante Effekte der Grün-Metriken ($p < 0.05$) gemäss separater logistischer Regression für die jeweilige Lärmquelle.

4.5. Effekt-Modifikation durch Urbanisierungsgrad

Während die Wirkung der "Basis-Metriken" NDVI, LU-green und LU-natural auf die Lärmbelastigung nicht stark vom Urbanisierungsgrad abhängt (nicht dargestellt), ändert die Stärke der Wirkung der aus den obigen Metriken abgeleiteten Grössen (erreichbare und/oder ruhige Gebiete) sowie der von zuhause aus sichtbaren Vegetation mit dem Urbanisierungsgrad.

Strassenverkehrslärm: Abbildung 4-5 zeigt die EWK für die Belästigung durch Strassenverkehrslärm für ruhiges LU-grün, erreichbares LU-grün und von zuhause aus sichtbare Vegetation in Abhängigkeit des Urbanisierungsgrades. Ruhige Grünflächen scheinen besonders in ländlichen Gebieten wichtig zu sein ($\Delta L = -9.6$ dB), erreichbare Grünflächen hingegen vor allem in Städten ($\Delta L = -8.8$ dB). Ähnliche Zusammenhänge wurden auch für ruhiges NDVI bzw. LU-natural gefunden, während ruhiges und zugängliches LU-green bzw. LU-natural die Wirkungen von ruhigem LU-green und zugänglichem LU-green kombinierte,

d.h. eine positive Wirkung sowohl in der Stadt als auf dem Land zeigte (nicht dargestellt). Die von zuhause aus sichtbare Vegetation vermag die Belästigung in urbanen Gebieten zu vermindern ($\Delta L = -3.5$ dB), nicht aber in der Agglomeration oder in ländlichen Gebieten.

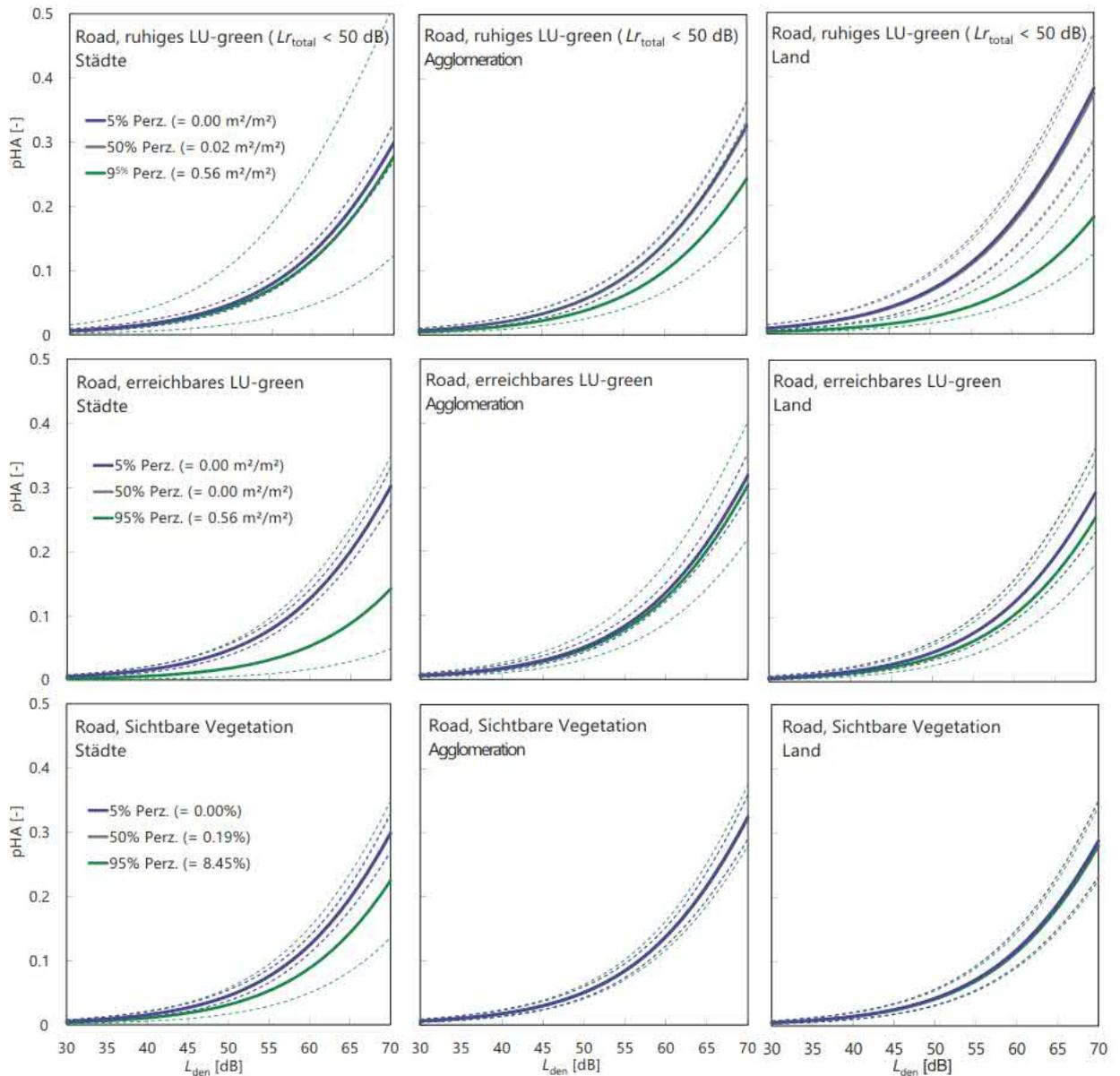


Abbildung 4-5: Expositions-Wirkungs-Kurven für die Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung (pHA) für Strassenverkehrslärm (Road) als Funktion des L_{den} , Grün in der Wohnumgebung (oben: ruhiges LU-green mit $L_{r_{total}} < 50$ dB, Mitte: erreichbares LU-green, unten: von zuhause aus sichtbare Vegetation) und Urbanisierungsgrad (links: Städte, Mitte: Agglomeration, rechts: Land), inklusive 95% Konfidenzintervallen. Die drei Kurven pro Plot repräsentieren die 5%-, 50%- und 95%-Perzentile (Tabelle 3-1). Die Kurven sind auf alle Kovariaten zentriert.

Eisenbahnlärm: Bei Eisenbahnlärm war der Einfluss des Urbanisierungsgrades bezüglich der Wirkung von Grün auf die Belästigung weniger deutlich, was angesichts der geringen und meist nicht-signifikanten integralen Wirkung von Grün (Kap. 4.4) zu erwarten war. Lediglich die erreichbaren LU-grün und LU-natural waren in der Stadt tendenziell wichtiger als auf dem Land.

Fluglärm: Beim Fluglärm beeinflusste der Urbanisierungsgrad vor allem den Zusammenhang der Belästigung mit ruhigem LU-green und der von zuhause aus sichtbarer Vegetation (Abbildung 4-6). Beide Grün-Metriken wiesen die stärkste Assoziation mit der Lärmbelästigung im urbanen Raum auf (ruhiges LU-green: $\Delta L = +13.7$ dB; sichtbare Vegetation: $\Delta L = +4.1$ dB). Bezüglich ruhigem LU-green kontrastiert der Befund mit der Beobachtung für Strassenverkehrslärm, wo die Wirkung in ländlichen Gebieten am stärksten war (Abbildung 4-5).

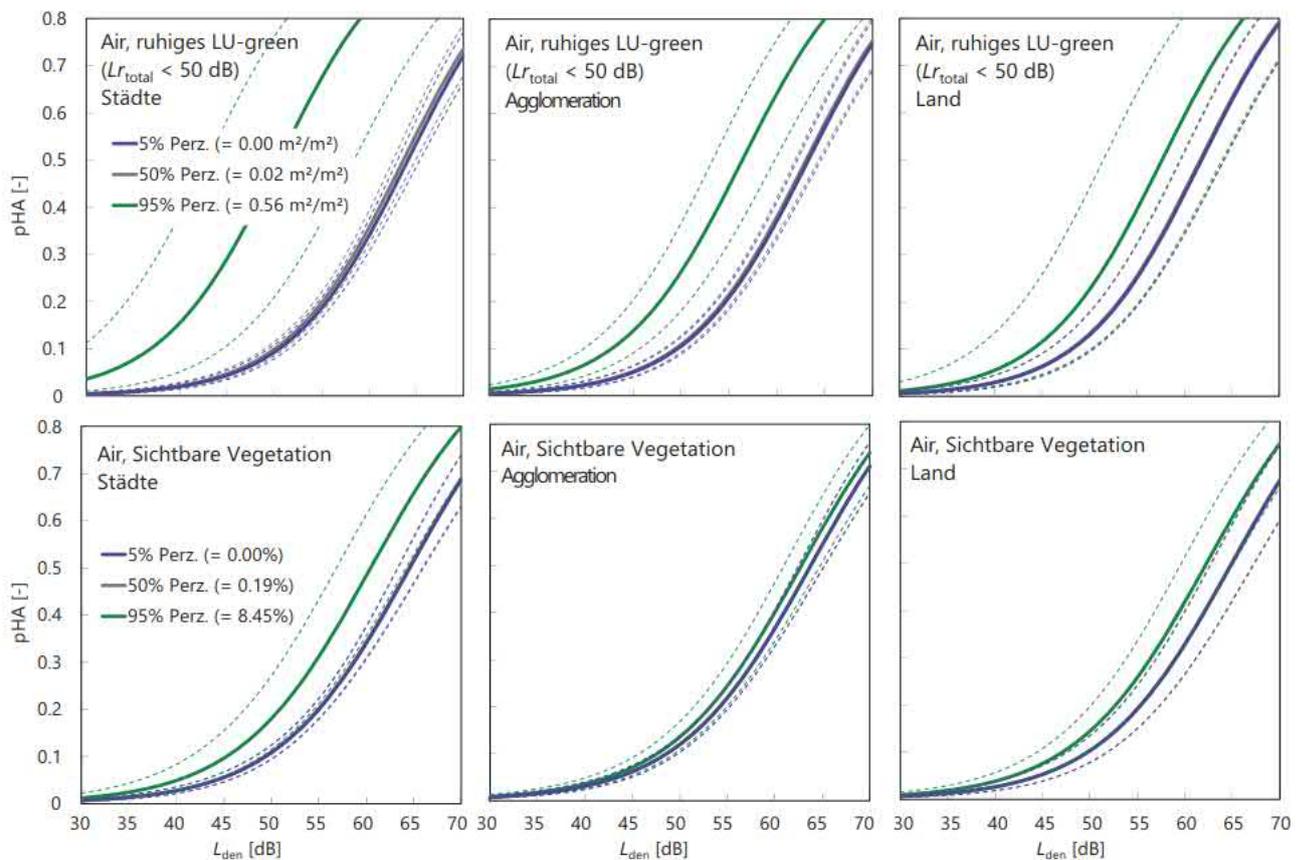


Abbildung 4-6: Expositions-Wirkungs-Kurven für die Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung (pHA) für Fluglärm (Air) als Funktion des L_{den} , Grün in der Wohnumgebung (oben: ruhiges LU-green mit $L_{r total} < 50$ dB, unten: von zuhause aus sichtbare Vegetation) und Urbanisierungsgrad (links: Städte, Mitte: Agglomeration, rechts: Land), inklusive 95% Konfidenzintervallen. Die drei Kurven pro Plot repräsentieren die 5%, 50% und 95%-Perzentile (Tabelle 3-1). Die Kurven sind auf alle Kovariaten zentriert.

Bei der Interpretation obiger Ergebnisse ist die fehlende Signifikanz der integralen Wirkung von erreichbarem LU-grün und der von zuhause aus sichtbaren Vegetation im Falle von Strassenverkehr zu berücksichtigen (Tabelle 4-1). Ferner weisen die EWK der 95%-Perzentile insbesondere im urbanen Raum auffallend grosse Konfidenzintervalle auf (Abbildung 4-5, Abbildung 4-6), d.h. die Assoziation von Grün mit der Be-

lästigung ist mit erhöhter Unsicherheit behaftet. Ferner sind die EWK der 5%- und 50%-Perzentile meist annähernd deckungsgleich, was auf die schiefe Verteilung dieser Grün-Metriken (Kap. 4.1) zurückzuführen ist.

4.6. Effektstärke des Grün bei unterschiedlichen Lärmbelastungen

In diesem Abschnitt untersuchen wir, ob die Wirkung von Grün in Wohngebieten von der Lärmbelastung abhängt. Dabei soll der Frage nachgegangen werden, ob die Wirkung von Grün bei "mittlerer" Lärmbelastung höher als bei tiefen oder sehr hohen Lärmbelastungen ist. Hierzu werden die beobachteten relativen Häufigkeiten für starke Belästigung in zwei Klassen unterteilt (Beobachtungen mit "viel" [NDVI > 0.5] und "wenig" Grün [NDVI ≤ 0.5]) und in Abhängigkeit des L_{den} dargestellt. Abbildung 4-7 zeigt die Resultate.

Bei "tiefen" L_{den} (Strassenlärm < 55 dB, Eisenbahnlärm < 50 dB, Fluglärm < 40 dB) scheint die Wirkung von Grün auf die beobachteten relativen Häufigkeiten von HA tatsächlich vernachlässigbar zu sein. Dies ist plausibel, da bei tiefer Lärmbelastung auch die Belästigung gering ausfällt. Oberhalb dieser L_{den} -Werte wird die Wirkung des NDVI auf die Belästigung deutlich. Bei Strassenlärm zeigt sich eine durchgehend positive Wirkung von mittleren bis zu hohen Pegeln; eine "Obergrenze" für die Wirkung von Grün auf die Belästigung ist nicht erkennbar (Abbildung 4-7 links). Bei Eisenbahn- und Fluglärm hingegen (Abbildung 4-7 Mitte und rechts) scheint die Wirkung von NDVI bei "hohen" L_{den} (Eisenbahnlärm > 70 dB, Fluglärm > 60 dB) gering zu werden. Aufgrund der relativ geringen Anzahl von Beobachtungen bei hohen L_{den} (Abbildung 3-3) kann die Existenz einer allfälligen Obergrenze jedoch nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden, bzw. es kann davon ausgegangen werden, dass es zumindest im untersuchten Pegelbereich, welchem der Grossteil der Studienteilnehmer ausgesetzt waren, keine Obergrenze gibt. Tatsächlich verlaufen auch die EWK eines zusätzlich erstellten statistischen Modells, welches eine Interaktion zwischen L_{den} und Grün enthält, um zu berücksichtigen, dass die Wirkung von Grün von der Lärmbelastung abhängen kann, nahezu parallel (nicht dargestellt) und unterscheiden sich nur wenig von den EWK des in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Modells (Gleichung (1)). Daher sind die hier dokumentierten EWK gemäss Gleichung (1), welche keine Abhängigkeit der Wirkung von Grün von L_{den} berücksichtigen, geeignet, um die beobachteten Wirkungen von Grün beschreiben.

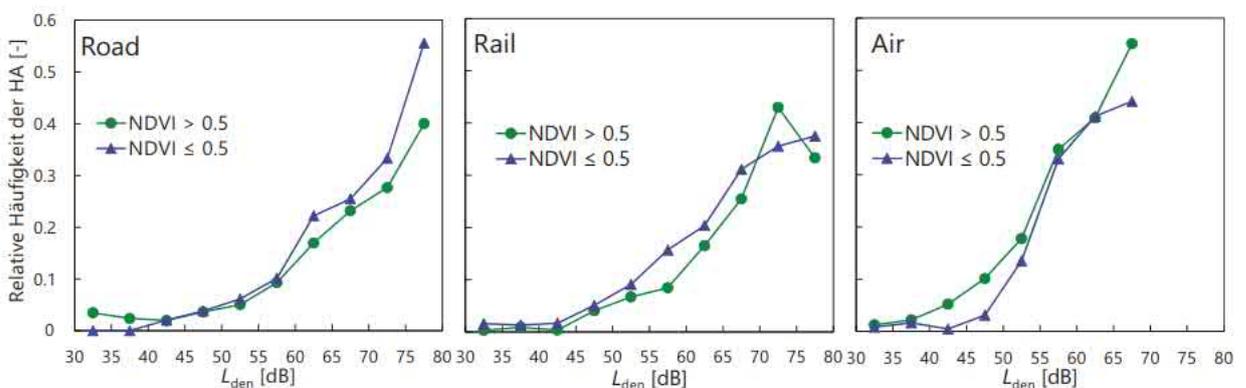


Abbildung 4-7: Beobachtete relative Häufigkeiten der starken Belästigung (HA; Symbole und Linien) der SiRENE-Befragung in Abhängigkeit des L_{den} (in 5-dB-Klassen) und NDVI (2 Klassen, NDVI > 0.5 oder ≤ 0.5) für Strassenverkehrs- (Road), Eisenbahn- (Rail) und Fluglärm (Air).

5. Diskussion

5.1. Synthese

In der vorliegenden Studie wurde der Zusammenhang von Grün im Wohngebiet mit der Belästigung der Schweizer Bevölkerung durch Strassenverkehr-, Eisenbahn- und Fluglärm auf nationaler Ebene untersucht. Dazu wurden EWK für die Wahrscheinlichkeit starker Belästigung in Abhängigkeit des L_{den} , der Lärmquelle, der Grün-Metriken, des Urbanisierungsgrades, deren Interaktionen sowie persönlicher Charakteristiken erstellt. Die Studie ergänzt die heute verfügbare Literatur insofern, als letztere auf die Belästigung durch Strassenverkehrslärm in urbanen Gebieten fokussiert [13, 42], die Wirkung ruhiger Grünflächen nicht systematisch untersucht und auf geografisch begrenzten Studiengebieten beruht.

Belästigung durch Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm: Die vorliegende Studie bestätigt Ergebnisse der Literatur, dass Grün in Wohngebieten die Belästigung durch Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm vermindern kann [13, 42]. Die Wirkung entspricht einer äquivalenten Pegelminderung von bis zu 6 dB für Strassenverkehrslärm und bis zu 3 dB für Eisenbahnlärm. Für Strassenverkehrslärm liegt die Effektstärke in derselben Grössenordnung wie von den Studien [28] und [36] ausgewiesen (wobei letztere die Wirkung des Zugangs zu einer ruhigen Seite des Wohngebäudes untersuchten), ist aber deutlich geringer als die in einem Literatur-Review geschätzten 10 dB [42]. Allerdings umfasste der Review v.a. Studien urbaner Gebiete, während die hier vorliegenden Werte für die integrale Wirkung, unabhängig des Urbanisierungsgrades, gelten. Tatsächlich fanden wir für einige Grün-Metriken in Städten eine deutlich stärkere Wirkung (z. B. erreichbares LU-green rund 9 dB, vgl. Abbildung 4-5). Diese vorteilhaften Wirkungen können durch positive Anreize für gesundheitsfördernde Aktivitäten wie z.B. Sport sowie Erholung erklärt werden [35].

Von den hier untersuchten Grün-Metriken zeigte NDVI als Indikator dafür, wie grün es in den Wohngebieten ist, die stärkste Wirkung auf die Lärmbelästigung, gefolgt von LU-green und LU-natural, während die Wirkung der abgeleiteten Grössen (erreichbare und/oder ruhige Grünflächen) sowie der von zuhause aus sichtbaren Vegetation und der Landschaftsqualität für Naherholung (DULN) weniger stark war. Somit konnten die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten komplexeren Metriken zur Charakterisierung der Grünflächen den erklärten Zusammenhang zwischen Belästigung und Grün nicht verbessern.

Dass NDVI und LU-green die Belästigung durch Strassenverkehrslärm vermindern, wurde auch in anderen Studien gefunden [16, 21]. Interessanterweise hatte LU-green eine gleich starke oder sogar stärkere Wirkung auf die Belästigung als LU-natural. Somit scheinen Gewässer gemäss der vorliegende Studie kaum eine reduzierende Wirkung auf die Belästigung zu haben. Dies stimmt mit den Resultaten einer Studie in Hong Kong überein, dass die Aussicht auf Grün die Belästigung stärker vermindert als die Aussicht auf Gewässer [31]. Die im oben erwähnten Review [42] berichtete besonders starke Wirkung der von zuhause aus sichtbaren Vegetation konnte hier nicht nachgewiesen werden. Diese Diskrepanz der Ergebnisse dürfte jedoch methodischer Natur sein. Während [42] die subjektiven Angaben der Studienteilnehmer zur Aussicht auf nahe Vegetation (z. B. Bäume, Sträucher) berücksichtigte, konnte genau diese Vegetation hier aufgrund fehlender Datengrundlagen (Vegetationsmodelle) auf nationaler Ebene nicht berücksichtigt werden.

Während somit die "Basis-Metriken" NDVI, LU-green und LU-natural insgesamt die stärkste Wirkung auf die Lärmbelastigung aufwiesen, sind auch die anderen Metriken durchaus wichtig. Ihr Effekt hängt jedoch stark vom Urbanisierungsgrad ab. So sind die von zuhause aus sichtbare Vegetation sowie gut erreichbare Grünflächen besonders im urbanen Raum wichtig, nicht aber in der Agglomeration oder in ländlichen Gebieten. Der Befund der wichtigen Rolle gut erreichbarer Grünflächen im urbanen Raum, um die Lärmbelastigung zu vermindern, stimmt mit der Literatur überein [21]. Im Gegensatz hierzu waren ruhige Grünflächen in ländlichen Gegenden deutlich wichtiger als im urbanen Raum, was auf die Erwartungshaltung der Anwohner zurückzuführen sein dürfte. Da man eine Übereinstimmung der audio-visuellen Eigenschaften von Landschaften erwartet [9], sollten Grünflächen auf dem Land "weniger laut" sein als in der Stadt.

Interessanterweise hingen die "Basis-Metriken" NDVI, LU-green und LU-natural vergleichsweise wenig vom Urbanisierungsgrad ab. Dies dürfte ein Hinweis darauf sein, dass die Wirkung bestimmter Qualitätsmerkmale von Grünflächen (insb. Erreichbarkeit und Lärmbelastung) zwar davon abhängen, ob man in städtischen oder ländlichen Gebieten lebt, das Grundprinzip "je grüner, desto besser" jedoch allgemein gilt.

Belästigung durch Fluglärm: Im Gegensatz zu Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm war zunehmendes Grün – unerwartet – sehr deutlich mit zunehmender Fluglärmelastigung assoziiert. Die entsprechende äquivalenten Pegelerhöhung von rund 10 dB war deutlich stärker als die Pegelverminderung bei Strassenverkehrs- und Bahnlärm. Die Ergebnisse stimmen mit denjenigen von [7] überein, wo festgestellt wurde, dass die selbstberichtete Schlafstörung wegen Fluglärm auf dem Land (d.h. in Gebieten mit mehr Grün, vgl. Abbildung 4-1) höher war als in Städten (mit weniger Grün). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass beide Datensätze (die hier verwendeten Belästigungsdaten [6] sowie die Schlafstörungsdaten [7]) derselben Umfrage entstammen und dass die beiden Zielgrößen zumindest teilweise ähnliche Konstrukte sein können. Ebenfalls wurde in einer Laborstudie zur Lärmbelastigung wegen kombinierten Strassenverkehrs- und Meeresgeräuschen festgestellt, dass der Blick auf Grün von bergigen Landschaften die Belästigung verstärken kann [11]. Die vorliegenden Ergebnisse kontrastieren hingegen einer Laborstudie, welche fand, dass Vegetation die wahrgenommene Qualität einer Geräuschkulisse mit Fluglärmereignissen verbessern kann [34].

Mehrere Besonderheiten des Fluglärms sind als Ursache für die kontrastierende Wirkung von Grün denkbar. Während erstens Strassenverkehrslärm für die meisten Wohngebiete einen Teil der Geräuschkulisse bildet, dürfte Fluglärm noch immer als "Fremdlärm" wahrgenommen werden. Zweitens können Anwohner von Strassenverkehrs- und Eisenbahnanlagen dem Lärm innerhalb von Grünflächen "entkommen". Letztere bieten Zugang zu ruhigeren Zonen, was die Erholung fördert. Flugzeuge hingegen können Grünflächen überfliegen, sodass die Anwohner dem Lärm innerhalb von Grünflächen nicht entfliehen können, was die Belästigung erhöhen kann. Diese Hypothese stützend, fand eine Studie in einem Österreicher Alpental in natürlicherer Umgebung höhere Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärmbelastigung als in weniger natürlicher Umgebung [29], wobei diese Wirkung einer äquivalenten Pegelerhöhung von 3–7 dB entsprach. Alpentäler können aufgrund der Hanglagen, welche die direkte Schallausbreitung in grössere Distanzen fördern, geringe Lärmgradienten aufweisen. Tatsächlich wurden in solchen Regionen besonders hohe Verkehrslärmbelastigungen beobachtet [30]. In einer Analyse des vorliegenden SiRENE-Datensatzes für Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm in Schweizer Alpentälern fanden wir zwar keine solche umgekehrte (d.h.

Belästigungs-erhöhende) Wirkung. Allerdings war die verfügbare Stichprobe sehr klein (< 500 Beobachtungen für Strassenverkehr, < 350 für die Eisenbahn). Drittens könnten Fluglärm-belastete Grünflächen als "audio-visuell inkongruent" negativ wahrgenommen werden [9]. Dies könnte auch der Grund dafür sein, dass in Städten ruhige Grünflächen (wo der Fluglärm hörbar ist) mit besonders starker Belästigung assoziiert sind (Abbildung 4-6). Schliesslich könnte auch die Sichtbarkeit der Flugzeuge als Lärmquellen, welche durch die Vegetation oft nicht vollständig verdeckt werden können, eine Rolle spielen. Allerdings dürfte dieser Effekt im Vergleich zur Wirkung von Grün eine eher untergeordnete Rolle spielen [42].

Wirkung von Grün bei unterschiedlicher Lärmbelastung: Der Zusammenhang von Grün und Belästigung war über einen breiten Bereich von L_{den} recht stabil. Eine zuverlässige Bestimmung einer "Obergrenze" für die Wirkung von Grün auf die Belästigung war anhand des vorliegenden Datensatzes nicht möglich, schliesst eine solche Grenze aber auch nicht aus. Gemäss Literatur würde bei mittlerer Lärmbelastung eine stärkere Wirkung als bei tiefen [42] oder hohen Pegeln [2] erwartet. Allerdings fand auch eine andere Studie [4] über einen breiten L_{Aeq} -Bereich keine starke Änderung der Wirkung einer ruhigen Gebäudeseite (definiert als "Fenster zum Hof, zum Wasser oder zur Grünfläche") auf die Belästigung. Unsere Daten legen daher nahe, dass für relevante Bereiche von Verkehrslärm die Wirkung von Grün auf die Lärmbelastigung recht stabil ist.

5.2. Stärken und Grenzen

Nach unserem Wissen wurde hier zum ersten Mal die Wirkung von Grün in Wohngebieten auf die Verkehrslärmbelastigung auf nationaler Ebene bzw. für sämtliche Urbanisierungsgrade untersucht, separat für Strassenverkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm. Die Stärken des hier zugrundeliegenden Datensatzes der SiRENE-Studie (Stichprobengrösse, Stratifizierung der Stichprobe, Detaillierungsgrad der Lärmberechnungen, Berücksichtigung saisonaler Unterschiede in der Belästigung usw.) sind detailliert in [6] diskutiert. Zudem konnte der hier erarbeitete Datensatz mit einer Reihe von Metriken zur Charakterisierung von Grün anhand einer grossen Stichprobe (fast 5'600 Befragte) geprüft werden.

Dennoch sollten gewisse Grenzen der vorliegenden Studie bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Erstens sind beim zugrunde liegenden Belästigungsdatensatz die Rücklaufquote der Fragebogen von 31% (welche jedoch klar innerhalb der erwarteten Bandbreite liegt) sowie die zeitliche Diskrepanz zwischen berechneter Exposition (Jahr 2011) und Befragung (2014/2015) zu berücksichtigen, wie in [6] detailliert diskutiert wird. Zweitens wurde die Stichprobe der Befragung zwar aufgrund akustischer Kriterien stratifiziert [6]; für die vorliegende Studie wäre jedoch eine Stratifizierung, welche auch Grün einschliesst, wünschenswert gewesen. Drittens repräsentiert die Metrik für von zuhause aus sichtbare Vegetation nur teilweise den realen Ausblick der Bewohner, da sie nur die frei sichtbaren Grünflächen, nicht aber die Vegetation (Sträucher, Bäume) im unmittelbaren Wohnumfeld berücksichtigt. Letztere könnte aber das dominante Element für die positive Wirkung der sichtbaren Vegetation sein. Dies könnte auch der Grund für die im Vergleich zur Literatur (10 dB [42]) hier deutlich schwächere beobachtete Wirkung der sichtbaren Vegetation sein (~1,5 dB insgesamt; ~3,5 dB in Städten). Schliesslich fanden verschiedene Studien, inklusive der zugrunde liegenden SiRENE-Befragung, dass der Zugang zu einer leisen Seite (bzw. leisen Fassade) des Wohngebäudes die Lärmbelastigung zu vermindern vermag [6, 12, 22, 36]. Dies wirft die Fra-

ge auf, ob der Zugang zu einer leisen Seite und/oder zu Grün in der Wohnumgebung konkurrierende, sich ergänzende oder gar synergetische Wirkungen auf die Lärmbelastigung aufweisen. Es gibt zwar Hinweise aus der Literatur, dass der Zugang zu beidem (leise Seite und Grün) vorteilhaft ist, d.h. dass das eine das andere nicht hinfällig macht [21]. Eine systematische Untersuchung zu diesem Thema wäre jedoch wünschenswert und könnte im Rahmen eines Anschlussprojektes mit dem vorliegenden SiRENE-Datensatz durchgeführt werden.

5.3. Die wichtigsten Ergebnisse im Überblick

Unsere Analysen zeigen, dass zusätzliches Grün mit geringerer Belästigung durch Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm, aber mit erhöhter Belästigung durch Fluglärm assoziiert ist. Die Gesamtwirkung von Grün kann als äquivalente Pegeländerung in dB, gemessen als Verschiebung zwischen den Expositions-Wirkungs-Kurven der Befragten, deren Grün bei nur 5% der Verteilung der Stichprobe lag (d.h. "nicht viel Grün"), und derjenigen, deren Wert bei 95% lag ("viel Grün ") quantifiziert werden. Insgesamt fanden wir so eine äquivalente Pegelreduktion von rund 6 dB bzw. 3 dB für Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm, aber eine Erhöhung um etwa 10 dB für Fluglärm. Letztere Erkenntnis steht im Einklang mit den starken Belästigungsreaktionen, welche bisweilen in ländlichen Gebieten mit Fluglärm beobachtet werden. Weitere Studien zum besseren Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen wären wünschenswert. NDVI und LU-green stellten sich als die beiden Metriken heraus, welche den Einfluss der Vegetation auf die Belästigung am besten beschreiben. Die Wirkungen der von zuhause sichtbaren Vegetation sowie von erreichbaren und/oder ruhigen Grünflächen auf die Lärmbelastigung waren insgesamt weniger bedeutend. Allerdings hängen deren Wirkung (im Gegensatz zu NDVI und LU-green) stark vom Urbanisierungsgrad ab. Für Strassenlärm scheinen sichtbare Vegetation und Erreichbarkeit der Grünflächen besonders in Städten vorteilhaft zu sein, während ruhige Grünflächen vor allem in ländlichen Gebieten wirksam sind. Die vorliegende Studie legt somit nahe, dass Grün in Wohngebieten insbesondere in dicht besiedelten (d.h. urbanen) Gebieten gefördert werden sollte. Es gilt: "je grüner desto besser".

6. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie erörterte mithilfe eines breiten Spektrums von Grün-Metriken die Wirkung von Grün in Wohngebieten auf die Belästigung durch Strassenverkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm. Darauf basierend können die zu testenden Hypothesen (Kap. 1.1) folgendermassen beantwortet werden:

- I. **Die Begrünung in Wohngebieten vermindert die Verkehrslärmbelastigung:** Ja für Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm, Nein für Fluglärm. In Übereinstimmung mit der Literatur vermindert Grün tatsächlich die Belästigung durch Strassenverkehrs- und Eisenbahnlärm: "je grüner, desto besser". Im Gegensatz hierzu war Grün mit deutlich erhöhter Fluglärmbelastigung assoziiert.
- II. **Die Erreichbarkeit und Lärmbelastung von Grünflächen beeinflussen deren Wirkung:** Ja, wobei deren Einfluss stark vom Urbanisierungsgrad abhängt. Allerdings sind die "Basis-Metriken" für Grün wie z.B. NDVI bezüglich der integralen Wirkung (unabhängig des Urbanisierungsgrades) wichtiger.
- III. **Der Urbanisierungsgrad beeinflusst die Wirkung von Begrünung und Grünflächen:** Ja. Erreichbare Flächen sowie von zuhause aus sichtbare Vegetation sind vor allem in der Stadt wichtig, ruhige Flächen hingegen auf dem Land. Interessanterweise hängen die "Basis-Metriken" für Grün (NDVI, LU-green und LU-natural) deutlich weniger vom Urbanisierungsgrad ab. Das Grundprinzip "je grüner, desto besser" scheint somit allgemein gültig zu sein.

Unsere Ergebnisse unterstreichen somit, dass Grün insbesondere in dicht besiedelten Gebieten mit Strassenverkehrslärm (und Eisenbahnlärm) gefördert werden sollte. Allerdings könnten auch fluglärmbelastete Gebiete durchaus von zusätzlichem Grün profitieren. Zu Fluglärm wären aber weitere Studien zur Bestätigung des unerwarteten Ergebnisses, dass Grün mit erhöhter Lärmbelastigung assoziiert ist, sowie zum vertieften Verständnis dieser Wirkungskette wünschenswert.

Abschliessend können wir die in der EKLK diskutierte Frage "**Kann durch eine Aufwertung des öffentlichen Raumes mittels Erholungszonen eine kompensierende Wirkung in Bezug auf die Schädlichkeit und Lästigkeit von Verkehrslärm erzielt werden?**" mit **JA** beantworten.

7. Dank

Die Autoren danken Silvia Tobias für ihren Beitrag zum Stand des Wissens in der Literatur und Felix Kienast für die Bereitstellung der schweizweiten Daten zur distanzungewichteten Landschaftsqualität für Naherholung.

8. Abkürzungen

DULN	Distanzungengewichtete Landschaftsqualität für Naherholung
EWK	Expositions-Wirkungs-Kurve
Grün	Überbegriff für alle Aspekte von grünen bzw. blauen Landschaftselementen, wie Aussicht auf Vegetation, Begrünung/Vegetation im Wohngebiet, grössere zusammenhängende grüne Naherholungszonen, Gewässer etc.
Grün-Metriken	Messgrössen zur Charakterisierung und Quantifizierung von grünen und/oder blauen Landschaftselementen
HA	starke Belästigung (<i>high annoyance</i>)
L_{den}	<i>Day-Evening-Night-Level</i>
L_r	Beurteilungspegel
$L_{r_{total}}$	Totale Verkehrslärmbelastung am Tag, d.h. energetische Summe der $\rightarrow L_r$ am Tag für Strassenverkehrs-, Eisenbahn- und Fluglärm
LSV	Lärmschutz-Verordnung
LU-green	separat ausgewiesene Grünflächen, bzw. grüne Erholungszonen gemäss dem swisstopo Datensatz swissTLM ^{3D}
LU-natural	separat ausgewiesene Naturflächen, d.h. LU-green plus Gewässer gemäss dem swisstopo Datensatz swissTLM ^{3D}
NDVI	normierter differenzierter Vegetationsindex (<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>) auf Basis von Satellitenbildern
pHA	Wahrscheinlichkeit für starke Belästigung (<i>probability of high annoyance</i>)
QICu	<i>Corrected quasi-likelihood under the independence model criterion</i> , ein Mass für die Modellgüte
ΔL	äquivalente Schalldruckpegeländerung

9. Literatur

- [1] Alvarsson, J.J., S. Wiens, M.E. Nilsson, 2010. *Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise*. International Journal of Environmental Research and Public Health **7**, 1036-1046.
- [2] Aylor, D.E. L.E. Marks, 1976. *Perception of noise transmitted through barriers*. Journal of the Acoustical Society of America **59**, 397-400.
- [3] BAFU, 2018. *Lärmbelastung in der Schweiz. Ergebnisse des nationalen Lärmmonitorings sonBASE, Stand 2015. Umwelt-Zustand Nr. 1820*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz.
URL: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/>.
- [4] Bodin, T., J. Björk, J. Ardö, M. Albin, 2015. *Annoyance, sleep and concentration problems due to combined traffic noise and the benefit of quiet side*. International Journal of Environmental Research and Public Health **12**, 1612-1628.
- [5] Brambilla, G. L. Maffei, 2006. *Responses to noise in urban parks and in rural quiet areas*. Acta Acustica United with Acustica **92**, 881-886.
- [6] Brink, M., B. Schäffer, D. Vienneau, M. Foraster, R. Pieren, I.C. Eze, C. Cajochen, N. Probst-Hensch, M. Röösli, J.M. Wunderli, 2019. *A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: differences between continuous and intermittent noise*. Environment International **125**, 277-290.
- [7] Brink, M., B. Schäffer, D. Vienneau, R. Pieren, M. Foraster, I.C. Eze, F. Rudzik, L. Thiesse, C. Cajochen, N. Probst-Hensch, M. Röösli, J.M. Wunderli, 2019. *Self-reported sleep disturbance from road, rail and aircraft noise: exposure-response relationships and effect modifiers in the SiRENE study*. International Journal of Environmental Research and Public Health **16**, 1-21.
- [8] Buchecker, M., F. Kienast, B. Degenhardt, S. Widmer, M. Moritzi, 2013. *Naherholung räumlich erfassen*. Merkblatt für die Praxis Nr. 51.
URL: <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A9147/datastream/PDF/view>.
- [9] Carles, J.L., I.L. Barrio, J.V. de Lucio, 1999. *Sound influence on landscape values*. Landscape and Urban Planning **43**, 191-200.
- [10] Chang, C.-Y., W.E. Hammitt, P.-K. Chen, L. Machnik, W.-C. Su, 2008. *Psychophysiological responses and restorative values of natural environments in Taiwan*. Landscape and Urban Planning **85**, 79-84.
- [11] Chau, C.K., T.M. Leung, J.M. Xu, S.K. Tang, 2018. *Modelling noise annoyance responses to combined sound sources and views of sea, road traffic, and mountain greenery*. Journal of the acoustical Society of America **144**, 3503-3513.
- [12] de Kluzenaar, Y., E.M. Salomons, S.A. Janssen, F.J. van Lenthe, H. Vos, H. Zhou, H.M.E. Miedema, J.P. Mackenbach, 2011. *Urban road traffic noise and annoyance: the effect of a quiet façade*. Journal of the Acoustical Society of America **130**, 1936-1942.
- [13] Dzhambov, A.M., 2017. *More residential greenspace is associated with lower noise annoyance: results from a quantitative synthesis of the literature*, in Traffic Noise: Exposure, Health Effects and Mitigation, C. Łuczjan and D. Gérard, Editors. Nova Science Publishers: New York, NY. p. 77-104.
- [14] Dzhambov, A.M. D.D. Dimitrova, 2015. *Green spaces and environmental noise perception*. Urban Forestry & Urban Greening **14**, 1000-1008.
- [15] Dzhambov, A.M., I. Markevych, P. Lercher, 2018. *Greenspace seems protective of both high and low blood pressure among residents of an Alpine valley*. Environment International **121**, 443-452.
- [16] Dzhambov, A.M., I. Markevych, B. Tilov, Z. Arabadzhiev, D. Stoyanov, P. Gatseva, D.D. Dimitrova, 2018. *Lower noise annoyance associated with GIS-derived greenspace: pathways through perceived*

- greenspace and residential noise*. International Journal of Environmental Research and Public Health **15**, 15.
- [17] Empa, 2019. *Datenaufbereitung CompenSense. Datenaufbereitung und Implementation in Python 2.7. Interner Bericht zu Projekt Nr. 5211.01519.100.01, Stand 31.01.2019*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [18] Fields, J.M., R.G. De Jong, T. Gjestland, I.H. Flindell, R.F.S. Job, S. Kurra, P. Lercher, M. Vallet, T. Yano, R. Guski, U. Felscher-Suhr, R. Schumer, 2001. *Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and a recommendation*. Journal of Sound and Vibration **242**, 641-679.
- [19] BAFU, 2020. *Webpage: sonBASE GIS noise database*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. URL: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/noise/state/gis-laermdatenbank-sonbase.html>.
- [20] BFS, 2020. *Webpage: Räumliche Typologien. Europäischer Urbanisierungsgrad 2011 (DEGURBA of the European statistical office Eurostat)*. Bundesamt für Statistik (BFS), Bern. URL: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/querschnittsthemen/raeumliche-analysen/raeumliche-gliederungen/raeumliche-typologien.html>.
- [21] Gidlof-Gunnarsson, A. E. Öhrström, 2007. *Noise and well-being in urban residential environments: the potential role of perceived availability to nearby green areas*. Landscape and Urban Planning **83**, 115-126.
- [22] Gidlöf-Gunnarsson, A. E. Öhrström, 2010. *Attractive "quiet" courtyards: a potential modifier of urban residents' responses to road traffic noise?* International Journal of Environmental Research and Public Health **7**, 3359-3375.
- [23] Giles-Corti, B., M.H. Broomhall, M. Knuiaman, C. Collins, K. Douglas, K. Ng, A. Lange, R.J. Donovan, 2005. *Increasing walking - how important is distance to, attractiveness, and size of public open space?* American Journal of Preventive Medicine **28**, 169-176.
- [24] Gozalo, G.R., J.M.B. Morillas, D.M. González, 2019. *Perceptions and use of urban green spaces on the basis of size*. Urban Forestry & Urban Greening **46**.
- [25] Hansen, W.G., 1959. *How accessibility shapes land-use*. Journal of the American Institute of Planners **25**, 73-76.
- [26] Karipidis, I., D. Vienneau, M. Habermacher, M. Köpfli, M. Brink, N. Probst-Hensch, M. Rössli, J.M. Wunderli, 2014. *Reconstruction of historical noise exposure data for environmental epidemiology in Switzerland within the SiRENE project*. Noise Mapping **1**, 3-14.
- [27] Kienast, F., B. Degenhardt, B. Weilenmann, Y. Wager, M. Buchecker, 2012. *GIS-assisted mapping of landscape suitability for nearby recreation*. Landscape and Urban Planning **105**, 385-399.
- [28] Lercher, P., 1996. *Environmental noise and health: an integrated research perspective*. Environment International **22**, 117-129.
- [29] Lercher, P. G. Brauchle, 2000. *Die wechselseitige Beeinflussung von externer akustischer und "natürlicher" Umgebung in einem alpinen Tal: umweltpsychologische und gesundheitliche Perspektiven*. in Fortschritte der Akustik – DAGA 2000, 26. Deutsche Jahrestagung für Akustik. Oldenburg, Deutschland: Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA).
- [30] Lercher, P., B. de Greve, D. Botteldooren, J. Rüdisser, 2008. *A comparison of regional noise-annoyance-curves in alpine areas with the European standard curves*. in Proceedings of the 9th Congress of the International Commission on the Biological Effects of Noise (ICBEN). Foxwoods, CT: available from Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, Dortmund, Germany.
- [31] Leung, T.M., J.M. Xu, C.K. Chau, S.K. Tang, L.S.C. Pun-Cheng, 2017. *The effects of neighborhood views containing multiple environmental features on road traffic noise perception at dwellings*. Journal of the Acoustical Society of America **141**, 2399-2407.

- [32] Li, H.N., C.K. Chau, S.K. Tang, 2010. *Can surrounding greenery reduce noise annoyance at home?* Science of the Total Environment **408**, 4376-4384.
- [33] LSV, 1986. *Lärmschutz-Verordnung (LSV) vom 15. Dezember 1986 (Stand am Stand am 7. Mai 2019)*. SR 814.41. URL: <http://www.admin.ch/ch/d/sr/8/814.41.de.pdf>.
- [34] Lugten, M., M. Karacaoglu, K. White, J. Kang, K. Steemers, 2018. *Improving the soundscape quality of urban areas exposed to aircraft noise by adding moving water and vegetation*. Journal of the Acoustical Society of America **144**, 2906-2917.
- [35] Markevych, I., J. Schoierer, T. Hartig, A. Chudnovsky, P. Hystad, A.M. Dzhambov, S. de Vries, M. Triguero-Mas, M. Brauer, M.J. Nieuwenhuijsen, G. Lupp, E.A. Richardson, T. Astell-Burt, D. Dimitrova, X.Q. Feng, M. Sadeh, M. Standl, J. Heinrich, E. Fuertes, 2017. *Exploring pathways linking greenspace to health: theoretical and methodological guidance*. Environmental Research **158**, 301-317.
- [36] Öhrström, E., A. Skånberg, H. Svensson, A. Gidlöf-Gunnarsson, 2006. *Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness*. Journal of Sound and Vibration **295**, 40-59.
- [37] Pan, W., 2001. *Akaike's information criterion in generalized estimating equations*. Biometrics **57**, 120-125.
- [38] Schäffer, B., R. Pieren, F. Mendolia, M. Basner, M. Brink, 2017. *Noise exposure-response relationships established from repeated binary observations: modeling approaches and applications*. Journal of the Acoustical Society of America **141**, 3175-3185.
- [39] SwissOSM, 2020. *Webpage: OpenStreetMap Switzerland*. URL: <https://osm.ch/>.
- [40] Tobler, W., 1993. *Three presentations on geographical analysis and modeling: non-isotropic geographic modeling; speculations on the geometry of geography; and global spatial analysis*. Technical report 93-1. University of California, Santa Barbara, CA. URL: <https://escholarship.org/uc/item/05r820mz>.
- [41] Van Dillen, S.M.E., S. De Vries, P.P. Groenewegen, P. Spreeuwenberg, 2012. *Greenspace in urban neighbourhoods and residents' health: adding quality to quantity*. Journal of Epidemiology and Community Health **66**, e8-e8.
- [42] Van Renterghem, T., 2019. *Towards explaining the positive effect of vegetation on the perception of environmental noise*. Urban Forestry & Urban Greening **40**, 133-144.
- [43] Vienneau, D., K. de Hoogh, D. Faeh, M. Kaufmann, J.M. Wunderli, M. Rösli, The SNC Study Group, 2017. *More than clean air and tranquillity: residential green is independently associated with decreasing mortality*. Environment International **108**, 176-184.
- [44] Weier, J. D. Herring, 2000. *Webpage: Measuring Vegetation (NDVI & EVI)*. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>.
- [45] WHO, 2011. *Burden of Disease from Environmental Noise. Quantification of Healthy Life Years Lost in Europe*. ed. F. Theakston. World Health Organization (WHO), Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark. URL: <http://www.euro.who.int/en/publications>.
- [46] WHO, 2018. *Environmental Noise Guidelines for the European Region*. World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark. URL: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region>.