



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr

**Grundlagen für die Durchführung einer Kosten-
Nutzen-Analyse**

**Evaluation des effets externes du trafic routier :
Principes pour la réalisation d'une analyse
coûts / avantages**

**Evaluation of external effects of road transport:
Basics for the realisation of a cost benefit analysis**

**Ecoplan
Christoph Lieb
Heini Sommer**

**Forschungsprojekt VSS 2015/115 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Februar 2020

1667

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur die vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autoren. Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr

**Grundlagen für die Durchführung einer Kosten-
Nutzen-Analyse**

**Evaluation des effets externes du trafic routier :
Principes pour la réalisation d'une analyse
coûts / avantages**

**Evaluation of external effects of road transport:
Basics for the realisation of a cost benefit analysis**

**Ecoplan
Christoph Lieb
Heini Sommer**

**Forschungsprojekt VSS 2015/115 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Februar 2020

1667

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Christoph Lieb, Ecoplan AG

Mitglieder

Heini Sommer, Ecoplan AG

Federführende Fachkommission

Fachkommission 1: Verkehr

Begleitkommission

Präsident

Jost Lükling

Mitglieder

Frank Bruns

Alain Cuche

Dieter Egger

Christian Ferres

Nikolaus Hilty

Christina Hürzeler

Michael Neumeister

Kay Axhausen (bis Ende 2018)

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Kurzfassung	9
Résumé	11
Summary	13
1 Einleitung	15
1.1 Überarbeitungsbedarf der SN 641 828	15
1.1.1 Neue Anforderungen aus der neuen Grundnorm	15
1.1.2 Veränderungen in Berechnungsmethoden und Datengrundlagen	16
1.1.3 Weiterer Überarbeitungsbedarf	17
1.2 Ziel des Forschungsprojektes	17
1.3 Zu betrachtende externe Effekte	18
1.4 Vorgaben aus der Grundnorm	19
1.5 Verhältnis der Arbeiten zu NISTRA	20
1.6 Preisstand	21
1.7 Grundlagen und Vorgehen	21
1.8 Anwendungsbeispiel	21
1.9 Gliederung des Berichtes	23
2 Lärm	25
2.1 Einleitung.....	25
2.2 Mengengerüst	26
2.2.1 Benötigte Inputdaten	26
2.2.2 Berechnung des Mengengerüstes	30
2.2.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten	30
2.3 Wertgerüst.....	31
2.3.1 Bewertungsmethode	31
2.3.2 Bestimmung des Wertgerüstes	31
2.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten	35
2.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand	35
2.4 Veränderung über die Zeit	36
2.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen	39
2.5.1 Bewertung über Durchschnittskosten	39
2.5.2 Einsatzgebiet der vereinfachten Methode.....	39
2.6 Anwendungsbeispiel	40
2.7 Vergleich mit bisheriger Methodik.....	41
3 Luftverschmutzung	43
3.1 Einleitung.....	43
3.1.1 Durchschnittskosten oder Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten.....	43
3.1.2 Berücksichtigte Effekte.....	45
3.1.3 Lokale und regionale Schadstoffe.....	46
3.2 Mengengerüst	51
3.2.1 Benötigte Inputdaten	51
3.2.2 Berechnung des Mengengerüstes	52
3.2.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten	53
3.3 Wertgerüst.....	54
3.3.1 Bewertungsmethode	54
3.3.2 Bestimmung des Wertgerüstes	54
3.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten	57
3.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand	60
3.4 Veränderung über die Zeit	61
3.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen	64
3.6 Anwendungsbeispiel	65

3.7	Vergleich mit bisheriger Methodik.....	67
4	Klima	69
4.1	Einleitung	69
4.2	Mengengerüst	69
4.2.1	Benötigte Inputdaten.....	69
4.2.2	Berechnung des Mengengerüstes.....	69
4.2.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten.....	70
4.3	Wertgerüst	70
4.3.1	Bewertungsmethode	70
4.3.2	Bestimmung des Wertgerüstes.....	70
4.3.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten.....	72
4.3.4	Anpassung an einen anderen Preisstand.....	72
4.4	Veränderung über die Zeit	72
4.5	Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen	73
4.6	Anwendungsbeispiel	73
4.7	Vergleich mit bisheriger Methodik.....	74
5	Bodenversiegelung.....	75
5.1	Einleitung	75
5.2	Mengengerüst	75
5.2.1	Benötigte Inputdaten.....	75
5.2.2	Berechnung des Mengengerüstes.....	76
5.2.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten.....	77
5.3	Wertgerüst	77
5.3.1	Bewertungsmethode	77
5.3.2	Bestimmung des Wertgerüstes.....	77
5.3.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten.....	77
5.3.4	Anpassung an einen anderen Preisstand.....	78
5.4	Veränderung über die Zeit	78
5.5	Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen	78
5.6	Anwendungsbeispiel	78
5.7	Vergleich mit bisheriger Methodik.....	79
6	Vor- und nachgelagerte Prozesse.....	81
6.1	Einleitung	81
6.2	Mengengerüst	83
6.2.1	Benötigte Inputdaten.....	83
6.2.2	Berechnung des Mengengerüstes.....	84
6.2.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten.....	87
6.3	Wertgerüst	87
6.3.1	Bewertungsmethode	87
6.3.2	Bestimmung des Wertgerüstes.....	87
6.3.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten.....	92
6.3.4	Anpassung an einen anderen Preisstand.....	92
6.4	Veränderung über die Zeit	92
6.5	Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen	93
6.6	Anwendungsbeispiel	93
6.7	Vergleiche mit bisheriger Methodik.....	95
7	Externe Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs	97
7.1	Einleitung	97
7.2	Mengengerüst	98
7.2.1	Benötigte Inputdaten.....	98
7.2.2	Berechnung des Mengengerüstes.....	99
7.2.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten.....	100
7.3	Wertgerüst	100
7.3.1	Bewertungsmethode	100
7.3.2	Bestimmung des Wertgerüstes.....	100

7.3.3	Anpassung an örtliche Gegebenheiten	101
7.3.4	Anpassung an einen anderen Preisstand	102
7.4	Veränderung über die Zeit	102
7.5	Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen	102
7.6	Anwendungsbeispiel	103
7.7	Vergleich mit bisheriger Methodik.....	103
8	Zusammenfassung des Anwendungsbeispiels	105
9	Anhang A: Verworfenere vereinfachte Methode der Lärmbewertung	107
10	Anhang B: Berechnung des Kostensatzes für die Bodenversiegelung	109
	Literaturverzeichnis	113
	Projektabschluss	117
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	120

Kurzfassung

In der SN 641 828 «Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Effekte» wird erläutert, wie die externen Effekte in Kosten-Nutzen-Analysen (KNA) von Strassenprojekten berücksichtigt werden können (ohne Unfallkosten – siehe dazu SN 641 824). Der vorliegende Bericht bildet die Grundlage für die Überarbeitung der SN 641 828. Er beschreibt die verwendeten Methoden umfassend und ersetzt damit alle bisherigen Grundlagen. Auf Basis der aktuellen Literatur – vor allem der Studien des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) zu den externen Effekten – werden insbesondere folgende Anpassungen vorgenommen:

- Neu werden zusätzliche externe Effekte miteinbezogen:
 - Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung
 - **Vor- und nachgelagerte Prozesse** der Antriebsenergie (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Herstellung, Transport und Bereitstellung der Antriebsenergie (Benzin, Diesel, Strom)) und der Infrastruktur (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Bau, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur). Damit können neu auch die externen Effekte der Elektrofahrzeuge miteinbezogen werden. Dazu werden die externen Kosten der Stromproduktion umfassend aktualisiert. Auch für die anderen Kostenbestandteile werden Bewertungsmethoden für die KNA hergeleitet und die entsprechenden Kostensätze ermittelt.
 - **Externe Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs:** Durch die Bewegung im Fuss- und Veloverkehr sinkt die Häufigkeit von Spitalaufenthalten bei sechs Krankheitsbildern und die Lebenserwartung steigt. Für die Berücksichtigung dieser positiven Auswirkungen wird eine neue Methodik hergeleitet und die dazu benötigten Daten werden zur Verfügung gestellt.
- Dagegen entfallen zwei bisherige Indikatoren, nämlich das Landschafts- und Ortsbild sowie die externen Kosten des Energieverbrauchs durch den Infrastrukturbetrieb.
- Neu wird ein deutlich höherer VOSL (value of statistical life) verwendet als bisher. Zudem wird eine Sensitivität für den VOSL gerechnet, da bei der Herleitung des VOSL grosse Unsicherheiten bestehen ($\pm 50\%$).
- Zudem werden die Berechnungsmethoden und die Datengrundlagen der übrigen Kostenbereiche umfassend überarbeitet und aktualisiert:
 - **Lärm:** Die benötigten Inputdaten für die Bewertung beruhen auf neuen Lärmmassen. Damit sinken auch die Schwellenwerte, ab denen Lärmkosten berücksichtigt werden. Zudem werden neu Lärmkosten in Eigentumswohnungen und bei den lärmbedingten Gesundheitskosten auch jene von Schlaganfällen miteinbezogen. Schliesslich werden alle Datengrundlagen (inkl. VOSL) aktualisiert. Wie bisher beschränkt sich die Bewertung auf den Lärm am Wohnort.
 - **Luftverschmutzung:** Die bisherige Methodik wird im Wesentlichen beibehalten, aber umfassend aktualisiert (inkl. Einbezug Biodiversitätsverluste und höherer VOSL). Die lokalen Gesundheits- und Gebäudeschäden im unbebauten Gebiet werden neu auf Null gesetzt (dafür im bebauten Gebiet erhöht).
 - **Klima:** Es wird neu ein gut doppelt so hoher Kostensatz als bisher vorgeschrieben (neu 121.5 CHF pro Tonne CO₂), der pro Jahr um 3% zunimmt. Zudem erfolgt neu eine Sensitivitätsanalyse für den Klimakostensatz.
 - **Bodenversiegelung:** Bei der Bodenversiegelung wird nur der Kostensatz pro versiegelte Fläche aktualisiert. Auf einen Wechsel der Methodik wurde nach reiflicher Überlegung verzichtet.

Zu jedem der sechs (fett hervorgehobenen) Kostenbereiche enthält der Bericht zudem eine Abschätzung wie sich die Effekte über die Zeit verändern dürften, da für die Anwendung in einer KNA die Entwicklung der externen Effekte über eine Zeitperiode von mehr als 50 Jahre prognostiziert werden müssen (Planungs- und Bauphase plus 40-jährige Betriebsphase). Zudem werden die Bewertungsmethoden anhand eines Anwendungsbeispiels illustriert, welches das Vorgehen veranschaulicht. Schliesslich erfolgt für alle Kostenbereiche ein Vergleich zur bisherigen Methodik.

Mit der nachgeführten Norm entspricht die Bewertung der externen Effekte wieder dem aktuellen Stand der Forschung.

Résumé

Le SN 641 828 « Analyses coûts / avantages du trafic routier : Effets externes » explique comment les effets externes peuvent être pris en compte dans les analyses coûts / avantages (KNA) des projets routiers (sans coûts d'accidents – voir SN 641 824). Ce rapport constitue la base de la révision du SN 641 828. Il décrit en détail les méthodes utilisées et remplace ainsi tous les principes précédents. Sur la base de la littérature actuelle – en particulier les études sur les effets externes réalisées par l'Office fédéral du développement territorial (ARE) – les adaptations suivantes seront notamment effectuées :

- D'autres effets externes sont désormais inclus :
 - Perte de biodiversité due à la pollution atmosphérique
 - **Processus en amont et en aval** de l'énergie de propulsion (dommages causés par l'émission de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques pendant la production, le transport et la fourniture de l'énergie de propulsion (essence, diesel, électricité)) et des infrastructures (dommages causés par l'émission de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques pendant la construction, la maintenance et l'élimination des infrastructures). Cela signifie que les effets externes des véhicules électriques peuvent désormais également être pris en compte. A cette fin, les coûts externes de la production d'électricité sont entièrement actualisés. Les méthodes d'évaluation de la KNA sont également dérivées pour les autres éléments de coût et les taux de coût correspondants sont déterminés.
 - **Bénéfices externes de la mobilité douce en matière la santé** : La fréquence des séjours à l'hôpital pour six signes cliniques est réduite et l'espérance de vie augmentée en raison des mouvements des piétons et des cyclistes. Une nouvelle méthodologie est élaborée pour tenir compte de ces effets positifs et les données nécessaires seront disponibles.
- En revanche, deux indicateurs précédents, à savoir le paysage et l'image du site ainsi que les coûts externes de la consommation d'énergie par l'exploitation de l'infrastructure, sont omis.
- Désormais, une VOSL (valeur de la vie statistique) nettement plus élevée est utilisée qu'auparavant. De plus, une sensibilité pour la VOSL est calculée, puisqu'il existe de grandes incertitudes ($\pm 50\%$) dans le calcul de la VOSL.
- En outre, les méthodes de calcul et les bases de données pour les autres domaines de coûts seront entièrement révisées et mises à jour :
 - **Bruit** : Les données requises pour l'évaluation sont basées sur de nouvelles mesures de bruit. Cela abaisse également les valeurs seuils au-dessus desquelles les coûts du bruit sont pris en compte. En outre, les coûts du bruit dans les appartements en copropriété et les coûts de santé liés aux accidents vasculaires cérébraux, sont inclus. Enfin, toutes les bases de données (y compris VOSL) sont mises à jour. Comme auparavant, l'évaluation se limite au bruit sur le lieu d'habitation.
 - **Pollution atmosphérique** : La méthodologie existante est essentiellement conservée, mais mise à jour de manière exhaustive (y compris la prise en compte des pertes de biodiversité et la VOSL plus élevée). Les dommages de santé et les dommages au bâtiment locaux dans la zone non construite sont mis à zéro (mais augmentés dans la zone construite).
 - **Climat** : Un taux de coût plus de deux fois plus élevé qu'auparavant est prescrit (actuellement 121,5 CHF par tonne de CO₂), qui augmentera de 3% par an. En outre, une analyse de sensibilité pour le taux de coût climatique est désormais effectuée.
 - **Imperméabilisation des sols** : Avec l'imperméabilisation des sols, seul le taux de coût par zone imperméabilisée est mis à jour. Après mûre réflexion, la méthodologie n'a pas été modifiée.

Pour chacun des six domaines de coûts (en gras), le rapport contient également une estimation de l'évolution des effets dans le temps, puisque l'évolution des effets externes sur une période de plus de 50 ans doit être prévue pour une KNA (phase de planification et de construction plus 40 ans de phase d'exploitation). En outre, les méthodes d'analyse sont

illustrées au moyen d'un exemple d'application qui illustre la procédure. Enfin, une comparaison avec la méthodologie précédente est effectuée pour tous les domaines de coûts.

Avec la norme actualisée, l'évaluation des effets externes correspond à nouveau à l'état actuel de la recherche.

Summary

The swiss standard SN 641 828 «Cost-benefit analyses in road traffic: external effects» explains how external effects can be considered in cost-benefit analyses (CBA) of road projects (without accident costs – see SN 641 824). The present report forms the basis for the revision of the SN 641 828. It comprehensively describes the methods used and thus replaces all previous documents. In particular, the following adjustments are made based on the current literature – especially the studies of the Federal Office for Spatial Development (ARE) on external effects:

- Additional external effects are now included:
 - Loss of biodiversity due to air pollution
 - **Upstream and downstream processes** of propulsion energy (damage caused by the emission of greenhouse gases and air pollutants during production, transport and provision of propulsion energy (petrol, diesel, electricity)) and infrastructure (damage caused by the emission of greenhouse gases and air pollutants during construction, maintenance and disposal of infrastructure). This means that the external effects of electric vehicles can now also be included. To this end, the external costs of electricity production are comprehensively updated. Also for the other cost components evaluation methods for the CBA are derived and the corresponding cost rates are determined.
 - **External health benefits of non-motorised transport:** The frequency of hospital stays for six clinical pictures decreases and life expectancy increases as a result of physical activity in pedestrian and bicycle traffic. To take these positive effects into account, a new methodology is derived and the necessary data is made available.
- On the other hand, two previous indicators are omitted, namely the landscape and townscape as well as the external costs of energy consumption due to the operation of the infrastructure.
- A significantly higher VOSL (value of statistical life) will now be used than before. In addition, a sensitivity for the VOSL is calculated, since there are large uncertainties ($\pm 50\%$) in the derivation of the VOSL.
- In addition, the calculation methods and the fundamental data of the other cost categories are comprehensively revised and updated:
 - **Noise:** The input data required for the assessment are based on new noise measures. This also reduces the threshold values above which noise costs are considered. In addition, noise costs in owner-occupied flats and noise-related health costs due to strokes are now included. Finally, all fundamental data (including the VOSL) are updated. As before, the assessment is limited to noise at the place of residence.
 - **Air pollution:** The existing methodology is essentially retained, but comprehensively updated (including biodiversity losses and the higher VOSL). The local health and building damage outside built-up areas is now set to zero (but increased in the built-up area).
 - **Climate:** A cost rate that is more than twice as high as used so far is prescribed (now 121.5 CHF per tonne of CO₂), which increases by 3% per year. In addition, a sensitivity analysis for the climate cost rate is now carried out.
 - **Soil sealing:** With soil sealing, only the cost rate per sealed area is updated. After careful consideration, the methodology was not changed.

For each of the six (bold) cost categories, the report also contains an estimate of how the effects are likely to change over time, as the development of the external effects must be forecasted for applications in a CBA over a period of more than 50 years (planning and construction phase plus 40-year operating phase). In addition, the evaluation methods are illustrated using an application example which visualises the procedure. Finally, a comparison is made with the previous methodology for all cost areas.

With the updated standard, the evaluation of the external effects again corresponds to the current state of research.

1 Einleitung

Die Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen zu Strassenprojekten wird in der Schweiz durch die SN 641 820 „Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Grundnorm“ geregelt. Die Grundnorm legt die zu berechnenden Indikatoren bei der Durchführung einer KNA bei einem Strassenverkehrsprojekt fest. Für viele Indikatoren wird jedoch die genaue Berechnungsweise bewusst offengelassen. Dies basiert auf der Überlegung, dass die detaillierten Verfahren, Berechnungsschritte, Inputdaten und Kostensätze zur Ermittlung dieser Indikatoren nicht in eine Grundnorm gehören, sondern vielmehr in verschiedenen Detailnormen festzulegen sind. Dies erlaubt es, die Detailnormen häufiger an aktuelle Forschungsergebnisse anzupassen als die Grundnorm.

Eine dieser Detailnormen beschäftigt sich mit den externen Effekten des Verkehrs¹ (SN 641 828 Kosten-Nutzen-Analyse im Strassenverkehr: Externe Effekte²). Die Berücksichtigung der externen Effekte ist notwendig, um die Nachhaltigkeit von Projekten umfassend beurteilen zu können.

In der Detailnorm SN 641 828 werden im Wesentlichen Bewertungsmethoden festgelegt und Kostensätze für verschiedene Umweltbereiche bereitgestellt. Damit lassen sich die externen Effekte von Strassenprojekten im Rahmen von umfassenden Kosten-Nutzen-Analysen gemäss den Vorgaben in der Grundnorm bewerten. Ausserdem enthält die Norm Vorgaben zum Mengengerüst bzw. zu den für die Bewertung benötigten Inputdaten.

1.1 Überarbeitungsbedarf der SN 641 828

Die SN 641 828 wurde im Jahr 2009 erstmals publiziert. In der Zwischenzeit sind verschiedenste Berechnungsmethoden sowie Datengrundlagen nicht mehr aktuell. Zudem haben sich die Anforderungen an die Norm geändert: 2018 wurde eine neue Version der Grundnorm SN 641 820 veröffentlicht, die auch andere Anforderungen an die SN 641 828 zu den externen Effekten enthält. Nachstehend fassen wir die wichtigsten Aktualisierungsbedürfnisse kurz zusammen.

1.1.1 Neue Anforderungen aus der neuen Grundnorm

Aus der neuen Grundnorm SN 641 820 ergibt sich der folgende Anpassungsbedarf, insbesondere zum Indikatorensystem:

- In der überarbeiteten SN 641 820 werden **zusätzliche externe Effekte miteinbezogen**, die es nun zu berücksichtigen gilt:
 - **Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung** (erstmals berechnet in EcoPlan / Infrac 2014)
 - **Vor- und nachgelagerte Prozesse der Antriebsenergie** (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Herstellung, Transport und Bereitstellung der Antriebsenergie (Benzin, Diesel, Strom)) **und der Infrastruktur** (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Bau, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur)

¹ Die externen Kosten umfassen jenen Teil der Verkehrskosten, für die nicht die Verursachenden der Verkehrsaktivität aufkommen. Typische Beispiele hierfür sind etwa der Lärm und die Luftverschmutzung, welche durch die Verkehrsaktivität verursacht werden, die sich jedoch nicht im Preis der Fahrt widerspiegeln.

Nebst den externen Kosten spricht man in der Verkehrsökonomie auch von den internen Kosten. Es handelt sich hierbei um Kosten, welche die Verkehrsteilnehmenden selbst für ihre Fahrt auf sich nehmen (wie z.B. Benzinkosten, Autobahnvignette, Reisezeit usw.).

Die Summe aus externen und internen Kosten ergeben die sogenannten sozialen oder volkswirtschaftlichen Kosten und reflektieren die gesamten gesellschaftlichen Kosten der Verkehrsaktivität.

Neben den Kosten gibt es auch Nutzen, die ebenfalls intern oder extern sein können.

² Bisher hiess die SN 641 828 «Externe Kosten», neu jedoch «Externe Effekte», weil neu auch die externen Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs miteinbezogen werden.

- **Externe Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs:** Durch die Bewegung im Fuss- und Veloverkehr sinkt die Häufigkeit verschiedener Krankheiten und die Lebenserwartung steigt. Da immer mehr Verkehrsmodelle den Langsamverkehr als eigene Kategorie enthalten, sollen die Datengrundlagen für die Berücksichtigung des Langsamverkehrs in der SN 641 828 zur Verfügung gestellt werden.

Folglich werden im vorliegenden Bericht die entsprechenden Grundlagen erarbeitet, die den Einbezug dieser neuen externen Effekte erlaubt. Daraus folgt, dass die überarbeitete Norm neu «Externe Effekte» heissen muss und nicht mehr «Externe Kosten», da mit den Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr nun auch externe Nutzen miteinbezogen werden.

- Gemäss der überarbeiteten SN 641 820 können neu aber auch zwei bisher berücksichtigte **Indikatoren entfallen:**

- **Landschafts- und Ortsbild**
- **Externe Kosten Energie Infrastrukturbetrieb**

Die Gründe für diesen Wegfall werden in Ecoplan, Transoptima (2018³) erläutert und können kurz wie folgt zusammengefasst werden:

- **Landschafts- und Ortsbild:** Das Landschafts- und Ortsbild war in den bisher durchgeführten Bewertungen oft wenig relevant, in der politischen Diskussion ist aber die Zerstörung von unbelasteten Landschaftsbildern immer wieder ein Thema. Die teils hohe Bedeutung in der politischen Diskussion kann der KNA-Indikator nicht abbilden. Zudem war die Herleitung des bisher verwendeten Kostensatzes eher gewagt. Das Landschafts- und Ortsbild soll deshalb zukünftig ausserhalb der KNA in die Bewertung einfließen.
- **Externe Kosten Energie Infrastrukturbetrieb:** Dieser Indikator war in den bisherigen Bewertungen nie relevant, war aber in der Erhebung der benötigten Inputdaten relativ aufwändig. Deshalb kann ganz auf diesen Indikator verzichtet werden.
- Zudem soll neu auch eine **Sensitivität für den VOSL** (value of statistical life) gerechnet werden, da bei der Herleitung des VOSL grosse Unsicherheiten bestehen ($\pm 50\%$). Entsprechend sind alle Kostensätze, die vom VOSL abhängen, nicht nur als Basiswerte auszuweisen, sondern zusätzlich für die hohe bzw. tiefe Sensitivität des VOSL.

1.1.2 Veränderungen in Berechnungsmethoden und Datengrundlagen

Aufgrund von Fortschritten in der Forschung bezüglich der Quantifizierung der externen Effekte ergibt sich ein Anpassungsbedarf in mehrfacher Hinsicht:

- Die Kostensätze in der SN 641 828 basieren zu grossen Teilen auf Grundlagen aus einer Studie zu den externen Kosten des Verkehrs, welche im Jahr 2008 im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) durch Ecoplan / Infras erstellt wurde.⁴ Im Jahr 2014 wurde diese **Grundlagenstudie** wiederum im Auftrag des ARE **umfassend aktualisiert** und mit neuen Ergebnissen aus der nationalen und internationalen Forschung ergänzt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in Ecoplan / Infras (2014) „Externe Effekte des Verkehrs 2010“ (ca. 600 Seiten Umfang) zusammengefasst.⁵ Im Jahr 2019 erfolgte eine erneute Aktualisierung, wenn auch mit geringerem Aufwand.⁶ Gegenüber der Studie aus dem Jahr 2008 haben sich in diesen Überarbeitungen teilweise auch deutliche **Änderungen** in den externen Kosten einzelner Umweltbereiche ergeben – sowohl was die **Berechnungsmethode** als auch was die **Ergebnisse** betrifft.
- Eine Anpassung ist dabei besonders hervorzuheben: Die Bewertung der immateriellen Kosten bei lärm- und luftverschmutzungsbedingten Todesfällen erfolgt über die Zahlungsbereitschaft zur Verminderung von Todesfallrisiken, d.h. über den sogenannten

³ Ecoplan, Transoptima (2018), Neue Erkenntnisse zu Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr.

⁴ Ecoplan, Infras (2008), Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten.

⁵ Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

⁶ Infras, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

„**value of statistical life**“ (**VOSL**). Die bisherige Norm SN 641 828 beruht dabei auf einem VOSL der mittlerweile veraltet ist. Wie Ecoplan (2016⁷) zeigt, ist der neu zu verwendende VOSL deutlich höher als der bisher angewendete Wert. Der neue Wert beruht auf der weltweit grössten Metaanalyse zu Zahlungsbereitschaftsstudien zur Bestimmung des VOSL (insgesamt 261 VOSL-Schätzungen aus 28 Studien in OECD-Ländern).⁸ In Infrac, Ecoplan (2019) wurde der neue, höhere VOSL in die Berechnungen der externen Effekte integriert. Entsprechend muss die SN 641 828 neu auch auf dem neuen höheren VOSL beruhen. Analog ist auch die SN 641 824 zu den Unfallkosten zu überarbeiten, da auch die Unfallkosten vom VOSL abhängen und damit erhöht werden müssen.

1.1.3 Weiterer Überarbeitungsbedarf

Zudem gibt es noch einen weiteren Überarbeitungsbedarf: Bisher wurden die **externen Kosten der Stromproduktion** für die Berechnung des nun entfallenden Indikators externe Kosten Energie Infrastrukturbetrieb ermittelt. Trotzdem müssen im vorliegenden Bericht aber weiterhin die externen Kosten der Stromproduktion ermittelt werden. Denn neu wird der Kostensatz benötigt, um die externen Kosten der **Elektrofahrzeuge** zu bestimmen. Elektroautos fehlten bisher in den Bewertungen, da sie auch im Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) bisher fehlen. In der neusten Version des HBEFA (Version 4.1), die im Sommer 2019 publiziert werden soll, werden die Elektrofahrzeuge aber erstmals mit enthalten sein. Die externen Kosten der Stromproduktion entspringen aus den vorgelagerten Prozessen der Elektromobilität. Mit dem Einbezug der vor- und nachgelagerten Prozesse müssen also weiterhin die externen Kosten der Stromproduktion ermittelt werden.

1.2 Ziel des Forschungsprojektes

Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Detailnorm zu den externen Effekten des Verkehrs wieder mit dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse in Einklang zu bringen. Damit kann auch dem Anspruch einer periodischen Aktualisierung Rechnung getragen werden, wie er in der bisherigen SN 641 828 gefordert wird (Ziffer 8: Aktualisierung ca. alle 5 Jahre).

In den Studien Ecoplan / Infrac (2014) und Infrac / Ecoplan (2019) wurden die externen Effekte des Verkehrs in globo für die gesamte Schweiz ermittelt. Für die Anwendung der Ergebnisse in der KNA ist es erforderlich, die Gesamtkosten auf spezifische Masseinheiten umzurechnen (wie z.B. Kostensatz pro Tonne Schadstoff), die auf der Ebene von einzelnen Strassenprojekten zur Verfügung stehen. Diese zum Teil sehr **aufwendige Umrechnungsarbeit** ist sowohl für die bereits bisher berücksichtigten Effekte nötig als auch für die oben erwähnten neu miteinzubeziehenden Effekte.⁹

Mit der methodischen Überarbeitung und Aktualisierung der Inputdaten wird sichergestellt, dass für Kosten-Nutzen-Analysen, welche gemäss den Vorgaben der Grundnorm durchgeführt werden, aktuelle und wissenschaftlich korrekte Kostensätze zur Bewertung von externen Kosten zur Verfügung stehen. Zudem werden die umfangreichen Arbeiten zu den externen Kosten (im Auftrag des ARE) einem weiteren Anwendungsbereich zugeführt, indem sie für KNA aufbereitet werden.

Da sich die Bewertungsmethoden und die Datengrundlagen seit Publikation der heutigen SN 641 828 im Jahr 2009 zum Teil deutlich verändert haben (z.B. höherer VOSL, Abstützung auf Nacht- oder Taglärm, tiefere Schwellenwerte, ab denen Veränderungen im Lärm

⁷ Ecoplan (2016), Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life).

⁸ OECD (2012), Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies.

⁹ In Ecoplan, Infrac (2014) und Infrac, Ecoplan (2019) sind zwar auch Kostensätze enthalten, diese sind aber meist in der falschen Einheit, so dass teils umfangreiche Umrechnungen nötig sind. So müssen z.B. die Kosten der Luftbelastung in der Schweiz in einen Kostensatz pro Tonne Schadstoff (differenziert nach Emissionsort) umgewandelt werden. Oder beim Lärm müssen die Ergebnisse zu den Gesundheitskosten für die Schweiz in Kostensätze pro belastete Person übersetzt werden.

berücksichtigt werden, höherer Klimakostensatz etc.), kann die vorliegende Überarbeitung auch Auswirkungen auf die Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von Projekten bzw. auf die Wahl der Bestvariante haben. Dies gilt sowohl für Projekte des Bundes, als auch für solche der Kantone und Gemeinden.

Zudem erlaubt die Forschungsarbeit Auswirkungen auf die Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr neu miteinzubeziehen, womit eine Lücke in den heutigen Bewertungen geschlossen wird, da diese Auswirkungen von Verkehrsprojekten auf den Langsamverkehr bisher mangels Datengrundlagen nicht berücksichtigt werden konnten.

1.3 Zu betrachtende externe Effekte

Die Detailnorm SN 641 828 zu den externen Effekten beschränkt sich auf jene Effekte, die einer Monetarisierung zugänglich sind. Die übrigen, nicht monetarisierten externen Effekte müssen ausserhalb der KNA betrachtet werden (wie z.B. in NISTRA, vgl. Kapitel 1.5).

Die zu betrachtenden externen Effekte werden in der Grundnorm SN 641 820 (Ziffer 16 der neuen Version von 2018) abschliessend aufgezählt. Es handelt sich um die folgenden sechs externen Effekte:^{10, 11}

- **Lärm:** Der Lärm – als Störung und Belästigung empfunden – führt zu einer Beeinträchtigung der Lebensqualität. Deshalb erzielen belärmte Wohnungen einen geringeren Preis als ruhige Wohnungen. Zudem führt der Lärm auch zu Gesundheitsstörungen (ischämische Herzkrankheiten (mangelnde Versorgung mit Blut), Bluthochdruck bedingte Krankheiten und Schlaganfälle), die sich in zusätzlichen Krankheits- und Todesfällen niederschlagen.
- **Luftverschmutzung:** Die Luftverschmutzung wirkt sich negativ auf die menschliche Gesundheit aus. Dies führt zu zusätzlichen Krankheits- und Todesfällen. Ausserdem führt die Luftverschmutzung auch zu Gebäudeschäden in Form höherer Renovations- und Reinigungskosten an Gebäudefassaden. Schliesslich schadet die Luftverschmutzung auch der Vegetation (Ernteauffälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste (neu) und Beeinträchtigung der Bodenqualität).
- **Klima:** Der Ausstoss von Treibhausgasen führt zu einer Klimaerwärmung und damit weltweit zu einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur. Aufgrund der weltweiten Klimaerwärmung werden gravierende Folgen (Überschwemmungen, Wirbelstürme, Gletscherabbrüche in den Alpen usw.) befürchtet. Dem schleichenden Prozess der Klimaerwärmung soll entgegengewirkt werden, indem der Ausstoss von Treibhausgasen reduziert wird.
- **Bodenversiegelung:** Die Böden spielen als Nährstoff- und Wasserspeicher, als Puffer und Lebensraum eine zentrale Rolle im Naturhaushalt. Verkehrsflächen führen zu einer Versiegelung der Böden, so dass sie diese Funktionen nicht mehr erfüllen können. Eine der Nachhaltigkeit verpflichtete Planung der Strasseninfrastruktur strebt daher einen möglichst geringen Flächenbedarf an.
- **Vor- und nachgelagerte Prozesse der Antriebsenergie** (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Herstellung, Transport und Bereitstellung der Antriebsenergie (Benzin, Diesel, Strom)) **und der Infrastruktur** (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Bau, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur)
- **Externe Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs:** Durch die Bewegung im Fuss- und Veloverkehr sinkt die Häufigkeit verschiedener Krankheiten und die Lebenserwartung steigt.

¹⁰ Obwohl die Unfallkosten auch zu den externen Effekten des Verkehrs zählen, sind sie in der nachstehenden Aufzählung nicht enthalten. Grund dafür ist, dass die Unfallkosten Gegenstand einer separaten Detailnorm SN 641 824 «Unfallraten und Unfallkostensätze» sind.

¹¹ Streng genommen sind nicht die externen Effekte zu erheben, sondern die sozialen Effekte der Umweltauswirkungen. Für die betrachteten Umwelteffekte sind die externen und sozialen Kosten jedoch identisch. Im Bereich der Unfälle und der Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs ist diese Unterscheidung aber von Bedeutung. Bei den Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs werden tatsächlich nur die externen Kosten berücksichtigt (vgl. Kapitel 7).

In der Grundnorm (bzw. im Kommentar¹² zur ersten Version der Norm, S. 67-70 und im Kommentar zur überarbeiteten Norm¹³) werden zudem auch jene externen Effekte erwähnt, für die – mit dem heutigen Wissenstand – keine Kostensätze zur Verfügung stehen und daher auch in diesem Projekt **ausgeklammert** bleiben:

- Erschütterungen
- Wert von Naherholungsgebieten oder Sehenswürdigkeiten
- Zerschneidung
- Gewässerverschmutzung
- Landschafts- und Ortsbild (vgl. oben)
- Externe Kosten des Energieverbrauchs durch den Betrieb der Infrastruktur (vgl. oben)

1.4 Vorgaben aus der Grundnorm

Die Grundnorm schreibt vor, dass die oben beschriebenen sechs externen Effekte zu berücksichtigen sind und enthält bezüglich Berechnung und Bewertung einige generelle Vorgaben. Sie legt aber das Bewertungsverfahren nicht im Detail fest. Dies soll in der SN 641 828: „Externe Effekte im Strassenverkehr“ erfolgen. Dazu muss in der vorliegenden Studie einerseits festgelegt werden, welche Inputdaten zur Erfassung dieser Effekte benötigt werden. Andererseits ist aufzuzeigen, wie die ermittelten Auswirkungen in Geldeinheiten umzurechnen sind. Dazu sind insbesondere Kostensätze festzulegen.

Aus den erwähnten, generellen Vorgaben der Grundnorm SN 641 820 (überarbeitete Version von 2018) bezüglich der Berechnung und Bewertung der externen Effekte sind insbesondere die folgenden Punkte zu beachten:

- Die Bewertungsmethode muss gemäss Ziffer 38.1 der Grundnorm gewählt werden, d.h. es sind so weit als möglich Marktpreise zu verwenden. Liegen keine Marktpreise vor, ist die Bewertung in folgender Reihenfolge über einen Hedonic Pricing-¹⁴, Zahlungsbereitschafts-¹⁵, Vermeidungskosten-¹⁶ oder Reparatur- bzw. Ersatzkosten¹⁷-Ansatz vorzunehmen.
- Der Preisstand der Kostensätze ist anzugeben und es ist zu erläutern, wie die Kostensätze auf einen anderen Preisstand anzupassen sind (vgl. Ziffer 38.2 der Grundnorm).
- Die Kostensätze sind zu Faktorpreisen auszuweisen (nicht zu Marktpreisen), d.h. indirekte Steuern sind herauszurechnen (vgl. Ziffer 38.3 der Grundnorm).
- Es ist zu prüfen, aufgrund welcher Daten die Berechnungen an örtliche Gegebenheiten angepasst werden können oder müssen (vgl. Ziffer 38.4 der Grundnorm).
- Für die Berücksichtigung der externen Kosten sind wenn möglich die durch ein Projekt zusätzlich entstehenden Grenzkosten zu bestimmen. Nur wenn die Grenzkosten nicht verfügbar sind, können Durchschnittskosten verwendet werden (vgl. Ziffer 38.5 der Grundnorm).
- Für alle Indikatoren ist sowohl die Bestimmung des Mengengerüsts (z.B. Veränderung der Fahrzeugkilometer oder der Emissionen), wie auch des Wertgerüsts (Kostensätze zur Bewertung der Effekte) festzulegen (vgl. Ziffern 37 und 40 der Grundnorm).

¹² Ecoplan, metron (2005), Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Kommentar zur Norm.

¹³ Ecoplan, Transoptima (2018), Neue Erkenntnisse zu Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr.

¹⁴ Im Hedonic Pricing-Ansatz wird mit statistischen Methoden der Preis eines Gutes aus den Marktpreisen von Gütern, in denen es enthalten ist, bestimmt (z.B. Preis der Ruhe im Mietpreis) (vgl. SN 641 820, Ziffer 8.12).

¹⁵ Mit dem Zahlungsbereitschafts-Ansatz wird aufgrund spezieller Umfragen ermittelt, wie viel die Bevölkerung für ein bestimmtes Gut zu zahlen bereit ist. Die Umfrageergebnisse stammen also von einem hypothetischen Markt (vgl. SN 641 820, Ziffer 8.40).

¹⁶ Mit dem Vermeidungskosten-Ansatz werden die Kosten von Massnahmen abgeschätzt, welche die Entstehung von Schäden verhindern (vgl. SN 641 820, Ziffer 8.37).

¹⁷ Mit dem Reparatur- oder Ersatzkostenansatz werden die Kosten erfasst, die sich ergeben, wenn der entstandene Schaden repariert wird oder das beschädigte Gut andernorts ersetzt wird (z.B. Ersatz eines wertvollen Biotopes) (vgl. SN 641 820, Ziffer 8.25).

- Dabei gilt es auch die Entwicklung des Mengen- und Wertgerüsts über die Zeit festzulegen (vgl. Ziffer 38.6 der Grundnorm). Für die Bewertung von Projekten wird gemäss SN 641 820 (Ziffer 12) jeweils eine Betriebsphase von 40 Jahren nach der Eröffnung des Projektes betrachtet. Deshalb ist davon auszugehen, dass Prognosen bis mindestens 2070 nötig sind (bei einer Eröffnung im Jahr 2030). Für diesen langen Prognosehorizont sind pragmatische Ansätze zu wählen.
- Die Höhe des VOSL ist unsicher. Der wahre VOSL könnte auch 50% höher oder tiefer liegen als der Basis-VOSL. Deshalb soll eine Sensitivität für die Höhe des VOSL gerechnet werden (vgl. Ziffer 44). Entsprechend müssen im vorliegenden Bericht die Kostensätze auch für einen 50% höheren und tieferen VOSL bestimmt werden.

Neben diesen Vorgaben aus der Grundnorm verfolgen wir das Ziel, bei der Bestimmung der Kostensätze **so weit als möglich Schweizer Zahlen** zu verwenden. Wir stützen uns dabei vor allem auf die Arbeiten des ARE (Bundesamt für Raumentwicklung), das die externen Kosten in mehreren Bereichen für die Schweiz regelmässig berechnen lässt. Die aktuellste Version dieser Berechnungen (Infras, Ecoplan [2019]¹⁸) erschien kürzlich. Nur wenn keine Zahlen aus Schweizer Studien vorliegen, wird auf ausländische Studien zurückgegriffen.

Die bisherigen Arbeiten zu den externen Kosten des Verkehrs, insbesondere jene im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, liefern wichtige methodische Grundlagen zur Bewertung von Umweltfolgen des Verkehrs sowie quantitative Ergebnisse zum gesamten Ausmass der externen Verkehrskosten in der Schweiz. Die Arbeiten des ARE sind aber nicht explizit auf die Verwendung in Kosten-Nutzen-Analysen ausgerichtet. Im Zusammenhang mit der Bewertung von einzelnen Strassenprojekten stellen sich vor allem bezüglich der dadurch ausgelösten Zusatz- bzw. Grenzkosten neue Fragen, welche in den ARE-Arbeiten nicht diskutiert werden. Diese zentralen Fragen werden im Rahmen dieses Forschungsprojektes geklärt. Zudem sollen möglichst einfache und benutzerfreundliche Berechnungsvorschläge zur Berücksichtigung der externen Kosten entwickelt werden, so dass diese Effekte in Zukunft bei der Projektevaluation mit vertretbarem Aufwand mitberücksichtigt werden können.

1.5 Verhältnis der Arbeiten zu NISTRA

In NISTRA (=Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte¹⁹) werden die bestehenden Normen zur Kosten-Nutzen-Analyse (SN 641 820 bis SN 641 828) umgesetzt. Im Excel-Tool eNISTRA sind alle projektunabhängigen Bewertungsvorgänge und Kostensätze enthalten, so dass der Benutzer nur noch die projektspezifischen Inputdaten eingeben muss und die Ergebnisse dann automatisch berechnet werden. Dies erlaubt es den Anwendern, die Auswirkungen eines Projektes unter Berücksichtigung der externen Effekte sehr einfach zu berechnen, da ein Grossteil der – teils komplexen – Berechnungen bereits in eNISTRA implementiert ist.

NISTRA enthält neben der KNA zusätzlich eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse (KWA) und weitere qualitative Indikatoren, um auch jene Auswirkungen eines Projektes berücksichtigen zu können, die sich nicht in Geldeinheiten ausdrücken lassen.

eNISTRA soll basierend auf der im vorliegenden Forschungsprojekt überarbeiteten und ergänzten Detailnorm ebenfalls aktualisiert werden. Dies stellt sicher, dass nicht mehrere Vorgaben gleichzeitig existieren. Mit der neuen Version von eNISTRA wird es möglich sein, die neuen Methoden und Kostensätze mit sehr geringem Aufwand bei der Bewertung von realen Projekten in der Praxis anzuwenden.

¹⁸ Infras, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

¹⁹ Ecoplan (2018), Handbuch eNISTRA 2017, NISTRA – Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte. Handbuch für das Excel-Tool eNISTRA 2017.

1.6 Preisstand

Beim Wertgerüst verwenden wir in dieser Studie immer den **Preisstand** des Jahres **2015**, da die meisten Daten in 2015er-Preisen vorliegen. Im Vergleich zur bisherigen Norm wird der Preisstand damit von 2005 auf 2015 aktualisiert.²⁰ In den einzelnen Kapiteln zu den sechs verschiedenen externen Effekten wird erläutert, wie die Werte auf einen anderen Preisstand angepasst werden müssen (z.B. mit dem Nominallohnwachstum, vgl. Grundnorm Ziffer 38.2).

1.7 Grundlagen und Vorgehen

Die wichtigsten Grundlagen sind die bisherige Detailnorm SN 641 828, die auf der Berechnung der externen Kosten für das Jahr 2005²¹ beruht, die im Bericht Ecoplan (2007²²) normkonform aufbereitet wurden, sowie die Arbeiten für das ARE, insbesondere die aktuellsten Zahlen für das Jahr 2015 in Infrac, Ecoplan 2019²³. Da in der Publikation für das Jahr 2015 nicht alle Details der Methodik beschrieben werden, wird auch auf die ausführlichen Erläuterungen in den Berechnungen für das Jahr 2010 in Ecoplan, Infrac (2014²⁴) zurückgegriffen. Diese Studien berücksichtigen die sehr breite nationale und internationale Literatur.

Die Vorgaben in der bisherigen Norm wurden wie erwähnt im Bericht Ecoplan (2007) hergeleitet. Darin wurden die Methodik und die Herleitung der Kostensätze im Detail erläutert. Teilweise wurde auch beschrieben, warum andere, ebenfalls denkbare Methoden nicht angewendet wurden. In Absprache mit der Begleitgruppe wurde beschlossen, dass der vorliegende Bericht alle wesentlichen Überlegungen zur Herleitung der überarbeiteten Detailnorm enthalten soll.²⁵ Ecoplan (2007) wird also künftig nicht mehr relevant sein und wird durch den vorliegenden Bericht ersetzt.

Für die neu berücksichtigten Bereiche (Biodiversitätsverluste durch Luftbelastung, vor- und nachgelagerte Prozesse sowie externe Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr) müssen zudem neue Methoden für die Umrechnung in KNA-taugliche Kostensätze entwickelt werden.

1.8 Anwendungsbeispiel

Die Bewertungsmethoden werden jeweils am Schluss des Kapitels anhand eines Beispiels erläutert. Es wird jeweils das Ergebnis im Jahr 2015 berechnet und darauf verzichtet, das Ergebnis für weitere Jahre und für die Bauphase zu ermitteln. In der tatsächlichen Anwendung sind die Ergebnisse normalerweise für eine 40-jährige Nutzungsphase zu ermitteln (siehe SN 641 820 [2], Ziffer 12) – und allenfalls ist auch die Bauphase zu berücksichtigen.

²⁰ Der Kommentar zur Norm (Ecoplan 2007, Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse) basiert noch auf dem Preisstand 2000. Grund dafür ist, dass vor der Publikation der Norm die Berechnungen gegenüber dem Kommentar nochmals aktualisiert wurden, da in der Zwischenzeit aktuellere Datengrundlagen verfügbar wurden (konkret Ecoplan, Infrac 2008, Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten).

²¹ Ecoplan, Infrac (2008), Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten.

²² Ecoplan (2007), Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse.

²³ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

²⁴ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

²⁵ Hierzu wird in Absprache mit der Begleitgruppe auch in Kauf genommen, dass gewisse Textpassagen wörtlich aus dem Bericht Ecoplan (2007) übernommen werden, soweit sie noch von Relevanz sind und weiterhin Gültigkeit haben.

Bei der Berechnung für die weiteren Jahre sind die entsprechenden Vorgaben zur realen Veränderung über die Zeit zu beachten.

Dieses Anwendungsbeispiel war bisher in der Detailnorm enthalten, soll gemäss Beschluss der Begleitgruppe aber neu im Bericht dargestellt werden und nicht mehr Gegenstand der Norm sein.

Das vereinfachte Anwendungsbeispiel basiert auf dem Bau einer Umfahrungsstrasse mit Tunnelabschnitt. Die Umfahrungsstrasse führt zu einer Verkehrsentslastung im Ortskern und zu einer höheren Belastung am Ortsrand. Entsprechend nehmen die Fahrzeugkilometer innerorts ab, während sie ausserorts steigen. Auch aufgrund des Mehrverkehrs ist die Zunahme ausserorts doppelt so gross wie die Abnahme innerorts. Ebenso nehmen auf der Autobahn (Zufahrtsstrecke) die Fahrzeugkilometer (Fzkm) durch das Projekt leicht zu (vgl. Teil I in der folgenden Tabelle). Insgesamt nehmen die Fzkm um 73 Mio. Fzkm zu.

Durch die neue Umfahrungsstrasse nimmt der motorisierte Verkehr im Ortszentrum wie erwähnt ab. Das Zentrum wird dadurch für Wege zu Fuss oder mit dem Velo attraktiver. Somit steigen die Personenkilometer im Fuss- und Veloverkehr um 4 bzw. 2 Mio. Personenkilometer (pkm) pro Jahr (vgl. Teil II in der folgenden Tabelle).²⁶

Die Abmessungen der neuen Infrastrukturen sind in Teil III der folgenden Tabelle enthalten: Die neue Umfahrungsstrasse ist insgesamt 6.5 km lang, wovon 1.5 km in einem Tunnel verlaufen, der zu einem Drittel als Tagbautunnel und zu zwei Dritteln bergmännisch erstellt wird. Die Umfahrungsstrasse ist 12m breit (im Tunnel 10m breit). Zudem gibt es einen weiteren Zubringer zur neuen Umfahrungsstrasse, der 1 km lang und 6m breit ist und über ein einseitiges Trottoir von 2m Breite verfügt.

Die Investitionskosten des Baus belaufen sich auf 400 Mio. CHF (vgl. Teil IV der folgenden Tabelle), wovon 33% im bebauten Gebiet investiert werden (Rest im unbebauten Gebiet – basierend auf lokaler Verteilung der Investitionskosten).

Tab. 1 Projektspezifische Inputdaten für das fiktive Anwendungsbeispiel im Jahr 2015

I) Mio. Fzkm	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Innerorts	-50		-1.0	-2.0	-4.0	-3.0	-60.0
Ausserorts	100		2.0	4.0	8.0	6.0	120.0
Autobahn	10		0.2	0.4	1.0	1.0	12.6
Total	60		1.2	2.4	5.0	4.0	72.6

II) Mio. pkm	Fussverkehr	Veloverkehr	Li	SNF	Total
Veränderung durch Projekt	4.0	2.0			

III) Abmessungen der neuen Umfahrungsstrasse	Länge in m	Breite in m	
		Fahrbahn	Trottoir
Umfahrungsstrasse: Offene Strecke	5'000	12	
Umfahrungsstrasse: Tagbautunnel	500	10	
Umfahrungsstrasse: Tunnel bergmännisch	1'000	10	
Zubringer: Offene Strecke	1'000	6	2

IV) Investitionskosten	400 Mio. CHF davon		33% im bebauten Gebiet
Investitionskosten			

²⁶ Es handelt sich um ein fiktives Beispiel, d.h. wir wissen nicht, ob diese Zunahme im Langsamverkehr im Vergleich zu den Veränderungen im motorisierten Verkehr plausibel ist.

Zudem führt die Umfahrungsstrasse im Ortskern zu einer Lärmentlastung bei hohen Lärmniveaus. Sie hat jedoch zur Folge, dass am Ortsrand Mehrbelastungen bei tieferen Lärmniveaus auftreten (die hierfür benötigten Inputdaten sind relativ umfangreich und werden in *Tab. 8* in Kapitel 2.6 gelb hervorgehoben).

1.9 Gliederung des Berichtes

Die weitere Struktur des Berichts folgt den sechs externen Effekten: Lärm, Luftverschmutzung, Klima, Bodenversiegelung, vor- und nachgelagerte Prozesse der Antriebsenergie und der Infrastruktur sowie externe Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs. Dabei ist jedes Kapitel in sechs Unterkapitel gegliedert:

- Kapitel X.1 Einleitung: In der Einleitung wird der jeweilige Kostenbereich mit den zu bewertenden Kostenbestandsanteilen erläutert. Ebenso wird das methodische Vorgehen zur Herleitung der Kostensätze aufgezeigt.
- Kapitel X.2 Mengengerüst: In diesem Unterkapitel werden die benötigten Inputdaten beschrieben. Falls die Inputdaten nicht das eigentliche Mengengerüst darstellen, wird erläutert, wie aus den Inputdaten das Mengengerüst ermittelt werden kann.²⁷ Ausserdem wird gezeigt, wie das Mengengerüst an örtliche Gegebenheiten angepasst werden kann.
- Kapitel X.3 Wertgerüst: Hier wird einleitend vorgestellt, welche Bewertungsmethode verwendet wird (z.B. Zahlungsbereitschaft oder Vermeidungskosten sowie Durchschnitts- oder Grenzkosten). Anschliessend wird die Bestimmung des Wertgerüsts erklärt. Zudem werden Anpassungen an örtliche Gegebenheiten und an einen anderen Preisstand besprochen.
- Kapitel X.4 Veränderung über die Zeit: Die KNA muss gemäss SN 641 820 (Ziffer 12) einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren nach Eröffnung des Projektes umfassen. Für diesen langen Zeitraum sind Prognosen über die Veränderungen des Mengen- und Wertgerüsts unerlässlich.
- Kapitel X.5 Vereinfachte Methode: Die in den Kapiteln X.2 bis X.4 präsentierten Methoden scheinen teilweise anspruchsvoll zu sein. Für kleinere Projekte und Grobbewertungen wird im Rahmen dieses Unterkapitels jeweils untersucht, ob ein vereinfachtes Berechnungsverfahren erforderlich ist. Dies ist einzig beim Lärm der Fall. Entsprechend wird dort eine vereinfachte Methodik vorgestellt.
- Kapitel X.6 Anwendungsbeispiel: In diesem Unterkapitel wird wie bereits erwähnt die Berechnungsmethodik mit Hilfe eines Beispiels illustriert.
- Kapitel X.7: Vergleich mit bisheriger Methodik: Im letzten Unterkapitel werden die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur Methodik in der bisherigen Detailnorm SN 641 828 (bzw. in NISTRA) erläutert.

Nach der Erläuterung der aktualisierten bzw. neuen Berechnungsmethodik für die sechs externen Effekte in den Kapiteln 2 bis 7 folgt in Kapitel 8 für das Fallbeispiel eine zusammenfassende Darstellung über die behandelten Bereiche.

Im Anhang A wird ausgeführt, warum eine mögliche Alternative für eine vereinfachte Bewertungsmethode für den Lärm nicht verwendet wird. Der Anhang B enthält die Herleitung des Kostensatzes für die Bodenversiegelung.

²⁷ Beispielsweise können die Inputzahlen Fahrzeugkilometer sein, die zuerst noch in Emissionen von Treibhausgasen umgerechnet werden müssen.

2 Lärm

2.1 Einleitung

Die verkehrsbedingten Lärmkosten am Wohnort teilen sich in zwei Bereiche auf:

- Einerseits verursacht Lärm eine **Ruhestörung**. Dies wird über die Reduktion der Wohnungspreise gemessen, die sich dadurch ergibt, dass belärmte Wohnungen einen tieferen Preis erzielen als vergleichbare ruhige Wohnungen. Die Reduktion der Wohnungspreise kann als Mass der subjektiven Ruhestörung aufgefasst werden. Dabei werden Mietwohnungen und Wohnungen im Eigentum berücksichtigt.
- Andererseits werden die durch den Lärm verursachten **Gesundheitskosten** (Krankheits- und Todesfälle) ermittelt. Dabei sind die medizinischen Behandlungskosten, die Produktionsausfälle, die Wiederbesetzungskosten²⁸ und die immateriellen Kosten (für Schmerz und Leid) zu berücksichtigen.²⁹

Damit werden im Folgenden **nur** die Auswirkungen des **Lärms am Wohnort** betrachten. Weitere Auswirkungen des Lärms werden bei der Monetarisierung **nicht berücksichtigt** wie beispielsweise:³⁰

- Auswirkungen des Lärms in Schutz- und Erholungsgebieten
- Auswirkungen des Lärms am Arbeitsplatz (Produktionsausfälle durch verminderte Leistungsfähigkeit des Personals, Kosten von Schallschutzmassnahmen)
- Auswirkungen des Lärms an Schulen (reduzierte Lernfähigkeit)
- Verluste durch Auszonung oder Nicht-Einzonung von Grundstücken in der Raumplanung, sowie auch Auswirkungen auf nicht überbautes Bauland (sogenanntes Bauerwartungsland)
- Kosten von Schallschutzmassnahmen an Gebäuden (Schallschutzfenster)
- Baulärm

Diese Bereiche müssen bei einer Monetarisierung vernachlässigt werden, da dazu keine Kostensätze zur Verfügung stehen. Die Bereiche sollten ausserhalb der KNA in die Bewertung miteinbezogen werden.

Zur Ermittlung der lärmbedingten Verkehrskosten im Rahmen einer KNA muss einerseits das Mengengerüst bestimmt werden (Anzahl belärmte Wohnungen für die Reduktion der Ruhestörung und Anzahl belärmte Personen für die Gesundheitskosten) und andererseits muss das Wertgerüst (Kostensätze) zur Verfügung stehen. Auf diese Aspekte gehen wir in den zwei nachfolgenden Abschnitten ein, bevor in Abschnitt 2.4 die Veränderungen von Mengen- und Wertgerüst über die Zeit beleuchtet werden. Danach wird in Abschnitt 2.5 eine vereinfachte Bewertungsmethode bei Kleinprojekten oder im Rahmen einer Grobevaluierungen vorgestellt. Der Abschnitt 2.6 enthält ein Anwendungsbeispiel und in Abschnitt 2.7 werden die methodischen Anpassungen gegenüber der bisherigen Norm nochmals im Überblick zusammengefasst.

²⁸ Kosten für die Wiederbesetzung einer Stelle, wenn eine Arbeitnehmerin gestorben ist.

²⁹ Die gleichzeitige Berücksichtigung von Gesundheitsschäden und Mietzinsausfällen wirft die Frage nach allfälligen Doppelzählungen auf. Wir gehen davon aus, dass Schlaf- und Kommunikationsstörungen sich in tieferen Wohnungspreisen niederschlagen. Diese Bereiche werden deshalb bei den Gesundheitskosten nicht berücksichtigt. Aber es besteht ein Konsens, dass bei weniger bekannten Effekten (wie ischämischen Herzkrankheiten (mangelnde Versorgung mit Blut), Bluthochdruck bedingten Krankheiten und Schlaganfällen) Doppelzählungen nicht zu erwarten sind, da sich die Bevölkerung dieser Effekte nicht bewusst ist (Ecoplan, Infrac 2014, Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 236 und WHO 2011, Burden of disease from environmental noise).

³⁰ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 235.

2.2 Mengengerüst

2.2.1 Benötigte Inputdaten

Die Bestimmung der Lärmkosten ist keineswegs trivial, denn die Lärmbelastung nimmt kaum zu, wenn ein zusätzliches Fahrzeug über eine Strasse fährt. Die Grenzkosten einer zusätzlichen Fahrt sind also häufig vernachlässigbar klein. Grössere Veränderungen der Verkehrsmenge auf einer bestimmten Strasse führen jedoch zu hörbaren Be- oder Entlastungen. Der Bau einer neuen Umfahrungsstrasse z.B. kann zu einer Entlastung im Ortskern führen. Gleichzeitig erhöht er jedoch die Lärmbelastung entlang der Umfahrungsstrasse (ausser diese verläuft in einem Tunnel). Das Ergebnis hängt stark von der konkreten Situation ab. So ist es auch möglich, dass die Entlastung kaum wahrnehmbar, die Mehrbelastung jedoch spürbar ist.

Eine erste wichtige Frage bei der Ermittlung des Mengengerüsts ist, wie der zu betrachtende Raum abgegrenzt werden muss, d.h. in welchem Gebiet sind Veränderungen der Lärmbelastung zu berücksichtigen. Bei der **Abgrenzung des Untersuchungsraumes** ist bedeutsam, dass wie bereits erwähnt geringe Veränderungen in der Verkehrsmenge zu keinen wahrnehmbaren Lärmveränderungen führen. Als nicht wahrnehmbar gelten dabei Lärmveränderungen unter 1 dB(A) (vgl. Anhang A). Deshalb sind für die Bestimmung der Lärmkosten nur Strassen mit einer starken Veränderung der Verkehrsmenge zu betrachten, wie z.B. Neubaustrecken und deren Zulaufstrecken sowie die entlasteten alten Strassen. Der Untersuchungsraum muss **zumindest alle Strassen mit einer Veränderung der Verkehrsmenge um mindestens den Faktor 1.25** enthalten (Zunahme um 25% oder Abnahme um 20% – dies gilt bei gleichbleibendem Schwerverkehrsanteil und gleicher Geschwindigkeit, vgl. Anhang A).³¹ Die gewählte Abgrenzung des Untersuchungsraums ist zu begründen.

Bei der Berechnung der Auswirkungen auf den Lärm ist von Bedeutung, welche Inputdaten für die Bewertung zur Verfügung stehen. Um in der Praxis anwendbar zu sein, dürfen die Anforderungen nicht zu hoch sein. Andererseits sollen auch ohnehin vorhandene Daten (z.B. aus der Umweltverträglichkeitsprüfung) genutzt werden. Im Folgenden wird erläutert, wie dies umgesetzt wird. Für das weitere Vorgehen wird zwischen Lärm in der Betriebs- und Bauphase der Verkehrsinfrastruktur unterschieden.

Betriebsphase

In der Schweiz besteht mit sonBASE ein schweizweites, gutes Lärmmodell mit dessen Anwendung die Auswirkungen eines Projektes auf den Verkehrslärm vergleichsweise einfach ermittelt werden können. Deshalb wird nachstehend für die Berechnung der verkehrsbedingten Lärmkosten eine Methode vorgeschlagen, die sich auf detaillierte Daten zur Lärmbelastung abstützt.

Die Berechnung der Lärmkosten in der Schweiz³² basiert auf folgenden Inputdaten zum Lärm:

- Ruhestörung bzw. Reduktion Wohnungspreise: Hier wird das sogenannte ZKB-Lärm-mass verwendet, das auf einer Studie der Zürcher Kantonalbank beruht, die untersucht hat, welches Lärm-mass die beste Korrelation mit den Wohnungspreisen aufweist.³³ Das ZKB-Lärm-mass ist wie folgt definiert:

³¹ In Anhang A wird erläutert, dass auch Veränderungen des Lärms unter 1 dB(A) relevant sein können. Deshalb wurde für die räumliche Abgrenzung des Untersuchungsraums bewusst die Umschreibung «zumindest alle Strassen» und «um mindestens den Faktor 1.25» verwendet: Der Untersuchungsraum darf auch grösser gewählt werden.

³² Infras, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, detaillierter beschrieben in Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

³³ ZKB (2011), Ruhe bitte! Wie Lage und Umweltqualität die Schweizer Mieten bestimmen. und ZKB (2012), Wie Lage und Umweltqualität die Eigenheimpreise bestimmen. Hedonisches Modell für Stockwerkeigentum.

- Anzahl Dezibel über 40 dB(A) Nachtlärm bzw.
- Anzahl Dezibel über 50 dB(A) Taglärm, falls Nachtlärm unter 40 dB(A).

Es wird also untersucht, wie viele Wohnungen welchem Lärmniveau gemäss ZKB-Lärmklassen ausgesetzt sind. Für Wohnungen, die Lärmbelastungen unter 40 dB(A) nachts und unter 50 dB(A) tags ausgesetzt sind, wird keine Reduktion der Wohnungspreise berechnet.³⁴

- Gesundheitskosten: Die Gesundheitskosten werden über das oft verwendete Lärmklassen L_{DEN} abgebildet.³⁵ Dabei steht DEN für eine Tag-Abend-Nacht-Gewichtung (Day-Evening-Night), bei der abendlicher Lärm (18.00 – 22.00 Uhr) einen Zuschlag von 5 dB erhält und nächtlicher Lärm (22.00 – 6.00 Uhr) mit einem Zuschlag von 10 dB versehen wird. Dabei wird ein Schwellenwert von 48 dB(A) L_{DEN} angewendet und untersucht, wie viele Personen einem höheren Lärmniveau ausgesetzt sind. Für Belastungen unter 48 dB(A) L_{DEN} werden keine Gesundheitskosten berechnet.

Für die Bewertung eines Projektes im Rahmen einer KNA muss somit das ZKB-Lärmklassen für Wohnungen und das L_{DEN} -Mass für Personen erhoben werden und zwar jeweils für den Referenzfall und den Projektfall. Die Daten sind nach 1dB(A)-Lärmklassen zu differenzieren, vgl. Tab. 2.

Daraus lässt sich für jede Lärmklasse berechnen, wie viele Wohnungen bzw. Personen durch das Projekt mehr oder weniger dem entsprechenden Lärmniveau ausgesetzt sind (für Personen vgl. Tab. 2, für Wohnungen ist eine identisch strukturierte Tabelle für das ZKB-Lärmklassen zu erstellen). Diese **Veränderungen der Anzahl belasteter Wohnungen bzw. Personen nach Lärmklassen** dienen als Inputdaten in die KNA.

Tab. 2 Berechnung der Veränderung der Lärmbelastung für ein fiktives Projekt

Personen mit einer Lärmbelastung L_{DEN} von	Projektfall	Referenzfall	Veränderung
48 dB(A) (48.00 - 48.99)	8'000	7'100	900
49 dB(A) (49.00 - 49.99)	8'200	7'200	1'000
50 dB(A) (50.00 - 50.99)	8'500	7'400	1'100
51 dB(A) (51.00 - 51.99)	8'500	7'500	1'000
52 dB(A) (52.00 - 52.99)	9'000	8'100	900
53 dB(A) (53.00 - 53.99)	9'000	8'200	800
54 dB(A) (54.00 - 54.99)	8'900	8'200	700
55 dB(A) (55.00 - 55.99)	8'800	8'100	700
56 dB(A) (56.00 - 56.99)	8'200	7'700	500
57 dB(A) (57.00 - 57.99)	8'100	7'600	500
58 dB(A) (58.00 - 58.99)	7'500	7'100	400
59 dB(A) (59.00 - 59.99)	6'900	6'600	300
60 dB(A) (60.00 - 60.99)	6'300	6'100	200
61 dB(A) (61.00 - 61.99)	6'000	6'000	0
62 dB(A) (62.00 - 62.99)	5'500	5'600	-100
63 dB(A) (63.00 - 63.99)	4'900	5'100	-200
64 dB(A) (64.00 - 64.99)	4'400	4'700	-300
65 dB(A) (65.00 - 65.99)	3'800	4'200	-400
66 dB(A) (66.00 - 66.99)	3'200	3'700	-500
67 dB(A) (67.00 - 67.99)	2'500	3'000	-500
68 dB(A) (68.00 - 68.99)	1'800	2'400	-600
69 dB(A) (69.00 - 69.99)	1'200	1'900	-700
70 dB(A) (70.00 - 70.99)	600	1'000	-400
71 dB(A) (71.00 - 71.99)	200	400	-200
72 dB(A) (72.00 - 72.99)	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮

³⁴ Bei den Belastungsgrenzwerten für Lärm entspricht 40 dB(A) nachts bzw. 50 dB(A) tags den Planungswerten der Empfindlichkeitsstufe I (Erholung) (siehe Bundesrat 2018, Lärmschutz-Verordnung (Nr. 814.41), Anhang 3).

³⁵ Siehe z.B. EU (2002), Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm.

Dieses Vorgehen stellt relativ hohe Anforderungen an die Lärmmodelle, da sowohl Daten zum L_{DEN} als auch zum ZKB-Lärm berechnet werden müssen. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es nicht sinnvoll wäre, diese Eingabedaten zu vereinfachen, indem z.B. nur auf Daten zum Taglärm (nach 1 dB(A)-Lärmklassen) abgestellt wird. So wurde z.B. in der bisherigen Version der Norm, die noch auf anderen Lärmmassen basiert, der Nachtlärm durch den Taglärm approximiert, so dass nur der Taglärm erhoben werden musste.³⁶

Gemäss Auskunft von Lärmmodellexperten³⁷ sind im Lärmmodell jedoch ohnehin der Taglärm und der Nachtlärm verfügbar, da diese beiden Lärmmasse wichtig sind für die Überprüfung der Lärmgrenzwerte gemäss Lärmschutzverordnung³⁸. Deren Überprüfung wird auch im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) verlangt,³⁹ muss also für ein Projekt ohnehin gerechnet werden. Man kann also davon ausgehen, dass Lärmkarten zum Tag- und Nachtlärm verfügbar sind.

Aus dem Tag- und Nachtlärm kann – gemäss den Lärmmodell-Experten – sehr schnell das ZKB-Lärm berechnet werden. Entsprechend können auch Daten für das ZKB-Lärm als Inputdaten in die KNA verlangt werden, ohne dass damit ein zu hoher Anspruch an die Datenerfordernisse gesetzt wird.

Schwieriger ist das Lärm L_{DEN} , denn hier wird neben dem Tag- und Nachtlärm auch der Lärm am Abend benötigt. Die Ermittlung des Abendlärms bedingt als Grundlage entsprechende Daten zum Verkehrsaufkommen im Abendverkehr. In vielen Verkehrsmodellen liegen diese Daten nicht vor und müssten daher mit einem vergleichsweise grossen Aufwand zusätzlich beschafft werden. Sofern keine Daten zum Abendlärm vorliegen, ist für L_{DEN} folgende Approximation zulässig: Vereinfachend wird unterstellt, dass der Tages- und Abendlärm identisch sind. In der Folge lässt sich das Lärm L_{DEN} wie folgt berechnen: 12 Stunden Taglärm (6 bis 18 Uhr), 4 Stunden Abendlärm [=Taglärm + 5 dB(A)] (18 bis 22 Uhr) und 8 Stunden Nachtlärm + 10 dB(A) (22 bis 6 Uhr). Auch diese Berechnung ist sehr einfach, wenn die Ergebnisse für den Tag- und Nachtlärm vorliegen. Gemäss Angaben der Lärmexperten benutzt das BAFU diese Approximation jeweils um L_{DEN} -Daten zu berechnen.

Für die UVP wird üblicherweise nur die Empfindlichkeitsstufe II (Wohnzonen) der Lärmschutzverordnung⁴⁰ überprüft, in welcher der Grenzwert (Planungswert) bei 45 dB(A) Nachtlärm und 55 dB(A) Taglärm liegt. Für die Herleitung der benötigten Daten in der KNA muss also der Perimeter der Lärmberechnung vergrössert werden, um auch Häuser / Personen mit Lärmbelastungen bis 38 dB(A) Nachtlärm bzw. 48 dB(A) Taglärm zu erfassen (für die Berechnung des L_{DEN} ab 48 dB(A)). Dies ist mit zusätzlichem Aufwand auf Seiten des Lärmmodells verbunden, was die Frage nach der Verhältnismässigkeit aufwirft. Die gesamtschweizerischen Ergebnisse zum Strassenverkehrslärm zeigen, dass die Kosten der Ruhestörung (Reduktion Wohnungspreise) um 11% höher ausfallen als wenn die Lärmkosten ohne die untersten 5 dB(A) berechnet worden wären, die lärmbedingten Gesundheitskosten sind um 15% höher als wenn sie ohne die untersten 7 dB(A) ermittelt worden wären.⁴¹ Ein einfaches Weglassen der untersten Lärmklassen kann somit nicht empfohlen werden. Können die untersten Lärmklassen nicht berechnet werden, so muss eine **Approximation** verwendet werden. Dazu bestehen zwei Möglichkeiten:

³⁶ Diese Vereinfachung war insofern zulässig, als bisher nur ca. 7% der Lärmkosten vom Nachtlärm abhingen. Neu sind hingegen 45% der Kosten durch die Ruhestörung bedingt und damit hauptsächlich durch den Nachtlärm. Die verbleibenden 55% basieren auf Gesundheitskosten, die über den L_{DEN} bestimmt werden und damit auch teilweise vom Nachtlärm abhängig sind. Eine Abstützung allein auf den Taglärm wäre also viel ungenauer als bisher.

³⁷ Es wurden Experten der Firmen n-Sphere AG und Sinus AG kontaktiert.

³⁸ Bundesrat (2018), Lärmschutz-Verordnung (Nr. 814.41).

³⁹ BAFU (2009), UVP-Handbuch. Richtlinie des Bundes für die Umweltverträglichkeitsprüfung, Modul 5, S. 25.

⁴⁰ Bundesrat (2018), Lärmschutz-Verordnung (Nr. 814.41).

⁴¹ Eigene Berechnung basierend auf Infrast, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

- Entweder werden die Ergebnisse ab 45 dB(A) Nachtlärm und 55 dB(A) Taglärm einfach um obige Prozentsätze erhöht, d.h. die Zahl der belärmten Wohnungen (in den berechneten Lärmklassen) werden um 11% erhöht und die Zahl der belärmten Personen wird um 15% erhöht. Dieses Vorgehen ist natürlich grob.
- Alternativ können ausgehend von den bestehenden Lärmdaten bis 45 dB(A) Nachtlärm und 55 dB(A) Taglärm die Ergebnisse für L_{DEN} ab 55 dB(A) und das ZKB-Lärmmass ab 5 dB(A) ermittelt werden. Basierend auf diesen Ergebnissen kann eine projektspezifische Extrapolation auf die unteren Lärmklassen erstellt werden. Dazu kann die Schweizer Verteilung auf die Lärmklassen eine Hilfestellung sein, die in der folgenden Tab. 3 gezeigt wird. Selbstverständlich können im Projektfall die Anteile der belärmten Wohnungen und Personen kleiner oder grösser sein als im Schweizer Durchschnitt.

Tab. 3 Lärmbelastung im gesamten Strassenverkehr der Schweiz nach 1 dB(A)-Lärmklassen

ZKB-Lärmmass	Anzahl belastete Wohnungen 2015	Lärmniveau L_{DEN}	Anzahl belastete Personen 2015
0	1'643'136	< 48	1'332'612
>0 - 0.99	231'275	48.00 - 48.99	301'931
1.00-1.99	230'681	49.00 - 49.99	342'234
2.00-2.99	204'390	50.00 - 50.99	366'858
3.00-3.99	187'585	51.00 - 51.99	387'475
4.00-4.99	168'668	52.00 - 52.99	399'286
5.00-5.99	161'261	53.00 - 53.99	404'010
6.00-6.99	154'477	54.00 - 54.99	390'604
7.00-7.99	146'451	55.00 - 55.99	371'635
8.00-8.99	135'946	56.00 - 56.99	345'533
9.00-9.99	121'056	57.00 - 57.99	318'165
10.00-10.99	100'697	58.00 - 58.99	305'234
11.00-11.99	91'084	59.00 - 59.99	297'475
12.00-12.99	84'284	60.00 - 60.99	290'179
13.00-13.99	82'117	61.00 - 61.99	281'631
14.00-14.99	78'143	62.00 - 62.99	274'544
15.00-15.99	79'087	63.00 - 63.99	264'949
16.00-16.99	80'891	64.00 - 64.99	256'061
17.00-17.99	76'508	65.00 - 65.99	238'251
18.00-18.99	72'214	66.00 - 66.99	223'480
19.00-19.99	62'269	67.00 - 67.99	205'337
20.00-20.99	51'697	68.00 - 68.99	180'427
21.00-21.99	39'697	69.00 - 69.99	154'171
22.00-22.99	25'942	70.00 - 70.99	119'946
23.00-23.99	16'039	71.00 - 71.99	87'191
24.00-24.99	9'959	72.00 - 72.99	56'727
25.00-25.99	6'394	73.00 - 73.99	35'413
26.00-26.99	3'598	74.00 - 74.99	21'249
27.00-27.99	2'503	75.00 - 75.99	12'230
28.00-28.99	1'648	76.00 - 76.99	6'996
29.00-29.99	1'023	77.00 - 77.99	4'398
30.00-30.99	487	78.00 - 78.99	2'986
31.00-31.99	238	79.00 - 79.99	1'608
32.00-32.99	215	≥ 80.0	1'571
33.00-33.99	88		
≥34	98		
Total	4'351'846		8'282'396

Herleitung basierend auf Lärmdaten 2010 aus sonBASE und Hochrechnung auf 2015 mit Bevölkerung bzw. Anzahl Wohnungen.

Die Daten für die *Tab. 2* können mit jedem modernen Lärmberechnungsmodell ermittelt werden, sofern die berechneten Lärmdaten mit den entsprechenden Statistikdaten (Wohnungen und Personen) verknüpft werden können. Ein Beispiel eines solchen Lärmmodells ist wie erwähnt sonBASE.⁴² Zu beachten ist, dass bei der Berechnung der Lärmveränderung gemäss dem Ausweis in *Tab. 2* immer die Veränderung im Gesamtlärm zu hinterlegen ist, d.h. auch andere Lärmquellen sind zu berücksichtigen.⁴³

Bauphase

Bisher haben wir nur die Betriebsphase der neuen Strasse betrachtet. Natürlich können auch während der **Bauphase** grössere Lärmbelastungen entstehen. Dabei ist einerseits an den Baulärm und andererseits an Umwegfahrten zu denken.

Die Auswirkungen von **Umwegfahrten** (Umleitungen) könnten prinzipiell genau gleich behandelt werden wie die Veränderungen in der Betriebsphase. Für die relativ kurze Bauphase kann aber bei der Ermittlung der Lärmbelastung kaum derselbe Aufwand getrieben werden wie für die Betriebsphase. Wir nehmen daher an, dass für Umwegfahrten keine komplexen Computerberechnungen (Verkehrs- und Lärmmodell) angestellt werden. Wenn Umwegfahrten überhaupt miteinbezogen werden, dann mit einfacheren Methoden, d.h. mit der in Kapitel 2.5 vorgestellten vereinfachten Bewertungsmethode. Bei vielen Fällen sind jedoch keine Umwegfahrten nötig oder die Umleitung erfolgt nur während einer so kurzen Zeit, dass deren Effekte vernachlässigt werden können.

Die Auswirkungen von **Baulärm** können unseres Wissens mit den üblichen Lärmmodellen nicht berechnet werden, da der Baulärm nach Schweizer Umweltrecht nicht ein Bestandteil des Strassenlärms ist⁴⁴ und somit in den Strassenverkehrsmodellen nicht enthalten ist.⁴⁵ Aufgrund dieser Datenlücken lässt sich der Baulärm (mit vernünftigem Aufwand) aktuell nicht monetarisieren. Der Baulärm kann deshalb lediglich **deskriptiv** in der Bewertung berücksichtigt werden.

2.2.2 Berechnung des Mengengerüsts

Die erhobenen Inputdaten entsprechen direkt dem Mengengerüst. Es ist keine Umrechnung nötig.

2.2.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Die Berechnung des Mengengerüsts mittels eines Computermodells berücksichtigt bereits die örtlichen Gegebenheiten.

⁴² Die hier beschriebenen Inputdaten für eine KNA werden im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) nicht benötigt, d.h. für eine KNA sind zusätzliche Daten zu erheben. Denn im Rahmen der UVP wird nur der jeweils lauteste Punkt eines Gebäudes betrachtet. In der UVP wird aber kein Bezug vom Gebäude zu den Wohnungen resp. den Personen hergestellt. Diese Verknüpfung zwischen belärmten Gebäuden und Wohnungen bzw. Personen muss als Ergänzung zur UVP hergestellt werden. Zudem sind die Umrechnungen des Tages- und Nachtlärms in das ZKB-Lärmass und den L_{DEN} nötig sowie die Daten für tiefere Lärmniveaus.

⁴³ So führt beispielsweise der Bau einer neuen Strasse entlang einer bestehenden Schienenverbindung zu einer geringeren Veränderung in der Gesamtlärmbelastung, als wenn die neue Strasse durch ein bisher nicht lärmbelastetes Gebiet führt.

⁴⁴ Der Baulärm wird nach der Baulärm-Richtlinie des BAFU behandelt (Mail von Sinus AG vom 16.8.2007).

⁴⁵ Zudem dürfte eine Berechnung deutlich komplexer sein, da die verschiedenen Bauphasen unterschiedlich lärmintensiv sind – im Gegensatz dazu ist der Strassenlärm ein relativ gleichmässiges Geräusch.

2.3 Wertgerüst

2.3.1 Bewertungsmethode

Beim Wertgerüst stützen wir uns auf die ARE-Studie zu den externen Effekten in der Schweiz 2015.⁴⁶ Für die Ruhestörung bzw. die Reduktion der Wohnungspreise wird die Hedonic Pricing Methode verwendet. Bei den lärmbedingten Gesundheitsschäden werden die medizinischen Heilungskosten, die Produktionsausfälle und die Wiederbesetzungskosten über Marktpreise bestimmt. Die immateriellen Kosten werden über Zahlungsbereitschaften monetarisiert.

Aufgrund des zur Verfügung gestellten Mengengerüsts können die durch das Projekt zusätzlich ausgelösten Kosten bestimmt werden (Grenzkosten). Wird hingegen die vereinfachte Methodik in Kapitel 2.5 verwendet, so kommen Durchschnittskosten zum Einsatz.

2.3.2 Bestimmung des Wertgerüsts

Das im Folgenden hergeleitete Wertgerüst bezieht sich wie in der ARE-Studie immer auf Faktorpreise des Jahres 2015. Für den gesamten schweizerischen Strassenverkehr im Jahr 2015 wurden die Lärmkosten auf 2'089 Mio. CHF veranschlagt (vgl. Infrac, Ecoplan, 2019, S. 67). Davon entfallen 946 Mio. CHF (oder 45.3%) auf die Ruhestörung und 1'143 Mio. CHF (oder 54.7%) auf die Gesundheitskosten.

Ruhestörung bzw. Reduktion Wohnungspreise

In der ARE-Studie wird für die Reduktion der Wohnungspreise hergeleitet, dass die Abnahme 0.25% pro dB(A) beträgt.⁴⁷ Dieser Wert entspricht einem gewichteten Mittelwert für belärmte Mietwohnungen (0.21% pro dB(A)) und Eigentumswohnungen (0.59% pro dB(A)), wobei als Gewicht die Verteilung der belärmten Wohnungen auf Mietwohnungen (87.1%) und Eigentumswohnungen (12.9%) verwendet wird. Wie erwähnt wird dabei das ZKB-Lärmass verwendet, d.h. es werden Lärmbelastungen ab 40 dB(A) Nachtlärm bzw. 50 dB(A) Taglärm miteinbezogen (vgl. Definition des ZKB-Lärmasses in Kapitel 2.2.1). Jedes Dezibel über 40 bzw. 50 dB(A) reduziert also den Wohnungspreis linear um 0.25%.

Der Preis einer Durchschnittswohnung in der Schweiz im Jahr 2010 wurde in Ecoplan, Infrac (2014, S. 271-273) hergeleitet und in Infrac, Ecoplan (2019) auf 2015 aktualisiert. Im Folgenden werden die aktualisierten Werte für 2015 dargestellt. Ausgehend von einem durchschnittlichen Preis von Mietwohnungen von 1'306 CHF / Monat und dem Durchschnittspreis aller Wohnungen (Mietwohnungen und Eigentumswohnungen) von 1'455 CHF / Monat kann der (vorsichtig geschätzte) Preis der Eigentumswohnungen von 1'694 CHF / Monat bestimmt werden. Da mehrheitlich Mietwohnungen belärmt werden, kostet eine durchschnittliche belärmte Wohnung 1'356 CHF / Monat. Die Reduktion der Wohnungspreise basiert aber auf dem Preis ohne Lärmabzug, der bei 1'379 CHF / Monat oder 16'546 CHF / Jahr liegt.

Die **Reduktion der Wohnungspreise** von 0.25% pro dB(A) entsprechen also einem Betrag von **42.07 CHF pro Jahr, Wohnung und dB(A) gemäss ZKB-Lärmass**. Wird durch den Neubau einer Strasse eine Wohnung neu z.B. mit 49 dB(A) statt 44 dB(A) Nachtlärm belastet, so kann die damit verursachte Reduktion der Wohnungspreise auf 210.35 CHF (= (49 – 44) * 42.07) im Jahr 2015 veranschlagt werden.

Diese Herleitung des Kostensatzes beruht auf Schweizer Durchschnittswerten. In der Berechnung der gesamten verkehrsbedingten Lärmkosten in der Schweiz wurden jedoch nach Kantonen differenzierte Werte verwendet. Diese kantonal unterschiedlichen Werte

⁴⁶ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Die Methodik wird ausführlicher erläutert in Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

⁴⁷ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 270, was in Infrac, Ecoplan (2019) übernommen wurde.

beruhen auf den unterschiedlichen Wohnungspreisniveaus der Kantone und unterschiedlichen Wohneigentumsquoten. Es fragt sich deshalb, ob in KNA von Projekten in unterschiedlichen Kantonen auch unterschiedliche Kostensätze verwendet werden sollten. In Absprache mit der Begleitgruppe wird aus folgenden Gründen darauf verzichtet:

- Betrachtet wird eigentlich die Ruhestörung. Die Messung über Wohnungspreise könnte dazu verleiten, kantonale differenzierte Werte für die Ruhestörung zu verwenden.
- Das Arbeiten mit Schweizer Mittelwerten erlaubt eine möglichst breite und einfache Anwendung der Norm.
- Diese Vereinfachung lässt sich auch unter einem Fairness-Standpunkt vertreten, da unterschiedliche Personen, die dem gleichen Lärmniveau ausgesetzt sind, mit demselben Kostensatz bewertet werden.
- Die Lärmempfindlichkeit der Bevölkerung in Städten dürfte geringer sein als diejenige der Menschen auf dem Land. Hingegen sind die Wohnungspreise in den Städten meist höher als in ländlichen Gebieten. Mit diesen beiden gegenläufigen Effekten lässt es sich vertreten, auf eine kantonale Differenzierung des Kostensatzes zu verzichten.

Gesundheitskosten

Bei der Ermittlung der lärmbedingten Gesundheitskosten werden in Infrac, Ecoplan (2019)⁴⁸ ischämische Herzkrankheiten (mangelnde Versorgung mit Blut), Bluthochdruck bedingte Krankheiten und Schlaganfälle berücksichtigt. Für diese drei Krankheitsbilder wurde untersucht, wie die Belastungs-Wirkungsbeziehung zwischen der Lärmbelastung und der Häufigkeit der Krankheit ausfällt:⁴⁹ Es zeigt sich, dass unter 48 dB(A) L_{DEN} keine dieser drei Krankheitsbilder aufgrund des Lärms auftreten. Darüber geht die Studie von einer linearen Zunahme der Anzahl lärmbedingten Fälle bei steigendem Lärmniveau aus.

In Infrac, Ecoplan (2019) wurde berechnet, wie viele Personen in der Schweiz aufgrund des Lärms vorzeitig sterben oder erkranken.⁵⁰ Diese Todesfälle bzw. Erkrankungen wurden über Kostensätze monetarisiert. Ausgehend von diesen Grundlagen in Infrac, Ecoplan (2019) wurde für die vorliegende Arbeit eine weiterführende Auswertung (vgl. folgender Exkurs) mit folgendem Ergebnis vorgenommen:

- Der Kostensatz für alle drei Krankheitsbilder zusammen beläuft sich auf **15.79 CHF pro Jahr, pro belärmte Person und pro dB(A) L_{DEN} über 48 dB(A) L_{DEN}** . Davon entfallen 58% auf ischämische Herzkrankheiten, 36% auf Bluthochdruck bedingte Krankheiten und 6% auf Schlaganfälle.
- Wird der **VOSL** im Rahmen der Sensitivitätsanalyse um 50% erhöht oder reduziert, so verändert sich der Kostensatz um $\pm 41.9\%$ auf **22.41 bzw. 9.18 CHF pro Jahr, pro belärmte Person und pro dB(A) L_{DEN} über 48 dB(A) L_{DEN}** .

⁴⁸ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Die Methodik wird ausführlicher erläutert in Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

⁴⁹ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 259-265.

⁵⁰ Grundlage für die Berechnung waren die oben erläuterte Zunahme dieser Krankheiten bei Lärmniveaus über 48 dB(A) L_{DEN} , die Grundhäufigkeiten dieser Krankheiten in der Bevölkerung (ohne Lärm) sowie das Mengengerüst für die Schweiz bzw. die Anzahl durch den Strassenverkehr belärmter Personen (nach Lärmniveaus).

Exkurs: Berechnung der Kostensätze für die Gesundheitskosten

Für die Ermittlung der Gesundheitskosten wird für ischämische Herzkrankheiten, Bluthochdruck bedingte Krankheiten und Schlaganfälle je ein Kostensatz pro dB(A) Lärm und pro Person benötigt. Diese Werte sind in den Studien von Infrac und Ecoplan⁵¹ nicht aufgeführt und müssen deshalb für das vorliegende Projekt neu ermittelt werden. Ausgangspunkt dazu sind die in der folgenden Tabelle dargestellten Ergebnisse zu den lärmbedingten Gesamtkosten der drei Krankheitsbilder. Insgesamt entstanden im Jahr 2015 lärmbedingte Gesundheitskosten von 1'143 Mio. CHF. Dieser Wert hängt stark vom VOSL ab. Wird dieser im Rahmen der Sensitivitätsanalyse um 50% erhöht oder reduziert, so schwankt das Ergebnis um 41.9% (zwischen 664 und 1'622 Mio. CHF).

Tab. 4 Lärmbedingte Krankheitskosten im Strassenverkehr im Jahr 2015 in der Schweiz

	Ischämische Herzkrankheiten	Bluthochdruck bedingte Krankheiten	Schlaganfall	Total
Kosten in Mio. CHF Basis	659.73	409.28	74.14	1'143.15
Kosten in Mio. CHF mit hohem VOSL	952.77	562.85	106.35	1'621.97
Kosten in Mio. CHF mit tiefem VOSL	366.69	255.71	41.92	664.33

Diese Kosten müssen nun in ein Verhältnis zu der zu Grunde liegenden Lärmbelastung gesetzt werden. Der obere Teil von *Tab. 5* weist aus, wie viele Menschen in der Schweiz durch den Strassenlärm einem Lärmniveau über 48 dB(A) L_{DEN} ausgesetzt sind.⁵² Es zeigt sich, dass nur 1.3 Mio. der 8.3 Mio. Einwohner der Schweiz einer Lärmimmission ausgesetzt ist, die nicht gesundheitsschädlich ist bzw. unter 48 dB(A) L_{DEN} liegt. Der Grossteil der Bevölkerung (84%) muss jedoch gesundheitlich relevante Lärmimmissionen ertragen.

In der Tabelle ist auch ausgewiesen, wie hoch jeweils die Lärmbelastung für die betroffenen Personen über dem Schwellenwert von 48 dB(A) L_{DEN} ausfällt. Aus diesen Daten lässt sich die Anzahl dB(A) mal belastete Person über einem Lärmniveau von 48 dB(A) L_{DEN} berechnen, was 72.4 Mio. dB(A) mal Personen ergibt (durchschnittlich ist die Schweizer Bevölkerung also einer Lärmbelastung von 8.74 dB(A) L_{DEN} über dem Schwellenwert ausgesetzt). Werden die Kosten aus *Tab. 4* nun durch diese Zahl dividiert, so ergeben sich daraus die im Haupttext dargestellten Kostensätze, die auch in *Tab. 5* unten aufgeführt sind.

⁵¹ Weder in Infrac, Ecoplan (2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten), noch in Ecoplan, Infrac (2014, Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten).

⁵² Bei den dargestellten Zahlen handelt es sich um eine lineare Hochrechnung der Ergebnisse für das Jahr 2010 aus sonBASE mit dem Bevölkerungswachstum auf 2015 (aus Infrac, Ecoplan 2019). Die neusten Lärmdaten, die durch das BAFU Ende 2018 publiziert wurden, lagen beim Verfassen der Studie Infrac, Ecoplan (2019) noch nicht vor.

Tab. 5 Ermittlung der relevanten Strassenlärmbelastung und des Kostensatzes

Lärmniveau L_{DEN}	Anzahl belastete Personen 2015	Anzahl dB(A) über 48 dB(A)	Anzahl dB(A) * belastete Personen
< 48	1'332'612	0	-
48.00 - 48.99	301'931	0.5	150'965
49.00 - 49.99	342'234	1.5	513'351
50.00 - 50.99	366'858	2.5	917'145
51.00 - 51.99	387'475	3.5	1'356'163
52.00 - 52.99	399'286	4.5	1'796'788
53.00 - 53.99	404'010	5.5	2'222'054
54.00 - 54.99	390'604	6.5	2'538'929
55.00 - 55.99	371'635	7.5	2'787'264
56.00 - 56.99	345'533	8.5	2'937'029
57.00 - 57.99	318'165	9.5	3'022'571
58.00 - 58.99	305'234	10.5	3'204'952
59.00 - 59.99	297'475	11.5	3'420'960
60.00 - 60.99	290'179	12.5	3'627'235
61.00 - 61.99	281'631	13.5	3'802'017
62.00 - 62.99	274'544	14.5	3'980'888
63.00 - 63.99	264'949	15.5	4'106'706
64.00 - 64.99	256'061	16.5	4'225'007
65.00 - 65.99	238'251	17.5	4'169'401
66.00 - 66.99	223'480	18.5	4'134'371
67.00 - 67.99	205'337	19.5	4'004'069
68.00 - 68.99	180'427	20.5	3'698'754
69.00 - 69.99	154'171	21.5	3'314'674
70.00 - 70.99	119'946	22.5	2'698'785
71.00 - 71.99	87'191	23.5	2'048'981
72.00 - 72.99	56'727	24.5	1'389'807
73.00 - 73.99	35'413	25.5	903'028
74.00 - 74.99	21'249	26.5	563'094
75.00 - 75.99	12'230	27.5	336'336
76.00 - 76.99	6'996	28.5	199'391
77.00 - 77.99	4'398	29.5	129'750
78.00 - 78.99	2'986	30.5	91'063
79.00 - 79.99	1'608	31.5	50'654
≥ 80.0	1'571	32.5	51'056
Total	8'282'396		72'393'238
Kosten in Mio. CHF	Ischämische Herzkrankheiten		659.73
	Bluthochdruck bedingte Krankheiten		409.28
	Schlaganfall		74.14
	Total		1'143.15
Kosten in CHF pro Jahr, pro Person und pro dB(A) L_{DEN} über 48 dB(A) L_{DEN}	Ischämische Herzkrankheiten		9.11
	Bluthochdruck bedingte Krankheiten		5.65
	Schlaganfall		1.02
	Total		15.79
	Total mit hohem VOSL		22.41
	Total mit tiefem VOSL		9.18

Zusammenfassung

Zusammenfassend ergibt sich für die Anwendung in einer KNA folgendes Wertgerüst zur Bewertung der Lärmkosten:

- Ab 0 dB(A) gemäss ZKB-Lärmass (bzw. ab 40 dB(A) Nachtlärm bzw. 50 dB(A) Taglärm): Reduktion Wohnungspreise um 42.07 CHF pro Jahr, Wohnung und dB(A) gemäss ZKB-Lärmass

- Ab 48 dB(A) L_{DEN} : Krankheitskosten von 15.79 CHF pro Jahr, pro Person und pro dB(A) L_{DEN} .
 - Die Sensitivität zum VOSL hat nur auf die Krankheitskosten einen Einfluss. Diese werden im Rahmen der VOSL-Sensitivität um $\pm 41.9\%$ auf 22.41 bzw. 9.18 CHF pro Jahr, pro Person und pro dB(A) L_{DEN} über 48 dB(A) L_{DEN} erhöht bzw. vermindert.
- Dies wird in der folgenden Abbildung nochmals veranschaulicht, in der die linear steigenden Kostensätze graphisch dargestellt werden.

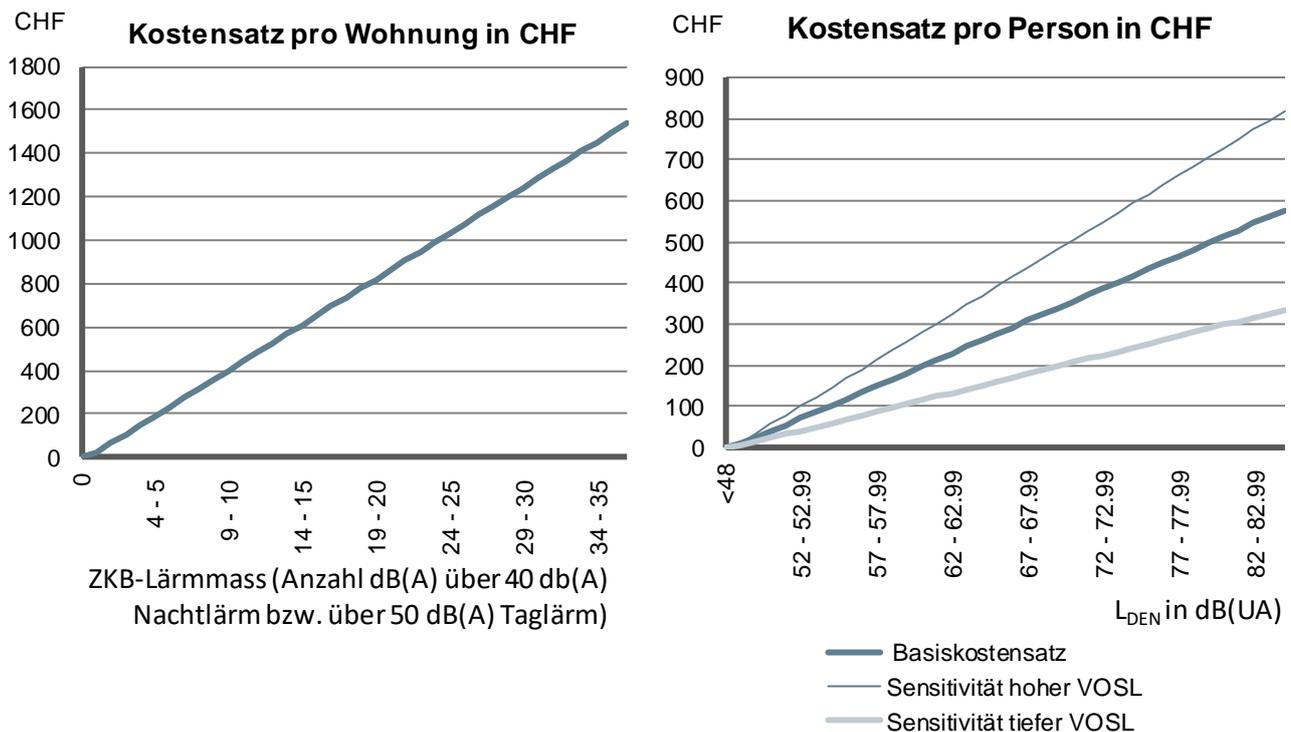


Abb.1 Kostensätze pro Wohnung und pro Person nach Lärmbelastung

2.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Bei den Gesundheitskosten ist keine Anpassung an örtliche Gegebenheiten nötig bzw. die örtlichen Gegebenheiten werden bereits in den Berechnungen im Lärmmodell umfassend abgebildet. Auch bei der Ruhestörung bzw. der Reduktion der Wohnungspreise erfolgt keine weitere örtliche Differenzierung z.B. anhand kantonal unterschiedlicher Wohnungspreise – wie in Kapitel 2.3.2 erläutert.

Es wäre zu erwarten, dass auf dem Land die Belästigung des Lärms tendenziell höher ist als in der Stadt, weil Personen, die sich schnell von Lärm gestört fühlen, tendenziell eher auf dem Land leben und umgekehrt. Dazu gibt es aber keine erhärteten Daten, so dass auf eine Anpassung verzichtet werden muss.

2.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand

Die hier angegebenen Werte beziehen sich alle auf den Preisstand des Jahres 2015. Wird die KNA mit einem anderen Preisstand durchgeführt, können die Werte vereinfachend mit dem Nominallohnwachstum auf den Preisstand der KNA angepasst werden:

- Ruhestörung bzw. Reduktion Wohnungspreise: Das Niveau der Wohnungspreise hängt langfristig vom Einkommen bzw. vom Niveau der Nominallöhne ab – abgesehen von

zeitlich beschränkten Über- oder Unterangeboten auf dem Wohnungsmarkt. Somit kann vereinfachend das Nominallohnwachstum für die Fortschreibung verwendet werden.

- Gesundheitskosten: Das Nominallohnwachstum ist auch hier sinnvoll, da es sich um Werte handelt, die hauptsächlich mit einer Zahlungsbereitschaft bestimmt wurden.⁵³

2.4 Veränderung über die Zeit

Wie in Kapitel 1.4 beschrieben, sind für die Bewertung Prognosen bis ca. zum Jahr 2070 nötig. Für diesen langen Prognosehorizont ist ein pragmatischer Ansatz zu wählen. Es geht nicht darum, für jeden einzelnen Einflussfaktor eine separate Prognose zu treffen, sondern eine Gesamtprognose für alle Veränderungen (als Veränderungsrate pro Jahr). Daher werden hier die Veränderungen des Mengen- und Wertgerüsts gemeinsam betrachtet.

Das Mengengerüst (vgl. Tab. 2) und das Wertgerüst sind wie erläutert nicht nur für ein Stichjahr (z.B. 2030) zu erheben, sondern es ist auch abzuschätzen, wie sie sich über die Zeit bzw. über die nächsten Jahrzehnte verändern dürften. Folgende Faktoren können einen Einfluss auf die zukünftige Höhe der Lärmkosten haben (die verschiedenen Faktoren werden in Tab. 6 zusammengefasst):⁵⁴

Veränderung des **Mengengerüsts**:

- Die Auswirkungen von **Lärminderungen bei Motoren und Rollgeräuschen** werden zusammen untersucht. Die gemeinsame Veränderungsrate basiert auf folgenden Überlegungen zur künftigen Entwicklung der beiden Lärmquellen:
 - Bei den **Lärmemissionen der Motoren** ist vor allem die Einführung der Elektrofahrzeuge relevant. In Absprache mit dem BAFU kann davon ausgegangen werden, dass ein elektrisch betriebenes Fahrzeug keine Antriebsgeräusche verursacht bzw. dass die Antriebsgeräusche bei Geschwindigkeiten von 50, 80 oder 120 km/h so klein sind, dass sie im Vergleich zu den Rollgeräuschen nicht relevant sind. Bei den bisherigen Fahrzeugtypen (Benzin- und Dieselfahrzeuge) gehen wir von einem gleichbleibenden Motorenlärm aus. Entscheidend ist somit die Geschwindigkeit, mit der sich Elektrofahrzeuge ausbreiten. Dabei übernehmen wir Prognosen aus dem HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren⁵⁵): Für das Jahr 2050 (das letzte Jahr mit Prognose) geht das HBEFA von einem Anteil der Elektrofahrzeuge von 26% bei den Personenwagen und von 2.7% bei den schweren Güterfahrzeugen aus (jeweils Durchschnitt der Fzkm über alle Strassentypen (Autobahn, ausserorts, innerorts)).
 - Die **Lärmemissionen durch Rollgeräusche** (Räder) sind ab Geschwindigkeiten von ca. 20 bis 40 km/h zur dominanten Lärmquelle geworden.⁵⁶ Bei einem vollständigen Durchdringungsgrad von lärmarmen Reifen wurde ein Lärminderungspotential von bis zu 3.5 dB bis 2030 ermittelt.⁵⁷ In Absprache mit dem BAFU gehen wir davon aus, dass eine durchschnittliche Lärmreduktion um 2 dB(A) bis 2050 realistisch ist. Dies gilt für den Personen- und Güterverkehr.

Das Potenzial der Elektrofahrzeuge beim Motorenlärm und die Abnahme der Rollgeräusche um 2 dB(A) wird schliesslich in eine Veränderungsrate in % pro Jahr umgerechnet, wobei davon ausgegangen wird, dass sich diese Lärmreduktionen bis 2050

⁵³ Die immateriellen Kosten, rund 94% der gesamten lärmbedingten Gesundheitskosten im Strassenverkehr, werden über eine Zahlungsbereitschaft bestimmt. Weitere 2% durch medizinische Behandlungskosten, 4% durch Produktionsausfälle und 0.1% durch Wiederbesetzungskosten (Infras, EcoPlan 2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten).

⁵⁴ Lärmsanierungen (Lärmschutzwände, Flüsterbeläge etc.) spielen bei der vorliegenden Analyse keine Rolle, denn es wird ein spezifisches Projekt betrachtet, in dem eine Lärmschutzwand entweder mit enthalten ist oder eben nicht.

⁵⁵ Infras (2017), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 3.3, bzw. Spezialauswertung durch Infras basierend auf Infras (2017), Pilotstudie zum Treibstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen im Verkehr 1990-2050 - Szenarien für den Strassenverkehr.

⁵⁶ Heutschi und Locher (2018), sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm, Kapitel 10.6.

⁵⁷ Grolimund + Partner AG (2018), «Lärminderungspotential leiser Reifen auf gängigen Schweizer Strassenbelägen S. 23-24.

- umsetzen lassen. Dabei ergibt sich eine grob berechnete **Abnahme von 0.45% pro Jahr**.⁵⁸ Dieser Wert ist allerdings mit relativ grossen **Unsicherheiten** verbunden.
- **Bevölkerungswachstum:** Die Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung des BfS bis 2045 gehen im Referenzszenario von einer abfallenden jährlichen Wachstumsrate aus (2015: 1.22% pro Jahr, 2045 0.24% pro Jahr).⁵⁹ Dies entspricht einem durchschnittlichen Wachstum zwischen 2015 und 2045 von 0.67% pro Jahr. Da wir diesen Wert auch für die Zeit nach 2045 anwenden, runden wir diesen Wert auf 0.5% pro Jahr ab.⁶⁰
 - **Zunahme der Anzahl Wohnungen:** Die Zahl der Wohnungen hat zwischen 2009 und 2016⁶¹ durchschnittlich jährlich um 1.4% zugenommen.⁶² Unseres Wissens gibt es jedoch keine spezifischen Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Wohnungszahlen. Deshalb verwenden wir bestehende Prognosen für die Veränderung der Energiebezugsfläche von Haushalten. Die Prognosen sagen für die Jahre 2015 bis 2020 ein jährliches Wachstum von 1.4% voraus, das danach aber abnimmt. Durchschnittlich beträgt das jährliche Wachstum bis 2050 noch 0.8%. Auch hier runden wir diesen Wert ab – diesmal auf **0.7% pro Jahr** – weil wir längere Zeiträume betrachten.⁶³
 - **Verkehrswachstum:** Mit dem Wachstum des Verkehrs nimmt auch der Lärm zu. Das Verkehrswachstum wird im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der KNA variiert. In NISTRA beträgt es im Basisszenario 1% pro Jahr (Sensitivität mit 0% und 2%).⁶⁴ Gemäss den Erläuterungen im Anhang A führen allerdings erst Verkehrszunahmen über 25% zu einem wahrnehmbaren Lärmanstieg von über 1 dB(A). Kurzfristig hat das Verkehrswachstum somit keinen Effekt auf die Lärmbelastung. Aufgrund der Vorgabe einer 40-jährigen Nutzungsphase bei Infrastrukturprojekten (vgl. Grundnorm SN 641 820, Ziffer 12), kann sich bei diesem langen Betrachtungszeitraum auch aus kleinen jährlichen Zunahmen ein Verkehrswachstum von insgesamt über 25% ergeben. Deshalb soll das Verkehrswachstum miteinbezogen werden.⁶⁵

Veränderung des Wertgerüstes:

- Reale Veränderung der **Ruhestörung:** Wie in Kapitel 2.3.4 erläutert hängt das Niveau der Wohnungspreise langfristig vom Lohnniveau ab. Entsprechend kann die Reduktion der Wohnungspreise mit dem **Reallohnwachstum** fortgeschrieben werden.
- Die **Gesundheitskosten** werden hauptsächlich mittels einer Zahlungsbereitschaft (vgl. Fussnote 53) bestimmt und nehmen deshalb – wie üblich – mit dem **Reallohnwachstum** zu.

⁵⁸ Dazu werden zuerst die Lärmemissionen durch Motor sowie Rollen und daraus das Total für Personenwagen und schwere Güterfahrzeuge zu Bedingungen im Jahr 2015 ermittelt. Dazu verwenden wir die Formeln für die Lärmberechnung aus Ecoplan et al. (2004, Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs, S. 46). Dies wird für innerorts, ausserorts und Autobahn gemacht. Dann ziehen wir davon beim Rollgeräusch das oben beschriebene Potential zur Lärmreduktion von 2 dB(A) ab und eliminieren bei den Elektrofahrzeugen den Motorenlärm vollständig und berechnen dann die Auswirkungen auf den Gesamtlärm, der bei Personenwagen um 1.8 dB(A) abnimmt und im Güterverkehr um 1.1 dB(A) (die angegebenen Werte sind Durchschnitte für die verschiedenen Verkehrssituationen (innerorts, ausserorts und Autobahn), wobei die Durchschnitte mit den Prognosen der Fzkm für 2050 aus dem HBEFA berechnet werden). Dann wird die Berechnung der Lärmkosten für die ganze Schweiz in Infrac, Ecoplan (2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten) reproduziert unter der Voraussetzung, dass die Zahl der belärmten Personen bzw. Wohnungen entsprechend der Abnahme des Lärms um 1.8 bzw. 1.1 dB abnimmt. Die resultierende Abnahme der Lärmkosten wird dann mit einer konstanten Veränderungsrate auf 35 Jahre (2015 bis 2050) verteilt. Die Ergebnisse für Personenwagen bzw. schwere Güterfahrzeuge werden schliesslich mit dem entsprechenden Anteil dieser Fahrzeugkategorien an den Lärmkosten des Strassenverkehrs gewichtet (Infrac, Ecoplan 2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten). Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Abnahme von 0.45% pro Jahr.

⁵⁹ BfS (2015), Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung. Ergebnisse des Referenzszenarios.

⁶⁰ Dies ergibt sich z.B., wenn man nach 2045 Konstanz unterstellt als Durchschnitt zwischen 2015 und 2055.

⁶¹ Die Gebäude- und Wohnungsstatistik wird vom BfS erst seit 2009 geführt.

⁶² BfS (2017), Wohnungen nach Kanton, Gebäudekategorie, Anzahl Zimmer, Flächenklassen und Bauperiode.

⁶³ Dies ergibt sich, wenn wir die Periode 2015 bis 2055 betrachten und nach 2050 Konstanz unterstellen.

⁶⁴ Ecoplan (2018), Handbuch eNISTRA 2017, S. 160.

⁶⁵ Bisher wurde auf den Einbezug des Verkehrswachstums verzichtet. Dies führte dazu, dass in der detaillierten Methodik das Verkehrswachstum nicht berücksichtigt wird, in der vereinfachten Methodik, die direkt von den Fahrzeugkilometern abhängt, hingegen schon. Mit der Berücksichtigung des Verkehrswachstums in der detaillierten Methodik wird diese Inkonsistenz beseitigt.

- Das Reallohnwachstum dürfte in etwa **0.75% pro Jahr** betragen (Sensitivität mit 0% und 1.5%).⁶⁶ Dieser Wert wird im Rahmen der üblichen Sensitivitätsanalysen in der KNA verändert.⁶⁷

Fazit

Wie gesagt kann die Festlegung der Veränderungen des Lärmeffektes über die Zeit nicht genau erfolgen. Deshalb wird pragmatisch eine Veränderungsrate pro Jahr bestimmt, die alle oben beschriebenen Veränderungen umfasst, wobei das Verkehrs- und Reallohnwachstum gesondert ausgewiesen wird, da diese im Rahmen der Sensitivitätsanalysen verändert werden. Bei der Festlegung der Prognose ist zu beachten, dass nicht alle Veränderungen gleich auf das Gesamtergebnis wirken, gewisse Veränderungen haben nur einen Einfluss auf die Ruhestörung, andere nur auf die Gesundheitskosten und einige auf beide. Dabei ist zu beachten, dass sich die Lärmkosten des Strassenverkehrs in der Schweiz im Jahr 2015 zu 45% auf die Reduktion der Wohnungspreise und zu 55% auf Gesundheitskosten verteilen.⁶⁸

Die folgende Tabelle fasst die oben beschriebenen Veränderungen pro Jahr zusammen. Dabei werden das Verkehrs- und Reallohnwachstum nicht berücksichtigt, da diese im Rahmen der üblichen Sensitivitätsanalyse verändert werden. Es ist zu betonen, dass die einzelnen Zahlen in der Tabelle alle mit Unsicherheiten verbunden sind (insbesondere die Abnahme der Lärmemissionen von Motoren und Rollgeräuschen). Deshalb können sie nur als Grössenordnungen verstanden werden. Die Tabelle soll lediglich zeigen, wie die verschiedenen Prognosen verknüpft werden müssen, um zu einem Gesamtergebnis zu kommen.

Die Berechnungen in *Tab. 6* zeigen, dass sich somit eine **Erhöhung der Lärmkosten um 0.15% pro Jahr** (gerundet) ergibt. **Zudem** ist das **Verkehrs- und Reallohnwachstum** zu beachten.

Tab. 6 Übersicht über die zu erwartenden zukünftigen Veränderungen pro Jahr mit Einfluss auf die Höhe der spezifischen Lärmkosten (ohne Verkehrs- und Reallohnwachstum) **ALLE ZAHLEN SIND NUR ALS GRÖSSENORDNUNGEN ZU VERSTEHEN.**

	Ruhestörung 45.3%	Gesundheitskosten 54.7%	Total
Motoren und Rollgeräusche	-0.45%	-0.45%	-0.45%
Bevölkerungswachstum		0.50%	0.27%
Zunahme Wohnungen	0.70%		0.32%
Total¹	0.25%	0.05%	0.14%

¹ Das Total wird multiplikativ gebildet, d.h. $(1+X)^*(1+Y)^* \dots - 1$.

Bei der Anwendung der Norm in der Praxis ist zu beachten, dass möglicherweise gewisse in *Tab. 6* berücksichtigte Effekte bereits im Lärmmodell enthalten sind, was zu Doppelzählungen führen könnte. Beispielsweise könnte im Lärmmodell bereits eine Bevölkerungsprognose enthalten sein. In diesem Fall darf das Bevölkerungswachstum nicht doppelt berücksichtigt werden.

⁶⁶ Ecoplan (2018), Handbuch eNISTRA 2017, S. 160.

⁶⁷ Dieser Zusammenhang zur üblichen Sensitivität für das Reallohnwachstum wurde bisher nicht beachtet, soll neu aber mitberücksichtigt werden.

⁶⁸ Infras / Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 66.

2.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grob-valuationen

Die oben beschriebene Bewertungsmethode stellt relativ hohe Anforderungen an die benötigten projektabhängigen Inputdaten: Die Ermittlung der Veränderung der Anzahl belärmter Personen und Wohnungen nach 1-dB(A)-Lärmklassen erfordert den Einsatz eines Lärmmodells. Es ist jedoch davon auszugehen, dass für Grobbewertungen oder für kleinere Projekte der Einsatz von Lärmmodellen nicht gefordert werden kann. Für solche Bewertungen ist deshalb eine einfachere Methode zur Verfügung zu stellen, die auf üblicherweise vorhandenen Daten aufbaut oder auf Daten, die relativ leicht beschafft werden können.

Für die Herleitung einer einfacheren Bewertungsmethode wurden zwei Ansätze untersucht. Nach reiflicher Überlegung wurde in Ecoplan (2007) entschieden, dass die im Folgenden vorgestellte Durchschnittskosten-Methode vorzuziehen ist. Die Alternative, nach der nur Strassen mit grossen Veränderungen der Verkehrsmenge betrachtet werden, wird zusammen mit der Begründung ihrer Ablehnung im Anhang A kurz vorgestellt.

2.5.1 Bewertung über Durchschnittskosten

Die Grundlage für die Bewertung bilden die durchschnittlichen Kosten pro Fzkm (vgl. *Tab. 7*). Die Werte stammen – wie das oben verwendete Wertgerüst – aus der Studie Infrac / Ecoplan (2019), und umfassen somit Ruhestörung und Gesundheitskosten.

Als Inputdaten werden die Veränderungen der Fzkm benötigt, die im Rahmen einer KNA ohnehin vorliegen. Dies kann differenziert nach den sechs in *Tab. 7* aufgeführten Fahrzeugkategorien geschehen, nur nach Personen- und Güterverkehr oder nur für den Gesamtverkehr.

Bei dieser vereinfachten Methode sind prinzipiell die gesamten Veränderungen der Fzkm als Folge des neuen Infrastrukturprojektes zu berücksichtigen.⁶⁹ Um aber grobe Fehler bei Tunnelbauten oder Ortsumfahrungen zu vermeiden, sind in diesen Fällen die Fzkm im neuen Tunnel oder auf der neuen Umfahrungsstrasse (falls in unbewohntem Gebiet) nicht zu berücksichtigen, denn der vorliegende Indikator analysiert nur den Lärm am Wohnort.

Tab. 7 Durchschnittliche Lärmkosten im Jahr 2015 in Rp / Fzkm

	Personenverkehr					Güterverkehr			Ø PV und GV
	PW	Bus ¹	Car	MZ	Ø PV	Li	SNF	Ø GV	
Lärmkosten 2015 in Rp / Fzkm	1.7	19.7	19.7	18.4	2.4	5.3	21.7	11.6	3.4

Legende: PW = Personenwagen, Bus = Linienbus ÖV, Car = Privatcar, MZ = Motorisierte Zweiräder, Li = Lieferwagen, SNF = Schwere Nutzfahrzeuge

¹ Ohne Trolleybus, der Kosten von 1.7 Rp / Fzkm verursacht und ohne Tram (5.3 Rp / Fzkm).

Quelle: Infrac, Ecoplan (2018), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheits-effekten, S. 144 und eigene Berechnungen.

Die Anpassung an einen anderen Preisstand und die Veränderungen über die Zeit erfolgen wie in Kapitel 2.3.4 und 2.4 beschrieben.

2.5.2 Einsatzgebiet der vereinfachten Methode

Bei grösseren Projekten ist eine detaillierte Betrachtung zu fordern. Bei kleineren Projekten ist immer dann eine detaillierte Bewertung vorzunehmen, wenn die Daten dies erlauben

⁶⁹ Die Durchschnittskostensätze ergeben sich aus der Division der gesamten Strassenlärmkosten in der Schweiz mit der gesamten Fahrleistung in der Schweiz. Entsprechend wäre es unzulässig, den Untersuchungsraum wie in der detaillierten Methode nur auf Strassen zu konzentrieren, auf denen grössere Veränderungen der Verkehrsmenge zu beobachten sind (vgl. Kapitel 2.2.1).

oder wenn der Lärm ein relevanter Indikator sein könnte. Die **vereinfachte Methode** sollte vor allem in folgenden Fällen zum Einsatz kommen:

- Grobevaluationen
- Bewertung von Projekten mit Kosten unter ca. 500 Mio. CHF, in denen die nötigen Inputdaten für die detaillierte Methode nicht zur Verfügung stehen.
 - Wir empfehlen, auch bei kleinen Projekten nicht zum Vornherein auf die Anwendung der detaillierten Methode (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3) zu verzichten. Gemäss Lärmexperten⁷⁰ ist in der Praxis oft festzustellen, dass gerade bei kleineren Projekten die Datenlage zur Lärmbelastung vergleichsweise gut ist, weil bei solchen Projekten die Lärmveränderung oftmals von Relevanz sein kann und ihr daher bei der Aufarbeitung der Grunddaten entsprechend Beachtung geschenkt wird.
- Für die Bewertung von Umleitungen während der Bauphase (vgl. Kapitel 2.2.1).

Generell ist zu beachten, dass die Anwendung der vereinfachten Methode nur sehr zurückhaltend erfolgen sollte. Es besteht insbesondere kein linearer Zusammenhang zwischen der Zunahme des Verkehrsaufkommens und dem Anstieg der Lärmkosten – vielmehr nehmen die Lärmkosten bei steigender Fahrleistung stark unterproportional zu, so dass die Grenzkosten beinahe Null sein können. Wesentlich bedeutender für die Höhe der Lärmkosten sind meist die örtlichen Begebenheiten, also beispielsweise die Frage, ob eine neue Strasse durch ein dicht oder dünn besiedeltes Gebiet führt. Diesen Besonderheiten kann mit einem Durchschnittskostensatz nicht Rechnung getragen werden, sondern bedingen letztlich den Einsatz der detaillierten Methode.

2.6 Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel wird eine Umfahrungsstrasse betrachtet (vgl. Kapitel 1.8). Die Umfahrungsstrasse führt im Ortskern zu einer Lärmentlastung bei hohen Lärmniveaus, hat jedoch zur Folge, dass am Ortsrand Mehrbelastungen bei tieferen Lärmniveaus auftreten (siehe *Tab. 8*). Die benötigten Inputdaten werden in der Tabelle gelb hinterlegt (und entsprechen für die Personen den Zahlen in *Tab. 2*). Das Wertgerüst wird aus Kapitel 2.3.2 übernommen, wobei es hier jeweils für 0.5, 1.5, 2.5, ... dB(A) benötigt wird.

Wie *Tab. 8* zeigt, führt die fiktive Umfahrungsstrasse im Jahr 2015 per Saldo zwar zu mehr lärmbelasteten Personen und Wohnungen, aber insgesamt zu weniger hohen Lärmkosten, da vor allem bei hohen Lärmniveaus der Lärm abnimmt. Schlussendlich resultiert ein Nutzen von 1.4 Mio. CHF.

⁷⁰ Ecoplan (2007), Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse, S. 33.

Tab. 8 Berechnung der Lärmkosten anhand eines fiktiven Beispiels für das Jahr 2015 (positive Zahlen stellen eine Zunahme gegenüber dem Referenzfall dar, negative eine Abnahme)

Lärmbelastung ZKB-Lärmmass in dB(A)	Lärmbelastung L _{DEN} in dB(A)	Anzahl dB(A) über Grenzwert	Veränderung Anzahl Wohn- ungen ZKB- Lärmmass	Veränderung Anzahl Personen L _{DEN}	Kostensatz pro Wohnung in CHF	Kostensatz pro Person in CHF	Ergebnis in CHF
>0 bis 1	48 bis 48.99	0.5	500	900	21.03	7.90	17'623
1 bis 2	49 bis 49.99	1.5	450	1'000	63.10	23.69	52'082
2 bis 3	50 bis 50.99	2.5	400	1'100	105.17	39.48	85'492
3 bis 4	51 bis 51.99	3.5	350	1'000	147.24	55.27	106'800
4 bis 5	52 bis 52.99	4.5	350	900	189.30	71.06	130'209
5 bis 6	53 bis 53.99	5.5	250	800	231.37	86.85	127'322
6 bis 7	54 bis 54.99	6.5	250	700	273.44	102.64	140'208
7 bis 8	55 bis 55.99	7.5	200	700	315.50	118.43	146'003
8 bis 9	56 bis 56.99	8.5	150	500	357.57	134.22	120'747
9 bis 10	57 bis 57.99	9.5	100	500	399.64	150.01	114'970
10 bis 11	58 bis 58.99	10.5	-	400	441.71	165.80	66'322
11 bis 12	59 bis 59.99	11.5	-50	300	483.77	181.59	30'290
12 bis 13	60 bis 60.99	12.5	-100	200	525.84	197.39	-13'107
13 bis 14	61 bis 61.99	13.5	-150	-	567.91	213.18	-85'186
14 bis 15	62 bis 62.99	14.5	-200	-100	609.98	228.97	-144'892
15 bis 16	63 bis 63.99	15.5	-250	-200	652.04	244.76	-211'962
16 bis 17	64 bis 64.99	16.5	-250	-300	694.11	260.55	-251'692
17 bis 18	65 bis 65.99	17.5	-300	-400	736.18	276.34	-331'389
18 bis 19	66 bis 66.99	18.5	-350	-500	778.24	292.13	-418'451
19 bis 20	67 bis 67.99	19.5	-200	-500	820.31	307.92	-318'023
20 bis 21	68 bis 68.99	20.5	-100	-600	862.38	323.71	-280'466
21 bis 22	69 bis 69.99	21.5	-	-700	904.45	339.50	-237'652
22 bis 23	70 bis 70.99	22.5	-	-400	946.51	355.29	-142'118
23 bis 24	71 bis 71.99	23.5	-	-200	988.58	371.09	-74'217
24 bis 25	72 bis 72.99	24.5	-	-	1'030.65	386.88	-
Total			1'050	5'100			-1'371'088

2.7 Vergleich mit bisheriger Methodik

Gegenüber der bisherigen Detailnorm SN 641 828 aus dem Jahr 2009 werden folgende Anpassungen vorgenommen:⁷¹

- **Neue Lärmmasse:** Bisher war als Input nur der Taglärm erforderlich. Neu werden Daten zu den beiden Lärmmassen L_{DEN} und ZKB-Lärmmass benötigt. Diese können aus Daten zum Tag- und Nachtlärm einfach abgeschätzt werden.
- **Eigentumswohnungen miteinbezogen:** Der bisherige Kostensatz für die Reduktion der Wohnungspreise beruhte allein auf der Preisabnahme bei Mietwohnungen. Neu können aufgrund neuer Studien auch die Eigentumswohnungen miteinbezogen werden. Bei diesen wird generell eine höhere Sensibilität gegenüber Lärm festgestellt, was zu entsprechend höheren Preisabschlägen führt.
- **Neue Schwellenwerte:** Die Schwellenwerte, ab denen der Lärm zu Kosten führt, wurden aufgrund der neuen Datengrundlagen angepasst. Bisher wurden Mietzinsausfälle ab 55 dB(A) Taglärm berücksichtigt, Bluthochdruck ab 57 dB(A) Taglärm und ischämische Herzkrankheiten ab 65 dB(A) Taglärm. Neu gilt für die Ruhestörung bzw. Reduktion der Wohnungspreise eine Schwelle von 0 dB(A) gemäss ZKB Lärmmass (d.h. 40 dB(A) Nachtlärm bzw. 50 dB(A) Taglärm) und für alle drei Krankheitsbilder eine Schwelle von 48 dB(A) gemäss L_{DEN}.
- **Höherer VOSL:** Die Kostensätze basieren neu auf einem deutlich höheren VOSL (value of statistical life) als bisher. Dadurch verdoppeln sich die lärmbedingten Gesundheitskosten beinahe. Zudem wird neu gemäss Grundnorm SN 641 820 eine Sensitivität

⁷¹ Wie bereits erwähnt entspricht die Methodik in NISTRA der bisherigen Detailnorm SN 641 828. Nach Abschluss des vorliegenden Berichts bzw. nach der Publikation der aktualisierten SN 641 828 wird die neue Methodik auch in eNISTRA implementiert.

für den VOSL eingeführt und entsprechend werden die Kostensätze auch für diese Sensitivität berechnet.

- **Neue Lärmdaten:** Die Kostensätze beruhen auf besseren Datengrundlagen zur Lärmbelastung (SonBase-Daten für 2010⁷²).
- **Schlaganfälle berücksichtigt:** Bisher wurden lediglich Bluthochdruck bedingte Krankheiten und ischämische Herzkrankheiten berücksichtigt, neu zusätzlich auch noch Schlaganfälle. Dadurch steigen die Lärmkosten in der Schweiz um 3.7%.
- **Wiederbesetzungskosten berücksichtigt:** Neu werden die Wiederbesetzungskosten miteinbezogen (Kosten für die Neubesetzung einer Arbeitsstelle, wenn die Arbeitskraft frühzeitig verstirbt). Dies erhöht die Lärmkosten um weniger als 0.1%.
- **Anpassung an örtliche Gegebenheiten:** Auf eine Anpassung an örtliche Gegebenheiten (Mietpreisniveau) wird neu vereinfachend verzichtet.
- **Preisanpassung:** Damit erfolgt auch die Preisanpassung neu nur noch über das Nominallohnwachstum (und nicht mehr über das Mietpreisniveau).
- **Veränderung über die Zeit:** Die Anpassung der Kostensätze über die Zeit wurde ebenfalls an die aktuellen Gegebenheiten angepasst. Bisher wurde von einer realen Zunahme von 0.3% ausgegangen (in der das Reallohnwachstum enthalten ist). Neu wird eine reale Zunahme von 0.15% unterstellt, zu der zusätzlich das Verkehrs- und Reallohnwachstum zu addieren ist. Damit kann neu das Reallohnwachstum im Rahmen der Sensitivität wie bei allen anderen betroffenen Indikatoren variiert werden. Zudem wird das Verkehrswachstum neu mitberücksichtigt.
- **Aktuelle Datengrundlagen:** Generell wurden alle benötigten Inputdaten (wie Preisstand, Bevölkerungsgrösse, Anzahl belärmte Wohnungen, Wohnungspreise, Krankheitshäufigkeiten in der Bevölkerung etc.) auf 2015 aktualisiert.
- Auch die **vereinfachte Methode** (Lärmkosten pro Fzkm) wurde aktualisiert, wobei alle oben erwähnten Anpassungen auch hier einfließen.

Die folgende Tabelle fasst die bisherigen und die überarbeiteten Kostensätze und Schwellenwerte zusammen. Auf den ersten Blick mag dies nach tieferen Lärmkosten als bisher aussehen, da die Kostensätze geringer sind. Da jedoch gleichzeitig die Schwellenwerte und die Lärmmasse angepasst wurden, führen die neuen Kostensätze für den Strassenverkehr in der Schweiz im Jahr 2015 zu Kosten von 2'089 Mio. CHF. Im Vergleich dazu führten die alten Kostensätze für das Jahr 2005 nur zu gut halb so hohen Lärmkosten für den Strassenverkehr in der Schweiz (1'101 Mio. CHF⁷³). Allerdings hat sich auch die Lärmbelastung zwischen 2005 und 2015 verändert.

Mit der neuen Methodik werden also Effekte bei tiefen Lärmniveaus neu mitberücksichtigt, Verschiebungen auf hohen Lärmniveaus werden hingegen tiefer bewertet als bisher. Wie sich dies auf die Bewertung einzelner Projekte auswirkt, hängt vom betrachteten Projekt ab. Generell sind aber höher Lärmkosten als bisher zu erwarten.

Tab. 9 Kostensätze und Schwellenwerte gemäss bisheriger bzw. überarbeiteter SN 641 828

	Bisherige SN 641 828		Überarbeitete SN 641 828	
	Kostensatz	Schwellenwert	Kostensatz	Schwellenwert
Reduktion Wohnungspreise (in CHF pro Jahr, Wohnung und dB(A))	89.50	55 dB(A) Taglärm	42.07	0 dB(A) ZKB-Lärmass ¹
Bluthochdruck bedingte Krankheiten (in CHF pro Jahr, Person und dB(A))	16.72	57 dB(A) Taglärm	5.65	48 dB(A) L _{DEN}
Ischämische Herzkrankheiten (in CHF pro Jahr, Person und dB(A))	19.14	65 dB(A) Taglärm	9.11	48 dB(A) L _{DEN}
Schlaganfall (in CHF pro Jahr, Person und dB(A))	nicht berücksichtigt		1.02	48 dB(A) L _{DEN}

¹ Anzahl Dezibel über 40 dB(A) Nachtlärm bzw. falls Nachtlärm unter 40 dB(A), Anzahl dB(A) über 50 dB(A) Taglärm.

⁷² Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 290.

⁷³ Ecoplan, Infras (2008), Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten, S. 133.

3 Luftverschmutzung

3.1 Einleitung

3.1.1 Durchschnittskosten oder Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten

Um die Kosten der Luftverschmutzung abzuschätzen, wird meist der Ursachen-Wirkungsketten-Ansatz (impact pathway approach) verwendet (vgl. *Abb.2*): Die Emissionen werden durch den Wind transportiert und führen zu Immissionen. Die Immissionen führen zu Schäden (z.B. an der Gesundheit oder an Gebäuden). Diese Schäden können wiederum in Kosten umgerechnet werden.



Abb.2 Der Ursachen-Wirkungsketten-Ansatz

Eine wesentliche **Grundsatzfrage** für die Umsetzung dieses Ansatzes in der vorliegenden Norm ist, ob bei der Ermittlung der Kosten über den Ursachen-Wirkungsketten-Ansatz jeweils **Durchschnittswerte** verwendet werden sollen **oder** ob auf **lokale Gegebenheiten** Rücksicht genommen wird:

- Emissionen: Unterschiedliche Geschwindigkeiten (zumindest Autobahn, ausserorts, innerorts) und Steigungen führen z.B. zu lokal unterschiedlichen Emissionen.
- Immissionen: Je nach Bevölkerungsdichte und je nach Windrichtungen und -geschwindigkeiten (sowie nach anderen meteorologischen Effekten) führen dieselben Emissionen nicht zu denselben Immissionen.
- Schäden: Dieselbe Schadstoffkonzentration (Immission pro Person oder Gebäude) führt überall zu denselben Gesundheits- oder Gebäudeschäden.
- Kosten: Die Schäden z.B. an Gesundheit oder Gebäuden führen überall zu denselben Kosten.

Bei den Schäden und Kosten ist eine Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten also nicht nötig. **Die Frage nach der Berücksichtigung der lokalen Begebenheiten bezieht sich somit nur auf die Emissionen und Immissionen.**

a) Differenzierung der Emissionen

Ohne jegliche Differenzierung nach lokalen Gegebenheiten resultiert eine Methodik, in welcher die Kosten der Luftverschmutzung über einen durchschnittlichen Kostensatz pro Fahrzeugkilometer (Fzkm) berechnet werden (vgl. Methode A in *Abb.3*). Alternativ können – ebenfalls von den Fzkm ausgehend – mit dem Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA⁷⁴ die lokalen Schadstoffemissionen in Abhängigkeit z.B. der Geschwindigkeit ermittelt und diese dann mit einem durchschnittlichen Kostensatz pro Tonne Schadstoff monetarisiert werden (vgl. Methode B in *Abb.3*).

Wird ein durchschnittlicher Kostensatz pro Fzkm (Methode A) verwendet, wird für die gesamte Ursachen-Wirkungskette eine Durchschnittsbetrachtung unterstellt. Wird hingegen ein Kostensatz pro Tonne Schadstoff verwendet (Methode B), erlaubt dies, bei den Emissionen auf lokale Gegebenheiten (wie Geschwindigkeit, Steigung) einzugehen, doch wird bei den Immissionen (sowie bei den Schäden und Kosten) weiterhin eine Durchschnittsbetrachtung unterstellt.

Diese beiden Methoden A und B haben den Vorteil, dass sie sehr einfach sind und keine besonderen projektspezifischen Inputdaten benötigen: Es muss einzig die Veränderung

⁷⁴ Infrac (2017), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA.

der Fzkm zur Verfügung stehen, die sich bei Verwendung eines Verkehrsmodells automatisch ergibt, sowie für die Methode B noch Emissionsfaktoren pro Fzkm (differenziert nach verschiedenen Streckentypen).

	Emissionen	Immissionen	Schäden	Kosten
Methode A: Kostensatz pro Fzkm	keine Differenzierung nach lokalen Gegebenheiten			
Methode B: Kostensatz pro t Emissionen	lokale Gegebenheiten (Steigung, Geschwindigkeit)	keine weitere Differenzierung		
Methode C: Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten (bei den Emissionen und Immissionen)	lokale Gegebenheiten (Steigung, Geschwindigkeit)	Differenzierung für Schäden durch lokale Schadstoffe (z.B. nach Bevölkerungsdichte, Windverhältnissen usw.)	keine weitere Differenzierung	
		Keine Differenzierung für Schäden durch regionale Schadstoffe		

Abb.3 Mögliche Ansätze der lokalen Differenzierung

b) Differenzierung der Immissionen

Diese einfachen Methoden A und B führen aber dazu, dass Emissionen mitten im Stadtzentrum bzw. auf der grünen Wiese gleich behandelt werden. Dabei wird vernachlässigt, dass der Ort der Emission sehr wohl eine wichtige Rolle für die dadurch entstehenden **Immissionen** (bzw. Kosten) spielt. Denn es ist entscheidend, ob am Ort der Immission viele Menschen wohnen (Gesundheitskosten) und damit auch viele Gebäude stehen (Gebäudeschäden) oder nicht.

Zudem könnte eine Vernachlässigung des Ortes der Immissionen dazu führen, dass die Auswirkungen eines Projektes auf die Luftqualität völlig falsch eingeschätzt werden: Wird z.B. eine Umfahrungsstrasse gebaut, so kann diese länger sein als die bisherige Strasse durch den Ort hindurch, so dass höhere Emissionen zu verzeichnen sind. Wird in einem solchen Fall ein konstanter Kostensatz pro Emission angewendet, bedeutet dies, dass das Projekt mit zusätzlichen Luftbelastungskosten verbunden ist. Tatsächlich führt das Projekt jedoch zu einer Entlastung im Wohngebiet und zu einer Mehrbelastung auf der grünen Wiese, wo die lokalen Schäden viel geringer sind. Die Bewertung muss diese Unterschiede abbilden können, d.h. sie muss den Ort der Immissionen berücksichtigen. Würde darauf verzichtet, könnte die Bewertung möglicherweise das falsche Vorzeichen ausweisen.

c) Fazit: Differenzierte Berücksichtigung der lokalen Begebenheiten

Aufgrund der vorangehenden Überlegungen **empfehlen wir** wie bisher⁷⁵ die detaillierte **Methode C** in *Abb.3* zu verwenden. Dabei ist es auch wichtig, dass zwischen lokalen und regionalen Schadstoffen differenziert wird, d.h. zwischen Schadstoffen, die lokale Schäden verursachen und für welche die Beachtung des Emissionsortes relevant ist, und Schadstoffen, die über weite Distanzen transportiert werden, bevor sie einen Schaden verursachen (für Details siehe Kapitel 3.1.3) und für welche der Emissionsort keine Rolle spielt.⁷⁶

- **Emissionsseitig** werden sowohl bei den regionalen wie auch bei den lokalen Schadstoffen die für die Emissionsmenge relevanten Begebenheiten (Geschwindigkeit, Steigung) am Ort der Emissionentstehung berücksichtigt.
- **Immissionsseitig** ist eine Berücksichtigung der lokalen Begebenheiten (z.B. Bevölkerungsdichte) nur bei lokalen Schadstoffen sinnvoll. Bei regionalen Schadstoffen lässt sich aufgrund der weiten Verfrachtungen nicht bestimmen, wo genau sie sich als Immissionen niederschlagen, entsprechend sind auch die relevanten Begebenheiten am Ort der Immission nicht bekannt.

⁷⁵ Ecoplan (2007), Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse, Kapitel 3 bzw. bisherige SN 641 828.

⁷⁶ Die globalen Schadstoffe, d.h. die Klimagase, werden in Kapitel 4 behandelt.

3.1.2 Berücksichtigte Effekte

Folgende Kostenbestandteile der Luftverschmutzung sind zu berücksichtigen:

- **Gesundheitsschäden:** Luftschadstoffe können zu Krankheits- und Todesfällen führen.
- **Gebäudeschäden:** Luftschadstoffe können zur Folge haben, dass Gebäude häufiger renoviert und gereinigt werden müssen.
- **Vegetationsschäden:** Die Vegetationsschäden beinhalten Ernteauffälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste sowie die Beeinträchtigung der Bodenqualität.

Die folgende Tabelle enthält die durchschnittlichen Kostensätze im schweizerischen Strassenverkehr für die Methode A (Kostensatz pro Fzkm, vgl. Abb.3) und zeigt damit die Gröszenordnung der verschiedenen Kostenbereiche auf: Die Gesundheitskosten sind im Strassenverkehr für 83% der Kosten verantwortlich, die Gebäudeschäden für weitere 6%. Auf die Bodenqualität sowie auf Biodiversitätsverluste entfallen je ca. 3.5% der Kosten. Ernteauffälle und Waldschäden verursachen Kosten von je ca. 1.5% der gesamten Kosten der Luftbelastung. Wie die Werte in Tab. 10 ermittelt wurden, wird in der folgenden Box erläutert.

Tab. 10 Durchschnittliche Kosten der Luftbelastung im Strassenverkehr im Jahr 2015 in Rp / Fzkm

Rp / Fzkm	Personenverkehr					Güterverkehr			Total	Anteil
	PW	Bus	Car	MZ	Total	Li	SNF	Total		
Gesundheitskosten	3.70	41.45	31.65	0.74	3.80	5.52	22.91	12.27	4.60	83.3%
Gebäudeschäden	0.28	3.12	2.38	0.06	0.29	0.42	1.72	0.92	0.35	6.3%
Ernteauffälle	0.06	1.29	1.07	0.02	0.07	0.17	0.55	0.30	0.09	1.7%
Waldschäden	0.06	1.12	0.93	0.02	0.06	0.15	0.47	0.26	0.08	1.5%
Biodiversitätsverluste	0.14	2.05	1.69	0.03	0.15	0.28	0.87	0.49	0.18	3.3%
Bodenqualität	0.12	2.13	2.11	0.06	0.14	0.33	2.10	0.95	0.22	3.9%
Total	4.37	51.16	39.83	0.93	4.50	6.86	28.62	15.20	5.52	100.0%

PW = Personenwagen, Bus = Linienbus ÖV (ohne Trolleybusse), Car = Privatcar, MZ = Motorisierte Zweiräder (Motorräder und Mofas), Li = Lieferwagen, SNF = Schwere Nutzfahrzeuge.

Quelle: Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

Berechnungsmethode

Die Gesundheitskosten in Tab. 10 wurden wie folgt ermittelt:⁷⁷

- Aufgrund der Fzkm und der Emissionsfaktoren pro Fzkm werden die Emissionen des Strassenverkehrs ermittelt.
- Diese werden mit einem Schadstoff-Ausbreitungsmodell in Immissionen umgerechnet und zu einer Immissionskarte (200x200 m Raster) zusammengefasst.⁷⁸ Aus der Überlagerung von Immissions- und Einwohnerkarte kann die Schadstoffexposition der Bevölkerung bestimmt werden.
- Über epidemiologische Studien wird anschliessend ermittelt, wie viele zusätzliche Krankheits- und Todesfälle die Luftverschmutzung verursacht.
- Diese Krankheits- und Todesfälle werden mit Kostensätzen pro Krankheitsbild monetarisiert.
- Um Kosten pro Fzkm zu erhalten, werden die gesamten Kosten durch die Fzkm dividiert.

Für die Bewertung der Gesundheitsschäden durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung wurde also dasselbe Verfahren angewendet wie bei den lärmbedingten Gesundheitskosten. Ähnliche Methoden wurden auch zur Bestimmung der Gebäude- und Vegetationsschäden verwendet.

⁷⁷ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015 und Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010.

⁷⁸ BAFU (2013), PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland, S. 9.

3.1.3 Lokale und regionale Schadstoffe

Im Folgenden diskutieren wir zuerst, welche Schadstoffe verwendet wurden, um die Schäden der Luftverschmutzung in der Schweiz zu monetarisieren. Diese Erläuterung erfolgt anhand der Studie Infrac, Ecoplan (2019), die im Auftrag des ARE erarbeitet wurde und als Grundlage zur Bestimmung der luftverschmutzungsbedingten Kosten im Rahmen der vorliegenden Norm dient.⁷⁹ Die nachstehende Zusammenstellung in *Tab. 11* zeigt, welche Kostenbereiche in dieser Studie basierend auf welchen Luftschadstoffen ermittelt wurden:^{80, 81}

- **Gesundheitskosten:** In der Schweiz werden die Gesundheitskosten über den Leitschadstoff PM₁₀ (Partikel mit einem Durchmesser von höchstens 10 µm) ermittelt. In epidemiologischen Studien zeigte sich, dass PM₁₀ eine sehr gute Korrelation mit der Auftretenshäufigkeit verschiedener Gesundheitsprobleme hat.
- **Gebäudeschäden:** Auch die Gebäudeschäden werden in der Schweiz über den Leitschadstoff PM₁₀ bestimmt.
- **Ernteauffälle:** Die Ernteauffälle werden über die Ozonkonzentration quantifiziert, die das Wachstum verschiedener Nutzpflanzen reduziert. Dabei wird der sogenannte AOT40c-Wert verwendet.⁸²

Tab. 11 Übersicht über Luftschadstoffe, die zur Monetarisierung verwendet wurden

	Quantifizierung über	Davon Schadstoffe mit lokalen Effekten
Gesundheitskosten	PM ₁₀	Primäres PM ₁₀ aus Schweizer Quellen
Gebäudeschäden	PM ₁₀	Primäres PM ₁₀
Ernteauffälle	Ozon	keine
Waldschäden	Ozon, Bodenversauerung	keine
Biodiversitätsverluste	NO _x , NH ₃ , SO ₂	keine
Bodenqualität	Zink	Zink

⁷⁹ Für einen Vergleich mit Vorgaben auf EU-Ebene (HEATCO und ExternE) siehe Ecoplan (2006), Environmental costs in sensitive areas, S. 21 – 23.

⁸⁰ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015 bzw. Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010.

⁸¹ Bei der nachstehenden Aufzählung zu den berücksichtigten Luftschadstoffen in den einzelnen Kostenbereichen stellt sich aufgrund einer aktuellen Publikation in der Tagespresse (Sonntagszeitung vom 16.6.2019, Die grösste Quelle von Mikroplastik) die Frage, inwieweit die Verunreinigung durch Mikroplastik in den vorgestellten Ergebnissen enthalten ist. Beim Mikroplastik handelt es sich um Kunststoffpartikel mit weniger als 5 mm Durchmesser. Der grösste Teil des Mikroplastik (knapp ein Drittel der Mikroplastik-Emissionen) stammt aus dem Strassenverkehr und entsteht beim Abrieb der Autoreifen. In Bezug auf die Berücksichtigung der Folgekosten in der erwähnten ARE-Studie lässt sich Folgendes festhalten:

- Rund die Hälfte des Mikroplastiks gelangt in den Boden (gemäss einer europäischen Studie von 2018). Die nachstehend betrachteten Schäden an der Bodenqualität wurden über den Ansatz von Sanierungskosten quantifiziert. Bei diesem Ansatz wird nicht von einem einzelnen Schadstoff ausgegangen, sondern von den gesamten Sanierungskosten für die Entsorgung von schadstoffbelastetem Boden und dessen Ersatz.
- Bei den gesundheitlichen Folgen und Gebäudeschäden werden die Folgen der Luftverschmutzung über den Leitschadstoff PM₁₀ quantifiziert. Die Belastung durch den Mikroplastik ist darin enthalten, sofern die Kunststoffpartikel unter 10 µm (= 0.01 mm) gross sind. Grössere Kunststoffpartikel sind nicht erfasst, stellen aber mindestens für die menschliche Gesundheit nicht die gleiche Gefährdung dar.
- Bei den Ernteauffällen, Waldschäden und Biodiversitätsverlusten sind die Schäden durch Mikroplastik nicht explizit enthalten. Unklar ist wie bedeutsam sie in diesen Kostenbereichen sind.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Thematik der Luftverschmutzung durch Mikroplastik noch nicht explizit in die bisherigen ARE-Studien zu den externen Kosten des Verkehrs eingeflossen ist. Die gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen des Mikroplastik sind weitgehend noch nicht in einer Art und Weise erforscht, welche eine explizite Quantifizierung und Monetarisierung der dadurch verursachten Schäden zulassen würde.

⁸² Der AOT40c Wert misst die akkumulierte Ozondosis über einem Schwellenwert von 40 ppb (parts per billion) während der Wachstumsphase der Kulturpflanzen (1. Mai bis 31 Juli). AOT steht für „accumulated exposure over threshold“ und „c“ für „crop“ (Infrac 2006, Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000. Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse, S. 58 und 154).

- **Waldschäden:** Waldschäden werden teilweise von Ozon (AOT40f) verursacht (geringe Holzernte) und teilweise über die Bodenversauerung durch sauren Regen (geringere Holzernte und höheres Risiko von Sturmschäden).⁸³
- **Biodiversitätsverluste:** Der Eintrag der Schadstoffe Stickoxid (NO_x), Ammoniak (NH₃) und Schwefeldioxid (SO₂) führt zur Überdüngung (Eutrophierung) bzw. Versauerung von Böden und Gewässern. Beides hat einen negativen Einfluss auf die Biodiversität.⁸⁴
- **Bodenqualität:** Im Strassenverkehr werden die Schäden an der Bodenqualität über den Leitschadstoff Zink quantifiziert. Mitberücksichtigt werden dabei auch die Auswirkungen anderer Schwermetalle sowie von PAK (polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe, die in Verbrennungsprozessen entstehen).⁸⁵

Gewisse Schäden werden durch Schadstoffe verursacht, die über weite Strecken transportiert werden, bevor sie den Schaden auslösen. Solche Schadstoffe nennen wir **regionale Schadstoffe**. Ein Beispiel dafür ist Ozon, das sich zuerst aus Vorläufersubstanzen bilden muss und vor und nach der Umwandlung in Ozon mit Winden verfrachtet wird. Bei solchen, über weite Strecken transportierten Schadstoffen ist wie erwähnt eine Berücksichtigung von lokalen Begebenheiten am Ort der Immission wenig sinnvoll, es **genügt** daher eine Berücksichtigung der **lokalen Begebenheiten am Ort der Emission** (Kostensatz pro t Emissionen).

Relevant ist die Berücksichtigung lokaler Begebenheiten sowohl emissions- wie auch immissionsseitig nur für **lokale Schadstoffe**, deren Schaden in unmittelbarer Nähe des Emissionsortes anfällt.

Im Folgenden wird für die in *Tab. 11* angeführten Kostenbereiche untersucht, ob aufgrund der Schadstoffe sowohl eine emissions- wie auch immissionsseitige Differenzierung vorgenommen werden muss oder ob sich die Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten auf den Ort der Emissionen beschränken kann.

a) Vegetationsschäden

Ernteauffälle und Waldschäden werden durch Ozon und sauren Regen verursacht (vgl. auch *Abb. 4*). Beides sind regionale Schadstoffe, so dass für diese Schäden der Ort der Emission für die Höhe der Immissionen keine entscheidende Rolle spielt. Für Ernteauffälle und Waldschäden genügt es also nur bei den Emissionen die lokalen Begebenheiten zu berücksichtigen, bei den Immissionen ist dies nicht erforderlich.

	Schadstoffausbreitung der Leitschadstoffe	
	lokal	regional
Vegetationsschäden	0%	100%
Ernteauffälle		Ozon (AOT40c)
Waldschäden		Ozon (AOT40f) Bodenversauerung / Saurer Regen
Biodiversitätsverluste		NO _x , NH ₃ und SO ₂
Bodenqualität	Zink	Berechnungsmethode der Schäden jedoch überall gleich (Reparaturkosten)

Abb. 4 Aufteilung der Vegetationsschäden auf lokale und regionale Schäden

⁸³ AOT40f ist ein Ozonwert, der während der Wachstumsphase der Wälder („f“ für „forest“) vom 1. April bis 30. September ermittelt wird (Infras 2006, Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000. Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse, S. 74 und 154).

⁸⁴ Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 222.

⁸⁵ Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 357.

Die Biodiversitätsverluste werden durch die regionalen Schadstoffe NO_x , NH_3 und SO_2 verursacht, d.h. die Schäden treten nicht am Emissionsort auf, sondern erst nachdem die Schadstoffe über möglicherweise weite Strecken transportiert wurden (z.B. saurer Regen). Auch hier sind nur bei den Emissionen die lokalen Begebenheiten zu beachten.

Die Schäden für die Bodenqualität werden über einen Reparaturkostenansatz monetarisiert, d.h. die Kosten für die Sanierung der mit Schwermetallen und PAK verschmutzten Böden dienen als Grundlage für die Monetarisierung.⁸⁶ Da die Kosten der Sanierung überall in der Schweiz als gleich angenommen wurden, ist eine Differenzierung nach dem Immissionsort gar nicht möglich. Somit genügt auch für die Schäden an der Bodenqualität eine emissionsseitige Differenzierung.

Als erste **Schlussfolgerung** ergibt sich somit: Bei den **Vegetationsschäden** reicht eine emissionsseitige Berücksichtigung der lokalen Begebenheiten für die Monetarisierung, auf die immissionsseitige Differenzierung kann verzichtet werden (vgl. *Abb.4*). Damit kann ein Kostensatz pro Tonne Emissionen hergeleitet werden.

b) Gesundheitskosten

Für den Umgang mit den lokalen Begebenheiten bei den Gesundheitskosten ist bedeutsam, dass sich PM_{10} aus **primärem und sekundärem PM_{10}** zusammensetzt: Primäres PM_{10} wird direkt als PM_{10} ausgestossen. Sekundäres PM_{10} bildet sich erst in der Luft durch die Reaktion zwischen den Vorläufersubstanzen Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH_3), Schwefeldioxid (SO_2) und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMVOC).⁸⁷ **Sekundäres PM_{10}** wird über grössere Distanzen transportiert und ist somit ein **regionaler Schadstoff**, dessen Schäden ausschliesslich bei der Bestimmung der Höhe der Emissionen eine lokale Differenzierung erfordern.

Zudem ist zu beachten, dass auch die ausländischen Emissionen von primärem PM_{10} über grössere Distanzen transportiert werden. Analog verursacht auch das primäre PM_{10} aus der Schweiz nicht nur lokale Schäden, sondern auch regionale. Aus den vorhandenen Daten ist es jedoch nicht möglich, zu bestimmen, wie sich die Schäden durch primäres PM_{10} auf lokale und regionale Schäden aufteilen. Ebenso ist zu bedenken, dass auch sekundäres PM_{10} teilweise zu lokalen Schäden führt, was ebenfalls nicht quantifiziert werden kann. Vereinfachend wird deshalb wie in Ecoplan (2007, S. 41-42) Folgendes angenommen:

- Die primären PM_{10} -Immissionen aus Schweizer Quellen stellen einen lokalen Schadstoff dar und es sind daher sowohl emissions- wie auch immissionsseitig die relevanten lokalen Begebenheiten zu berücksichtigen.
- Die primären PM_{10} -Immissionen aus dem Ausland sowie alle sekundären PM_{10} -Immissionen werden als regionale Schadstoffe betrachtet, bei diesen erfolgt keine Differenzierung nach dem Ort der Immission.

Für die Quantifizierung verwenden wir die bisherigen Daten aus Ecoplan (2007).⁸⁸ Diese basieren auf dem Schadstoffausbreitungsmodell, das auch für die Ermittlung der Kosten

⁸⁶ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 357.

⁸⁷ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 127, Ecoplan (2006), Environmental costs in sensitive areas, S. 39 und BAFU (2013), PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ ambient concentrations in Switzerland, S. 43.

⁸⁸ Eine Aktualisierung dieser Daten wäre mit grossem Aufwand verbunden. Gleichzeitig ist aber davon auszugehen, dass sich das Ergebnis durch die Aktualisierung nur geringfügig ändern wird (dies zeigen einerseits die publizierten Zahlen für 2000, 2005, 2010 und 2020 in BAFU (2013, PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ ambient concentrations in Switzerland, S. 66) und BUWAL (2003, Modelling of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010) und andererseits ein Gespräch mit den Experten von Infrac (12.3.2019)). Zudem erscheint eine Aktualisierung im jetzigen Zeitpunkt wenig zielführend, da momentan eine Überarbeitung des Schadstoffausbreitungsmodells in Bearbeitung ist, die aber erst nach Abschluss der vorliegenden Arbeiten beendet wird. Dabei wird das Raster um den Faktor 100 verfeinert (bisher 200m x 200m, neu 20m x 20m). Dadurch könnten sich die Ergebnisse für den Strassenverkehr deutlich ändern. Bei der nächsten Überarbeitung des vorliegenden Berichtes bzw. der SN 641 828 sollte eine Aktualisierung der *Tab. 12* deshalb vorgesehen werden.

der Luftverschmutzung verwendet wurde. Für Ecoplan (2007) wurde eine Spezialauswertung durchgeführt, um die Schadstoffimmissionen, die durch den Strassenverkehr verursacht werden, genauer zu analysieren. Die folgende Tabelle zeigt, wie sich die Exposition der Bevölkerung durch den Strassenverkehr von durchschnittlich $4.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zusammensetzt. Der Anteil der Immissionen, die auf primären PM_{10} -Emissionen aus der Schweiz beruhen, beträgt 41.7%.

Folglich sind **41.7% der luftverschmutzungsbedingten Gesundheitskosten** lokale Schäden, die unter Berücksichtigung der lokalen Begebenheiten bei Emissionen und Immissionen zu differenzieren sind (vgl. auch *Abb.5*). Die **übrigen 58.3%** sind regionale Schäden, die über einen Kostensatz pro t Emissionen monetarisiert werden können. Die emittierte Menge pro Fzkm ist dabei abhängig von den lokalen Begebenheiten am Ort der Emission.

Tab. 12 Durchschnittliche PM_{10} -Bevölkerungsexposition in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (bzw. in Prozent) durch den Strassenverkehr im Jahr 2000

Quelle	Primäres PM_{10}		Sekundäres PM_{10}		PM_{10} total	
Strassenverkehr, Schweiz	1.76	41.7%	0.92	21.7%	2.67	63.4%
Strassenverkehr, Ausland	0.76	18.1%	0.78	18.6%	1.54	36.6%
Total	2.52	59.7%	1.70	40.3%	4.22	100.0%

Quelle: Berechnung durch Infrac und Meteotest basierend auf Ecoplan et al. (2004), Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung (das wiederum auf BUWAL (2003), Modelling of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ ambient Concentrations in Switzerland 2000 and 2010, S. 66 basiert).

	Schadstoffausbreitung der Leitschadstoffe	
	lokal	regional
Gesundheitsschäden	Primäres PM_{10} aus Schweizer Quellen	Sekundäres PM_{10} und primäres PM_{10} aus ausländischen Quellen
	41.7%	58.3%

Abb.5 Aufteilung der Gesundheitskosten auf lokale und regionale Kosten

c) Gebäudeschäden

Die Gebäudeschäden teilen sich in folgende Kostenkomponenten auf:⁸⁹

- Kosten durch **verkürzte Renovationszyklen** an verkehrsexponierten Standorten: Diese Kosten werden aus Unterschieden in den Renovationszyklen an Verkehrshauptachsen im Vergleich zu Nebenstrassen hergeleitet. Dabei werden nur die Emissionen von primärem PM_{10} berücksichtigt.⁹⁰ Des Weiteren wird festgestellt, dass an Orten mit hohen Konzentrationen (über $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) die Renovationskosten um 0.5% höher liegen als an weniger belasteten Gebieten. Dabei wird primäres und sekundäres PM_{10} miteinbezogen.⁹¹ Das Mengengerüst beruht auf den verkehrsexponierten Standorten (über primäres PM_{10} berücksichtigt), nur das Wertgerüst wird auch über sekundäres PM_{10} bestimmt. Deshalb gehen wir davon aus, dass die gesamten zusätzlichen Renovationskosten als **lokale Schäden** betrachtet werden können, so dass diese Schäden sowohl von relevanten emissions- (z.B. Geschwindigkeit) wie auch immissionsseitigen Begebenheiten (bebautes / nicht bebautes Gebiet) abhängen.

⁸⁹ Infrac, Wüest & Partner (2004), Verkehrsbedingte Gebäudeschäden, S. 4 – 7, 38 – 44 und 73 – 75 bzw. Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 169 – 172.

⁹⁰ Infrac, Wüest & Partner (2004), Verkehrsbedingte Gebäudeschäden, S. 54.

⁹¹ Infrac, Wüest & Partner (2004), Verkehrsbedingte Gebäudeschäden, S. 44.

- Kosten durch **Verkürzung der Lebensdauer der Gebäudehülle** an nicht verkehrsexponierten Standorten: Auch abseits der Hauptverkehrsachsen treten Schäden durch die Luftverschmutzung auf. Diese Kosten werden bestimmt, indem der Zustand der Gebäudefassade mit der Schadstoffbelastung (und dem Alter des Gebäudes) verglichen wird.⁹² Diese Kosten werden somit über die PM₁₀-Immissionen ermittelt, also über primäres und sekundäres PM₁₀. Berücksichtigt werden jedoch nur Schäden, die abseits der Hauptverkehrsachsen auftreten. Damit handelt es sich um **regionale Schäden**.
- Zusätzliche Kosten für **Fensterreinigungen** an Geschäfts- und Verwaltungsgebäuden: Die Luftverschmutzung führt schliesslich an verkehrsexponierten Standorten auch dazu, dass Gebäudefassaden (vor allem Fenster) häufiger gereinigt werden müssen. Die verkehrsexponierten Standorte werden wiederum über die Emissionen von primärem PM₁₀ bestimmt. Damit handelt es sich um **lokale Schäden**.

Tab. 13 Gebäudeschäden in der Schweiz im Jahr 2000 in Mio. CHF

	Schäden	Mio. CHF
Verkürzte Renovationszyklen	lokal	152.6
Verkürzung Lebensdauer Gebäudehülle	regional	7.4
Fensterreinigung	lokal	55.7
Total		215.7
Anteil regionale Schäden		3.4%
Anteil lokale Schäden		96.6%

Die Tab. 13 fasst die Ergebnisse der Studie zu den Gebäudeschäden zusammen. Es zeigt sich, dass nur gut **3% der Schäden durch regionale Schadstoffe** verursacht werden (vgl. auch Abb. 6) und deshalb über einen Kostensatz pro t Emissionen bewertet werden können und auf eine Berücksichtigung der lokalen Begebenheiten am Ort der Immissionen verzichtet werden kann. Im Vergleich zu den bisherigen Berechnungen, ist dieser Anteil stark gesunken, in Ecoplan (2007⁹³) war er noch 29%. Die starke Abnahme ist auf sinkende PM₁₀-Immissionen zurückzuführen.

	Schadstoffausbreitung der Leitschadstoffe	
	lokal	regional
Gebäudeschäden	96.6%	3.4%
Verkürzung Renovationszyklen an verkehrsexponierten Standorten	Lokale Schäden	
Verkürzung Lebensdauer Gebäudehüllen an nicht verkehrsexponierten Standorten		Regionale Schäden
Fensterreinigung an verkehrsexponierten Standorten	Lokale Schäden	

Abb. 6 Aufteilung der Gebäudeschäden auf lokale und regionale Schäden

⁹² Infrac, Wüest & Partner (2004), Verkehrsbedingte Gebäudeschäden, S. 39 und 65.

⁹³ Ecoplan (2007), Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse, S. 43.

d) Zusammenfassung

Aus den vorangehenden Erläuterungen geht hervor, dass selbst bei einer Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten (Methode C in *Abb.3*) folgende Kostenbestandteile über einen **durchschnittlichen Kostensatz pro Tonne Schadstoff** (Methode B in *Abb.3*, ohne Differenzierung nach den lokalen Begebenheiten am Ort der Immission) quantifiziert werden können:

- 58% der Gesundheitskosten
- 3.4% der Gebäudeschäden
- Die gesamten Vegetationsschäden (Ernteauffälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste und Bodenqualität)

Für die übrigen 41% der Kosten⁹⁴ sind die lokalen Gegebenheiten sowohl emissions- wie auch immissionsseitig gemäss der Methode C in *Abb.3* zu berücksichtigen. Für diesen detaillierten Bewertungsansatz sind folgende Schritte notwendig:

- Ermittlung der Veränderung der Fzkm durch das Projekt (vgl. Kapitel 3.2.1)
- Umrechnung der veränderten Fzkm in veränderte Schadstoffemissionen (mittels Emissionsfaktoren, vgl. Kapitel 3.2.2 und Kapitel 3.2.3)
- Monetarisierung mit den Kostensätzen pro Tonne Schadstoff (vgl. Kapitel 3.3.2), differenziert nach dem Ort der Emissionen (vgl. Kapitel 3.3.3).

3.2 Mengengerüst

3.2.1 Benötigte Inputdaten

Als projektabhängige Inputdaten werden die **Veränderungen der Fahrzeugkilometer** benötigt. Die Fahrzeugkilometer sind zu differenzieren **nach Autobahnen, Ausserorts- und Innerortsstrassen**. Aufgrund der teilweise bedeutenden Unterschiede bei den Emissionsfaktoren⁹⁵ auf diesen Strassentypen – vor allem bei Abrieb und Aufwirbelung – ist diese Differenzierung sinnvoll. Sie kann mit den gängigen Verkehrsmodellen ohne Probleme umgesetzt werden.

Je nach Möglichkeit sind die Fzkm zudem

- nach den sechs in *Tab. 10* erwähnten Fahrzeugkategorien (PW, Bus, Car, motorisierte Zweiräder, Lieferwagen, schwere Nutzfahrzeuge⁹⁶) zu differenzieren oder
- nach Personen- und Güterverkehr zu unterscheiden oder
- für den Gesamtverkehr zu erheben.

Mit dem Verkehrsmodell ist eine Auswertung für all diese Fahrzeugkategorien meist nicht direkt möglich. Die Ergebnisse für die Fahrzeugkategorie «Personenwagen» im Verkehrsmodell können aber mit Schweizer Durchschnittswerten oder lokalen Daten auf Personenwagen und motorisierte Zweiräder aufgeteilt werden. In analoger Weise können die Fzkm der schweren Fahrzeuge auf schwere Nutzfahrzeuge und Cars aufgeteilt werden (vgl. dazu Ecoplan, Transoptima 2018, S. 34 bzw. SN 641 820).

Des Weiteren ist zu beachten, dass während der **Bauphase Umwegfahrten** (Umleitungen) nötig sein können, welche die Fahrtstrecke und damit die Schadstoffemissionen erhöhen. Auch für allfällige Umwegfahrten sind also die zusätzlichen Fzkm zu erheben. Dies kann auch grob erfolgen.

⁹⁴ 42% der Gesundheitskosten oder 1.93 Rp / Fzkm im Gesamtverkehr (vgl. *Tab. 10*) und 97% der Gebäudeschäden oder 0.33 Rp / Fzkm – d.h. insgesamt 41% der Kosten der Luftverschmutzung oder 2.25 Rp / Fzkm.

⁹⁵ Infrac (2017), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 3.3.

⁹⁶ Dies sind die Fahrzeugkategorien in NISTRA – vgl. Ecoplan (2018), Handbuch NISTRA 2017, NISTRA – Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte.

In der bisherigen SN 641 828 wurden auch **Emissionen** von Schadstoffen **durch den Bau** (z.B. Baumaschinen, Beförderung von Baumaterial zur Baustelle) bewertet. Grobe Berechnungen hatten damals gezeigt, dass die Bauemissionen bedeutend sein können:⁹⁷ In einer Beispielrechnung zeigt sich, dass es mehr als 70 Jahre dauern kann, bis die zusätzlichen Emissionen während der Betriebsphase gleich gross sind wie die Emissionen während der Bauphase. An diesen Verhältnissen hat sich zwischenzeitlich nichts Grundsätzliches geändert, daher sollen auch in der aktuellen Norm die Bauemissionen weiterhin berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Bauemissionen wählen wir wie bisher eine sehr einfache Methode: Sie werden über einen groben Faktor aus der Höhe der Investitionskosten abgeschätzt (siehe *Tab. 15* und Erläuterungen dazu unten). Entsprechend werden als Inputdaten auch die Investitionskosten des betrachteten Projektes benötigt.

3.2.2 Berechnung des Mengengerüsts

Emissionen des Verkehrs in der Betriebsphase und der Umwegfahrten in der Bauphase

Aus der Veränderung der Fzkm kann mittels Emissionsfaktoren pro Fzkm die Veränderung der Schadstoffemissionen in Tonnen berechnet werden. Dazu kann die aktuelle Version des HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren) verwendet werden.⁹⁸

Im Folgenden soll noch kurz auf den Spezialfall der **Elektrofahrzeuge** eingegangen werden (die folgenden Ausführungen gelten für alle Fahrzeugkategorien): Bezüglich der Emissionen durch Abrieb und Aufwirbelung unterscheiden sich Elektrofahrzeuge nicht von einem «normalen» Fahrzeug (mit Verbrennungsmotor), d.h. die entsprechenden durchschnittlichen Emissionsfaktoren pro Fzkm können aus dem HBEFA übernommen werden. Da Elektrofahrzeuge aber elektrisch betrieben werden, haben sie keine direkten Motoremissionen. Die Stromproduktion kann jedoch ebenfalls externe Effekte auslösen. Diese werden in Kapitel 0 zu den vor- und nachgelagerten Prozessen betrachtet – zusammen mit den vor- und nachgelagerten Prozessen des Benzin- und Dieserverbrauchs.

Allerdings fehlen im HBEFA die **Emissionsfaktoren für Zink**. Daher verwenden wir hierzu die Grundlagedaten aus Infrac / Ecoplan (2019⁹⁹). Die in *Tab. 14* dargestellten Zink-Emissionsfaktoren¹⁰⁰ sind gut doppelt so hoch wie die bisher verwendeten Emissionsfaktoren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neu nicht nur der Abrieb von Reifen und Bremsbelägen berücksichtigt werden kann, sondern auch Emissionen aus der Verbrennung. Die Zink-Emissionsfaktoren sind gemäss Infrac / Ecoplan (2019) über die Zeit praktisch konstant. Für Zink liegt keine Differenzierung nach innerorts, ausserorts und Autobahn vor – geschweige denn weitere Differenzierungen. Entsprechend lässt sich für alle Fzkm der Zink-Emissionsfaktor nur nach Fahrzeugkategorien differenzieren, nicht aber nach dem Ort der Emission (vgl. *Tab. 14*).

Tab. 14 Durchschnittliche Emissionsfaktoren für Zink

	Personenverkehr					Güterverkehr			Total
	PW	Bus	Car	MZ	Total	Li	SNF	Total	
Zink in g / Fzkm	0.0029	0.0494	0.0490	0.0015	0.0032	0.0077	0.0486	0.0221	0.0051

PW = Personenwagen, Bus = Linienbus ÖV, Car = Privatcar, MZ = motorisierte Zweiräder, Li = Lieferwagen, SNF = Schwere Nutzfahrzeuge. Die Ergebnisse zu Motorrad und Mofa bzw. Lastwagen und Sattelschlepper werden mit den entsprechenden Fzkm im Jahr 2015 gewichtet in MZ bzw. SNF umgerechnet.

⁹⁷ Ecoplan (2007), Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse, S. 45-46.

⁹⁸ Momentan die Version 3.3: Infrac (2017), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA. In Kürze wird jedoch die Version 4.1 erscheinen.

⁹⁹ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

¹⁰⁰ Die Durchschnittswerte für MZ, SNF, Total PV, Total GV und Gesamttotal basieren auf einer Gewichtung mit den gesamtschweizerischen Fzkm des Jahres 2015.

Für die Bewertung werden die veränderten Schadstoffemissionen anschliessend mit Kostensätzen pro Tonne Schadstoff monetarisiert (vgl. Kapitel 3.3.2 und 3.3.3).

Emissionen der Baustelle

Die **Bauemissionen** können über den in *Tab. 15* hergeleitet Emissionsfaktor von **0.128 t PM₁₀-Emissionen pro Mio. CHF Investitionskosten** ermittelt werden. Dabei werden die Landkosten nicht als Teil der Investitionskosten angesehen (da sie zu keinen Emissionen führen).

Diese Methodik ist sehr grob. Wünschenswert wäre z.B. eine Differenzierung des Kostensatzes nach Streckenabschnitten (Tunnel, Brücke, offene Strecke) oder gar nach verschiedenen Bauarbeiten (z.B. Kostensatz pro m³ Aushub offene Strecke, m³ Aushub Tunnel, m³ Verschalung, m³ Eisen, m³ Schotter für Fahrbahn, t Armierung, m³ Beton, m³ Asphalt, m Leitplanke etc.). Hierzu liegen jedoch keine differenzierten Angaben zu PM₁₀-Emissionen vor und die entsprechende Aufarbeitung der Grundlagendaten würde den Rahmen der vorliegenden Studie bei weitem sprengen. Daher müssen die Baustellenemissionen bis auf Weiteres mit einem groben Durchschnittsfaktor aus dem Umsatz des Bauhauptgewerbes und den von ihm verursachten Baustellenemissionen abgeleitet werden.

Tab. 15 Berechnung des Emissionsfaktors für Baustellenemissionen

PM₁₀-Emissionen durch Baustellen und Baustellenverkehr im Jahr 2015	
Motor-Emissionen Baumaschinen	40 t ¹
Nicht-Motor-Emissionen Baumaschinen	2'211 t ¹
Baustellentransporte	109 t ²
Total	2'360 t
Umsatz Bauhauptgewerbe im Jahr 2015	
Hoch- und Tiefbau	18'380 Mio. CHF³
Emissionsfaktor	
PM ₁₀ pro Investitionskosten (= 2'360 / 18'380)	0.1284 t / Mio. CHF

¹ EMIS-Datenbank (Emissionsinformationssystem der Schweiz), Stand Juni 2018..

² Gesamte PM₁₀-Emissionen des schweren Güterverkehrs (109t Motoremissionen und 351t Abrieb – Infrast 2017, Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs der Schweiz 1990-2050., S. 71) multipliziert mit dem Anteil von 23.7% der Bautransporte (Auswertung der Güterverkehrsstatistik des BfS: Anteil der Warenarten «Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse» und «Sonstige Mineralerzeugnisse (verarbeitete Baustoffe, Glas, etc.)» an den gesamten Tonnenkilometern der in- und ausländischen Fahrzeuge 2014 (letztes verfügbares Jahr), wobei diese beiden Warengruppen gemäss Aussage des BfS (Mail vom 12.3.2019) einen guten Indikator für die Baustellentransporte darstellen).

³ Schweizer Baumeisterverband (2017), Zahlen und Fakten 2017, S. 5.

3.2.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Bei Bewertungen in der Schweiz wird bisher meist mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren aus dem HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren) für Autobahnen, Ausserorts- und Innerortsstrassen gerechnet. Diese Durchschnittsfaktoren basieren auf Erhebungen über das gesamte schweizerische Strassennetz und wurden in NISTRA implementiert, so dass bei einem Arbeiten mit NISTRA das HBEFA automatisch berücksichtigt wird. Bei spezifischen Streckenverhältnissen kann von diesen Durchschnittswerten abgewichen werden und stattdessen können differenzierte Werte aus dem HBEFA verwendet werden. In der Praxis wurde unseres Wissens jedoch nie weiter differenziert als nach Autobahnen, Ausserorts- und Innerortsstrassen, obwohl das Handbuch Emissionsfaktoren dies zulassen würde. Es unterscheidet zwischen mehr als 300 Verkehrssituationen (Autobahn, ausserorts, innerorts, Tempo, Strassentyp, Gebietstyp (Agglo / Land), Verkehrszustand). Weitere Differenzierungen sind z.B. nach Geschwindigkeit oder Steigung möglich.

3.3 Wertgerüst

3.3.1 Bewertungsmethode

Die wesentliche Grundlage für die Bestimmung des Wertgerüsts sind die Studien im Auftrag des ARE zu den externen Kosten der Luftverschmutzung in der Schweiz.¹⁰¹ Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die in diesen Studien verwendeten Bewertungsmethoden. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme der immateriellen Gesundheitskosten und der Biodiversitätsverluste alle anderen Kostenbereiche bzw. Auswirkungen der Luftverschmutzung mit Marktpreisen quantifiziert werden.

Tab. 16 Übersicht über die Bewertungsmethoden

	Bewertungsmethode
Gesundheitskosten	
Medizinische Behandlungskosten	Marktpreise
Produktionsausfall	Marktpreise
Wiederbesetzungskosten	Marktpreise
Immaterielle Kosten (Schmerz und Leid)	Zahlungsbereitschaft
Gebäudeschäden	
Verkürzte Renovationszyklen	Marktpreise für Fassadenrenovationen
Verkürzte Lebensdauer Gebäudehülle	Marktpreise für die Erstellungskosten von Fassadenbauteilen
Fensterreinigung	Marktpreise
Vegetationsschäden	
Ernteaufschläge	Marktpreise für Nutzpflanzen wie Weizen, Kartoffeln, Trauben etc.
Waldschäden	Marktpreise für Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft (Holzpreis) und für Sturmschäden (Einkommensverlust, Pflege- und Aufrüstemassnahmen und Folgeschäden (wie Borkenkäferschäden))
Biodiversitätsverluste	Wiederherstellungs- bzw. Ersatzkosten
Bodenqualität	Marktpreise für Sanierungskosten

Quelle: Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten

Für die Luftverschmutzung sind **Grenz- und Durchschnittskosten** praktisch **identisch**, da die in den ARE-Studien verwendeten Kostenfunktionen linear verlaufen (z.B. der Zusammenhang zwischen höherer Schadstoffkonzentration, mehr Krankheitsfällen und höheren Kosten). Deshalb kann das Ziel, die Grenzkosten zu bewerten (SN 641 820, Ziffer 38.5), auch mit einem Durchschnittskostensatz erreicht werden. Zudem trägt bei lokalen Schäden die Differenzierung des Emissions- bzw. Immissionsortes nach bebaut und unbebaut dazu bei, dass tatsächlich die zusätzlich entstehenden Grenzkosten bewertet werden.

3.3.2 Bestimmung des Wertgerüsts

Das im Folgenden dargestellte Wertgerüst bezieht sich wie in Infrac / Ecoplan (2019) immer auf Faktorpreise des Jahres 2015. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben werden die dort ermittelten Schadstoffemissionen mit einem Kostensatz pro Tonne Schadstoff monetarisiert.

Zuordnung zwischen Schadstoffen und Kostensätzen

Für die Herleitung der Kostensätze pro Tonne Schadstoff muss in einem ersten Schritt untersucht werden, welche Schadstoffe für welche Schäden verantwortlich sind. Die Ergebnisse sind in *Tab. 17* zusammengefasst.

¹⁰¹ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten sowie Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

- **Gesundheitskosten:** Die Gesundheitskosten werden über primäres PM₁₀ bewertet. Eigentlich müsste zwischen primärem und sekundärem PM₁₀ differenziert werden (60% bzw. 40% der Immissionen gemäss Tab. 12). Sekundäres PM₁₀ bildet sich durch die Reaktion zwischen den Vorläufersubstanzen. Ziel wäre es, einen Kostensatz pro (Vorläufer-) Schadstoff herzuleiten. Dazu müssten Umrechnungsfaktoren der verschiedenen Vorläufersubstanzen in sekundäres PM₁₀ bestimmt werden (z.B. 1 g SO₂ ergibt X g PM₁₀). Dies ist jedoch nicht möglich, da die chemischen Prozesse in der Luft nichtlinear verlaufen und von der Zusammensetzung der Luft abhängen, die von Ort zu Ort unterschiedlich ist. Deshalb werden vereinfachend die gesamten Gesundheitskosten dem primären PM₁₀ angelastet (wie in Ecoplan 2007).
- **Gebäudeschäden:** Die Gebäudeschäden werden ebenfalls über primäres PM₁₀ beurteilt. Auch bei den Gebäudeschäden müsste nach primärem und sekundärem PM₁₀ unterschieden werden (99%¹⁰² bzw. 1%). Wie bei den Gesundheitskosten können die Schäden durch sekundäres PM₁₀ jedoch nicht auf die Vorläufersubstanzen aufgeteilt werden. Deshalb werden wie bei den Gesundheitsschäden die gesamten Gebäudeschäden dem primären PM₁₀ angelastet.
- **Ernteauffälle:** Die Ernteauffälle werden durch Ozon verursacht, welches aus den Vorläufersubstanzen NO_x und VOC (flüchtige organische Kohlenwasserstoffverbindungen) entsteht. Untersuchungen haben ergeben, dass in ländlichen Gebieten die Ozonbildung NO_x-limitiert ist, d.h. in der Luft ist so viel VOC, dass NO_x der limitierende Faktor bei der Ozonbildung ist. Deshalb gehen wir wie Infrac¹⁰³ davon aus, dass NO_x die entscheidende Vorläufersubstanz ist. Folglich werden die Ernteauffälle über einen Kostensatz für den Schadstoff NO_x monetarisiert.

Tab. 17 Relevante Schadstoffe

	relevante Schadstoffe
Gesundheitskosten	primäres PM ₁₀
Gebäudeschäden	primäres PM ₁₀
Ernteauffälle	NO _x
Waldschäden	NO _x
Biodiversitätsverluste	NO _x
Bodenqualität	Zink

- **Waldschäden:** Die Waldschäden entstehen teilweise durch Holzernteverluste aufgrund der Ozonkonzentration, teilweise durch Schäden aufgrund der Bodenversauerung (Holzernteverluste und höheres Windwurfisiko). Die Ozonschäden können wie die Ernteauffälle über die Veränderung der NO_x-Emissionen angepasst werden.¹⁰⁴ Die Bodenversauerung entsteht aufgrund der Vorläufersubstanzen Stickoxide NO_x, Ammoniak NH₃ und Schwefeldioxid SO₂, deren Gewichtung in der folgenden Tabelle zusammengefasst wird.

Von den gesamten verkehrsbedingten Waldschäden von 54 Mio. CHF entfallen 28 Mio. CHF oder 51.7% auf Schäden durch Ozon.¹⁰⁵ Damit ergibt sich folgende Gewichtung der Schadstoffe:

- NO_x 93.8% (= 48.3% * 87.3% + 51.7%)
- NH₃ 6.0% (= 48.3% * 12.5%)
- SO₂ 0.1% (= 48.3% * 0.3%)

¹⁰² Die Gebäudeschäden werden zu 97% durch primäres PM₁₀ verursacht (vgl. Tab. 13), die verbleibenden 3% werden durch das totale PM₁₀ verursacht, das sich wie bei den Gesundheitskosten zu 60% aus primärem und zu 40% aus sekundärem PM₁₀ zusammensetzt. Damit beträgt der gesamte Anteil des primären PM₁₀ 98.6%.

¹⁰³ Infrac (2006), Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000. Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse, S. 64-65 und Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 190.

¹⁰⁴ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 209-210.

¹⁰⁵ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

Vereinfachend können wie bisher (vgl. Ecoplan 2007, S. 50) die gesamten Waldschäden als vom NO_x abhängig angesehen werden.

Tab. 18 Waldschäden: Gewichtung der Vorläufersubstanzen der Bodenversauerung

	Beitrag an Bodenversauerung	Anteil Strassenverkehr	Beitrag des Verkehrs an gesamter Bodenversauerung	Beitrag des Verkehrs an Bodenversauerung durch Verkehr
NO _x	27%	51.7%	14.0%	87.3%
NH ₃	69%	2.9%	2.0%	12.5%
SO ₂	4%	1.1%	0.05%	0.3%
Total	100%		16.0%	100.0%

Quelle: Eigene Berechnungen basierend auf Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.

- **Biodiversitätsverluste:** Auch die Biodiversitätsverluste werden über die drei Schadstoffe NO_x, NH₃ und SO₂ bestimmt. Dabei werden die Kosten in der Schweiz über drei Kostensätze pro Tonne Schadstoff bestimmt, die mit den entsprechenden Emissionen multipliziert wurden. Im Ergebnis zeigt sich, dass 78.5% der Kosten auf NO_x zurückzuführen sind, 21.5% auf NH₃ und 0.06% auf SO₂. Auch hier kann man vereinfachend annehmen, dass die gesamten Biodiversitätsverluste auf NO_x zurückzuführen sind.¹⁰⁶
- **Bodenqualität:** Bei der Bodenqualität ist der Schadstoff Zink relevant, denn bei der Verschmutzung mit Zink erreicht der Boden am schnellsten den Grenz- resp. Prüfwert, oberhalb dessen Schäden auftreten.¹⁰⁷

Durchschnittliche Kostensätze pro Tonne Schadstoff

In der folgenden Tabelle werden die durchschnittlichen Kostensätze pro Tonne Schadstoff dargestellt. Diese ergeben sich aus der Division der Kosten des Strassenverkehrs in der Schweiz in Mio. CHF mit den Gesamtemissionen des betroffenen Schadstoffes im Strassenverkehr (beides gemäss Infrac / Ecoplan 2019).¹⁰⁸ Die Ergebnisse zeigen, dass primäres PM₁₀ Gesundheitskosten von etwa 836'000 CHF pro Tonne sowie Gebäudeschäden von 63'000 CHF pro Tonne verursacht. Die Vegetationsschäden durch NO_x bzw. Zink führen zu Kosten von insgesamt 7'000 CHF bzw. 431'000 CHF pro Tonne.

Bei den Gesundheitsschäden ist zu beachten, dass die Grundnorm SN 641 820 eine Sensitivität mit einem 50% höheren bzw. tieferen VOSL fordert. Die entsprechenden Werte für die Kostensätze liegen um 40% höher oder tiefer als im Basisszenario.

Die **Bauemissionen** werden mit denselben Kostensätzen bewertet. Da bei den Bauemissionen nur PM₁₀ berücksichtigt wird, werden die in Tab. 19 hergeleiteten Kostensätze für die Gesundheits- und Gebäudeschäden zusammengezählt, was einen Gesamtkostensatz von 899'000 CHF / t primäres PM₁₀ ergibt, der ebenfalls mit dem VOSL schwankt zwischen 565'000 und 1'233'000 CHF / t primäres PM₁₀.

¹⁰⁶ Es stellt sich die Frage, ob allenfalls auch NH₃ miteinzubeziehen wäre. Es zeigt sich aber, dass lediglich 0.8% der gesamten luftverschmutzungsbedingten Schäden durch NH₃ verursacht werden (vgl. dazu Tab. 10, wenn auch der Anteil der Waldschäden miteinbezogen wird). Eine Approximation über NO_x erscheint deshalb vertretbar, um die Methodik nicht unnötig kompliziert zu machen.

¹⁰⁷ Der Prüfwert gibt eine Konzentration des Schadstoffes im Boden an, oberhalb der die Bodenfruchtbarkeit eingeschränkt ist, so dass der Boden eine potenzielle Gefährdung von Pflanzen, Tieren und allenfalls auch Menschen darstellt (Infrac 2006, Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000. Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse, S. 98 und 100).

¹⁰⁸ Dabei werden jeweils alle Fahrzeugkategorien miteinbezogen.

Tab. 19 Durchschnittliche Kostensätze pro Tonne Schadstoff

		CHF / t Schadstoff	
Primäres PM ₁₀	Gesundheitsschäden	VOSL Basis	836'000
		VOSL tief	502'000
		VOSL hoch	1'170'000
	Gebäudeschäden		63'000
NO _x	Ernteauffälle		1'800
	Waldschäden		1'600
	Biodiversitätsverluste		3'600
Zink	Bodenqualität		431'000

3.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Wie erwähnt sind die lokalen Gegebenheiten auch bei den Immissionen zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.1.1b): Ein Teil des Effektes der Schadstoffemissionen spielt sich in einem relativ engen Gebiet entlang der Strasse ab. Im Folgenden ist deshalb zu klären, wie auf die örtlichen Gegebenheiten eingegangen werden kann (z.B. Emission mitten in einem bebauten Gebiet oder auf grüner Wiese).

Auch bei einer örtlichen Differenzierung verwenden wir weiterhin Schadstoffemissionen und Kostensätze pro Tonne Schadstoff. Der Kostensatz wird nun aber nach dem Ort der Emission (bzw. Immission) differenziert, so dass der Kostensatz in dicht besiedeltem Gebiet höher ausfällt als auf der grünen Wiese.

Die exakte Bestimmung differenzierter Kostensätze würde einen sehr grossen Aufwand verursachen, der hier nicht geleistet werden kann. Deshalb wird im Folgenden wie bisher (Ecoplan 2007) ein pragmatisches Vorgehen gewählt.

Bei der Differenzierung des Kostensatzes wird nur zwischen Strassen bzw. Emissionen in bebautem und unbebautem Gebiet unterschieden:

- Unter **Strassen in bebautem Gebiet** verstehen wir Strassenabschnitte mit Bebauung je **50m beidseits der Strasse**. Nach Aussage von Experten (vgl. Ecoplan 2007, S. 51-52) ist für die lokalen Wirkungen nur ein 100m breites Band um die Strasse herum relevant. Als bebaut gilt ein beidseits der Strasse bebautes Gebiet, in dem nur noch einzelne Lücken bestehen (in denen Neubauten entstehen könnten).
- Unter **Strassen in unbebautem Gebiet** verstehen wir Strassenabschnitte ohne Bebauung je 50m beidseits der Strasse. Dazu zählen auch Tunnelabschnitte mit Belüftung (je nach Bebauung ohne Ein- und Ausfahrt).

Strassen, die auf der einen Seite bebaut, aber auf der anderen unbebaut sind, sind je hälftig Strassen im bebauten bzw. unbebauten Gebiet zuzuordnen. Gleiches gilt für Strassen mit beidseitig jeweils nur einem Haus innerhalb von 50m (ausser es handelt sich um grössere Häuser mit relativ vielen Einwohnern z.B. grössere Wohnblöcke), da innerhalb von 50m meist zwei Häuser Platz finden.

Um die differenzierten Kostensätze herzuleiten wird wie folgt vorgegangen:

- Zuerst ist zu beachten, dass nur ein Teil der Schäden lokal ist und entsprechend der Ort der Emission und Immission zusammenfallen. Die regionalen Schäden werden nicht lokal differenziert, da sie ohnehin regional anfallen. Aus Kapitel 3.1.3d) (Seite 51) wissen wir, dass 58% der Gesundheitskosten, 3% der Gebäudeschäden sowie die gesamten Vegetationsschäden regional verursacht werden. Als erstes teilen wir deshalb die in Tab. 19 aufgeführten Kostensätze für das PM₁₀ in regionale und lokale Schäden auf (NO_x und Zink führen nur zu regionalen Schäden). Dies wird in den beiden Spalten «regionale Schäden» und «lokale Schäden Durchschnitt» in Tab. 20 vorgenommen.

Die regionalen Kostensätze gelten für alle PM₁₀-Emissionen unabhängig vom Emissionsort. Der durchschnittliche lokale Kostensatz gilt es im Folgenden nach bebautem und unbebautem Emissionsort (der zugleich auch Immissionsort ist) zu differenzieren.

- Dazu betrachten wir zunächst die «Ecklösung», dass alle lokalen Schäden nur im bebauten Gebiet anfallen und entsprechend die lokalen Schäden im unbebauten Gebiet gleich Null sind. Dies scheint insofern plausibel, als die lokalen Schäden sich auf Gesundheitskosten von Personen an ihrem Wohnort bzw. Gebäudeschäden beziehen. Diese Schäden können nur in Gebäuden auftreten, so dass es plausibel ist, dass die Schäden im unbebauten Gebiet gleich Null sind.
- Deshalb wird bestimmt, welcher Anteil der gesamten PM₁₀-Emissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz im bebauten Gebiet ausgestossen wird. Dazu werden die differenzierten Emissionsfaktoren nach Autobahn, ausserorts und innerorts aus dem HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren¹⁰⁹) verwendet sowie die entsprechenden Fahrzeugkilometer.¹¹⁰ Es kann unterstellt werden, dass die Fahrleistungen im bebauten Gebiet sich ergeben als Summe aller Fahrleistungen innerorts und 22% der Fahrleistungen auf Autobahnen¹¹¹ (und 0% der Fahrleistungen ausserorts). Alle Emissionen ausserorts und 78% der Emissionen auf Autobahnen gelten entsprechend als im unbebautem Gebiet ausgestossen. Daraus ergibt sich, dass insgesamt 43.7% der PM₁₀-Emissionen im Strassenverkehr in der Schweiz im bebauten Gebiet ausgestossen wurden und 56.3% im unbebauten Gebiet.
- Entsprechend müssen die durchschnittlichen Kostensätze für lokale Schäden in Tab. 20 gut verdoppelt werden (Division durch 0.437), um die lokalen Schäden im bebauten Gebiet zu bestimmen. Die lokalen Gesundheitsschäden betragen folglich 798'000 CHF / t PM₁₀ (bei tiefem bzw. hohem VOSL 479'000 bzw. 1'116'000 CHF / t PM₁₀) und die lokalen Gebäudeschäden 139'000 CHF / t PM₁₀ (vgl. Tab. 20).

Tab. 20 Aufteilung der Kostensätze auf lokale und regionale Schäden

			Schäden Total	regionale Schäden	lokale Schäden		
					Durch- schnitt	bebautes Gebiet	unbebautes Gebiet
Primäres PM ₁₀	Gesundheitsschäden	VOSL Basis	836'000	488'000	348'000	798'000	-
		VOSL tief	502'000	293'000	209'000	479'000	-
		VOSL hoch	1'170'000	683'000	488'000	1'116'000	-
	Gebäudeschäden		63'000	2'200	61'000	139'000	-
NO _x	Ernteauffälle		1'800	1'800	-	-	-
	Waldschäden		1'600	1'600	-	-	-
	Biodiversitätsverluste		3'600	3'600	-	-	-
Zink	Bodenqualität		431'000	431'000	-	-	-

- Zur Kontrolle, ob diese Kostensätze plausibel erscheinen, benutzen wir Ergebnisse aus europäischen Forschungsprojekten. In Ecoplan (2007) wurde ein Ergebnis aus dem EU-Projekt HEATCO herangezogen, in dem Vorschläge für eine KNA für grenzüberschreitende Projekte gemacht werden. In HEATCO werden unterschiedliche Kostensätze für PM_{2.5} hergeleitet für urbane Räume und Gebiete ausserhalb des Siedlungsgebietes.¹¹² Dazu wurde das Schadstoff-Ausbreitungsmodell EcoSense eingesetzt. Darin sind Hintergrundemissionen und Meteorologie enthalten. Das Modell arbeitet europaweit mit einem 50 x 50 km Raster. In HEATCO ausgewiesen werden Kostensätze pro Land, die durch die hypothetische Erhöhung der Emissionen in einem Land um 10%

¹⁰⁹ Infrac (2017), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 3.3.

¹¹⁰ bfu (2016) Status 2016: Statistik der Nichtberufsunfälle und des Sicherheitsniveaus in der Schweiz, S. 28, Tabelle USV.T.07.

¹¹¹ Berechnung wie in NISTRA (Handbuch NISTRA 2017, S. 67) mit Hilfe einer GIS-Überlagerung der Autobahnen mit der Arealstatistik, wobei bebaut (ohne Industrie) als innerorts betrachtet wurde (Ermittlung durch EBP für die Schweiz im Rahmen einer Bewertung).

¹¹² Bickel et al. (2006), HEATCO D5: Proposal for Harmonized Guidelines, S. 134 – 143.

- ermittelt wurden (Vergleich der zusätzlichen Emissionen und der zusätzlichen Kosten). Die Ergebnisse zeigen, dass die Kosten von PM_{2.5}-Emissionen in urbanen Räumen je nach betrachtetem Land 2.2- bis 12.1-mal höher sind als die Kosten von Emissionen ausserhalb des Siedlungsgebietes, für die Schweiz beträgt der Faktor 7.4.¹¹³
- Um diese eher alte Zahl zu aktualisieren, verwenden wir European Commission (2019¹¹⁴). Dort fehlt aber eine Angabe für die Schweiz (da die Schweiz nicht Mitglied der EU ist).¹¹⁵ Alle Faktoren für die Nachbarländer der Schweiz (wie bei HEATCO für PM_{2.5}) sind in der neuen Publikation leicht gesunken gegenüber HEATCO (um 0.1 bis 0.8). Es ist somit davon auszugehen, dass auch der Schweizer Faktor gemäss den neueren Berechnungen leicht gesunken ist und somit in etwa zwischen 6.5 und 7.3 liegen dürfte.
 - Es ist zu beachten, dass dieser Faktor von ca. 7 für die gesamten Schäden durch PM_{2.5} gilt.¹¹⁶ Gemäss der bisherigen Herleitung ist ein Teil der Schäden durch regionale Schadstoffe verursacht. Die gesamten Schäden durch PM₁₀ im bebauten Gebiet betragen somit 1'427'000 CHF / t PM₁₀ (Summe regionaler und lokaler Gesundheits- und Gebäudeschäden (mit Basis-VOSL)), im unbebauten Gebiet treten lediglich regionale Schäden auf, so dass der Kostensatz 490'000 CHF / t PM₁₀ beträgt. Der Faktor zwischen den beiden Kostensätzen beträgt somit 2.9 (mit tiefem bzw. hohem VOSL 3.1 bzw. 2.8).
 - Dieser Faktor ist deutlich kleiner als die in den europäischen Projekten für die Schweiz berechneten Faktoren von ca. 7. Es ist jedoch klar, dass die Faktoren aus den EU-Projekten keineswegs exakt sind.¹¹⁷ Die internationalen Faktoren zeigen jedoch, dass der von uns ermittelte Faktor von ca. 3 für Kostensätze zwischen bebautem und unbebautem Gebiet im internationalen Vergleich keineswegs als hoch einzustufen ist. Entsprechend können die hier berechneten Werte zur Verwendung empfohlen werden.

Die vorgestellte Herleitung zur Differenzierung der lokalen Kostensätze nach bebautem bzw. unbebautem Gebiet stellt selbstverständlich eine grobe Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse dar. So spielt beispielsweise nicht nur das Vorhandensein einer Bebauung eine Rolle, sondern auch die Dichte der Bebauung bzw. die Bevölkerungsdichte. Zudem sind auch meteorologische Bedingungen von Bedeutung wie die Windrichtung und -stärke. Auch die Häufigkeit von Temperaturinversionen ist relevant, da die Schadstoffe bei einer Inversion nicht wegtransportiert werden und deshalb grösseren Schaden anrichten. So hat z.B. Ecoplan (2006)¹¹⁸ gezeigt, dass die Immissionen im Alpenraum aufgrund von Inversionen und wenig Wind 4.2-mal höher sind als im Flachland (bei gleichen Emissionen). Auf die Berücksichtigung all dieser Einflussgrössen wird hier jedoch aus verschiedenen Gründen verzichtet.¹¹⁹

Mit dem vorgeschlagenen Vorgehen können aber grobe Fehleinschätzungen verhindert werden, beispielsweise wenn eine Umfahrungsstrasse zu einer Entlastung der Wohngebiete führt, aber insgesamt zu mehr Emissionen. In diesem Fall würde eine Durchschnittsmethode (vgl. Methode A in Abb.3) eine Zunahme der Luftverschmutzung zeigen, während die hier vorgeschlagene Differenzierung die tatsächliche Entlastung aufzeigt.

¹¹³ Bickel et al. (2006), HEATCO D5: Proposal for Harmonized Guidelines, Tabelle 6.2, S. 137.

¹¹⁴ European Commission (2019), Handbook on the external costs of transport, S. 48-49.

¹¹⁵ Eine Nachfrage bei den Autoren der Studie (CE Delft) bestätigte, dass Schweizer Zahlen nicht verfügbar sind.

¹¹⁶ In Ecoplan (2007, S. 52-53) wurde hingegen unterstellt, dass der Faktor nur für die lokalen Schäden gilt, so dass die Kostensätze für lokale Schäden im bebauten Gebiet so bestimmt wurden, dass sie 7.4-mal höher sind als die lokalen Schäden im unbebauten Gebiet.

¹¹⁷ Erstens beruht der Faktor auf PM_{2.5}, während wir ihn für PM₁₀ herleiten. Zweitens beruht der Faktor auf einem anderen Wertgerüst als dem hier verwendeten. Und drittens schwankt der Faktor innerhalb Europas beträchtlich, so dass die Unsicherheiten eher gross sind und Abweichungen durchaus möglich.

¹¹⁸ Ecoplan (2006), Environmental costs in sensitive areas, Kapitel 3.

¹¹⁹ Der Verzicht auf die Berücksichtigung des Faktors zwischen Alpenraum und Flachland erfolgt, weil die Abgrenzung zwischen Alpenraum und Flachland in der Praxis für ein konkretes Projekt schwierig ist, weil der Faktor für den Variantenvergleich meist unbedeutend sein dürfte (alle Varianten im Alpenraum oder keine). Zudem soll das vorgeschlagene Verfahren nicht komplizierter werden. Dies gilt auch für die übrigen Einflussfaktoren, auf die auch meist aufgrund der mangelnden Daten auf eine Differenzierung verzichtet werden muss.

Vorgehen in der praktischen Anwendung

Abschliessend soll nochmals zusammengefasst werden, wie bei der praktischen Bewertung eines Projektes vorzugehen ist:

- Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben ist zuerst die Veränderung der Fzkm differenziert nach Autobahn, ausserorts und innerorts zu erheben (und allenfalls nach Fahrzeugkategorien).
- Dann wird mit Hilfe von Emissionsfaktoren die Veränderung der PM₁₀-Emissionen bestimmt (vgl. Kapitel 3.2.2).
- Die Vegetationsschäden sowie die regionalen Gesundheits- und Gebäudeschäden können dann mit den entsprechenden Kostensätzen monetarisiert werden (vgl. Tab. 20).
- Für die Bewertung der lokalen Schäden müssen die Fzkm bzw. die Emissionen zuerst nach bebautem und unbebautem Gebiet aufgeteilt werden. Dabei können vereinfachend die Fzkm innerorts sowie 22% der Fzkm auf Autobahnen als innerorts angesehen werden (genauere Erhebungen sind natürlich zulässig). Anschliessend können die spezifischen Kostensätze für das bebaute Gebiet in Tab. 20 für die Bewertung angewendet werden.

Wie sich also zeigt, müssen für die Anwendung der detaillierten Methode die Fzkm differenziert werden. Einerseits nach innerorts, ausserorts und Autobahn, andererseits nach bebautem und unbebautem Gebiet (weitere Differenzierung z.B. nach Geschwindigkeit oder Steigungen sind möglich). Die Differenzierung nach innerorts, ausserorts und Autobahn kann gemäss unserer Erfahrung einfach aus dem Verkehrsmodell gezogen werden. Die Differenzierung nach bebaut und unbebaut ist danach approximativ möglich.

Zusätzlich sind auch die **Bauemissionen** zu berücksichtigen. Dies erfolgt über den Emissionsfaktor von 0.128 t PM₁₀ pro Mio. CHF Investitionskosten (vgl. Tab. 15). Die lokalen Schäden der Bauemissionen sind ebenfalls **mit den detaillierten Kostensätzen für bebauten und unbebauten Gebiet** in Tab. 20 zu bewerten. Denn für die Baustelle kann der Emissionsort einfach festgestellt werden (Anteil der Bauemissionen in bebautem bzw. unbebautem Gebiet), so dass die unterschiedlichen Kostensätze anzuwenden sind. Zusätzlich sind natürlich die regionalen Schäden zu berücksichtigen (vgl. Tab. 20).

3.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand

Die hier angegebenen Werte beziehen sich alle auf den Preisstand des Jahres 2015. Wird die KNA mit einem anderen Preisstand durchgeführt, sind die Werte wie folgt anzupassen (vgl. auch Tab. 21, in der auch nochmals die Bewertungsmethoden angegeben sind):

- **Gesundheitskosten:** Die Gesundheitskosten werden hauptsächlich mittels Zahlungsbereitschaften¹²⁰ bestimmt und werden deshalb – wie üblich – mit dem Nominallohnwachstum angepasst.
- **Gebäudeschäden:** Die Kosten für die verkürzten Renovationszyklen sowie die verkürzte Lebensdauer der Gebäudehülle können beide mit dem Hochbaupreisindex¹²¹ fortgeschrieben werden. Wir schlagen vor, wie bisher die Fensterreinigung im Sinne einer Vereinfachung ebenfalls mit dem Hochbaupreisindex an die Preisentwicklung anzupassen.¹²²
- **Vegetationsschäden:** Die Vegetationsschäden (ohne Biodiversitätsverluste) werden über die Preise von Nutzpflanzen und Holz sowie Sanierungskosten bestimmt. Diese können über die Inflation (Konsumentenpreisindex) an die Preisentwicklung angepasst

¹²⁰ 92% der gesamten Gesundheitskosten durch den Strassenverkehr werden über Zahlungsbereitschaften bestimmt. Weitere 7.4% durch Produktionsausfälle, 0.5% durch medizinische Behandlungskosten und 0.2% durch Wiederbesetzungskosten (Infras, Ecoplan 2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015).

¹²¹ BfS (2018), Entwicklung der Baupreise.

¹²² Zur Anpassung der Fensterreinigungskosten würde sich grundsätzlich das Nominallohnwachstum als eng korrelierter Kostentreiber anbieten. Aufgrund der geringen Bedeutung der Fensterreinigungskosten (26% der Gebäudeschäden) kann jedoch auf diese Differenzierung verzichtet werden und vereinfachend der Hochbaupreisindex verwendet werden.

werden. Die Biodiversitätsverluste werden über Ersatzkosten quantifiziert, die von Eco-plan, Infrac¹²³ bereits mit dem Konsumentenpreisindex auf den erwünschten Preisstand angepasst wurden. Es können also die gesamten Vegetationsschäden mit dem Konsumentenpreisindex angepasst werden.

Tab. 21 Übersicht über Bewertungsmethoden und Anpassungen an einen anderen Preisstand

	Bewertungsmethode	Anpassung Preisstand
Gesundheitskosten		
Medizinische Behandlungskosten	Marktpreise	} Nominallohnwachstum
Produktionsausfall	Marktpreise	
Wiederbesetzungskosten	Marktpreise	
Immaterielle Kosten	Zahlungsbereitschaft	
Gebäudeschäden		
Verkürzte Renovationszyklen	Marktpreise	} Hochbaupreisindex
Verkürzte Lebensdauer Gebäudehülle	Marktpreise	
Fensterreinigung	Marktpreise	
Vegetationsschäden		
Ernteauffälle	Marktpreise	} Konsumentenpreisindex
Waldschäden	Marktpreise	
Biodiversitätsverluste	Ersatzkosten	
Bodenqualität	Marktpreise	

3.4 Veränderung über die Zeit

Das Mengen- und Wertgerüst sind nicht nur für ein Stichjahr (z.B. 2015 oder 2030) zu erheben, sondern es ist auch abzuschätzen, wie sie sich über die Zeit bzw. über die nächsten Jahrzehnte verändern (vgl. Kapitel 1.4).

Das Verkehrswachstum ist hier nicht relevant, weil die Veränderung der Verkehrsmenge (in Fzkm) als Input in die Berechnungen einfließt, d.h. zusätzlich zu den im Folgenden gemachten Vorgaben berücksichtigt werden muss.

a) Mengengerüst

Emissionsfaktoren während der Betriebsphase

Die Emissionen der Fahrzeuge werden in den nächsten Jahren weiter abnehmen. Dies ist bei einer KNA zu berücksichtigen. Die Entwicklung der Emissionsfaktoren für Abgase kann dem HBEFA entnommen werden. Dort sind Angaben für die relevanten Fahrzeugkategorien für jedes einzelne Jahr bis 2035 enthalten.¹²⁴ Es zeigt sich, dass zwischen 2015 und 2035 folgende Entwicklungen zu erwarten sind:

- PM₁₀-Motoremissionen nehmen um ca. 80% ab (je nach Fahrzeugkategorie und Strassentyp (Autobahn, ausserorts, innerorts)).
- Die PM₁₀-Emissionen aus Abrieb und Aufwirbelung bleiben hingegen konstant über die Zeit.
- Auch die NO_x-Emissionen nehmen um ca. 80% ab.
- Die Zink-Emissionen bleiben über die Zeit konstant (vgl. Kapitel 3.2.2).

¹²³ Eco-plan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 228.

¹²⁴ In der Version 4.1 des HBEFA, die im Sommer 2019 publiziert werden soll, werden Emissionsfaktoren bis ins Jahr 2060 verfügbar sein.

Diese Werte verdecken einige Unterschiede zwischen den Fahrzeugkategorien. Insbesondere sind die Abnahmen der Emissionen im Güterverkehr ausgeprägter als im Personenverkehr.

Wie bisher wird angenommen, dass sich die Emissionsfaktoren nach 2035 (bzw. nach dem letzten Jahr in der aktuellsten Version des HBEFA) nicht mehr verändern. Dies lässt sich auch mit dem Verlauf der Emissionsfaktoren im HBEFA begründen, in welchem die Veränderungen in den letzten Jahren vor 2035 nur noch gering sind.

Emissionsfaktoren während der Bauphase

Um die Veränderung der Bauemissionen über die Zeit zu bestimmen, müssen die PM₁₀-Emissionen in ihre drei Bestandteile aufgeteilt werden (vgl. Tab. 15):

- Die **Motoremissionen der Baumaschinen** nehmen gemäss Prognosen des BAFU wie folgt ab:¹²⁵
 - 2015: 40t
 - 2020: 32t
 - 2025: 19t
 - 2030: 15t

Wobei der Wert für 2030 auch noch für das Jahr 2050 gilt und somit auch für die Zeit danach als konstant angesehen werden kann.
- Die **Nicht-Motor-PM₁₀-Emissionen** (Abrieb / Aufwirbelung etc.) dürften wie die PM₁₀-Emissionen im Verkehr über die Zeit **konstant** bleiben.
- Die **Emissionen der Baustellentransporte** nehmen **wie die Gesamtemissionen von schweren Nutzfahrzeugen** ab, d.h. sie reduzieren sich gemäss HBEFA bis 2035 um 18% (Motor-Emissionen und Abrieb, Aufwirbelung).

Werden diese differenzierten Abnahmefaktoren mit den Emissionen im Jahr 2015 gewichtet (vgl. Tab. 15), so zeigt sich, dass die gesamten Bauemissionen nur um knapp 2% abnehmen, weil die Nicht-Motor-Emissionen klar dominieren.

b) Wertgerüst

- Die **Gesundheitskosten** werden mehrheitlich mittels einer Zahlungsbereitschaft (vgl. Fussnote 120) bestimmt und nehmen deshalb – wie üblich – mit dem **Reallohnwachstum** zu, das in etwa 0.75% pro Jahr betragen dürfte (Sensitivität mit 0% und 1.5% – vgl. Kapitel 2.4).
- Bei den Kostensätzen zu den **Gebäudeschäden** gehen wir von **realer Konstanz** aus:
 - Die Kosten einer Fassadenrenovation sowie der Erstellung von Fassadenbauteilen dürften real etwa konstant bleiben. Dies entspricht auch der Standardannahme, dass die Ersatzinvestitionen real gleich hoch sind wie die ursprünglichen Investitionen (vgl. SN 641 820, Ziffer 29).
 - In der professionellen Fensterreinigung könnten die Kosten dank technischen Fortschritten und aufgrund des starken Wettbewerbs sinken. Andererseits könnten aufgrund des Reallohnwachstums steigende Kosten vermutet werden. Insgesamt kann auch hier von real konstanten Kosten ausgegangen werden.
- Auch bei den **Vegetationsschäden** erwarten wir **real konstante** Preise für Landwirtschaftsprodukte (Ernteausfälle) und Holz (Waldschäden), real konstante Ersatzkosten für Biodiversitätsverluste sowie real konstante Reparaturkosten für Bodensanierungen.

¹²⁵ BAFU (2015), Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-road-Sektors: Studie für die Jahre 1980 – 2050, S. 186 sowie EMIS-Datenbank (Stand Juni 2018).

c) Zusätzliche Einflüsse auf das Wertgerüst

Zwei weitere Entwicklungen haben ebenfalls einen Einfluss auf die Kostensätze. Sie bewirken, dass die Zahl der Personen, die unter Gesundheitsschäden leiden, bzw. die Zahl der betroffenen Gebäude zunehmen. Entsprechend steigt der Kostensatz pro Tonne Schadstoff:

- **Bevölkerungswachstum:** Die Bevölkerungsszenarien des BfS¹²⁶ gehen im Referenzszenario von einer Bevölkerungszunahme bis zum Jahr 2045 aus, wobei die Wachstumsrate pro Jahr über die Zeit abnimmt (vgl. folgende Tabelle). Diese Entwicklung wird übernommen, wobei nach 2045 Konstanz unterstellt wird. Dabei ist zu beachten, dass das Bevölkerungswachstum nur einen Effekt auf die Gesundheitskosten hat.¹²⁷

Tab. 22 Entwicklung der Bevölkerung gemäss BfS

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Bevölkerung in Tausend	8'339.5	8'757.6	9'159.9	9'541.5	9'857.0	10'044.3	10'176.1

Quelle: BfS (2015), Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung. Ergebnisse des Referenzszenarios.

- **Zunahme der Gebäude:** Auch die Zahl der Gebäude und damit die Gebäudeschäden können sich über die Zeit verändern. Unseres Wissens gibt es keine Prognosen für die Veränderung der Gebäudeflächen. Deshalb verwenden wir bestehende Prognosen für die Veränderung der Energiebezugsfläche, welche in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind. Bis 2030 wird ein starkes Wachstum prognostiziert, weil der Platzbedarf pro Kopf deutlich steigen wird und weil bis 2030 auch die Bevölkerung noch deutlich zunimmt. Für die Jahre nach 2030 werden sinkende Wachstumsraten pro Jahr prognostiziert. Wir schlagen vor, dies in zwei Wachstumsphasen zusammenzufassen: 1.2% pro Jahr von 2015 bis 2030 und 0.5% pro Jahr von 2030 bis 2050. Nach 2050 gehen wir von Konstanz aus, denn die Energiebezugsfläche pro Person ist bereits seit 2006 in etwa konstant (deutlicher Trendbruch gegenüber vorher) und bei der Bevölkerung gehen wir nach 2045 ebenfalls von Konstanz aus.

Bei den Vegetationsschäden gehen wir davon aus, dass die mit Nutzpflanzen bebaute Fläche sowie die Waldfläche (in etwa) konstant bleiben.

Tab. 23 Veränderung der Energiebezugsfläche in der Schweiz in Mio. m²

	2015	2020	2030	2035	2040	2050
Privathaushalte	537.1	584.2	670.9	704.2	727.4	754.2
Dienstleitungen	156.8	161.7	171.6	176.5	181.4	191.0
Industrie	73.4	76.4	77.2	77.8	78.9	80.7
Total	767.2	822.3	919.7	958.5	987.7	1'025.9
		2015 - 2020	2020 - 2030	2030 - 2035	2035 - 2040	2040 - 2050
Wachstum pro Jahr		1.4%	1.1%	0.8%	0.6%	0.4%
			2015 - 2030			2030 - 2050
Wachstum pro Jahr			1.2%			0.5%

Quelle: Prognos (2012), Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050, S. 60 und 52 und eigene Berechnungen.¹²⁸

¹²⁶ BfS (2015), Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung. Ergebnisse des Referenzszenarios.

¹²⁷ Zudem hat auch die Bevölkerungsstruktur einen Einfluss, da vor allem Senioren unter der Luftverschmutzung leiden und der Anteil der Seniorinnen steigen dürfte. Dies wird jedoch nicht berücksichtigt, weil der Aufwand für die Berücksichtigung dieses Effektes sehr gross wäre.

¹²⁸ Die Energiebezugsfläche der Privathaushalte beruht in Prognos (2012) noch auf einer älteren Bevölkerungsprognose, die von einem deutlich tieferem Bevölkerungswachstum ausging. Deshalb wurde die Energiebezugsfläche der Privathaushalte entsprechend den nun höheren Prognosen (vgl. Tab. 22) nach oben korrigiert.

d) Zusammenfassender Überblick zur Veränderungen über die Zeit

Die gesamten Veränderungen des Mengen- und Wertgerüsts über die Zeit werden in *Tab. 24* zusammengefasst. In der Tabelle werden auch nochmals zum Vergleich die Bewertungsmethode und die Anpassung an den Preisstand angegeben (vgl. *Tab. 16* und *Tab. 21*).

Tab. 24 Übersicht über Bewertungsmethoden und Anpassungen an Preisstand und Zeit

	Bewertungsmethode	Anpassung Preisstand	Anpassung über Zeit
Gesundheitskosten			
Medizinische Behandlungskosten	Marktpreise	} Nominallohnwachstum	} Abnahme Emissionsfaktoren Bevölkerungswachstum Reallohnwachstum
Produktionsausfall	Marktpreise		
Wiederbesetzungskosten	Marktpreise		
Immaterielle Kosten	Zahlungsbereitschaft		
Gebäudeschäden			
Verkürzte Renovationszyklen	Marktpreise	} Hochbaupreisindex	} Abnahme Emissionsfaktoren Zunahme Energiebezugsfläche
Verkürzte Lebensdauer Gebäudehülle	Marktpreise		
Fensterreinigung	Marktpreise		
Vegetationsschäden			
Ernteauffälle	Marktpreise	} Konsumentenpreisindex	} Abnahme Emissionsfaktoren
Waldschäden	Marktpreise		
Biodiversitätsverluste	Ersatzkosten		
Bodenqualität	Marktpreise		

3.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen

Die in Kapitel 3.2 bis 3.4 beschriebene Methode mag komplex erscheinen, doch der grösste Teil der Komplexität ist projektunabhängig und kann mit einem einmaligen Berechnungs- bzw. Programmierungsaufwand (in NISTRA) gelöst werden.¹²⁹ Für die Anwendung in der Praxis müssen daher im Normalfall „nur“ noch folgende Daten erhoben werden:

- Veränderung der Fzkm differenziert nach Autobahn, ausserorts und innerorts und nach bebautem bzw. unbebautem Gebiet (und wenn möglich nach Fahrzeugkategorien)
 - Die für die Bewertung relevante Differenzierung der Emission nach bebauten bzw. unbebauten Gebiet wird meist vereinfachend wie folgt berücksichtigt: Als im bebauten Gebiet emittiert gelten alle Fzkm innerorts sowie 22% der Fzkm auf Autobahnen. Entsprechend gelten 78% der Emissionen auf Autobahnen sowie alle Emissionen ausserorts als im unbebauten Gebiet ausgestossen. Liegen bessere Datengrundlagen vor, ist es möglich, die Anteile der Fzkm auf Autobahnen anzupassen und auch die Fzkm innerorts und ausserorts genauer auf bebautes und unbebautes Gebiet aufzuteilen.
 - Zudem sind weitere Differenzierungen z.B. nach Geschwindigkeit (Stop-and-go versus flüssiger Verkehr) oder Steigungen möglich, um entsprechend differenzierte Emissionsfaktoren anwenden zu können.
- Investitionskosten (für die Berechnung der Bauemissionen) sowie deren Aufteilung nach bebautem und unbebautem Gebiet.
- Allenfalls zusätzlich die Veränderung der Fzkm auf Umwegfahrten während der Bau-phase (wenn möglich differenziert nach Fahrzeugkategorien) – dies wird in der Praxis aber oft vernachlässigt.

Die Veränderung der Fzkm nach Strassentyp werden anschliessend mittels der Emissionsfaktoren des HBEFA in Schadstoffemissionen umgerechnet (geschieht in NISTRA au-

¹²⁹ Es ist wiederum geplant, die Vorgaben der Norm SN 641 828 in eNISTRA zu übernehmen, so dass viele detaillierte und komplizierte Berechnungen dem Benutzer abgenommen werden.

tomatisch). Meist genügt als Differenzierung die Aufteilung der Fzkm nach Autobahn, ausserorts und innerorts und wenn möglich nach Fahrzeugkategorien. Dies ist mit gängigen Verkehrsmodellen ohne grössere Probleme möglich.

Die Investitionskosten liegen bei einer KNA ohnehin vor, so dass diese nur noch nach bebautem und unbebautem Gebiet aufgeteilt werden müssen, was relativ einfach möglich ist (und auch grob erfolgen kann). Auf die Fzkm für Umwegfahrten in der Bauphase kann je nach Projekt auch verzichtet werden bzw. die Abschätzung kann grob erfolgen.

Eine weitere Vereinfachung ist deshalb nicht nötig, da die für die Bewertung minimal benötigten Inputdaten (Fzkm nach Strassentyp und Investitionskosten nach bebaut /unbebaut) für eine plausible Bewertung ohnehin erhoben werden müssen.

Die Differenzierung der Fzkm nach den einzelnen Fahrzeugkategorien dürfte oft nicht relevant sein. Allenfalls ist eine Differenzierung nach Personen- und Güterverkehr sinnvoll – vor allem wenn der Güterverkehrsanteil vom Schweizer Durchschnitt deutlich abweicht. Liegen differenzierte Daten aber ohnehin vor, sind diese zu verwenden.

3.6 Anwendungsbeispiel

Die Veränderung der Fzkm durch die Umfahrungsstrasse wird aus *Tab. 1* in Kapitel 1.8 übernommen und in Teil I der folgenden Tabelle nochmals dargestellt. Insgesamt nehmen die Fzkm um 73 Mio. Fzkm zu.

In Teil II der *Tab. 25* werden die Emissionsfaktoren für das Jahr 2015 aus dem HBEFA bzw. aus *Tab. 14* (für Zink) übernommen. Aus den Teilen I und II werden in Teil III der *Tab. 25* die Emissionen der drei Schadstoffe PM₁₀, NO_x und Zink berechnet, wobei ausser bei Zink nach innerorts, ausserorts und Autobahn differenziert wird. Die Emissionen aller Schadstoffe nehmen zu: Es werden 2015 2 t PM₁₀ mehr ausgestossen, 24 t NO_x und 0.5 t Zink.

In Teil IV der *Tab. 25* werden die Kosten berechnet. Dazu werden zuerst in der zweiten Spalte die Kostensätze aus *Tab. 20* übernommen (Gesundheitskosten mit Basis-VOSL). Mit diesen Kostensätzen werden Zeile für Zeile die Kosten berechnet, wobei es aufgrund des Kostensatzes von Null keine lokalen Schäden im unbebauten Gebiet gibt.

Gesamthaft nehmen die Kosten der Luftverschmutzung um 2.4 Mio. CHF ab – trotz der Zunahme der Fzkm und der Emissionen.¹³⁰ Grund dafür ist, dass die PM₁₀-Emissionen im bebauten Gebiet und damit die lokalen Schäden abnehmen, während die Zunahme der Emissionen im unbebauten Gebiet zu keinen lokalen Schäden führt. Die Abnahme der lokalen Schäden ist so ausgeprägt, dass sie auch die zusätzlichen Kosten der regionalen Schäden und der Vegetationsschäden mehr als kompensieren kann.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Verwendung der nach Bebauung differenzierten Kostensätze sehr wichtig sein kann für die Bewertung der Luftverschmutzung. Wären durchschnittliche Kostensätze verwendet worden, so wäre eine Zunahme der Luftverschmutzung um 2.2 Mio. CHF berechnet worden – anstatt einer Abnahme um 2.4 Mio. CHF.

¹³⁰ Mit dem tieferen bzw. höheren VOSL nehmen die Kosten der Luftbelastung um 1.1 bzw. 3.7 Mio. CHF ab.

Tab. 25 Berechnung der Kosten der Luftbelastung während der Betriebsphase anhand eines fiktiven Beispiels für das Jahr 2015

I) Mio. Fzkm	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Innerorts	-50		-1.0	-2.0	-4.0	-3.0	-60.0
Ausserorts	100		2.0	4.0	8.0	6.0	120.0
Autobahn	10		0.2	0.4	1.0	1.0	12.6
Total	60		1.2	2.4	5.0	4.0	72.6

II) Emissionsfaktoren in g / Fzkm	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
PM ₁₀	Innerorts	0.0442	0.3578	0.4839	0.0100	0.0693	0.4102
	Ausserorts	0.0341	0.1762	0.2289	0.0070	0.0591	0.1851
	Autobahn	0.0522	0.1243	0.1620	0.0110	0.0823	0.1327
NO _x	Innerorts	0.3550	7.9881	9.3580	0.0746	0.6812	5.4638
	Ausserorts	0.2914	4.0406	4.9569	0.1185	0.7702	2.8295
	Autobahn	0.3673	2.9920	3.7735	0.4394	1.2450	2.2176
Zink	0.0029	0.0494	0.0490	0.0015	0.0077	0.0486	

III) Emissionen in t	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
PM ₁₀	1.73	-	0.01	0.01	0.28	0.01	2.03
Innerorts	-2.21	-	-0.48	-0.02	-0.28	-1.23	-4.22
Ausserorts	3.41	-	0.46	0.03	0.47	1.11	5.48
Autobahn	0.52	-	0.03	0.00	0.08	0.13	0.77
NO _x	15.07	-	1.31	0.50	4.68	2.80	24.36
Innerorts	-17.75	-	-9.36	-0.15	-2.72	-16.39	-46.37
Ausserorts	29.14	-	9.91	0.47	6.16	16.98	62.67
Autobahn	3.67	-	0.75	0.18	1.25	2.22	8.07
Zink	0.17		0.06	0.00	0.04	0.19	0.47

IV) Kosten in Mio. CHF	Kostensätze	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Gesundheitskosten		-0.83		-0.38	-0.01	-0.07	-0.95	-2.24
Lokale Schäden		-1.67	-	-0.38	-0.02	-0.21	-0.96	-3.23
Innerorts (bebaut)	798'000	-1.76	-	-0.39	-0.02	-0.22	-0.98	-3.37
Autobahn bebaut	798'000	0.09	-	0.01	0.00	0.01	0.02	0.14
Unbebaut	-	-	-	-	-	-	-	-
Regionale Schäden	488'000	0.84	-	0.00	0.01	0.14	0.01	0.99
Gebäudeschäden		-0.29		-0.07	-0.00	-0.04	-0.17	-0.56
Lokale Schäden		-0.29	-	-0.07	-0.00	-0.04	-0.17	-0.56
Innerorts (bebaut)	139'000	-0.31	-	-0.07	-0.00	-0.04	-0.17	-0.59
Autobahn bebaut	139'000	0.02	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Unbebaut	-	-	-	-	-	-	-	-
Regionale Schäden	2'200	0.004	-	0.000	0.000	0.001	0.000	0.004
Ernte, Wald, Biodiversität	7'000	0.11		0.01	0.00	0.03	0.02	0.17
Boden	431'000	0.07		0.03	0.00	0.02	0.08	0.20
Total		-0.94		-0.41	-0.01	-0.06	-1.02	-2.43

PW = Personenwagen, Bus = Linienbus ÖV, GW = Gesellschaftswagen, MZ = Motorisierte Zweiräder, Li = Lieferwagen, SNF = schwere Nutzfahrzeuge

Für die Berechnung der **Bauemissionen** wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der gesamte Bau im Jahr 2015 erfolgt, tatsächlich müssten die Baukosten auf die mehrjährige Bauzeit aufgeteilt werden und die Bauemissionsfaktoren müssten entsprechend angepasst werden.

Die Investitionskosten betragen 400 Mio. CHF (vgl. Tab. 1). Gemäss Tab. 15 muss daher mit Bauemissionen von 51.4 t PM₁₀ gerechnet werden. Davon fallen 33% (vgl. Tab. 1) oder 17.0 t im bebauten Gebiet an und 67% oder 34.4 t im unbebauten Gebiet. Folglich betragen die durch den Bau entstehenden Kosten (siehe Tab. 20):

Lokale Schäden im bebauten Gebiet	
17.0 * (798'000 + 139'000) =	15.89 Mio. CHF
Lokale Schäden im unbebauten Gebiet	
34.4 * (0 + 0) =	0.00 Mio. CHF
Regionale Schäden	
51.4 * (488'000 + 2'200) =	25.18 Mio. CHF
Totale Schäden	41.07 Mio. CHF

Es ist zu beachten, dass diese 41.1 Mio. CHF und die -2.4 Mio. CHF von Tab. 25 nicht direkt vergleichbar sind, weil die Entlastung während der Betriebsphase jährlich anfällt, während die Bauemissionen nur einmalig auftreten. Trotzdem zeigt das Beispiel, dass die Bauemissionen im Vergleich zur Betriebsphase bedeutend sein können.

3.7 Vergleich mit bisheriger Methodik

Die grundsätzliche Bewertungsmethodik für den Einbezug der Kosten der Luftverschmutzung in die KNA wird mit den durchgeführten Anpassungen nicht verändert. Es werden aber die Kostensätze an die neusten Forschungsergebnisse angepasst. Die folgende Tabelle vergleicht die bisherigen (gemäss bisheriger SN 641 828¹³¹) und die aktualisierten Kostensätze:

- Die Gesundheitsschäden haben um den Faktor 1.9 zugenommen, was insbesondere auf den höheren VOSL zurückzuführen ist, aber auch auf diverse anderen Anpassungen, die in Ecoplan, Infrac (2014) und Infrac, Ecoplan (2019) durchgeführt wurden, wie z.B. die Reduktion der Belastungs-Wirkungs-Beziehung für verlorenen Lebensjahre sowie Anpassungen bei den Emissionen und Immissionen.
- Neu wird gemäss SN 641 820 eine Sensitivität für den VOSL eingeführt, welche deutliche Auswirkungen auf die Kostensätze der Gesundheitsschäden haben.
- Zudem werden neu alle Kostensätze für lokale Schäden im unbebauten Gebiet auf Null gesetzt (bei den Gesundheits- und Gebäudeschäden). Dafür sind die Kostensätze für die lokalen Schäden im bebauten Gebiet entsprechend höher.
- Gesamthaft haben sich die Kostensätze für Gebäudeschäden leicht reduziert (-5%). Zudem hat sich die Verteilung auf regionale und lokale Schäden deutlich geändert, da neu nur noch 3.4% der Kosten regional anfallen.
- Neu werden im Kostensatz für NO_x auch die Biodiversitätsverluste miteinbezogen, die bisher fehlten. Entsprechend fällt der Kostensatz für NO_x neu mit 7'000 CHF / t NO_x deutlich höher aus als bisher (3'100 CHF / t NO_x). Würden die Biodiversitätsverluste weiterhin nicht einbezogen, würde der Kostensatz sich nur wenig erhöhen (auf 3'400 CHF / t NO_x).

¹³¹ Zu beachten ist, dass der Grundlagenbericht Ecoplan (2007) sich noch auf Zahlen für das Jahr 2000 bezieht, dass aber die Norm SN 641 828 von 2009 auf Zahlen für das Jahr 2005 aus Ecoplan, Infrac (2008, Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten) beruht.

Tab. 26 Vergleich der Kostensätze gemäss bisherigem und aktualisiertem Vorgehen

			Schäden Total	regionale Schäden	lokale Schäden		
					Durch- schnitt	bebautes Gebiet	unbebautes Gebiet
Primäres PM ₁₀	Gesundheitsschäden	neu	836'000	488'000	348'000	798'000	-
		alt	446'000	260'000	186'000	345'000	46'000.00
		neu / alt	1.87	1.88	1.87	2.31	-
	Gebäudeschäden	neu	63'000	2'200	61'000	139'000	-
		alt	66'000	21'000	45'000	84'000	11'000.00
		neu / alt	0.95	0.10	1.36	1.65	-
NO _x	Ernte, Wald, Biodiversität	neu	7'000	7'000	-	-	-
		alt	3'100	3'100	-	-	-
	neu / alt	2.26	2.26				
Zink	Bodenqualität	neu	431'000	431'000	-	-	-
		alt	919'000	919'000			
		neu / alt	0.47	0.47			

- Der Kostensatz für Zink hat sich gut halbiert. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Emissionsfaktoren für Zink sich gut verdoppelt haben, weil neben den Reifen- und Bremsabrieb auch die Emissionen aus der Verbrennung miteinbezogen werden können. Damit entfällt aber die bisherige Approximation der Zinkemissionsfaktoren auf innerorts, ausserorts und Autobahn, weil die bisherige Approximation auf Abrieb beruht und damit nicht mehr anwendbar ist (der Anteil der Abriebemissionen im Emissionsfaktor ist nicht bekannt).

Da die gesamten Bodenschäden in der Schweiz nach wie vor in der gleichen Grössenordnung liegen (etwas höher wegen Preisentwicklung und neuem, etwas höheren Kostensatz), führen die höheren Emissionen zu einem tieferen Kostensatz pro Tonne Zink.

- In der Norm werden zudem die durchschnittlichen Kostensätze für lokale Schäden nicht mehr angegeben, da davon ausgegangen werden kann, dass die Differenzierung nach bebautem und unbebautem Gebiet jederzeit möglich ist.

Neben der Anpassung der Kostensätze wurden folgende Veränderungen vorgenommen:

- Neu wird die Aufteilung der Fzkm nach Autobahn, ausserorts und innerorts gefordert, da sich in den letzten Jahren in der Praxis gezeigt hat, dass diese Aufteilung mit den gängigen Verkehrsmodellen problemlos erhebbbar ist.
- Die Bauemissionen wurden ebenfalls aktualisiert, wobei der neue Kostensatz trotz Aktualisierung aller Inputdaten dem bisherigen Kostensatz sehr ähnlich ist, womit dessen Grössenordnung bestätigt wird.
- Wie erwähnt wurden die Emissionsfaktoren für Zink angepasst. Dabei wurden neben den Emissionen durch Abrieb von Reifen und Bremsen auch die Emissionen durch Verbrennung ergänzt.
- Auch die Veränderung der Kostensätze über die Zeit wurde mit neueren Datengrundlagen (insbesondere zum Bevölkerungswachstum und zur Zunahme der Gebäude) aktualisiert.
- Auf eine vereinfachte Methodik wird verzichtet, da die Anwendung der Methodik in der Praxis sehr einfach ist und die bisherigen Vereinfachungen aufgrund der Datenverfügbarkeit aus den Verkehrsmodellen nicht mehr erforderlich sind.

4 Klima

4.1 Einleitung

Die Emission von Treibhausgasen führt zu einer Klimaerwärmung. Es werden gravierende Folgen (Zunahme von Extremwetterereignisse wie Überschwemmungen, Wirbelstürme, Dürren sowie ein Anstieg des Meeresspiegels, Gletscherabbrüche in den Alpen und infolgedessen Migrationsbewegungen von Menschen usw.) befürchtet.

Da es sich beim Klimawandel um ein weltweites Phänomen handelt, spielt es keine Rolle, wo genau die Emissionen ausgestossen werden. Die Bewertung ist deshalb relativ einfach und kann auf den Treibhausgas-Emissionen (Mengengerüst) und einem Kostensatz pro Emissionseinheit (Wertgerüst) beruhen.

4.2 Mengengerüst

4.2.1 Benötigte Inputdaten

Um die Auswirkungen auf den Klimawandel abschätzen zu können, muss der Ausstoss von Treibhausgasen ermittelt werden. Dabei sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) zu berücksichtigen.

Wie bei der Luftverschmutzung kann das Mengengerüst aufgrund der Fahrleistungen (Fzkm) aus dem Verkehrsmodell und aufgrund von Emissionsfaktoren pro Fzkm bestimmt werden. Die projektabhängigen Inputdaten sind deshalb die Veränderungen der **Fahrzeugkilometer** (Fzkm) – wie bei der Luftbelastung differenziert nach Autobahn, ausserorts und innerorts. Nach Möglichkeit sind die Fzkm zudem nach Personen- und Güterverkehr zu unterscheiden, falls möglich sogar nach den sechs Fahrzeugkategorien in *Tab. 14*. Es ist dieselbe Differenzierung wie bei der Bewertung der Luftbelastung zu wählen, wobei auf die Differenzierung nach Emission im bebauten bzw. unbebauten Gebiet verzichtet werden kann, weil es aufgrund des globalen Phänomens keinen Sinn ergibt, den Ort der Emissionen zu lokalisieren.

Bei der Bestimmung des Mengengerüsts ist zu berücksichtigen, dass während der **Bauphase** Umwegfahrten (Umleitungen) nötig sein können, welche die Fahrtstrecke und damit die Fzkm und Treibhausgasemissionen erhöhen.

Was die Treibhausgasemissionen durch den Bau betrifft, so werden diese im Rahmen der vor- und nachgelagerten Effekte in Kapitel 0 berücksichtigt.

4.2.2 Berechnung des Mengengerüsts

Die Fahrzeugkilometer sind mittels Emissionsfaktoren pro Fzkm (wiederum differenziert nach Autobahn, ausserorts und innerorts und wenn möglich nach den Fahrzeugkategorien) in Treibhausgasemissionen umzurechnen. Für die Emissionsfaktoren liegen Prognosen aus dem HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren¹³²) bis zum Jahr 2035 vor.¹³³ Die Emissionen der drei klimarelevanten Gase CO₂, CH₄ und N₂O können mittels dem GWP (global warming potential) von 1 (für CO₂), 25 (CH₄) und 298 (N₂O) in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden.¹³⁴ Gemäss HBEFA (bzw. der Auswertung des HBEFA in NISTRA) stammen

¹³² Infrac (2017), Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 3.3.

¹³³ Die momentan verfügbare Version 3.3 enthält Prognosen bis 2035. Die neue Version 4.1, die Mitte 2019 publiziert wird, stellt Prognosen bis 2060 zur Verfügung.

¹³⁴ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 307 bzw. UBA (2019), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze, S. 9.

98.2% bis 99.8% der CO₂-Äquivalente vom CO₂ (2015 – 2035 für alle Fahrzeugkategorien ausser für die motorisierten Zweiräder: 93.4% bis 99.1%).

4.2.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Bei Bewertungen in der Schweiz wird bisher meist mit durchschnittlichen Emissionsfaktoren aus dem HBEFA für Autobahnen, Ausserorts- und Innerortsstrassen gerechnet, die auch in NISTRA implementiert wurden. Das HBEFA erlaubt diverse weitere Differenzierungen z.B. nach Geschwindigkeiten und Steigungen. Solche Verfeinerungen sind natürlich möglich. In der Praxis wurde unseres Wissens jedoch nie weiter differenziert als nach Autobahnen, Ausserorts- und Innerortsstrassen. Es empfiehlt sich, dieselbe Differenzierung wie bei der Bewertung der Luftbelastung zu wählen (wobei wie erwähnt auf die Differenzierung nach Emission im bebauten bzw. unbebauten Gebiet verzichtet werden kann).

4.3 Wertgerüst

4.3.1 Bewertungsmethode

Die Herleitung von CO₂-Kostensätzen kann über den Vermeidungskosten-Ansatz¹³⁵ oder den Schadenskosten-Ansatz¹³⁶ erfolgen. Die Wahl der Bewertungsmethodik wird ausführlich in Ecoplan, Infrac (2014)¹³⁷ besprochen und in Infrac, Ecoplan (2019)¹³⁸ aktualisiert. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus werden im folgenden Kapitel 4.3.2 kurz zusammengefasst. Wie sich dort zeigt, wird ein Vermeidungskostensatz angewendet.

Es werden in der Basisrechnung die Grenzkosten der Vermeidung ausgewiesen. Der Vermeidungskostensatz entspricht den Kosten, die entstehen für die Vermeidung der letzten Tonne CO₂. Ist die Vermeidung optimal gewählt, entsprechen die Grenzvermeidungskosten gerade den Grenzschadenskosten.¹³⁹

4.3.2 Bestimmung des Wertgerüsts

Ecoplan, Infrac (2014) empfiehlt, einen CO₂-Kostensatz basierend auf globalen Vermeidungskosten zur Erreichung des 2-Grad-Ziels zu verwenden: Das Klima soll sich im weltweiten Durchschnitt nicht um mehr als 2 Grad Celsius über das Niveau vor der Industrialisierung erwärmen. Dieses Ziel wurde wissenschaftlich definiert und von der Politik akzeptiert.¹⁴⁰ In der Schweiz beruht das CO₂-Gesetz ebenfalls auf diesem 2-Grad-Ziel. Um es zu erreichen, sollte die CO₂-Atmosphärenkonzentration 450 ppm CO₂-Äquivalente nicht überschreiten (ppm = parts per million).

Der in Infrac, Ecoplan (2019) vorgeschlagene **Kostensatz** beträgt **121.5 CHF / t CO₂-Äquivalent** im Jahr 2015.¹⁴¹ Grundlage dafür bildet die Metastudie von Kuik et al. (2009)¹⁴². Der Wert basiert auf einer Kostenbasis von 225 €₂₀₀₅ für die Grenzvermeidungskosten von CO₂

¹³⁵ Gemäss SN 641 820, Ziffer 8.37 gilt: Mit dem Vermeidungskosten-Ansatz werden Güter bewertet, für die es keinen Markt gibt. Dabei werden die Kosten von Massnahmen abgeschätzt, welche die Entstehung von Schäden verhindern.

¹³⁶ Gemäss SN 641 820, Ziffer 8.28 gilt: Mit dem Schadenskosten-Ansatz werden Güter bewertet, für die es keinen Markt gibt. Die Abschätzung des entstehenden Schadens erfolgt entweder über Hedonic Pricing oder über den Zahlungsbereitschaftsansatz.

¹³⁷ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 293 – 313.

¹³⁸ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten, S. 65-66.

¹³⁹ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 295-296.

¹⁴⁰ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 295.

¹⁴¹ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, S. 66.

¹⁴² Kuik et al. (2009), Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis.

im Jahr 2050. Zudem nehmen die Vermeidungskosten über die Zeit mit 3% pro Jahr zu.¹⁴³ Entsprechend diskontiert auf das Jahr 2015 sowie in CHF₂₀₁₅ umgerechnet ergibt sich der angegebene Kostensatz von 121.5 CHF / t CO₂-Äquivalent.

Die Herleitung des Vermeidungskostensatzes ist mit Unsicherheiten behaftet. Deshalb wird in Infrac, Ecoplan (2019) auch eine **Sensitivität** mit einem Kostensatz von **69 und 214 CHF / t CO₂-Äquivalent** im Jahr 2015 berechnet. Diese Werte basieren ebenfalls auf Kuik et al. (2009) und stellen die von Kuik et al. dargestellten Minimal- und Maximalwerte dar, die um 1 Standardabweichung vom zentralen Wert abweichen.¹⁴⁴

Dieselbe Grundlage für den CO₂-Kostensatz (Kuik et al. 2009) wird gemäss Infrac, Ecoplan (2019¹⁴⁵) auch in der deutschen Methodenkonvention 2.0 sowie in anderen internationalen Studien verwendet.

Als Bewertungsalternative steht die Möglichkeit zur Verfügung, die **Schadenskosten** des Klimawandels zu ermitteln, indem man die durch den Klimawandel verursachten Schäden abschätzt und monetarisiert. Dies ist zwar grundsätzlich möglich, aber mit grossen Unsicherheiten verbunden (Schätzungen schwanken zwischen 8 und mehr als 1'000 CHF pro Tonne CO₂¹⁴⁶). Deshalb wird oft von der Verwendung von Schadenskosten abgeraten. Hingegen wird in der aktuellen deutschen Methodenkonvention 3.0 interessanterweise vom Vermeidungs- auf den Schadenskostenansatz gewechselt.¹⁴⁷ Dabei wird ein Kostensatz von 180 €₂₀₁₆ bzw. 195 CHF₂₀₁₅ pro t CO₂ vorgeschlagen. Dies liegt innerhalb der Bandbreite der oben beschriebenen Sensitivität von 69 bis 214 CHF / t CO₂. In der Methodenkonvention wird aber eine Sensitivität mit 640 €₂₀₁₆ bzw. 698 CHF₂₀₁₅ pro t CO₂ empfohlen. Der Unterschied zum Basiswert von 180 €₂₀₁₆ pro t CO₂ ist, dass die reine Zeitpräferenzrate von 1% auf 0% reduziert wird, womit der Kostensatz deutlich steigt. Die beiden in der deutschen Methodenkonvention 3.0 verwendeten Werte für die Schadenskosten basieren beide auf Anthoff (2007).¹⁴⁸

Bisher wurde keine Sensitivitätsanalyse für den Klimakostensatz vorgeschrieben. In Ecoplan (2007, S. 70) wurde jedoch erwähnt, dass bei einem Projekt, bei dem die Klimakosten einen wesentlichen Einfluss auf das Endresultat haben, eine Sensitivität mit tieferem oder höherem Kostensatz sinnvoll ist. In den Studien für das ARE (Ecoplan, Infrac 2014 und Infrac, Ecoplan 2019) wird ebenfalls auf die Unsicherheiten beim Klimakostensatz hingewiesen und eine Sensitivitätsanalyse als sinnvoll beurteilt. In der Praxisanwendung der SN828 wird es häufig Projekte geben, bei denen die Auswirkungen auf die Klimaschäden nur relativ gering sind, so dass die Sensitivitäten keinen massgeblichen Einfluss auf das Endresultat haben. Allerdings werden auch Projekte zu bewerten sein, deren Klimaauswirkungen von Bedeutung sind.¹⁴⁹ In NISTRA können durch einen Knopfdruck Standardsen-

¹⁴³ Hauptgrund dafür sei die Zeitpräferenz (gemäss Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 301 und 312 und anderer Autoren). Gemäss Infrac, Ecoplan, (2014, S. 301-302 und 312) ist das Abweichen von der Diskontrate von 2% gemäss SN 641 821 für das Klima zulässig, weil es sich beim Klima um ein globales Phänomen handelt und weil das internationale Zinsniveau höher ist als in der Schweiz. Andere Autoren (Grundlagen zu deutscher Methodenkonvention 3.0) schreiben jedoch, dass die Zunahme des Kostensatzes nichts mit Diskontierung zu tun habe, sondern damit, dass die Kosten der Vermeidung mit der Zeit steigen, da zuerst die einfachen Vermeidungsoptionen genutzt werden und mit der Zeit immer teurere zum Einsatz kommen müssen.

¹⁴⁴ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 300-301.

¹⁴⁵ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, S. 65-66.

¹⁴⁶ Infrac, Ecoplan (2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015, S. 66 und Ecoplan, Infrac 2014, Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 295 und 298) sprechen von 35 bis mehr als 1000 CHF pro t CO₂. UBA (2005, Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externen Umweltkosten, S. 58) erwähnt Werte zwischen 5€ und 600€ bzw. 8 und ca. 1'000 CHF pro t CO₂.

¹⁴⁷ UBA (2019), Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze, S. 9.

¹⁴⁸ Anthoff D. (2007), «Report in the marginal external damage costs inventory of greenhouse gas emissions».

¹⁴⁹ Eine Ecoplan-eigene Auswertung von 12 Studien, in denen 22 Projektvarianten mit NISTRA (Version 2010) untersucht wurden hat gezeigt, dass der Klimaindikator durchschnittlich 0.5% der absoluten Effekte aller Indikatoren ausmacht, in einzelnen Projekten aber bis zu 4.2.% der Effekte auf sich vereinen kann – und dies noch basierend auf dem älteren, ca. 2- bis 3-mal tieferen Kostensatz (Verhältnis ändert sich über Zeit). Es gibt also durchaus Projekte, bei denen der Klimakostensatz ins Gewicht fällt.

sitivitäten berechnet werden. Es stellt sich die Frage, ob bei der Berechnung dieser Standard-Sensitivitäten auch eine Sensitivität für den Klimakostensatz mitberechnet werden soll. Wir empfehlen dies, weil andernfalls wohl selbst bei Projekten mit hoher Relevanz für das Klima auf die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse verzichtet würde. Nach Rücksprache mit der Begleitgruppe wird deshalb in der Norm neu eine Sensitivitätsanalyse für den Klimakostensatz verlangt.

Der untere Wert für die Sensitivitätsrechnung beläuft sich gemäss den oben erwähnten Bandbreiten für den Vermeidungskosten-Ansatz auf 69 CHF / t CO₂. Für die Bestimmung des oberen Wertes gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder man verwendet die Schwankungsbreite der Vermeidungskosten und kommt daher zu einem Kostensatz von 214 CHF / t CO₂ wie er auch vom ARE eingesetzt wird. Oder man verwendet den Schadenskostensatz aus Deutschland.¹⁵⁰ Dieser scheint mit 698 CHF / t CO₂ deutlich höher zu sein. Doch nimmt der Vermeidungskostensatz mit 3% pro Jahr zu, der Schadenskostensatz jedoch nur mit 0.39% pro Jahr.¹⁵¹ Bereits bei einem Projekt mit Eröffnungszeitpunkt 2042 und konstanten CO₂-Emissionen fällt daher der Nettobarwert über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren¹⁵² mit dem vermeintlich tieferen Vermeidungskostenansatz höher aus als mit dem Schadenskostenansatz. Zudem beruht der Schadenskostensatz auf einer Studie (Anthoff 2007), die in der Methodenkonvention 2.0 im Vergleich zum Vermeidungskosten-Ansatz nicht empfohlen wurde. Der Vermeidungskostenansatz basiert auf einer Studie von Kuik et al. (2009), die auch den ARE-Berechnungen zugrunde liegt. In Absprache mit der Begleitgruppe und in Konsistenz zu den ARE-Studien wird deshalb empfohlen, als obere Bandbreite den Vermeidungskostensatz von 214 CHF / t CO₂ zu verwenden.

4.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Im Gegensatz zur Luftverschmutzung spielt der Ort der Emission bei Treibhausgasen keine Rolle, da es sich bei der Klimaerwärmung um ein globales Phänomen handelt. Deshalb darf keine örtliche Anpassung des Kostensatzes erfolgen.

4.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand

Die hier angegebenen Werte beziehen sich alle auf den Preisstand des Jahres 2015. Wird die KNA mit einem anderen Preisstand durchgeführt, sind die Werte mit der **Inflation** (Konumentenpreisindex) auf den Preisstand der KNA anzupassen. Begründung hierfür ist die Überlegung, dass sich die Vermeidungskosten in etwa wie das allgemeine Preisniveau verhalten.

4.4 Veränderung über die Zeit

Die Emissionen von Treibhausgasen werden in den nächsten Jahren gemäss dem HBEFA abnehmen. Zwischen 2015 und 2035 reduzieren sich die Emissionsfaktoren für CO₂-Äquivalente um ca. 22% (je nach Fahrzeugkategorie um 6% (schwere Nutzfahrzeuge) bis 26% (Personenwagen)). Dies ist bei einer KNA zu berücksichtigen. Für die Veränderung der Emissionsfaktoren im Zeitverlauf können die Vorgaben aus der aktuellsten Version des HBEFA übernommen werden. Nach dem letzten Jahr im HBEFA (momentan 2035, in Kürze jedoch 2060) wird wie bisher Konstanz angenommen.

¹⁵⁰ Prinzipiell könnte man auch den Basis-Schadenskostensatz von 195 CHF / t CO₂ verwenden, doch liegt dieser innerhalb der Schwankungsbreite des Vermeidungskostensatzes und wird deshalb nicht empfohlen.

¹⁵¹ Aus dem angegebenen Kostensatz des UBA für das Jahr 2050 lässt sich eine durchschnittliche jährliche Zunahme zwischen 2016 und 2050 von 0.39% errechnen.

¹⁵² Gemäss SN 641 820 (Ziffer 12) wird in einer KNA üblicherweise eine Nutzungsphase von 40 Jahre betrachtet.

Beim Wertgerüst wurde bereits in Kapitel 4.3.2 erläutert, dass sich der Vermeidungskostensatz pro Jahr um 3% erhöht (dies gilt auch für die beiden tiefen bzw. hohen Vermeidungskostensätze, die in der Sensitivitätsanalyse verwendet werden).

4.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen

Die dargestellte Methode ist bereits sehr einfach, da im Wesentlichen nur die Fahrzeugkilometer differenziert nach Autobahn, ausserorts und innerorts und falls möglich nach Personen- und Güterverkehr bzw. nach sechs Fahrzeugkategorien benötigt werden. Eine weitere Vereinfachung ist nicht nötig.

4.6 Anwendungsbeispiel

Die Veränderung der Fzkm im Jahr 2015 nach innerorts, ausserorts und Autobahn wurde bereits in *Tab. 1* dargestellt (siehe Kapitel 1.8) und wird in Teil I von *Tab. 27* nochmals abgebildet. Mit den Emissionsfaktoren aus dem HBEFA (bzw. hier indirekt aus NISTRA übernommen) (in Teil II von *Tab. 27*) werden die Emissionen von CO₂-Äquivalenten berechnet, die um gut 12'000 t zunehmen (Teil III von *Tab. 27*). Mit dem Kostensatz von 121.5 CHF pro Tonne (im Jahr 2015) wird in Teil IV von *Tab. 27* schliesslich das Resultat ermittelt. Die Zunahme der Treibhausgasemissionen führt zu Kosten von knapp 1.5 Mio. CHF im Jahr 2015.

Tab. 27 Berechnung der Klimakosten anhand eines fiktiven Beispiels für das Jahr 2015

I) Mio. Fzkm		PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Innerorts		-50		-1.0	-2.0	-4.0	-3.0	-60.0
Ausserorts		100		2.0	4.0	8.0	6.0	120.0
Autobahn		10		0.2	0.4	1.0	1.0	12.6
Total		60		1.2	2.4	5.0	4.0	72.6

II) Emissionsfaktoren in g / Fzkm		PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
CO ₂ -Äquivalente	Innerorts	201.6	1'186.8	1'127.5	92.1	230.5	975.4	
	Ausserorts	159.4	866.3	818.6	100.5	205.3	792.3	
	Autobahn	183.9	658.2	726.2	126.1	244.6	723.6	

III) Emissionen in t CO ₂ -Äquivalente		PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Innerorts		-10'081	-	-1'127	-184	-922	-2'926	-15'241
Ausserorts		15'942	-	1'637	402	1'643	4'754	24'378
Autobahn		1'839	-	145	50	245	724	3'003
Total t CO₂-Äquivalente		7'701	-	655	268	965	2'551	12'141

IV) Kosten in Mio. CHF		Kostensatz	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Innerorts		121.5	-1.22	-	-0.14	-0.02	-0.11	-0.36	-1.85
Ausserorts		121.5	1.94	-	0.20	0.05	0.20	0.58	2.96
Autobahn		121.5	0.22	-	0.02	0.01	0.03	0.09	0.36
Total Klimaschäden in Mio. CHF			0.94	-	0.08	0.03	0.12	0.31	1.48

PW = Personenwagen, Bus = Linienbus ÖV, GW = Gesellschaftswagen, MZ = Motorisierte Zweiräder, Li = Lieferwagen, SNF = schwere Nutzfahrzeuge

4.7 Vergleich mit bisheriger Methodik

Beim Mengengerüst wird wie bisher auf dem HBEFA abgestützt. Neu wird jedoch zwingend die Differenzierung nach Autobahn, ausserorts und innerorts verlangt, da sich in den letzten Jahren gezeigt hat, dass diese Differenzierung problemlos möglich ist. Zudem wurde das «global warming potential» an neue Forschungsergebnisse angepasst (neu 1, 25 und 298 für CO₂, CH₄ und N₂O statt wie bisher 1, 23 und 296).

Beim Wertgerüst wurde bisher in der SN 641 828 ein Kostensatz von 40 CHF / t CO₂ im Jahr 2010 vorgeschrieben, der pro Jahr um 2.5 CHF / t CO₂ zunimmt und somit 2015 52.5 CHF / t CO₂ betragen hat. Der neue Kostensatz ist mit 121.5 CHF / t CO₂ etwa 2.3-mal höher als bisher.¹⁵³ Der neue Kostensatz nimmt um 3% pro Jahr zu und beträgt somit im Jahr 2050 342 CHF / t CO₂, was 2.4-mal über dem bisher verwendeten Kostensatz von 140 CHF / t CO₂ für das Jahr 2050 liegt.

Diese absehbaren Anpassungen wurden im NISTRA 2017 bereits vorweggenommen.

Noch nicht in NISTRA integriert ist jedoch die letzte vorgeschlagene Anpassung, nämlich auch für den Klimakostensatz eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

¹⁵³ Bei der Berechnung des Faktors wurde auch das unterschiedliche Preisniveau der beiden Kostensätze berücksichtigt.

5 Bodenversiegelung

5.1 Einleitung

Der Verkehr nimmt rund 30% der Schweizer Siedlungsfläche in Anspruch; 88% davon entfallen auf den Strassenverkehr.¹⁵⁴ Die Böden spielen als Nährstoff- und Wasserspeicher sowie als Puffer und Lebensraum eine zentrale Rolle im Naturhaushalt. Verkehrsflächen verhindern zudem andere Nutzungen. Eine der Nachhaltigkeit verpflichtete Planung der Strasseninfrastruktur sollte daher einen möglichst geringen Flächenbedarf anstreben. Dadurch wird sichergestellt, dass die Bodenversiegelung (oder der Flächenverbrauch) so gering wie möglich ausfällt.

In der Schweiz wird die Bodenversiegelung (oder Habitatverlust) im Rahmen von Studien für das ARE quantifiziert. Die Grundlagenstudie wurde von Econcept und Nateco (2004)¹⁵⁵ für das Jahr 2000 erstellt und wurde in den Folgejahren jeweils von Infrast fortgeschrieben.¹⁵⁶ Die Basis der Quantifizierung bildet ein Ersatzkostenansatz: Es werden die Kosten für den Ersatz der überbauten Flächen an anderer Stelle ermittelt. In Econcept und Nateco (2004) werden die Kosten des Flächenverbrauchs in der Schweiz durch den Bau von Verkehrswegen zwischen den 1950er/1960er-Jahren und 1998/1999 bestimmt. Dazu wird zuerst mit Hilfe von digitalen dreidimensionalen Luftbildern das Ausmass der Bodenversiegelung durch Verkehrsinfrastrukturen erhoben. Dabei wird zwischen 27 Habitatstypen unterschieden.¹⁵⁷ Im Prinzip haben die Ersatzkosten keinen Zusammenhang mit dem Schaden, der durch die Versiegelung verursacht wird, denn sie können viel grösser oder kleiner als der Schaden sein. Deshalb wären Schadenskosten zu bevorzugen (vgl. SN 641 820, Ziffer 38.1). Der Ersatzkostenansatz stellt im heutigen Zeitpunkt aber die einzige Quantifizierungsmöglichkeit dar und bildet auch die Grundlage der offiziellen Zahlen des ARE. Zudem ist auch gemäss SN 641 820 (Ziffer 38.1) bei ausstehenden Schadenskosten der Ersatzkostenansatz als Alternative vorgesehen.

Im Bereich der Bodenversiegelung werden wir uns deshalb auf die Studien im Auftrag des ARE stützen. Für deren Anwendung muss zuerst das Mengengerüst ermittelt werden: Dabei handelt es sich um die durch das Projekt neu versiegelten Flächen – sowie allenfalls durch das Projekt entsiegelte Flächen (Umwandlung einer Verkehrsfläche in Grünfläche). Danach ist das Wertgerüst zu bestimmen, d.h. ein Kostensatz pro versiegelte Fläche.

5.2 Mengengerüst

5.2.1 Benötigte Inputdaten

Das Mengengerüst umfasst die durch ein Projekt neu versiegelten Flächen sowie allenfalls entsiegelte Flächen. Es ist zu beachten, dass Tunnelbauten nur bei den Ein- und Ausfahrten zu Versiegelungen führen. Die versiegelte Fläche geht aus den Projektunterlagen hervor und kann aus der Länge und Breite der neu gebauten (oder aufgehobenen) Strasse ermittelt werden. Möglicherweise ist die Neubaustrecke in mehrere Abschnitte zu unterteilen, falls sie nicht überall gleich breit ist.

Der Flächenverbrauch umfasst gemäss Econcept und Nateco¹⁵⁸ mehr als nur die rein durch die Strasse versiegelte Fläche, da auch beidseits der Strasse Boden für die Natur verloren geht: Denn einerseits werden für den Bau zusätzliche Flächen links und rechts

¹⁵⁴ Eigene Berechnung basierend auf BFS (2018, Arealstatistik Land Use - Kantone und Grossregionen nach 46 Grundkategorien).

¹⁵⁵ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft.

¹⁵⁶ Letztmals in Infrast, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

¹⁵⁷ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 36 und 51.

¹⁵⁸ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft. S. 20 – 21.

der Strasse benötigt. Und andererseits hat die Strasse einen direkten Einfluss auf deren Umfeld (Bodenverdichtungen¹⁵⁹ und Entwässerung etc.). Der gesamte Flächenbedarf ist abhängig vom Infrastrukturtyp und wird in der folgenden Tabelle dargestellt: Für Autobahnen und Autostrassen wurde aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und der grossen Kurvenradien sowie der häufig hohen Böschungen ein erheblich grösserer Flächenverbrauch gewählt.

Für die Bestimmung der entsiegelten Flächen wird der Einfachheit halber die gleiche Bemessungsgrundlage verwendet (siehe *Tab. 28*). Wird der Flächenverbrauch andernorts durch Ausgleichs- und Ersatzmassnahmen tatsächlich ausgeglichen, sind die entsprechenden Flächen (ohne «Korrekturen» wie in *Tab. 28*) von der versiegelten Fläche in Abzug zu bringen. Dies ist aber nur dann zulässig, wenn bei den Baukosten die Kosten für den Rückbau der Strasse bzw. für die die Ausgleichs- und Ersatzmassnahmen enthalten sind.¹⁶⁰

Tab. 28 Bestimmung des Flächenverbrauchs

Strasstyp	Beschreibung	Flächenverbrauch
Autobahn	Eine Autobahn ist kreuzungsfrei, zwei- oder mehrspurig und hat eine bauliche Richtungstrennung.	Platzbedarf der Strasse plus je doppelte Strassenbreite links und rechts der Strasse
Autostrasse	Eine Autostrasse ist kreuzungsfrei und ein- oder mehrspurig, aber ohne bauliche Richtungstrennung.	Platzbedarf der Strasse plus je einfache Strassenbreite links und rechts der Strasse
übrige Strassen	Diese Kategorie reicht von gut ausgebauten Strassen 1. Klasse (mehr als 6m breit und mit Lastwagen und Bus im Gegenverkehr befahrbar) bis zu weniger gut ausgebauten Strassen 3. Klasse (mind. 2.5m breit, mit Lastwagen und Bus nur einspurig befahrbar).	Platzbedarf der Strasse plus je 10 m links und rechts der Strasse

Quelle: Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft. S. 14 und 21.

Der Beginn der Bodenversiegelung wird mit dem Start der Bauphase gleichgesetzt.¹⁶¹ Deshalb wird die **Bodenversiegelung** nicht nur während der Betriebsphase berücksichtigt, sondern auch **während der Bauphase**.

5.2.2 Berechnung des Mengengerüsts

Für die Ermittlung des Mengengerüsts sind nebst der oben erwähnten Flächenbestimmung keine weiteren Berechnungen erforderlich.

¹⁵⁹ Von Bodenverdichtung wird gesprochen, wenn es durch Aufbringen von hoher Last zu einer Verformung und somit zu einer Veränderung des Bodens kommt (Wikipedia: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bodenverdichtung> – 1.4.2019).

¹⁶⁰ Liegen keine genaueren Kostenschätzungen für die Ersatzmassnahmen vor, können deren Kosten mit der hier beschriebenen Methode abgeschätzt werden. Werden die Ersatzmassnahmen wirklich ergriffen, so sind sie Teil der Baukosten und nicht mehr Teil der Kosten für die Umwelt.

¹⁶¹ Bei einem grösseren Projekt ist dies unter Umständen nicht ganz exakt, da sich die Bodenversiegelung beim Baubeginn meist nicht auf die gesamte Neubaustrecke erstreckt, sondern mit dem Baufortschritt voran schreitet. Oft werden aber schon relativ früh erste (Aushub-) Arbeiten durchgeführt, welche zu einer Versiegelung führen und im Normalfall ist die gesamte Neubaustrecke weit vor dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme (Eröffnung) bereits versiegelt. Deshalb wird vereinfachend die gesamte Bodenversiegelung schon mit dem Baubeginn gleichgesetzt.

5.2.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Es erfolgt keine Anpassung an örtliche Gegebenheiten (vgl. Anhang B): Theoretisch wäre es zwar möglich, die lokalen Gegebenheiten bzw. die unterschiedlichen überbauten Biotoptypen zu berücksichtigen. Diese wäre aber einerseits mit einem hohen Aufwand bei der Datenerhebung (Differenzierung nach Biotoptypen) verbunden. Andererseits haben Experten des BAFU (Sektion Boden) davon abgeraten, da gewisse Biotoptypen dann mit einem zu tiefen Kostensatz bewertet würden (vgl. Anhang B). Folglich wird auf eine differenzierte Betrachtung nach Biotoptypen verzichtet und eine Durchschnittsmethode vorgeschlagen, in der jeder Biotoptyp gleich bewertet wird.

5.3 Wertgerüst

5.3.1 Bewertungsmethode

Die Monetarisierung des Flächenverbrauchs beruht auf einem Ersatzkostenansatz, d.h. es werden die Kosten bewertet, die entstehen, wenn andernorts die überbauten Biotope wieder ersetzt werden. Um das durch den Strassenbau verlorene wertvolle Biotop andernorts zu ersetzen, muss ein Ausgangsbiotop angenommen werden. Dabei wurde intensiv genutztes Grünland / Ackerland unterstellt¹⁶². Die Ersatzkosten setzen sich aus folgenden Kostenbestandteilen zusammen:

- Landkauf
- Erstinstandsetzung
- Entwicklungspflege und Pflegemassnahmen über mehrere Jahre
- Planungskosten
- Erfolgskontrolle über mehrere Jahre
- Zuschlag von 0% – 50% für Wiederherstellungsrisiken (d.h. Risiko, dass das beabsichtigte Zielbiotop nicht erreicht wird)

Für die Berechnung der Kostensätze wurden Marktpreise verwendet.

Bei den Ersatzkosten handelt es sich um die Kosten, die entstehen, wenn die durch die Strasse betroffenen wertvollen Biotope andernorts ersetzt werden. Damit handelt es sich um die durch das Projekt ausgelösten zusätzlichen Kosten oder um Grenzkosten.

5.3.2 Bestimmung des Wertgerüsts

Das im Folgenden hergeleitete Wertgerüst bezieht sich wie immer auf Faktorpreise des Jahres 2015. Entsprechend wurde die in den ursprünglichen Zahlen enthaltene MWST von 7.5%¹⁶³ herausgerechnet.

Die Ermittlung des Kostensatzes wird in Anhang B erläutert. Es ergibt sich ein durchschnittlicher Kostensatz von 2'800 CHF pro Hektare und Jahr zu Preisen 2000 bzw. 3'442 CHF pro Hektare und Jahr zu Preisen 2015, wobei die Hochrechnung auf 2015 mit dem Tiefbaupreisindex des BfS erfolgt (vgl. Kapitel 5.3.4).¹⁶⁴

5.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Es erfolgt keine Anpassung an örtliche Gegebenheiten (vgl. Anhang B bzw. Kapitel 5.2.3).

¹⁶² Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 42 – 43.

¹⁶³ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 51.

¹⁶⁴ Die Hochrechnung erfolgt basierend auf dem in Ecoplan (2007) hergeleiteten, ungerundeten Kostensatz für das Jahr 2000 von 2'805 CHF / ha und Jahr. In der bisherigen SN 641 828 wurde jedoch ein gerundeter Kostensatz von 3'000 CHF / ha und Jahr zu Preisen 2005 verwendet.

5.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand

Die hier angegebenen Werte beziehen sich alle auf den Preisstand des Jahres 2015. Wird die KNA mit einem anderen Preisstand durchgeführt, sind die Werte wie in den ARE-Studien¹⁶⁵ mit der **Tiefbaupreisindex** des BfS auf den Preisstand der KNA anzupassen. Bei den Kosten handelt es sich um folgende Bestandteile:¹⁶⁶

- Landerwerb
- Lohnkosten für Arbeit
- Kosten für Maschinen
- Kosten für Sand, Kies, Schotter, Steine
- Kosten für Saatgut für verschiedene Pflanzen (Gräser, Reben, Bäume etc.)

Die Lohnkosten müssten eigentlich mit dem Nominallohnwachstum angepasst werden. Doch geht der Anteil der Lohnkosten nicht klar aus der Studie hervor und ist je nach Biotoptyp unterschiedlich. Abgesehen vom Landerwerb sind jedoch alles typische Tiefbauarbeiten, so dass der Tiefbaupreisindex eine sinnvolle Grundlage für die Fortschreibung darstellt.

5.4 Veränderung über die Zeit

Bei der Veränderung über die Zeit liegt es in der Natur der Sache, dass sich das Mengengerüst, d.h. die durch die Strasse versiegelte Fläche, nicht verändert.

Beim Wertgerüst gehen wir ebenfalls von (realer) **Konstanz** über die Zeit aus. Zwar dürften die Lohnkosten mit dem Reallohnwachstum zunehmen, doch könnten die Kosten durch den Einsatz neuerer und besserer Maschinen auch sinken (technischer Fortschritt). Dies entspricht auch der Standardannahme bei den Ersatzinvestitionen: Es wird unterstellt, dass die Ersatzinvestitionen real gleich hoch sind wie die Baukosten (vgl. SN 641 820, Ziffer 29).

5.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen

Für die hergeleitete Methode sind relativ wenig projektabhängige Inputdaten nötig, um die Bodenversiegelung bewerten zu können: Es wird lediglich die

- Länge und
- Breite der Neubaustrecken (und allfälliger aufgehobener Strassen) benötigt sowie der
- Strassentyp (Autobahn, Autostrasse oder übrige Strasse).

Diese Daten sind relativ einfach zu beschaffen. Eine noch einfachere Methode ist deshalb nicht notwendig.

5.6 Anwendungsbeispiel

Die Umfahrungsstrasse ist 5 km lang (exklusive Tunnelabschnitt) und als Autostrasse 12 m breit. Zudem wird ein Zubringer von 1 km Länge und 8 m Breite gebaut (übrige Strasse – vgl. *Tab. 1*). Gemäss *Tab. 28* ergibt sich damit folgender Flächenverbrauch:

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| • 5000 m · (12 m · 3) | = 180'000 m ² |
| • <u>1000 m · (8 m + 20 m)</u> | = <u>28'000 m²</u> |
| • Total | 208'000 m ² |

¹⁶⁵ Ecoplan, Infras (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 341.

¹⁶⁶ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. A-33 – A-34.

Es werden keine Ersatzmassnahmen getroffen. Die versiegelte Fläche ist daher vollumfänglich mit dem Kostensatz von 3'442 CHF pro Hektare und Jahr zu multiplizieren. Die Kosten der Bodenversiegelung betragen folglich im Jahr 2015

- $20.8 \text{ ha} * 3442 \text{ CHF / ha} = 71'594 \text{ CHF} = 0.07 \text{ Mio. CHF.}$

5.7 Vergleich mit bisheriger Methodik

Im Vergleich zu bisher ändert sich nur wenig: Der bisherige Kostensatz wird mit dem Tiefbaupreisindex auf 2015 fortgeschrieben. Dabei wird für die Anpassung auf einen anderen Preisstand neu der Tiefbaupreisindex verwendet anstatt wie bisher der Konsumentenpreisindex.¹⁶⁷ Der folgende Exkurs zeigt, warum die neusten Ergebnisse aus den ARE-Studien für die KNA-Normen nicht direkt verwendet werden können.

Exkurs: Neue Ergebnisse aus den ARE-Studien

Die oben verwendete Methodik zur Herleitung des Kostensatzes für Bodenversiegelungen beruht auf der Studie von Econcept und Nateco.¹⁶⁸ Diese Studie wurde in den Folgejahren jeweils von Infrac im Auftrag des ARE aktualisiert.¹⁶⁹ Dabei wurde an der grundsätzlichen Methodik nichts geändert, sondern die bisherigen Ergebnisse von Econcept und Nateco (2004) lediglich fortgeschrieben und ergänzt. So wurde z.B. in Ecoplan, Infrac (2014¹⁷⁰) neu auch die Bodenversiegelung innerorts berücksichtigt. Dies bestätigt das bisherige Vorgehen in der SN 641 828, in der bei der Versiegelung nicht nach innerorts und ausserorts unterschieden wurde. Zudem wurde sowohl in Ecoplan, Infrac (2014, S. 337-338) als auch in Infrac, Ecoplan (2019, S. 73-74) viel Aufwand in die korrekte Erhebung der Strassenlängen gesteckt. Dies ist wichtig für den Ausweis der Bodenversiegelung in der Schweiz – aber nicht für die hier interessierende KNA-Methodik, denn an den Kostensätzen ändert sich dadurch nichts.

Zudem verwendet Infrac neu Kostensätze pro m Strassenlänge. Diese Kostensätze sind geeignet, um die Kosten der Bodenversiegelung in der Schweiz zu bestimmen. Die bisher der SN 641 828 zugrundeliegenden Kostensätze nach Biotoptypen (vgl. Anhang B) werden in den Berechnungen nicht mehr direkt verwendet, sondern nur noch daraus abgeleitete Kostensätze pro m Strasse (nach 4 Strassentypen). Im Rahmen der vorliegenden Studie stellt sich die Frage, ob neu statt einem Kostensatz pro m² (bzw. pro Hektare) auf einen Kostensatz pro m Strassenlänge übergegangen werden sollte. Dies wird aus folgenden Gründen nicht umgesetzt:

- Die Kostensätze sind teilweise intuitiv schwer nachvollziehbar. So ist z.B. der Kostensatz für 1.-Klass-Strassen 23% tiefer als derjenige für 2.-Klass-Strassen. Grund hierfür dürfte sein, dass die durch 1. Klass-Strassen zwischen ca. 1960 und 2000 zerstörten Biotope weniger wertvoll waren als die durch 2.-Klass-Strassen zerstörten Biotope. Für die Bewertung eines neuen Projektes ist es jedoch wenig zielführend, für breitere 1.-Klass-Strassen einen tieferen Kostensatz zu verwenden als für schmalere 2.-Klass-Strassen.
- Mit Kostensätzen pro Strassentyp könnte der Ausbau einer Autobahn von 4 auf 6 Spuren (oder allgemein Strassenverbreiterungen) nicht bewertet werden.

Entsprechend wird in der Norm weiterhin ein Kostensatz pro m² Strassenfläche verwendet.

¹⁶⁷ Basierend auf der Hochrechnung mit dem Konsumentenpreisindex wird heute in NISTRA ein Wert von 3'077 CHF / ha und Jahr (Preise 2015) verwendet, was unterhalb des neuen Kostensatzes von 3'442 CHF / ha und Jahr liegt.

¹⁶⁸ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft.

¹⁶⁹ Letztmals in Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

¹⁷⁰ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 329-330.

6 Vor- und nachgelagerte Prozesse

6.1 Einleitung

Gemäss der überarbeiteten Grundnorm SN 641 820 sind bei den externen Effekten neu auch die vor- und nachgelagerten Effekte der Energie und der Infrastruktur miteinzubeziehen. Die Begründung dafür (aus der SN 641 820 bzw. dem Kommentar dazu¹⁷¹) soll im Folgenden nochmals kurz dargestellt werden.

Die Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse setzen sich prinzipiell aus drei Bereichen zusammen (deren Kosten im Rahmen von Ecoplan, Infrac (2014, Kapitel 12) und Infrac, Ecoplan (2019, Kapitel 12) für die Schweiz ermittelt wurden):

- **Vor- und nachgelagerte Prozesse Energie:** Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Herstellung, Transport und Bereitstellung der Antriebsenergie (Benzin, Diesel, Strom).
- **Vor- und nachgelagerte Prozesse Infrastruktur:** Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Bau, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur.
- **Vor- und nachgelagerte Prozesse Fahrzeug:** Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Fahrzeuge.

Die vor- und nachgelagerten Prozesse der Fahrzeuge werden hier jedoch in Absprache mit der Begleitgruppe nicht miteinbezogen. Für diesen Ausschluss sprechen folgende Gründe:

- Der Effekt eines einzelnen Projektes auf den Fahrzeugbestand dürfte gering sein und kann deshalb vernachlässigt werden: Beinahe niemand, der vorher kein Fahrzeug hatte, kauft sich aufgrund des Projektes neu ein Fahrzeug (oder einen neuen Zweitwagen). Zudem dürfte die Abschätzung dieses Effektes mit grösseren Schwierigkeiten verbunden sein. So wird in einer KNA üblicherweise davon ausgegangen, dass sich durch ein einzelnes Verkehrsprojekt der Fahrzeugbestand nicht verändert (bzw. die Veränderung vernachlässigbar klein ist).
- Möglich ist zwar, dass sich durch ein Projekt die Streckenlänge von A nach B verändert (z.B. durch eine Umfahrungsstrasse). Bei mehr Fzkm könnte dies dazu führen, dass das Fahrzeug früher ersetzt wird und damit auch zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse entstehen. Meist wird ein Auto jedoch nicht allein aufgrund des Kilometerstandes ersetzt, sondern weil es (technisch) veraltet ist. Deshalb gehen wir davon aus, dass auch dieser Effekt klein ist. Zudem wäre er schwer zu quantifizieren.

Damit werden bei den Elektrofahrzeugen auch die externen Effekte durch die Herstellung, den Unterhalt und die Entsorgung der Batterie nicht betrachtet.¹⁷²

Werden hingegen durch ein Projekt die Fzkm verändert (z.B. Mehrverkehr, Umfahrungsstrasse, neue Verbindung), so verändert sich dadurch der Treibstoffverbrauch (bzw. Stromverbrauch bei Elektrofahrzeugen). Damit verändern sich auch die externen Kosten durch die vor- und nachgelagerten Prozesse der Energie des Verkehrs. Diese Effekte sind künftig in KNA miteinzubeziehen.

Werden im Rahmen eines Projektes neue Infrastrukturen gebaut, so verändern sich dadurch auch die Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse dieser Infrastrukturen. Diese Kosten sollten in einer KNA ebenfalls miteinbezogen werden.

¹⁷¹ Ecoplan, Transoptima (2018), Neue Erkenntnisse zu Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr.

¹⁷² Der Neubau einer Strasse kann dazu führen, dass die Fahrzeugkilometer deutlich zu- oder abnehmen. Damit wird auch die Batterie stärker bzw. weniger stark abgenutzt und muss entsprechend früher oder später ersetzt werden. In Absprache mit der Begleitgruppe wird darauf verzichtet, diesen Effekt genauer zu analysieren. Die Batterieemissionen fehlen auch im neuen HBEFA 4.1.

Bisher wurden in der SN 641 828 die externen Kosten des Energie- bzw. Stromverbrauchs durch den Betrieb der Infrastrukturen miteinbezogen. Gemäss der überarbeiteten SN 641 820 kann dieser Indikator jedoch künftig vernachlässigt werden (aufgrund seiner geringen Relevanz und des hohen Erhebungsaufwandes¹⁷³). Die externen Kosten der Stromproduktion müssen aber weiterhin bestimmt werden, da neu die Elektrofahrzeuge mit ihren vor- und nachgelagerten Effekten miteinbezogen werden. Elektrofahrzeuge haben keine Motoremissionen, denn ihre Emissionen für die Antriebsenergie fallen bei der Stromproduktion an – und damit an einem anderen Ort als wo der Strom auf der Strasse verbraucht wird.

Um die ökonomischen Folgekosten der vor- und nachgelagerten Prozesse für die Gesellschaft zu quantifizieren, müssten theoretisch sämtliche Prozessketten detailliert dokumentiert werden, die dabei anfallenden Umweltbelastungen sowie die davon betroffenen Personen bzw. Ökosysteme erfasst und mit Hilfe von Dosis-Wirkungs-Beziehungen die dadurch entstehenden Schäden quantifiziert und schliesslich bewertet werden. Aufgrund der starken Vernetzung der Weltwirtschaft treten die Umweltbelastungen global auf, die Bewertung der resultierenden Schäden ist jedoch stark vom regionalen bzw. nationalen Kontext abhängig. Es ist daher kaum möglich, sämtliche Umweltbelastungen zu erfassen und verlässlich zu quantifizieren.

Aus diesem Grund fokussiert der Berechnungsansatz von Ecoplan, Infras (2014, Kapitel 12) und Infras, Ecoplan (2019, Kapitel 12) lediglich auf die wichtigsten globalen Umweltbelastungen, deren Schäden auf Basis internationaler Studien auch ohne detailliertes Wissen zur genauen Emissionsquelle grob quantifiziert werden können. Die Berechnungen erfassen daher die Treibhausgasemissionen (v.a. CO₂) sowie die Luftschadstoffe NO_x, PM₁₀, SO₂ und NMVOC sämtlicher vor- und nachgelagerter Prozesse des Verkehrs in der Schweiz. Dabei wird nicht berücksichtigt, ob diese Emissionen in der Schweiz selbst oder im Ausland emittiert werden, wesentlich ist einzig, dass die Emissionen letztlich als vor- oder nachgelagerter Prozess für die in der Schweiz erbrachten Verkehrsleistungen anfallen.

Weil nur die oben erwähnten Schadstoffe bewertet werden, nicht aber alle weiteren vor- und nachgelagerten Umweltbelastungen, die im ursächlichen Zusammenhang mit dem Verkehr in der Schweiz stehen, entspricht das Vorgehen dem at least Ansatz bzw. führt zu einer Unterschätzung.

Bevor wir die vor- und nachgelagerten Effekte im Detail herleiten, soll in der folgenden Abbildung ein Überblick gegeben werden über die verschiedenen Emissionen von Luftschadstoffen und Klimagasen und deren Berücksichtigung in einer KNA. Beim Energieverbrauch betrachten wir zuerst den Verbrauch von Benzin, Diesel und Strom durch die Strassenfahrzeuge. Hier werden die vorgelagerten Effekte im Folgenden berücksichtigt, während die direkten Emissionen von Luftschadstoffen und Klimagasen in den Kapitel 3 und 4 erläutert wurden. Beim Stromverbrauch beschränken sich die direkten Emissionen jedoch auf Abrieb und Aufwirbelung von Luftschadstoffen. Nachgelagerte Prozesse gibt es keine.

Beim Dieselverbrauch der Baumaschinen werden die direkten PM₁₀-Emissionen von Baumaschinen bei der Luftbelastung miteinbezogen (vgl. Kapitel 3.2.2). Beim CO₂ ist unklar, ob die Emissionen von Baumaschinen in den Emissionsfaktoren der Ecoinvent-Datenbank für Infrastrukturen enthalten sind oder nicht. Dasselbe gilt für die Emission der Luftschadstoffe NO_x, SO₂ und NMVOC. Sind sie in den Ecoinvent-Daten enthalten, werden sie berücksichtigt, andernfalls fehlen dazu die Datengrundlagen. Die Emissionen der Baustellentransporte werden in Kapitel 3.2.2 miteinbezogen, die vorgelagerten Prozesse hingegen nicht, da dazu die Datengrundlagen fehlen. Muss der Verkehr aufgrund einer Baustelle, einen Umweg in Kauf nehmen, werden die dadurch verursachten Emissionen gleich berücksichtigt, wie die Emissionen durch den Benzin-, Diesel- und Stromverbrauch der Strassenfahrzeuge.

¹⁷³ Ecoplan, Transoptima (2018), Neue Erkenntnisse zu Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Kapitel 3.3.2.

	vorgelagerte Prozesse	Direkte Emissionen	nachgelagerte Prozesse
Energieverbrauch			
Benzinverbrauch Strassenfahrzeuge	vor	direkt	(keine)
Dieselerbrauch Strassenfahrzeuge	vor	direkt	(keine)
Stromverbrauch Strassenfahrzeuge	vor	nur Abrieb, Aufwirbelung	(keine)
Dieselerbrauch Baumaschinen	vor?	direkt / vor?	(keine)
Baustellentransporte	keine Daten	direkt (nur Luft)	(keine)
Umwegfahrten	vor	direkt	(keine)
Stromverbrauch Betrieb Infrastrukturen	vernachlässigt		
Infrastruktur			
Nicht-Motor-Emissionen Baumaschinen	(keine)	direkt (kein CO ₂)	(keine)
Baumaterialien	vor	vor (ohne PM ₁₀)	nach
Unterhalt	wie Infrastruktur und Dieselerbrauch Baumaschinen		
vor = vorgelagerte Prozesse in Kapitel 6, nach = nachgelagerte Prozesse in Kapitel 6, direkt = direkte Emissionen von Luftschadstoffen (Kapitel 3) und Klimagasen (Kapitel 4)			

Abb.7 Überblick über die Berücksichtigung der Luftschadstoffe und Klimagase

Bezüglich Infrastruktur geht es bei den Nicht-Motor-Emissionen der Baumaschinen um Abrieb und Aufwirbelung von PM₁₀, was in Kapitel 3.2.2 berücksichtigt wird. Dazu gibt es keine vor- und nachgelagerten Emissionen. Die Emissionen der Baumaterialien werden im Folgenden berücksichtigt, einzig die PM₁₀-Emissionen werden ausgeschlossen, um sicher zu sein, dass keine Doppelzählung mit den in Kapitel 3.2.2 berücksichtigten PM₁₀-Emissionen entstehen. Die PM₁₀-Emissionen der Baumaterialien dürften zwar berücksichtigt werden, da diese in Kapitel 3.2.2 nicht enthalten sind, doch ist unklar, ob in dem Emissionsfaktor von Ecoinvent nicht auch Emissionen durch Baumaschinen enthalten sind. Die übrigen Luftschadstoffe (NO_x, SO₂ und NMVOC) werden jedoch berücksichtigt (vgl. Tab. 34 unten).

Im Folgenden werden das Mengen- und Wertgerüst (Kapitel 6.2 und 6.3) dargestellt, wobei jeweils zwischen den vor- und nachgelagerten Effekten der Energie und der Infrastruktur unterschieden wird. Danach wird wie üblich die zeitliche Entwicklung erläutert (Kapitel 6.4), gezeigt, dass eine vereinfachte Methodik nicht nötig ist (Kapitel 6.5), eine Anwendungsbeispiel präsentiert (Kapitel 6.6) und ein Vergleich zu bisher angestellt (Kapitel 6.7).

6.2 Mengengerüst

6.2.1 Benötigte Inputdaten

a) Vor- und nachgelagerte Prozesse Energie

Um die vor- und nachgelagerten Prozesse des Energieverbrauchs durch den Verkehr zu bestimmen, müssen die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen bestimmt werden, die bei der Herstellung, dem Transport und der Bereitstellung der Antriebsenergie (Benzin, Diesel, Strom) ausgestossen werden.

Wie bei der Luftverschmutzung und beim Klima kann das Mengengerüst aufgrund der Fahrleistungen (Fzkm) aus dem Verkehrsmodell und aufgrund von Emissionsfaktoren pro Fzkm bestimmt werden. Die projektabhängigen Inputdaten sind deshalb die Veränderungen der **Fahrzeugkilometer** (Fzkm) – wie bei der Luftbelastung und beim Klima differenziert nach Autobahn, ausserorts und innerorts. Nach Möglichkeit sind die Fzkm zudem nach Personen- und Güterverkehr zu differenzieren, falls möglich sogar nach den sechs Fahrzeugkategorien in Tab. 14. Es ist dieselbe Differenzierung wie bei der Bewertung der Luftbelastung und des Klimas zu wählen, wobei wie beim Klima auf die Differenzierung nach Emission im bebauten bzw. unbebauten Gebiet verzichtet werden kann.

Bei der Bestimmung des Mengengerüsts ist zu berücksichtigen, dass während der **Bauphase** Umwegfahrten (Umleitungen) nötig sein können, welche die Fahrtstrecke und damit die Fzkm und Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen erhöhen.

b) Vor- und nachgelagerte Prozesse Infrastruktur

Um die vor- und nachgelagerten Effekte der Infrastruktur abschätzen zu können, muss die **Fläche der neuen Strasse** erhoben werden. Diese Daten liegen aus den Unterlagen zum Projekt meist vor oder können ohne grossen Aufwand abgeschätzt werden. Da die Kostensätze differenziert vorliegen, müssen auch die Inputdaten entsprechend differenziert erhoben werden (vgl. unten Kapitel 6.2.2b und 6.3.2): Die Flächen sind zu **differenzieren nach** der Fläche der **Strasse** (offene Strecke Autobahn bis 3.Klass-Strasse), der **Brücke / des Viadukts**, des **Tagbautunnels / der Galerie**, des **bergmännischen Tunnels**, des **Trottoirs** und des **Velowegs**. Der Grund für die Differenzierung von Trottoir und Velowegen dürfte darin liegen, dass bei diesen Infrastrukturen der Unterbau weniger gut sein muss, da sie deutlich weniger belastet werden. Deshalb sind **Velostreifen den Strassenflächen zuzuordnen**, da ihr Unterbau auch belastbar sein muss, da auf den Velostreifen auch Lastwagen fahren (zumindest, wenn keine Velos da sind oder sie entgegenkommenden Fahrzeugen ausweichen (Sicherheitsabstand)).

Wird eine andere Strasse rückgebaut, so darf die Fläche dieser Strasse nicht abgezogen werden. Grund dafür ist, dass der Kostensatz die vor- und nachgelagerten Effekte durch Bau, Unterhalt und Entsorgung enthält. Das bedeutet, dass der Kostensatz der neuen Strasse bereits deren spätere Entsorgung mit enthält und diese Kosten auf die Betriebsphase der Strasse aufteilt (Kostensatz pro m² und Jahr). Damit wurden die Kosten der Entsorgung der rückgebauten Strasse bereits während dem Betrieb der Strasse berücksichtigt und dürfen nun nicht nochmals berücksichtigt werden. Einzig die Kosten des Unterhalts der rückgebauten Strasse entfallen in Zukunft. Wie sich jedoch zeigen wird, sind nur ca. 6% der Kosten auf den Unterhalt zurückzuführen, so dass wir empfehlen, auf die Berücksichtigung dieses kleinen Effektes zu verzichten. Entsprechend sind rückgebaute Strassen für die Bewertung nicht relevant.

6.2.2 Berechnung des Mengengerüsts

a) Vor- und nachgelagerte Prozesse Energie

Das neue HBEFA 4.1¹⁷⁴ enthält erstmals auch die Emissionsfaktoren von CO₂-Äquivalenten¹⁷⁵ durch die vor- und nachgelagerten Prozesse und zwar differenziert nach Benzin-, Diesel- und Elektrofahrzeugen, sowie differenziert nach Autobahn, ausserorts und innerorts und nach den Fahrzeugkategorien (und vielen weiteren Differenzierungen). Die Emissionen von CO₂-Äquivalenten durch vor- und nachgelagerte Prozesse können damit aus der Veränderung der Fzkm sowie dieser spezifischen Emissionsfaktoren für vor- und nachgelagerte Prozesse ermittelt werden. Das HBEFA 4.1 enthält dabei auch Prognosen für diese Emissionsfaktoren bis 2060. Bei der Stromproduktion geht das HBEFA dabei vom durchschnittlichen Schweizer Strommix aus, der bis 2060 prognostiziert wird.

Das HBEFA enthält bei den vor- und nachgelagerten Prozessen jedoch nur Emissionsfaktoren für CO₂-Äquivalente, jedoch keine Emissionsfaktoren für andere Schadstoffe. Deshalb wird für die Luftschadstoffe beim Wertgerüst unten ein Kostensatz pro Tonne Treibstoff (Benzin und Diesel) und pro kWh Strom hergeleitet. Der Treibstoffverbrauch bzw. Stromverbrauch kann ebenfalls mit dem HBEFA ermittelt werden.

¹⁷⁴ Das neue Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 4.1 wird im Sommer 2019 publiziert.

¹⁷⁵ Dabei werden die Emissionen der drei klimarelevanten Gase CO₂, CH₄ und N₂O wie beim Klima (Kapitel 4.2.2) mittels dem GWP (global warming potential) von 1, 25 und 298 in CO₂-Äquivalente umgerechnet.

b) Vor- und nachgelagerte Prozesse Infrastruktur

Im Folgenden werden die Flächenangaben in Emissionen von CO₂-Äquivalenten umgerechnet, um die Klimaschäden aus den vor- und nachgelagerten Prozessen bestimmen zu können. Prinzipiell müssten auch entsprechende Umrechnungen in Emissionen von Luftschadstoffen hergeleitet werden, doch wird bei den Luftschadstoffen auf diesen Zwischenschritt verzichtet und in Kapitel 6.3.2 direkt ein Kostensatz pro m² und Jahr für die luftverschmutzungsbedingten Kosten aus den vor- und nachgelagerten Prozessen hergeleitet, der die Emissionen mehrerer Luftschadstoffe zusammenfasst.

Dazu verwenden wir Daten aus der Ecoinvent-Datenbank (Version 3.3), deren Emissionsfaktoren wir aus Infrac, Ecoplan (2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015) übernehmen. Dort sind allerdings nur die in der folgenden Tabelle dargestellten Werte pro Meter einer Durchschnittsstrasse verfügbar. Das bedeutet, dass mit diesen Zahlen ein Meter Autobahn gleich bewertet werden muss wie ein Meter einer deutlich weniger breiten Strasse 3. Klasse (vgl. Tab. 28). Dies ist unbefriedigend.

Tab. 29 Emissionen von CO₂-Äquivalenten durch vor- und nachgelagerte Prozesse von Infrastrukturen

	Emissionen von CO ₂ -Äquivalenten in kg pro Meter und Jahr	Anteil
Bau / Produktion	8.78	32.1%
Unterhalt	2.87	10.5%
Entsorgung	15.67	57.3%
Total	27.33	100.0%

Quelle: Ecoinvent bzw. Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

Deshalb rechnen wir diesen Kostensatz in einen Kostensatz pro m² Strassenfläche um, damit in der Praxis die Strassenbreite miteinbezogen werden kann. Dazu benötigen wir die durchschnittliche Strassenbreite in der Schweiz. Diese berechnen wir aus Daten von Econcept und Nateco¹⁷⁶ zur Strassenbreite sowie Daten von Infrac, Ecoplan (2019) zur Strassenlänge.¹⁷⁷ Wie die folgende Tabelle zeigt, beträgt die durchschnittliche Strassenbreite in der Schweiz ca. 4.8m (ohne Trottoir und Radwege).

Tab. 30 Berechnung der durchschnittlichen Strassenbreite in der Schweiz

	Breite in m	Länge in m	Fläche in m ²
Autobahn	22.50	1'590'528	35'786'873
Autostrasse	15.00	483'317	7'249'748
1.Klass-Strasse	6.50	12'233'427	79'517'278
2.Klass-Strasse	5.00	30'904'253	154'521'267
3.Klass-Strasse	3.25	38'684'375	125'724'220
Total	4.80	83'895'900	402'799'386

Quellen: Econcept, Nateco 2004, S. 14 + 21 und Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

¹⁷⁶ Econcept, Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 14 und 21.

¹⁷⁷ Diese Daten wurden in Infrac, Ecoplan (2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015) verwendet, um die Kosten von Natur und Landschaft zu bestimmen. Sie stammen aus GIS-Auswertungen des topgrafischen Landschaftsmodells «SwissTLM» der Swisstopo. Diese Daten enthalten bei den 1.Klass-Strassen zudem Daten für 6m-, 8m- und 10m-breite Strassen, die benutzt wurden, um die mittlere Breite der 1.Klass-Strassen zu ermitteln.

Damit kann das Ergebnis von 27.3 kg CO₂-Äquivalente pro Meter und Jahr aus *Tab. 29* mit Hilfe der Strassenbreite von 4.8 Metern aus *Tab. 30* in den zu verwendenden Emissionsfaktor von 5.7 kg CO₂-Äquivalente pro m² Strassenfläche und Jahr umgerechnet werden (vgl. *Tab. 31*). Mit diesem Kostensatz kann nun die Breite der verschiedenen Strassen berücksichtigt werden.

Nebst der generellen Berücksichtigung der Breite bzw. Fläche ist auch eine Differenzierung nach spezifischen Strassenelementen (z.B. Tunnel und Brücken) angezeigt. Für die Herleitung solcher spezifischer Kostensätze stützen wir uns auf Daten zu den Investitionskosten aus dem strategische Entwicklungsprogramm Nationalstrassen (STEP-NS 2018).¹⁷⁸ In umfangreichen Auswertungen wird pragmatisch hergeleitet, dass die Investitionskosten pro m² Strassenfläche von offenen Strecken in etwa

- 6-mal geringer sind als für Brücken und Viadukte
- 8-mal kleiner sind als für Tagbautunnel und Galerien und
- 10-mal kleiner sind als für Tunnels in bergmännischer Bauweise.¹⁷⁹

Diese Kennzahlen werden auf den Emissionsfaktor der offenen Strecke von 5.7 kg CO₂-Äquivalente pro m² und Jahr angewendet. Das Ergebnis ist in der *Tab. 31* dargestellt. Zudem zeigt *Tab. 31* zwei weitere, etwas tiefere Kostensätze für Trottoirs und Velowege. Diesen stammen aus den Berechnungen von Infrast für das ARE.¹⁸⁰ Damit können nebst den vorangehend erwähnten Elementen auch Trottoirs und Velowege unterschiedlich behandelt werden.

Tab. 31 Emissionen von CO₂-Äquivalenten durch vor- und nachgelagerte Prozesse von Infrastrukturen

	Emissionen von CO ₂ -Äquivalenten in kg pro m ² und Jahr
Autobahn bis 3.Klass-Strasse	5.7
Brücke / Viadukt	34.1
Tagbautunnel / Galerie	45.5
Tunnel bergmännisch	56.9
Trottoir	4.4
Befestigter Veloweg	3.4

¹⁷⁸ EBP et al. (2017), Strategisches Entwicklungsprogramm Nationalstrassen (STEP-NS 2018): Technischer Bericht zur Engpassanalyse, Bewertung mit EBeN und Priorisierung, S. 50-52.

¹⁷⁹ Dazu werden die Kostensätze pro Meter Strassenlänge von EBP et al. (2017, S. 50-52) für 5 verschiedene Strassentypen (Gemischtverkehrsstrasse, 2-Spur Neubau Autostrasse, 4-Spur Neubau, Ausbau von 2 auf 4 Spuren, Ausbau von 4 auf 6 Spuren) mit den angegebenen Breiten in Kostensätze pro m² umgerechnet. Dabei werden die verschiedenen Baubestandteile einer Strasse aufsummiert (Unterbau, Entwässerung, Tragschichten, Deckschichten, passive Schutzeinrichtungen, Nebenarbeiten und elektromechanische Ausrüstung). Teilweise sind die Kostensätze nach leichten, mittleren und schweren Situationen differenziert. Hier wird ein Mittelwert verwendet. Diese Berechnungen werden einerseits für offene Strecken und andererseits für bergmännische Tunnels, Tagbautunnels / Galerien sowie Brücken / Viadukte durchgeführt. Dabei ergeben sich die oben angegebenen Faktoren: Brücken / Viadukte sind pro m² ca. 6-mal teurer als offene Strecken (je nach Strassentyp 5.5 bis 6.3), Tagbautunnels / Galerien sind ca. 8-mal teurer (7.5 bis 8.2 und Ausreisser von 9.4) und bergmännische Tunnels ca. 10-mal teurer (8.5 bis 10.7).

¹⁸⁰ Hintergrundberechnungen von Infrast für Infrast, Ecoplan (2019, Externe Effekte des Verkehrs 2015). Ausgehend von der Durchschnittsstrasse zeigt Infrast, dass das Ergebnis für 3.Klass-Strassen ca. 2/3 der Durchschnittsstrasse beträgt (dies bestätigt den vorgeschlagenen Emissionsfaktor von 5.7 kg CO₂-Äquivalente pro m² Strassenfläche und Jahr, denn damit gerechnet ergibt sich beinahe dasselbe Ergebnis für 3.Klass-Strassen). Da die mittleren Investitionskosten pro Meter Infrastruktur für befestigte Velowege und Trottoirs nur etwa halb so hoch sind wie für 3.Klass-Strassen (Velowege etwas höher als Trottoirs), werden die Emissionsfaktoren entsprechend gekürzt. Zudem werden sie dann mit Breiten von 2m für Trottoirs und 3m für befestigte Velowege in Emissionsfaktoren pro m² und Jahr umgerechnet.

6.2.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Bei den vor- und nachgelagerten Prozessen ist eines der grundsätzlichen Probleme, dass der Ort der Emissionen nicht bekannt ist. Dies kann z.B. in einem Elektrizitätskraftwerk in der Schweiz sein oder bei der Herstellung von Benzin und Diesel in z.B. Saudi-Arabien oder Venezuela oder am Ort der Herstellung oder Entsorgung von Baumaterialien, der ebenfalls oft nicht bekannt ist. Eine Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten ist deshalb nicht möglich. Zudem spielt der Ort des Verbrauchs der Antriebsenergie (z.B. im bebauten oder unbebauten Gebiet) keine Rolle für die Höhe der Emissionen in den vor- und nachgelagerten Prozessen.

6.3 Wertgerüst

6.3.1 Bewertungsmethode

Bei den vor- und nachgelagerten Prozessen kommt es zur Emission von Luftschadstoffen und Treibhausgasen, deren externe Kosten es hier zu ermitteln gilt. Als Grundlage für deren Berechnung werden prinzipiell dieselben Studien verwendet wie in den Kapiteln 3 und 4 zur Luftverschmutzung und zum Klima. Deshalb gelten die dortigen Ausführungen auch hier:

- Luftverschmutzung: Bei den gesamten Kosten der Luftverschmutzung (Gesundheitskosten, Gebäude- und Vegetationsschäden) können Marktpreise für die Bewertung eingesetzt werden, ausser für die immateriellen Kosten der Gesundheitsschäden, für die eine Zahlungsbereitschaft verwendet wird und den Biodiversitätsverlusten, für die Ersatzkosten zum Einsatz kommen. Bei den Kosten der Luftverschmutzung sind Grenz- und Durchschnittskosten identisch (vgl. Kapitel 3.3.1).
- Klima: Es handelt sich um einen Vermeidungskostenansatz. Dabei kommen Grenzkosten zur Anwendung (vgl. Kapitel 4.3.1).

Allerdings werden viele der hier betrachteten Emissionen nicht in der Schweiz, sondern im Ausland emittiert. Entsprechend kommen bei den Luftschadstoffen auch Kostensätze aus dem Ausland zum Einsatz, diese wurden jedoch prinzipiell methodisch gleich festgelegt.

6.3.2 Bestimmung des Wertgerüsts

Klimaschäden: Vor- und nachgelagerte Prozesse durch Energieverbrauch und Infrastrukturen

Die mit dem HBEFA oder mit *Tab. 31* bestimmten Emissionen von CO₂-Äquivalenten durch den Energieverbrauch bzw. die Infrastrukturen können mit demselben Kostensatz monetarisiert werden, der auch bei den Klimakosten verwendet wurde (vgl. Kapitel 4.3.2): Es wird somit ein **Kostensatz von 121.5 CHF / t CO₂-Äquivalent** im Jahr 2015 verwendet. Für die Sensitivitätsbetrachtungen ist ein Kostensatz von 69 CHF / t CO₂ (untere Grenze) und 214 CHF / t CO₂ (ober Grenze) einzusetzen.

Luftschadstoffe: Vor- und nachgelagerte Prozesse der Stromproduktion

In den folgenden Abschnitten werden Kostensätze für die Quantifizierung der luftverschmutzungsbedingten Kosten aus den vor- und nachgelagerten Prozessen bestimmt. Bei dieser Bestimmung werden wir auf den Ausweis von Kostensätzen für die Sensitivitätsbetrachtung verzichten. Der Grund für diesen Verzicht liegt darin, dass die im Folgenden vorgeschlagenen Kostensätze mehrheitlich für die Produktionsprozesse im Ausland gelten (EU28-Durchschnitt) und in ihre Bestimmung häufig auch ein Anteil für die Bewertung des VOSL einfließt, ohne dass dieser Anteil in den verwendeten Berechnungsquellen transparent ausgewiesen wird. Wir empfehlen deshalb, auf die Sensitivität für den VOSL hier zu verzichten, da das Ausmass der Schwankungsbreite nicht bestimmt werden kann und weil die vor- und nachgelagerten Effekte vergleichsweise geringe Kosten verursachen, so dass ein Verzicht auf diese Sensitivität vertretbar ist.

Im Folgenden wird nun zuerst ein Kostensatz für die entstehenden Luftschadstoffe bei der Stromproduktion ermittelt.¹⁸¹ Die bisherige Herleitung der luftschadstoffbedingten Schäden der Stromproduktion in Ecoplan (2007)¹⁸² basieren auf einer anderen Studie von Ecoplan.¹⁸³ Diese Studie wurde mittlerweile in Ecoplan (2012)¹⁸⁴ aktualisiert. Ecoplan (2012) basiert allerdings noch auf den Zahlen des ARE zu den externen Kosten für das Jahr 2009. Damit sind insbesondere die methodischen Anpassungen, die bei der Berechnung der externen Kosten zuhanden des ARE für das Berichtsjahr 2010¹⁸⁵ und 2015¹⁸⁶ vorgenommen wurden, nicht in den Ergebnissen von Ecoplan (2012) enthalten – insbesondere der neue, deutlich höhere VOSL ist darin noch nicht berücksichtigt. Um methodische Inkonsistenzen zu den Kosten der Luftbelastung in Kapitel 3 zu vermeiden (z.B. anderer VOSL als Grundlage), werden die Berechnungen in Ecoplan (2012) speziell für das vorliegende Projekt aktualisiert, so dass die neuen Kosten gemäss Infrac, Ecoplan (2019) berücksichtigt werden können.

Die Berechnungen in Ecoplan (2012) basieren auf sogenannten PM₁₀-Äquivalenten, die sich aus primären PM₁₀-Emissionen und den Vorläufersubstanzen für sekundäres PM₁₀ zusammensetzen. Dies sind NO_x (Stickoxide, Faktor 0.22¹⁸⁷), SO₂ (Schwefeldioxid, Faktor 0.20) und NH₃ (Ammoniak, Faktor 0.32). Aus den gesamten Emissionen von PM₁₀-Äquivalenten im Jahr 2015 und den gesamten Kosten der Luftbelastung (Gesundheitskosten, Gebäudeschäden, Ernteauffälle, Waldschäden und Biodiversitätsverluste¹⁸⁸ – und zwar nicht nur durch den Verkehr wie in Infrac, Ecoplan (2019), sondern durch die gesamte Luftbelastung (inkl. Haushalte, Industrie Landwirtschaft etc.)¹⁸⁹) wird zuerst ein Kostensatz pro Tonne PM₁₀-Äquivalent ermittelt, der 253'000 CHF / t PM₁₀-Äquivalent beträgt.¹⁹⁰

Für verschiedene Stromerzeugungstechnologien werden zudem die Emissionen von PM₁₀-Äquivalenten aus Ecoplan (2012) übernommen.¹⁹¹ Bei der Herleitung dieser Emissionsfaktoren wurde auch berücksichtigt, welcher Anteil der Emissionen in der Schweiz anfällt bzw. im Ausland. Für die Schweizer Emissionen wird der oben ermittelte Kostensatz von 253'000 CHF / t PM₁₀-Äquivalent verwendet.

Dieser Kostensatz ist aber für die Emissionen im Ausland zu hoch. Denn je nach Bevölkerungsdichte, genauem Emissionsort, Entwicklungsstand etc. können die Kostensätze im Ausland deutlich von den Schweizer Werten abweichen. In Ecoplan (2012) wurde deshalb für die ausländischen Emissionen ein Kostensatz aus den EU-Projekten NEEDS und CASES für die EU27 verwendet. Diesen Kostensatz aktualisieren wir nun mit Ergebnissen

¹⁸¹ In der bisherigen SN 641 828 wurde ebenfalls ein Kostensatz für die externen Kosten der Stromproduktion berechnet und zwar für den Indikator «Externe Kosten des Energieverbrauchs durch den Betrieb der Infrastrukturen». Dieser Indikator entfällt nun (vgl. Kapitel 1.1.1). Die Berechnungen werden aber für den Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge trotzdem aktualisiert, wobei im Vergleich zu bisher die Kosten durch CO₂ nicht mehr miteinbezogen werden, da diese wie oben erläutert durch das neue HBEFA 4.1 integriert werden können.

¹⁸² Ecoplan (2007), Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse.

¹⁸³ Ecoplan (2007), Die Energieperspektiven 2035 – Band 3. Volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang B, Kapitel 9.4.

¹⁸⁴ Ecoplan (2012), Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen, Anhang C.

¹⁸⁵ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010.

¹⁸⁶ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

¹⁸⁷ Der Faktor bedeutet, dass 1t NO_x-Emissionen zu 0.22t PM₁₀-Äquivalenten führen.

¹⁸⁸ Die in Kapitel 3 berücksichtigte Beeinträchtigung der Bodenqualität durch Schwermetalle ist hier nicht relevant, da diese im Verkehr durch den Abrieb von Bremsbelägen und Reifen sowie durch die Verbrennung entsteht (vgl. Kapitel 3.2.2), was bei der Energieproduktion nicht von Bedeutung ist.

¹⁸⁹ Dazu wurden für das vorliegende Projekt spezifische Hochrechnungen vorgenommen, die das Ergebnis jedoch nicht massgeblich beeinflussen (ohne die Hochrechnung wäre der Kostensatz um 2% tiefer).

¹⁹⁰ Der Kostensatz stimmt nicht mit den Kostensätzen in Kapitel 3 überein, denn in Kapitel 3 wurde ein Kostensatz für verschiedene einzelne Schadstoffe hergeleitet, während hier ein Kostensatz für das Aggregat PM₁₀-Äquivalente verwendet wird. Zudem wurde in Kapitel 3 ein Kostensatz für den Strassenverkehr (differenziert nach Emissionsort (bebaut / unbebaut)) ermittelt, hier jedoch für die gesamten Schadstoffemissionen in der Schweiz.

¹⁹¹ Diese stammen ursprünglich aus einer Spezialauswertung der Ecoinvent-Datenbank (Version 2.2) und können für die vorliegenden Arbeiten aufgrund des Aufwandes nicht aktualisiert werden.

aus dem aktuellsten EU-Handbuch,¹⁹² was zu einem durchschnittlichen Kostensatz für die EU28 von ca. 46'000 CHF / t PM₁₀-Äquivalent führt. Mit diesem deutlich tieferen Kostensatz (im Vergleich zum Kostensatz für die Schweiz gut 5-mal tiefer) werden die ausländischen Emissionen monetarisiert.

Aus diesen Berechnungen ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten Kostensätze. Diese schwanken zwischen 0.2 und 1.5 Rappen / kWh. Es stellt sich nun die Frage, welcher dieser Kostensätze in der Norm verwendet werden soll.

Tab. 32 Kosten der Luftbelastung durch Stromerzeugung in CHF₂₀₁₅

	Stromverteilung und Netz	Brennstoffbereitstel- lung und -entsorgung	Kraftwerk / WKK	Total	Total (Summe Schweiz und Ausland)
Kernenergie					
mg PM10-eq pro kWh Strom	40.0	87.2	4.8	132.0	
Anteil in der Schweiz	5%	1.3%	20%	3.1%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.051	0.030	0.024	0.105	
Rappen / kWh im Ausland	0.175	0.397	0.018	0.590	0.695
Erdgas GuD (Gas- und Dampfturbine)					
mg PM10-eq pro kWh Strom	45.0	65.0	37.0	147.0	
Anteil in der Schweiz	5%	0.0%	90%	24.2%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.057	-	0.843	0.900	
Rappen / kWh im Ausland	0.197	0.300	0.017	0.514	1.414
Erdgas WKK 160 kWe					
mg PM10-eq pro kWh Strom	49.0	88.0	37.0	174.0	
Anteil in der Schweiz	5%	0.0%	65%	15.2%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.062	-	0.609	0.671	
Rappen / kWh im Ausland	0.215	0.406	0.060	0.681	1.352
Photovoltaik					
mg PM10-eq pro kWh Strom	36.8	-	169.9	206.8	
Anteil in der Schweiz	5%	-	0%	0.9%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.047	-	-	0.047	
Rappen / kWh im Ausland	0.161	-	0.784	0.946	0.992
Speicherwasserkraftwerk					
mg PM10-eq pro kWh Strom	36.9	-	11.0	47.9	
Anteil in der Schweiz	5%	-	65%	18.8%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.047	-	0.181	0.228	
Rappen / kWh im Ausland	0.162	-	0.018	0.180	0.407
Laufwasserkraftwerk					
mg PM10-eq pro kWh Strom	36.9	-	10.3	47.2	
Anteil in der Schweiz	5%	-	65%	18.1%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.047	-	0.170	0.216	
Rappen / kWh im Ausland	0.162	-	0.017	0.178	0.394
Kehrichtverbrennungsanlage (KVA)					
mg PM10-eq pro kWh Strom	36.9	-	-	36.9	
Anteil in der Schweiz	5%	-	0%	5.0%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.047	-	-	0.047	
Rappen / kWh im Ausland	0.162	-	-	0.162	0.209
Windturbine 800 kW					
mg PM10-eq pro kWh Strom	50.8	-	36.9	87.7	
Anteil in der Schweiz	5%	0.0%	0%	2.9%	
Rappen / kWh in Schweiz	0.064	-	-	0.064	
Rappen / kWh im Ausland	0.223	-	0.170	0.393	0.457
Geothermie (Hot Dry Rock)					
mg PM10-eq pro kWh Strom				71.9	
Anteil in der Schweiz				76.3%	
Rappen / kWh in Schweiz				1.389	
Rappen / kWh im Ausland				0.079	1.467

¹⁹² European Commission (2019), Handbook on the external costs of Transport, S. 107 und 49.

Die Energieperspektiven für die Schweiz für das Jahr 2050 zeigen, dass die Energieproduktion bis 2050 sinken wird, was vor allem den künftigen Verzicht auf Atomenergie zurückzuführen ist.¹⁹³ Für einige Produktionstechnologien werden jedoch Zunahmen in der Produktion erwartet. Dies betrifft insbesondere die Sonnenenergie (deutliche Zunahme), Geothermie und Wind (mittlere Zunahme) sowie die Wasserkraft (leichte Zunahme). Beim Erdgas ist noch unsicher, ob es deutlich ausgebaut wird oder fast gar nicht. Als wahrscheinlichste Quelle für eine zusätzliche Stromnachfrage durch Elektrofahrzeuge scheint somit die Sonnenenergie zu sein. Wir schlagen deshalb vor, in der Norm den gerundeten Kostensatz der Photovoltaik in *Tab. 32* von **1.0 Rappen / kWh oder 10 CHF / MWh** zu verwenden. Dieser Kostensatz kann auch als Mittelwert über mehrere Produktionstechnologien betrachtet werden (Geothermie, Wind, Wasserkraft und allenfalls Erdgas).

Luftschadstoffe: Vor- und nachgelagerte Prozesse von Benzin und Diesel

Für Benzin und Diesel liegen aus den Berechnungen von Infrac, Ecoplan (2019) für die vor- und nachgelagerten Prozesse Emissionsfaktoren pro kg Benzin bzw. Diesel für 4 Luftschadstoffe vor (PM₁₀, NO_x, SO₂ und NMVOC – diese stammen ursprünglich aus der Ecoinvent-Datenbank). Diese können mit einem Kostensatz pro Tonne Schadstoff für die vier Schadstoffe monetarisiert werden. Daraus kann ein Kostensatz pro Tonne Benzin bzw. Diesel hergeleitet werden. Dieser kann dann mit dem Mengengerüst (Veränderung des Benzin- und Dieserverbrauchs) multipliziert werden. Dieses Vorgehen ist deutlich einfacher als wenn die vier Schadstoffe einzeln berechnet würden.

Entscheidend ist, welche Kostensätze zur Ermittlung des durchschnittlichen Wertes pro Tonne Benzin bzw. Diesel zugrunde gelegt werden. Infrac verwendet in seinen Berechnungen für das ARE¹⁹⁴ Kostensätze, die aus den EU-Projekten NEEDS und HEIMTSA stammen und vom IER Stuttgart für die deutsche UBA-Methodenkonvention 2.0 aufbereitet wurden. Diese Kostensätze wurden für die «nördliche Hemisphäre» hergeleitet und sind in der folgenden Tabelle links dargestellt. Alternativ könnten Kostensätze für die EU28 verwendet werden. Die aktuellsten Kostensätze für die EU28 stammen aus dem neusten EU-Handbuch¹⁹⁵ und werden auch oben für die Herleitung der Stromkosten benutzt. Wie die folgende Tabelle zeigt, unterscheiden sich die Werte je nach verwendeter Quelle stark (Faktor 1.04 bis 76). Dieser Unterschied ist auf den Emissionsort (nördliche Hemisphäre versus EU28) zurückzuführen, wobei aus den verfügbaren Unterlagen nicht klar wird, wofür der Unterschied im Detail beruht.

Tab. 33 Kostensatz pro Tonne Schadstoff in CHF₂₀₁₅

	CHF / t	Nördliche Hemisphäre	EU28	Faktor
PM10		318	24'196	76.11
NOx		383	11'827	30.92
SO2		794	11'827	14.90
NMVOC		1'256	1'302	1.04

Sowohl im neuen EU-Handbuch als auch in der neuen deutschen Methodenkonvention 3.0 werden nicht die Kostensätze für die nördliche Hemisphäre benutzt, sondern Kostensätze für die EU28.¹⁹⁶ In Deutschland wurde somit in der Methodenkonvention 3.0 der bisherige Kostensatz für die nördliche Hemisphäre (in der Methodenkonvention 2.0) durch einen Kostensatz für die EU28 ersetzt. Das gilt auch für die EU. Wir schlagen deshalb vor, für die

¹⁹³ Prognos (2012), Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 – Anhang III: Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in Zahlen; Emissionen, Tabellen 3-47 und 3-61., die gemäss unseren internen Energiefachleuten auf den plausibelsten Szenarien beruhen.

¹⁹⁴ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

¹⁹⁵ European Commission (2019), Handbook on the external costs of Transport, S. 107.

¹⁹⁶ Persönliche Kommunikation mit einem Mitautor beider Studien von Infrac.

SN 641 828 die Kostensätze für die EU28 zu verwenden – wie dies auch in der EU und in Deutschland gemacht wird. Daraus ergeben sich folgende Kostensätze:

- Benzin: **96.92 CHF / t Benzin**
- Diesel: **53.39 CHF / t Diesel**

Würden stattdessen die deutlich tieferen Kostensätze für die nördliche Hemisphäre verwendet, so wären die Kostensätze um ca. den Faktor 14 tiefer. Mit der Herleitung über die Kostensätze EU28 ist das Vorgehen auch kompatibel mit dem obigen Vorgehen bei der Herleitung des Kostensatzes für die Stromproduktion, bei der für die Kosten im Ausland ebenfalls auf die Kostensätze für die EU28 abgestellt wird.

Luftschadstoffe: Vor- und nachgelagerte Prozesse von Infrastrukturen

Um die vor- und nachgelagerten Effekte von Infrastrukturen durch Luftschadstoffe abschätzen zu können, werden wiederum Emissionsfaktoren aus der Ecoinvent-Datenbank verwendet, die auch in Infrac, Ecoplan (2019) zur Anwendung kommen. Wie die folgende Tabelle zeigt, werden jedoch die Emissionen von PM₁₀ durch Bau und Unterhalt vorsichtshalber ausgeklammert, weil die Gefahr besteht, dass es hier zu einer Doppelzählung mit den Bauemissionen in Kapitel 3.2.2 kommt (vgl. Kapitel 6.1). Die Emissionsfaktoren pro Meter Strassenlänge werden wiederum umgerechnet in Emissionsfaktoren pro m² Strassenfläche, wobei wir die durchschnittliche Strassenbreite von 4.8m aus Tab. 30 verwenden. Diese werden mit den Kostensätzen für die EU28 aus Tab. 33 monetarisiert. Gesamthaft ergibt sich daraus ein Kostensatz von 0.4641 CHF pro m² Strassenfläche und Jahr.

Tab. 34 Kostensatz pro Tonne Schadstoff in CHF₂₀₁₅

Emissionen in kg pro Meter und Jahr	NOx	PM10	SO2	NMVOG	Total
Bau / Produktion	0.0596	¹	0.0220	0.0563	
Unterhalt	0.0051	¹	0.0064	0.0062	
Entsorgung	0.0739	0.0020	0.0080	0.0219	
Total	0.1386	0.0020	0.0365	0.0844	
Emissionen in kg pro m ² und Jahr	0.0289	0.0004	0.0076	0.0176	
Kostensatz in CHF / t	11'827	24'196	11'827	1'302	
Kosten in CHF pro m² und Jahr	0.3413	0.0101	0.0898	0.0229	0.4641

¹ Wird ausgeklammert, um Doppelzählung mit PM10-Emissionen im Bau (vgl. Kapitel 3.2.2) zu vermeiden.

Quelle Emissionsfaktoren: Ecoinvent-Datenbank bzw. Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015.

Im Zusammenhang mit den Klimaschäden aus vor- und nachgelagerten Prozessen haben wir eine Abstufung des CO₂-Kostensatzes für offene Strecken, Brücken / Viadukte, Tagbautunnels / Galerien, bergmännische Tunnels, Trottoirs und befestigte Velowege hergeleitet (vgl. Tab. 31). Diese Abstufung liegt für Trottoir und Velowege leider nur für CO₂ vor, nicht aber für die anderen Luftschadstoffe. Wir nehmen deshalb vereinfachend an, dass die Kostensätze für Trottoir und befestigte Velowege um den gleichen Prozentsatz tiefer liegen wie beim CO₂. Für Brücken / Viadukte, Tagbautunnels / Galerien und bergmännische Tunnels verwenden wir dieselben Faktoren von 6, 8 bzw. 10 (basierend auf den Investitionskosten) wie bei der Herleitung von Tab. 31. Damit ergeben sich für die Luftschadstoffe folgende Kostensätze:

- Autobahn bis 3.-Klass-Strasse 0.464 CHF pro m² und Jahr
- Brücke / Viadukt 2.784 CHF pro m² und Jahr
- Tagbautunnel / Galerie 3.713 CHF pro m² und Jahr
- Tunnel bergmännisch 4.641 CHF pro m² und Jahr
- Trottoir: 0.356 CHF pro m² und Jahr
- Befestigter Veloweg: 0.277 CHF pro m² und Jahr

6.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Da die Klimaproblematik ein globales Phänomen ist, darf wie in Kapitel 4.3.3 erläutert keine örtliche Anpassung des Kostensatzes erfolgen. Bei der Luftverschmutzung wird ebenfalls auf eine örtliche Differenzierung verzichtet, weil unklar ist, wo das Strom liefernde Kraftwerk steht wo Benzin und Diesel produziert werden oder wo die Baumaterialien hergestellt bzw. entsorgt werden.

6.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand

Die hier angegebenen Werte beziehen sich alle auf den Preisstand des Jahres 2015. Wird die KNA mit einem anderen Preisstand durchgeführt, gelten im Prinzip die Methoden aus den Kapiteln 3.3.4 und 4.3.4:

- Beim **Klima** erfolgt die Anpassung über die **Inflation** (Konsumentenpreisindex).
- Bei der **Luftverschmutzung** erfolgt prinzipiell die Anpassung bei den Gesundheitsschäden über das Nominallohnwachstum, bei den Gebäudeschäden über den Hochbaupreisindex und bei den Vegetationsschäden über die Inflation (Konsumentenpreisindex). Da bei der Luftverschmutzung der Grossteil der Kosten Gesundheitskosten sind (über 83%, vgl. *Tab. 10*) und ein Teil der Gebäudeschäden auch über das Nominallohnwachstum angepasst werden sollten (vgl. Fussnote 122), schlagen wir vereinfachend vor, die Anpassung nur über das **Nominallohnwachstum** vorzunehmen.

Bei der Luftbelastung ist zusätzlich zu beachten, dass ein Teil der Kosten im Ausland anfällt. Entsprechend müsste eigentlich das Nominallohnwachstum im Ausland verwendet werden, nicht dasjenige der Schweiz. Wir schlagen vereinfachend vor, das (prognostizierte) Nominallohnwachstum der Schweiz zu verwenden, um die vor- und nachgelagerten Effekte des Verkehrs in der Schweiz abzuschätzen.

6.4 Veränderung über die Zeit

Im Folgenden wird aufgezeigt, welche Veränderungen über die Zeit auftreten:

Mengengerüst

- Vor- und nachgelagerte Effekte der Energie:
 - Als Inputdaten werden die Fahrzeugkilometer benötigt. Diese nehmen wie immer mit dem **Verkehrswachstum** zu.
 - Zudem verändern sich die **Emissionsfaktoren** für CO₂-Äquivalente bzw. Verbrauch von Treibstoffen und Strom gemäss dem HBEFA. Das **HBEFA 4.1** enthält Prognosen bis 2060, danach wird Konstanz angenommen.
- Vor- und nachgelagerte Effekte der Infrastruktur: Die Fläche der Strassen verändert sich natürlich nicht über die Zeit. Bei den Emissionsfaktoren für CO₂-Äquivalente pro m² und Jahr in *Tab. 31* wird angenommen, dass sie konstant bleiben, da keine Datengrundlagen vorliegen, welche die Festlegung einer Veränderungsrate erlauben würden.

Wertgerüst

- Der **Kostensatz für CO₂-Äquivalente nimmt pro Jahr um 3% zu** (vgl. Kapitel 4.4). In der Sensitivität für den CO₂-Kostensatz nehmen der tiefe und hohe Kostensatz auch mit je 3% pro Jahr zu.
- Bei den Kosten durch Luftschadstoffe bei der Stromproduktion gehen wir von (realer) Konstanz aus. Diese Schlussfolgerung ziehen wir aus der Vermutung, dass sich zwei gegenläufige Bewegungen in etwa aufheben dürften: Einerseits ist davon auszugehen, dass die Emissionen pro MWh über die Zeit abnehmen werden. Dies gilt zwar nicht unbedingt für eine bestehende Produktionsanlage, aber wenn neue Produktionsanlagen gebaut werden, dürften die Emissionen tiefer sein als bei älteren Produktionsanlagen. Andererseits nehmen die Gesundheitsschäden mit dem Bevölkerungswachstum und dem Reallohnwachstum zu, während die Gebäudeschäden mit der Zunahme der Energiebezugsflächen zunehmen und die Vegetationsschäden konstant bleiben (vgl.

Kapitel 3.4) Insgesamt scheint uns daher ein real konstanter Kostensatz eine vertretbare Annahme zu sein.¹⁹⁷

- Für die Kosten der Luftverschmutzung bei der Herstellung von Benzin und Diesel nehmen wir ebenfalls (reale) Konstanz an. Einerseits dürften die Emissionen bei der Herstellung und dem Transport der Treibstoffe mit der Zeit abnehmen, andererseits wird bei Reallohn, Bevölkerung und Gebäudeflächen eine Zunahme zu verzeichnen sein. Wiederum nehmen wir an, dass sich diese Effekte gegenseitig in etwa ausgleichen.
- Bei den Kosten der Luftverschmutzung durch vor- und nachgelagerte Prozesse der Infrastruktur gehen wir gleichfalls von (realer) Konstanz aus. Wiederum dürften sich abnehmende Emissionsfaktoren und zunehmende Kostensätze in etwa ausgleichen.

Damit ist das Wertgerüst abgesehen vom CO₂-Kostensatz konstant.

6.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen

Bei den vor- und nachgelagerten Effekten der Energie werden keine projektspezifischen Daten benötigt, die nicht bereits zur Abschätzung der Auswirkungen auf Luftbelastung und Klima (und andere Indikatoren) erforderlich sind. Die Methodik kann deshalb mit einem einmaligen Programmieraufwand in NISTRA integriert werden und läuft danach automatisch ab. Damit ist keine vereinfachte Methodik erforderlich.

Für die Bestimmung der vor- und nachgelagerten Effekte der Infrastruktur sind als projektspezifische Daten nur Flächenangaben zu den neuen Strassen erforderlich, so dass eine vereinfachte Methodik ebenfalls nicht nötig ist. Die restliche Methodik kann mit einer einmaligen Programmierung in NISTRA integriert werden.

6.6 Anwendungsbeispiel

Die Veränderung der Fzkm wurde bereits bei der Berechnung der Effekte auf Luftbelastung und Klima benötigt und wird im obersten Teil I) der folgenden Tabelle nochmals wiederholt (vgl. auch *Tab. 1* in Kapitel 1.8).

Im Teil II) der nachstehenden Tabelle folgen die Emissionsfaktoren, die alle aus dem HBEFA 4.1 herausgelesen werden können.¹⁹⁸ Zuunterst in Teil II) sind auch die Anteile der verschiedenen Antriebsarten abgebildet. Dabei ist die Bedeutung der Elektrofahrzeuge 2015 noch sehr gering, doch wird ihr Anteil in den nächsten Jahrzehnten deutlich zunehmen.

Aus den Teilen I) und II) (Veränderung der Fzkm durch das Projekt und Emissionsfaktoren) wird in Teil III) die Veränderung der Emissionen berechnet. Bei den CO₂-Äquivalenten werden dabei die Emissionen von Benzin-, Diesel- und Elektrofahrzeugen mit der entsprechenden Gewichtung addiert. Die Gesamtemissionen aus vor- und nachgelagerten Prozessen betragen ca. 2'400 t CO₂-Äquivalente und sind um den Faktor 5 kleiner als die Emissionen von CO₂-Äquivalenten durch die Verbrennung von Benzin und Diesel (gut 12'000 t CO₂-Äquivalente, vgl. Kapitel 4.6). Zudem wird in Teil III) der Treibstoffverbrauch berechnet.

In Teil IV) werden schliesslich aus Teil III) und den Kostensätzen die Ergebnisse ermittelt. Bei den Elektrofahrzeugen ist dabei zu beachten, dass 1 MWh 3'600 MJ entspricht. Der Effekt bei den Elektrofahrzeugen ist marginal, da diese 2015 noch keine Rolle spielen. Mit

¹⁹⁷ Zudem wurde auch in der bisherigen Norm davon ausgegangen, dass der Kostensatz pro MWh Strom konstant bleibt (Ecoplan 2007, Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse, S. 80).

¹⁹⁸ Da die Version 4.1 des HBEFA zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Berichtes noch nicht vorliegt, werden hier Werte aus der Version 3.3 verwendet bzw. die CO₂-Äquivalente werden berechnet aus dem Treibstoffverbrauch gemäss HBEFA Version 3.3. und Emissionsfaktoren von Ecoinvent pro kg Treibstoff (übernommen aus Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015).

den Anteilen an Elektrofahrzeugen, die gemäss dem aktuellen eNISTRA für 2050 gelten, würden die Kosten für Luftbelastungen durch Elektrofahrzeuge auf 0.05 Mio. CHF im Jahr 2015 ansteigen.

Tab. 35 Berechnung der Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse durch den Energieverbrauch anhand eines fiktiven Beispiels für das Jahr 2015

I) Mio. Fzkm	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Innerorts	-50		-1.0	-2.0	-4.0	-3.0	-60.0
Ausserorts	100		2.0	4.0	8.0	6.0	120.0
Autobahn	10		0.2	0.4	1.0	1.0	12.6
Total	60		1.2	2.4	5.0	4.0	72.6

II) Emissionsfaktoren in g / Fzkm	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
CO ₂ - Benzinfahrzeuge	54.16	-	-	21.86	57.65	-	
(CO ₂ -Äquivalente)	43.46	-	-	24.96	49.40	-	
	51.96	-	-	31.65	55.78	-	
CO ₂ - Dieselfahrzeuge	27.82	185.61	175.58	-	36.12	150.84	
(CO ₂ -Äquivalente)	21.53	135.27	127.17	-	32.39	122.18	
	23.25	102.89	112.80	-	38.96	111.45	
CO ₂ - Elektrofahrzeuge	25.07	123.63	-	0.14	32.63	93.42	
(CO ₂ -Äquivalente)	21.63	112.20	-	0.14	28.01	85.60	
	22.89	-	-	0.32	29.67	74.07	
Benzinverbrauch	67.7	-	-	27.3	72.0	-	
	54.3	-	-	31.2	61.7	-	
	64.9	-	-	39.5	69.7	-	
Dieserverbrauch	56.4	376.0	355.7	-	73.2	305.5	
	43.6	274.0	257.6	-	65.6	247.5	
	47.1	208.4	228.5	-	78.9	225.8	
Stromverbrauch	0.87	4.30	-	0.005	1.14	3.25	
in MJ / Fzkm	0.75	3.91	-	0.005	0.97	2.98	
	0.80	-	-	0.011	1.03	2.58	
Anteile Fahrzeugtypen	59.25%	35.80%	0.00%	95.81%	13.19%	0.00%	
in %	40.63%	63.90%	100.00%	0.00%	86.72%	99.97%	
	0.12%	0.30%	0.00%	4.19%	0.10%	0.03%	

III) Emissionen in t	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total	
CO ₂ -Äquivalente	1'683.9	-	101.3	65.9	162.4	392.0	2'405.5	
Innerorts	-2'171.2	-	-175.6	-41.9	-155.8	-452.5	-2'997.0	
Ausserorts	3'452.5	-	254.3	95.7	277.0	733.0	4'812.6	
Autobahn	402.6	-	22.6	12.1	41.2	111.4	589.9	
Treibstoffverbrauch								
Benzin	in t	1'597.1	-	-	82.3	36.3	-	1'715.8
Diesel	in t	818.7	-	205.2	-	269.8	793.8	2'087.6
Elektro	in MJ	46'033	-	-	597	4'140	3'281	54'051

IV) Kosten in Mio. CHF	Kostensätze	PW	Bus	GW	MZ	Li	SNF	Total
Klimakosten	121.5 CHF / t CO ₂	0.20	-	0.01	0.01	0.02	0.05	0.29
Luftschadstoffe		0.20	-	0.01	0.01	0.02	0.04	0.28
Benzin	96.92 CHF / t	0.15	-	-	0.01	0.00	-	0.17
Diesel	53.39 CHF / t	0.04	-	0.01	-	0.01	0.04	0.11
Elektro	10 CHF / MWh	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		0.40	-	0.02	0.02	0.04	0.09	0.57

Gesamthaft entstehen durch die vor- und nachgelagerten Effekte der Energie Kosten von 0.57 Mio. CHF im Jahr 2015. Im vorliegenden Beispiel ist etwas mehr als die Hälfte davon auf Klimakosten zurückzuführen, etwas weniger als die Hälfte auf die Kosten der Luftbelastung.

Ausserdem sind die vor- und nachgelagerten Effekte der Infrastruktur zu bestimmen. Wie in Kapitel 1.8 erläutert beträgt die Länge der Umfahrungsstrasse insgesamt 6.5 km, wobei 1.5 km in einem Tunnel verlaufen (zwei Drittel davon bergmännisch). Die Umfahrungsstrasse ist 12m breit (im Tunnel 10m). Der Zubringer ist 1.0 km lang und hat eine Breite von 6m plus 2m für ein einseitiges Trottoir. Eine Brücke oder ein Veloweg wird beim vorliegenden Beispielprojekt nicht gebaut. Wie die folgende Tabelle zeigt, wird damit eine Fläche von 83'000 m² überbaut. Dadurch werden knapp 1'200 t CO₂-Äquivalente ausgestossen, was zu Kosten von 0.14 Mio. CHF im Jahr 2015 führt. Zusätzliche entstehen Kosten durch vor- und nachgelagerte Effekte durch Luftschadstoffe von 0.10 Mio. CHF im Jahr 2015. Gesamthaft ergeben sich somit Kosten von 0.24 Mio. CHF.

Die Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse von Energie und Infrastruktur betragen damit insgesamt 0.81 Mio. CHF im Jahr 2015 (Summe der Ergebnisse in Tab. 35 und Tab. 36).

Tab. 36 Berechnung der Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse durch die Infrastruktur anhand eines fiktiven Beispiels für das Jahr 2015

	Länge in m	Strassen- breite in m	Trottoir- breite in m	Fläche offe- ne Strecke in m ²	Fläche Tag- bautunnel in m ²	Fläche Tunnel bergmän- nisch in m ²	Trottoir- fläche in m ²	Total
Umfahrungsstrasse								
- Offene Strecke	5'000	12		60'000				60'000
- Tagbautunnel	500	10			5'000			5'000
- Tunnel bergmännisch	1'000	10				10'000		10'000
Zubringer: Offene Strecke	1'000	6	2	6'000			2'000	8'000
A) Total				66'000	5'000	10'000	2'000	83'000
B) Emissionen von CO ₂ -Äquivalenten in kg pro m ² und Jahr				5.7	45.5	56.9	4.4	
C) Emissionen von CO ₂ -Äquivalenten in t pro Jahr (= A * B / 1000)				376.2	227.5	569.0	8.8	1'182
D) Kostensatz in CHF pro Tonne CO ₂ -Äquivalenten im Jahr 2015				121.5	121.5	121.5	121.5	121.5
E) Klimakosten in Mio. CHF (= C * D / 1'000'000)				0.046	0.028	0.069	0.0011	0.144
F) Kostensatz für Luftschadstoffe in CHF pro m ² und Jahr				0.464	3.713	4.641	0.356	
G) Kosten durch Luftschadstoffe in Mio. CHF (= A * F / 1'000'000)				0.031	0.019	0.046	0.0007	0.096
H) Kosten durch Klimagase und Luftschadstoffe in Mio. CHF (E + G)				0.076	0.046	0.116	0.0018	0.240

6.7 Vergleiche mit bisheriger Methodik

Die vor- und nachgelagerten Effekte wurden bisher in der SN 641 828 nicht berücksichtigt. Entsprechend fehlen sie bisher auch in NISTRA. Sie werden daher gemäss den Vorgaben der neuen SN 641 820 integriert. Durch den Einbezug der vor- und nachgelagerten Effekte, insbesondere der externen Effekte der Stromproduktion, kann eine bestehende Lücke im heutigen NISTRA geschlossen werden.

Ein Vergleich zu bisher ist damit nicht möglich – mit einer Ausnahme: In der bisherigen Norm war bereits ein Kostensatz für die externen Kosten der Stromproduktion enthalten, und zwar um die (nun entfallenden) externen Kosten des Infrastrukturbetriebs zu bewerten. In der bisherigen Norm SN 641 828 wird für die externen Kosten bei der Stromproduktion ein Kostensatz von 30 CHF / MWh verwendet, während der neue Kostensatz nur noch 10 CHF / MWh beträgt. Es ist allerdings zu beachten, dass der bisherige Kostensatz neben den Kosten für die Luftschadstoffe auch die Klimakosten enthielt, was nun nicht mehr der Fall ist. Hätte man in der bisherigen Norm basierend auf den damaligen Datengrundlagen einen Kostensatz nur für die Luftbelastung hergeleitet, so hätte man wohl einen Kostensatz zwischen 11 und 14 CHF / MWh verwendet. Der neue Kostensatz basierend auf den aktu-

alisierten Datengrundlagen liegt also in einer ähnlichen Grössenordnung wie bisher. Zudem beruhte der Kostensatz bisher auf einer anderen Produktionstechnologie (bisher Gas im Zentrum, nun Sonnenenergie). Schliesslich werden vollständig neue Emissionsfaktoren und ein anderes Vorgehen (über PM₁₀-Äquivalente) gewählt als bisher.

7 Externe Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs

7.1 Einleitung¹⁹⁹

Die körperliche Betätigung im Langsamverkehr (Fuss- und Veloverkehr) wirkt sich positiv auf die Gesundheit aus. Durch körperliche Aktivität vermindert sich die Zahl der Spitalaufenthalte in der Bevölkerung und die Lebenserwartung nimmt zu. Berücksichtigt werden entfallende medizinische Heilungskosten, vermiedene Wiederbesetzungskosten (Arbeitsplatz), nicht eintretende Produktionsausfälle (da die aktiven Personen nicht vorübergehend oder dauerhaft als Arbeitskräfte ausfallen) und vermiedene Versicherungsleistungen. Es handelt sich prinzipiell um ähnliche Auswirkungen wie bei der Luftbelastung, aber hier sind es Gesundheitsnutzen, bei der Luftbelastung hingegen Gesundheitsschäden bzw. -kosten.

Die Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs wurden in Ecoplan / Infrac (2014) erstmals quantifiziert und in Infrac, Ecoplan (2019) fortgeschrieben.²⁰⁰ Da immer mehr Verkehrsmodelle den Langsamverkehr als eigene Kategorie enthalten, sollen im Folgenden die Datengrundlagen für die Berücksichtigung des Langsamverkehrs in der SN 641 828 zur Verfügung gestellt werden. Damit kann eine Lücke in den bisherigen Bewertungsmethoden geschlossen werden (vgl. auch folgender Exkurs).

Exkurs: Unfallkosten des Langsamverkehrs

Mit der Integration der externen Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs wird ein wichtiger externer Effekt des Langsamverkehrs neu in die KNA aufgenommen. Der andere wichtige externe Effekt des Langsamverkehrs sind die Unfallkosten (siehe Infrac, Ecoplan 2019, S. 120 und 138). Werden die Gesundheitsnutzen neu miteinbezogen, so ist auch sicherzustellen, dass die Unfallkosten des Langsamverkehrs in der KNA miteinbezogen werden.

Gemäss der SN 641 824 («Unfallraten und Unfallkostensätze», Ziffer 1) enthalten die heute verwendeten Unfallraten (und Unfallziffern) auch die Langsamverkehrsunfälle. Konkret wurden bei der Berechnung der Unfallraten (und Unfallziffern) zwar die Unfälle im Langsamverkehr miteinbezogen, aber die Fahrleistungen des Fuss- und Veloverkehrs nicht berücksichtigt (SN 641 824, Ziffer 1). Mit diesem Vorgehen werden die Unfälle von Fussgängern und Velofahrerinnen auf die Fahrleistungen des motorisierten Verkehrs verteilt. Das bedeutet, dass bereits bisher bei der Projektbewertung die Unfälle mit Fussgängerinnen und Velofahrern in den berechneten Werten miteinbezogen sind, indem sie implizit in den Unfallraten des motorisierten Verkehrs enthalten sind. Eine nochmalige Berücksichtigung würde zu einer Doppelzählung der Langsamverkehrsunfälle führen.²⁰¹

Bei der anstehenden Überarbeitung der SN 641 824 ist genau darauf zu achten, wie künftig der Langsamverkehr bei den Unfallkosten miteinbezogen wird.

Die Nutzen aus der körperlichen Aktivität im Fuss- und Veloverkehr sind primär intern, d.h. diejenige Person, die körperlich aktiv ist, lebt auch gesünder. Der Grossteil der internen Gesundheitsnutzen sind immaterielle Nutzen durch vermiedene Spitalaufenthalte bzw.

¹⁹⁹ Die folgenden Ausführungen beruhen zu grösseren Teilen auf Ecoplan, Infrac (2014, Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 492) und Ecoplan et al. (2018, Transportrechnung für Luxemburg und Methodik zu Kosten-Nutzen-Analysen für Verkehrsprojekte, S. 188f).

²⁰⁰ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, Kapitel 15 und Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, Kapitel 15.

²⁰¹ Diese Aussage wurde uns vom Autor der SN 641 824 bestätigt.

eine höhere Lebenserwartung (vermiedenes Leid, vermiedener Schmerz, und Gewinn an Lebensfreude). Dazu kommt der Eigenkonsum (Differenz zwischen Brutto- und Nettoproduktionsausfall). Von einem Teil der positiven Auswirkungen profitieren aber auch Dritte: Der verbesserte Gesundheitszustand führt zu einer Reduktion von Krankheitsfällen, was Einsparungen bei den medizinischen Heilungskosten, bei den Nettoproduktionsausfällen und bei den Wiederbesetzungskosten zur Folge hat. Da diese Kosten auf Krankenkassen (bei den medizinischen Heilungskosten), Gesellschaft (bei den Nettoproduktionsausfällen) und Arbeitgeber (bei den Wiederbesetzungskosten) überwältigt werden, entstehen durch die körperliche Aktivität nicht nur interne Nutzen bei den Teilnehmenden des Langsamverkehrs, sondern auch externe Nutzen (in Form von eingesparten Kosten) bei Dritten. Zudem können durch die Vermeidung von frühzeitigen Todesfällen Hinterlassenenrenten (Witwen-, Witwer- und Waisenrenten) eingespart werden, die von der AHV und damit von der Allgemeinheit zu bezahlen wären. Durch die Vermeidung von Demenzzfällen können im Weiteren Invaliditätsrenten eingespart werden.

Die externen Nutzen des Langsamverkehrs sind im Rahmen der KNA zu berücksichtigen. Auf den Einbezug der internen Nutzen ist demgegenüber zu verzichten: In die KNA fliessen nur die externen Gesundheitsnutzen ein, weil im projektbedingten Mehrverkehr die internen Gesundheitsnutzen bereits im Entscheid enthalten sind, ob man überhaupt mit dem Velo bzw. zu Fuss geht oder doch das Auto oder den ÖV vorzieht. Im Stammverkehr (der mit und ohne Projekt zu Fuss oder mit dem Velo unterwegs ist) muss vorsichtig davon ausgegangen werden, dass die internen Effekte auf die Gesundheit bereits im Zeitkostensatz enthalten sind,²⁰² so dass eine nochmalige Berücksichtigung zu einer Doppelzählung führen würde. Deshalb werden in der KNA nur die externen Gesundheitsnutzen miteinbezogen.

Verschiedentlich wird auch die Frage aufgeworfen, ob es sich bei den eingesparten Gesundheitskosten (z.B. eingesparte medizinische Heilungskosten) als Folge der körperlichen Aktivität im Langsamverkehr wirklich um Nutzen handle, die als echte Ressourceneinsparung zu berücksichtigen sind. Die Antwort hierzu ist unseres Erachtens klar: Wenn man auf die Ortsverschiebung mit dem Langsamverkehr verzichtet und zuhause bleibt oder das Auto oder den ÖV benutzt, dann fehlt der positive Effekt auf den Gesundheitszustand und die Personen wären potenziell häufiger krank und würden mehr Kosten verursachen. In diesem Sinne handelt es sich aus volkswirtschaftlicher Sicht tatsächlich um eine Ressourceneinsparung, die als Nutzen zu betrachten ist.

Um die externen Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr in einer KNA berücksichtigen zu können, sind Kostensätze pro Personenkilometer im Fuss- bzw. Veloverkehr erforderlich. Nimmt das Ausmass des Langsamverkehrs zu, so steigen die externen Nutzen an. Dies ist einerseits ein beabsichtigter Effekt beim Ausbau des Langsamverkehrs. Führen andererseits Strassen- oder ÖV-Projekte dazu, dass Personen vermehrt das Auto oder den ÖV benutzen und teilweise auf Fuss- und Velowege verzichten, so sinken damit die Nutzen des Projektes, denn durch die reduzierte körperliche Aktivität nehmen Krankheitsfälle und frühzeitige Todesfälle zu.

7.2 Mengengerüst

7.2.1 Benötigte Inputdaten

Um die externen Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr bestimmen zu können, müssen folgenden Inputdaten verfügbar sein:

- Veränderung der Personenkilometer im Fussverkehr durch das Projekt
- Veränderung der Personenkilometer im Veloverkehr durch das Projekt

²⁰² Kritisch anzumerken ist, dass es im Schweizer Normensystem keinen Zeitkostensatz für den Langsamverkehr gibt. Einzig der Zeitkostensatz für die Zu- und Abgangszeiten im ÖV betreffen Fuss- oder Velowege z.B. von zu Hause zur ÖV-Haltestelle (SN 641 822a, Ziffer 5.5 und Tab 4). Dieser muss momentan auch für den Langsamverkehr verwendet werden, es wäre jedoch zu begrüssen, wenn Zeitkostensätze spezifisch für Langsamverkehrswege erhoben würden.

Ist eine Differenzierung nach Fuss- und Veloverkehr nicht möglich, genügt auch die undifferenzierte Summe der Veränderung der Personenkilometer im Langsamverkehr. Wie wir in Kapitel 7.3.2 sehen werden, sind die Kostensätze für Fuss- und Veloverkehr praktisch identisch. Deshalb wird in der Norm auf die Differenzierung nach Fuss- und Veloverkehr verzichtet. Kann die Verkehrsleistung im Fuss- und Veloverkehr aber problemlos differenziert erhoben werden,²⁰³ so lassen sich mit differenzierten Inputdaten auch die Ergebnisse differenziert nach Fuss- und Veloverkehr ausweisen, was für die Interpretation hilfreich sein kann (detaillierte Aussagen über die Auswirkungen eines Projektes auf den Fuss- und Veloverkehr).

Eine Differenzierung nach Strassentypen (Autobahn, ausserorts, innerorts) wie z.B. bei der Luftbelastung in Kapitel 3.2.1 ist nicht erforderlich, da der Langsamverkehr auf Autobahnen verboten ist und innerorts und ausserorts gleich schnell fährt, so dass die Gesundheitsnutzen innerorts und ausserorts sich nicht grundlegend unterscheiden.

Im Veloverkehr wäre eine Differenzierung nach «normalen» Velos und Elektrovelos (Pedelec und E-Bike mit Tretunterstützung bis 25 km/h bzw. 45 km/h) prinzipiell wünschbar. Die verfügbaren Daten erlauben aber keine Differenzierung. Der im Folgenden vorgestellte Kostensatz bezieht sich auf «normale» Velo ohne elektrischer Tretunterstützung. Aufgrund fehlender Daten wurde der Kostensatz auch für Pedelecs verwendet, womit die Gesundheitsnutzen der Pedelecs überschätzt werden. Hingegen werden die E-Bikes zu den Mofas gezählt, für die keine Gesundheitsnutzen ermittelt werden, obwohl auch E-Bikes zu Gesundheitsnutzen führen, wenn auch in geringerem Ausmass als ohne Tretunterstützung.²⁰⁴ Liegen differenzierte Daten nach «normalen» Velos, Pedelecs und E-Bikes vor, empfehlen wir deshalb in Analogie zur Berechnung der Gesundheitsnutzen in der Schweiz nur die Personenkilometer (pkm) der Velos und Pedelecs zu verwenden, aber die pkm der E-Bikes zu vernachlässigen.

Dass differenzierte Daten nach «normalen» Velos, Pedelecs und E-Bikes vorliegen, dürfte jedoch in den wenigsten Fällen zutreffen. Es ist vielmehr die Frage, ob überhaupt Daten zu den Auswirkungen auf den Langsamverkehr zur Verfügung stehen bei einer Projektbewertung. Moderne Verkehrsmodelle enthalten immer häufiger auch den Fuss- und Veloverkehr als eigene Kategorien. Nicht immer können die Modellergebnisse aber mit aktuellen Daten zum Verkehrsaufkommen verglichen (bzw. kalibriert) werden, so dass die Auswertungsergebnisse für den Fuss- und Veloverkehr oft mit Unsicherheiten behaftet sind. Trotz dieser Einschränkungen werden mit der vorliegenden Arbeit die nötigen Kostensätze für eine Bewertung zur Verfügung gestellt. Damit ist sichergestellt, dass beim Vorliegen von Daten für den Fuss- und Veloverkehr die Auswirkungen auf die externen Gesundheitsnutzen abgeschätzt werden können.

Bezüglich möglicher Umwegfahrten während der Bauphase von Projekten empfehlen wir, im Langsamverkehr auf eine Berücksichtigung solcher Effekte zu verzichten.²⁰⁵ Insbesondere im Fussverkehr, aber auch im Veloverkehr sind die Umwege meist sehr kleinräumig und meist deutlich geringer als für den motorisierten Verkehr, da dem Langsamverkehr lange Umwege gar nicht zugemutet werden können und alle Grundstücke ohnehin immer erreichbar bleiben müssen.

7.2.2 Berechnung des Mengengerüsts

Die erhobenen Inputdaten entsprechen direkt dem Mengengerüst. Es ist keine Umrechnung nötig.

²⁰³ So liegen die Daten im Verkehrsmodell oft bereits differenziert vor (z.B. nationalen Personenverkehrsmodell und Berner Gesamtverkehrsmodell: ARE 2016, NPVM 2016 und Transoptima et al. 2018, Gesamtverkehrsmodell Kanton Bern).

²⁰⁴ Infras, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, S. 163.

²⁰⁵ Dies im Unterschied zum motorisierten Personen- und Güterverkehr, bei welchen die Umwegfahrten in der Bauphase explizit berücksichtigt werden und unter anderem in die Ermittlung der luftverschmutzungsbedingten Kosten und Klimakosten einfließen.

- Kolonkrebs²⁰⁷
- Demenz
- Depression

Es werden also nicht nur die Auswirkungen auf die Mortalität untersucht (wie dies in anderen Studien zu den Nutzen des Langsamverkehrs oft geschieht), sondern auch die Auswirkungen bzw. positiven Effekte auf sechs Krankheitsbilder.

Es können die folgenden Kostensätze²⁰⁸ für die externen Gesundheitsnutzen verwendet werden:²⁰⁹

- Fussverkehr: 0.183 CHF / pkm
- Veloverkehr: 0.184 CHF / pkm

Wie die Ergebnisse zeigen, sind die beiden Kostensätze zufällig²¹⁰ praktisch identisch. Deshalb verzichten wir in der Norm auf eine Differenzierung des Kostensatzes und verwenden stattdessen den **Durchschnitt von 0.184 CHF / pkm** für Fuss- und Veloverkehr.

Die dargestellten Kostensätze unterschätzen die tatsächlichen externen Nutzen deutlich, weil die folgenden Nutzen nicht berücksichtigt werden können:²¹¹

- Vermiedene Kosten durch weniger gravierende Krankheitsverläufe (ohne Spitalaufenthalt). So können z.B. selbst bei leichten Depressionen (ohne Spitalaufenthalt) hohe volkswirtschaftliche Kosten durch verminderte Produktivität, Arbeitsausfälle und Folgebehandlungen entstehen.
- Kosten durch weitere Krankheitsbilder neben den sechs oben berücksichtigten.
- Es werden nur vermiedene Spitaleinweisungen berücksichtigt, bei denen die Hauptdiagnose einem der sechs betrachteten Krankheitsbilder entspricht. Hospitalisationen, in denen die Nebendiagnose einem der sechs Krankheitsbilder entspricht werden folglich vernachlässigt. Dies führt insbesondere bei der Demenz zu einer Unterschätzung.
- Kosten bei der IV aufgrund von Depressionen.
- Die Demenz führt nicht nur zu Kosten für Spitalaufenthalte, sondern auch für Aufenthalte in Alters- und Pflegeheimen, für die Spitex, für Arztbesuche, für Medikamente und für die informelle Pflege durch Angehörige. Die gesamten direkten Kosten der Demenz sind 35-mal höher als die Spitalkosten.
- Insbesondere bei Depressionen ist anzumerken, dass nach einer Depression möglicherweise nur noch eine weniger anspruchsvolle Arbeit erledigt werden kann.

Die in der SN 641 820 geforderte Sensitivitätsanalyse im Zusammenhang mit Kostensätzen, die vom VOSL abhängen, ist für die externen Gesundheitsnutzen nicht von Bedeutung. Der VOSL beeinflusst nur die Höhe der sozialen Gesundheitsnutzen, nicht aber jene der externen Gesundheitsnutzen.

7.3.3 Anpassung an örtliche Gegebenheiten

Es erfolgt keine Anpassung an örtliche Gegebenheiten (vgl. Kapitel 7.2.3).

²⁰⁷ Der Kolon (oder Colon) ist der mittlere Abschnitt des Dickdarms (auch Grimmdarm genannt).

²⁰⁸ Wir sprechen hier von «Kostensätzen», obwohl es sich um Nutzen handelt, denn der Ausdruck «Nutzensätze» ist nicht gebräuchlich.

²⁰⁹ Infrac, Ecoplan (2019), Externe Effekte des Verkehrs 2015, S. 138.

²¹⁰ Die Ergebnisse für den Fuss- und Veloverkehr werden zwar nach der gleichen Methodik, aber mit teilweise deutlich unterschiedlichen Inputdaten berechnet. Dass die Endergebnisse fast identisch ausfallen ist zufällig und kann sich bei einer späteren Überarbeitung wieder ändern.

²¹¹ Ecoplan, Infrac (2014), Externe Effekte des Verkehrs 2010, S. 497-498 und 512-513.

7.3.4 Anpassung an einen anderen Preisstand

Wie die folgende Tabelle zeigt, ergibt sich der grösste Anteil der externen Gesundheitsnutzen (43%) aus eingesparte Transferleistungen von Versicherungen, wobei dies grossmehrheitlich auf Hinterlassenenrenten der AHV zurückzuführen ist (97%) und nur geringfügig auf IV-Renten von Demenzkranken (3%). Die Hinterlassenenrenten der AHV sind vom Einkommen des Verstorbenen abhängig, wobei die AHV selbst die Einkommen mit der «Lohn- und Preisentwicklung» fortschreibt.²¹² Dies wird am besten durch ein Fortschreiben mit dem Nominallohnwachstum abgebildet.

Der zweitgrösste Nutzenanteil sind die vermiedenen Produktionsausfälle mit 27%. Auch für die Produktionsausfälle eignet sich die Fortschreibung mit dem Nominallohnwachstum.

Die medizinischen Behandlungskosten sind für weitere 25% der Nutzen verantwortlich. Diese müssten mit der Entwicklung der Spitalkosten fortgeschrieben werden. Wir schlagen jedoch vor, vereinfachend auch die Behandlungskosten mit dem Nominallohnwachstum fortzuschreiben.

Schliesslich entfallen 6% auf die Wiederbesetzungskosten. Diese werden als 50% des Jahreslohnes des zu ersetzenden Arbeitnehmers veranschlagt. Auch diese Kosten nehmen damit mit dem Nominallohnwachstum zu.

Damit können die gesamten externen Gesundheitsnutzen des Langsamverkehr mit dem **Nominallohnwachstum** aktualisiert werden. Dies entspricht auch dem Vorgehen bei den Gesundheitskosten der Luftbelastung: Auch dort werden die gesamten Gesundheitskosten mit Nominallohnwachstum fortgeschrieben.

Tab. 37 Übersicht über Fortschreibung auf einen anderen Preisstand und über die Zeit

	Nutzenanteil	Anpassung Preisstand	Anpassung über Zeit
Externe Gesundheitsnutzen			
Medizinische Behandlungskosten	24.7%	} Nominallohnwachstum	} Reallohnwachstum
Nettoproduktionsausfall	27.3%		
Wiederbesetzungskosten	5.5%		
Transfers der Versicherungen	42.5%		

7.4 Veränderung über die Zeit

Entsprechend der Anpassung an einen anderen Preisstand mit dem Nominallohnwachstum wird für die Fortschreibung über die Zeit das **Reallohnwachstum** verwendet (vgl. Tab. 37). Auch in der KNA-Methodik in Luxemburg werden die externen Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr mit dem Reallohnwachstum fortgeschrieben.²¹³

7.5 Vereinfachte Methode bei kleineren Projekten oder Grobevaluationen

Die hergeleitete Methodik ist bereits sehr einfach. Es wird lediglich die Summe der Personenkilometer im Fuss- und Veloverkehr benötigt. Eine weitere Vereinfachung ist deshalb nicht möglich.

²¹² AHV (2019), Hinterlassenenrenten der AHV. S. 6.

²¹³ Ecoplan et al. (2018), Transportrechnung für Luxemburg und Methodik zu Kosten-Nutzen-Analysen für Verkehrsprojekte, S. 195.

7.6 Anwendungsbeispiel

Wie in Kapitel 1.8 erläutert, nimmt der Verkehr im Ortszentrum durch die neue Umfah-
rungsstrasse ab. Das Zentrum wird dadurch für den Fuss- und Veloverkehr attraktiver. So-
mit steigen die Personenkilometer im Fuss- und Veloverkehr um 4 bzw. 2 Mio. pkm pro
Jahr (vgl. folgende Tabelle bzw. *Tab. 1*). Umgerechnet mit den Nutzen pro pkm ergeben
sich Gesundheitsnutzen von 1.1 Mio. CHF.²¹⁴

Tab. 38 Berechnung der Gesundheitsnutzen für ein fiktives Beispiel im Jahr 2015

	Fussverkehr	Veloverkehr	Total
Veränderung in Mio. pkm durch Projekt	4.0	2.0	6.0
Nutzen in CHF pro pkm	0.184	0.184	0.184
Nutzen in Mio. CHF	0.736	0.368	1.104

7.7 Vergleich mit bisheriger Methodik

Die Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs werden im vorliegenden Bericht erstmals
für die KNA aufbereitet. Ein Vergleich mit vorangehenden Versionen entfällt daher.

²¹⁴ Würden die Kostensätze nach Fuss- und Veloverkehr differenziert und würde damit für den Fussverkehr der
leicht tiefere Kostensatz von 0.183 CHF / pkm verwendet, würde ein um 0.004 Mio. CHF oder 0.4% tieferer Nutzen
berechnet.

8 Zusammenfassung des Anwendungsbeispiels

Die Ergebnisse des fiktiven Anwendungsbeispiels werden in diesem Kapitel zusammenfassend dargestellt (siehe *Tab. 39*). Die Betriebsphase führt gesamthaft zu einem positiven Ergebnis von 2.5 Mio. CHF im Jahr 2015. Dies ist auf die Verlegung des Verkehrs aus dem Ortskern zurückzuführen, was zu einer Reduktion beim Lärm und bei der Luftverschmutzung führt. Zudem wird dadurch der Langsamverkehr attraktiver, was zu Gesundheitsnutzen führt. Bei den übrigen drei Indikatoren sind jedoch Verschlechterungen in Kauf zu nehmen.

Zudem führt die Bauphase zu Luftverschmutzungskosten von 41.1 Mio. CHF, die jedoch nur einmalig anfallen, während die anderen Effekte jährlich wiederkehren, wobei sie sich über die Zeit verändern können.

Tab. 39 Zusammenfassung des Anwendungsbeispiels

Effekte im Bereich	Nutzen im Jahr 2015 in Mio. CHF
Lärm	1.37
Luftverschmutzung (Betriebsphase)	2.43
Klima	-1.48
Bodenversiegelung	-0.07
Vor- und nachgelagerte Prozesse	-0.81
Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr	1.10
Total	2.54
Luftverschmutzung während Bauphase	-41.07

Umsetzung in der Praxis: NISTRA

Im Bewertungstool eNISTRA (Excel-Tool zu den Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte) ist die heutige Norm zu den externen Effekten (SN 641 828) implementiert. Dies erlaubt es den Anwendern, die Auswirkungen eines Projektes auf die externen Kosten sehr einfach zu berechnen, da ein Grossteil der – teils komplexen – Berechnungen bereits in eNISTRA implementiert ist.

eNISTRA soll basierend auf der in diesem Forschungsprojekt überarbeiteten und ergänzten Norm ebenfalls aktualisiert werden. Die neue Version von eNISTRA wird es erlauben, die neuen Methoden und Kostensätze mit sehr geringem Aufwand bei der Bewertung von realen Projekten in der Praxis anzuwenden. Damit werden die neuen Kostensätze eine breite Anwendung finden.

9 Anhang A: Verworfenne vereinfachte Methode der Lärmbewertung

In Kapitel 2.5 wurde erläutert, wie der Lärm bewertet werden kann, wenn nicht alle Daten für die detaillierte Methode vorliegen und deshalb eine vereinfachte Methode zur Anwendung kommen muss. Dabei wurde auch eine zweite vereinfachte Methode erwägt. Diese wird im Folgenden kurz vorgestellt und es wird erläutert, weshalb sie nicht weiter verwendet wurde.

Bewertung der Strassen mit grossen Veränderungen der Verkehrsmenge

Die alternative Methode zur vereinfachten Bewertung der Lärmkosten würde von der Tatsache ausgehen, dass bei geringen Veränderungen in der Verkehrsmenge die resultierende Änderung in der Lärmbelastung für die Menschen nicht wahrnehmbar ist. Wahrnehmbare Veränderungen von über 1 dB(A) (vgl. unten) ergeben sich erst, wenn das Verkehrsvolumen um den Faktor 1.25 zu- oder abnimmt.²¹⁵ Deshalb würden für die Bestimmung der Lärmkosten **nur die Strassen mit einer Erhöhung der Verkehrsmenge um mindestens 25% bzw. einer Reduktion um mindestens 20%** betrachtet. Dieses Vorgehen wurde bei der Bewertung der AVANTI-Initiative verwendet.

Als Input in die Berechnung würde die Veränderung der Fzkm auf allen Strassen mit einer Veränderung der Verkehrsmenge um mehr als den Faktor 1.25 benötigt. Dabei würden Tunnelstrecken und Strecken durch unbewohntes Gebiet nicht berücksichtigt, da der dort emittierte Lärm nicht zu Beeinträchtigungen am Wohnort führt.

Die relevanten Fzkm würden dann mit einem Durchschnittskostensatz pro Fzkm monetarisiert. Die in Tab. 7 dargestellte Durchschnittskostensätze wurden ermittelt, indem die gesamten Lärmkosten am Wohnort in der Schweiz durch die gesamten Fahrzeugkilometer in der Schweiz dividiert wurden. Tatsächlich führen jedoch praktisch nur die innerorts zurückgelegten Fzkm zu Lärmkosten am Wohnort. Deshalb würden die in Tab. 7 dargestellten Kostensätze für die Verwendung in diesem Abschätzverfahren nach oben korrigiert und nur auf die Fzkm innerorts bezogen.

Gründe für die Nichtberücksichtigung dieser Methode

Das Hauptproblem dieser Methode ist deren Grundannahme, nämlich dass Lärmveränderungen unter 1 dB(A) für Menschen als nicht wahrnehmbar stärkere Lärmimmission gelten. Diese Annahme ist jedoch kritisch zu hinterfragen:²¹⁶

- In der Akustik wird zwischen dem „Momentanpegel“ L und dem „Mittelungspegel“ Leq, unterschieden. Die Vorbeifahrt eines Fahrzeuges nehmen wir als eine Folge von Momentanpegeln L wahr. Die gemäss Umweltschutzgesetz zu beurteilende Grösse ist jedoch der „jahresdurchschnittliche Mittelungspegel Leq“ im Zeitraum Tag und Nacht. Deshalb kann ein zusätzliches Fahrzeug im Moment zwar hörbar sein, doch verschwindet dieser Effekt praktisch vollständig, wenn man einen Durchschnitt über den ganzen Tag bildet.

Die Aussage, dass Lärmveränderungen unter 1 dB(A) nicht hörbar sind, bezieht sich auf den Mittelungspegel. Die Verwendung des Schwellenwertes von 1 dB(A) geht auf

²¹⁵ Eine Zunahme um 1 dB(A) ergibt sich bei einer Zunahme des Verkehrsvolumens um 25.9% (berechnet aus $10^{X/10} / 10^{(X-1)/10}$, was für jedes X dasselbe Ergebnis ergibt). Entsprechend nimmt das Lärmniveau bei einer Abnahme des Verkehrsvolumens um 20.6% (= $1 / (1 + 25.9\%)$) um 1 dB(A) ab. Diese Zahlen werden auf +25% und -20% bzw. auf den Faktor 1.25 gerundet. (Der Prozentsatz verändert sich natürlich, wenn sich der Anteil des Schwerverkehrs ändert oder wenn sich die Geschwindigkeit verändert. Aus pragmatischen Gründen kann dies aber nicht berücksichtigt werden.)

²¹⁶ Die folgenden Ausführungen basieren auf einem Mail von Sinus AG vom 16.8.2007.

Art. 8 Abs. 3 LSV zurück.²¹⁷ Dort wird von „wahrnehmbar stärkeren Lärmimmissionen“ gesprochen. Die Definition, was nun „wahrnehmbar stärker“ bedeutet, hat das Bundesamt für Verkehr (BAV) mit dem (damaligen) Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in der Weisung Nr. 4 vom 25. Februar 1992 für die Eisenbahnanlagen wie folgt definiert:

- Eine Zunahme des Beurteilungs-Emissionspegels²¹⁸ um mehr als 2 dB(A) gilt in jedem Fall als wahrnehmbar.
- Eine Zunahme des Beurteilungs-Emissionspegels zwischen 1 und 2 dB(A) gilt nur dann als wahrnehmbar, wenn die gesamte Verkehrsmenge für die Tages- oder Nachtperiode um mindestens 25% erhöht wird.
- Eine Zunahme des Beurteilungs-Emissionspegels um weniger als 1 dB(A) gilt in keinem Fall als wahrnehmbar.

Der oben festgelegte Faktor von 1.25 kann also direkt in dieser Weisung des BAV und des BUWAL wiedergefunden werden.

Fazit: Veränderungen des Beurteilungspegels unter 1 dB(A) gelten zwar gemäss Weisung des BAV und BUWAL aus rechtlicher Sicht als nicht wahrnehmbare stärkere Lärmimmission, doch heisst dies nicht, dass Veränderungen unter 1 dB(A) tatsächlich nicht wahrnehmbar sind. Es ist anzunehmen, dass auch für Veränderungen unter 1 dB(A) eine Zahlungsbereitschaft besteht, um z.B. einzelne stark störende Fahrten oder insbesondere in der Nacht eine Lärmreduktion unter 1dB(A) zu erreichen. Folglich sind auch diese Effekte in eine KNA einzubeziehen. Zudem ist auch zu betonen, dass auch kleine Massnahmen, die „nur“ Veränderungen um z.B. 0.3 dB(A) bewirken, relevant sind.

Neben diesem Hauptgrund wurde die Methode aber auch aus folgenden Gründen abgelehnt:

- Die Methode erfordert zusätzliche Inputdaten, nämlich die Veränderung der Fzkm auf Strassen mit einer Veränderung der Verkehrsmenge um mindestens den Faktor 1.25. Diese können zwar aus den Ergebnissen des Verkehrsmodells abgelesen werden, doch ist dazu eine gesonderte Auswertung der Ergebnisse nötig. Die in Kapitel 2.5 dargestellte Durchschnittskosten-Methode beruht jedoch auf der gesamten Veränderung der Fzkm, die im Rahmen einer KNA ohnehin benötigt werden. Damit sind dort keine zusätzlichen Auswertungen des Verkehrsmodells nötig.
- Die Methode kann zu Inkonsistenzen führen, wenn Projekte in Teilprojekte unterteilt werden und z.B. zwei Teilprojekte je eine Erhöhung der Verkehrsmenge auf derselben Strasse um 15% bewirken. Für beide Projekte würden also keine Lärmkosten berechnet. Für das Gesamtprojekt mit einer Zunahme der Verkehrsmenge um 30% würden hingegen Kosten entstehen.

²¹⁷ Bundesrat (2018), Lärmschutz-Verordnung (Nr. 814.41).

²¹⁸ Der Beurteilungs-Emissionspegel L_r ergibt sich aus dem Mittelungspegel L_{eq} und einer Pegelkorrektur K (vgl. Ecoplan et al. (2004), Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs, S. 16-17)

10 Anhang B: Berechnung des Kostensatzes für die Bodenversiegelung

Im Folgenden wird gezeigt, wie in Ecoplan (2007²¹⁹) der Kostensatz für das Jahr 2000 aus Econcept und Nateco (2004²²⁰) hergeleitet wurde (wobei der Text weitgehend wörtlich übernommen wird). In Kapitel 5.3.2 wird dieser Kostensatz dann auf den Preisstand 2015 angepasst.

Ausgangspunkt für die Bewertung der Bodenversiegelung in Econcept und Nateco (2004) sind die Flächenverluste seit den 1950er bzw. 1960er Jahren in der ganzen Schweiz. Dabei wird nach 27 Biotoptypen unterschieden (vgl. *Tab. 42*).²²¹ Zudem werden die Flächen mit sogenannten Funktionalitätsfaktoren gewichtet.²²² Unter der Funktionalität werden die Funktionen verstanden, die eine Fläche (noch) erfüllen kann. Als Kriterien werden die Einbindung in das Umland und der Reifezustand verwendet (vgl. *Tab. 40*). Die Funktionalitätsfaktoren selbst sind in *Tab. 41* dargestellt.

Tab. 40 Definition der Kriterien zur Bestimmung der Funktionalitätsfaktoren

Kriterium	Definition
Einbindung in Umland gut	Freier Zugang zu anderen naturnahen Flächen (keine Verkehrswege oder Siedlungen dazwischen) auf mindestens der halben Länge des Umfangs
Einbindung in Umland schlecht	Freier Zugang zu anderen naturnahen Flächen (keine Verkehrswege oder Siedlungen dazwischen) auf weniger als der halben Länge des Umfangs
Reifezustand hoch	Flächen älter als die Hälfte des notwendigen Alters für den Reifezustand bzw. älter als die Hälfte der Entwicklungsdauer bis ein Biotop den Reifezustand erreicht (vgl. <i>Tab. 42</i>). Wird ein Bereich angegeben, kann vom Mittelwert ausgegangen werden, z.B. für 6 – 30 Jahre von 18 Jahren.
Reifezustand klein	Flächen jünger als die Hälfte des notwendigen Alters für den Reifezustand

Tab. 41 Funktionalitätsfaktoren

Funktionalitätsfaktoren	Einbindung in Umland schlecht	Einbindung in Umland gut
Reifezustand hoch	2/3	3/3
Reifezustand klein	1/3	2/3

²¹⁹ Ecoplan (2007), Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse, Anhang D.

²²⁰ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft.

²²¹ Die Studie von Econcept und Nateco basiert auf den 25 in *Tab. 42* fett hervorgehobenen Habitatstypen sowie auf den Biotop-Nummern 4100 und 4400 (vgl. die folgenden Ausführungen im Haupttext). Sie erlaubt zudem, gewisse Habitatstypen weiter zu unterteilen und mit maximal 34 Habitatstypen zu rechnen.

²²² Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 38.

Tab. 42 Kostensätze und Entwicklungsdauern bis ein Biotop reif ist nach Biotoptyp

Code-bereich	Code GIS	Biotoptyp	Einheit	Kosten pro Jahr in CHF/Einheit ¹	Entwicklungsdauer in Jahren
2000		Binnengewässer			
	2500	Stillgewässer	ha	23'302	6-30
		Temporäre Stillgewässer	ha	33'563	6-30
		Durchschnitt 2500: (Annahme: 80% Stillgewässer, 20% temp. Stillgewässer)	ha	25'354	6-30
	2400	Auenstillgewässer, Altwasser	ha (10 m breit, 1000 m lang)	48'372	50-100
	2200	Fliessgewässer <2 m	100m (2m breit)	17'033	31-80
	2250	Fliessgewässer > 2 m, Uferbereich (beide Seiten)	100m(2*50m)	8'516	31-80
3000		Moore, Sümpfe			
	3100	Hoch- u. Zwischenmoorstandorte		28'967	>150
	3220	Grosseggenried	ha	19'042	6-30
		Röhricht	ha	7'033	6-30
		Durchschnitt 3220: (Annahme: 40% Röhricht, 60% Grosseggenried)	ha	14'238	6-30
	3200	Niedermoore u. Sümpfe (gehölzfrei)		41'609	6-30
4000		Flächen der Landwirtschaft; Staudenfluren			
	4200	Grünland, strukturreiche Wiesen und Weiden (beweidetes extensives Grünland)	ha	3'935	0-10
		Trockenrasen/Halbtrockenrasen	ha	34'726	81-150
		Extensiv genutztes, frisches Grünland	ha	3'079	6-30
		Extensiv genutztes, nass-feuchtes Grünland	ha	8'512	6-30
		Durchschnitt 4200: (Annahme: 30% Wiesen und Weiden, 30% Trocken-/Halbtrocken-rasen, 30% frisches Grünland, 10% nass-feuchtes Grünland)	ha	13'373	
	4170	Ackerbrachen	ha	2'530	1-5
		Grünlandbrachen	ha	3'377	1-5
		Acker- u. Grünlandbrachen (Annahme: je 50%)	ha	2'953	1-5
	4470	Weinbrache (Alte Rebulturen u. Rebbrachen)	ha	25'219	100
	4900	Böschungen <= 2 m Breite, Ackerrandstreifen	100m (2m breit)	79	
5000		Rohbodenstandorte			
	5400	Ruderalflächen	ha	9'070	
		Ruderalflur auf Kies, Sand, bindigem Substrat			3-20
		Boden- und Gesteinsaufschlüsse			?
		Sand-, Kies- u. Schotterflächen			20
		Strassen mit grünem Mittelstreifen			1
	5500	Steinriegel, Trockensteinmauern	100m (2m breit)	3'144	50
	5800	Fels		8'428	
6000		Bäume, Feldgehölze, Gebüsche			
	6100	Hecken, Feldgehölze, bachbegleitende Gehölzsäume	ha	20'586	80
	6220	Lebhag	2m breit * 100m lang	4'195	6-30
	6300	Baumreihe (Allee)	5m breit * 100m lang	1'805	60
	6400	Einzelbäume	St. (25m ²)	130	50-150
	6500	(Alter) Streuobstbestand	ha	14'074	81-150
7000		Wälder			
	7001	Potenzielle Auenwälder	ha	14'967	>150
		Bruchwälder	ha	21'767	>150
		Durchschnitt 7001: (Annahme: 60% Auenwälder, 40% Bruchwälder)	ha	17'687	>150
	7100	Laubwälder	ha	12'567	>150
	7200	Nadelwälder	ha	12'567	50-100
	7300	Mischwälder	ha	12'567	>150
	7800	Waldmäntel (Annahme 5 m breiter Waldmantel)	100m (5m breit)	4'949	80
	7002	Waldweide (nur in eindeutigen Fällen)	ha	9'740	100

Quelle: Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 44 und 51 sowie eigene Umrechnung der Kosten auf Faktorkosten, d.h. Herausrechnen der MWST von 7.5%, die gemäss Econcept und Nateco (2004, S. 51) in den Zahlen enthalten ist.

¹ Die Daten beruhen auf einem realen Diskontsatz von 3% (Econcept und Nateco 2004, S. 33). In einer KNA wird jedoch nur im Rahmen der Sensitivität mit einem Diskontsatz von 3% gerechnet, während der normale Wert 2% beträgt (SN 641 821 (2006), Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Diskontsatz). Zudem wird ein Betrachtungszeitraum von 30 Jahren unterstellt, während in einer KNA standardmässig von einem Betrachtungszeitraum von 40 Jahren ausgegangen wird (SN 641 820, Ziffer 12). Dadurch entsteht zwar eine methodische Ungenauigkeit, deren Behebung würde aber im Vergleich zur Kostenrelevanz einen unverhältnismässigen Aufwand verursachen: Die gesamten umfassenden Berechnungen in Anhang A-6 (Econcept und Nateco 2004, S. A-33 – A-67) müssten neu erstellt werden, da nicht alle Kostenarten gleich auf diese Veränderungen reagieren (teilweise Kosten am Anfang, teilweise regelmässig wiederkehrende Kosten).

Schliesslich werden die so bestimmten (mit den Funktionalitätsfaktoren korrigierten) Flächen mit den in *Tab. 42* angegebenen Kostensätzen monetarisiert (die Bestandteile dieser Kostensätze werden in Kapitel 5.3.1 erläutert). Für die Bestimmung der Kostensätze wurde davon ausgegangen, dass Ackerland, intensives Kulturland, fette Dauerweiden, intensive Weiden und Weinbauflächen (Biotop-Nummern 4100 und 4400) die Ausgangsbiotope für den Ersatz bilden.²²³ Entsprechend können für diese Biotope keine Ersatzkosten berechnet werden. Folglich fliesst ihr Wert nur über den Landpreis in die KNA ein. Wie *Tab. 42* zeigt, schwanken die jährlichen Kosten je nach Biotoptyp zwischen 2'500 und 48'400 CHF / ha (wobei wie erwähnt intensiv genutzte Flächen einen Wert von Null erzielen).²²⁴

Das dargestellte Vorgehen von Econcept und Nateco erlaubt im Prinzip eine sehr differenzierte Berechnung nach verschiedenen Biotoptypen. Experten des BAFU (Sektion Boden) haben jedoch von einer solch differenzierten Betrachtung abgeraten (im Rahmen von Eco-plan 2007): Denn jeder Boden nimmt wichtige Funktionen wahr (Nährstoff- und Wasserspeicher, Abbau von Schadstoffen, CO₂-Senke, Wasserreinigung). Deshalb wäre insbesondere die Bewertung der intensiven Kulturlächen mit einem Kostensatz von Null störend, da auch diese wichtige Funktionen wahrnehmen und ihre Versiegelung somit einen Schaden verursacht. Eine Differenzierung nach einzelnen Biotoptypen gemäss den Ersatzkosten würde also nicht der Bedeutung der Böden für den Naturhaushalt entsprechen. Folglich wird auf eine differenzierte Betrachtung nach Biotoptypen verzichtet und eine Durchschnittsmethode vorgeschlagen, in der jeder Biotoptyp gleich bewertet wird.

Für diese Durchschnittsmethode benötigen wir einen durchschnittlichen Kostensatz pro Hektare. Dazu wird ein gewichteter Durchschnittswert aus den Kostensätzen nach Biotoptypen (vgl. *Tab. 42*) verwendet. Als Gewicht für die verschiedenen Biotoptypen dienen die Flächenverluste seit den 1950er bzw. 1960er Jahren, die von Econcept und Nateco berechnet wurden.²²⁵ Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher Kostensatz von **2'800 CHF pro Hektare pro Jahr** (Preise 2000).²²⁶ Es ist zu betonen, dass dieser Durchschnittswert unter Einbezug der Biotope Ackerland, intensives Kulturland, fette Dauerweiden, intensive Weiden und Weinbauflächen (Biotop-Nummern 4100 und 4400) ermittelt wurde, die einen Kostensatz von Null haben und 77% der überbauten Fläche ausmachen. Damit müssen diese Biotoptypen bei der Ermittlung des Mengengerüsts nicht ausgeschieden werden, was die Bereitstellung der Flächendaten für die Integration in die KNA vereinfacht.

²²³ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 42 – 43.

²²⁴ In *Tab. 42* werden nur die mittleren Kostensätze aus Econcept und Nateco (2004, S. 51) übernommen. Econcept und Nateco geben aber auch Schwankungsbreiten an, d.h. minimale und maximale Kosten (ca. ±30%). Mit diesen Kostensätzen könnte eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. In der SN 641 820 (Ziffer 44) ist jedoch vorgesehen, dass für viele unsichere Parameter keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, weil der Einfluss dieser Annahmen auf das Gesamtergebnis zu gering ist. Da die Bodenversiegelung meist nur ein unbedeutender Indikator ist, wird auf eine Sensitivitätsbetrachtung verzichtet.

²²⁵ Econcept und Nateco (2004), Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, S. 41. Dabei werden nur die Biotoptypen berücksichtigt, die in ha gemessen werden (vgl. *Tab. 42*).

²²⁶ Eigentlich ergibt sich ein jährlicher Kostensatz von 4'200 CHF / ha und Jahr. Dieser gilt aber für eine Fläche mit Funktionalitätsfaktor 1 (vgl. *Tab. 41*). Um die Bewertung weiter zu vereinfachen, soll auch die Erhebung des Funktionalitätsfaktors nicht nötig sein. Deshalb unterstellen wir einen durchschnittlichen Funktionalitätsfaktor von 2/3.

Literaturverzeichnis

Verordnungen

- [1] Bundesrat (2018), Lärmschutz-Verordnung (Nr. 814.41) von 1986 Stand 2018. Online: <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19860372/index.html> (20.11.2018).

Normen

- [2] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2018), «**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr**», *SN 641 820*.
- [3] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2006), «**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Diskontsatz**», *SN 641 821*.
- [4] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2009), «**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Zeitkosten im Personenverkehr**», *SN 641 822a*.
- [5] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), «**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Unfallraten und Unfallkostensätze**», *SN 641 824*.
- [6] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2009), «**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Betriebskosten von Strassenfahrzeugen**», *SN 641 827*.
- [7] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2009), «**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Kosten**», *SN 641 828*.

Dokumentation

- [8] AHV (2019), «**Hinterlassenenrenten der AHV**». 3.03 Leistungen der AHV. Online: <https://www.ahv.ch/p/3.03.d> (8.4.2019).
- [9] Anthoff David (2007), «**Report in the marginal external damage costs inventory of greenhouse gas emissions**». NEEDS delivery n° 5.4 – RS1b. Online: <http://www.needs-project.org/2009/Deliverables/RS1b%20D5.4-5.5.pdf> (27.6.2019).
- [10] ARE Bundesamt für Raumentwicklung (2016), «**NPVM 2016: Zonenstruktur und Verkehrsnetze**». Studie erarbeitet durch EBP Schweiz AG. Zürich und Bern.
- [11] BAFU Bundesamt für Umwelt (2009), «**UVP-Handbuch. Richtlinie des Bundes für die Umweltverträglichkeitsprüfung (Art. 10b Abs. 2 USG und Art. 10 Abs. 1 UVPV)**». Online: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/uvp/publikationen/uvp-handbuch.html> (13.9.2018).
- [12] BAFU Bundesamt für Umwelt (2013), «**PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland. Modelling results for 2005, 2010 and 2020.**» Environmental studies no. 1304. Bern. Online: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/air/publications-studies/publications/pm10-and-pm2-5-ambient-concentrations-in-switzerland.html> (11.3.2019).
- [13] BAFU Bundesamt für Umwelt (2015), «**Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-road-Sektors: Studie für die Jahre 1980 - 2050.**» Umwelt-Wissen Nr. 1519. Bern. Online: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoff-emissionen-des-non-road-sektors.html> (12.3.2019).
- [14] BfS Bundesamt für Statistik (2015), «**Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung. Ergebnisse des Referenzszenarios**». Neuenburg. Online: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/zukunftige-entwicklung.assetdetail.272238.html> (12.9.2018).
- [15] BfS Bundesamt für Statistik (2017), «**Wohnungen nach Kanton, Gebäudekategorie, Anzahl Zimmer, Flächenklassen und Bauperiode**». Online: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bau-wohnungswesen/wohnungen.assetdetail.3822925.html> (12.9.2018).
- [16] BfS Bundesamt für Statistik (2018), «**Entwicklung der Baupreise.**» Schweizerischer Baupreisindex - Veränderungsraten zum Vorjahr in % - Index Oktober 2010 = 100. Online: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.7008828.html> (18.3.2019).
- [17] BfS Bundesamt für Statistik (2018), «**Arealstatistik Land Use - Kantone und Grossregionen nach 46 Grundkategorien.**» Online: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.6646436.html> (1.4.2019).
- [18] bfu Beratungsstelle für Unfallverhütung (2016), «**Status 2016: Statistik der Nichtberufsunfälle und des Sicherheitsniveaus in der Schweiz.**»
- [19] Bickel P., Hunt A., De Jon G., Laird J., Lieb Ch., Lindberg G., Mackie P., Navrud S., Odgaard Th., Shies J., Tavasszy L. (2006), «**HEATCO D5: Proposal for Harmonized Guidelines**». Deliverable 5 of HEATCO (Developing Harmonized European Approaches for Transport Costing and Project Assessment).

-
- [20] BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) (2003), «**Modelling of PM10 and PM2.5 ambient Concentrations in Switzerland 2000 and 2010.**» Environmental Documentation No. 169. Bern.
-
- [21] EBP, Ecoplan, Transitec (2017), «**Strategisches Entwicklungsprogramm Nationalstrassen (STEP-NS 2018): Technischer Bericht zur Engpassanalyse, Bewertung mit EBEn und Priorisierung.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strassen. Definitive Fassung vom 25. September 2017. Zürich, Bern und Lausanne.
-
- [22] Econcept, Nateco (2004), «**Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft. Monetarisierung der Verluste und Fragmentierung von Habitaten.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumplanung, des Bundesamtes für Strassen und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern.
-
- [23] Ecoplan (2006), «**Environmental costs in sensitive areas.**» GRACE – Task 1.7. Background report im Auftrag der Europäischen Kommission. GRACE (Generalisation of Research on Accounts and Cost Estimation). Funded by Sixth Framework Programme. Bern.
-
- [24] Ecoplan (2007), «**Externe Kosten im Strassenverkehr: Grundlagen zur Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse.**» Forschungsauftrag 2005/204 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). Bern und Altdorf.
-
- [25] Ecoplan (2007), «**Die Energieperspektiven 2035 – Band 3. Volkswirtschaftliche Auswirkungen. Ergebnisse des dynamischen Gleichgewichtsmodells, mit Anhang über die externen Kosten des Energiesektors.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bern.
-
- [26] Ecoplan (2012), «**Energiestrategie 2050 – volkswirtschaftliche Auswirkungen.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Bern. Online: https://www.ecoplan.ch/download/ekkw_sb_de.pdf (29.5.2019).
-
- [27] Ecoplan (2018), «**Handbuch NISTRA 2017, NISTRA – Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte. Handbuch für das Excel-Tool eNISTRA 2017, das folgende Bewertungsmethoden enthält: KNA – Kosten-Nutzen-Analysen gemäss VSS-Normen SN 641 820 – SN 641 828 KWA – Kosten-Wirksamkeits-Analyse.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA). Bern.
-
- [28] Ecoplan (2016), «**Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life).**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) und der Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu). Bern. Online: <https://www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/kosten-und-nutzen-des-verkehrs.html> (30.8.2018).
-
- [29] Ecoplan (2018), «**Handbuch eNISTRA 2017, NISTRA – Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte. Handbuch für das Excel-Tool eNISTRA 2017, das folgende Bewertungsmethoden enthält: KNA – Kosten-Nutzen-Analyse gemäss VSS-Normen SN 641 820 – SN 641 828. KWA – Kosten-Wirksamkeits-Analyse.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA). Bern.
-
- [30] Ecoplan PRH, komobile und BDO (2018), «Transportrechnung für Luxemburg und Methodik zu Kosten-Nutzen-Analysen für Verkehrsprojekte». Studie im Auftrag des Ministère du Développement durable et des Infrastructures, Direction de la Planification de la Mobilité. Bern, Luxemburg und Wien. Online: <https://gouvernement.lu/dam-assets/documents/actualites/2018/07-juillet/05-bausch-mobilitaet/LUX-Schlussbericht-def.pdf> (8.4.2019).
-
- [31] Ecoplan, Infras (2008), «**Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE) und des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Bern, Zürich und Altdorf.
-
- [32] Ecoplan, Infras (2014), «**Externe Effekte des Verkehrs 2010, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE), Bern, Zürich und Altdorf. Online: <https://www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/kosten-und-nutzen-des-verkehrs.html> (30.8.2018).
-
- [33] Ecoplan, Infras, ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004), «**Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2000.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, des Bundesamtes für Energie sowie des Bundesamtes für Gesundheit. Bern.
-
- [34] Ecoplan, metron (2005), «**Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Kommentar zur Norm.**» Forschungsauftrag VSS2000/342 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
-
- [35] Ecoplan, Planteam, IHA-ETH (Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie) (2004), «**Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2000.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft sowie des Bundesamtes für Gesundheit. Bern.
-
- [36] Ecoplan, Transoptima (2018), «**Neue Erkenntnisse zu Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr.**» Forschungsprojekt VSS 2015/117 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). Bern.
-
- [37] EU (2002), «**Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm.**» Online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0049&from=DE> (20.11.2018).
-

- [38] European Commission, DG Mobility and Transport (2019), «**Handbook on the external costs of Transport. Version 2019**». Brüssel. Online: https://ec.europa.eu/transport/themes/sustainable-transport/internalisation-transport-external-costs_en (26.6.2019).
- [39] Grolimund + Partner AG (2018), «**Lärminderungspotential leiser Reifen auf gängigen Schweizer Strassenbelägen**». Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und den Kantonen Aargau, Graubünden, Solothurn und Zürich. Online: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/fachinformationen/massnahmen-gegen-laerm/massnahmen-gegen-strassenlaerm/leise-reifen.html> (5.10.2018).
- [40] Heutschi K., Locher B. (2018), «**sonROAD18 - Berechnungsmodell für Strassenlärm**». Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 02.03.2018.
- [41] Infras (2006), «**Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000. Klima und nicht erfasste Umweltbereiche sowie vor- und nachgelagerte Prozesse.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung. Zürich.
- [42] Infras (2017), «**Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA.**» Version 3.3. Berechnungstool im Auftrag der Schweiz, Deutschlands, Österreichs, Schwedens, Frankreichs und Norwegens. Bern.
- [43] Infras (2017), «**Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs der Schweiz 1990-2050.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Bern. Online: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/studien.html> (12.3.2019)
- [44] Infras (2017), «**Pilotstudie zum Treibstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen im Verkehr 1990-2050 – Szenarien für den Strassenverkehr.**» Schlussbericht. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern. Online: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/daten-indikatoren-karten/daten/emissionsperspektiven.html> (5.10.2018).
- [45] Infras (2019), «**Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA.**» Version 4.1. Berechnungstool im Auftrag der Schweiz, Deutschlands, Österreichs, Schwedens, Frankreichs und Norwegens. Bern.
- [46] Infras, Ecoplan (2019), «**Externe Effekte des Verkehrs 2015, Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten**», Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung (ARE), Bern, Zürich und Altdorf.
- [47] Infras, Wüest & Partner (2004), «**Verkehrsbedingte Gebäudeschäden. Aktualisierung der externen Kosten.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, des Bundesamtes für Energie sowie des Bundesamtes für Gesundheit. Zürich.
- [48] Kuik O., Brander L., Tol R.S.J (2009), «**Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis.**» Energy Policy, vol. 37, Iss. 4 (2009), pp. 1395-1403.
- [49] OECD (2012), Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies. Online: <http://www.oecd.org/environment/mortalityriskvaluationinenvironmenthealthandtransportpolicies.htm> (30.8.2018).
- [50] Prognos (2012), «**Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 – 2050. Ergebnisse der Modellrechnungen für das Energiesystem.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), Basel. Online: http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/06431/index.html?lang=de&dossier_id=06421&print_style=yes (12.9.2018).
- [51] Prognos (2012), «**Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 – Anhang III: Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in Zahlen; Emissionen.**» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Basel. Online: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050/dokumentation/energieperspektiven-2050.html> (29.5.2019).
- [52] Schweizer Baumeisterverband (2017), «**Zahlen und Fakten 2017.**» Online: <http://www.baumeister.ch/de/politik-wirtschaft/publikationen/zahlen-und-fakten> (13.3.2019).
- [53] Sonntagszeitung (2019), Die grösste Quelle von Mikroplastik. 16.6.2019. Online: <https://desk-top.12app.ch/articles/27370930> (26.6.2019).
- [54] Transoptima, Ecoplan, Transsol (2018), «**Gesamtverkehrsmodell Kanton Bern: Modellaktualisierung 2016.**» Studie im Auftrag der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern. Online: https://www.bve.be.ch/bve/de/index/mobilitaet/mobilitaet_verkehr/mobilitaet/grundlagen_mobilitaet/verkehrsmodellierung.assetref/dam/documents/BVE/AoeV/de/aoev_Bericht_GVM%20BE_Aktualisierung_2016_20181010.pdf (9.4.2018).
- [55] UBA Umweltbundesamt Berlin (2005), «**Ökonomische Bewertung von Umweltschäden. Methodenkonvention zur Schätzung externen Umweltkosten.**» Entwurf Stand Juli 2005.
- [56] UBA Umweltbundesamt (2005), «**Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden: Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen.**» Texte 19/05. Forschungsbericht 202 242 20/02. UBA-FB 000824. Dessau. Online im Internet: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2936.pdf> (13.3.2019).
- [57] UBA Umweltbundesamt (2019), «**Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten: Kostensätze.**» Stand 02/2019. Online: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf (27.3.2019).

-
- [58] WHO World Health Organization (2011), «**Burden of disease from environmental noise. Qualification of healthy life years lost in Europe**». Kopenhagen. Online im Internet: http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/e94888/en/ (12.9.2018).
-
- [59] ZKB Zürcher Kantonalbank (2011), «Ruhe bitte! Wie Lage und Umweltqualität die Schweizer Mieten bestimmen.» Studie in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Umwelt. Zürich.
-
- [60] ZKB Zürcher Kantonalbank (2012), «Wie Lage und Umweltqualität die Eigenheimpreise bestimmen. Hedonisches Modell für Stockwerkeigentum.» Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Zürich.
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 11. Juni 2019 / 8. Juli 2019

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2015/115
 Projekttitel: Bewertung der externen Effekte des Strassenverkehrs
 Enddatum: 31. Juli 2019

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

In der SN 841 828 «Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Effekte» wird erläutert, wie die externen Effekte in Kosten-Nutzen-Analysen (KNA) von Strassenprojekten berücksichtigt werden können (ohne Unfallkosten – siehe dazu SN 841 824). Der vorliegende Bericht bildet die Grundlage für die Überarbeitung der SN 841 828. Er beschreibt die verwendeten Methoden umfassend und ersetzt damit alle bisherigen Grundlagen. Insbesondere werden auf Basis der aktuellen Literatur folgende Anpassungen vorgenommen:

- Neu werden zusätzliche externe Effekte miteinbezogen:
 - Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung
 - Vor- und nachgelagerte Prozesse der Antriebsenergie (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Herstellung, Transport und Bereitstellung der Antriebsenergie (Benzin, Diesel, Strom)) und der Infrastruktur (Schäden durch die Emission von Klimagasen und Luftschadstoffen bei Bau, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur). Damit können neu auch die externen Effekte der Elektrofahrzeuge miteinbezogen werden. Dazu werden die externen Kosten der Stromproduktion umfassend aktualisiert. Auch für die anderen Kostenbestandteile werden Bewertungsmethoden für die KNA hergeleitet und die entsprechenden Kostensätze ermittelt.
 - Externe Gesundheitsnutzen des Langsamverkehrs: Durch die Bewegung im Fuss- und Veloverkehr sinkt die Häufigkeit von Spitalaufenthalten bei sechs Krankheitsbildern und die Lebenserwartung steigt. Für die Berücksichtigung dieser positiven Auswirkungen wird eine neue Methodik hergeleitet und die dazu benötigten Daten werden zur Verfügung gestellt.
- Dagegen entfallen zwei bisherige Indikatoren, nämlich das Landschafts- und Ortsbild sowie die externen Kosten des Energieverbrauchs durch den Infrastrukturbetrieb.
- Neu wird ein deutlich höherer VOSL (value of statistical life) verwendet als bisher. Zudem wird eine Sensitivität für den VOSL gerechnet, da bei der Herleitung des VOSL grosse Unsicherheiten bestehen ($\pm 50\%$).
- Zudem werden die Berechnungsmethoden und die Datengrundlagen der übrigen Kostenbereiche umfassend überarbeitet und aktualisiert:
 - Lärm: Die benötigten Inputdaten für die Bewertung beruhen auf neuen Lärmmassen. Damit sinken auch die Schwellenwerte, ab denen Lärmkosten berücksichtigt werden. Zudem werden neu Lärmkosten in Eigentumswohnungen und bei den lärmbedingten Gesundheitskosten auch jene von Schlaganfällen miteinbezogen. Schliesslich werden alle Datengrundlagen (inkl. VOSL) aktualisiert. Wie bisher beschränkt sich die Bewertung auf den Lärm am Wohnort.
 - Luftverschmutzung: Die bisherige Methodik wird im Wesentlichen beibehalten, aber umfassend aktualisiert (inkl. Einbezug Biodiversitätsverluste und höherer VOSL). Die lokalen Gesundheits- und Gebäudeschäden im unbebauten Gebiet werden neu auf Null gesetzt (dafür im bebauten Gebiet erhöht).
 - Klima: Es wird neu ein gut doppelt so hoher Kostensatz als bisher vorgeschrieben (neu 121.5 CHF pro Tonne CO₂), der pro Jahr um 3% zunimmt. Zudem erfolgt neu eine Sensitivitätsanalyse für den Klimakostensatz.
 - Bodenversiegelung: Bei der Bodenversiegelung wird nur der Kostensatz pro versiegelte Fläche aktualisiert. Auf einen Wechsel der Methodik wurde nach reiflicher Überlegung verzichtet.

Zu jedem Kostenbereich enthält der Bericht zudem eine Abschätzung wie sich die Effekte über die Zeit verändern dürfen, da für die Anwendung in einer KNA die Entwicklung der externen Effekte über eine Zeitperiode von mehr als 50 Jahre prognostiziert werden müssen. Zudem werden die Bewertungsmethoden anhand eines Anwendungsbeispiels illustriert, welches das Vorgehen veranschaulicht. Schliesslich erfolgt für alle Kostenbereiche ein Vergleich zur bisherigen Methodik.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Ziel des vorliegenden Projektes ist es, die Norm SN 641 828 wieder auf den aktuellen Stand der Forschung zu bringen. Der überarbeitete Normentwurf erfüllt diese Bedingung. Insbesondere können die bestehenden Kostenbereiche umfassend aktualisiert und methodisch erweitert werden (sofern nicht bewusst auf einen Kostenbereich verzichtet wird), und es können neue Kostenbereiche in die Norm integriert werden (vor- und nachgelagerte Prozesse, Gesundheitsnutzen im Langsamverkehr und Biodiversitätsverluste der Luftbelastung). Für diese neuen Kostenbereiche werden die entsprechenden Methoden zur Bewertung der externen Kosten entwickelt und die zur Durchführung nötigen Datengrundlagen erarbeitet. Mit der nachgeführten Norm entspricht die Bewertung der externen Effekte wieder dem aktuellen Stand der Forschung.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die wesentlichen Folgerungen und Empfehlungen wurden im überarbeiteten Normentwurf zusammengefasst (und sind auch oben in der "Zusammenfassung der Projektergebnisse" ersichtlich). Zwar hat sich die Norm SN 641 828 in den letzten 10 Jahren im grossen Ganzen gut bewährt. Die Forschungsarbeit zeigt aber, dass die Norm nun in mehreren Punkten angepasst und ergänzt bzw. bereinigt werden muss, damit sie wieder dem aktuellen Stand der Forschung zu den externen Effekten entspricht. Mit der aktualisierten Norm ist es zudem neu möglich, einerseits Elektrofahrzeuge und andererseits den Langsamverkehr in einer KNA zu berücksichtigen.

Publikationen:

- VSS-Forschungsbericht
- Überarbeitete Norm SN 641 828 "Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Effekte"

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Lieb

Vorname: Christoph

Amt, Firma, Institut: Ecoplan AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Ziel der Forschungsarbeit war es, Bewertungsansätze für externe Effekte aus aktuellen Studien in bewertungstaugliche Algorithmen umzurechnen und so das Wertgerüst für Kosten-Nutzen-Analysen von Strassenprojekten auf den aktuellen Stand der Wissenschaft zu bringen. Dabei wurden auch neue Bewertungstatbestände aufgegriffen, zum Beispiel zu Biodiversitätsverlusten oder zum Nutzen körperlicher Betätigung im Langsamverkehr. Die Forschungsarbeit baut insbesondere auch auf Arbeiten des Bundesamtes für Raumentwicklung auf und stellt die einheitliche Anwendung auf Behördenebene sicher. Die Forschungsziele wurden innerhalb der geplanten Bearbeitungszeit und im Kreditrahmen vollständig erreicht.

Umsetzung:

Aktualisierung der SN 641 828. Der Forschungsbericht dient Interessierten als weiteres Hilfsmittel zu deren Anwendung.

weitergehender Forschungsbedarf:

-

Einfluss auf Normenwerk:

Aktualisierung der SN 641 828

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Lükling

Vorname: Jost

Amt, Firma, Institut: R+R Burger und Partner AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

*Digital unterschrieben von Jost
Lükling
DN: cn=Jost Lükling, o=R+R, ou,
email=lukling@rmp.ch, c=CH
Datum: 2019.07.02 12:25:06
+02'00'

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.