

Grundlagen für Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen von Infrastrukturbauten



Hombrechtikon, 13. Mai 2025

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)



Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Ökonomie und Innovation, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer

Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon

Autoren und Autorinnen

Saskia Bleiker
Thomas Pohl
Tina Stürzinger
Dominik Osterwalder

Begleitgruppe

Niklas Nierhoff, Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Markus Wüest, Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Peter Gerber, Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Pierryves Padey, Bundesamt für Umwelt (BAFU)
David Hiltbrunner, Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Christian Aebischer, Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Jonathan Hacker, Schweizerische Bundesbahnen (SBB)
Juliane Buchheister, Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Simon Hofstetter, Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Fabio Brantschen, Bundesamt für Rüstung (Armasuisse)
François-Joseph Contat, Bundesamt für Rüstung (Armasuisse)
René Bähler, Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB)

Hinweis

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Der Klimawandel führt nicht nur zu höheren Temperaturen, sondern auch zu einer Veränderung der Häufigkeit, der Intensität und der Dauer verschiedener Klimaextreme. Diese sind potenzielle Gefahren für Menschen und Infrastrukturen. Die Klimaneutralität gewinnt vor diesem Hintergrund immer mehr an Bedeutung. Gemäss Klima- und Innovationsgesetz (KIG) muss die Schweiz bis Mitte des Jahrhunderts eine ausgeglichene Treibhausgasbilanz erreichen – und die zentrale Bundesverwaltung bis 2040.

Der Infrastrukturbereich sieht sich wie alle Sektoren mit der dringenden Herausforderung konfrontiert, die Treibhausgasemissionen im Hinblick auf die Erreichung der Klimaziele zu reduzieren. Referenz- und Zielwerte können einen effektiven Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen leisten. Im Bereich des Hochbaus wurde dieses Thema bereits vor über 10 Jahren systematisch angegangen.

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) werden von der Umtec Technologie AG (UTech) im Rahmen dieser Studie deshalb Grundlagen für Referenz- und Zielwerte von grauen Treibhausgasemissionen im Infrastrukturbereich ermittelt. Die Studie ist in drei Module gegliedert. Der Fokus liegt auf der Auswertung und Zusammenstellung einer Grosszahl an bereits vorhandenen Ökobilanzen, auf der Identifikation und Schliessung von Datenlücken (Modul 1) sowie auf der Analyse von Reduktionspotenzialen (Modul 2) und einer Synthese mit Hinweisen auf eine mögliche Umsetzung in der Praxis (Modul 3).

Im Modul 1 wurden verschiedene repräsentative Infrastrukturprojekte der Schweiz und des naheliegenden Auslands ausgewertet. Untersucht wurden Fahrbahnen (Anschlussstrecke, Gehweg, Gemeindestrasse, Kantonsstrasse, Nationalstrasse, Kreisel, Bushaltestelle), Gleise im Bahnbau, Brücken, Tunnel, Galerie, übrige Bauten (Böschungssicherungen, Lärmschutzwände, Stützanker, Stützmauer, Freileitungen, Flugpiste) sowie Entwässerungen und Kanalisationen (Abwasserleitungen, Leitungsgräben, Pumpen, Schächte und Strassenabwasserbehandlungsanlagen). Dabei wurden die Lebenszyklusphasen Herstellung, Errichtung, teilweise Instandsetzung und Entsorgung berücksichtigt. Die Auswertung wurde für die Wirkungsabschätzungsmethoden Treibhausgasemissionen (THG) und sofern Daten vorhanden waren für die Umweltbelastungspunkte (UBP) und den kumulierten Energieaufwand (KEA) durchgeführt. Das Ziel war es, für verschiedene Infrastrukturbauwerke Referenzwerte zu bilden. Die Mittelwertbildung glättet mögliche Unsicherheiten und Unterschiede in den Systemgrenzen oder in den Hintergrunddatenbanken aus. Die Heterogenität einzelner Infrastrukturprojekte ist teilweise sehr ausgeprägt, was die Vergleichbarkeit der Projekte erschwert. Bei einigen Objekttypen wie zum Beispiel bei Brücken wurde festgestellt, dass eine umfassende Klassierung notwendig wäre und die Datengrundlage deutlich verbessert werden müsste. Andere Objekttypen wie zum Beispiel die Fahrbahnen sind anhand der Standardaufbau-Normalien vergleichbar und bieten eine gute Grundlage für Referenzwerte. So weisen zum Beispiel Kantons- und Nationalstrassen 1.5 kg CO₂ eq pro Quadratmeter und Jahr auf.

In Modul 2 wurden Reduktionspotenziale identifiziert. Die Auswertung des Moduls 1 hat ergeben, dass die Materialien, insbesondere Beton, Asphalt, Stahl und Natursteine zu hohen Umweltbelastungen von bis zu ca. 80% der Gesamtumweltwirkung in Infrastrukturbauprojekten führen. Deshalb wurde einerseits das Reduktionspotenzial dieser Materialien allgemein und andererseits das Reduktionspotenzial der Infrastrukturprojekte unter Berücksichtigung dieser Materialoptimierungen evaluiert und Ziele für die Jahre 2030 und 2040 abgeleitet. Eine besondere Rolle spielten hier Recyclingmaterialien, alternative Zemente, Niedertemperaturasphalt und neue Ansätze wie Flüssigboden als Ersatz für herkömmliche Hüllmaterialien. Die Ergebnisse zeigen, dass durch innovative Materialwahl die Emissionen für einzelne Bauprojekte um bis zu 60% gesenkt werden können. Das Ziel könnte sein, die Treibhausgasemissionen der Bauprojekte bis 2030 um ca. einen Drittel und bis 2040 um zwei



Drittel zu reduzieren. Einsätze von Baumaschinen und Transportprozesse können ebenfalls optimiert werden, jedoch ist deren Auswirkung auf die Gesamtbilanz geringer als bei den Materialien. Darüber hinaus liegt bei der konstruktiven Ausgestaltung und bei bautechnischen Varianten ein grosses Reduktionspotenzial.

Im Modul 3 fand eine Synthese der ersten beiden Module statt und es wurden Vorschläge für mögliche Referenz- und Zielwerte für die Praxis erarbeitet. Ein möglicher Verwendungszweck für Referenzwerte ist deren Einbindung in bestehende Normen oder Bewertungsinstrumente wie den SNBS-Infrastruktur (Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz). Des Weiteren können darauf basierend Anreizsysteme geschaffen und zum Beispiel Bonus-Malus-Systeme eingeführt werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die den Referenzwerten zugrunde liegende Datenbasis hinreichend breit, transparent und statistisch belastbar ist. Sowohl die Herkunft und Repräsentativität der Daten als auch die methodischen Annahmen müssen klar dokumentiert sein. Dies bedingt eine Weiterbearbeitung der vorliegenden Resultate.

Die Studie zeigt auf, dass Anreize und Normen entscheidende Hebel sein können, um den Infrastrukturbau nachhaltig zu transformieren und Emissionsziele zu erreichen.

Insgesamt stellt die Studie eine wichtige Grundlage für die Konkretisierung und Weiterentwicklung von Referenz- und Zielwerten dar und gibt Empfehlungen, wie die Baupraxis in der Schweiz nachhaltiger gestaltet werden kann. Die im Rahmen dieser Studie ermittelten Vorschläge für Referenz- und Zielwerte stellen eine erste Groborientierung dar. Konkrete Vorgaben können auf Basis der vorliegenden Datengrundlage für die meisten Objekttypen noch nicht erfolgen. Das vorgeschlagene Vorgehen umfasst eine engere Zusammenarbeit mit den beteiligten Akteuren und die laufende Weiterentwicklung der Normen und Prozesse. Im Hochbau sind die nötigen Daten, Methoden, Normen, Hilfsmittel sowie zertifizierbare Standards vorhanden. Für eine vermehrte Berücksichtigung der grauen Emissionen im Infrastrukturbereich sollte auf den Erfahrungen aus dem Hochbau aufgebaut werden.

In einem nächsten Schritt sollten die in dieser Studie erarbeiteten Grundlagen angewendet und plausibilisiert werden. Bei einzelnen Objekttypen, wie Strassen, Lärmschutzwänden und Kanalisation, konnten bereits robuste Werte erzielt werden. Demgegenüber werden die Objekttypen «Kunstbauten» und «Tunnel» einen zusätzlichen Aufwand erfordern.

Synthèse

Le changement climatique n'entraîne pas seulement des températures plus élevées, mais aussi des changements dans la fréquence, l'intensité et la durée des différents extrêmes climatiques. Il s'agit là de menaces potentielles pour les personnes et les infrastructures. Dans ce contexte, la neutralité climatique devient de plus en plus importante. Conformément à la loi sur le climat et l'innovation, la Suisse doit atteindre un bilan neutre en gaz à effet de serre d'ici le milieu du siècle, et l'administration fédérale centrale d'ici 2040.

Comme tous les secteurs, celui des infrastructures est confronté à l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre pour atteindre les objectifs climatiques. Les valeurs de référence et des objectifs peuvent contribuer efficacement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans le secteur du bâtiment, ce sujet a été systématiquement abordé il y a plus de 10 ans.

Dans le cadre de cette étude, Umtec Technologie AG (UTech) a donc été commandée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) d'élaborer des bases pour des valeurs de référence et des objectifs des émissions grises dans le domaine des infrastructures. L'étude est structurée en trois modules. Le premier module met l'accent sur l'évaluation et la compilation d'un grand nombre d'analyses du cycle de vie existantes, sur l'identification et la compensation des lacunes de données. Le deuxième module porte sur l'analyse des potentiels de réduction. Le troisième module propose une synthèse avec des indications sur une possible application dans la pratique.

Dans le module 1, différents projets d'infrastructures représentatifs de Suisse et des pays voisins ont été évalués. L'étude a porté sur les chaussées (tronçons de raccordement, trottoirs, routes communales, routes cantonales, routes nationales, giratoires, arrêts de bus), les voies ferrées, les ponts, les tunnels, les galeries, les ouvrages divers (stabilisation des talus, murs antibruit, ancrages de soutien, murs de soutènement, lignes aériennes, pistes d'aviation) ainsi que les systèmes de drainage et d'assainissement (conduites d'eaux usées, tranchées de conduites, pompes, puits et installations de traitement des eaux de ruissellement routier). Les phases du cycle de vie, comprenant la fabrication, la construction, la maintenance partielle et l'élimination, ont été prises en compte. L'évaluation a été effectuée selon les méthodes d'impact, notamment les émissions de gaz à effet de serre (GES), les unités de charge écologique (UCE) et la demande en énergie cumulée (CED), lorsque les données étaient disponibles. L'objectif était de calculer des valeurs de référence pour divers ouvrages d'infrastructure. La mise en place de moyennes permet de lisser les incertitudes potentielles et les différences dans les limites du système ou encore les bases de données de référence. L'hétérogénéité de certains projets d'infrastructure est parfois très marquée, ce qui complique la comparaison des projets. Dans le cadre de l'analyse des ouvrages de génie civil, notamment les ponts, il est essentiel de proposer une classification plus exhaustive. En outre, il serait impératif d'optimiser l'échantillon utilisé pour la détermination de la moyenne. D'autres types, comme les chaussées, sont comparables entre eux en utilisant les normes de construction standard et offrent une bonne base pour des valeurs de référence à atteindre. Par exemple, les routes cantonales et nationales affichent respectivement 1.5 kg CO₂-éq par mètre carré et par an.

Dans le module 2, des potentiels de réduction ont été identifiés. L'évaluation du module 1 a révélé que les matériaux, notamment le béton, l'asphalte, l'acier et les pierres naturelles, sont responsables d'environ 80 % des impacts environnementaux totaux des projets de construction d'infrastructures. C'est la raison pour laquelle le potentiel de réduction des impacts de ces matériaux a été évalué d'une part de manière générale, et d'autre part en tenant compte des projets d'infrastructure intégrant des optimisations de matériaux, avec des objectifs fixés pour les années 2030 et 2040. Les matériaux recyclés, les ciments alternatifs, l'asphalte à basse température et de nouvelles approches, comme le sol fluide, pour remplacer les matériaux d'enveloppe traditionnels, jouent ici un rôle particulier.



Les résultats montrent qu'un choix innovant de matériaux peut réduire les émissions de certains projets de construction jusqu'à 60 %. L'objectif pourrait être de réduire les émissions de gaz à effet de serre des projets de construction d'environ un tiers d'ici 2030 et des deux tiers d'ici 2040. L'utilisation des machines de construction et les processus de transports peuvent également être optimisés, bien que leur impact sur le bilan global soit moindre que celui des matériaux. En outre, la conception et les variantes techniques offrent un important potentiel de réduction.

Le module 3 a permis de synthétiser les deux premiers modules et d'élaborer des propositions de valeurs de référence et des objectifs pour la pratique. Les valeurs de référence pourraient notamment être intégrées dans des normes existantes ou dans des outils d'évaluation tels que le SNBS-Infrastructure (Standard de Construction Durable Suisse). En outre, des systèmes d'incitation peuvent être mis en place sur cette base et, par exemple, des systèmes de bonus-malus peuvent être introduits. Cela suppose toutefois que la base de données sur laquelle reposent les valeurs de référence soit suffisamment large, transparente et statistiquement fiable. L'origine et la représentativité des données ainsi que les hypothèses méthodologiques doivent être clairement documentées. Cela nécessite un traitement plus approfondi des résultats disponibles.

L'étude montre que les incitations et les normes peuvent être des leviers décisifs pour transformer durablement la construction d'infrastructures et atteindre les objectifs d'émission.

Dans l'ensemble, l'étude constitue une base importante pour la concrétisation et le développement de valeurs de référence et d'objectifs potentiels et offre des recommandations pour rendre la pratique de la construction en Suisse plus durable. Les propositions de valeurs de référence et objectifs définis dans le cadre de cette étude constituent une première orientation générale. Sur la base des données disponibles, il n'est pas encore possible de définir des prescriptions concrètes pour la plupart des types d'objets. L'approche proposée comprend une collaboration plus étroite avec les parties prenantes et le développement continu des normes et des processus. Dans le secteur du bâtiment, les données, méthodes, normes, outils nécessaires ainsi que les standards certifiables existent depuis plusieurs années. Pour mieux prendre en compte les émissions grises dans le secteur des infrastructures, il convient de s'appuyer sur l'expérience acquise dans le secteur du bâtiment.

Dans une prochaine étape, les bases élaborées dans cette étude devraient être mises en application et leur plausibilité vérifiée. Pour certains types d'ouvrages, comme les routes, les murs antibruit et les systèmes d'assainissement, des valeurs robustes ont déjà été obtenues. En revanche, les types d'objets «ouvrages d'art» et «tunnels» nécessiteront un travail supplémentaire.

Sintesi

Il cambiamento climatico non solo porta a temperature più elevate, ma anche a un cambiamento nella frequenza, intensità e durata di vari eventi climatici estremi. Questi sono potenziali pericoli per le persone e le infrastrutture. In questo contesto, la neutralità climatica sta diventando sempre più importante. Secondo la legge sul clima e l'innovazione, la Svizzera deve raggiungere un bilancio di gas serra equilibrato entro la metà del secolo e l'amministrazione federale centrale entro il 2040.

Come tutti gli altri settori, anche quello delle infrastrutture si trova ad affrontare l'urgente sfida di ridurre le emissioni di gas serra per raggiungere gli obiettivi climatici. I valori di riferimento e obiettivi possono contribuire efficacemente alla riduzione delle emissioni di gas serra. Nel settore dell'edilizia questo tema è stato affrontato sistematicamente già più di 10 anni fa.

Su incarico dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM), Umtec Technologie AG (UTech) sta sviluppando, nell'ambito di questo studio, le basi per valori di riferimento e obiettivi delle emissioni grigie nel settore delle infrastrutture. Lo studio è suddiviso in tre moduli. L'attenzione è rivolta alla valutazione e alla raccolta di un ampio numero di bilanci ecologici esistenti, all'identificazione e al coltamento delle lacune nei dati (modulo 1), all'analisi del potenziale di riduzione (modulo 2) e a una sintesi con indicazioni su una possibile attuazione pratica (modulo 3).

Nel modulo 1 sono stati valutati diversi progetti infrastrutturali rappresentativi della Svizzera e dei paesi vicini. Sono stati esaminati pavimentazioni (collegamenti, marciapiedi, strade comunali, strade cantonali, strade nazionali, rotatorie, fermate degli autobus), binari ferroviari, ponti, gallerie, gallerie artificiali, altre costruzioni (protezione delle scarpate, barriere antirumore, ancoraggi di sostegno, muri di sostegno, linee aeree, piste di atterraggio) nonché sistemi di drenaggio e fognature (condotte fognarie, trincee per condotte, pompe, pozzetti e impianti di trattamento delle acque di scarico stradali). Sono state considerate le fasi del ciclo di vita di produzione, costruzione, manutenzione parziale e smaltimento. La valutazione è stata effettuata utilizzando i metodi di stima degli impatti, in particolare le emissioni di gas serra (GHG), i punti di impatto ambientale (PIA) e il consumo energetico cumulato (CEA) quando i dati erano disponibili. L'obiettivo era calcolare valori di riferimento per diverse infrastrutture. Il calcolo dei valori medi attenua le incertezze e le differenze nelle delimitazioni dei sistemi o nelle banche dati di riferimento. L'eterogeneità di alcuni progetti infrastrutturali è talvolta molto pronunciata, il che rende difficile il confronto dei progetti. Per alcuni tipi di opere, come i ponti, sarebbe necessaria una classificazione più completa e la base dei dati dovrebbe essere notevolmente migliorata. Altri tipi, come le pavimentazioni, sono comparabili utilizzando le norme di costruzione standard e offrono una buona base per valori di riferimento. Ad esempio, le strade cantonali e nazionali presentano rispettivamente 1.5 kg CO₂-eq per metro quadrato all'anno.

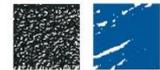
Nel modulo 2 sono stati identificati i potenziali di riduzione. La valutazione del modulo 1 ha rivelato che i materiali, in particolare calcestruzzo, asfalto, acciaio e pietre naturali, sono responsabili di circa l'80% degli impatti ambientali complessivi nei progetti di costruzione di infrastrutture. Pertanto, è stato valutato il potenziale di riduzione di questi materiali sia in generale sia per i progetti infrastrutturali che includono ottimizzazioni dei materiali, con obiettivi fissati per gli anni 2030 e 2040. I materiali riciclati, i cementi alternativi, l'asfalto a bassa temperatura e nuovi approcci come il terreno fluido per sostituire i materiali di rivestimento tradizionali giocano qui un ruolo particolare. I risultati mostrano che una scelta innovativa dei materiali può ridurre le emissioni di alcuni progetti di costruzione fino al 60%. L'obiettivo potrebbe essere quello di ridurre le emissioni di gas serra dei progetti di costruzione di circa un terzo entro il 2030 e di due terzi entro il 2040. Anche l'impiego di macchinari da costruzione e i processi di trasporto possono essere ottimizzati, ma il loro impatto sul bilancio complessivo è inferiore rispetto a quello dei materiali. Inoltre, la progettazione strutturale e le varianti tecniche offrono un grande potenziale di riduzione.



Nel modulo 3 è stata effettuata una sintesi dei primi due moduli e sono state elaborate proposte di possibili valori di riferimento e obiettivi per la pratica. Un possibile utilizzo dei valori di riferimento è la loro integrazione nelle norme esistenti o negli strumenti di valutazione come lo SNBS-Infrastruktur (Standard Svizzero di Costruzione Sostenibile). Inoltre, sulla base di tali valori è possibile creare sistemi di incentivazione e introdurre, ad esempio, sistemi di bonus-malus. Ciò presuppone tuttavia che la base dati su cui si fondano i valori di riferimento sia sufficientemente ampia, trasparente e statisticamente attendibile. Sia l'origine e la rappresentatività dei dati che i presupposti metodologici devono essere chiaramente documentati. Ciò richiede un'ulteriore elaborazione dei risultati disponibili. Lo studio dimostra che incentivi e norme possono essere leve decisive per trasformare in modo sostenibile la costruzione di infrastrutture e raggiungere gli obiettivi di emissione.

Complessivamente, lo studio rappresenta una base importante per la concretizzazione e l'ulteriore sviluppo di valori di riferimento e obiettivi e offre raccomandazioni per rendere più sostenibile la pratica edilizia in Svizzera. Le proposte di valori di riferimento e obiettivi elaborate nell'ambito di questo studio costituiscono un primo orientamento. Sulla base dei dati disponibili non è ancora possibile formulare prescrizioni concrete per la maggior parte dei tipi di immobili. L'approccio proposto comprende una collaborazione più stretta con le parti interessate e lo sviluppo continuo delle norme e dei processi. Nel settore dell'edilizia sono disponibili i dati, i metodi, le norme, gli strumenti e gli standard certificabili necessari. Per una maggiore considerazione delle emissioni grigie nel settore delle infrastrutture, si dovrebbe fare affidamento sull'esperienza acquisita nell'edilizia.

In una fase successiva, le basi elaborate in questo studio dovrebbero essere applicate e verificate. Per singoli tipi di oggetti, come strade, barriere antirumore e sistemi fognari, sono già stati ottenuti valori affidabili. Tuttavia, i tipi di oggetti «strutture ingegneristiche» e «gallerie» richiederanno un ulteriore sforzo.



Summary

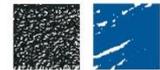
Climate change not only leads to rising temperatures but also affects the frequency, intensity, and duration of various climate extremes. These are potential dangers for people and infrastructure. Against this backdrop, climate neutrality is becoming increasingly important. According to the Climate and Innovation Act (KIG), Switzerland must achieve a balanced greenhouse gas budget by the middle of the century, while the central federal administration must reach this goal by 2040.

The infrastructure sector, like all others, faces the urgent challenge of reducing greenhouse gas emissions to meet climate targets. Reference and target values can make an effective contribution to reducing greenhouse gas emissions. In the building sector, this topic has been systematically addressed for over a decade.

Commissioned by the Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), Umtec Technologie AG (UTech) is conducting this study to establish the basis for reference and target values for embodied greenhouse gas emissions in infrastructure. The study is structured into three modules, focusing on the evaluation and compilation of a large number of existing life cycle assessments and the identification and closure of data gaps (Module 1), the analysis of reduction potentials (Module 2), and the synthesis of findings with indications for potential practical implementation (Module 3).

In Module 1, various representative infrastructure projects in Switzerland and neighbouring countries were analysed. Roadways (access roads, footpaths, municipal roads, cantonal roads, national roads, roundabouts, bus stops), railway tracks, bridges, tunnels, galleries, other structures (embankment protection, noise barriers, retaining anchors, retaining walls, openings, airstrips) and drainage and sewage systems (wastewater pipes, pipe trenches, pumps, shafts and road wastewater treatment plants) were analysed. The life cycle phases of production, construction, partial maintenance and disposal were considered. The evaluation was carried out for the impact assessment methods greenhouse gas emissions (GHG) and, where data was available, for the total environmental impact (eco-points, UBP) and cumulative energy demand (KEA). The aim was to calculate reference values for various infrastructure structures. Averaging smoothes out possible uncertainties and differences in the system boundaries or in the background databases. However, the heterogeneity of individual infrastructure projects is sometimes very pronounced, making comparisons challenging. For some object types, such as bridges, it was determined that a comprehensive classification would be necessary, and the data basis would have to be significantly improved. Other object types, such as roadways, are comparable based on standard construction norms and provide a good basis for reference and target values. For example, cantonal and national roads have around 1.5 kg CO₂-eq per square metre and year.

Reduction potentials were identified in Module 2. The evaluation of Module 1 showed that the materials, in particular concrete, asphalt, steel and natural stone, lead to high environmental impacts of up to approx. 80% of the total environmental impact in infrastructure construction projects. For this reason, the reduction potential of these materials in general and the reduction potential of infrastructure projects, taking these material optimisations into account, were evaluated and targets set for the years 2030 and 2040. Recycled materials, alternative cements, low-temperature asphalt and new approaches such as liquid soil as a replacement for conventional envelope materials played a special role here. The results show that innovative material selection can reduce emissions for individual construction projects by up to 60%. The aim could be to reduce greenhouse gas emissions from construction projects by around a third by 2030 and by two thirds by 2040. The use of construction machinery and transport processes can also be optimised, but the impact on the overall balance is lower than of materials. In addition, there is considerable potential in terms of design and construction variants.



Module 3 synthesized the results from the first two modules and developed proposals for integrating reference and target values into practice. One possible use for reference values is their integration into existing standards or assessment instruments such as the SNBS infrastructure (Swiss Sustainable Building Standard). Furthermore, incentive systems can be created based on this and bonus-malus systems can be introduced. However, this requires that the database underlying the reference values is sufficiently broad, transparent, and statistically reliable. Both the origin and representativeness of the data and the methodological assumptions must be clearly documented. This requires further refinement of the available results. The study highlights that incentives and norms are key levers for achieving emissions reductions.

Overall, the study provides an important basis for the concretisation and further development of reference and target values and makes recommendations on how construction practice in Switzerland can be made more sustainable. The proposals for reference and target values identified in this study represent an initial rough orientation. Concrete requirements cannot yet be specified for most types of constructions based on the available data. The proposed approach involves closer collaboration with stakeholders and the continuous development of norms and processes. In the building sector, the necessary data, methods, tools and certifiable standards are available, and the infrastructure sector should build on these experiences.

In a next step, the developed methodologies in this study should be applied and their plausibility verified. For certain object types, such as roads, noise barriers and sewerage systems robust values have already been achieved. In contrast, the object types “engineering structures” and “tunnels” will require additional effort.



Inhalt

1	Einleitung	15
1.1	Ausgangslage.....	15
1.2	Zielsetzung	15
1.2.1	Modul 1	16
1.2.2	Modul 2	16
1.2.3	Modul 3	16
2	Methodik.....	18
2.1	Allgemeine Vorgehensweise	18
2.2	Einteilung der Infrastruktur.....	18
2.3	Parameter der Ökobilanzdaten	19
2.3.1	Systemgrenze und Untersuchungsrahmen.....	19
2.3.2	Funktionelle Einheit.....	21
2.3.3	Sachbilanz und Wirkungsmodelle	22
3	Grundlagen für Referenzwerte – Modul 1.....	23
3.1	Fahrbahn, Strasse.....	23
3.1.1	Anschlussstrecken.....	23
3.1.2	Bushaltestellen	24
3.1.3	Gehwege.....	25
3.1.4	Kreisel	25
3.1.5	Gemeindestrassen	26
3.1.6	Kantonsstrassen.....	27
3.1.7	Nationalstrassen	28
3.2	Fahrbahn, Gleis	29
3.3	Brücken	31
3.4	Tunnel	32
3.5	Galerien.....	33
3.6	Übrige Bauten	33
3.6.1	Böschungssicherungen	33
3.6.2	Lärmschutzwände.....	34
3.6.3	Stützanker	35
3.6.4	Stützmauern	36
3.6.5	Freileitungen.....	37
3.6.6	Flugpiste	38
3.7	Entwässerung und Kanalisation	38



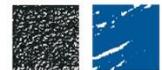
3.7.1	Abwasserleitungen	38
3.7.2	Leitungsgräben	39
3.7.3	Pumpstationen	40
3.7.4	Schacht und Ablauf.....	41
3.7.5	Strassenabwasserbehandlungsanlagen.....	42
3.8	Werkleitungen.....	43
3.8.1	Stromübertragung	43
3.9	Einheitlicher Rahmen für die Messung und Weiterentwicklung	44
4	Reduktionspotenziale – Modul 2	47
4.1	Dekarbonisierung durch den Einsatz von Holz	48
4.2	Asphalt	49
4.2.1	RC-Gehalt.....	49
4.2.2	Niedertemperaturasphalt.....	50
4.2.3	Fahrplan des Europäischen Asphaltverbandes hin zu Netto-Null	51
4.3	Beton.....	53
4.3.1	CO ₂ -optimierte Zementsorten	53
4.3.2	RC-Beton mit CO ₂ -Speicherung	54
4.3.3	Fahrplan des globalen Zement- und Betonverbandes hin zu Netto-Null	55
4.3.4	Alternative Hüll- und Auffüllmaterial «Flüssigboden»	55
4.4	Stahl	57
4.4.1	Strommix, Energieeffizienz und Anteil Recyclingschrott	57
4.4.2	Einsatz von Wasserstoff.....	57
4.4.3	Bestrebungen der Branche hin zu «Netto-Null» bis 2050	57
4.5	Natursteine	58
4.6	Alternativ angetriebene Baumaschinen	59
4.7	Alternative angetriebene Transporte.....	60
4.8	Weiteres Reduktionspotenzial	60
5	Praktische Synthese – Modul 3.....	61
5.1	Referenz- und Zielwerte.....	61
5.1.1	Vorschlag für Referenz- und Zielwerte	61
5.1.2	Datenlage für Referenz- und Zielwerte.....	67
5.1.3	Vorschlag für Einbindung in SNBS-Infrastruktur	67
5.1.4	Methodische Setzungen definieren.....	68
5.2	Ambitionsniveaus.....	69
5.2.1	Ambitionsniveau «Basis».....	69
5.2.2	Ambitionsniveau «Fortgeschritten»	70



5.2.3	Ambitionsniveau «Hoch»	71
5.3	Anreizsysteme	72
5.3.1	Bonus/Malus-Systeme	72
5.3.2	Vertragsstrafen	72
5.4	Normen und Normalprofile	74
5.4.1	ASTRA Normalprofile und Fachhandbücher	75
5.4.2	VSS-Normen.....	75
5.4.3	SIA-Normen	75
5.5	Anwendung.....	75
5.5.1	Ziele und Nutzen der Anwendung.....	75
5.5.2	Projektphasengerechter Einbezug.....	76
6	Fazit.....	78
6.1	Grundlagen für Referenzwerte – Modul 1	78
6.2	Reduktionspotenziale – Modul 2	78
6.3	Praktische Synthese – Modul 3.....	79
7	Ausblick	82
	Referenzen	83
	Begriffe und Abkürzungen.....	88
	Abbildungen	90
	Tabellen	99
	Anhang	101
Anhang A.	Ergänzende Informationen und methodische Grundlagen.....	101
A1.	Umtec Technologie AG.....	101
A2.	Einteilung in Objekttypen	101
A3.	Technische Vordergrunddaten und generische Hintergrunddaten	105
A4.	Wirkungsabschätzung.....	105
Anhang B.	Technische Vordergrunddaten	106
B1.	Fahrbahn	106
B2.	Gleise	123
B3.	Brücken	123
B4.	Tunnel	127
B5.	Galerie.....	130
B6.	Übrige Bauten	131
B7.	Entwässerung und Kanalisation	137
B8.	Werkleitungen.....	140



Anhang C.	Auswertung UBP und KEA	143
C1.	Fahrbahn	143
C2.	Fahrbahn, Gleis	150
C3.	Brücken	151
C4.	Tunnel	152
C5.	Übrige Bauten	153
C6.	Entwässerung und Kanalisation	158
C7.	Werkleitungen.....	163
Anhang D.	Reduktionspotenziale.....	164
D1.	Reduktionspotenziale bis 2030	164
D2.	Reduktionspotenziale bis 2040	172
Anhang E.	Dekarbonisierung durch den Einsatz von Holz	179
E1.	Ziel und Methodik.....	179
E2.	Ökobilanzierung	179
E3.	Resultate	180
E4.	Speicherleistung Holz: Temporäre Speicherung biogenes CO ₂	180
E5.	Einschätzung UTech	181
Anhang F.	Abfälle im Infrastrukturbau	183
Anhang G.	Diskussion Workshop	184



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Standards SNBS und Minergie-ECO definieren Kriterien für die Berechnung von Treibhausgasemissionen und dem Energieaufwand im Hochbau. Eine volkswirtschaftliche Beurteilung im Auftrag des BAFU hat gezeigt, dass Grenzwerte eine kosteneffektive Möglichkeit sind, um die Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft im Hochbau zu fördern. Mit der Gesetzesrevision durch die Parlamentarische Initiative (Pa. Iv.) 20.433 sind die Kantone beauftragt, Grenzwerte für graue Energie im Hochbau festzulegen. Die hierfür nötigen Daten, Methoden, Normen, Standards und Hilfsmittel sind seit mehreren Jahren vorhanden. Das KIG (Klima- und Innovationsgesetz) verpflichtet die Bundesverwaltung das Netto-Null-Ziel bis 2040 zu erreichen, unter Berücksichtigung der vor- und nachgelagerten (d.h. grauen) Emissionen. Die Motion von Ständerat Stark fordert die Prüfung des Einsatzes von Holz im Infrastrukturbau zur Dekarbonisierung.

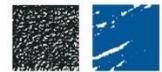
Zurzeit fehlen Grenzwerte für graue Emissionen im Bereich Infrastrukturbau. Eine Kommissionsminderheit zur Pa. Iv. 20.433 forderte Grenzwerte für graue Treibhausgasemissionen von Bauwerken (d.h. für Hoch- und Tiefbau), was breite Unterstützung erfuhr, jedoch knapp vom Nationalrat abgelehnt wurde.

1.2 Zielsetzung

Das vorliegende Projekt soll Grundlagen und Methoden für Referenz- und Zielwerte für graue Treibhausgasemissionen (THG), Umweltbelastungspunkte (UBP) und den kumulierten Energieaufwand (KEA) bei Infrastrukturbauten erarbeiten. In dem Zusammenhang sollen Einschränkungen und Wissenslücken diskutiert, sowie mögliche Lösungsansätze zu deren Überwindung skizziert werden. Dabei liegt der Fokus auf der Erarbeitung solider Grundlagen für Vorschläge für Referenz- und Zielwerte zur Entwicklung neuer Richtlinien. Das Vorgehen gliedert sich in folgende drei Module: Modul 1 «Auswertung der Umweltwirkung von bisherigen Projekten», Modul 2 «Reduktionspotenziale und Erreichbarkeit» und Modul 3 «Anreizsysteme, Forschungsbedarf und konkrete Anwendung». Der Bericht verfolgt mit seinen drei Modulen das Ziel, eine fachlich fundierte Grundlage für die Definition von Referenz- und Zielwerten im Infrastrukturbau zu schaffen. Dabei steht nicht eine pauschale Vereinheitlichung im Vordergrund, sondern vielmehr eine praxistaugliche Systematisierung, die gleichzeitig Raum für projektspezifische Anforderungen lässt. Es ist wichtig, dass die Anwendung von Referenz- und Zielwerten stets den spezifischen Rahmenbedingungen – wie Komplexität, Topografie oder technischen Herausforderungen – Rechnung trägt. Ebenso sollten langfristige Entwicklungen von Infrastrukturen über deren Lebenszyklus hinweg (z. B. Etappierungen, Instandhaltungen, Nutzungsänderungen) stärker berücksichtigt werden. Der Bericht hebt daher hervor, dass eine standardisierte Betrachtung durch adaptive, kontextbezogene Ansätze ergänzt werden sollte, um sowohl eine hohe ökologische Aussagekraft als auch die notwendige planerische Flexibilität zu gewährleisten.

In dieser Studie werden die untenstehenden Begriffe folgendermassen definiert:

- Referenzwert: Der Referenzwert ist ein erster Richtwert und entspricht dem Status quo, welcher im Rahmen dieser Grundlagenstudie in Form von Mittelwerten evaluiert wurde.
- Zielwert: Der Zielwert entspricht einem zukünftig anzustrebenden Wert unter Berücksichtigung diverser Optimierungspotenziale.



1.2.1 Modul 1

In Modul 1 werden repräsentative Infrastrukturbauprojekte der Schweiz und des naheliegenden Auslands (Deutschland und Österreich) hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen, Umweltbelastungspunkte und kumulierte Energieaufwände ausgewertet und zusammengestellt. Die erste Priorität liegt auf den Treibhausgasemissionen, gefolgt von den Umweltbelastungspunkten und vom kumulierten Energieaufwand. In diesem Zusammenhang wird der Untersuchungsrahmen und die Rahmenbedingungen in Bezug auf Ökobilanzprojekte und Literaturstudien vereinheitlicht. Dabei werden die für Ökobilanzen methodisch relevanten Aspekte festgelegt: Untersuchungsbereich, Ziel der Studie, technische, geografische, inhaltliche und zeitliche Systemgrenze, funktionale Einheit, funktionale Äquivalenz, Wirkungsabschätzungsmethoden, unterschiedliche Ökobilanzsystemmodelle inkl. Wahl der Allokationsmethode, technischen Vordergrunddaten und generischen Hintergrunddaten.

Die Umtec Technologie AG hat in jüngst vergangenen Projekten die Auswertung jeweils unterteilt in die drei «M»: Material, Maschine und Mobilität. Bei «Maschine» sind die direkten und indirekten (vorgelagerte Wertschöpfungskette) Emissionen der Baumaschinen und Baustellengeräte enthalten. Der Begriff «Mobilität» umfasst die Baustellenexternen Gütertransporte (Materiallieferungen und -abfuhr) sowie die Baustelleninternen Gütertransporte dazu. Beim «Material» sind die Bau- und Rückbaumaterialien enthalten.

Ein weiterer wichtiger Punkt des ersten Moduls ist die Erarbeitung einer Liste mit allen relevanten Infrastrukturbereichen und deren Bauwerken in der Schweiz, die einer vordefinierten Struktur für den Bereich Tiefbau und Infrastrukturbau folgt.

1.2.2 Modul 2

Im Rahmen des Modul 2 werden Reduktionspotenziale identifiziert. Die technischen Vordergrunddaten werden einerseits für den Bauwerkstyp der Fahrbahnen (Anschlussstrecke bis hin zur Nationalstrasse) gemittelt und mit standardisierten generischen Hintergrunddaten verknüpft. Die Hintergrundprozesse können so variiert werden. Andererseits werden auf Basis von übergeordneten Aspekten Bauwerkstyp-unabhängig Reduktionspotenziale ermittelt und ausgewiesen. Im Fokus steht die Auswertung mittels dem Wirkungsmodell der Treibhausgasemissionen. Die weiteren Ökobilanzmethoden der Umweltbelastungspunkte (UBP) und der kumulierte Energieaufwand (KEA) werden nur vereinzelt betrachtet.

Diese beiden Ansätze (Bauwerkstyp-bezogen am Beispiel der Fahrbahnen und auch Bauwerkstyp-übergeordnet) schaffen Handlungsspielraum und Möglichkeiten, wie definierte Referenz- und Zielwerte eingehalten werden können. Dadurch kann anhand der Resultate ein Bereich der praktikablen und erreichbaren Referenz- und Zielwerte festgelegt werden. Je nach Bauwerkstyp können unterschiedliche Ambitionsniveaus vorgeschlagen werden.

Ein weiterer Teil des Moduls 2 besteht aus der Diskussion bezüglich der Motion 21.3293 von Ständerat Jakob Stark zum Dekarbonisierungspotenzial mit dem Werkstoff Holz im Infrastrukturbereich.

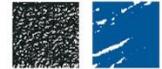
1.2.3 Modul 3

Im Modul 3 werden die Ergebnisse der Module 1 und 2 in einen grösseren Kontext gestellt. Dabei sollen weitere Anreizsysteme für die Reduktion der Umweltwirkungen ausgearbeitet und der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt werden.

Die Ausarbeitung von Vorschlägen, wie Referenz- und Zielwerte über die Projektphasen gemäss SIA 112/2, insbesondere in den Planungsarbeiten und im Ausschreibungsverfahren der öffentlichen Hand aufgenommen werden können, ist ebenfalls Teil des Modul 3. Zusätzlich sollen mögliche alternative Ansätze, die zusätzlich oder anstelle von Referenz- und Zielwerten zum Einsatz kommen, diskutiert werden.



Ebenfalls Teil des Moduls 3 ist die Ausarbeitung von Vorschlägen, wie die Referenz- und Zielwerte sowie allfällige Anreizsysteme in das Instrument des SNBS-Infrastruktur und in die Normalprofile für Bauten, wie z.B. dem VSS-Normenwerk und die ASTRA-Normen, integriert werden könnten.



2 Methodik

2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Im Rahmen des Moduls 1 wurden repräsentative Infrastrukturbauprojekte aus vergangenen Projekten der UTech hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen und bei vorhandenen Daten ebenfalls hinsichtlich ihrer Umweltbelastungspunkte und kumulierte Energieaufwände ausgewertet und verglichen. Dabei wird die Lebenszyklusperspektive eingenommen. Neben den Umweltbelastungen in der Schweiz sind auch diejenigen durch Produktionsschritte im Ausland berücksichtigt. Aufgrund der grossen Anzahl und der Heterogenität der Infrastrukturbauprojekte bestand die Herausforderung vor allem darin, vergleichbare Projekte zu evaluieren und Datenlücken zu füllen.

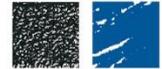
In einem ersten Schritt wurde eine Grosszahl an vergangenen Projekten der UTech, geordnet nach den einzelnen Objekttypen, zusammengetragen. Dabei wurden die Umweltwirkungen und Mengen an Materialien, Bauabfällen, Transporten und Baumaschinenstunden erfasst. Zusätzlich wurden wichtige Eigenschaften wie die Dimension der Infrastrukturbauten inklusive einem Kurzbeschreibung notiert. Anhand der Kurzbeschreibungen und weiteren Detailangaben zu den Projekten, konnten vergleichbare Projekte evaluiert werden. Es stellte sich heraus, dass die Infrastrukturbauprojekte je Objekttyp teilweise grosse Unterschiede aufweisen und die Vergleichbarkeit nicht immer gegeben ist. Bei Kombiprojekten, wie zum Beispiel dem Bau eines Kreisels inklusive Böschungssicherungen und einer Neugestaltung der Zufahrtsstrassen, war es nicht immer möglich eine Aufschlüsselung und Zuordnung der Aufwände in die einzelnen Objekttypen vorzunehmen. Einige dieser Projekte konnten mit der Einschätzung von Fachexperten aufgetrennt werden, andere mussten vernachlässigt werden. Zusätzlich zu den projektspezifischen Daten lagen auch Daten zu Standardnormalbauwerken vor, welche wiederum eine sehr gute Vergleichbarkeit ermöglichen und eine hohe Datentransparenz aufweisen.

In einem nächsten Schritt wurden die Materialien, Transporte und Baumaschinen, welche je nach Projekt unterschiedliche Detaillierungsgrade aufwiesen, kategorisiert (Beispielkategorien: Beton, Asphalt Deckschicht, Asphalt Tragschicht, Gesteinskörnung, Stahl, Hydraulikbagger, Vibrowalze, LKW Diesel etc.). Über diese Kategorien wurden die Umweltwirkungen der vergleichbaren Infrastrukturbauprojekte zusammengefasst und analysiert. Die Kategorisierung dient im Modul 1 hauptsächlich der vereinfachten Zuordnung in die Lebenszyklusphasen und zur Auswertung. Im Modul 2 hingegen, werden die Kategorien gezielt zusammengefasst und Mittelwerte davon berechnet.

2.2 Einteilung der Infrastruktur

In dieser Studie werden verschiedene Infrastrukturbauwerkstypen im Tiefbau untersucht. Die Einteilung dieser Bauwerke in Objektgruppen/Bauwerksgruppen und Objekttypen/Bauwerkstypen ist im Anhang in Tabelle 7 (oder im Hauptteil in Tabelle 5) ersichtlich. Die Hauptobjektgruppen sind: Fahrbahn, Brücken, Tunnel und Galerie, Übrige Bauten, Entwässerung und Kanalisation. Einige Bauwerkstypen wurden aufgrund mangelnder Datengrundlage oder anderer Fokussierung nicht im Detail untersucht, werden für die Vollständigkeit jedoch trotzdem in den Tabellen aufgeführt.

Der Detaillierungsgrad der Daten unterscheidet sich je nach Objekttyp. Die Fahrbahnen weisen generell einen hohen Detaillierungsgrad auf, während zum Beispiel Stützanker (Übrige Bauten) einen geringen Detaillierungsgrad aufweisen. Ein hoher Detaillierungsgrad beinhaltet die Berücksichtigung verschiedener Lebenszyklusphasen, wie Herstellung, Errichtung, Instandsetzung und Entsorgung und eine gute Datenqualität der technischen Vordergrunddaten und der generischen Hintergrunddaten. Viele der ausgewerteten Projekte wurden aus früheren Studien übernommen und weisen daher einen hohen Detaillierungsgrad auf. Durch die Übernahme der Umweltwirkungen werden mögliche Änderungen in den Ökobilanz-



Datenbanken nicht berücksichtigt, dafür bleibt jedoch der hohe Detaillierungsgrad der Daten und der Auswertung im Modul 1 erhalten. Im Modul 2 wird dann der Detaillierungsgrad durch die Kategorisierung und Aggregation verringert und im Gegenzug mit den aktuellen Werten der Ökobilanz-Datenbanken gerechnet.

2.3 Parameter der Ökobilanzdaten

2.3.1 Systemgrenze und Untersuchungsrahmen

Im Rahmen des Modul 1 wurde der Untersuchungsrahmen und die Systemgrenze folgendermassen definiert.

- Untersuchungsbereich: Infrastrukturbauwerke im Bereich Tiefbau (siehe Kapitel 2.2)
- Ziel der Studie: Ermittlung von Grundlagen für Referenz- und Zielwerte im Tiefbau
- Systemgrenze (geografisch, zeitlich, technisch und inhaltlich)
 - Der Fokus liegt auf Projekten in der Schweiz, jedoch werden Projekte aus Deutschland und Österreich ebenfalls berücksichtigt.
 - Der Betrachtungszeitraum kann je nach Bauwerkstyp variieren. Die Lebensdauer der Bauwerke wurde grösstenteils berücksichtigt und die Umweltwirkungen pro Jahr ausgewertet.
 - Für die Betrachtung der Lebenszyklusphasen diente die DIN EN 15643 [1] als Orientierung. Dabei steht die Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase im Vordergrund. Die Betrachtung der einzelnen Phasen variiert je nach Bauwerkstyp.

In Bezug auf die Lebenszyklusphasen gilt es besonders zwischen den linearen und den zirkulären Phasen des Lebenszyklus zu unterscheiden und diese separat zu beziffern. Die meisten Infrastrukturbauwerke werden nach einer ersten Herstellungs- und Errichtungsphase (lineare Bestandteile) kontinuierlich durch Instandsetzungs- und Erhaltungsmaßnahmen im zirkulären Teil des Lebenszyklus gehalten, siehe dazu Abb. 2-1. Ein kompletter Rückbau eines Infrastrukturobjekts, bei dem der Zustand vor der ursprünglichen Errichtung wiederhergestellt wird, ist nur selten der Fall. Es fallen Rückbaumaterialien während der Betriebsphase im Rahmen von Instandsetzungs- und Erhaltungsmaßnahmen an. In dieser Studie werden als Erhaltungsmaßnahmen nur Instandsetzungen (z.B. Austausch der Asphaltdeckschicht), nicht aber Instandhaltungsmaßnahmen wie zum Beispiel Ausbesserungen eines Deckbelags oder Erneuerungsmaßnahmen berücksichtigt.

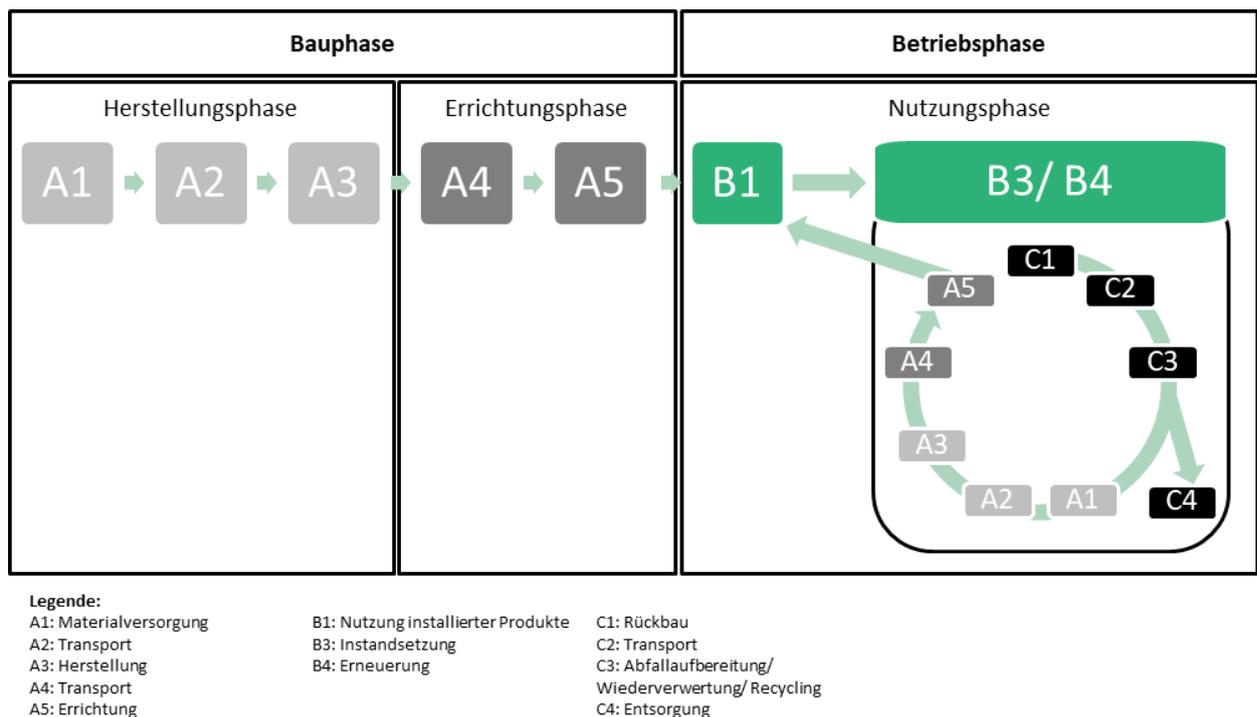


Abb. 2-1: Lebenszyklusphasen von Infrastrukturbauwerken im Allgemeinen. Eigene Grafik basierend auf der DIN EN 15643.

Die Studie orientiert sich an den Bilanzierungsregeln der KBOB/ecobau-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich [2]. Dabei werden die Umweltwirkungen von Recyclingmaterialien sowie die Allokation einer Belastung für die Aufbereitung von sekundären Baumaterialien berücksichtigt. Die Bilanzierungsregeln der KBOB/ecobau-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich beziehen sich auf die Phasen der Herstellung der Materialien A1-A3 und die Entsorgung C1-C4. Diese Studie berücksichtigt auch die Phasen A4 und A5, damit die Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus des Infrastrukturobjekts berücksichtigt werden.

In dieser Studie wurden deshalb folgende Annahmen für die Betrachtung der einzelnen Lebenszyklusphasen getroffen.

- Herstellungsphase (A1 bis A3): Die Herstellungsphase in der Ökobilanz deckt die Umweltwirkungen der benötigten Materialien inkl. vorgelagerter Herstellungskette sowie den Transport in ein Verteilzentrum ab. In dieser Studie wird ein Totalersatz (Art der Instandsetzung), zum Beispiel bei einer Fahrbahn, der Herstellung gleichgesetzt.
- Errichtungsphase (A4 und A5): Die Errichtungsphase umfasst den Transport der Materialien vom Verteilzentrum zur Baustelle und die Aufwände der Baumaschinen, welche für den Einbau benötigt werden.
- Nutzungs- und Instandhaltungsphase (B1 - B2): Die Nutzung und kleinere Instandhaltungsmassnahmen zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Bauwerke werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.
- Instandsetzungsphase (B3 und B4): Die Instandsetzungsphase wurde in dieser Studie ebenfalls bei einigen Bauwerkstypen vernachlässigt. Berücksichtigt wurde sie zum Beispiel bei Strassen, wenn es um den Vergleich von der Asphalt- und Betonbauweise geht, da in diesem Falle die Instandsetzung von Asphaltstrassen höhere Aufwände aufweist und das Endergebnis ohne Berücksichtigung einen falschen Eindruck vermitteln würde.



- Entsorgungsphase (C1): Die Baumaschinenaufwände für den Rückbau wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt.
- Entsorgungsphase (C2 bis C4): Der Transport der rückgebauten Materialien sowie allfällige Weiterverarbeitungsprozesse und die Endlagerung in einer Deponie wurden berücksichtigt.

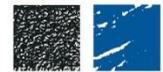
Abweichungen davon sind je nach Bauwerkstyp und aufgrund der Heterogenität der ausgewerteten Projekte möglich und werden explizit erwähnt.

2.3.2 Funktionelle Einheit

Die Funktionelle Einheit variiert je nach Bauwerkstyp. Ein Grossteil der Bauwerkstypen wurde pro Quadratmeter und Jahr ausgewertet. Andere Bauwerkstypen wurden zum Beispiel pro Laufmeter und Jahr bilanziert. Welche Einheit bei welchem Bauwerkstyp gewählt wurde, ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Funktionelle Einheit je nach Bauwerkstyp

Bauwerkstyp	Funktionelle Einheit: Umweltwirkung pro ...
Fahrbahn: Anschlussstrecke	m ² Oberfläche und Jahr
Fahrbahn: Bushaltestellen	m ² Oberfläche und Jahr
Fahrbahn: Gehweg	m ² Oberfläche und Jahr
Fahrbahn: Kreisel	m ² Oberfläche und Jahr
Fahrbahn: Gemeinde-, Kanton- und Nationalstrassen	m ² Oberfläche und Jahr
Gleise	m und Jahr
Brücken	m ² und Jahr
Tunnel und Galerie	m und Jahr (und für den Vergleich mit anderen Verkehrslastträgern in m ² und Jahr)
Übrige Bauten: Böschungssicherungen	m und Jahr
Übrige Bauten: Lärmschutzwände	m ² Sichtfläche und Jahr
Übrige Bauten: Stützanker	m und Jahr
Übrige Bauten: Stützmauern	m ² Sichtfläche und Jahr
Übrige Bauten: Freileitungen	m und Jahr
Entwässerung und Kanalisation: Leitungen und Gräben	m und Jahr
Entwässerung und Kanalisation: Pumpen	kW (Kilowatt) und Jahr
Entwässerung und Kanalisation: Schacht und SABA	St (Stück) und Jahr
Werkleitungen: Stromübertragung Erdverkabelung	m und Jahr



2.3.3 Sachbilanz und Wirkungsmodelle

Die Sachbilanz besteht einerseits aus den technischen Vordergrunddaten, welche aus den realen Projekten herausgezogen werden, und andererseits aus den generischen Hintergrunddaten aus den Ökobilanz-Datenbanken (Beispiel: Prozessvorkette von einem Liter Diesel).

In dieser Studie wurden die technischen Vordergrunddaten zum Grossteil aus vergangenen Projekten der UTech und teilweise aus aktuellen Projekten aus ECO₂nstruct herangezogen. Die Projekte aus ECO₂nstruct wurden durch die UTech plausibilisiert, was zur Ausschliessung einiger Projekte geführt hatte. Ergänzend dazu wurden weitere Projektdaten von der Begleitgruppe bereitgestellt und Standardaufbauten gewisser Kantone ausgewertet. Die Systemgrenzen und der Untersuchungsrahmen unterscheiden sich je nach Projekt, was zu einer Heterogenität der Projekte führt und diese schlecht vergleichbar macht. Aus diesem Grund wurden teilweise Datenlücken ergänzt und weitere Annahmen getroffen (siehe dazu Anhang B). Durch die Bildung von Mittelwerten aus möglichst vielen Projekten werden gewisse Unsicherheiten in der Datengrundlage geglättet. Die Studie soll anhand möglichst vieler bereits vorhandener Daten eine erste Abschätzung für mögliche Referenz- und Zielwerte aufzeigen.

Es ist zu beachten, dass die zugrunde liegenden Hintergrunddaten aus heterogenen Quellen (verschiedene Versionen von Ecoinvent und verschiedene Datenbanken) stammen, was potenziell zu gewissen Inkonsistenzen führen kann. Diese wurden im Rahmen der Analyse bewusst in Kauf genommen, da sie entweder unvermeidbar sind (weil die Daten aus unterschiedlicher Literatur stammen) oder ihre Auswirkungen auf die Gesamtergebnisse als vertretbar eingeschätzt wurden.

Die Verknüpfung der technischen Vordergrunddaten mit den generischen Hintergrunddaten ermöglicht über Wirkungsabschätzungsmethoden die Ermittlung der Umweltwirkungen. In dieser Studie wurden drei Wirkungsmodelle verwendet, um eine mehrdimensionale und ganzheitliche Betrachtung der Umweltwirkungen zu erhalten. Diese drei Modelle sind ebenfalls in den Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten der KBOB vorgeschrieben [3].

- Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100a): Dieses Wirkungsmodell beschreibt die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO₂. Die Treibhauswirkung wird auf Basis der Treibhauspotenziale des 6. Sachstandberichts des IPCC (2021) quantifiziert [4], [5].
- Methode der ökologischen Knappheit 2021 (UBP-Methode 2021, Umweltbelastungspunkte): Mit der Methode der ökologischen Knappheit wird ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen aufgezeigt [6]. Sie basiert auf der schweizerischen Umweltpolitik. Die Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP'21) quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm. In der Schweiz gilt die UBP-Methode als Standard bei Ökobilanzen [7], [8], [9]. Sie wurde im Auftrag des BAFU erarbeitet und gilt als besonders hilfreich für die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen, da die Methode die Umweltpolitik der Schweiz widerspiegelt und umfassend ist.
- Kumulierter Energieaufwand (KEA): Dieses Wirkungsmodell quantifiziert den kumulierten Energieaufwand der fossilen und nuklearen Energieträger, Holz aus Kahlschlag von Primärwäldern sowie auch den Energieaufwand erneuerbarer Energieträger. In der vorliegenden Studie wurde nur der nicht-erneuerbare Anteil des kumulierten Energieaufwandes betrachtet, welcher auch als «Graue Energie» bezeichnet wird. Dieses Wirkungsmodell ist ein im Baubereich etablierter Kennwert, der auch in der KBOB/ecobau-Liste «Ökobilanzdaten im Baubereich» [10] verwendet wird. Das Ergebnis der Ökobilanz wird bei der Methode des kumulierten Energieaufwands als MJ-Oil-eq oder kWh Oil-eq («equivalents» = MJ / kWh Öl-Äquivalente) ausgegeben. Eine MJ Oil-eq bildet, analog zur Methode der Treibhausgase (kg CO₂ eq), die Basislinie zur Umrechnung der verschiedenen Energiequellen auf einen gemeinsamen Nenner [11].



3 Grundlagen für Referenzwerte – Modul 1

In den folgenden Kapiteln werden die Umweltwirkungen der verschiedenen Objekttypen vorgestellt. Die Grafiken werden jeweils auf Basis des Wirkmodells der Treibhausgasemissionen gezeigt. Dies einerseits, weil für alle betrachteten Bauwerkstypen Daten für die Treibhausgasemissionen verfügbar waren und andererseits aus Platzgründen nicht auch die grafische Auswertung der Umweltbelastungspunkte (UBP) und des kumulierten Energieaufwands (KEA) gezeigt werden kann. Die Grafiken für die UBP- und KEA-Auswertung befinden sich im Anhang C (viele Projekte der UTech waren in der Ökobilanz-Software vorhanden und konnten auch für die Wirkungsabschätzungsmethode der UBP und KEA ausgewertet werden). Im Text wird jedoch, sofern Daten zu den Umweltbelastungspunkten und zum kumulierten Energieaufwand vorhanden waren, auch darauf eingegangen, um die Ökobilanzergebnisse breiter abzustützen und fundierter einzuordnen.

Anhand der Treibhausgasemissionen wird aufgezeigt, wie die Berechnung der nachfolgenden Ökobilanzergebnisse erstellt wurden (dies gilt analog für UBP und KEA): Für die Auswertung wurden die totalen Treibhausgasemissionen je Objekt durch dessen Lebensdauer geteilt, um die jährlichen Treibhausgasemissionen aufzuzeigen. Die nachfolgenden Ergebnisse sind somit alle in der Einheit kg CO_2 -Äquivalente pro Fläche oder Laufmeter und Jahr.

Zwecks besserer Lesbarkeit werden die ausgewerteten Objekte in den nachfolgenden Kapiteln nicht im Detail beschreiben. Weiterführende technische Hintergrundinformationen zu den einzelnen Objekten und den ausgewerteten Projekten befinden sich im Anhang B. Dazu gehören unter anderem die angesetzten Lebensdauern (z.B. Mittelwert kantonaler Tiefbauämter) und die Instandsetzungsmassnahmen.

3.1 Fahrbahn, Strasse

3.1.1 Anschlussstrecken

In der Abb. 3-1 sind die Treibhausgasemissionen einer Schweizer Autobahn-Anschlussstrecke (Details siehe Anhang B1.1) ersichtlich. Die Herstellung der Materialien Asphalt und Gesteinskörnung sowie dessen Entsorgung weisen die grössten Treibhausgasemissionen auf. Die Errichtung macht ca. 9% der Umweltwirkung aus. Total weist die Anschlussstrecke $1.17 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/m}^2\text{a}$ auf. Die Instandsetzung ist in diesem Wert nicht berücksichtigt und würde zusätzliche Treibhausgasemissionen verursachen.

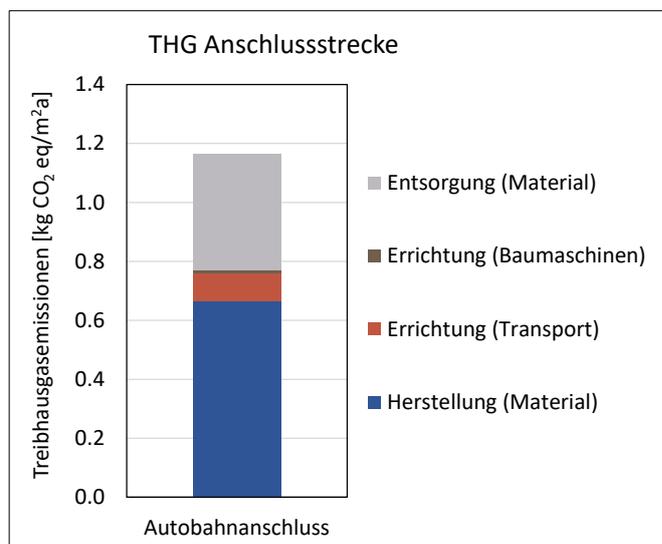


Abb. 3-1: Treibhausgasemissionen einer Schweizer Autobahn-Anschlussstrecke. Berücksichtigt wurden die Herstellung der Materialien, die Transporte und Baumaschinen für die Errichtung und die



Entsorgung (inkl. Transport) der Materialien (Lebensdauer 80 Jahre). Die Instandsetzung und Nutzung wurden nicht berücksichtigt.

Die Auswertungen der Gesamtumweltwirkung und des kumulierten Energieaufwandes ergaben ca. 3'000 UBP/m²a respektive 16 kWh Öl eq/m²a (siehe Abb. 0-7 und Abb. 0-8 im Anhang C1). Die Entsorgung der Gesteinskörnung für die Foundationsschicht etc. ist hauptverantwortlich für die hohen Umweltwirkungen mittels UBP und THG. Beim kumulierten Energieaufwand weist die Herstellung der Asphaltsschichten deutlich höhere Werte als die Entsorgung der Gesteinskörnung auf, weshalb mit dieser Methode die Entsorgung einen geringeren Anteil am Gesamtenergieaufwand ausmacht (siehe Abb. 0-8 im Anhang C1).

3.1.2 Bushaltestellen

Bushaltestellen werden entweder mit Betonplatten oder mit Asphalt erstellt. Für jede Bauweise wurden fünf Standard-Bushaltestellen von verschiedenen Kantonen ausgewertet (Details zu den Standardaufbauten und je drei zusätzlich ausgewertete Bushaltestellen-Beispielprojekte sind im Anhang B1.2 ersichtlich). Die Treibhausgasemissionen der Standard-Bushaltestellen pro Quadratmeter und Jahr sind in Abb. 3-2 ersichtlich. Die Instandsetzung während der Nutzungsphase wurde ebenfalls berücksichtigt, wobei bei Betonbushaltestellen keine Instandsetzung während der Lebensdauer von 40 Jahren anfällt. Bei einer Asphaltbushaltestelle werden während der Lebensdauer von 40 Jahren zweimal eine Deckschicht und einmal eine Binderschicht ersetzt.

Die Treibhausgasemissionen von Beton-Bushaltestellen liegen im Mittel bei ca. 2.3 kg CO₂ eq/m²a. Die Treibhausgasemissionen der Asphalt-Bushaltestellen sind im Mittel bei 2.5 kg CO₂ eq/m²a. Die Auswertungen der Bushaltestellen mittels Umweltbelastungspunkten ergeben ein ähnliches Bild. Die Betonvariante ist mit 3'900 UBP/m²a leicht tiefer als die Asphaltvariante mit 4'800 UBP/m²a (siehe Abb. 0-17 und im Anhang C1). Bezüglich kumuliertem Energieaufwand weisen Asphaltbushaltestellen deutlich höhere Werte auf, aufgrund des höheren stofflich genutzten Energieinhaltes des Bitumens. Im Mittel weisen Asphaltbushaltestellen 21 kWh Öl eq/m²a und Betonbushaltestellen 8.5 kWh Öl eq/m²a auf (siehe Abb. 0-18 und im Anhang C1).

Der Vergleich von der Beton- und Asphaltbauweise ist zudem stark von der Lebensdauer abhängig, welche in der Literatur im Strassenbau umstritten ist. Dies gilt vor allem bei den Bushaltestellen und den Kreiseln.

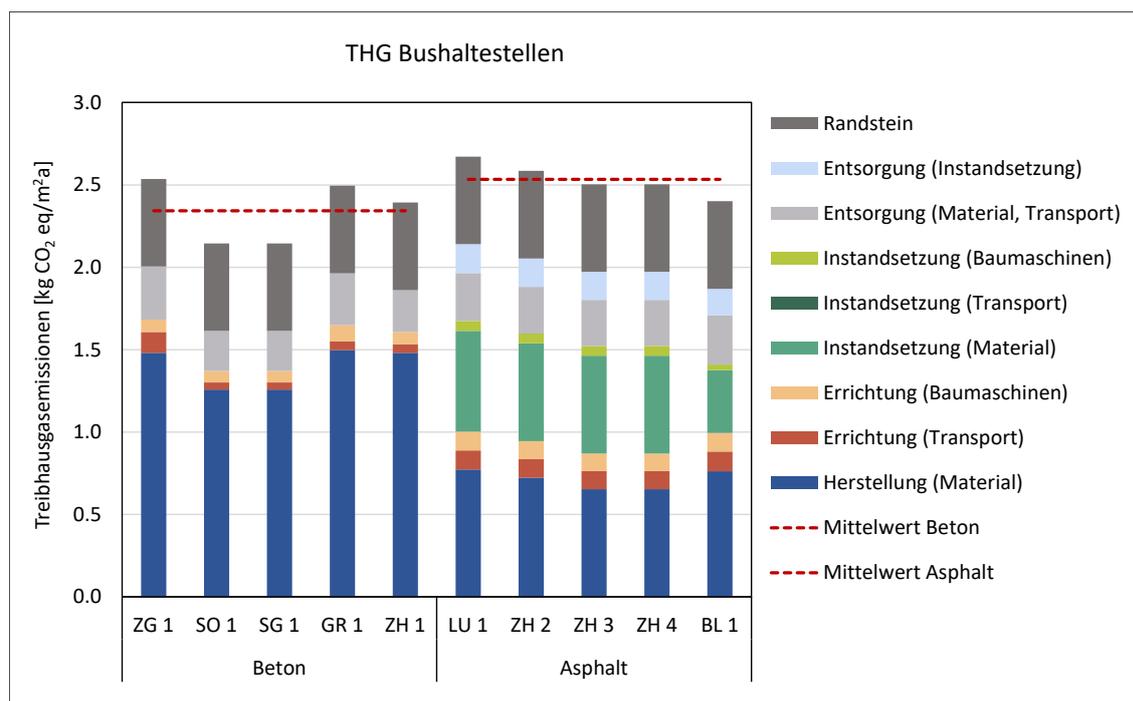




Abb. 3-2: Treibhausgasemissionen von je fünf Standard-Bushaltestellen von verschiedenen Kantonen aus Beton und Asphalt. Die Lebensdauer beträgt 40 Jahre (Beton: keine Instandsetzung, Asphalt: zweimal Deckschicht und einmal Binderschicht ersetzt).

3.1.3 Gehwege

Die Treibhausgasemissionen der Gehwege inklusive beidseitigem Randstein sind in Abb. 3-3 ersichtlich. Für die Analyse wurden Standardaufbauten kantonaler Tiefbauämter und von verschiedenen Gemeinden verwendet (Details siehe Anhang B1.3). Dabei wurde die Herstellung, die Errichtung und die Entsorgung von Asphalt-Gehwegen sowie ein beidseitiger Randstein betrachtet. Als Instandsetzungsmaßnahmen wurden innerhalb der Lebensdauer von 80 Jahren dreimal eine Deckschicht, zweimal eine Binderschicht und einmal eine Tragschicht ersetzt. Die mittleren Treibhausgasemissionen liegen bei 1.1 kg CO₂ eq/m²a. Die Auswertung mittels UB- und KEA-Methode ergibt im Mittel ca. 2'130 UB/m²a respektive knapp 9.8 kWh Öl eq/m²a (siehe Abb. 0-9 und Abb. 0-10 im Anhang).

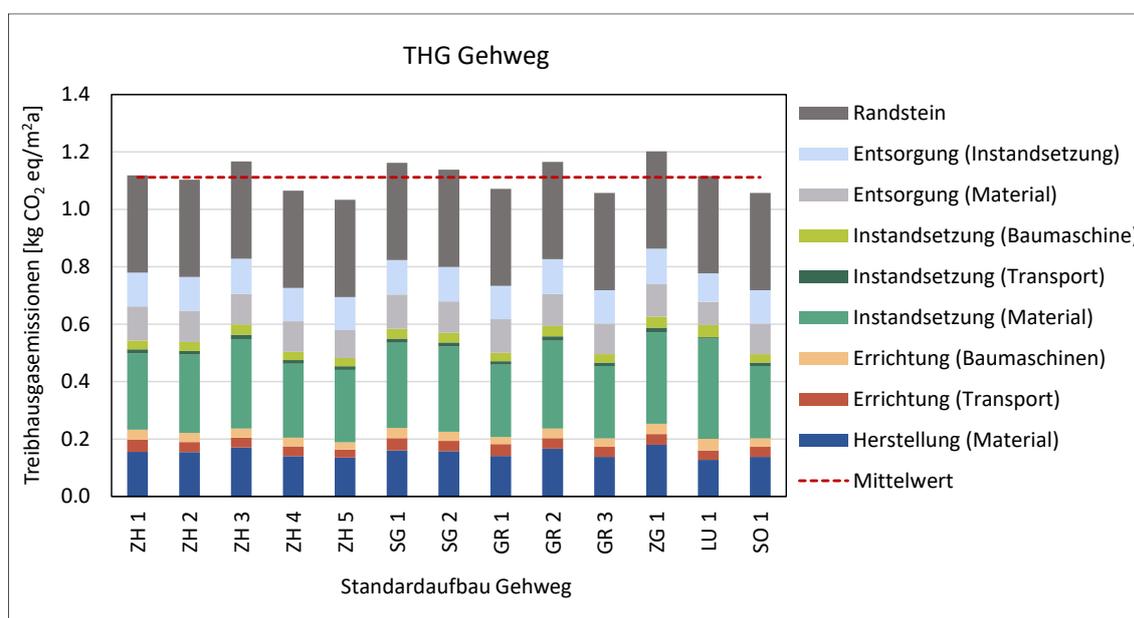
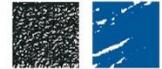


Abb. 3-3: Treibhausgasemissionen von Standard – Gehwegen inklusive beidseitigem Randstein von verschiedenen Gemeinden und Städten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG) und Graubünden (GR), Zug (ZG), Luzern (LU) und Solothurn (SO). Lebensdauer aller Projekte: 80 Jahre. Instandsetzungen: 3x Deckschicht, 1x Tragschicht.

3.1.4 Kreisel

Die Fahrbahn innerhalb eines Kreisels wird mit Beton oder Asphalt gebaut. Ausgewertet wurden je vier Asphalt- und Betonkreisel sowie ein zusätzlicher Betonkreisel aus einem Projekt, bei welchem die Asphaltanschlüsse inkludiert sind (Nummer 9). Berücksichtigt wurde jeweils nur die Fahrbahn ohne die Kreiselmitteln (Details siehe Anhang B1.7). Die Lebensdauer beträgt 80 Jahre. Neben der Herstellung, der Errichtung und der Entsorgung wurde auch die Instandsetzungen bei den Asphalt- und Betonkreiseln eingerechnet. Während der gesamten Lebensdauer weist der Betonkreisel keine Instandsetzungen ausser dem Ersatz von Fugenbändern auf, welche jedoch aufgrund mangelnder Daten und einer untergeordneten ökologischen Relevanz vernachlässigt wurden. Die durchschnittlichen Treibhausgasemissionen betragen 1.5 kg CO₂ eq/m²a und 1.1 kg CO₂ eq/m²a für Asphalt- respektive Betonkreisel. Die Baumaschinen im Projekt 9 verursachen höhere Emissionen, da das Projekt in steilem Gebirge ausgeführt wurde.

Mit der Methode der Umweltbelastungspunkte weisen Asphaltkreisel 2'950 UB/m²a und Betonkreisel 1'940 UB/m²a auf (siehe Abb. 0-19 im Anhang C1). Die Auswertung mittels kumuliertem Energieaufwand



ergibt ein ähnliches Bild wie bereits bei den Bushaltestellen. Im Mittel weisen Asphaltkreisel 17.5 kWh Öl eq/m²a und Betonkreisel 4.4 kWh Öl eq/m²a auf (siehe Abb. 0-20 im Anhang C1).

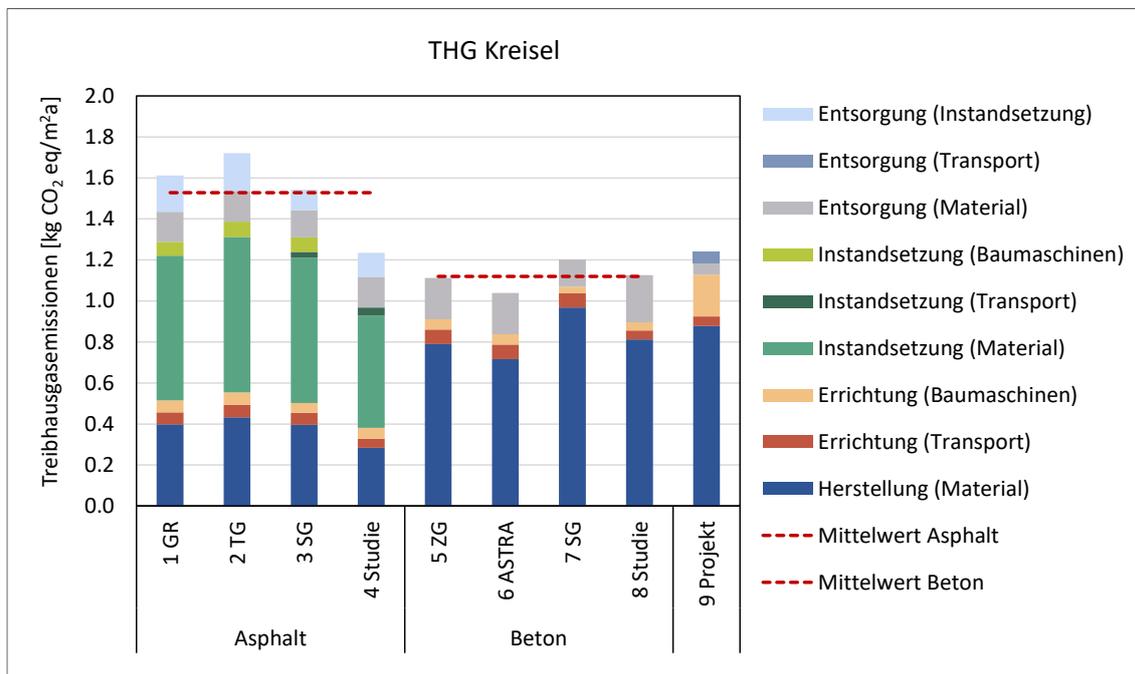


Abb. 3-4: Treibhausgasemissionen von je vier Asphalt- und Betonkreiseln sowie einem Betonkreisel inklusive Asphaltanschlüssen aus einem Gesamtprojekt (Nr. 9). Standardfahrbahnaufbauten der Kantone: Graubünden, St. Gallen, Thurgau, Zug und vom ASTRA. Nummer 4 und 8 stammen aus einer Studie [12]. Lebensdauer: 80 Jahre.

3.1.5 Gemeindestrassen

Die Auswertung der Treibhausgasemissionen von Gemeindestrassen inklusive beidseitigem Randstein basiert auf 10 Fahrbahn-Standardaufbauten von verschiedenen Gemeinden in den Kantonen Zürich, Luzern und Graubünden (Details siehe Anhang B1.4). In Abb. 3-5 sind die Treibhausgasemissionen der Herstellung, Errichtung und Entsorgung der Fahrbahnen von Gemeindestrassen abgebildet. Betrachtet wurde eine Lebensdauer von 80 Jahren. Als Instandsetzung wurde der Ersatz von einer Tragschicht (Annahme Lebensdauer 40 Jahre), zwei Binderschichten (Annahme Lebensdauer 30 Jahre) und drei Deckschichten (Annahme Lebensdauer 20 Jahre) berücksichtigt. Zusätzlich wurde ein Randstein auf beiden Strassenseiten anteilmässig heruntergebrochen auf einen Quadratmeter Gemeindestrasse mit einer Breite von 7 Metern bilanziert.

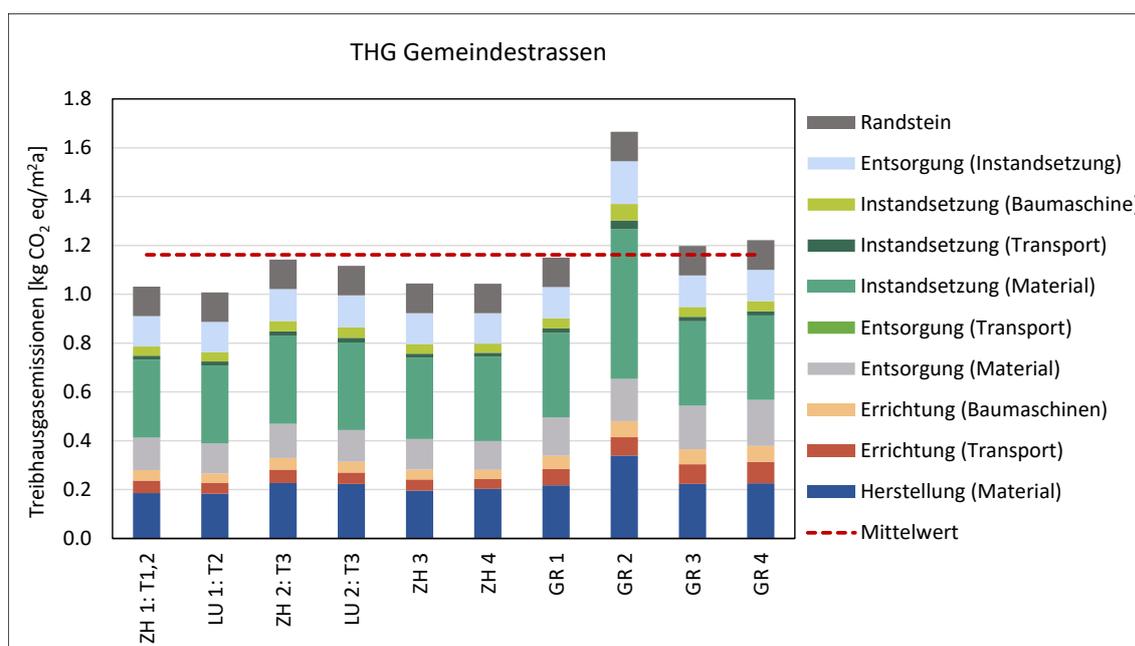


Abb. 3-5: Treibhausgasemissionen der Fahrbahnaufbauten inklusive beidseitigem Randstein von 10 verschiedenen Gemeinden in den Kantonen Zürich, Luzern und Graubünden. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

Die mittleren Treibhausgasemissionen betragen 1.16 kg CO₂ eq/m²a. Die Herstellung und Entsorgung der Materialien gehört zu den grössten Treibhausgastreibern. Die Baumaschinen und Transporte machen ca. 7% bis 10% der Gesamtemissionen aus. Der Mittelwert der Umweltbelastungspunkte liegt bei 2'230 UBP/m²a und jener des kumulierten Energieaufwandes bei 10.6 kWh Öl eq/m²a (vgl. Abb. 0-11 und Abb. 0-12 im Anhang C1).

3.1.6 Kantonsstrassen

Die Treibhausgasemissionen der Kantonsstrassen inklusive beidseitigem Randstein sind in Abb. 3-6 ersichtlich. Die Auswertung basiert auf Standardfahrbahnaufbauten verschiedener Kantone (Details siehe Anhang B1.5). Die Anforderungen sind jedoch nicht in der ganzen Schweiz identisch, gerade der Kanton Zürich hat hohe Anforderungen aufgrund des stark belasteten Netzes, was zu stärkeren Belagsschichten führt. Zusätzlich wurde basierend auf der Studie [13] ein Mittelwert von 17 Strassen berechnet («Literatur» in Abb. 3-6). Im Literaturwert ist keine Instandsetzung enthalten. Die Lebensdauer der Kantonsstrassen wurde auf 80 Jahre gesetzt (siehe Anhang B1).

Die mittleren Treibhausgasemissionen der Standardaufbau-Kantonsstrassen betragen 1.5 kg CO₂ eq/m²a. Die tieferen Belastungsklassen weisen tendenziell auch tiefere Umweltwirkungen auf, was mit der Schichtmächtigkeit und der Wahl der Asphaltart einhergeht. Dies ist auch bei der Auswertung mittels UBP und KEA zutreffend (siehe Abb. 0-13 und Abb. 0-14 im Anhang C1). Der Mittelwert liegt bei ca. 2'620 UBP/m²a und bei 13.4 kWh Öl eq/m²a.

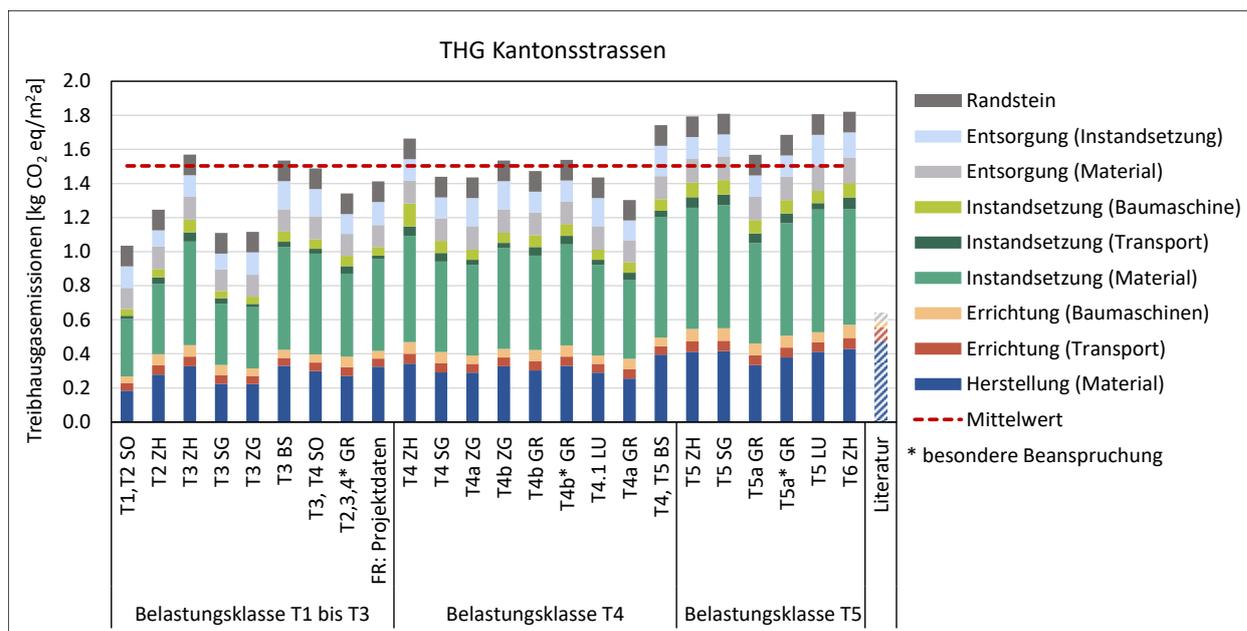


Abb. 3-6: Treibhausgasemissionen der Standardaufbauten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG), Graubünden (GR), Zug (ZG), Basel-Stadt (BS), Freiburg (FR), Solothurn (SO) und Luzern (LU) über alle Lebenszyklusphasen und für verschiedene Belastungsklassen (T1 bis T6). Als Vergleich ist ganz rechts schraffiert der Mittelwert von 17 Kantonsstrassen aus einer Studie des städtischen Tiefbauamtes der Stadt Zürich [13] angegeben. Rot gestrichelt ist der Mittelwert der Standardaufbauten abgebildet. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

3.1.7 Nationalstrassen

Die Treibhausgasemissionen von zehn Standard-Nationalstrassen sind in Abb. 3-7 aufgeführt. Die zehn verschiedene Standardaufbauten des ASTRA setzen sich aus verschiedenen Schichtzusammensetzungen und Recyclinganteilen zusammen (Details siehe Anhang B1.6). Im Anhang B1.6 befindet sich zusätzlich die Auswertung von einem spezifischen Projekt der UTech, bei welchem je 6 Standardaufbauten für die Asphalt- und Betonbauweise in Deutschland ausgewertet wurden. In der Auswertung ist der gesamte Lebenszyklus inklusive Instandsetzung abgebildet. Die verwendete Nutzungsdauer wurde analog zu den restlichen Fahrbahnen auf 80 Jahre (inkl. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht und einmal Tragschicht) gesetzt (siehe Anhang B1).

Die mittlere Treibhausgasemissionen der Standard-Nationalstrassen in der Schweiz betragen 1.5 kg CO₂ eq/m²a. Der Wert aus der Literatur liegt in einem ähnlichen Bereich wie die Standardaufbauten. Es zeigt sich, dass die Standardaufbauten des ASTRA geringere Treibhausgasemissionen aufweisen als diejenigen aus dem Projekt der UTech aus Deutschland. Dies hängt damit zusammen, dass die Schichtmächtigkeiten des Strassenoberbaus in Deutschland grösser und auch die Wahl der Asphaltarten beim ASTRA ökologisch vorteilhafter sind.

Die Auswertung mittels UBP und KEA ergeben 2'920 UBP/m²a und 14 kWh Öl eq/m²a (siehe Abb. 0-15 und Abb. 0-16 im Anhang C1).

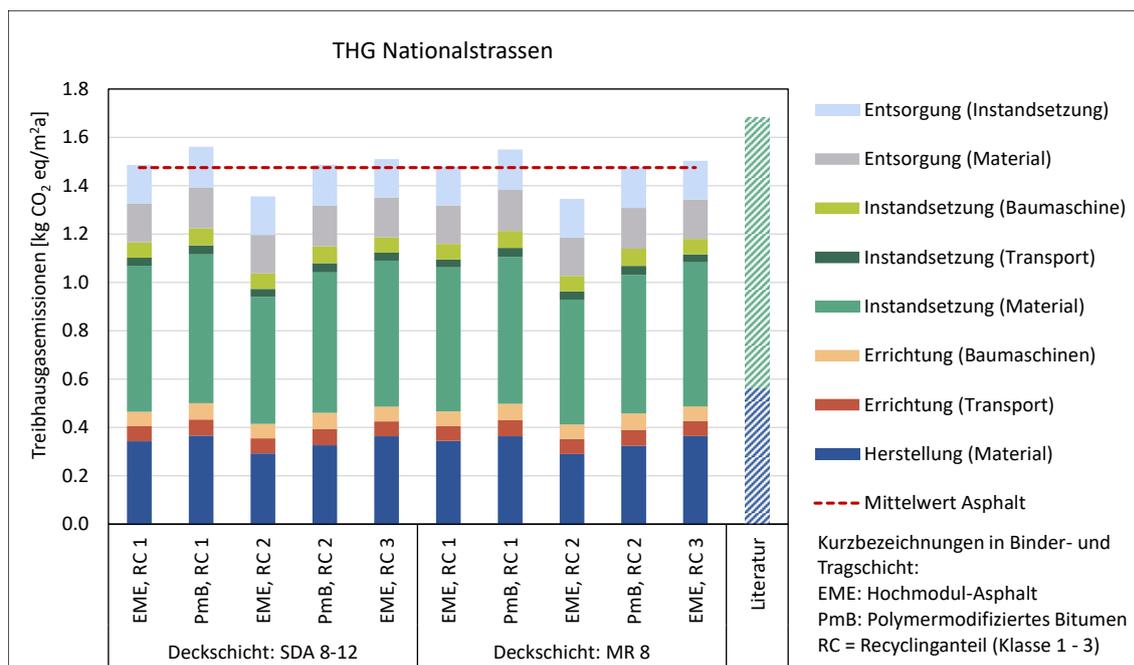


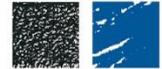
Abb. 3-7: Treibhausgasemissionen verschiedener Schweizer Standardfahrbahnaufbauten in Asphaltbauweise (kompletter Aufbau: Deck-, Binder- Trag- und Fundationsschicht mit Frostschutzschicht) sowie ein Vergleichswert aus der Literatur. Bei den Standardaufbauten unterscheiden sich die Schichtstärken, die Belagsarten (z.B. Deckschicht SDA 8-12 oder MR 8 und Binder-/Tragschicht mit EME oder PmB) und der Recyclinganteil (RC) in den verschiedenen Schichten von 0% (Deckschicht) bis zu 100% (Fundationsschicht) (Details siehe Anhang B1.6). Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht. Abkürzungen; SDA: Semidichter Asphalt, MR: Rauasphalt, EME: Hochmodul-Asphalt, PmB: Polymermodifiziertes Bitumen, RC: Recyclinganteil eingestuft in 3 Klassen.

3.2 Fahrbahn, Gleis

Die Treibhausgasemissionen der Gleise wurden anhand von zwei Beispielprojekten der SBB abgeschätzt (Details siehe Anhang B2). Dabei wurden ein eingleisiges Projekt und ein zweigleisiges Projekt ausgewertet. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die THG des zweigleisigen Projektes ebenfalls pro Laufmeter Gleis berechnet (zwei statt vier Schienen im Querschnitt). Die Resultate sind in Abb. 3-8 dargestellt. Der Haupttreiber für hohe Treibhausgasemissionen sind die Stahlschienen. Je nach Wirkungsabschätzungsmethode macht der Stahl zwischen 75% und knapp über 80% der Umweltwirkung aus. Die Betonschwellen liegen zwischen 10% und 20%. Eine untergeordnete Rolle spielen zum Beispiel die Kabelkanäle und Schienenklemmen. Die Baumaschinenstunden konnten nur grob abgeschätzt werden und waren beim eingleisigen Projekt deutlich höher als beim zweigleisigen Projekt, dies ist jedoch mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Auch die Stahlmenge des eingleisigen Projektes war höher, was zu einer sichtbaren Erhöhung der Umweltwirkung beitrug. Im Mittel weisen die Gleise 16.8 kg CO₂ eq/m Gleis und Jahr auf. Mittels UBP- und KEA-Methode liegen die Werte bei ca. 27'570 UBP/m Gleis und Jahr sowie bei 45 kWh Öl eq/m Gleis und Jahr (siehe Abb. 0-21 und Abb. 0-22 im Anhang).

Die Erkenntnisse aus der Studie Umweltbilanz Bahninfrastruktur von Carbotech im Auftrag des BAV [14] wurden ebenfalls als Literaturwerte in die Grafik eingefügt und im Mittelwert für die Treibhausgasemissionen berücksichtigt. Der Wert für das «zweigleisige» Projekt wurde ebenfalls pro Gleis (durch zwei geteilt) aufgeführt.

Zwecks Vergleichbarkeit mit den Strassenfahrbahnen wurden die Gleise als Fläche betrachtet (vgl. Abb. 5-1), wobei pro Laufmeter Gleisstrecke von einer 3.5 Metern breiten Gleisfläche ausgegangen wurde.



Folglich entspricht ein Laufmeter Gleisstrecke einer Gleisfläche von 3.5 m². Umgerechnet auf einen Quadratmeter Gleisfläche ergeben sich im Mittel 4.2 kg CO₂ eq/m² Gleis und Jahr.

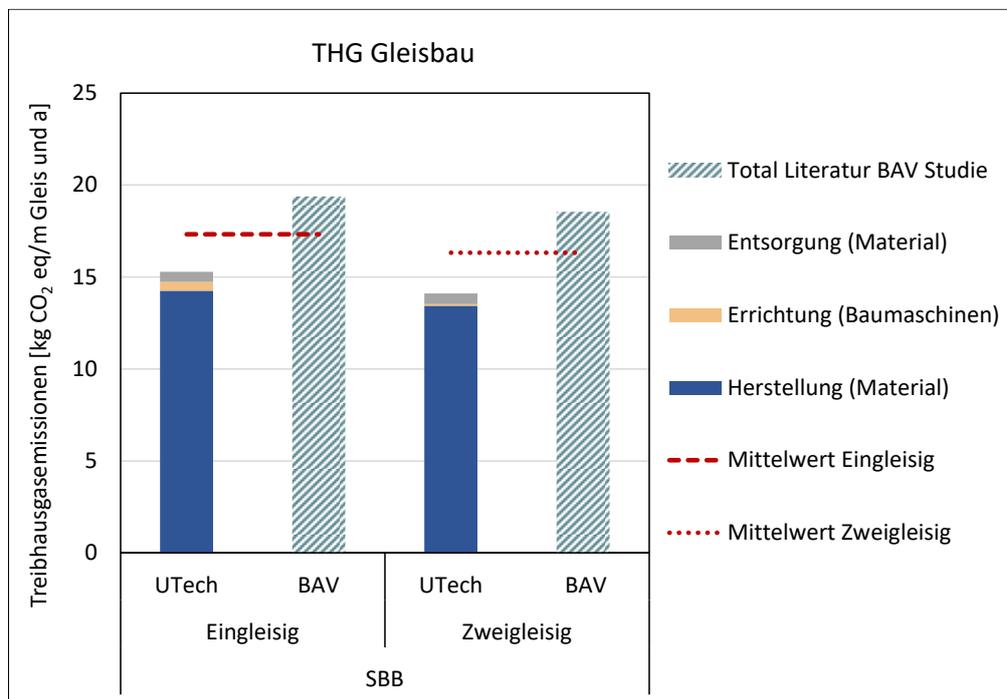


Abb. 3-8: Treibhausgasemissionen pro Meter Gleis und Jahr für einen eingleisigen und einen zweigleisigen Streckenabschnitt der SBB sowie die Literaturwerte aus der BAV Studie «Umweltbilanz Bahninfrastruktur» [14]. Die THG des zweigleisigen Projektes beziehen sich ebenfalls auf die tatsächliche Gleislänge (zwei statt vier Schienen in der Breite). Die Lebensdauer der ausgewerteten Projekte variiert je nach Material und wurde aus der Studie [14] übernommen (z.B. Stahlschiene 25 Jahre, Schwellen 40 Jahre, Schotter 60 Jahre, Rest 33 Jahre).



3.3 Brücken

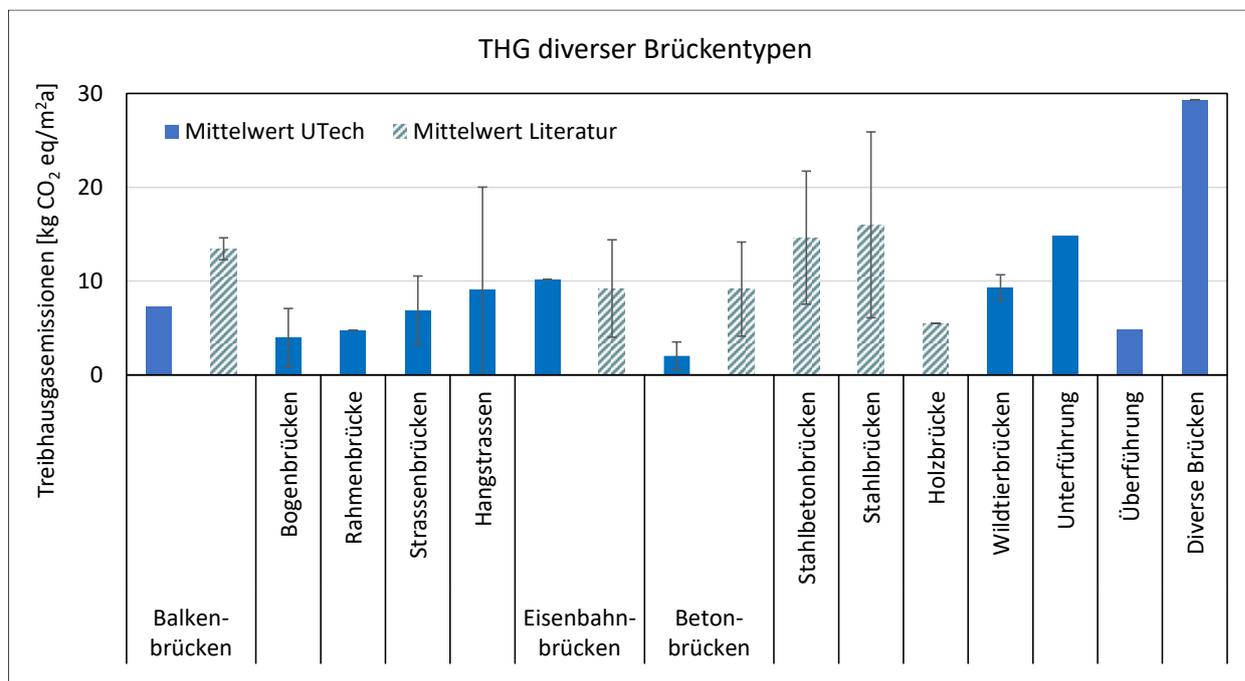


Abb. 3-9: Mittlere Treibhausgasemissionen von Projekten der UTech und aus der Literatur (siehe Anhang B3) von verschiedenen Brückentypen. Der Fehlerbalken gibt jeweils die Standardabweichung der gemittelten Werte je Brückentyp an. Die Datengrundlage und Unsicherheiten sind unterschiedlich je nach Projekt und Brückentyp.

Brücken sind sehr individuell und existieren in verschiedenen konstruktiven Ausgestaltungen und mit unterschiedlichen Aufbauten und Baumaterialien. Ein Referenzwert für Brücken zu evaluieren, erscheint den Autorinnen und Autoren deshalb nicht möglich. Es bedarf einer Klassierung der Brückentypen (z.B. nach Nutzungsart oder Bauweise), was im Rahmen dieses Projektes nicht möglich war. Dennoch wurden verschiedene Brückentypen ausgewertet und Literaturwerte beigezogen, um ein erstes Bild für die Treibhausgasemissionen verschiedener Brücken zu erhalten. In Abb. 3-9 sind die Treibhausgasemissionen der untersuchten Brückentypen inklusive Standardabweichung je Brückentyp aufgeführt. Die Schwankungen innerhalb eines Brückentyps ist teilweise höher als die Standardabweichung zwischen den verschiedenen Brückentypen. Dies ist zum einen auf die Einzigartigkeit jeder Brücke und zum anderen auf die Unsicherheiten in der Datengrundlage zurückzuführen. Weitere Details zu den Brücken sind dem Anhang B3 zu entnehmen. Die betrachtete Nutzungsdauer der Brücken beträgt 100 Jahre (Ausnahmen sind im Anhang B3 erwähnt). Der Mittelwert über alle Brückentypen liegt bei 10.5 kg CO₂ eq/m²a und die Standardabweichung zwischen den Brückentypen bei 8.4 kg CO₂ eq/m²a. Der Eintrag «Diverse Brücken» stammt vom kantonalen Tiefbauamts Zürich und wurde mittels Top Down-Ansatz ermittelt. Hier wurden insgesamt 693 Brücken mit einer mittleren Brückenfläche von 321.5 m² eingerechnet. Die Auswertung mittels UBP und KEA weist ebenfalls starke Schwankungen zwischen den Brückentypen auf (siehe Abb. 0-23 und Abb. 0-24 im Anhang C3).



3.4 Tunnel

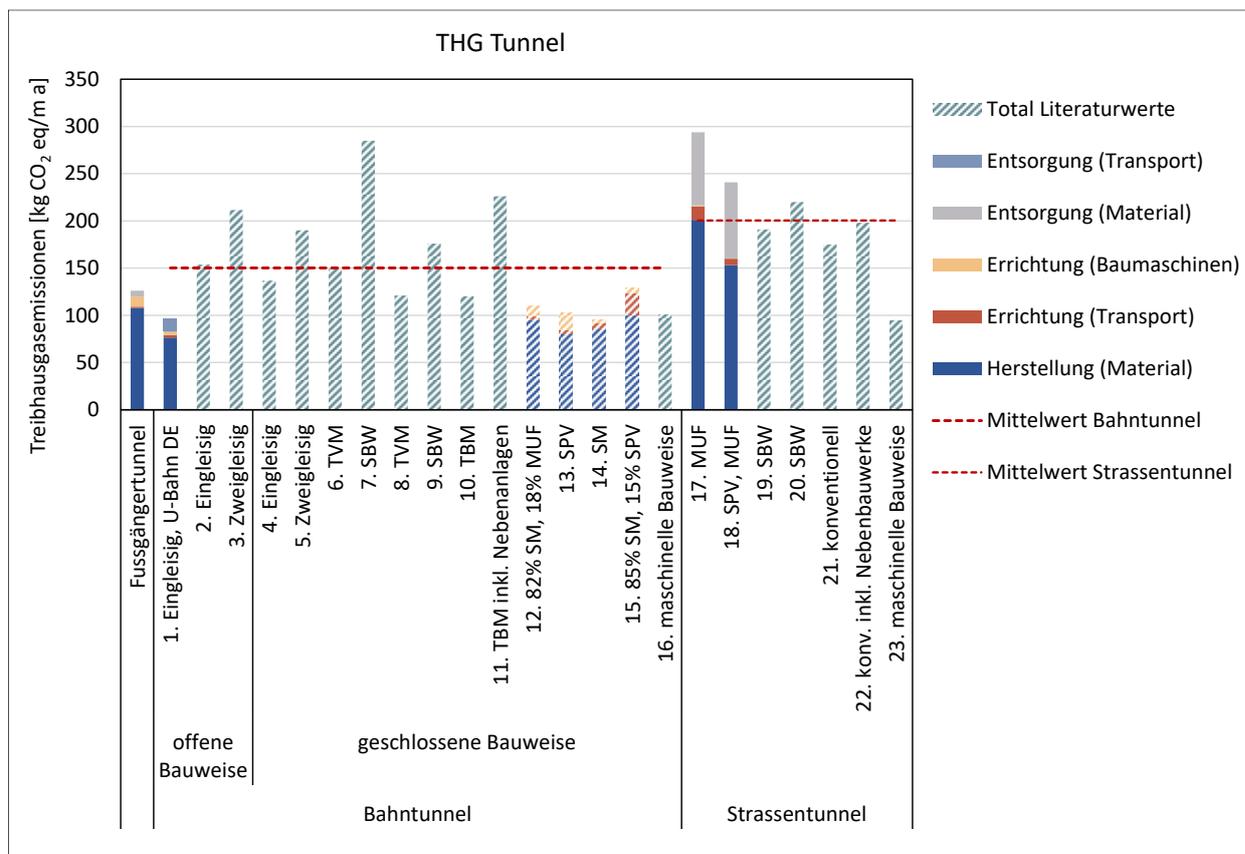


Abb. 3-10: Treibhausgasemissionen für einen Laufmeter Tunnel von verschiedenen Tunnelbauweisen wie Fussgänger, Bahn- und Strassentunnel. Legende: TVM: Tunnelvortriebsmaschine, SBW: Spritzbetonbauweise, TBM: Tunnelbohrmaschine, MUF: Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels, SM: Schildmaschine, SPV: Sprengvortrieb. Der Wert bezieht sich jeweils auf eine Tunnelröhre (Ausnahme: Projekte 12, 13 & 15: 2 Röhren, jedoch wurde hier nur der Rohbau bilanziert). Hintergrundinformationen zu den Tunnelbauwerken: Tabelle 26 im Anhang.

In Abb. 3-10 sind die Treibhausgasemissionen verschiedener Tunnel ersichtlich. Ausgewertet wurden ein Fussgängertunnel, ein eingleisiger U-Bahntunnel in offener Bauweise und zwei Strassentunnel in der Schweiz (Details siehe Anhang B4). Zusätzlich wurden diverse Literaturwerte für die offene und geschlossene Bauweise von Bahntunnel und für Strassentunnel beigezogen (siehe Anhang B4). Die Lebensdauer wurde jeweils auf 100 Jahre gesetzt. Gemäss Abb. 3-10 sind die Treibhausgasemissionen von Fussgänger-, Bahn- und Strassentunnel in derselben Grössenordnung. Der Mittelwert der Bahntunnel liegt bei 150 kg CO₂ eq/m a und jener der Strassentunnel bei 200 kg CO₂ eq/m a. Die grössten Treibhausgasemissionen fallen bei der Herstellung der Materialien an.

Zwecks Vergleichbarkeit wurden die selbst ausgewerteten Beispielprojekte ebenfalls noch pro Quadratmeter Fahrbahn im Tunnel ausgewertet. Dafür wurde die Breite der Fahrbahn verwendet. Der Mittelwert der Treibhausgasemissionen aller vier Projekte (Fussgängertunnel, 1., 18. und 19.) liegt bei knapp 24 kg CO₂ eq/m²a.

Die Datengrundlage für die Auswertung mittels UBP und KEA ist sehr dünn (siehe Abb. 0-25 und Abb. 0-26 im Anhang C4). Die Strassentunnel befinden sich in der Grössenordnung von 447'000 UBP/m a respektive 920 kWh Öl eq/m a. Das eine Beispielprojekt des Bahntunnel liegt bei 490 kWh Öl eq/m a.



3.5 Galerien

Die Datengrundlage in Bezug auf Galerien war sehr begrenzt. Zur Herstellung einer neuen Galerie waren keine Daten vorhanden, jedoch konnte ein Instandsetzungsprojekt ausgewertet werden (Details siehe Anhang B5). Die Umweltwirkung dieser Instandsetzung sind in Abb. 3-11 ersichtlich. Der Transport spielt eine verhältnismässig grosse Rolle, was darauf zurückzuführen ist, dass Galerien oft in Bergregionen mit einer schlechten Erschliessung gebaut werden und daher längere Transportdistanzen und ein höherer Dieselverbrauch aufgrund der steilen Strassen auftritt. Die gesamten Treibhausgasemissionen betragen 276 kg CO₂ eq/m a. Die Auswertung mittels UBP ergab ca. 550'000 UBP/m a, wobei die Entsorgung und die Herstellung der Materialien je ca. 40 % der Gesamtumweltwirkung ausmachen.

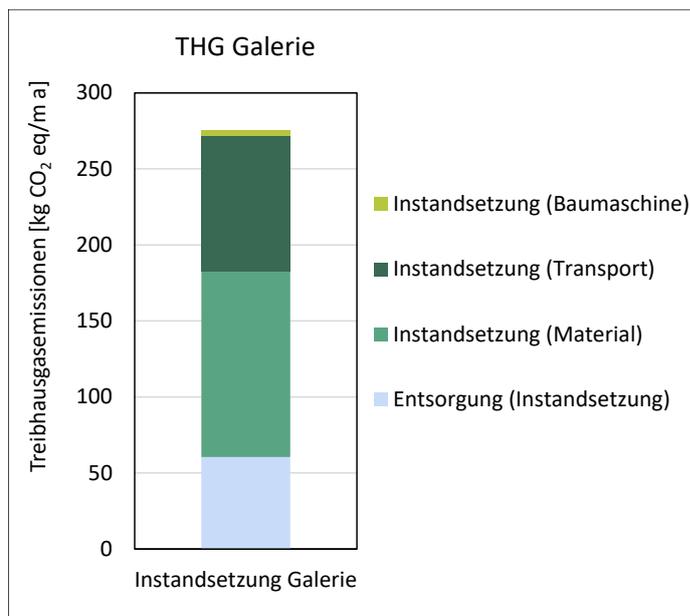


Abb. 3-11: Treibhausgasemissionen einer Instandsetzung einer Galerie. Nutzungsdauer: 100 Jahre.

3.6 Übrige Bauten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Böschungssicherungen, Lärmschutzwände, Stützanker, Stützmauern und Freileitungen vorgestellt. Aufgrund mangelnder Daten wurden bei den Böschungssicherungen und den Stützankern nur die Herstellung der Materialien ausgewertet.

3.6.1 Böschungssicherungen

Die Treibhausgasemissionen der Herstellung zweier verschiedener Böschungssicherungen sind in Abb. 3-12 ersichtlich. Links sind die Treibhausgasemissionen einer Böschungssicherung mit einer rückverankerten Spritzbetonschale und rechts einer Böschungssicherung mit einer flexiblen Geflechtsabdeckung abgebildet. Die Treibhausgasemissionen der Spritzbetonschale sind pro Laufmeter und Jahr doppelt so gross wie jene der Geflechtsabdeckung. Dies liegt vor allem an den deutlich höheren Materialmengen, die pro Laufmeter Spritzbetonschale im Vergleich zur Geflechtsabdeckung eingesetzt werden (siehe hierzu die Materialmengen in Tabelle 27 und Tabelle 28 im Anhang). Die Lebensdauer von beiden Böschungssicherungsarten wurde auf 100 Jahre gesetzt. Eine Auswertung bezüglich UBP und KEA wurde aufgrund fehlender Daten nicht vorgenommen.

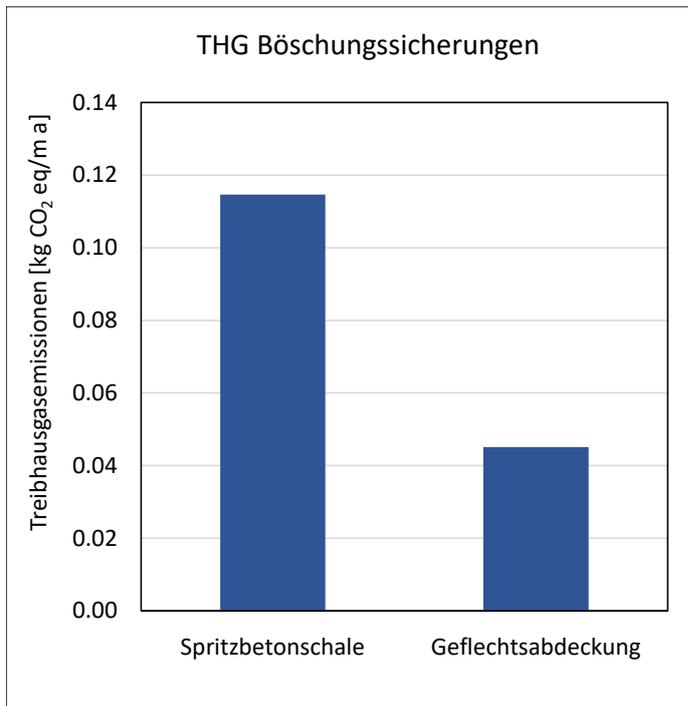
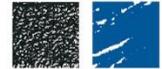


Abb. 3-12: Treibhausgasemissionen einer Böschungssicherung mit einer rückverankerten Spritzbetonschale und einer Böschungssicherung einer flexiblen Geflechtsabdeckung pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet ist nur die Herstellung der Materialien, ohne Einbau, Transporte, Entsorgung oder Instandsetzung.

3.6.2 Lärmschutzwände

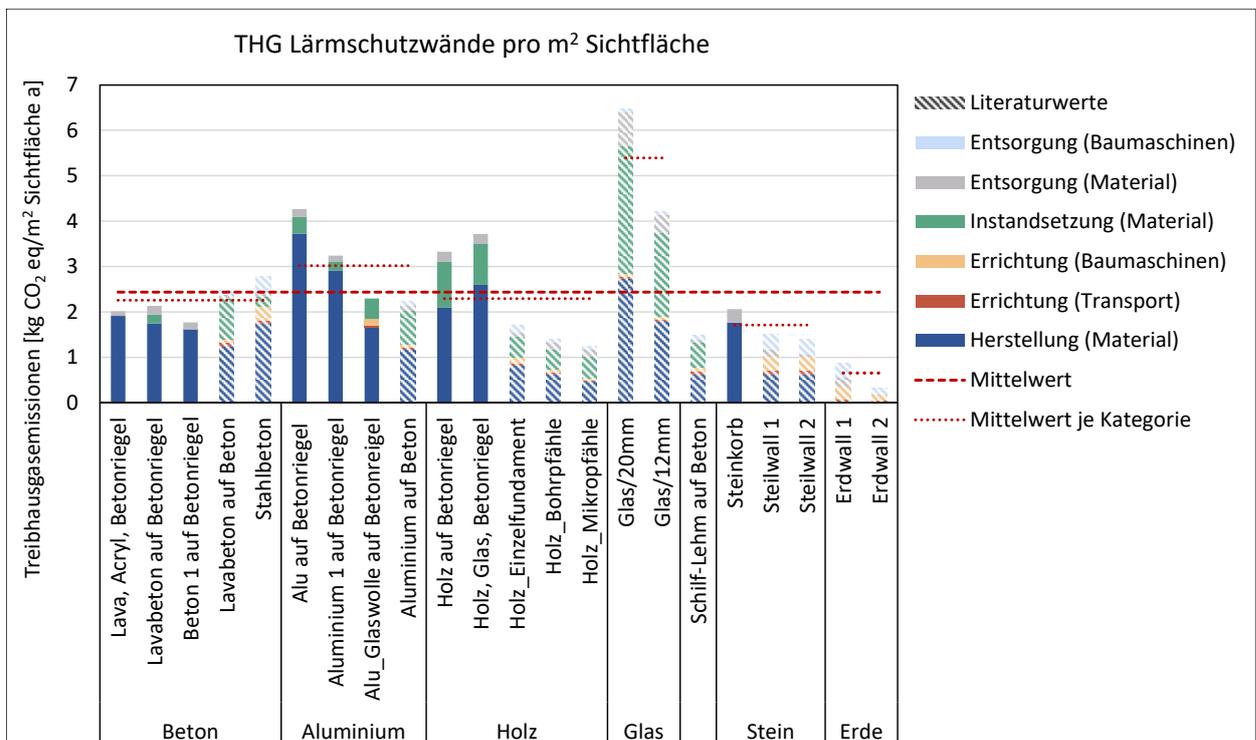
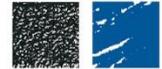


Abb. 3-13: Treibhausgasemissionen verschiedener Lärmschutzwände inkl. Foundation aus unterschiedlichen Materialien pro Quadratmeter Sichtfläche und Jahr. Lebensdauer: 80 Jahre.



Die Treibhausgasemissionen der Lärmschutzwände wurden pro Quadratmeter Sichtfläche ausgewertet (siehe Abb. 3-13). Mit Sichtfläche ist hierbei die gesamte Höhe der Lärmschutzwand inklusive Fundament gemeint. Ausgewertet wurden verschiedene Lärmschutzwandtypen aus unterschiedlichen Materialien. Da je Lärmschutzwandtyp oftmals nur ein bis zwei Beispielprojekte vorlagen, wurden die Daten zusätzlich mit Werten aus der Literatur verglichen. Hierfür wurde die Studie «DecarboNoise» von Susanne Kytzia herangezogen [15]. Der Mittelwert über alle Lärmschutzwandtypen liegt bei ca. 2.4 kg CO₂ eq/m² Sichtfläche und Jahr. Die Herstellung der Materialien ist bei allen Lärmschutzwandtypen der Haupttreiber für hohe Treibhausgasemissionen. Die Lebensdauer der Lärmschutzwände wurde auf 80 Jahre gesetzt. Die Materialien, welche weniger als 80 Jahre halten wurden als Instandsetzungsmassnahmen ein oder mehrmals ersetzt.

Die Auswertung mittels UBP und KEA war nur für die eigenen Projekte möglich, da in der Literatur nur die Treibhausgasemissionen untersucht wurden. Die Resultate sind in Abb. 0-27 und Abb. 0-28 im Anhang C5 ersichtlich. Von den untersuchten Lärmschutzwänden wiesen jene aus Beton mit 4'200 UBP /m² Sichtfläche und Jahr respektive 5.7 kWh Öl-eq/ m² Sichtfläche und Jahr bei beiden Methoden die tiefsten Umweltwirkungen auf. Die Herstellung des Holzes weist hohe UBP- und KEA-Werte auf (vgl. KBOB/ecobau Ökobilanzdaten im Baubereich [10]). Die Schwankungen zwischen den Lärmschutztypen beim kumulierten Energieaufwand sind sehr gross. Insbesondere Holz weist einen sehr hohen kumulierten Energieaufwand auf. Dies ist einerseits auf den hohen Anteil erneuerbarer, stofflich genutzter Energie im Holz zurückzuführen, andererseits auf den vergleichsweise energieintensiven Herstellungs- und Trocknungsprozess. Für die Umweltbilanz relevant ist jedoch primär der nicht erneuerbare Energiegehalt – und dieser fällt bei Holz im Vergleich zu anderen Materialien gering aus.

3.6.3 Stützanker

In Abb. 3-14 sind die Treibhausgasemissionen für die Herstellung verschiedener Anker pro Laufmeter und Jahr ersichtlich. Abgebildet ist jeweils die Herstellung des benötigten Stahls für die jeweiligen Ankertypen (Details siehe Anhang B6.3). Die Lebensdauer wurde auf 100 Jahre gesetzt. Aufgrund fehlender Daten wurde der Transport und der Einbau nicht berücksichtigt. Die Anker weisen verschiedene Durchmesser auf und sind somit schlecht vergleichbar, weshalb kein Mittelwert berechnet wurde. Es fällt jedoch auf, dass die Höhe der Treibhausgasemissionen stark mit der Grösse des Durchmessers korreliert. Weiter kann die Umweltbelastung durch die Optimierung der Menge an Ankern reduziert werden, etwa durch die Zugkraftmessungen auf geotechnische Anker.

Die Auswertung mittels UBP ergibt das gleiche Resultat und die Hauptaussagen ändern sich dadurch nicht (siehe Abb. 0-29 im Anhang C5).

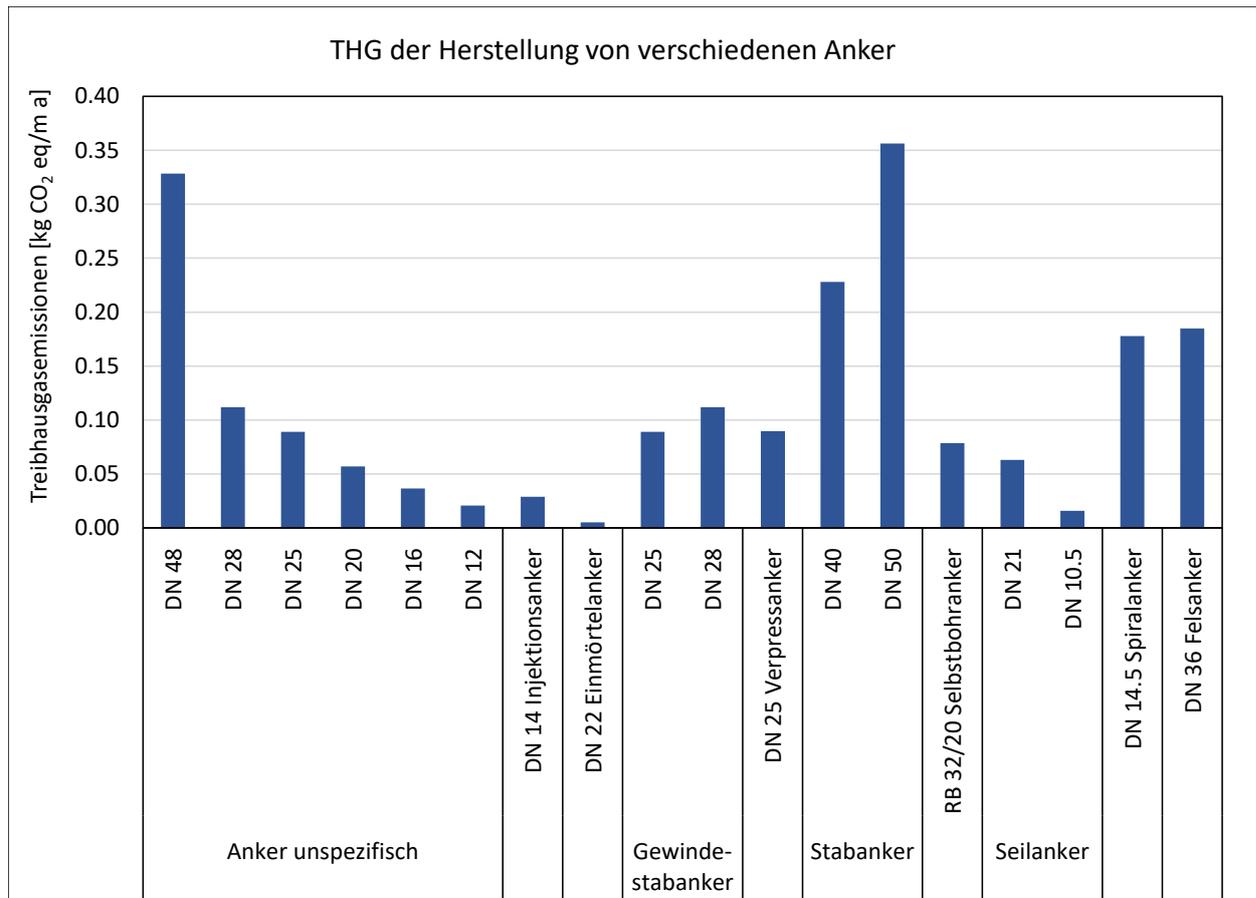
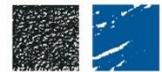


Abb. 3-14: Treibhausgasemissionen der Herstellung von verschiedenen Ankertypen mit unterschiedlichen Durchmessern (DN [mm]).

3.6.4 Stützmauern

Die Treibhausgasemissionen zweier Stützmauerarten (Winkelstützmauer und Schwergewichtsmauer) wurde pro Quadratmeter Sichtfläche und Jahr ausgewertet (siehe Abb. 3-15). Mit Sichtfläche ist die Länge der Mauern mal die gesamte Höhe inkl. Fuss gemeint. Die Stützmauern wurden in aufsteigender Höhe dargestellt. Ausgewertet wurden jeweils die Treibhausgasemissionen der Herstellung und Entsorgung der Materialien, die Transporte und die Baumaschinenstunden für die Errichtung der Stützmauer (Details siehe Anhang B6.4). Der Mittelwert der Winkelstützmauern liegt bei ca. 3.3 kg CO₂ eq/m² Sichtfläche und Jahr und die Standardabweichung bei 1.2 kg CO₂ eq/m² Sichtfläche und Jahr. Der Mittelwert der Schwergewichtsmauern liegt bei ca. 4.5 kg CO₂ eq/m² Sichtfläche und Jahr und die Standardabweichung bei 1.8 kg CO₂ eq/m² Sichtfläche und Jahr. Die Herstellung der Materialien ist bei allen Stützmauern der Haupttreiber für hohe Treibhausgasemissionen. Anhand der Resultate klassiert nach der Höhe ist ersichtlich, dass in diesen Beispielprojekten nicht primär die Dimensionierung massgebend ist, sondern auch andere Faktoren eine Rolle spielen, wie die verwendeten Materialien, die Berechnungsart und ob die Stützmauer zum Beispiel bergseitig (Projekte 16 und 17) oder talseitig (Projekte 18 und 19) gebaut wird.

Die Auswertungen mittels UBP und KEA zeigen ebenfalls bei den Winkelstützmauern den tieferen Mittelwert als die Schwergewichtsmauern (siehe Abb. 0-30 und Abb. 0-31 im Anhang C5). Die Aussage, dass Winkelstützmauern pauschal ökologischer sind, kann jedoch nicht gemacht werden, da sich vereinzelte Schwergewichtsmauern unterhalb des Mittelwertes der Winkelstützmauern befinden. Die Wahl der Stützmauerart ist zudem grösstenteils durch die geologischen Verhältnisse vorgegeben.

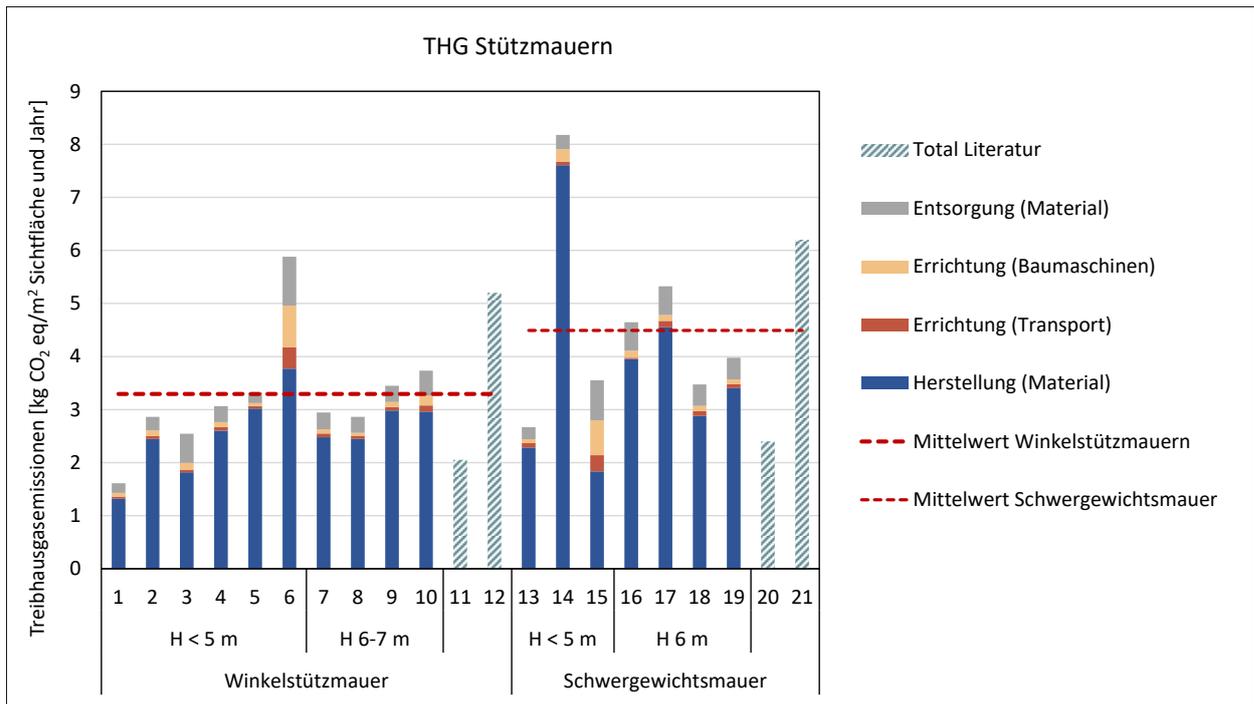


Abb. 3-15: Treibhausgasemissionen verschiedener Winkelstützmauern und Schwerkichtsmauern pro Quadratmeter Sichtfläche (Länge mal totale Höhe) und Jahr. Lebensdauer aller Projekte: 100 Jahre.

3.6.5 Freileitungen

In Abb. 3-16 sind die Treibhausgasemissionen verschiedener Freileitungssysteme zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) aufgeführt. Details zu den verschiedenen Freileitungen sind im Anhang B6.5 aufgeführt. Der Mittelwert liegt bei 8.7 kg CO₂ eq/m a. Die Standardabweichung beträgt 0.8 kg CO₂ eq/m a. Die Herstellung der Materialien verursacht die höchsten Treibhausgasemissionen. Die Auswertungen mittels UBP und KEA weisen ähnliche Resultate auf (siehe Abb. 0-32 und Abb. 0-33 im Anhang C5).

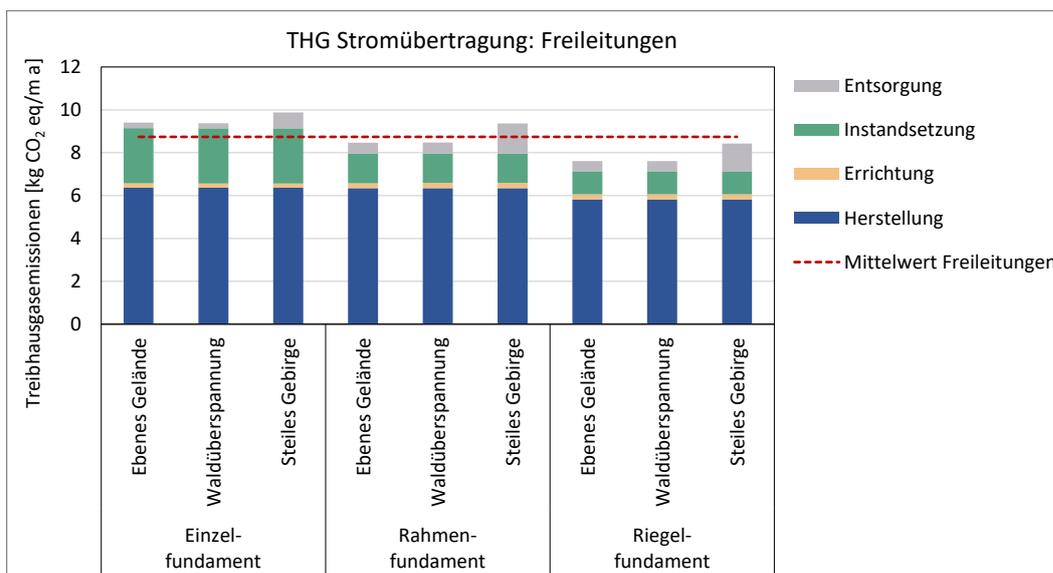
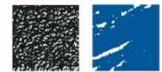


Abb. 3-16: Treibhausgasemissionen verschiedener Freileitungssysteme zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind die Phasen der Herstellung, Errichtung, Instandsetzung und Entsorgung.



3.6.6 Flugpiste

Die Treibhausgasemissionen der Instandsetzung einer Flugpiste sind in Abb. 3-17 ersichtlich. Aufgrund mangelnder Daten konnte kein Neubau bilanziert werden, jedoch waren Daten einer Instandsetzung vorhanden (Details siehe Anhang B6.6). Die Lebensdauer wurde auf 40 Jahre gesetzt. Die höchsten Treibhausgasemissionen verursachen die Materialien. Insgesamt weist die Instandsetzung der Flugpiste 1.84 kg CO₂ eq/m² a auf. Aufgrund der Berechnungsart sind in dieser Abbildung die direkten EntsorgungstHG der eingesetzten Materialien im Balken «Instandsetzung (Material)» inkludiert und die «Entsorgung (Instandsetzung)» bezieht sich in diesem Falle auf zusätzliche Entsorgungsleistungen wie zum Beispiel Aushub. Die Auswertungen mittels UBP und KEA sind in Abb. 0-34 und Abb. 0-35 im Anhang C5 ersichtlich.

Flugpisten sind oft individuell in ihrem Aufbau und bezüglich der Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Beanspruchung. Die Lebensdauer ist ebenfalls unterschiedlich je Fahrbahnbereich eines Flughafens.

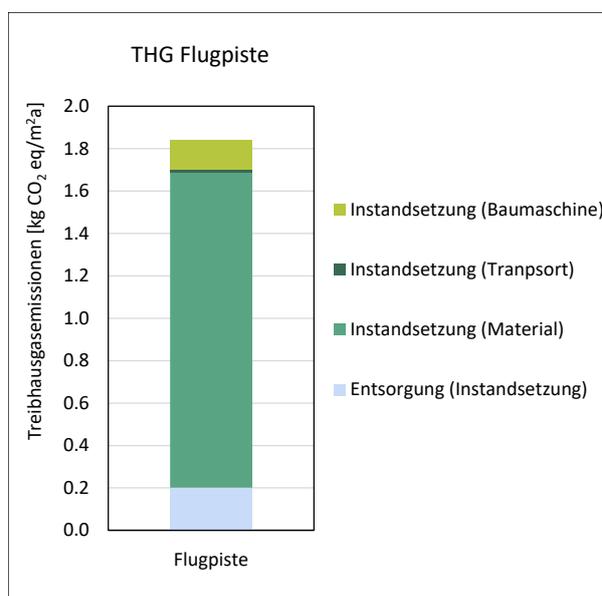


Abb. 3-17: Treibhausgasemissionen einer Instandsetzung einer Flugpiste. Lebensdauer: 40 Jahre.

3.7 Entwässerung und Kanalisation

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen der Materialherstellung der Abwasserleitungen in verschiedenen Materialien und Durchmessern sowie die Treibhausgasemissionen der gesamten Leitungsgräben, in welchen sich die Abwasserleitungen befinden, separat voneinander betrachtet.

3.7.1 Abwasserleitungen

In Abb. 3-18 sind die Treibhausgasemissionen der Herstellung des Materials, welches für einen Laufmeter der jeweiligen Rohre in drei verschiedenen Durchmessern benötigt wird, abgebildet. Als Lebensdauer wurden 80 Jahre angenommen (weitere Informationen befinden sich im Anhang B7.1). Die Treibhausgasemissionen unterscheiden sich je nach Rohrmaterial und Durchmesser. Da die Treibhausgasemissionen pro Rohrmeter berechnet wurden, ist es naheliegend, dass grössere Rohrdurchmesser aufgrund des erhöhten Materialbedarfs höhere Treibhausgasemissionen aufzeigen, jedoch ist die Zunahme nicht linear und unterscheidet sich ebenfalls je nach Rohrmaterial. Am besten schneidet das Geopolymerbeton-Rohr ab. Bei der Auswertung mittels UBP und KEA wird Letzteres durch das Betonrohr abgelöst (siehe Abb. 0-36 und Abb. 0-37 im Anhang C6). Die Kunststoffrohre weisen aufgrund des stofflich genutzten Energiegehalts von Erdöl gemäss KEA erhöhte Energieaufwände auf.

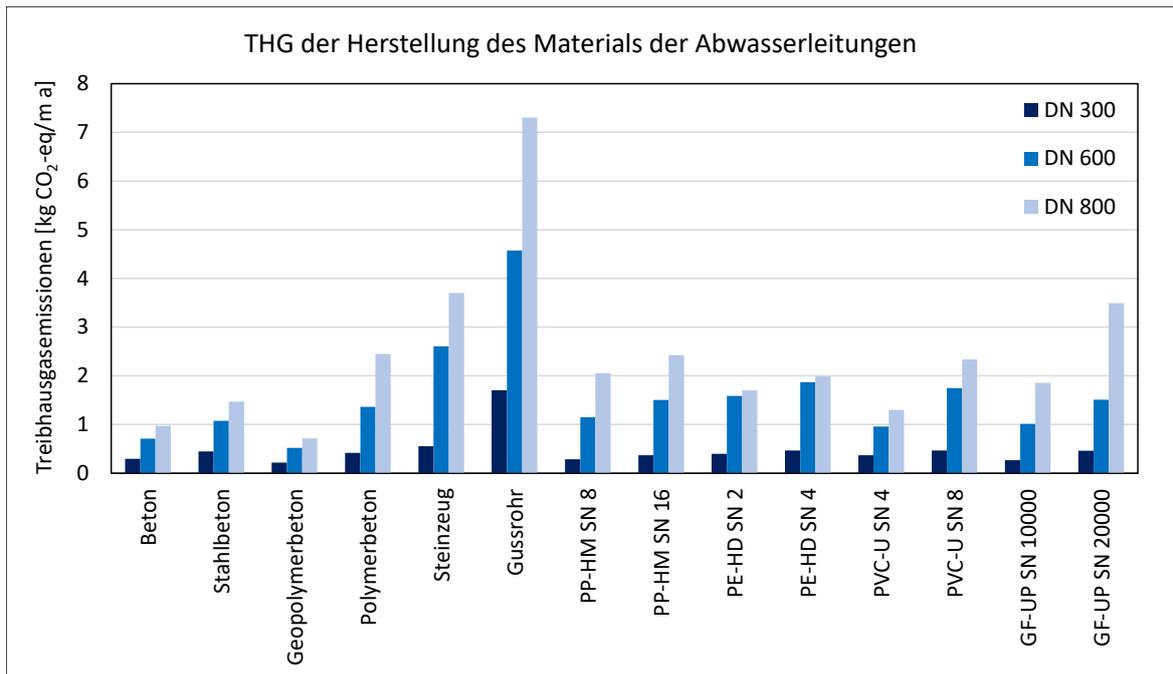
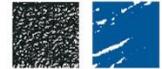


Abb. 3-18: Treibhausgasemissionen der Herstellung des Materials pro Laufmeter und Jahr der jeweiligen Rohre für die drei betrachteten Durchmesser 300 mm, 600 mm und 800 mm.

3.7.2 Leitungsgräben

Die Abwasserleitungen in den Leitungsgräben können mit verschiedenen Materialien umhüllt werden. Für die zwei Umhüllungen Kiessand und Beton wurden die Treibhausgasemissionen ausgewertet (Details siehe Anhang B7.2). Gerechnet wurde mit einer Lebensdauer von 80 Jahren. In den Abbildungen Abb. 3-19 und Abb. 3-20 sind die Treibhausgasemissionen von Abwasserleitungen mit verschiedenen Materialien und Durchmessern einmal mit der Kiessandumhüllung und einmal mit der Betonumhüllung ersichtlich. Für einen besseren Vergleich ist jeweils das Total der anderen Umhüllungsart als Punkt dargestellt. Die Treibhausgasemissionen der Betonumhüllung sind zwischen 11% und 41% höher als jene der Kiessandumhüllung bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen. Die Auswertung mittels UBP und KEA ergeben ähnliche Resultate, wobei die Umweltwirkung der Betonumhüllung 2% bis 20% höher ist (siehe Abb. 0-38 bis Abb. 0-41 im Anhang C6).

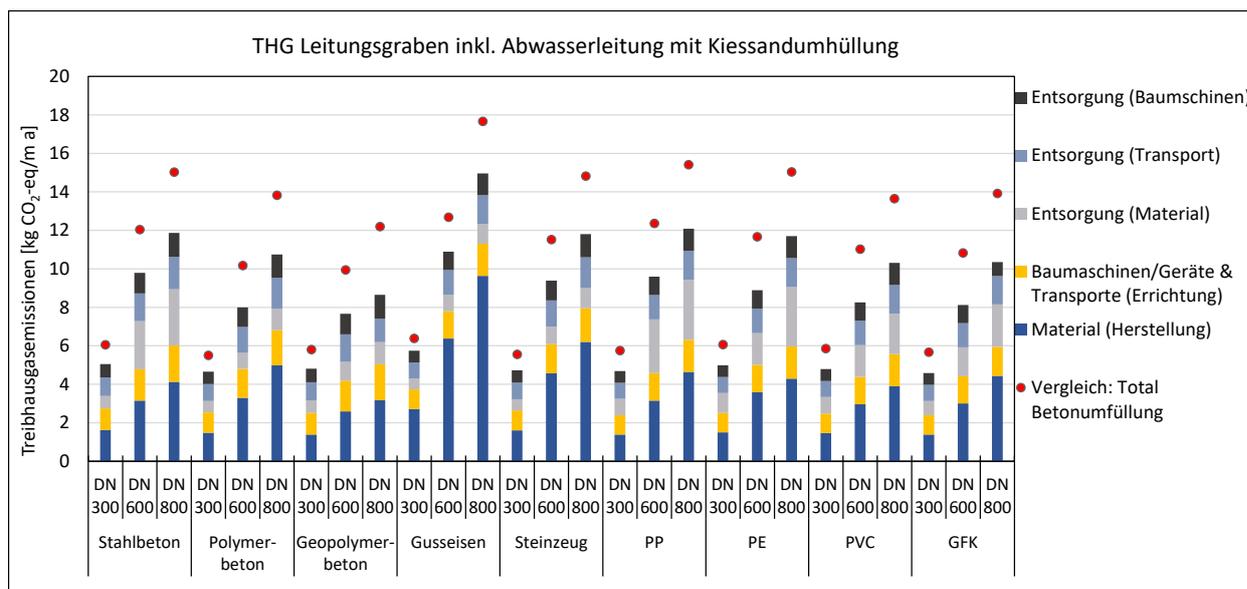


Abb. 3-19: Treibhausgasemissionen von Leitungsgräben mit einer Kiessandumhüllung (inkl. Vergleich zur Betonumfüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.

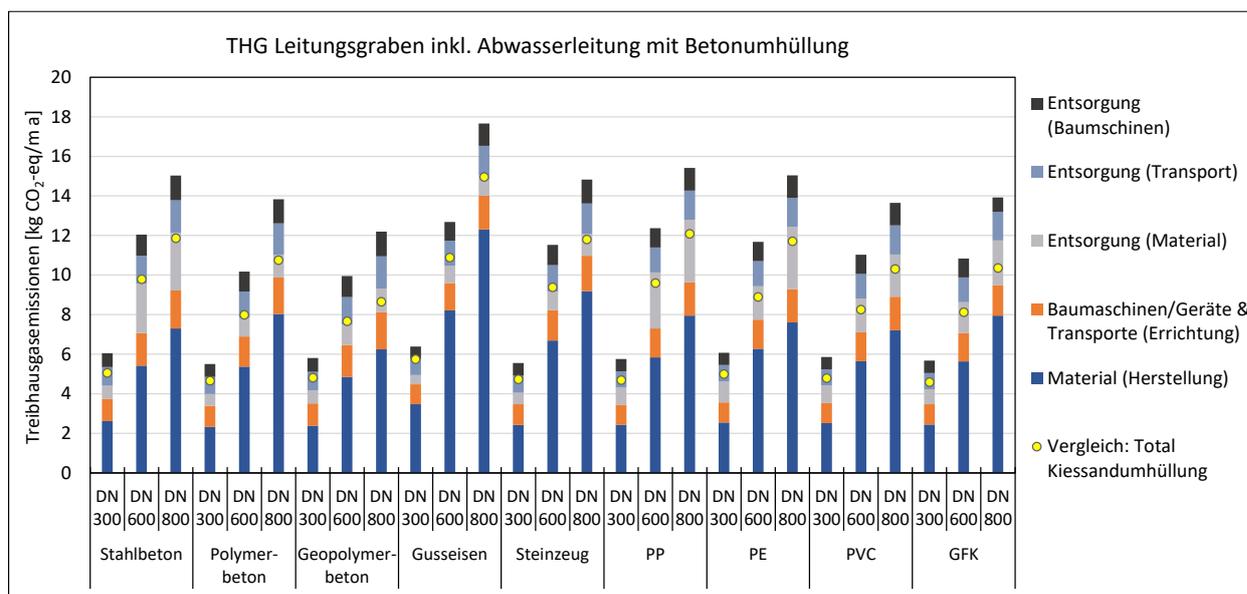
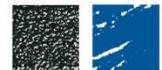


Abb. 3-20: Treibhausgasemissionen von Leitungsgräben mit einer Betonumhüllung (inkl. Vergleich zur Kiessandumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.

3.7.3 Pumpstationen

In Abb. 3-21 sind die Treibhausgasemissionen der Herstellung verschiedener Pumpen ersichtlich. Die Umweltwirkung wurde pro Kilowatt und Jahr ausgewertet. Als Lebensdauer wurden 15 Jahre angenommen. Die Daten stammen aus Ökobilanzprojekten für die Abwasserbehandlung. Pumpen sind wichtige Komponenten der Entwässerung der Infrastruktur und wurden deshalb in der vorliegenden Studie der Vollständigkeit halber ebenfalls aufgenommen. Die abgebildeten Treibhausgasemissionen stellen die Herstellung



der Pumpen dar (Details siehe Anhang B7.3). Der Einbau, der Betrieb, die Wartung und auch die Entsorgung sind nicht enthalten, da hierfür keine Daten vorlagen. Die Auswertung mittels UBP ergibt ähnliche Resultate (siehe Abb. 0-42 im Anhang C6).

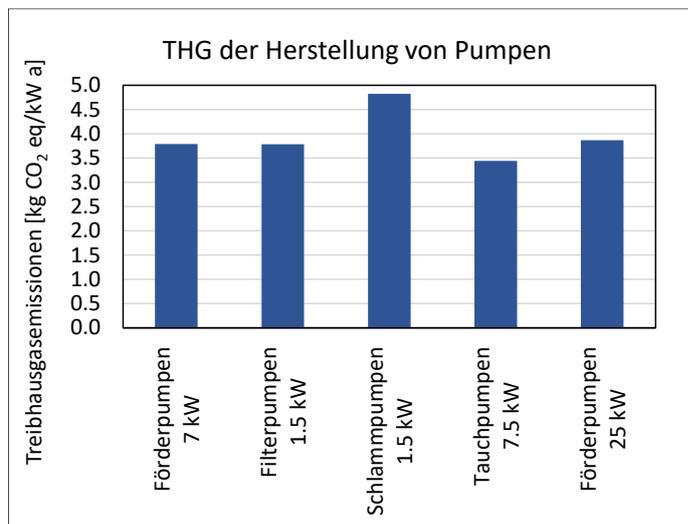


Abb. 3-21: Treibhausgasemissionen der Herstellung verschiedener Pumpen mit unterschiedlicher Leistung pro Kilowatt und Jahr.

3.7.4 Schacht und Ablauf

In Abb. 3-22 sind die Treibhausgasemissionen für die Herstellung von verschiedenen Schachttypen aus Beton ersichtlich. Die Schächte weisen unterschiedliche Grössen auf, wodurch sie nicht die gleiche funktionale Äquivalenz (unterschiedliche hydraulische Kapazitäten) aufweisen und damit schlecht miteinander vergleichbar sind (Details siehe Anhang B7.4). Bei den Strassenabläufen gibt es sieben verschiedene Typen, welche jeweils zwei verschiedene Höhen und den gleichen Durchmesser (DN 700) aufweisen. Der Mittelwert der Schächte der Höhe von 1.5 m liegt bei 1.1 kg CO₂/St a und jener mit einer Höhe von 2 m bei 1.4 kg CO₂/St a. Der Kontrollschacht mit einer vergleichbaren Höhe weist trotz kleinerem Durchmesser (DN 600) eine fast vierfach höhere Umweltbelastung von 4.1 kg CO₂/m a auf. Die Auswertung mittels UBP weist ähnliche Resultate auf (siehe Abb. 0-43 im Anhang C6).

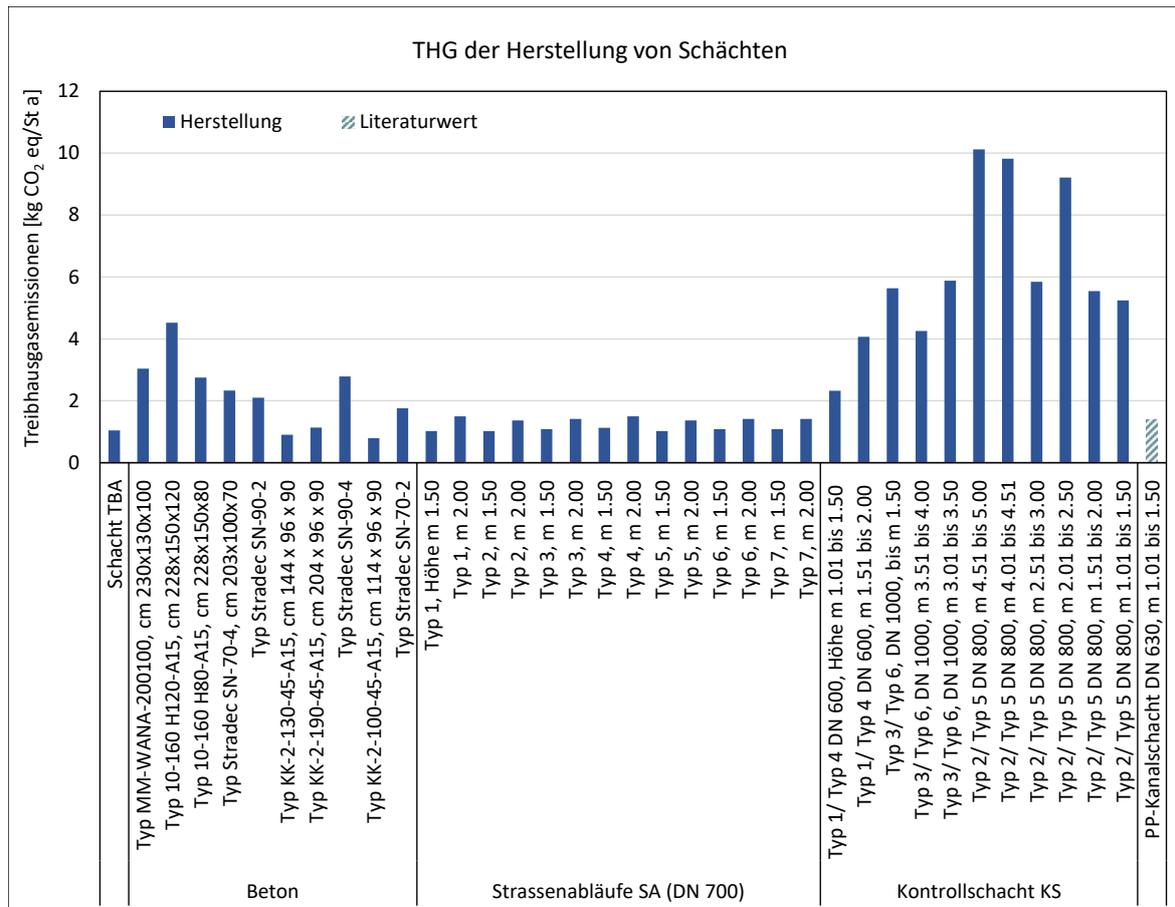
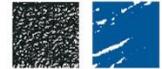


Abb. 3-22: Treibhausgasemissionen der Herstellung von verschiedenen Schachttypen aus Beton pro Stück und Jahr.

3.7.5 Strassenabwasserbehandlungsanlagen

Strassenabwasserbehandlungsanlagen (SABA) bestehen aus verschiedenen Elementen. Dazu gehören zum Beispiel der Einlaufschacht, ein Grobabscheider, ein Absetzbecken, allenfalls Stapelkanäle und (Öl-) Rückhaltebecken und Sand- und Raumfilter (Details siehe Anhang B7.5). In Abb. 3-23 sind die Treibhausgasemissionen einer Strassenabwasserbehandlungsanlage und von verschiedenen Einzelkomponenten ersichtlich. Die Auswertung mittels UBP und KEA ist in Abb. 0-44 und Abb. 0-45 im Anhang C6 ersichtlich. Die Umweltbelastung für die Deponierung des Aushubs ist mittels UBP sehr hoch.

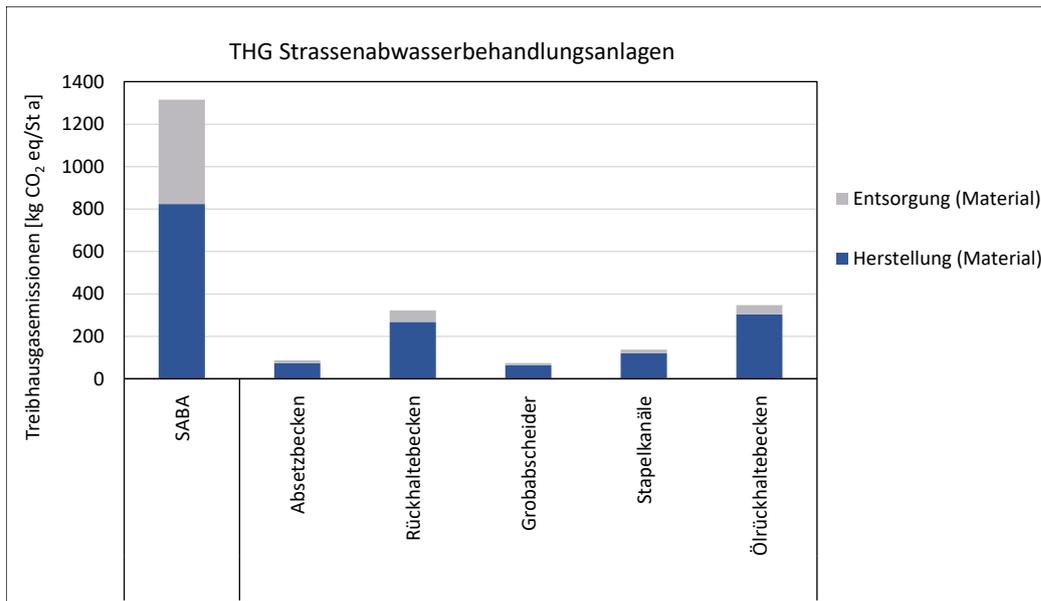
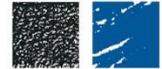


Abb. 3-23: Treibhausgasemissionen einer Strassenabwasserbehandlungsanlage (SABA) und verschiedener Teilelemente davon, wie beispielsweise ein Absetzbecken. Berücksichtigt wurden die Herstellung des Materials und dessen Entsorgung, jedoch kein Einbau und keine Instandsetzungen.

3.8 Werkleitungen

3.8.1 Stromübertragung

In der Abb. 3-24 sind die Treibhausgasemissionen verschiedener Stromübertragungen auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) mittels Erdverkabelung abgebildet. Der Mittelwert liegt bei 38 kg CO₂ eq/m a und die Standardabweichung der totalen Treibhausgasemissionen beträgt 21 kg CO₂ eq/m a. Die Werte stammen alle aus demselben Projekt (Details siehe Anhang B8). Aufgrund fehlender Daten ist kein Vergleich zu anderen Studien möglich.

Die Auswertung mittels UBP und KEA weist ähnliche Resultate auf, wobei die Errichtung im Untertagbau mittels UBP einen noch höheren Anteil an der Gesamtumweltwirkung ausmacht (siehe Abb. 0-46 und Abb. 0-47 im Anhang C7).

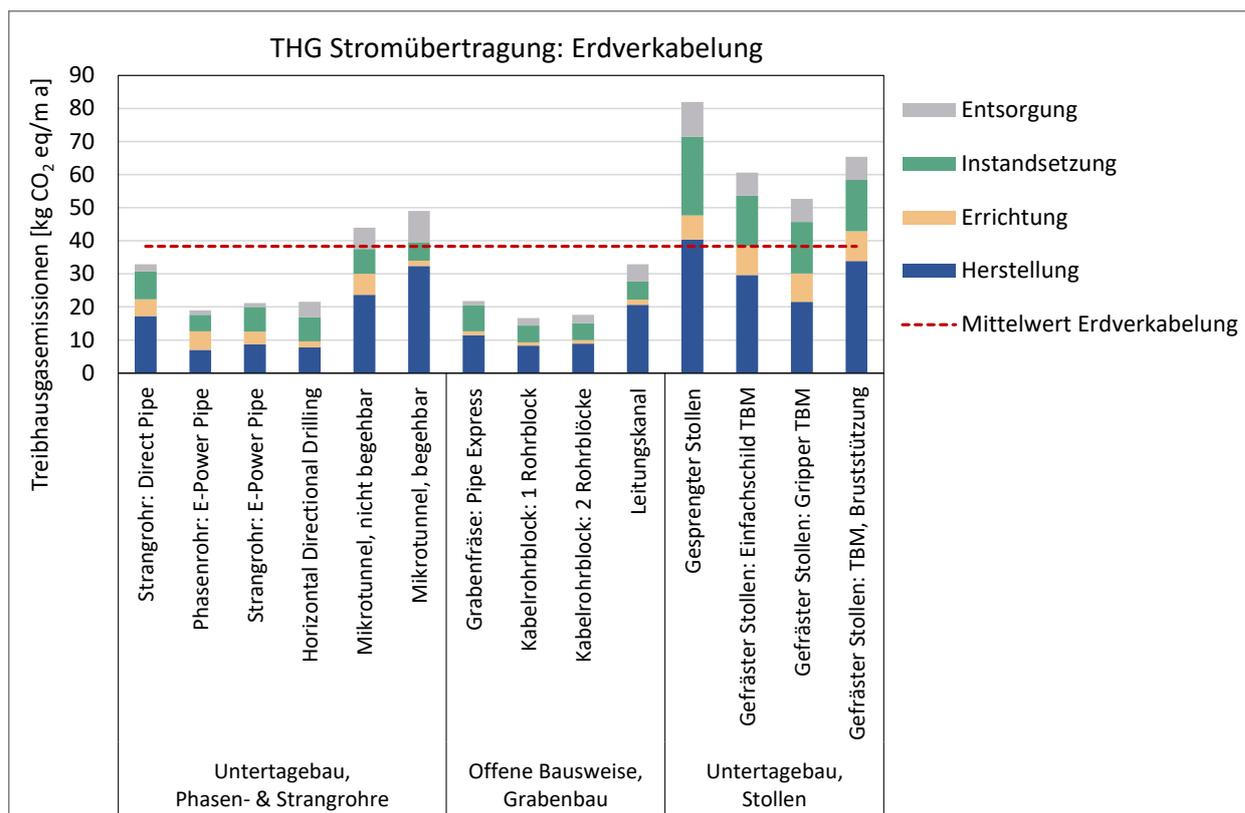
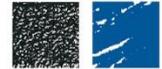


Abb. 3-24: Treibhausgasemissionen verschiedener Erdverkabelungsvarianten zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind alle Phasen des Lebenszyklus.

3.9 Einheitlicher Rahmen für die Messung und Weiterentwicklung

Die Voraussetzungen für die Herleitung von Referenz- und Zielwerten für Infrastrukturbauten sind Messbarkeit, Nachvollziehbarkeit, Vergleichbarkeit und die Möglichkeit, diese basierend auf zukünftigen Erfahrungen und Daten weiterzuentwickeln. Auf Grund der aktuellen Datenlage schlagen wir folgende Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Umsetzung vor:

- Verwendung der Charakterisierungsfaktoren der Treibhausgase gemäss IPCC 2021, 100a [16]. Hier sollte der Fokus für die Weiterentwicklung der Referenz- und Zielwerte gelegt werden.
- UBP stellen eine wichtige Kontrollgrösse dar, damit andere Umweltaspekte nicht verschlechtert werden. Bei den Umweltbelastungspunkten UBP stellen die periodischen Aktualisierungen der Methodik mit der Anpassung an die aktuellen Zielwerte der schweizerischen Umweltpolitik und an die aktuelle Emissionssituation eine Herausforderung dar.
- Anwendung der methodischen Setzungen und der Qualitätsrichtlinie der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022, ehemals UVEK-Datenbank) [17], sodass eine Vergleichbarkeit der Datengrundlage sichergestellt ist, dies gilt insbesondere für:
 - Verwendete Einheitsprozesse «Ökoinventare»
 - Qualitätsanforderungen (Angabe der Unsicherheit, externe Überprüfung)
 - Ökobilanzsystemmodell «Cut-off»
- Vorgabe von Bauwerkstypen resp. Bauwerkskomponenten oder Baumaterialien / Baumaschinen
- Vorgabe der funktionalen Einheit (analog zu Tabelle 1)



- Vorgabe der Systemgrenze gemäss DIN EN 15643: A1-A5, B1-B8 und C1-C4 [1]
- Keine Gutschriften / Belastungen ausserhalb der Systemgrenze aufgrund der Gefahr von Doppelzählungen und intransparenten Ökobilanzergebnissen
- Bei Mitbetrachtung der Nutzungsphase die technische Nutzungsdauer vorgeben, damit ein fairer Vergleich der Lebenszyklusanalyse anhand der Berechnung der Ökoannuität (Treibhausgasemissionen pro Jahr) für mehrere Varianten möglich ist
- Möglichst einfach und trotzdem vollständig: Die Planenden und Bauunternehmer nicht mit einer zu detaillierten Ökobilanz überfordern, sondern auf die relevanten Materialien, Baumaschinen und Transporte fokussieren
- Regelmässige Überprüfung der Referenz- und Zielwerte resp. deren Datengrundlage, insbesondere wenn eine Aktualisierung der Ökoinventardaten der Bundesverwaltung (BAFU:2022) erfolgt
- Planende miteinbeziehen, da der ökologische Hebel in der Planungsphase am grössten ist
- Bei Ausschreibungen den mitbietenden Bauunternehmen die gleiche Berechnungsgrundlage transparent zur Verfügung stellen, sodass alle die gleiche Ausgangslage haben und die Resultate vergleichbar sind (z.B. über eine Umweltbewertungsmatrix)

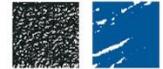
Weiter zu klären ist der Umgang mit den im Markt zunehmend aufkommenden Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declaration EPD¹). Die Idee hinter Umweltproduktdeklarationen (EPDs) stammt von der EU und soll einen länderübergreifenden Vergleich der Umweltwirkung ermöglichen. Bisher wurden in den EU-Ländern unterschiedliche Anforderungen an EPDs gestellt. Deswegen ist Stand heute die Vergleichbarkeit nur bedingt gegeben. Die EU arbeitet in den nächsten Jahren mit der Umsetzung der revidierten Bauprodukteverordnung auf eine Vereinheitlichung hin.

Die Daten der EPD sind bisher auch nicht kompatibel mit den «KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich» und auch nicht mit der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung [17]. Die Unterschiede sind in konkreten Anwendungen nur in wenigen Punkten relevant, wie eine Studie zeigt [18]. Bei einzelnen Baumaterialien wie Beton (Allokationsregeln beim Zement) und Asphalt (Allokationsregeln beim Bitumen in der Erdölraffinerie) können diese jedoch substantiell sein. Die Schweiz wird die revidierte EU-Bauprodukteverordnung übernehmen. Dabei gilt es auch die Kompatibilität der Ansätze sicher zu stellen. Das Hauptziel muss hierbei sein, dass die Vergleichbarkeit zwischen Ökobilanzen von Produkten gewährleistet ist. Hierfür braucht es einheitliche Hintergrunddaten, die Betrachtung des ganzen Lebenszyklus sowie die Berechnung der relevanten Umweltindikatoren.

Falls EPDs zur Anwendung kommen, sind folgende Aspekte zu beachten:

- Es sollten nur drittverifizierte EPDs verwendet werden
- Nur aktuelle EPDs verwenden (die nicht älter als 5 Jahre sind)
- Einen Programmbetreiber verwenden, welcher sich durch folgende Aspekte auszeichnet:
 - Transparenz: Offene Kommunikation und Informationen zu den verwendeten Daten und Prozessen
 - Akkreditierung: Anerkannte Zertifizierung und Akkreditierung durch zuständige Behörden oder Organisationen
 - Einhaltung von Standards: SN EN 15804 und ISO 14025

¹ Die ISO 14025 gibt den allgemeinen Rahmen von Umweltproduktdeklarationen vor. Die SN EN 15804 ist die Norm, die sich spezifisch mit Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte und Bauwerke befasst. Sie legt die Regeln fest, nach denen Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte zu erstellen sind, um Informationen über die Umweltwirkung dieser Produkte bereitzustellen. Die Norm definiert unter anderem die Art und Weise, wie Lebenszyklusdaten erhoben, analysiert und kommuniziert werden sollen, um Transparenz und Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Bauprodukten zu gewährleisten



- Datenqualität: Sicherstellung der Genauigkeit, Relevanz und Aktualität der Daten
- Unabhängigkeit: Keine Zielkonflikte und Durchführung einer Drittverifikation
- Länderspezifische Rahmenbedingungen (z.B. Strommix, Transportdistanzen passend für das vorliegende Bauprojekt) sind gemäss Quelle [17] miteinzubeziehen
- Darauf achten, dass die Datenquelle der technischen Vordergrunddaten vorhanden ist und verlässliche Hintergrunddaten verwendet werden [17]

Das Klima- und Innovationsgesetz (KIG) der Schweiz setzt ambitionierte Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und zur Förderung von Innovationen im Bereich der Klimaneutralität. Ein zentraler Bestandteil dieses Gesetzes ist das Ziel, dass Bundesbetriebe bis 2040 Netto-Null-Emissionen erreichen sollen, inklusive vor- und nachgelagerten Emissionen. Dieses Ziel stellt insbesondere für den Tiefbau eine grosse Herausforderung dar, da dieser Sektor für einen erheblichen Anteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist.

Das Netto-Null-Ziel bis 2040 ist ambitioniert. Es erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Bund, Forschungseinrichtungen und der Bauindustrie. Die grössten Herausforderungen liegen in der Umstellung auf emissionsarme bzw. emissionsreduzierte Materialien und Prozesse sowie in der notwendigen Innovationskraft der Branche. Der Tiefbau ist geprägt durch den intensiven Einsatz von Materialien wie Beton, Asphalt, Stahl und Natursteinen, die allesamt grosse ökologische Treiber sind. Die Herstellung und Verarbeitung dieser Materialien sind energieintensiv und verursachen hohe Treibhausgasemissionen. Gemäss den Roadmaps übergeordneter Verbände hin zu Netto-Null wird insbesondere für die Materialien Beton und Asphalt das Ziel Netto-Null angestrebt, siehe hierfür auch Kap. 4.1 und 4.3.

Mit gezielten Massnahmen und politischer Unterstützung kann der Tiefbau signifikant zur Erreichung der Klimaziele beitragen und Vorreiter für nachhaltige Baupraktiken werden. Die Transformation des Sektors wird nicht nur ökologische Vorteile bringen, sondern auch wirtschaftliche Chancen durch neue Technologien und Materialien eröffnen.



4 Reduktionspotenziale – Modul 2

In Modul 2 liegt das Hauptaugenmerk auf der Identifikation und Quantifikation von Reduktionspotenzialen basierend auf der in Modul 1 ermittelten Datenbasis. Auf Basis der langjährigen Projektstätigkeit mit Schwerpunkt Ökobilanzen für den Infrastrukturbau kann als Faustregel folgendes Splitting des relativen Beitrags der Treibhausgasemissionen in einem Infrastrukturbauprojekt angegeben werden:

- **80% Material und Abfälle**
- **10% Transporte**
- **10% Baumaschinen**

Tabelle 2: Anteil der Treibhausgasemissionen verschiedener Bauwerkstypen im Infrastrukturbau.

Anteil der Treibhausgasemissionen	Bauwerkstypen				im Mittel:
	Fahrbahnen	Tunnel	Brücken	Werkleitungen	
Material & Abfälle	85%	80%	85%	55%	80%
Transporte	7%	8%	10%	15%	10%
Baumaschinen	8%	12%	5%	30%	10%

Deswegen wird in Modul 2 der Fokus zur Ermittlung von Reduktionspotenzialen bei den Treibhausgasemissionen des Infrastrukturbaus auf die Materialien gelegt. Die Reduktionspotenziale bei den Baumaschinen und Transporten werden ebenfalls kurz beleuchtet.

Seit 2019 ist UTech für diverse kantonale Tiefbauämter (ZH, GR, BS und SG) sowie weitere städtische Tiefbauämter (BS, Winterthur) für die Ermittlung der Daten und deren Auswertung hinsichtlich der Treibhausgasemissionen zuständig. Die Auswertungen haben ergeben, dass Asphalt, Beton, Stahl und Natursteine die Hauptursache für Treibhausgasemissionen im Bau und Betrieb (Instandhaltung und Instandsetzung) der Infrastruktur darstellen. Insbesondere der Ausbauasphalt, der Betonabbruch sowie Grüngut (vom Grünflächen-Unterhalt) und Kunststoffe sind die massgeblichen Treiber hinsichtlich der Treibhausgasemissionen. Diese Aussagen bleiben auch bei der Anwendung der Umweltbelastungspunkte (UBP) und bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) identisch.

Die Abb. 4-1 zeigt den Beitrag der Treibhausgasemissionen der Materialien, welche für den Bau und Betrieb inkl. Unterhalt für kantonale und städtische Infrastruktur eingesetzt werden. In Abb. F-1 im Anhang wird der kumulative Beitrag der Entsorgung/Verwertung der Abfälle dargestellt, die beim Bau, Betrieb und Unterhalt der kantonalen und städtischen Infrastruktur anfallen. Die Daten basieren auf Mittelwerten mehrerer Tiefbauämter. Daten des ASTRA und der SBB sind nicht enthalten.

Zusammenfassend kann basierend auf dieser umfassenden Datengrundlage gesagt werden, dass der Fokus der Reduktionspotenziale auf den vier relevantesten Materialien: Asphalt, Beton, Metalle und Natursteine liegen sollte. Bei den Metallen sind es vor allem Stähle (Bewehrungsstähle, Vorspannstähle etc.) die den grossen Anteil an Treibhausgasemissionen ausmachen.

In den nachfolgenden Unterkapiteln zu Modul 2 werden die Reduktionspotenziale der Treibhausgasemissionen der Materialien einzeln betrachtet. Dabei wird das theoretische Potenzial erforscht. Die technische Machbarkeit in Bezug auf Sicherheitsanforderungen und allfällige Veränderungen der Materialeigenschaften müssten separat noch untersucht werden. Aufgrund der aktuellen Motion 21.3293, SR Jakob Stark wird zudem auf die Möglichkeiten der Dekarbonisierung durch den Einsatz von Holz eingegangen.

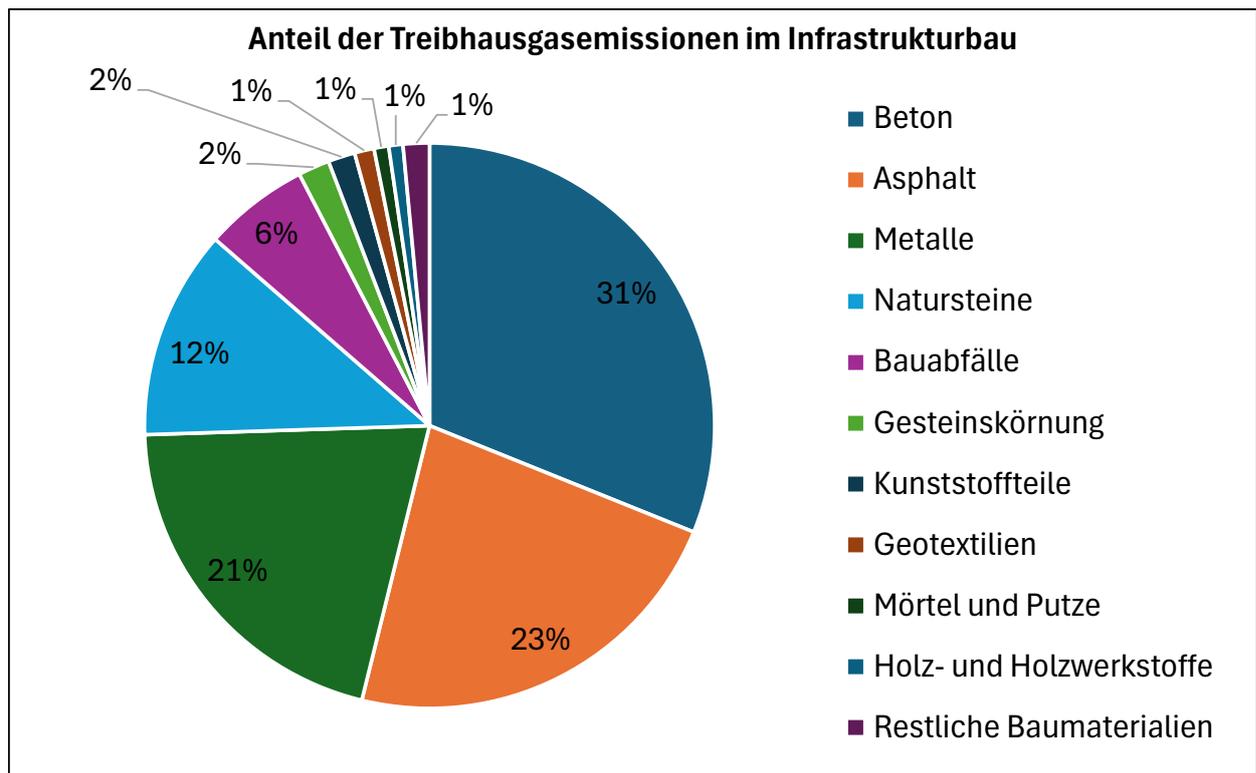
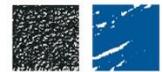


Abb. 4-1: Beitrag der Treibhausgasemissionen der Materialien, die für den Bau, Betrieb und Unterhalt kantonaler und städtischer Infrastruktur eingesetzt werden. 4 Materialien ergeben zusammen fast 90% der Treibhausgasemissionen aller Materialien und Bauabfälle. Daten stammen von der UTech.

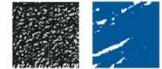
Nachfolgend werden in Unterkapiteln strukturiert folgende Reduktionspotenziale analysiert:

- Dekarbonisierung durch den Einsatz von Holz
- Asphalt (RC-Gehalt, Niedertemperaturasphalt, Fahrplan des Europäischen Asphaltverbandes hin zu Netto-Null bis 2050)
- Beton (CO₂-optimierte Zementsorten, RC-Beton mit CO₂-Speicherung, Alternative Hüll- und Auffüllmaterialien «Flüssigboden», Fahrplan des globalen Zement- und Betonverbandes hin zu Netto-Null bis 2050)
- Stahl (Herkunft des Stahls (Strommix), Bestrebungen der Industrie hin zu Netto-Null bis 2050)
- Natursteine
- Elektrifizierung der Baumaschinen und Transporte

Es besteht nicht der Anspruch auf Vollständigkeit. Potenziell bestehen weitere wirkungsvolle Ansätze, die zu einer Reduktion oder Substitution umweltbelastender Materialien führen, wie z.B. die Wiederverwendung von Bauteilen oder die in Kapitel 3.6.3 erwähnten Zugkraftmessungen auf geotechnische Anker. Auch die Wahl der Bindemittel wie zum Beispiel polymermodifiziertes Bitumen (PmB) im Asphalt hat einen Einfluss auf die Ökobilanz. Wie gross die Auswirkungen auf die Ökobilanz sind, müsste in zukünftigen Arbeiten genauer analysiert werden.

4.1 Dekarbonisierung durch den Einsatz von Holz

Die von SR Jakob Stark im Jahr 2021 eingereichte Motion 21.3293 fordert eine Untersuchung zur Dekarbonisierung des Infrastrukturbaus, einschliesslich der Ersetzung von Stahlbeton durch CO₂-speichernde



Materialien. Hierbei steht Holz als Werkstoff im Fokus. Als Reaktion darauf wurde die Berner Fachhochschule (BFH) vom Bundesamt für Umwelt mit der Erstellung dreier technischer Berichte beauftragt. Der finale Bericht analysiert die Dekarbonisierungspotenziale ausgewählter Infrastrukturbauten und zeigt auf, wie die stoffliche Wiederverwendung am Ende des Lebenszyklus umgesetzt werden kann. Im Rahmen der Studie wurden Ökobilanzen erstellt, um die Treibhausgasemissionen und den Primärenergieverbrauch verschiedener Bauweisen zu vergleichen. Dabei wurden repräsentative Infrastrukturbauten in Holz- und Betonausführung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von Holz eine Senkung der Treibhausgasemissionen zwischen 2% und 70 % erreicht werden kann. Die Höhe der Einsparpotenziale ist abhängig vom jeweiligen Bauobjekt. Zudem sind die Potenziale je nach Anwendung unterschiedlich und mit Einschränkungen verbunden. Eine detaillierte Erörterung der Ergebnisse der genannten Studien ist dem Anhang E zu entnehmen. Die stoffliche Nutzung von Holz hat zwei Effekte, welche eine Klimaleistung erbringen.

Zum einen besteht Holz zu rund der Hälfte seiner Masse aus Kohlenstoff, ein Kubikmeter Holz speichert so ungefähr die Menge einer Tonne CO₂. Wird Holz als Baustoff oder als anderes Holzprodukt eingesetzt, bleibt der Kohlenstoff während der Lebensdauer gebunden (Speicherung).

Zum andern wird bei der Herstellung von Holzprodukten weniger CO₂ freigesetzt als bei der Herstellung der meisten anderen Materialien. Bei der Substitution, also der Verwendung von Holz anstelle eines anderen Materials, werden deshalb weniger Treibhausgasemissionen verursacht. [19]

4.2 Asphalt

4.2.1 RC-Gehalt

Im Vergleich zu vielen anderen Materialien im Infrastrukturbau hat die Praxis gezeigt, dass sich Asphalt gut recyklieren und wiederverwenden lässt. Einige kantonale Tiefbauämter haben deshalb bereits Mindestanteile an Recyclingasphalt in neuen Belägen formuliert und fordern diese bei zukünftigen Projekten ein. Die VSS Norm VSS 640 430 gibt für Deckschichten einen maximalen Anteil an 50% RC-Asphalt und für Binder- und Tragschichten 70% RC-Gehalt vor. Ein Recyclinganteil von bis zu 50% in der Deckschicht müsste jedoch aufgrund der Sicherheitsanforderungen im Einzelfall diskutiert werden. Angelehnt an die Zugaberraten von Recyclingasphalt an die genannte VSS-Norm wurden verschiedene Szenarien erstellt und auf ihre Ökobilanz ausgewertet:

- Basisszenario: Kein Recyclingasphalt
- Szenario 1: Moderater Anteil an Recyclingasphalt von 30% (in allen Schichten)
- Szenario 2: Hoher Anteil an Recyclingasphalt von 50% in Deck-, 60% in Binder- und 80% in Trag- und Foundationsschichten

Abb. 4-2 zeigt die Reduktionspotenziale in Bezug auf die Treibhausgase der genannten Szenarien für den Bauwerkstyp «Fahrbahn». Dabei wird ersichtlich, dass zwischen 20% und 60% Reduktion der Treibhausgasemissionen möglich sind. Es sei darauf hingewiesen, dass die Herstellung, Errichtung und Entsorgung in der Berechnung mitbetrachtet wurden. Die Nutzungsphase mit Instandsetzungen wurde nicht berücksichtigt, um das Ökobilanzmodell nicht zu komplex zu gestalten und die Auswertung übersichtlich zu halten. Gemäss Experteneinschätzung mehrerer renommierter Asphaltprüfinstitute wie VIATEC und ISBS TU Braunschweig sind technische Parameter erster Pilotteststrecken vergleichbar mit Primärasphalt. Es ist davon auszugehen, dass auch die Instandsetzungszyklen gleichbleiben.

Aus Platzgründen werden die Auswertungen mittels der UBP- und KEA-Methode nicht separat gezeigt. Die Auswertungen mit den weiteren Wirkungsmodellen hat gezeigt, dass die Reduktionspotenziale vergleichbar bis sogar leicht höher sind als bei den Treibhausgasemissionen. Dies trifft insbesondere auf die Verwendung von RC-Asphalt zu.

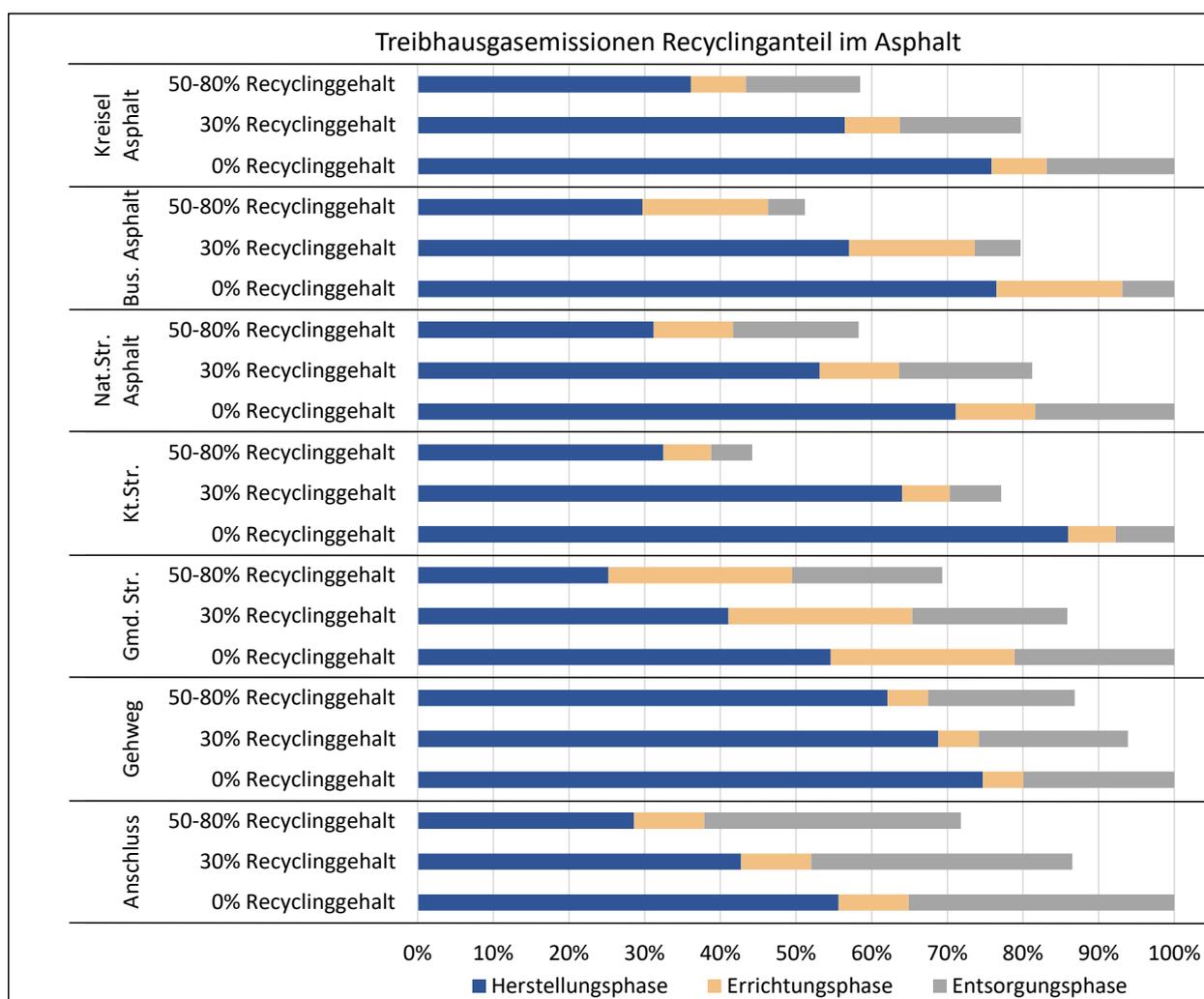


Abb. 4-2: Reduktionspotenzial durch den Einsatz von Recyclingasphalt in neuen Belägen im Vergleich zur Verwendung von Belägen ohne Recycling. 50% RC-Gehalt bezieht sich auf die Deck- und 60% RC-Gehalt auf die Binder-, Trag- und Fundationsschicht.

4.2.2 Niedertemperaturasphalt

Während Heissasphalt typischerweise bei Temperaturen zwischen 150 und 180 °C produziert wird, erfolgt die Produktion von Niedertemperaturasphalt bei Temperaturen von 100 bis 140 °C. Die Herstellung und Verarbeitung von Niedertemperaturasphalt bietet einen Vorteil in Bezug auf die Ökobilanz. Durch die niedrigeren Produktions- und Verarbeitungstemperaturen wird weniger Energie benötigt, was zu einer Reduktion des Treibhausgas-Ausstosses und anderer Schadstoffe führt. Durchschnittlich benötigt eine Tonne Heissasphalt knapp 70 kWh an thermischer Energie. Jüngst vergangene Projekte der UTech zeigen, dass der thermische Energiebedarf beim Mischgutwerk um bis zu 30% gesenkt werden könnte. Konkret kann der Energieverbrauch pro Tonne Asphalt um etwa 20 kWh reduziert werden, was zu einer signifikanten Verringerung des gesamten Energiebedarfs bei grossen Bauprojekten führt. Die Auswirkung auf die Ökobilanz sind in Abb. 4-3 anhand des Bauwerkstyps «Fahrbahn» aufgeführt. Die Auswertung zeigt, dass Treibhausgasemissionsreduktionen bis zu 12% möglich sind.

Kaltmischfundationen werden nicht betrachtet, da sie ökologisch gegenüber konventionellen Asphaltfundation- und Tragschichten nicht vorteilhaft sind. Schaumbitumen und hydraulische Bindemittel sind ökologisch nachteilig in Kaltmischfundationen und werden selten praktiziert in der Schweiz [20].

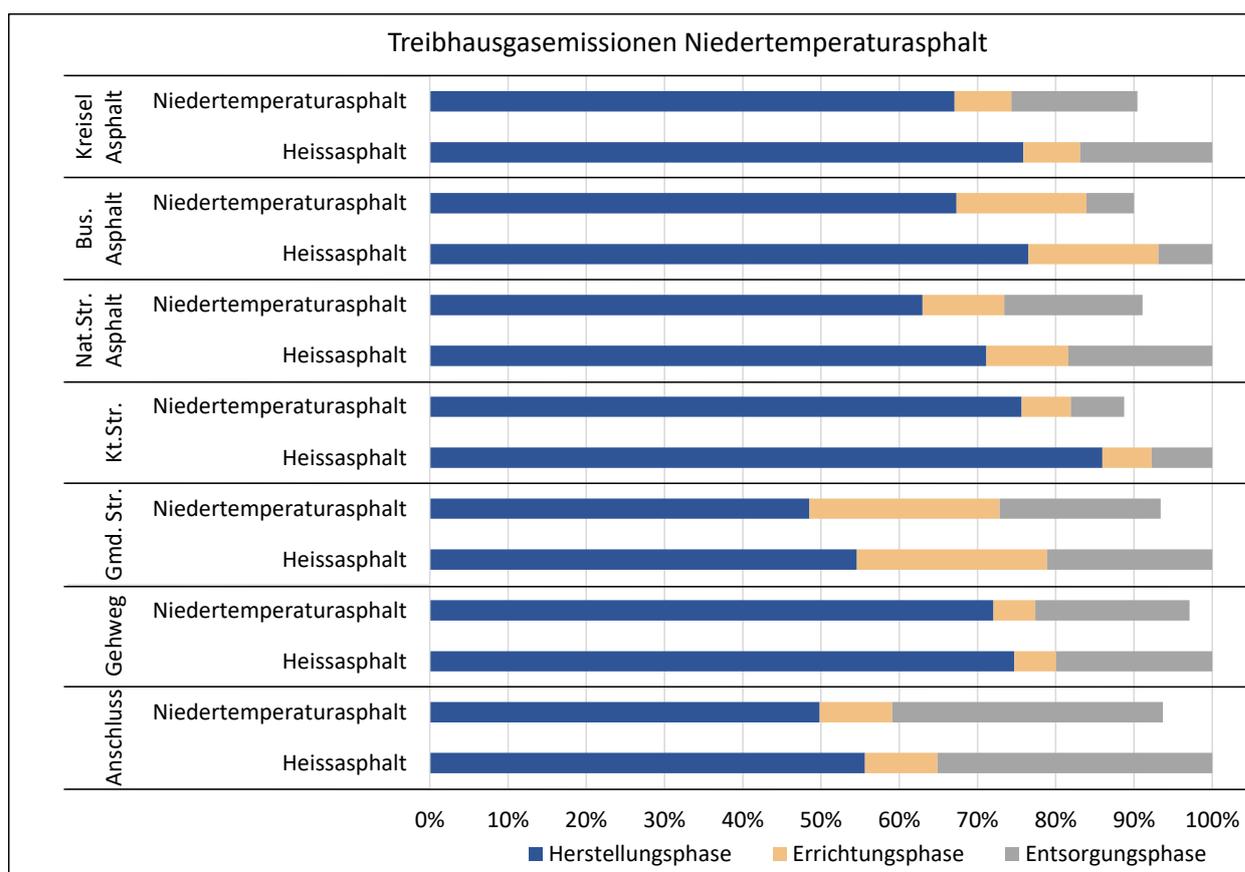


Abb. 4-3: Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Niedertemperaturasphalt im Vergleich zu Heissasphalt.

4.2.3 Fahrplan des Europäischen Asphaltverbandes hin zu Netto-Null

Die Asphaltindustrie spielt eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung im Infrastrukturbau. Schliesslich sind über 90% der europäischen Strassen mit Asphalt bedeckt. In einem kürzlich vom europäischen Asphaltverband (EAPA) vorgelegten Papier werden verschiedene Technologien und Massnahmen zur Umsetzung der Netto-Null-Strategie vorgestellt [21]. Zur Erreichung der Netto-Null-Strategie für den Baustoff Asphalt werden folgende Massnahmen vorgeschlagen:

- **Niedertemperaturasphalt:** Durch den Einsatz von Warm-Mix-Additiven und Schäumverfahren können die Herstellungstemperaturen gesenkt werden, was die Treibhausgasemissionen reduziert und die Lebensdauer der Asphaltdecke verlängert.
- **Kohlenstoffarme Bindemittel:** Ersetzen von bitumenbasierten Bindemitteln durch biogene oder dekarbonisierte Alternativen, um die Umweltauswirkungen der Bitumenproduktion zu minimieren.
- **Dekarbonisierte Brennstoffe:** Umstellung von fossilen Brennstoffen auf kohlenstoffneutrale Alternativen wie Holzpellets, erneuerbare Energien (Wind, Solar, Hydro), und Wasserstoff.
- **Effizienz am Einsatzort:** Verbesserung der Kraftstoffeffizienz und Optimierung der Arbeitsabläufe, um den Energieverbrauch zu minimieren, sowie der Einsatz von alternativen Kraftstoffen und Hybridtechnologien.
- **Effiziente Bitumentanks:** Wechsel von traditionellen Brennstoffen zu elektrischer Beheizung von Bitumentanks, um den Energieverbrauch zu senken.
- **Zirkularität:** Erhöhung des Einsatzes von recyceltem Asphalt in neuen Mischungen, um die Nachfrage nach neuen Materialien zu reduzieren und Emissionen durch Rohstofftransport und Abfallentsorgung zu senken.



- **Transport dekarbonisieren:** Einsatz von Elektro- und Hybridfahrzeugen sowie alternativen Kraftstoffen wie Biokraftstoffen oder Wasserstoff, um die Emissionen im Transport zu verringern.
- **Feuchtigkeitsreduktion in Aggregaten:** Schutz der Lagerbestände vor Regen, um den Energieverbrauch für das Trocknen der Materialien zu reduzieren.

Abb. 4-4 zeigt den zeitlichen CO₂-Absenkpfad des europäischen Asphaltverbandes grafisch auf. Bis 2050 wird das Ziel Netto-Null Treibhausgasemissionen angestrebt. Es ist davon auszugehen, dass auch die Schweiz über den Schweizer Asphaltverband Asphaltsuisse das Ziel Netto-Null anstrebt, wie es der europäische Verband vorgibt. Asphaltsuisse und ihre Mitglieder haben in der jüngeren Vergangenheit erste Bestrebungen zur Verbesserung der Umweltbelastung des Asphalts mittels Ökobilanz vorgenommen und werden diese kontinuierlich weiterführen. Diese Aussage basiert auf dem laufenden Projekt «Asphaltsorten-Ökobilanzrechner», welche die UTech im Auftrag von Asphaltsuisse und dem BAFU sowie diversen kantonalen Tiefbauämtern aktuell erarbeitet.

Abb. 4-5 zeigt, dass der Einsatz von emissionsreduzierten Belägen gemäss Fahrplan des EAPA («Netto-Null»-Fahrplan) zu Reduktionen von bis über 90% auf einzelne Bauwerke des Bauwerktyps «Fahrbahn» führen würde. Gewisse Treibhausgasmissionen anderer Materialien (Herstellungsphase) sowie aufgrund der Errichtung (Baumaschinen) und der Transporte verbleiben. Der «Netto-Null»-Fahrplan bezieht sich nur auf die Treibhausgasemissionen, weshalb eine Auswertung mittels UBP und KEA bezogen auf das Ziel nicht möglich ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch die Umweltbelastungspunkte und der kumulierte Energieaufwand stark zurückgehen.

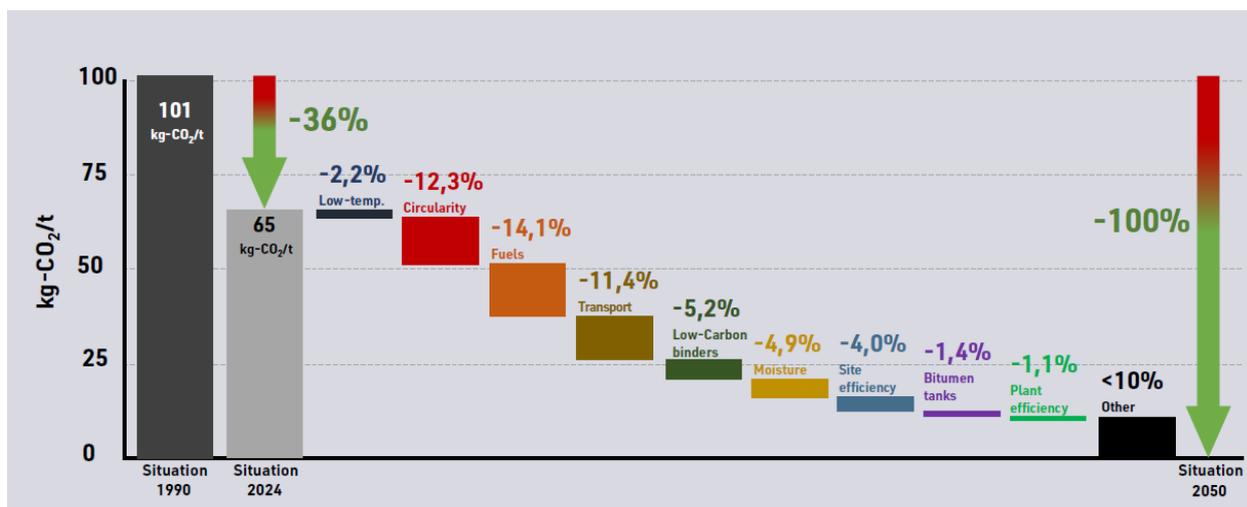


Abb. 4-4: CO₂-Absenkpfad des europäischen Asphaltverbandes EAPA, Quelle: [21]

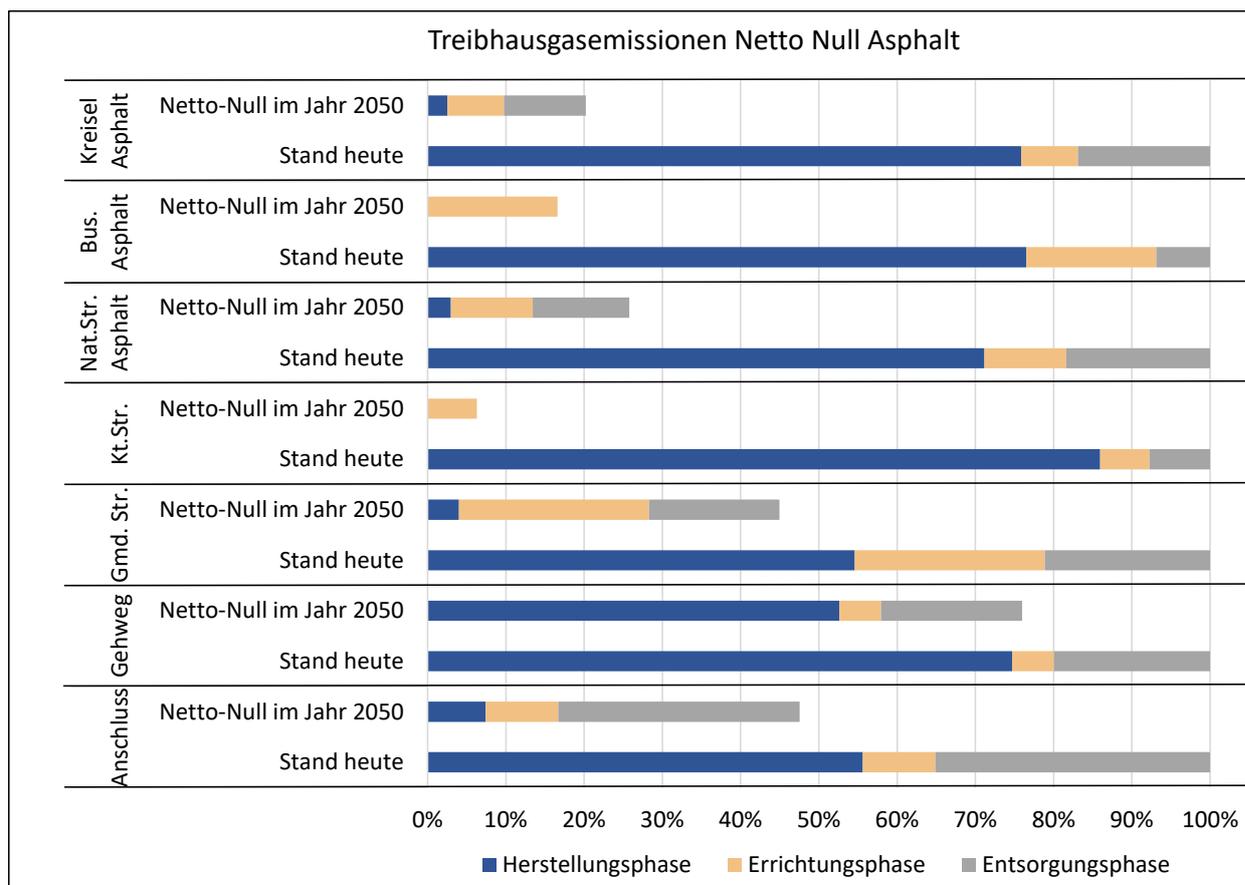


Abb. 4-5: Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von emissionsreduzierten Belägen gemäss «Netto-Null»-Fahrplan des EAPA.

4.3 Beton

Eine Studie zur Dekarbonisierung der europäischen Zement- und Betonindustrie bis 2050 zeigt auf, dass durch die Kombination verschiedener technischer und betrieblicher Massnahmen eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um bis zu 80 % im Vergleich zu 1990 möglich ist. Wesentliche Massnahmen umfassen den Einsatz von alternativen Brennstoffen, optimierte Betonmischungen, die verstärkte Nutzung von Recyclingmaterialien sowie Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS). Die Implementierung dieser Technologien kann, ohne grundlegende Änderungen an den bestehenden Normen, signifikante Beiträge zur Reduzierung der Emissionen leisten. Die Studie betont auch die Rolle der Kreislaufwirtschaft und effizienter Baustoffnutzung zur weiteren Emissionsminderung. [22]

4.3.1 CO₂-optimierte Zementsorten

Beton bietet Reduktionspotenzial hinsichtlich der Ökobilanz durch den Einsatz von CO₂-optimierten Zementsorten. Diese Zementsorten reduzieren die Treibhausgasemissionen während der Herstellung, da sie alternative Bindemittel und innovative Produktionsverfahren nutzen. Durch den Einsatz solcher optimierter Zemente kann die Betonindustrie einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung der Treibhausgasemissionen leisten und die Nachhaltigkeit im Infrastrukturbau verbessern. Gemäss der KBOB/ecobau-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich (2022, Version 5) liegt der durchschnittliche Tiefbaubeton (ohne Bewehrung) bei **225.6 kg CO₂ eq pro Kubikmeter**. Die Verwendung alternativer Bindemittel, insbesondere die Zugabe von Hochofenschlacke, Flugasche, Kalksteinmehl, Naturzeolithe, Geopolymer, Silicastaub oder anderen puzzolanartigen Stoffen (Hydrolith, Vulkanasche, kalzinierter Ton und Schiefer) ermöglicht eine Reduktion



der Treibhausgasemissionen auf bis zu **130 kg CO₂ eq pro Kubikmeter**, wie unterschiedliche abgeschlossene und laufende Ökobilanzprojekte der UTech zeigen (QUANTUM-Betone des Baustoffpark Walliswil). Dies entspricht einer Reduktion von rund 40%. Dieses Reduktionspotenzial bezieht sich allerdings auf einen Kubikmeter Beton und nicht direkt auf Bauwerkstypen, die viel Beton enthalten (z.B. Brücken oder Tunnel). Aufgrund der lückenhaften Datenlage kann der Einfluss auf entsprechende Bauwerkstypen (andere Bauwerkstypen als die Fahrbahn) in dieser Studie nicht direkt berechnet werden. Kommt erschwerend hinzu, dass die anderen Bauwerkstypen (vor allem Kunstbauten) sehr individuell sind und eine generelle Aussage zur Reduktion erschwert.

In einer Studie von Treeze wurden ebenfalls die Reduktionspotenziale bezüglich künftiger Betonherstellungen untersucht. Dabei wurde für den Beton im Tiefbau hinsichtlich der Treibhausgasemissionen ein Reduktionspotenzial von 76% ausgewiesen. Diese Reduktion ist hauptsächlich auf den Einsatz von CCS (carbon capture and storage) in der Klinkerproduktion zurückzuführen. Weitere Faktoren sind die Verwendung von Recyclingbeton und die Reduktion des Zementgehalts. [23]

In der Studie „CO₂ storage in cement and concrete by mineral carbonation“ von Frank Winnefeld et al. wird die Mineralkarbonatisierung als Methode zur Reduktion der Treibhausgase in der Zementherstellung untersucht. Olivin, ein magnesiumreiches Silikat, spielt dabei eine zentrale Rolle, da es CO₂ dauerhaft binden kann. Der Einsatz von Olivin als alternatives Bindemittel ermöglicht eine Reduzierung des Zementklinkers und fördert die CO₂-Speicherung im Beton. [24]

Wichtig zu erwähnen ist auch, dass die Anwendung gewisser CO₂-optimierter Zementsorten in Beton dazu führen kann (aber nicht muss), dass geforderte bautechnische Eigenschaften im Infrastrukturbau nicht mehr erfüllt werden. Es gibt jedoch bereits diverse Anwendungsbeispiele von CO₂-optimierten Zementen wie LC3 im Hoch- und Infrastrukturbau. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Informationen und Daten kann in diesem Projekt keine abschliessende Aussage getroffen werden.

4.3.2 RC-Beton mit CO₂-Speicherung

Aufgrund der hohen Anforderungen an die AAR-Beständigkeit bei stark exponiertem Beton im Infrastrukturbau ist der Einsatz von RC-Beton mit CO₂-Begasung mit Schwierigkeiten verbunden. Im Hochbau ist der Einsatz von RC-Beton mit CO₂-Speicherung schon verbreiteter (z.B. Zirkulit-Beton, Kibeco Beton oder NovoCon-Beton). Abb. 4-6 zeigt das Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen pro Kubikmeter Tiefbaubeton NPK D, welches durch den Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung mit CO₂-Begasung (CO₂-Speicherung) erreicht werden kann. Von **225.6 kg CO₂ eq pro Kubikmeter** (KBOB/ecobau-Liste Tiefbaubeton) ausgehend wäre eine Reduktion auf ca. **180 kg CO₂ eq pro Kubikmeter** möglich. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass zur Anrechenbarkeit des eingespeicherten CO₂ keine CO₂-Zertifikate von den produzierenden Unternehmen verkauft werden dürfen, um Doppelzählungen zu vermeiden.

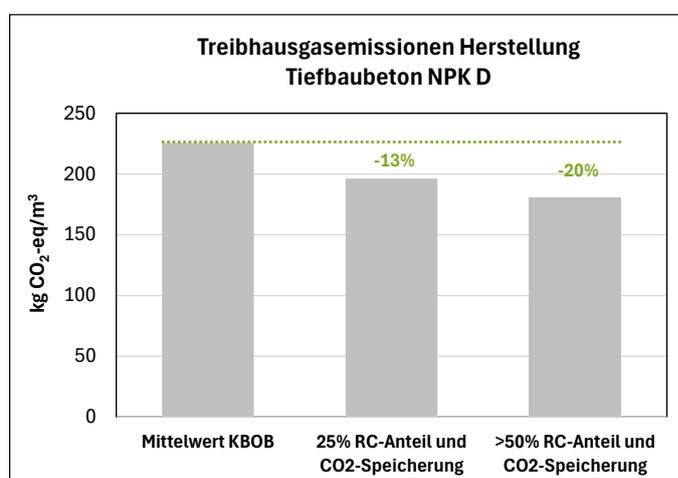
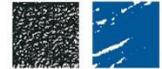


Abb. 4-6: Treibhausgasemissionen pro Kubikmeter Tiefbaubeton NPK D (ohne Bewehrung) gemäss KBOB [3] und gemäss Projektdaten der UTech.



4.3.3 Fahrplan des globalen Zement- und Betonverbandes hin zu Netto-Null

Die Global Cement and Concrete Association GCCA hat einen klaren Fahrplan hin zu Netto-Null bis 2050, siehe Abb. 4-7.

Dieser Plan beinhaltet:

- **Reduktion des Klinkeranteils:** Verringerung des Anteils des CO₂-intensiven Klinkers im Zement.
- **Alternative Brennstoffe:** Vermehrter Einsatz von Abfällen und Biomasse anstelle von fossilen Brennstoffen.
- **Technologische Innovationen:** Einführung und Förderung von Kohlenstoffabscheidungs- und -speicherungstechnologien (CCUS).
- **Produkt- und Prozesseffizienz:** Verbesserung der Energieeffizienz in der Produktion und Entwicklung neuer Betonmischungen.
- **Politische Massnahmen:** Aufruf an Regierungen zur Unterstützung durch geeignete politische Rahmenbedingungen, wie z.B. CO₂-Bepreisung und Förderung der Kreislaufwirtschaft.

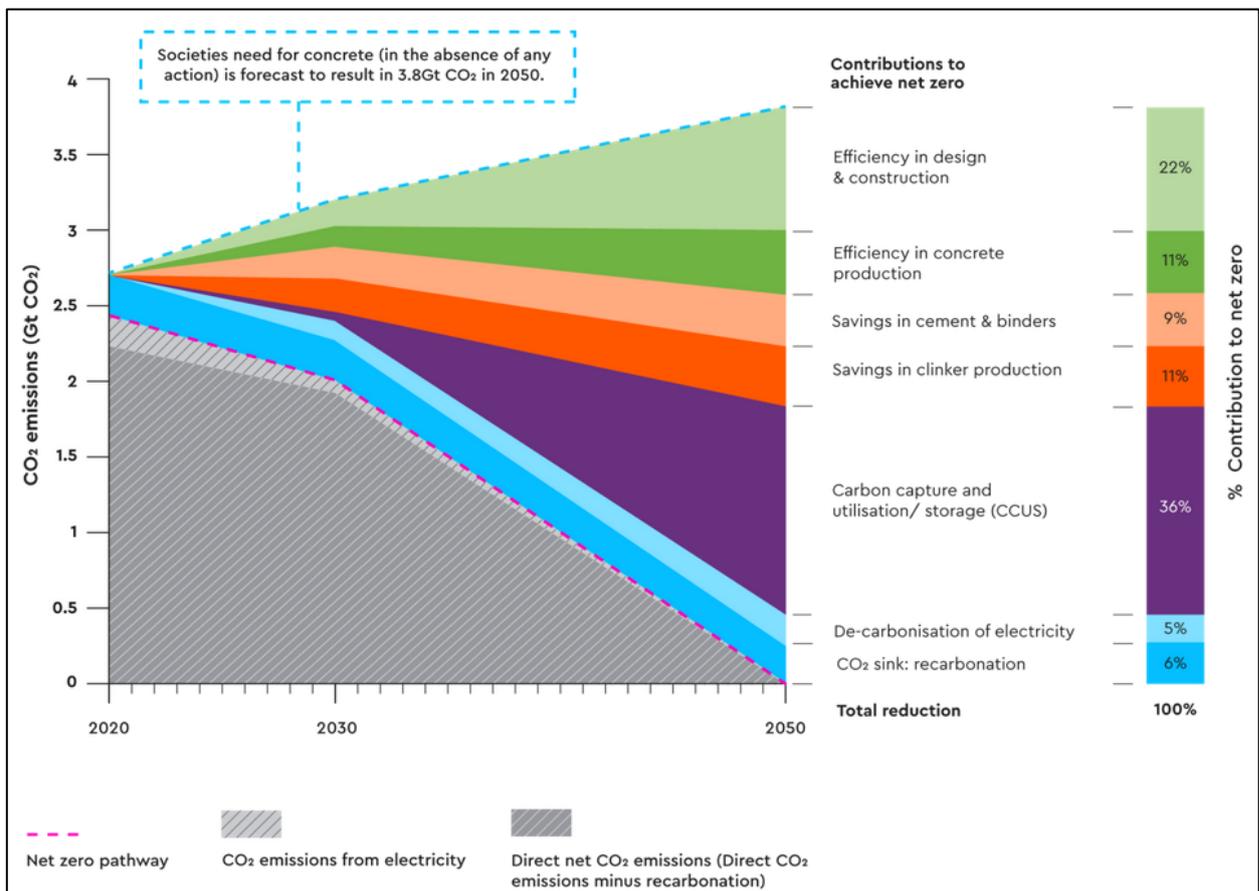
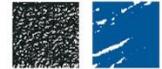


Abb. 4-7: CO₂-Absenkpfad der globalen Zement- und Betonindustrie GCCA. Quelle: GCCA, 2024

4.3.4 Alternative Hüll- und Auffüllmaterial «Flüssigboden»

Flüssigboden und Beton sind zwei Materialien, die im Werkleitungsbau häufig verwendet werden, insbesondere für Rohrumhüllungen und als Auffüllmaterial. Beide Materialien haben unterschiedliche Umweltwirkungen und bieten spezifische Vorteile. Dieser Vergleich beleuchtet die Ökobilanz von Flüssigboden und Beton und hebt die Vorteile von Flüssigboden als Hüll- und Auffüllmaterial hervor.

Flüssigboden ist ein fließfähiges, selbstverdichtendes Material, das aus lokal verfügbaren Böden, Bindemitteln und Wasser hergestellt wird. Es hat eine erdähnliche Konsistenz und verhärtet nach dem Einbau



zu einem festen, tragfähigen Material. Flüssigboden bietet gegenüber Beton folgende ökologische Vorteile:

- **Rohstoffe:** Flüssigboden nutzt überwiegend lokal verfügbare Böden, was den Bedarf an zusätzlichen Rohstoffen und Transportaufwand minimiert.
- **Energieverbrauch:** Die Herstellung von Flüssigboden erfordert weniger Energie als die Zementproduktion für Beton.
- **Treibhausgasemissionen:** Durch den geringeren Zementanteil und die Verwendung lokaler Böden weist Flüssigboden niedrigere Treibhausgasemissionen auf.
- **Recycling und Wiederverwendung:** Flüssigboden kann nach dem Aushärten wieder ausgehoben und erneut verwendet werden, was Abfall reduziert (weniger verbrauchende Ressourcennutzung als beim Beton, welcher 32.8% verbrauchende Ressourcennutzung aufweist [25]).

Aus einem jüngst vergangenen Projekt der UTech zeigt sich, dass die Verwendung von Flüssigboden anstelle von Beton im Einsatz von Hüll- und Auffüllmaterial sehr vorteilhaft für die Reduktion der Treibhausgasemissionen ist. Im Gegensatz zum verbreiteten Einsatz des Flüssigbodens in Deutschland, wird Flüssigboden in der Schweiz nur in kleinen Mengen eingesetzt. Wir schätzen jedoch das Reduktionspotenzial durch vermehrten Einsatz von Flüssigboden anstelle von Beton als hoch ein. Dies müsste jedoch in einer separaten Studie genauer untersucht werden.

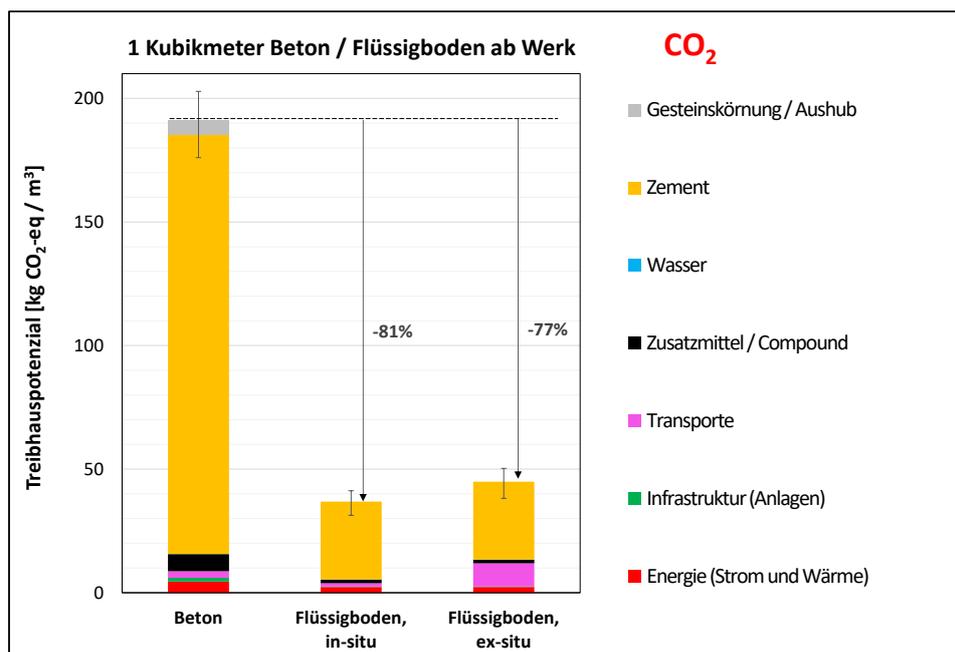
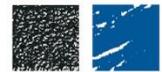


Abb. 4-8: Treibhausgasemissionen-Vergleich von 1 m³ Beton und Flüssigboden (hergestellt vor Ort – in-situ oder im Flüssigboden-Werk, ex-situ)

Aus Platzgründen werden die Auswertungen mittels der UBP- und KEA-Methode nicht separat gezeigt. Die Auswertungen mit den weiteren Wirkungsmodellen hat gezeigt, dass die Reduktionspotenziale vergleichbar bis sogar leicht höher sind als bei den Treibhausgasemissionen. Dies trifft insbesondere auf die Verwendung von RC-Beton bei den UBP zu. Die UBP zeigen ebenfalls höhere Einsparpotenziale beim Einsatz von Flüssigboden gegenüber Magerbeton (Hüll-, Füll und Sohlenbeton).



4.4 Stahl

Beim Stahl muss grundsätzlich zwischen den Herstell-Verfahren «Hochofenprozess» und «Elektrolichtbogenofen» unterschieden werden. Gemäss relevanten Quellen wie die World Steel Association und der European Steel Association verursacht der Hochofenprozess Treibhausgasemissionen im Bereich von 1.8 bis 2.2 kg CO₂ eq pro kg Stahl. Gemäss denselben Quellen liegen die Treibhausgasemissionen beim Elektrolichtbogenofen bei 0.4-0.8 kg CO₂ eq pro kg Stahl. Haupttreiber der Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Stahl sind vor allem der hohe Energiebedarf (thermisch beim Hochofenprozess oder elektrisch beim Elektrolichtbogenofen) sowie die Luftemissionen und Entsorgung/Verwertung der Rückstände (zinkhaltige Filterstäube und Schlacken). Beim Hochofenprozess liegt ein wichtiger Treiber der Treibhausgasemissionen in der vorgelagerten Wertschöpfungskette, nämlich im Bergbau.

4.4.1 Strommix, Energieeffizienz und Anteil Recyclingschrott

Bewehrungsstahl wird in Europa ausschliesslich via Elektrolichtbogenofen-Verfahren hergestellt. Hierbei ist für die Treibhausgasemissionen der Strommix entscheidend. Gemäss der KBOB/ecobau-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich [3] liegt der Mittelwert für Treibhausgasemissionen aus der Herstellung von Bewehrungsstahl bei **0.773 kg CO₂ eq pro kg Stahl**. Dieser Wert umfasst nicht nur Bewehrungsstahl aus der Schweiz, sondern bildet einen Marktmix ab. Aktuell wird dieser Wert jedoch überarbeitet und voraussichtlich in Zukunft tiefer liegen, da der Recyclinganteil besser abgeschätzt werden soll.

Gemäss Angaben von Schweizer Herstellern (KBOB-Daten, welche auf Branchendurchschnitts-EPDs basieren) liegen die Treibhausgasemissionen bei **0.2 bis 0.5 kg CO₂ eq pro kg Stahl**. Dazu tragen insbesondere Energieeffizienzsteigerungen der letzten Jahre, ein vorteilhafter Strommix sowie die Verwendung von recyceltem Schrott bei.

Das Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen liegt somit bei ca. 35% bis 74% pro Kilogramm Stahl. In einer Studie von Treeze wird von einem Reduktionspotenzial von 63% für Walzstahl ausgegangen [23].

Je nach Projekt oder Bauwerk werden andere Stahlsorten wie zum Beispiel Vorspannstahl, Bewehrungsmatten oder Armierungsstahlsorten eingesetzt, welche wiederum unterschiedliche Reduktionspotenziale aufweisen können. Vereinfacht wird in diesem Bericht jedoch von einem einheitlichen Reduktionspotenzial für Stahl von 50% ausgegangen.

4.4.2 Einsatz von Wasserstoff

Bei der Stahlproduktion liegt ein sehr grosses Reduktionspotential bei der Umstellung auf Wasserstoff (H₂) anstelle von Koks. Bei der Direktreduktion von Eisenerz mit grünem Wasserstoff entsteht kein CO₂, sondern lediglich Wasser. Jedoch sind zur Herstellung von grünem Wasserstoff enorme Mengen an erneuerbarer Energie nötig, daher wird grüner Wasserstoff über die nächsten Jahrzehnte ein knappes Gut bleiben.

4.4.3 Bestrebungen der Branche hin zu «Netto-Null» bis 2050

Gemäss [26] gibt es auch in der Stahlindustrie auf übergeordneter Verbandsebene (z.B. im Rahmen des «Net Zero Industry Projects» sowie bei den führenden Verbänden «World Steel Association» und auch beim europäischen Stahlverband «EUROFER») starke Bestrebungen die Herstellung des Stahls hin zu «Netto-Null» Treibhausgasemissionen zu entwickeln. Aufgrund der begrenzten Datenlage macht eine Angabe der Reduktionspotenziale für die Verwendung von «Netto-Null» Stahl (gegenüber dem Stahl Stand heute) je Bauwerkstyp Stand heute keinen Sinn. Kommt hinzu, dass eine allgemeingültige Angabe nur schwierig bis gar nicht machbar ist, weil einige der Bauwerkstypen sehr individuell sind und keine Verallgemeinerung zulassen, z.B. Kunstbauten.

Aus Platzgründen werden die Auswertungen mittels der UBP- und KEA-Methode nicht separat gezeigt. Die Auswertungen mit den weiteren Wirkungsmodellen hat gezeigt, dass die Reduktionspotenziale vergleichbar sind als bei den Treibhausgasemissionen.



4.5 Natursteine

Bei den Natursteinen sind die Herkunft und die damit verbundenen Abbau- und Verarbeitungsbedingungen sowie die Transportdistanz die Haupttreiber der Treibhausgasemissionen. Beim Abbau (Bergbau) und der Verarbeitung (Zuschneiden, Schleifen, Polieren etc.) der Natursteine sind die eingesetzten Maschinen und auch der Strommix Ökobilanz-bestimmend.

Tabelle 3 zeigt die Treibhausgasemissionen von Naturstein verschiedener Herkunftsländer, welche typischerweise in der Schweiz im Infrastrukturbau eingesetzt werden. Neu abgebaute Natursteine aus Schweizer Steinbrüchen bieten demnach grosses Reduktionspotenzial hinsichtlich der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu Natursteinen aus dem europäischen oder sogar asiatischen Ausland. Wird ein Naturstein aus der Schweiz anstelle eines Natursteins aus zum Beispiel Italien oder Polen gewählt, so führt dies zu einem Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen des Natursteins von ca. 67%. Noch mehr Reduktionspotenzial bietet die lokale Aufbereitung ausgebaute Natursteine durch einen Steinmetz, sodass die Natursteine wiederverwendet werden können.

Tabelle 3: Treibhausgasemissionen von Naturstein-Platten verschiedener Herkunftsländer. Zusätzlich wurde ganz links der Wert für die Wiederverwendung von ausgebauten und neu aufbereiteten Natursteinen aufgeführt.

Tätigkeit	Herkunftsland					Quelle / Bemerkung	
	CH	CH	IT	PT	China		
Abbau	Abbau [kg CO ₂ eq / kg]	0.00	0.12	0.42	0.45	0.49	Schweiz: Ecoinvent 3.8: Natural Stone Plate, cut, Production {CH} [27] Portugal und China: Ökoinventar Ecoinvent 3.8: Natural Stone Plate, cut, Production {RoW} [27]
	Transport mit LKW zum Bahnverlad [km]	0	0	0	50	0	Annahme für Inlandtransport per LKW in Portugal bis zum Bahnverlad
	Transport nach Schaffhausen, Bahn [km]	0	0	0	2'300	0	Bahntransport Portugal bis Schaffhausen CH
Transport	Transport mit LKW zum Hafen [km]	0	0	0	0	300	Annahme für Inlandtransport per LKW in China
	Transport Tessin bis Regionallager [km]	0	164	0	0		Annahme LKW-Transport Steinbruch Tessin (Lodrino) - Regionallager
	Transport nach Genua, Schiff [km]	0	0	0	0	15'773	Searates für China: Shanghai
	Transport nach ZH, LKW [km]	0	0	0	0	420	Distanz Genau - ZH per LKW
	Transport zur Baustelle, LKW [km]	0	50	231	50	20	CH: Regionallager zur Baustelle, IT: Steinbruch (Domodossola) bis Baustelle
Recy.	Transport [kg CO ₂ eq / kg]	0.00	0.03	0.04	0.01	0.27	LKW 16-32t aus Ökobilanzdatenbestand KBOB [28]
	Aufbereitung CH [kg CO ₂ eq / kg]	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	Ökoinventar UVEK: Natural stone plate, polished, at regional storage/CH U [17]
Total [kg CO₂ eq / kg]		0.07	0.16	0.46	0.49	0.76	

Aus Platzgründen werden die Auswertungen mittels der UBP- und KEA-Methode nicht separat gezeigt. Die Auswertungen mit den weiteren Wirkungsmodellen hat gezeigt, dass die Reduktionspotenziale vergleichbar bis sogar leicht höher sind als bei den Treibhausgasemissionen.

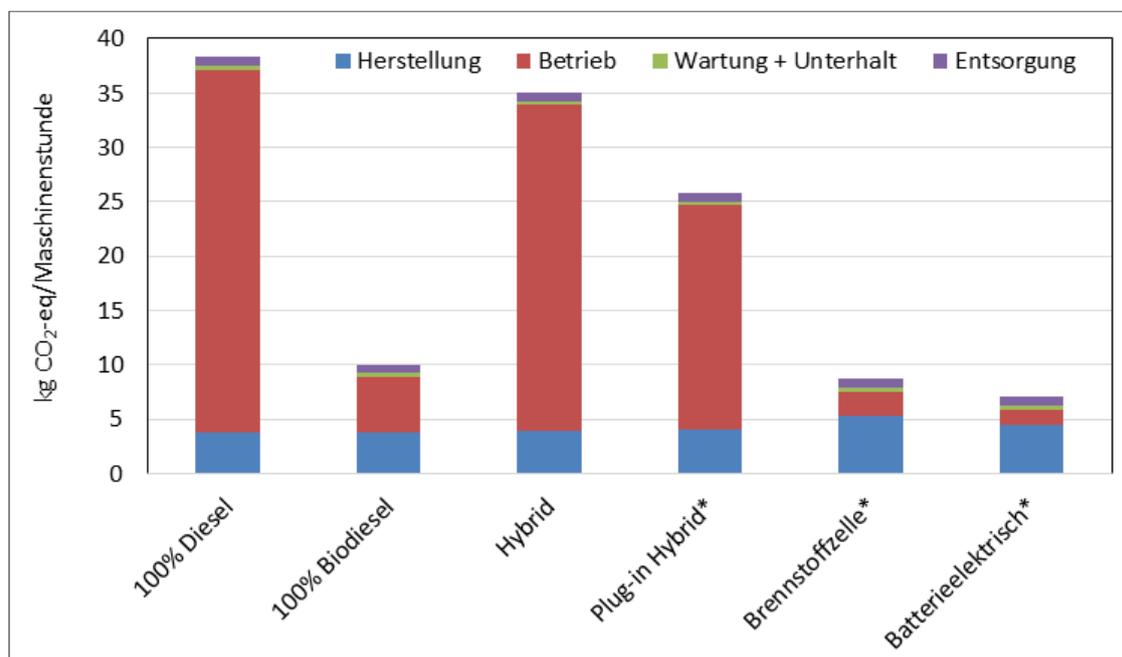


4.6 Alternativ angetriebene Baumaschinen

Die Auswertungen vergangener und aktuell laufender Projekte der UTech zur Ökobilanz von kantonalen und grösseren städtischen Tiefbauämtern zeigen, dass die fünf im Infrastrukturbau im Hinblick auf die Ökobilanz wichtigsten Baumaschinen wie folgt lauten (Anteil an den Treibhausgasemissionen der Baumaschinen ist jeweils in den Klammern angeben): Lastwagen mit Kippbrücke und Allrad (33%), Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk Einsatzgewicht 12-18 Tonnen und ca. 100 kW Leistung (33%), Dumper mit 5m³ Ladekapazität und ca. 80 kW Leistung (12%), Walzen (vor allem Vibrowalzen und Pneuradwalzen) bis zu 25 Tonnen Einsatzgewicht (11%). Die restlichen Baumaschinen führen in der Summe typischerweise zu den übrigen 11% der Treibhausgasemissionen der Baumaschinen in Infrastrukturbauprojekten.

Abb. 4-9 zeigt die Treibhausgasemissionen pro Maschinenstunde eines beispielhaften Hydraulikbaggers mit Raupenfahrwerk und einem Einsatzgewicht von 18 Tonnen sowie einer maximalen Leistung von 120 kW. Neben dem Referenzwert für 100% Diesel wurden verschiedene alternative Antriebe betrachtet: 100% Biodiesel HVO (aus Altöl, Abfall-Öl etc.), Hybrid, Plug-in Hybrid, Brennstoffzelle und Batterieelektrisch. Bei den letzten dreien wurde in der Ökobilanz des Betriebs grüner Strom (Ökostrom) angesetzt, um das maximal mögliche Reduktionspotenzial zu ermitteln.

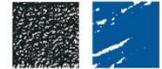
Alternative Antriebe bieten Reduktionspotenziale der Treibhausgasemissionen von Baumaschinen von 10% (Hybrid) bis zu 80% (Batterieelektrisch mit Ökostrom). Basierend auf dem Anteil der Treibhausgasemissionen der Baumaschinen in Infrastrukturprojekten (ca. 10%, siehe Tabelle 2) wären demnach Reduktionen von bis zu **8%** (10% x 80%) durch batterieelektrische Baumaschinen möglich. Dieser Wert wird je Bauwerkstyp leicht variieren.



* der Betrieb wurde auf Basis von grünem Strom gerechnet

Abb. 4-9: Treibhausgasemissionen pro Maschinenstunde eines beispielhaften Hydraulikbaggers mit einem Einsatzgewicht von 18 Tonnen und einer maximalen Leistung von 120 kW.

Aus Platzgründen werden die Auswertungen mittels der UBP- und KEA-Methode nicht separat gezeigt. Die Auswertungen mit den weiteren Wirkungsmodellen hat gezeigt, dass die Reduktionspotenziale bei den UBP vergleichbar bis leicht tiefer und beim kumulierten Energiebedarf vergleichbar bis sogar leicht höher als bei den Treibhausgasemissionen sind.



4.7 Alternative angetriebene Transporte

Das Reduktionspotenzial alternativer Antriebsysteme für Transportfahrzeuge liegt im vergleichbaren Bereich wie bei den Baumaschinen. Von daher kann im Mittel von einer Reduktion von **8%** der gesamten Treibhausgasemissionen je Infrastrukturbauprojekt ausgegangen werden, wenn alternative Antriebe (im Vergleich zu fossil betriebenen Transportfahrzeugen) zum Einsatz gelangen.

4.8 Weiteres Reduktionspotenzial

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde der Fokus ausschliesslich auf Reduktionspotenziale im Hinblick auf Materialien, Maschinen und Transporte gelegt. Es sei jedoch darauf verwiesen, dass darüber hinaus weitere Reduktionspotenziale bestehen. Denn insbesondere die konstruktive Ausgestaltung sowie die bautechnischen Varianten bergen ein weiteres Reduktionspotenzial. Diesbezüglich sei auf die Ausgestaltung einer Baugrube für ein Haltestellenbauwerk (Bahn) mittels Dichtesohle oder mittels Unterwasserbetonsohle sowie auf die Erstellung einer Wildtierbrücke in der Stahlbetonausführung mit einem Rahmen- oder Bogentragwerk verwiesen. Die genannten grundlegenden Entscheidungen werden in der Regel in einer frühen Planungsphase getroffen und besitzen einen wesentlichen Einfluss auf die Ökobilanz des Bauwerks. Diese sind allerdings sehr spezifisch und individuell und wurden daher in unserer Untersuchung nicht berücksichtigt. In ähnlicher Weise stellt sich die Frage der Trassenführung bzw. der Trassenplanung. Die Wahl der Trassenführung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ökobilanz. So wirkt sich die Frage, ob eine Trasse durch eine offene Landschaft gelegt wird, um ein Gebirge zu umfahren, oder ob sie mittels Tunnel durchquert wird, erheblich auf die Umweltbilanz aus. Auch die Entscheidung, ob eine zweistöckige Autobahn gebaut oder die bestehenden zwei Spuren auf vier Spuren erweitert werden, indem eine Verbreiterung vorgenommen wird, wirkt sich auf die Umweltbilanz aus.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die technische Nutzungsdauer der Infrastruktur. Diesbezüglich ist festzuhalten, dass die technische Nutzungsdauer der Infrastruktur einen massgeblichen Einfluss auf die Ökobilanz ausübt. Die Verlängerung der Nutzungsdauer eines Objektes wirkt sich positiv auf die Ökobilanz aus. Des Weiteren können durch eine verbesserte Koordination zwischen Strasseninfrastrukturen und unterirdischen Leitungsnetzen längere Nutzungsdauern erzielt und unnötige Eingriffe vermieden werden. Allerdings gestaltet sich auch die Einschätzung der Nutzungsdauer als schwierig, zudem ist die Datengrundlage verschiedener Bauherren zum Teil widersprüchlich. Infolgedessen wurden Reduktionspotenziale zur Verlängerung der technischen Nutzungsdauer nicht betrachtet.

Auch die Anpassung spezifischer Normen bzw. spezifischer Vorgaben vorliegender Normen kann einen Einfluss auf den Spielraum für ressourcenschonende Ansätze und somit die Ökobilanz haben.² Als Beispiele können hier die Aufhebung oder Anpassung des Mindestzementgehalts oder der maximal zulässigen Recyclingasphalt-Zugaberate in der Deckschicht genannt werden.

In einer zusammenfassenden Betrachtung lässt sich das weitere, in dieser Studie nicht vertieft untersuchte Reduktionspotenzial im Infrastrukturbereich wie folgt darstellen:

- Konstruktive Ausgestaltung
- Trassenführung und/oder Trassenplanung der Verkehrsinfrastruktur
- Technische Nutzungsdauer und gute Koordination (bauwerksübergeordnete Erhaltungsmaßnahmenplanung, z.B. Strassen und darunterliegende Werkleitungsnetze) für längere Nutzungsdauern
- Anpassung von Normen

² Dieses Thema wird in Kapitel «Praktische Synthese» - Modul 3 nochmals aufgegriffen und diskutiert.



5 Praktische Synthese – Modul 3

5.1 Referenz- und Zielwerte

5.1.1 Vorschlag für Referenz- und Zielwerte

Die nachfolgende Tabelle 5 gibt einen Überblick über die in Modul 1 erarbeiteten Grundlagen für Referenz- und Zielwerte für die Treibhausgasemissionen des Infrastrukturbaus. Zusätzlich wird empfohlen, für welche Infrastrukture Objekte eine Weiterverfolgung von Referenz- und Zielwerten sinnvoll ist und wo diese aus heutiger Sicht der Autorinnen und Autoren keinen Sinn machen bzw. nur schwierig zu ermitteln und auch umzusetzen wären. Die vorgeschlagenen Referenzwerte basieren auf den im vorliegenden Projekt ermittelten Mittelwerten je Bauwerkstyp (z.B. für die Fahrbahnen) und auf Literaturwerten. Die Zielwerte, abgeleitet vom Referenzwert und dem Reduktionspotenzial liegen, wie in der Tabelle 5 ersichtlich, tiefer. Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die totalen Treibhausgasemissionen. Für eine Auswertung je Lebenszyklusphase müssen die Werte aus den Grafiken mit der jeweiligen Lebensdauer (siehe Tabelle 8 im Anhang) multipliziert werden.

Abb. 5-1 zeigt eine Übersicht der Mittelwerte verschiedener Infrastrukturbauten. Hierbei wird ersichtlich, dass sich die meisten Infrastrukturbauten im Bereich von 0.5 – 4.5 kg CO₂ eq/m²a bewegen. Einzig die Brücken und die Tunnel liegen deutlich darüber mit 10 kg CO₂ eq/m²a (Brücken) und 24 kg CO₂ eq/m²a (Tunnel). Der Mittelwert für die Tunnel und Gleise wurde für den Vergleich mit den anderen Infrastrukturbauwerken von der funktionellen Einheit «pro Laufmeter und Jahr» auf «pro Quadratmeter und Jahr» anhand der Fahrbahnfläche umgerechnet. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich die Systemgrenzen und die methodischen Setzungen bei den ausgewerteten Projekten und verwendeten Literaturstudien unterscheiden. Die Mittelwertbildung dient der Glättung der Streubereiche und führt zu einem Unsicherheitsbereich, der mit dem von Ökobilanzdaten vergleichbar ist.

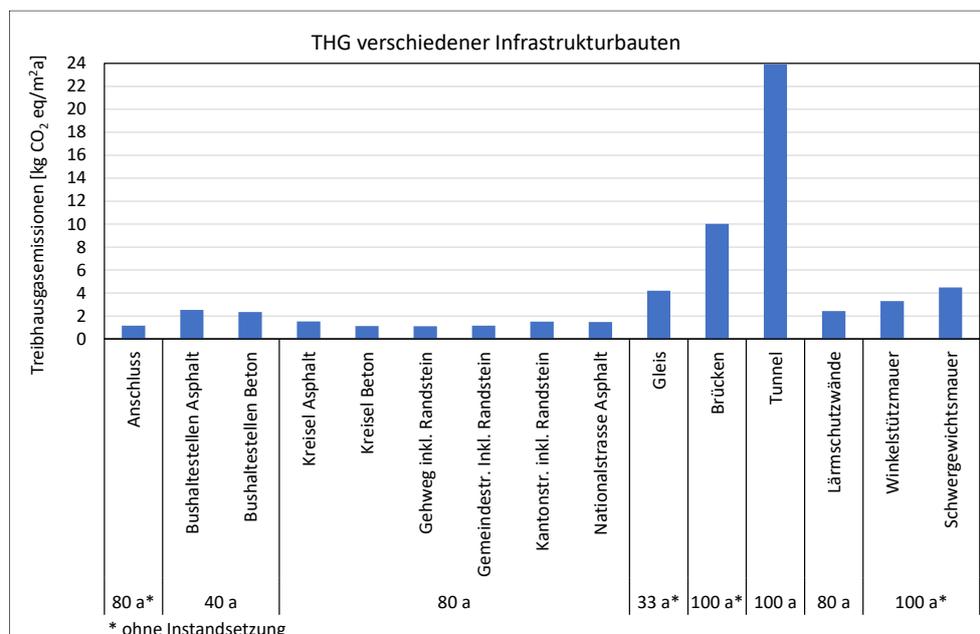


Abb. 5-1: Treibhausgasemissionen verschiedener Infrastruktur pro Quadratmeter Fahr- oder Sichtfläche (Lärmschutzwände, Stützmauern) und Jahr. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert je Bauwerkstyp für die angegebene Lebensdauer (z.B. 80 Jahre, mit oder *ohne Instandsetzung) dar. Die Datenqualität/Detailgrad der Infrastrukturbauten ist unterschiedlich.



Neben den Referenzwerten wird in Tabelle 5 ein «Bestes Projekt»-Wert (ausgewertetes Projekt mit niedrigsten Treibhausgasemissionen) angegeben. Dieser berücksichtigt das jeweils beste der ausgewerteten Projekte je Objekttyp und soll die ökologischen Möglichkeiten Stand heute aufzeigen.

Die Zielwerte wurden für das Jahr 2030 und für das Jahr 2040 angegeben (im Hinblick mit dem Ziel der Netto-Null-Erreichung gemäss KIG: im Jahr 2050 für die Schweiz und für die zentrale Bundesverwaltung inklusive vor- und nachgelagerter Emissionen im Jahr 2040). Für 2030 wird jeweils eine Reduktion von 1/3 und für 2040 von 2/3 vorgeschlagen. Dies ist basierend auf Berechnungen der Reduktionspotenziale je Objekttyp, die in Tabelle 5 aufgeführt sind. Die Reduktionspotenziale wurden anhand der in Kap. 4 erläuterten Massnahmen berechnet. Zusammenfassend lassen sich folgende Reduktionspotenziale gemäss Tabelle 4 erreichen. Für eine Abschätzung der Reduktionspotenziale je Bauwerkstyp wurde jeweils der Mittelwert der Treibhausgasemissionen der genannten Materialien mit dem Reduktionspotenzial in Tabelle 4 multipliziert.

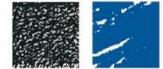
Tabelle 4: Zusammenfassung der Reduktionspotenziale der Herstellung der wichtigsten Materialien im Infrastrukturbau (Beton, Asphalt, Stahl und Natursteine) sowie der Baumaschinen und Transporte. Die Hintergründe zu den Zahlen befinden sich in Kap. 4.

	Reduktion bis 2030	Reduktion bis 2040
Beton	-40%	-90%
Asphalt	-60%	-90%
Stahl	-50%	-90%
Natursteine	-67%	-90%
Baumaschinen	-80%	-80%
Transporte	-80%	-80%

Die Grafiken der Resultate der Reduktionspotenziale für das Jahr 2030 sind im Anhang D1 aufgeführt. Ebenso befinden sich die Grafiken mit den Resultaten der Reduktionspotenziale für das Jahr 2040 im Anhang D2. Bei den Reduktionspotenzialen für 2040 haben wir uns auf die Massnahmen der Herstellung der Materialien Beton, Asphalt, Stahl und Natursteine sowie auf die Baumaschinen und auf die Transporte fokussiert. Nicht einberechnet haben wir die Entsorgung der Baumaterialien sowie weitere mögliche Ansätze zur Emissionsreduktion. Dies führt dazu, dass unsere Berechnungen für das Jahr 2040 nicht ganz in einer Reduktion von 2/3 resultiert haben. Dennoch ist davon auszugehen, dass dies mit weiteren Massnahmen zur Reduktion oder Substitution umweltbelastender Materialien sowie zur Emissionsreduktion bei der der Entsorgung bis 2040 erreichbar ist. Es existieren diverse weitere Optimierungsansätze, wie materialgerechtes und materialeffizientes Bauen, welches bereits bei der Planung ansetzt und dazu führt, dass Ressourcen intelligenter genutzt und Emissionen reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit wäre Suffizienz in Standard und Menge, also die Begrenzung auf das Wesentliche.

Ergänzende Begriffsdefinition für Tabelle 5:

- **Referenzwert:** Der Referenzwert (= Mittelwert der Auswertung) wurde je Objekttyp auf Basis der analysierten Projekte sowie ergänzender Literaturdaten ermittelt. Die Grafiken in Kap. 3 zeigen je Objekttyp die jeweilige Grundlage, welche den berechneten Mittelwerten zugrunde liegt.
- **Bestes Projekt:** Basierend auf den Projektdaten, die den Mittelwert bilden, wurde jeweils das Projekt mit den niedrigsten Treibhausgasemissionen («bestes ausgewertetes Projekt») aufgeführt.
- **Zielwert 2030:** Basierend auf dem Mittelwert wurde eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 von 1/3 hergeleitet. Hierfür haben wir die in Kap. 4 aufgezeigten Reduktionspotenziale für Beton, Asphalt, Stahl und Natursteine sowie für die Baumaschinen und Transporte



angesetzt und die Ökobilanz neu berechnet. Dabei ergab sich im Mittel über alle Objekttypen eine Reduktion von $1/3$, woraus der Zielwert für 2030 resultiert.

- Zielwert 2040: Analog zum Zielwert 2030 ergibt eine weitere Reduktion von $1/3$ des Mittelwerts den Zielwert für das Jahr 2040. Die Zielwerte 2040 liegen somit bei $1/3$ des Mittelwerts.



Tabelle 5: Referenzwerte (Mittelwerte), Bestes Projekt (ausgewertetes Projekt mit niedrigsten Treibhausgasemissionen) und Vorschlag für mögliche Zielwerte im Infrastrukturbau basierend auf der Auswertung von Projektdaten und Literatur. (Tabelle wird auf den nächsten Seiten fortgeführt)

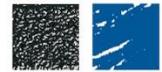
Objektgruppe	Objekttypen	Referenzwert		Systemgrenze gemäss DIN EN 15643	Betrachtete Lebensdauer [a]	Bestes Projekt [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Zielwert 2030 [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Zielwert 2040 [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Datengrundlage	
		[kg CO ₂ -eq / Einheit]	Einheit							
Fahrbahn, Strasse	Anschluss / Verzweigung	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden	
	Anschlussstrecke	1.2	m ² a	A1-A5, C1-C4	80	-	0.8	0.4	Mittelmässige Datengrundlage, weitere Projektdaten vorteilhaft, Instandsetzung fehlt	
	Bahnübergang	-	-	-	-	-	-	-	- fehlt, muss erst erarbeitet werden	
	Bushaltestelle Asphaltaufbau	2.5	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	40	2.1	1.7	0.8	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden	
	Bushaltestelle Betonaufbau	2.3	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	40	2.1	1.6	0.8	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden	
	Gehweg inkl. Randstein	1.1	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	1.1	0.7	0.4	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien	
	Kreisel Asphaltaufbau	1.5	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	1.2	1.0	0.5	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden	
	Kreisel Betonaufbau	1.1	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	1.0	0.7	0.4	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden	
	Offene Strecke ohne Richtungstrennung, Gemeindestrasse inkl. Randstein	1.2	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C5	80	1.0	0.8	0.4	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien	
	Offene Strecke ohne Richtungstrennung, Kantonsstrasse inkl. Randstein	1.5	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	1.0	1.0	0.5	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien	
	Offene Strecke mit Richtungstrennung, Nationalstrasse Asphaltaufbau CH	1.5	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	1.3	1.0	0.5	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien	
	Parkplätze	-	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Unterhaltsweg	-	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
Umfahrung	-	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden	
Fahrbahn, Gleis	1-Spurig pro Gleis	17.3	m a	A1-A5, C1-C4	25 - 60	15.3	11.5	5.8	Gute Datengrundlage inkl. Literatur, Instandsetzung fehlt	
	2-Spurig pro Gleis	16.3	m a	A1-A5, C1-C4	25 - 60	14.1	10.9	5.4	Gute Datengrundlage inkl. Literatur, Instandsetzung fehlt	
Kunstabauten	Brücken (Mittelwert aus Brückentypen)	10.5	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Der Mittelwert müsste noch mit den Brückentypen gewichtet werden	
	Balkenbrücken	10.4	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	-	
	Strassenbrücken	6.9	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	-	
	Hangstrasse	9.0	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	-	
	Bogenbrücken	4.0	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	-	
	Rahmenbrücken	4.8	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Brückenprojekte sind jeweils sehr individuell, hierzu gibt zu wenig Daten und keine Standardaufbauten resp.	
	Stahlbrücken	16.0	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Standardnormalprofil je Brückentyp. Allenfalls wäre eine	
	Stahlbetonbrücken	14.6	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- klassierung nach der Spannweite und nach der	
	Betonbrücken	5.3	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Brückenfunktion sinnvoll.	
	Holzbrücke	5.5	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	-	
	Eisenbahnbrücke	9.7	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	-	
	Diverse weitere Brücken	29.3	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	-	
	Wildtierüberführungen	9.3	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	7.2	6.2	3.1	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden	
	Unterführung	14.8	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C5	100	-	-	-	- Zu wenig Daten und fehlender Standardaufbau resp. Standardnormalprofil	
Überführung	4.9	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Zu wenig Daten und fehlender Standardaufbau resp. Standardnormalprofil		



Objektgruppe	Objekttypen	Referenzwert [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Einheit	Systemgrenze gemäss DIN EN 15643	Betrachtete Lebensdauer [a]	Bestes Projekt [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Zielwert 2030 [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Zielwert 2040 [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Datengrundlage
Tunnels	Strassentunnels, Bergmännische Tunnels (geschlossene Bauweise)	200.5	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Wenig Projektdaten, dafür gute Literatur vorhanden
	Strassentunnels, Tagbautunnels (offene Bauweise)	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Eisenbahntunnels, Bergmännische Tunnels (geschlossene Bauweise)	149.4	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Wenig Projektdaten, dafür gute Literatur vorhanden
	Eisenbahntunnels, Tagbautunnels (offene Bauweise)	154.0	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Wenig Projektdaten, wenig Literatur
	Galerie	276.0	lfm a	B3, B4, C1-C4	100	-	-	-	- Schlechte Datenlage, muss erweitert werden
Entwässerung / Kanalisation	Abwasserleitungen, DN300	0.5	lfm a	A1-A5, C1-C4	80	0.3	0.3	0.2	Gute Datengrundlage
	Abwasserleitungen, DN600	1.6	lfm a	A1-A5, C1-C4	80	0.5	1.1	0.5	Gute Datengrundlage
	Abwasserleitungen, DN800	2.4	lfm a	A1-A5, C1-C4	80	0.7	1.6	0.8	Gute Datengrundlage
	Becken	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Kanäle	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Leitungsgräben mit Abwasserleitungen, mit Kiessandumhüllung	8.4	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	4.6	5.6	2.8	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden
	Leitungsgräben mit Abwasserleitungen, mit Betonumhüllung	10.6	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	5.5	7.1	3.5	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden
	Pumpstation	3.9	kW a	A1-A3	15	-	-	-	- Der Betrieb resp. der dafür verwendete Strommix ist entscheidender als die Treibhausgasemissionen der Herstellung der Pumpe
	Betonschächte	2.1	Stk. a	A1-A3	80	-	1.4	0.7	Gute Datengrundlage aus Standardaufbauten und Normalien, sowie auch gute Projektdaten vorhanden
	Strassensammler (Beton)	1.2	Stk. a	A1-A3	80	-	0.8	0.4	Mittelmässige Datengrundlage, Definition von Standardnormaltypen hilfreich, weitere Daten erforderlich
	Kontrollschächte (aus Beton)	6.2	Stk. a	A1-A3	80	-	4.1	2.1	Mittelmässige Datengrundlage, Definition von Standardnormaltypen hilfreich, weitere Daten erforderlich
	Strassenabwasserbehandlungsanlage	1'315.0	Stk. a	A1-A3	70	-	876.7	438.3	
	Absetzbecken	87.5	Stk. a	A1-A3	70	-	58.3	29.2	Mittelmässige Datengrundlage, Definition von Standardnormaltypen hilfreich, weitere Daten erforderlich
	Rückhaltebecken	53.9	Stk. a	A1-A3	70	-	35.9	18.0	
Grobabscheider	10.2	Stk. a	A1-A3	70	-	6.8	3.4		
Ölrückhaltebecken	43.3	Stk. a	A1-A3	70	-	28.9	14.4		



Objektgruppe	Objekttypen	Referenzwert		Systemgrenze gemäss DIN EN 15643	Betrachtete Lebensdauer [a]	Bestes Projekt [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Zielwert 2030 [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Zielwert 2040 [kg CO ₂ -eq / Einheit]	Datengrundlage
		[kg CO ₂ -eq / Einheit]	Einheit						
Werkleitungen	Gasleitungen	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Kabelkanal, Kabelrohrblock	17.11	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	17.0	11.4	5.7	Gute Datengrundlage aus einem umfassenden Projekt mit Review
	Trinkwasserleitungen	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Stromübertragung mit Erdverkabelung	38.0	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	18.0	25.3	12.7	Gute Datengrundlage aus einem umfassenden Projekt mit Review
Übrige Bauten	Böschungssicherungen und Steinschlagschutz	0.08	lfm a	A1-A3	100	-	0.05	0.03	Schlechte Datenlage, muss erweitert werden
	Lärmschutzwand	2.4	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	2.3	1.6	0.8	Gute Datengrundlage, Projektdaten und Literaturwerte vorhanden
	Stützanker	0.12	lfm a	A1-A3	100	-	-	-	- Zu viele verschiedene Durchmesser und Ankertypen
	Stützmauern, Schwergewichtsstützmauer	4.5	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	3.5	3.0	1.5	Gute Datengrundlage, viele Projektdaten, Standardnormalaufbauten vorhanden, Literaturwerte vorhanden
	Stützmauern, Winkelstützmauer	3.2	m ² a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	100	2.8	2.1	1.1	Gute Datengrundlage, viele Projektdaten, Standardnormalaufbauten vorhanden, Literaturwerte vorhanden
	Stromübertragung mit Freileitungen	8.7	lfm a	A1-A5, B3, B4, C1-C4	80	7.6	5.8	2.9	Gute Datengrundlage aus einem umfassenden Projekt mit Review
	Flugpiste	1.8	m ² a	B3, B4, C1-C4	40	-	1.2	0.6	Schlechte Datenlage, nur ein Projekt vorhanden, welches eine Sanierung darstellt
Bunker	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden	
Gebäude oder NS und andere Anlagen	Rastplätze & -stätten	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Verkehrsmanagementzentrale	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden
	Werkhof und Stützpunkt	-	-	-	-	-	-	-	- Fehlt, muss erst erarbeitet werden



5.1.2 Datenlage für Referenz- und Zielwerte

Um valide Referenz- und Zielwerte zu ermitteln, ist bei den meisten Bauwerkstypen eine noch umfassendere Datengrundlage erforderlich:

- Fahrbahn, Strasse:
 - Anschluss und Verzweigung
 - Bahnübergänge
 - Parkplatz
 - Unterhaltsweg
 - Umfahrung
- Brücken (ausser Wildtierüberführungen)
- Tunnel
- Galerien
- Strassenabwasserbehandlungsanlagen SABA
- Werkleitungen: Gas, Trinkwasser
- Böschungssicherungen, Steinschlagschutz
- Flugpisten und Bunker (Armasuisse)
- Raststätten, Werkhöfe und weitere Gebäude wie Verkehrsmanagementzentrale (ASTRA)

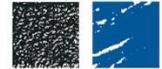
Bei den restlichen Bauwerkstypen:

- Fahrbahn, Strasse:
 - Gehweg
 - Gemeindestrasse
 - Kantonsstrasse
 - Nationalstrasse
 - Bushaltestellen und Kreisel
- Lärmschutzwände
- Stützanker und Stützmauern
- Gleise (Fahrbahn, Bahn)
- Freileitungen und Erdverkabelungen
- Abwasserleitungen, Kanäle, Schächte und Abläufe sowie weitere Kanalisationskomponenten

sind bereits gute Daten vorhanden, es wird jedoch auch hier empfohlen, weitere Daten zu sammeln und diese dann gemäss einem definierten Standard gleichermassen auszuwerten. Die Auswertung der Fahrbahnen basiert bereits auf definierten Standards.

5.1.3 Vorschlag für Einbindung in SNBS-Infrastruktur

Als erster Schritt wäre es wichtig, für jedes Infrastrukturbauprojekt ab einer gewissen Grösse (z.B. anhand finanzieller Kriterien festzumachen) eine Ökobilanz zu erstellen. Hier gilt es noch zu bestimmen, in welcher Projektphase dies geschehen sollte und wer dafür verantwortlich ist (Planer / Bauherr / Bauunternehmer). Ein Weg könnte der Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) darstellen. Für Infrastrukturbauprojekte gibt es spezifisch den SNBS-Infrastruktur mit Instrumenten, Hilfsmittel und Bewertungstools. Hier könnte die Anforderung für die Erstellung der Ökobilanz von Infrastrukturbauprojekten ergänzt werden. Wichtig ist, dass hierfür ein harmonisiertes resp. standardisiertes Vorgehen zur Erstellung der Ökobilanz vorgegeben wird. Im nachfolgenden Kapitel wird ein Vorschlag erläutert.



5.1.4 Methodische Setzungen definieren

Die methodischen Setzungen müssen eng vorgegeben werden, sodass kein Spielraum besteht und die Ergebnisse der Ökobilanzen vergleichbar sind. Die Erstellung eines solchen methodischen Rahmenwerks ist nicht trivial und bedarf eines separaten Projekts unter Beizug von Ökobilanzexpertinnen.

Folgende Aspekte müssen geklärt werden:

- Zu welcher Projektphase wird die Ökobilanz erstellt?
- Wer hat die Ökobilanz zu erstellen? Und muss sie überprüft oder sogar extern verifiziert werden?
- Welche Ökoinventardatenbank soll verwendet werden?
- Welche Ökoinventare fehlen?
- Wie sind die Systemgrenzen zu setzen?
- Mit welchen Wirkungsmodellen soll die Ökobilanz berechnet werden?
- Wie wird mit der Allokation bei Mehrproduktsystemen oder bei Recyclingprozessen umgegangen?
- Wie wird mit biogenem Kohlenstoff umgegangen? (Stichwort Pflanzenkohle in Asphalt oder Beton)
- Welche Lebenszyklusphasen (Herstellung, Errichtung, Nutzung und Entsorgung) sollen betrachtet werden? Separat oder als Summe?
- Welche weiteren technischen Daten werden benötigt für die Nachvollziehbarkeit und später fürs Benchmarking? Breite, Höhe, Länge, Durchmesser, Schichtstärken und ist eine weitere sinnvolle Unterteilung der Bauwerkstypen notwendig, z.B. Spannweite bei den Brücken?
- Funktionelle Einheit
- Wird die Lebensdauer miteinbezogen oder nicht?
- Werden Umweltproduktdeklarationen (EPD) zugelassen oder nicht bzw. mit welchen Anforderungen?
- Etc.

Es wird empfohlen, dass sich die methodischen Setzungen der zu erarbeitenden Ökobilanz-Methodik an den Bilanzierungsregeln der KBOB/ecobau-Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich (für Hochbau) [3] orientieren sollten, da dies eine ideale Vorgehensweise darstellen würde. Für den Infrastrukturbau besteht die Möglichkeit, die Bilanzierungsregeln [2] entweder direkt oder adaptiert zu übernehmen. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass der Datenqualität besondere Aufmerksamkeit gewidmet wird. Es ist erforderlich, zwei Ebenen von Daten zu unterscheiden:

1. Technische Vordergrunddaten aus den Projekten: Diesbezüglich ist zwischen drei Unterebenen der Daten zu unterscheiden: Materialart und -mengen, Maschinenstunden und Transportfahrleistungen.

2. Generische Hintergrunddaten aus einer Ökoinventar-Datenbank

Es wäre wünschenswert, wenn die technischen Vordergrunddaten und die generischen Hintergrunddaten zentral erfasst würden, sodass sie zu einem späteren Zeitpunkt für die Weiterentwicklung der Referenz- und Zielwerte herangezogen werden können. In dem Zusammenhang muss auch geklärt werden, wie mit den Umweltproduktdeklarationen EPD (Environmental Product Declaration) umgegangen wird respektive wie sich die Schweiz in Bezug auf Harmonisierung der Ökobilanzdaten mit der Europäischen Union positioniert. An dieser Stelle ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass im Infrastrukturbau noch nicht alle relevanten Ökoinventare vorhanden sind. Dies zeigt eine Untersuchung der Normenfachkommission NFK 5.5 des VSS [29]. Gemäss dem Aktionsplan 2024-2027 zur Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030 [30] soll mit der ersten Massnahme die Lücke in Datensätzen geschlossen werden und Ökoinventardaten sind digital



zur Verfügung zu stellen. Damit soll in naher Zukunft der BAFU-Ökobilanzdatenbestand mit ausreichend Inventardaten des Infrastrukturbaus bestückt sein. Die notwendigen Spezifikationen für die Erstellung von Ökoinventardaten sind beim BAFU erhältlich.

Unabhängig davon sollte eine neutrale Stelle die Datenbanken erstellen, verwalten und auch aktualisieren, z.B. wenn es neue CO₂-optimierte Betonsorten oder alternative Baumaterialien wie Flüssigboden gibt, welche in die Datenbank aufgenommen werden. Dies ist analog zur KBOB/ecobau-Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich [3], welche periodisch die publizierten Ökobilanzdaten aktualisiert.

Einen interessanten Ansatz zur methodischen Setzung der Ökobilanz-Methode liefert das ASTRA-Dokument «Dokumentation Ökobilanz-Methode, Anwendung für die Infrastruktur von Nationstrassen, ASTRA 8B001» [31]. Hier sind bereits viele der oben aufgeführten Fragen geklärt und die methodische Setzung könnte auf weitere Infrastrukturbaubereiche übertragen werden. Eine Möglichkeit zur Erfassung von Ökobilanzdaten auf Projektbasis könnte das von der Umtec Technologie AG und Ostschweizer Fachhochschule (Institut für Bau und Umwelt) entwickelte Ökobilanz-Tool «ECO₂nstruct» sein. Das Tool wurde für den Infrastruktur-Branchenverband Infra Suisse entwickelt und wird zurzeit von ihnen gehostet und verwaltet. Bei ECO₂nstruct ist eine Ökobilanzdatenbank mit den Emissionsfaktoren für CO₂ eq und UBP hinterlegt (könnte für den kumulierten Energieaufwand erweitert werden) und auch die von den Nutzerinnen eingegebenen Projektdaten sind gespeichert und abrufbar, z.B. für Auswertungen von Benchmarks.

Nach Schaffung der Datengrundlage können Referenz- und Zielwerte berechnet und publiziert werden. Diese müssen, basierend auf den Aktualisierungen im Hintergrund, aktuell gehalten und ebenfalls kontinuierlich überarbeitet werden. In den nächsten Jahren wird dann auch der Zielwert für 2030 mit einem Referenzwert ersetzt werden müssen.

5.2 Ambitionsniveaus

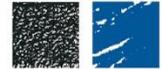
Die vorgestellten Referenz- und Zielwerte sollten aus Sicht der Autorinnen und Autoren mit verschiedenen Ambitionsniveaus ergänzt werden. Diese können basierend auf den in Kap. 4 berechneten Reduktionspotenzialen abgestützt und hergeleitet werden. Basierend darauf werden im Folgenden Ambitionsniveaus vorgeschlagen. Es werden jeweils Bandbreiten angegeben, weil das effektive Reduktionspotenzial je Bauwerkstyp (Brücke, Lärmschutzwand, Strasse etc.) schwankt:

5.2.1 Ambitionsniveau «Basis»

- **Beschreibung:** Zusätzliche freiwillige Massnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, die über die gesetzlichen Anforderungen hinausgehen und den «Best-Practice»-Ansatz darstellen. Einsatz von energieeffizienteren Maschinen und Materialien, Recycling von Baumaterialien, Verbesserung der Logistik zur Reduktion von Transportemissionen. Nutzung erneuerbarer Energien auf der Baustelle, umfangreicher Einsatz von emissionsarmen Baustoffen, Optimierung des gesamten Lebenszyklus des Projekts zur Emissionsminimierung.

2030:

- **Materialeinsatz:** Bis 2030 soll eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 10% im Vergleich zu den heutigen Standards erreicht werden. Dies wird durch den Einsatz von Niedertemperaturasphalt, erhöhten RC-Zugaberraten und CO₂-optimierten Zementsorten ermöglicht, wie in Kap. 4.1 und 4.3 beschrieben. Diese Materialien stellen eine kurzfristig umsetzbare Massnahme dar, die unmittelbar zu einer Reduktion der Emissionen führt.
- **Baumaschinen:** 2030 werden mindestens 25% der Baumaschinen mit alternativen Antrieben (batteriebetrieben, Biodiesel-basiert) ausgestattet. Dieser Schritt ist notwendig, um den Treibhausgas-Fussabdruck der Bauprozesse zu verringern und die Einführung neuer Technologien zu fördern.



- **Referenz- und Zielwerte:** Die bis 2030 festgelegten Referenz- und Zielwerte sollen **10-25% Reduktion** gegenüber dem Mittelwert aus Kap. 5.1.1 erreichen. Referenz- und Zielwerte konzentrieren sich auf die bedeutendsten Emissionsquellen wie Beton und Asphalt, um eine solide Grundlage für zukünftige Reduktionsschritte zu schaffen.

2040:

- **Materialeinsatz:** Bis 2040 soll die Reduktion der Treibhausgasemissionen auf mindestens 25% gesteigert werden. Dies wird durch eine verstärkte Anwendung von Recyclingmaterialien und fortgeschrittenen CO₂-optimierten Baumaterialien erreicht. Die Fortschritte bei der Materialwissenschaft und die Etablierung von Recyclingstrukturen werden dies ermöglichen.
- **Baumaschinen:** Der Anteil alternativ angetriebener Baumaschinen soll bis 2040 auf 50% erhöht werden. Dies setzt eine stärkere Marktdurchdringung und technologische Weiterentwicklung voraus, die bereits in den 2020er Jahren begonnen hat.
- **Referenz- und Zielwerte:** Die Referenzwerte sollen bis 2040 kontinuierlich verschärft werden, so dass sie **25-45% Reduktion bis 2040** gegenüber dem Mittelwert aus Kap. 5.1.1 aufweisen. Dies soll durch eine kontinuierliche Anpassung der Standards und die Integration neuer Technologien und Materialien möglich werden.

5.2.2 Ambitionsniveau «Fortgeschritten»

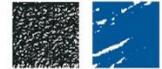
- **Beschreibung:** Zusätzliche freiwillige Massnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, die über die gesetzlichen Anforderungen hinausgehen und den «Best-Practice»-Ansatz darstellen.

2030:

- **Materialeinsatz:** Eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 25% wird bis 2030 angestrebt. Dies wird durch den verstärkten Einsatz von RC-Beton mit CO₂-Speicherung und durch die Substitution von Beton durch Holz in geeigneten Konstruktionen sowie durch den erhöhten Einsatz von RC-Asphalt und Natursteinen aus der Schweiz erreicht, wie in Kap. 4.1 bis 4.6 beschrieben. Zusätzlich sollen alternative Baustoffe wie Flüssigboden grossflächig eingesetzt werden.
- **Baumaschinen:** Die Einführung von mindestens 50% alternativ angetriebenen Baumaschinen ist bis 2030 geplant, um die Emissionen während der Bauphase signifikant zu senken.
- **Referenz- und Zielwerte:** Die gesetzten Referenz- und Zielwerte sollen **25-45% Reduktion bis 2030** gegenüber dem Mittelwert aus Kap. 5.1.1 erbringen. Der Fokus liegt auf der Stärkung von Innovationen und Anreizen für die Anwendung emissionsärmerer Materialien.

2040:

- **Materialeinsatz:** Bis 2040 soll eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 45% erreicht werden. Dies erfordert die umfassende Nutzung von innovativen Materialien wie CO₂-sequestrierenden Betonen mit tiefem Zementklinkeranteil und einer weiteren Erhöhung des Einsatzes von Recyclingbaustoffen, wo technisch möglich.
- **Baumaschinen:** Bis 2040 werden 100% alternativ angetriebene Baumaschinen und Transporte eingesetzt. Dies setzt voraus, dass alternative Antriebe nicht nur verfügbar, sondern auch ökonomisch wettbewerbsfähig geworden sind.
- **Referenz- und Zielwerte:** Die Referenz- und Zielwerte sollen bis 2040 so angepasst werden, dass eine **Reduktion von 45-65%** gegenüber dem Mittelwert aus Kap. 5.1.1 erreicht wird. Dies setzt voraus, dass die Methode der Lebenszyklusanalyse sowie zirkuläre und emissionsreduzierte Baustoffe in der Branche breit angewendet werden.



5.2.3 Ambitionsniveau «Hoch»

- Maximale Treibhausgasemissionsreduktion mit dem Ziel eines möglichst grossen Beitrags zur Klimaneutralität. Einsatz von energieeffizienteren Maschinen und Materialien, Recycling von Baumaterialien, Verbesserung der Logistik zur Reduktion von Transportemissionen. Nutzung erneuerbarer Energien auf der Baustelle, umfangreicher Einsatz von emissionsarmen Baustoffen, Optimierung des gesamten Lebenszyklus des Projekts zur Emissionsminimierung, vollständige Elektrifizierung der Baustellenfahrzeuge, Kompensation verbleibender Emissionen durch zertifizierte Klimaschutzprojekte oder Negativemissionstechnologien (NET).

2030:

- **Materialeinsatz:** Bis 2030 wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 45% durch die Dekarbonisierung des Materialeinsatzes angestrebt. Dies umfasst die vollständige Umstellung auf stark emissionsreduzierte Zement- und Asphaltvarianten sowie die maximale technisch mögliche Nutzung von Holz in tragenden Konstruktionen, basierend auf den Szenarien in Kapitel 4.
- **Baumaschinen:** Bis 2030 soll ein Anteil von 75% alternativ angetriebenen Baumaschinen erreicht werden. Dies erfordert erhebliche Investitionen in die Entwicklung (Maschinenherstellende) sowie die Schaffung von Marktanreizen (öffentlich-rechtliche Auftraggeberschaft).
- **Referenz- und Zielwerte:** Die Referenzwerte sollen bis 2030 auf einem Niveau festgelegt werden, dass eine **Reduktion von 45-65%** gegenüber dem Mittelwert aus Kap. 5.1.1 erreicht wird. Dies setzt grosse Reduktionen für die meisten Bauprozesse und Baumaterialien voraus, was auch deutliche Fortschritte beim Recycling und der Wiederverwendung von Materialien erfordert.

2040:

- **Materialeinsatz:** Bis 2040 wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 65% angestrebt. Die vollständige Dekarbonisierung des Materialeinsatzes und die Nutzung von fortschrittlichen Materialien wie emissionsarmen Baustoffen stehen im Fokus.
- **Baumaschinen:** Bis 2040 werden 100% der Baumaschinen und Transporte mit alternativen Antrieben eingesetzt.
- **Referenz- und Zielwerte:** Die Referenz- und Zielwerte werden so festgelegt, dass eine **Reduktion von 65-90% bis 2040** gegenüber dem Mittelwert aus Kap. 5.1.1 erreicht wird. Diese ambitionierten Ziele setzen voraus, dass die Integration der besten verfügbaren Technologien und Materialien gelingt.

Für die Ambitionsniveaus «Fortgeschritten» und «Hoch» braucht es technische Innovationen und ein wachsendes Angebot an emissionsreduzierten Baustoffen. Hierfür ist Planungssicherheit wichtig. Die Kommunikation und die Selbstverpflichtung zu Zielwerten durch Tiefbauämter und Politik können für Unternehmen Planungssicherheit schaffen, um die nötigen Investitionen zu tätigen. Aus Sicht der Autorinnen und Autoren müssen auch regulatorische Vorgaben in Betracht gezogen werden, die klare Anforderungen an die Reduktion von Emissionen formulieren und somit die Transformation hin zu einer klimaneutralen Bauweise unterstützen.



Tabelle 6: Zusammenfassung der THG-Reduktionspotenziale der unterschiedlichen Ambitionsniveaus in Bezug auf den Mittelwert aus Kap. 5.1.1. Es sind grosse Spannweiten aufgeführt. Die Idee dahinter ist, dass je Objekttyp ein konkreter Wert innerhalb der Spannweite gewählt resp. festgesetzt wird.

Ambitionsniveau	THG-Reduktion gegenüber Mittelwert aus Kap. 5.1.1	
	2030	2040
Basis	10-25%	25-45%
Fortgeschritten	25-45%	45-65%
Hoch	45-65%	65-90%

5.3 Anreizsysteme

Die Erreichung der ambitionierten Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen im Infrastrukturbau erfordert einerseits klare Vorgaben des Gesetzgebers und/oder des Bauherren (vgl. Kap. 5.1) sowie die Implementierung technischer Innovationen (vgl. Kap.4). Andererseits ist für das Funktionieren in der Praxis die Kombination mit Anreizsystemen (Bonus-Malus-Systeme, andere finanzielle Anreize, Vergünstigungen etc.) wichtig. Diese dienen der Sicherstellung der effektiven und effizienten Erreichung der angestrebten Reduktionsziele. Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine Vorstellung verschiedener möglicher Anreizmechanismen.

5.3.1 Bonus/Malus-Systeme

Das Bonus-System sieht für offerierende Unternehmen, die die festgelegten Referenz- und Zielwerte für Emissionen deutlich unterschreiten, finanzielle Anreize wie finanzielle Zuschüsse oder eine bevorzugte Behandlung bei der Vergabe öffentlicher Aufträge vor. Die positiven Anreize fördern nicht nur die Einhaltung der Ziele, sondern motivieren zudem zu einer Übererfüllung der Anforderungen.

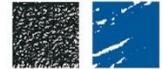
Im Falle einer Überschreitung sieht das Malus-System finanzielle Nachteile für die betroffenen Unternehmen vor. Dies kann durch die Verhängung von Strafzahlungen oder den Ausschluss von öffentlichen Ausschreibungen erfolgen.

Die Kombination von Belohnung und Bestrafung stellt ein differenziertes Anreizmodell dar, welches sowohl Anreize für Verbesserungen als auch Sanktionen für unzureichende Leistungen bietet. Dieses Bonus-Malus-System gilt es vertraglich festzuhalten. Im Folgenden sind mögliche Vertragsstrafen, durch die ein «Malus» umgesetzt werden könnte, beschrieben. Um mit Unvorhergesehenem wie Nachträgen oder Projektänderungen umzugehen, sollte das Anreizsystem eine transparente und dokumentierte Nachsteuerungsmöglichkeit vorsehen, die auf nachvollziehbaren Begründungen basiert und projektspezifische Anpassungen in definierten Grenzen erlaubt.

5.3.2 Vertragsstrafen

Die Vereinbarung von Vertragsstrafen stellt ein effektives und transparentes Instrument dar, damit Planer und auch Bauunternehmen, die ihnen auferlegten Verpflichtungen hinsichtlich der Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie der Einhaltung vertraglich festgelegter Grenzwerte ernst nehmen.

Der Einsatz von Vertragsstrafen erfolgt auf Basis entsprechender Vereinbarungen in Planer- und/oder Bauverträgen. Diese greifen, sofern ein Unternehmen die darin festgehaltenen Umweltziele oder Emissionsgrenzwerte nicht einhält. Die Höhe der Vertragsstrafe kann als fester Geldbetrag oder als prozentualer Anteil der Projektkosten definiert werden. Die Strafe wird fällig, sobald eine Überschreitung der Referenz- und Zielwerte nachgewiesen wird. Die Höhe der Strafe sollte dabei in einem angemessenen Verhältnis zur



Schwere der Verfehlung stehen, um sowohl eine abschreckende Wirkung als auch einen Anreiz für die Einhaltung der Vorgaben zu erzielen.

Der wesentliche Vorteil von Vertragsstrafen besteht darin, dass bereits bei Vertragsabschluss klare Erwartungen und Konsequenzen für die Nichteinhaltung von Umweltzielen definiert werden. Die Verbindlichkeit dieser Vorgaben führt dazu, dass Bauunternehmen nachhaltige und emissionsarme Lösungen in ihren Bauprojekten priorisieren müssen.

Anhand eines Beispiels soll die Anwendung verdeutlicht werden: In der Praxis könnten Vertragsstrafen beispielsweise dann greifen, wenn die Treibhausgasemissionen eines Projekts die im Vertrag festgelegten Grenzwerte überschreiten. Ein exemplarisches Szenario wäre folgendes: Ein Bauunternehmen, welches mehr CO₂ emittiert als vereinbart, wäre verpflichtet, für jede Tonne CO₂ oberhalb des Grenzwertes eine bestimmte Strafe zu entrichten. Die finanziellen Konsequenzen führen dazu, dass es für Unternehmen aus ökonomischer Perspektive vorteilhaft ist, von Beginn an Massnahmen zur Reduzierung von Emissionen zu ergreifen.

Die Einbindung von Vertragsstrafen gewährleistet ein hohes Mass an Verlässlichkeit und Durchsetzbarkeit. Die Implementierung umweltfreundlicher und innovativer Lösungen bereits in der Planungsphase stellt für Bauunternehmen einen Anreiz dar, sich mit den Zielen des Projekts, welche sich auch in den Umweltzielen widerspiegeln, zu identifizieren und diese zu erreichen, ohne dabei die Anwendung von Vertragsstrafen zu riskieren.

Nachfolgend werden drei Möglichkeiten für die Umsetzung von Vertragsstrafen erläutert. Hierbei gilt es vor allem dem Aspekt der Überprüfbarkeit Rechnung zu tragen. Am einfachsten ist die zur Verfügungstellung eines Dokuments mit hinterlegten Emissionsfaktoren, in der die Materialmengen, Maschinenstunden und Transportfahrleistungen eingetragen werden können. Die eingetragenen Mengen sollten anschliessend stichprobenartig überprüft werden.

5.3.2.1 Konventionalstrafen

Konventionalstrafen stellen eine vertraglich festgelegte Sanktion dar, welche bei einer Nichteinhaltung der vereinbarten Umweltziele oder Emissionsgrenzwerte verhängt wird. Sie stellen ein direktes Instrument zur Durchsetzung von Umwelanforderungen dar und fungieren als abschreckendes Instrument gegen die Überschreitung von Grenz- und Zielwerten.

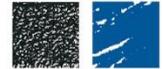
Anwendung im Infrastrukturbau: Im Rahmen öffentlicher Bauprojekte besteht die Möglichkeit, Konventionalstrafen in den Planer- und/oder Bauverträgen zu definieren. Im Falle der Nichteinhaltung der vertraglich festgelegten Grenzwerte ist der Planer oder das Bauunternehmen zur Zahlung einer zuvor definierten Strafe verpflichtet. Die Höhe der Strafe kann dabei prozentual zu den überschrittenen Emissionswerten oder als Pauschalbetrag festgesetzt werden.

Die Implementierung von Konventionalstrafen resultiert in einem hohen Mass an Verlässlichkeit und Verbindlichkeit, welches essenziell ist, um die festgelegten Emissionsziele im Infrastrukturbau zu erreichen.

5.3.2.2 Rückerstattung des Bietungsvorteils

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, im Falle nachgewiesener Verstösse eine Rückerstattung des sogenannten «Bietungsvorteils» zu verlangen. Dies impliziert, dass ein Unternehmen, welches durch die Nichteinhaltung der Umweltvorgaben einen Preisvorteil gegenüber anderen Bietern erlangt hat, zur Rückzahlung dieses Vorteils an den Auftraggeber rückwirkend verpflichtet ist. Diese Rückerstattung zielt darauf ab, Unternehmen, die sich nicht an die Vorgaben halten, durch niedrigere Angebotskosten daran zu hindern, sich einen unrechtmässigen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen.

Diese Mechanismen dienen somit der Sicherstellung eines fairen Wettbewerbs sowie der Einhaltung von Umweltzielen auch während der Ausführung von Bauprojekten. Sie fördern die Transparenz und Integrität im Vergabeprozess und stärken das Vertrauen in die Rechtmässigkeit öffentlicher Aufträge.



5.3.2.3 Finanzieller Ausgleich für die entstandenen externen Kosten

Umweltbelastungen, im vorliegenden Fall die Treibhausgasemissionen, führen zu sogenannten externen Kosten. Bei dieser Vertragsstrafe sind die Treibhausgasemissionen, welche über den vereinbarten Grenzwerten liegen, finanziell auszugleichen. Dieser Ansatz orientiert sich am Umweltpolitikinstrument der Internalisierung externer Kosten. Das Ziel besteht darin, die tatsächlichen gesellschaftlichen Kosten von Umweltbelastungen in die Preisgestaltung einzubeziehen und den Verursachern in Rechnung zu stellen. Es gibt bereits auch einige Unternehmen, welche interne Emissionspreise eingeführt haben.

5.4 Normen und Normalprofile

Um effektive Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen im Infrastrukturbau festzulegen, ist eine sorgfältige Integration und gegebenenfalls Anpassung bestehender Normen und Normalprofile erforderlich. Diese Normen bilden die technische Grundlage für Bauvorhaben und sind massgeblich für die Qualitätssicherung und Nachhaltigkeitsbewertung. Eine harmonisierte Anpassung an ökologische Zielsetzungen könnte daher eine signifikante Rolle in der Reduktion von Umweltbelastungen spielen.

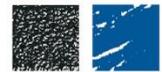
Gemäss einer Expertenbefragung der Professorin für Nachhaltiges Bauen an der Ostschweizer Fachhochschule, Simone Stürwald, kann folgendes Resümee gefasst werden:

Es besteht zweifelsfrei die Möglichkeit, Normen im Hinblick auf Nachhaltigkeit zu überarbeiten und anzupassen, wobei das Potenzial hierfür noch nicht vollständig ausgeschöpft ist. Der exakte Umfang sowie das Ausmass dieser Potenziale lassen sich vermutlich nicht exakt beziffern, da eine Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen ist. Dazu zählen unter anderem der technische Fortschritt sowie die Akzeptanz neuer Bauweisen. Ein besonders prägnantes Beispiel ist der Mindestzementgehalt. Eine Anpassung dieser Anforderung könnte zu einer Reduktion des Treibhausgas-Fussabdrucks im Beton von bis zu 20% führen, was angesichts des hohen Betonverbrauchs im Bauwesen einen signifikanten Beitrag leisten würde.

Des Weiteren existieren zahlreiche, spezifische Optimierungsansätze, die einzelnen Bauanwendungen einen Vorteil verschaffen. Diesbezüglich seien materialgerechtes und materialeffizientes Bauen erwähnt, welches bereits bei der Planung ansetzt und dazu führt, dass Ressourcen intelligenter genutzt und Emissionen reduziert werden.

Beim SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein), insbesondere im Bereich der Tragwerksnormen, wird jede Revision, jede neue Norm und jedes neue Merkblatt einem strukturierten und formalen Prüfprozess durch mehrere Gremien unterzogen. Der hier beschriebene Prozess zielt darauf ab, mögliche Optimierungspotenziale im Hinblick auf die Nachhaltigkeit zu identifizieren. Auch ausserhalb der regulären Revisionszyklen werden grosse und einflussreiche Normenkommissionen aufgefordert, ihre Normen auf Verbesserungspotenzial hin zu überprüfen. Des Weiteren sieht der SIA vor, dass jede Norm im Fünf-Jahres-Rhythmus einer umfassenden Überprüfung unterzogen wird. Dadurch soll sichergestellt werden, dass aktuelle Entwicklungen und technologische Fortschritte berücksichtigt werden.

Folglich lässt sich konstatieren, dass seitens des SIA Optimierungen im Fluss sind und die nachhaltige Bauweise ein kontinuierliches Thema bleibt. Dennoch muss nach zahlreichen Workshops und Diskussionen festgestellt werden, dass letztlich vor allem die Auftraggeber, Planer und alle am Bau Beteiligten dazu angehalten sind, die jeweiligen Möglichkeiten zur Optimierung auszuschöpfen. In diesem Kontext sind insbesondere die folgenden Stichwörter von Relevanz: Suffizienz in Standard und Menge, also die Begrenzung auf das Wesentliche, materialeffizientes Bauen, welches die Ressourcen möglichst sparsam einsetzt, sowie materialgerechtes Bauen, bei dem jedes Material so eingesetzt wird, dass es optimal zur Funktionalität des Bauwerks beiträgt. Die Integration dieser Prinzipien in die tägliche Praxis würde bereits einen wesentlichen Beitrag zur Förderung der Nachhaltigkeit im Bauwesen leisten.



5.4.1 ASTRA Normalprofile und Fachhandbücher

Die Normalprofile und Fachhandbücher des Bundesamts für Strassen (ASTRA) bieten detaillierte Vorgaben für den Strassenbau. Diese Dokumente sollten um ökologische Bewertungskriterien ergänzt werden, die die Auswahl von Materialien und Technologien nach ihrer Umweltverträglichkeit fördern. Dies könnte beispielsweise durch die Integration spezifischer Referenz- und Zielwerte für Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkte (UBP) für alle relevanten Bauprozesse geschehen. Das würde bedeuten, dass im Vorfeld eine eigenständige Ökobilanz für Standard-Bauprozesse benötigt würde. Diese Auswertung ist auf Basis der in dieser Studie vorliegenden Referenz- und Zielwerte nicht möglich. Eine solche Erweiterung würde es ermöglichen, umweltfreundlichere Methoden direkt in die Planung und Ausführung von Strassenbauvorhaben zu integrieren.

5.4.2 VSS-Normen

Die Normen des Verbands der Schweizerischen Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) könnten ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Festlegung ökologischer Standards im Infrastrukturbau spielen. Hier wäre es sinnvoll, die bestehenden Normen, um ökologische Kriterien und spezifische Umweltindikatoren zu erweitern. Zum Beispiel könnte die Implementierung von Referenz- und Zielwerten für die Nutzung von recycelten Materialien oder für die Reduktion von Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Asphalt und Beton eine direkte und messbare Wirkung haben.

5.4.3 SIA-Normen

Die Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) setzen technische und qualitative Standards für den gesamten Bau- und Planungsprozess. Eine ökologische Überarbeitung dieser Normen könnte darauf abzielen, die Lebenszykluskosten und Umweltauswirkungen von Bauprojekten systematisch zu bewerten und zu minimieren. Insbesondere die Einführung von Modellen zur Bewertung der Treibhausgasemissionen in allen Phasen eines Bauprojekts könnte dazu beitragen, die Umweltauswirkungen signifikant zu reduzieren – ähnlich dem Merkblatt SIA 2032 «Graue Energie» im Hochbau.

5.5 Anwendung

5.5.1 Ziele und Nutzen der Anwendung

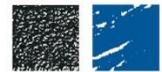
Die Umsetzung von Referenz- und Zielwerten für graue Emissionen im Infrastrukturbereich kann unterschiedliche Ziele verfolgen, die je nach Anwender-Perspektive voneinander abweichen:

- Instrument zur Erreichung der Klimaziele
- Projekt-Portfolio-Ökobilanzierung
- Nachhaltigkeitsreporting und Benchmarking
- Nachhaltigkeitsstandards und öffentliche Beschaffung
- Projektoptimierung

Diese Aspekte werden nachfolgend einzeln kurz beleuchtet. Je nach Anwendung wäre auch die Einführung interventionsspezifischer Referenzwerte (z.B. separat für eine Deckschichterneuerung) zielführend. Dies wurde jedoch im Rahmen dieser Grundlagenstudie nicht behandelt.

5.5.1.1 Instrument zur Erreichung der Klimaziele

Gewisse Bauherren müssen politische Klimaziele erreichen, die auch den Tiefbau betreffen. Insbesondere betrifft dies die zentrale Bundesverwaltung, die bis 2040 inklusive vor- und nachgelagerter Emissionen



mindestens Netto-0-Emissionen erreichen muss – oder auch den Kanton Baselstadt mit seinem Klimaziel bis 2037. Referenz- und Zielwerte stellen für die Zielerreichung Instrumente dar, die auch Transparenz und Fortschrittsmessung ermöglichen.

5.5.1.2 Projekt-Portfolio-Ökobilanzierung

Für einen Bauherren oder auch für die Planenden können Referenz- und Zielwerte als Plausibilitätscheck und auch für Benchmarking einer Projekt-Portfolio-Ökobilanzierung verwendet werden. Wenn ein Bauherr z.B. 20 Strassenbauprojekte laufen hat, können Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen eine gute Orientierung als Art «Benchmark» bieten, um zu sehen, wie das Projekt-Portfolio hinsichtlich ihrer Ökobilanz steht und in welche Richtung es sich entwickeln soll.

5.5.1.3 Nachhaltigkeitsreporting und Benchmarking

Bauherren, Bauunternehmen und auch Planende können Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen für ihr Nachhaltigkeitsreporting verwenden und aufzeigen, wo die Ökobilanz ihrer Bauprojekte in Relation zu den Referenz- und Zielwerten zu liegen kommt. Dabei können diese Werte auch als Benchmarks verwendet werden.

5.5.1.4 Nachhaltigkeitsstandards und öffentliche Beschaffung

In der öffentlichen Beschaffung werden Nachhaltigkeitsstandards immer wichtiger. Die hier vorgestellten Ambitionsniveaus, Anreizsysteme und die Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen können für die Ausgestaltung ökologischer Zuschlagskriterien verwendet werden.

5.5.1.5 Projektoptimierung

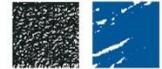
Insbesondere Planende profitieren von Referenz- und Zielwerten, an denen sie sich orientieren und ihre Projekte, zum Beispiel im Rahmen eines Variantenstudiums, vergleichen und optimieren können.

5.5.2 Projektphasengerechter Einbezug

Im Rahmen der SIA 112/2, welche die Norm für das Projektmanagement im Bauwesen darstellt, wird ein strukturierter und projektphasengerechter Einsatz von Referenz- und Zielwerten für graue Emissionen im Infrastrukturbau empfohlen. Dies dient dazu, Umweltaspekte und Nachhaltigkeitsziele systematisch in die Bauplanung und -ausführung zu integrieren. Hierbei wird besonders darauf Wert gelegt, dass die ökologischen Kriterien in allen Phasen des Projekts von der Planung bis zur Fertigstellung und darüber hinaus berücksichtigt werden.

5.5.2.1 Projektvorbereitung und strategische Planung

- In dieser Phase können, die in dieser Studie erarbeiteten Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen im Infrastrukturbau zur groben Orientierung, für Benchmarking oder auch als Unterstützung für strategische Überlegungen herangezogen werden. Im Rahmen von Vorstudien können die Referenz- und Zielwerte ebenfalls zur Entwicklung des Planungsprozesses und den damit verbundenen Entscheidungen herangezogen werden.
- Die Zielsetzung muss klar definiert und dokumentiert werden, um sicherzustellen, dass alle Projektbeteiligten (Architekten, Ingenieure, Bauunternehmer) die umweltbezogenen Ziele verstehen und diese in ihre Planung integrieren können.



5.5.2.2 Planungsphase

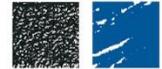
- In der Planungsphase können Referenz- und Zielwerte ihr grösstes Potenzial ausspielen. Denn sie sind für Planende ideal, um Variantenvergleiche vorzunehmen und diese dann anhand der Referenz- und Zielwerte zu evaluieren. Planende haben den grössten Einfluss auf die Ökobilanz eines Bauprojekts, weshalb insbesondere die Planungsphase sehr wichtig ist. So können Planende spezifische Lösungen entwickeln, um die Umweltauswirkungen zu minimieren und die Referenz- und Zielwerte einzuhalten. Dazu gehört vor allem der Umgang mit dem geplanten Einsatz der Materialmengen und der Einsatz möglichst nachhaltiger Materialien. Die konstruktive Ausgestaltung hat einen grossen Einfluss auf die später in der Ausführung zum Einsatz gelangenden Materialmengen. Diese wiederum sind Ökobilanz bestimmend.
- Die Einhaltung der Referenz- und Zielwerte sollte durch vorläufige Simulationen und Bewertungen überprüft werden, z.B. mittels GreenBIM oder anderen softwaregestützten Lösungen, um Anpassungen und Optimierungen vor Baubeginn zu ermöglichen. Anreizsysteme und Ambitionsniveaus sollen aus Sicht des Bauherrn nicht nur für Bauunternehmen in der Ausführung, sondern auch für Planende in der Planungsphase verwendet werden.
- Bei der Planung beziehen sich die verantwortlichen Akteure auf eine Vielzahl von Dokumenten, die als Grundlage für die Umsetzung dienen. Dazu zählen unter anderem Normen, Normalprofile, Fachhandbücher, Wegleitungen, Merkblätter sowie weitere unterstützende Dokumente. Eine Planung, welche über die Normen hinausgeht und einzelne Aspekte von Normen und Fachhandbüchern im Hinblick auf die Ökobilanz bewusst anders umsetzt bzw. diese in Frage stellt, weist ein beträchtliches Potenzial auf und bietet die Möglichkeit, einen bedeutenden ökologischen Einfluss zu nehmen. Diesbezüglich sei darauf verwiesen, dass beispielsweise die maximal zulässigen Recyclingasphalt-Zugaberaten in Deckschichten in Frage gestellt und anhand eines Pilotprojekts getestet werden können. Ferner besteht die Möglichkeit, die Mindestzementgehalte für einzelne Betonbauwerkselemente zu reduzieren. Dabei ist jedoch stets sicherzustellen, dass die Bauwerkssicherheit gewährleistet bleibt. Um die Einhaltung der genannten Kriterien zu gewährleisten, ist die Hinzuziehung von Fachexperten, beispielsweise von der EMPA oder anderen Materialprüfinstituten, sowie von Experten aus Normenfachkommissionen erforderlich. In der Regel ist es empfehlenswert, derartige Innovationen im Rahmen von Pilotprojekten mit wissenschaftlicher Begleitung zu evaluieren. Auch die Zulassung innovativer, über eine Norm hinausgehender Materialien obliegt in der Regel den Planenden. Als Beispiele seien hier ein CO₂-optimierter Beton oder der Einsatz von Flüssigboden anstelle von Hüllbeton genannt.

5.5.2.3 Ausschreibung und Vergabe

- Im Rahmen der Ausschreibung ist gemäss des revidierten Beschaffungsgesetzes seit dem 1. Januar 2021 die Nachhaltigkeit als Kriterium zu berücksichtigen. Diesbezüglich sind insbesondere auch ökologische Zuschlagskriterien zu nennen. Die genannten Kriterien eignen sich insbesondere für den Einbezug der Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen sowie für die Einbindung unterschiedlicher Ambitionsniveaus, inklusive der Implementierung eines Anreizsystems. Es ist von essenzieller Bedeutung, dass die ökologischen Zuschlagskriterien klar in den Vergabeunterlagen aufgeführt werden. Die Bieter müssen in ihren Angeboten darlegen, wie sie die festgelegten Referenz- und Zielwerte erreichen wollen.
- Die Auswahl der Auftragnehmer erfolgt nicht nur nach Kostenkriterien, sondern auch nach der Fähigkeit, die ökologischen Zuschlagskriterien zu erfüllen.

5.5.2.4 Ausführungsphase

- Während der Bauausführung ist die kontinuierliche Überwachung und Dokumentation der Einhaltung der Referenz- und Zielwerte notwendig. Eine solche Überwachung sollte von einer unabhängigen auf Ökobilanzdaten spezialisierte Institution erfolgen, welche die Ökobilanz fortlaufend nachrechnet oder



ein bereits bestehendes Ökobilanztool auswertet. Fortlaufende Umweltüberwachung und regelmäßige Berichte helfen, Abweichungen frühzeitig zu erkennen und korrigierende Massnahmen einzuleiten.

- Die Implementierung von umweltfreundlichen Bautechniken und -verfahren spielt eine entscheidende Rolle bei der Minimierung der Umweltauswirkungen während der Bauausführung.

Der projektphasengerechte Einsatz von Referenz- und Zielwerten für graue Emissionen für Infrastrukturbauten nach SIA 112/2 unterstützt somit eine umfassende und effektive Integration von Umwelt- und Nachhaltigkeitskriterien in Bauprojekte. Dieser Ansatz fördert nicht nur eine nachhaltige Bauweise, sondern trägt auch langfristig zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen bei.

6 Fazit

6.1 Grundlagen für Referenzwerte – Modul 1

Die in dieser Studie erfassten Daten ermöglichen die Berechnung von Mittelwerten der Treibhausgasemissionen je funktioneller Einheit verschiedener Bauwerkstypen im Infrastrukturbau. Auf dieser Grundlage wurden Referenz- und Zielwerte vorgeschlagen. Abb. 5-1 zeigt eine Übersicht der Mittelwerte unterschiedlicher Bauwerkstypen. Brücken sind in der vorliegenden Berechnung nicht enthalten. Aufgrund ihres individuellen Charakters bräuchte es weitere Abklärungen, ob eine Kategorisierung und Ableitung von Mittelwerten Sinn machen.

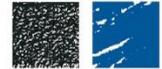
Die Mittelwerte (und somit auch die Referenz- und Zielwerte) basieren auf dem jeweiligen Stand der Daten und der Datenbanken (Hintergrunddatenbanken und Ökoinventare). Sobald es ein Update der Datenbanken gibt, kann es vorkommen, dass sich die Mittelwerte verändern oder sich die Schwerpunkte verlagern. Hinzu kommen methodischen Updates der Wirkmodelle der Ökobilanz, wie zum Beispiel bei der Veröffentlichung neuer Charakterisierungsfaktoren für Treibhausgase oder ein Update der Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte).

6.2 Reduktionspotenziale – Modul 2

Ein zentraler ökologischer Hebel liegt bei den Materialien, insbesondere Beton, Asphalt, Stahl und bei den Natursteinen. Damit wird die Wichtigkeit der erfolgreichen Umsetzung von Fahrplänen der Industrie hin zu Netto-Null unterstrichen.

Folgende Erkenntnisse können basierend auf der Reduktionspotenzialanalyse der Umweltwirkung im Infrastrukturbau zusammengefasst werden:

- Fahrbahn: Asphaltbauweise schneidet besser ab (auch in Einbezug der Umweltbelastungspunkte über den gesamten Lebenszyklus einer Strasse), Ausnahmen bilden Kreisel und Bushaltestellen. Hier ist die Betonbauweise ökologisch gleichwertig bis sinnvoller (je nach Bewertungsmethode). Hebel bestehen darin, möglichst viel Recyclingasphalt einzusetzen und nach Möglichkeit Niedertemperaturasphalt zu verwenden.
- Wildtierüberführungen: Holz bringt gegenüber Beton einen leichten ökologischen Vorteil.
- Lärmschutzwände: Die niedrigste Menge an Treibhausgasemissionen weisen die Lärmschutzwände aus reinen Naturmaterialien wie Erdwall oder Steinkörbe auf. Ebenfalls niedrige Treibhausgasemissionen haben die Lärmschutzwände aus Beton und je nach Bauart jene aus Holz.



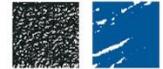
- Bei den Tunnel zeigt die «offene Bauweise» leicht tiefere Treibhausgasemissionen als die «geschlossene Bauweise». In Bezug auf die Umweltbelastungspunkte und den kumulierten Energieaufwand kann hierzu keine Aussage gemacht werden.
- Bei den Abwasserleitungen schneidet das Material Geopolymerbeton hinsichtlich der Treibhausgasemissionen am besten ab. Die Rohrumhüllung mit Sand oder Flüssigboden hat deutlich tiefere Umweltauswirkungen als mit Beton. Bei den Kunststoffrohren schneidet die Entsorgung (grössenteils werden Stand heute Kunststoffrohre in KVA verbrannt) schlecht ab. Ein Recyclingsystem für Kunststoffrohre birgt ein signifikantes Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Unter Betrachtung der Umweltbelastungspunkte und des kumulierten Energieaufwandes der Rohre sind zusätzlich die Materialien Beton und Kunststoff (nur bei UBP) ökologisch vorteilhaft gegenüber anderen Rohrmaterialien (Steinzeug, Gusseisen).
- Bei den Infrastrukturbauten zur Stromübertragung sind Freileitungen mit allen drei Bewertungsmethoden ökobilanziell besser als Erdverkabelungen (Werkleitungen). Freileitungen sind jedoch aufgrund des Terrains oder anderer raumplanerischer Aspekte nicht immer möglich, wobei auf die Erdverkabelung ausgewichen wird. Hier schneidet die Bauweise «offener Graben» mit Kabelrohrblöcken am besten ab, gefolgt von Phasen- und Strangrohren. Verfahren im Untertagebau (gesprengter oder gefräster Stollen) sind ökobilanziell nachteilig.
- Im Direktvergleich weisen Winkelstützmauern durchschnittlich tiefere Treibhausgasemissionen, Umweltbelastungspunkte und einen geringeren kumulierten Energieaufwand als Schwergewichtsstützmauern auf. Die Wahl des Stützmauertyps ist jedoch hauptsächlich von geologischen und statischen Voraussetzungen abhängig.
- Böschungssicherungen mit Geflechtsabdeckung weisen aufgrund der kleineren Materialmengen halb so hohe Treibhausgasemissionen auf wie Sicherungen mit Spritzbetonschale.

Es ist darauf hinzuweisen, dass weitere Optimierungsansätze bestehen, die nicht in dieser Studie untersucht wurden und das Potenzial zur Emissionsreduktion ergänzen, wie insbesondere materialgerechtes und materialeffizientes Bauen, welches bereits bei der Planung ansetzt und dazu führt, dass Ressourcen intelligenter genutzt und Emissionen reduziert werden. Eine weitere Möglichkeit wäre Suffizienz in Standard und Menge, also die Begrenzung auf das Wesentliche. Ebenso ist eine verbesserte Koordination (Beispiel: Strasseninfrastruktur und darunterliegende Leitungsnetze) essenziell, um unnötige Eingriffe und Emissionen zu vermeiden.

6.3 Praktische Synthese – Modul 3

In Modul 3 wird betont, dass die Definition und Anwendung von Referenz- und Zielwerten für Treibhausgasemissionen im Infrastrukturbereich einen wichtigen Beitrag leisten kann, um nachhaltige Bauweisen zu fördern und die Umweltbelastungen signifikant zu reduzieren. Die praktische Synthese demonstriert, dass Ansätze, wie der Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) und Ökobilanz-Datenbanken, beispielsweise jene des Bundesamts für Umwelt (BAFU), wertvolle Grundlagen bereitstellen, um diese Werte für Infrastrukturprojekte anzupassen. Ein wesentlicher Aspekt ist die Integration dieser Referenz- und Zielwerte in alle Phasen der Infrastrukturprojekte, von der Planung bis zur Ausschreibung. Die Entwicklung solcher Standards bzw. die Integration in solche Standards wird als essenziell erachtet, um klimafreundliche Innovationen und Anreize im Bauwesen zu fördern.

Ein weiterer Fokus des Moduls 3 liegt auf der Identifikation von Anreizsystemen, wie beispielsweise Bonus-Malus-Modellen, welche Unternehmen dazu motivieren sollen, die Referenz- und Zielwerte einzuhalten oder gar zu übertreffen. Gleichzeitig wird die Relevanz einer zentralen Datenbasis mit einem einheitlichen methodischen Rahmen betont, um die Vergleichbarkeit und Transparenz der Emissionsdaten im Infrastrukturbereich zu gewährleisten.



Die Synthese lässt den Schluss zu, dass der Weg zu einem emissionsarmen Infrastrukturbau zwar herausfordernd, aber machbar ist. Es wird darauf hingewiesen, dass aus Sicht der Autorinnen und Autoren neben technischen Innovationen auch die Anpassung des rechtlichen Rahmens sowie die Schaffung von Anreizen von entscheidender Bedeutung sind. Der Aufbau einer umfassenden Datengrundlage, kombiniert mit methodischen Anpassungen und einem klaren regulatorischen Rahmen, wird als essenziell erachtet, um die Emissionen im Infrastrukturbau signifikant zu reduzieren und die Klimaziele zu erreichen.

Folgende Aspekte müssen erfüllt sein, damit die weitere Erarbeitung für Referenz- und Zielwerte im Infrastrukturbau gelingen:

- **Schaffung besserer und einheitlicher Datengrundlagen für Ökobilanz- und Projektdaten:** Für Vorgaben von Zielwerten für graue Emissionen im Infrastrukturbau, sei es in freiwilligen Standards oder perspektivisch allgemeingültig in Verordnungen, benötigen die hier betrachteten Objekttypen (Strasse, Gleis, Werkleitungen, Kunstbauten etc.) eine bessere Datengrundlage für einerseits Ökobilanzdaten und andererseits für Projektangaben. Deswegen wird in diesem Bericht auch von Referenzwerten gesprochen. Die Daten können auch aus Normalien/ Normen/ Standardaufbauten etc. stammen. Einige Objekttypen könnten mit einem kleinen Mehraufwand auf das notwendige Niveau gehoben werden, wie z.B. die Strasse (Gehwege, National-, Kantons- und Gemeindestrassen, Kreisell, Bushaltestellen etc.) oder Lärmschutzwände oder die Kanalisation. Andere Objekttypen benötigen deutliche mehr Aufwand, wie z.B. Kunstbauten oder Tunnel. Der Aufwand unterscheidet sich je nach Objekttyp, für Strassen ist er überschaubar.
- **Regelmässige Datenaktualisierung:** Die verwendeten Emissionsdaten müssen regelmässig aktualisiert werden, um technologische Fortschritte und veränderte Marktbedingungen zu berücksichtigen. Dies kann durch ein zentrales Ökobilanzsystem erfolgen.
- **Zentralisierung der Ökobilanzdaten:** Eine zentrale Plattform für die Erfassung und Auswertung von Ökobilanzdaten sorgt für transparente, vergleichbare Ergebnisse und bildet die Grundlage für Referenz- und Zielwerte.
- **Kombination mit Anreizsystemen (Bonus-Malus):** Durch finanzielle Anreize oder Strafen, basierend auf der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte, könnten Bauunternehmen motiviert werden, besonders klimafreundliche Bauweisen anzuwenden. Dies müsste vertraglich festgehalten werden.
- **Planung und Projektierung:** Diese wurde in diesem Bericht nicht berücksichtigt. Allfällige Anreizsysteme in der Projektierung der Projekte könnten zu einer Optimierung der Materialmengen und geringem Unterhaltsaufwand führen, um ein vielen Ansprüchen genügendes ausgewogenes Bauprojekt zu erstellen. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Ökobilanzierung aus. Die Optimierung der Umweltwirkungen beginnt somit bereits in der frühen Phase der Planung und Projektierung und setzt sich in der späteren Ausführung durch die Bauunternehmungen fort.

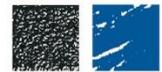
Damit die Anwendung in der Praxis gelingt müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- **Einbindung in den Planungsprozess:** Referenz- und Zielwerte müssen bereits in der frühen Planungsphase definiert und in alle Projektschritte integriert werden, um die Emissionsziele langfristig zu erreichen.
- **Förderung von Best Practices:** Die Implementierung eines Benchmarking-Systems ermöglicht es, Best Practices und emissionsarme Bauweisen in der gesamten Branche zu identifizieren und zu fördern. Allenfalls finden solche Best-Practice-Ansätze Eingang in Richtlinien, Fachhandbücher oder sogar in Normen.



- **Klar definierte Verantwortlichkeiten:** Die Zuweisung klarer Verantwortlichkeiten für die Einhaltung der Emissionsziele, sowohl auf Ebene der Auftraggeber als auch der ausführenden Bauunternehmen, ist entscheidend. Die Projektierungsbüros wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt.
- **Schulung und Sensibilisierung:** Alle Beteiligten in der Bauindustrie – von Planern bis zu Bauunternehmen – sollten gezielt geschult werden, um die Vorteile und Anwendungen emissionsarmer Technologien und Verfahren zu verstehen. Hierzu stehen entsprechende Kurse zur Verfügung, welche zum Beispiel die Nachhaltigkeit im Tiefbau und eine nachhaltige Planung und Ausführung thematisieren.

Schliesslich sollte ein smarterer Politikmix dabei helfen, optimale Rahmenbedingungen zu schaffen, damit Unternehmen und insbesondere Planungs- und Projektierungsbüros mehr in die Entwicklung und Bereitstellung von emissionsreduzierten und recycelten Materialien und in eine interdisziplinäre Planung investieren. Beispiele sind klimapolitische Vorgaben, Forschungs- und Innovation oder Aus- und Weiterbildung sowie Information und Beratung. Darüber hinaus sollte nach einer Übergangsphase, in der mit freiwilligen Labels und Projekten von Tiefbauämtern Erfahrungen gesammelt wurden, geprüft werden, ob schweizweit gültige Referenz- und Zielwerte für graue Treibhausgasemissionen im Tiefbau eingeführt werden sollten. Im Hochbau besteht bereits ein gesetzlicher Auftrag an die Kantone, Grenzwerte für die grauen Emissionen zu erlassen. [32]



7 Ausblick

Der Infrastrukturbereich sieht sich wie alle Sektoren mit der dringenden Herausforderung konfrontiert, die Treibhausgasemissionen im Hinblick auf die Erreichung der Klimaziele zu reduzieren. Referenz- und Zielwerte können einen effektiven Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen leisten. Im Bereich des Hochbaus wurde dieses Thema bereits vor über 10 Jahren systematisch angegangen. Die bereits bestehenden Ansätze, wie der Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS), die Ökobilanzdaten des Baubereichs der KBOB/ecobau sowie die Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022) oder die SIA 2032 «Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden», bieten wertvolle Grundlagen, die für den Infrastrukturbau adaptiert werden sollten. Die genannten Ansätze erlauben eine systematische Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauprojekten sowie eine gezielte Reduktion von Emissionen.

Ogleich ein zeitlicher Vorsprung besteht, waren auch im Hochbau ähnliche Herausforderungen und Hürden zu überwinden, wie sie derzeit im Infrastrukturbereich bestehen.

Um die Adaption und Umsetzung möglichst zeitnah zu ermöglichen, ist der Aufbau einer umfassenden Datengrundlage für Referenz- und Zielwerte im Infrastrukturbereich von essenzieller Bedeutung. Diese Datenbasis sollte auf einer einheitlichen Methodik zur Berechnung der Ökobilanz von Infrastrukturprojekten basieren und durch eine zentrale Stelle verwaltet werden, welche sowohl die Daten als auch die Projektergebnisse sammelt und der Branche zugänglich macht. Zentral ist auch eine transparente und differenzierte Methodik zur Bestimmung der Lebensdauern, welche für die Ökobilanzierung angewendet werden, da diese einen massgeblichen Einfluss auf das Resultat der Ökobilanz haben. Die Lebensdauer von Baumaterialien sollte auf empirischen Daten, normativen Vorgaben (z.B. SIA, VSS) und Praxiswissen basieren.

Die Etablierung einer zentralen Datendrehscheibe würde nicht nur die Vergleichbarkeit und Transparenz der Daten verbessern, sondern auch eine gezielte Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsstandards im Infrastrukturbereich ermöglichen. Diese Massnahmen sind von entscheidender Bedeutung, um die notwendigen Schritte zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Bauwesen zügig und effizient umzusetzen.

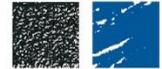
Die Resultate der vorliegenden Untersuchung legen nahe, dass die im Rahmen dieser Studie ermittelten, auf Mittelwerten je Objekttyp (Strasse, Gleis, Kunstbauten etc.) basierenden Vorschläge für Referenz- und Zielwerte eine erste Groborientierung darstellen. Konkrete Vorgaben für Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen im Infrastrukturbaubereich können auf Basis der vorliegenden Datengrundlage für die meisten Objekttypen noch nicht erfolgen. Einzelne Objekttypen, wie z.B. die Strassen, wurden bereits nach Standards ausgewertet und weisen somit eine gute, vergleichbare Datenbasis auf. Die Datenbasis für Lärmschutzwände und die Kanalisation ist ebenfalls gut und umfassend. Demgegenüber wird der Objekttyp «Kunstbauten» einen deutlich höheren Mehraufwand erfordern. Zunächst muss eine sinnvolle Einteilung (beispielsweise über Spannweite, Länge, Brückentyp etc.) erfolgen, woraufhin eine Neuberechnung potenzieller Referenz- und Zielwerte vorgenommen werden kann. Dies gilt im Wesentlichen auch für die Datengrundlage für Tunnelbauwerke. Eine sinnvolle Einteilung in gruppierte Bauweisen und charakteristischen Merkmalen (Verwendungsart Bahn – Strasse, Länge, Querschnittsgrösse) wird als Grundlage für weitere Berechnungen vorgeschlagen.

Nach der Konkretisierung der Referenz- und Zielwerte pro Objekttyp (allenfalls sogar interventionsspezifisch) sollten in einem nächsten Schritt die Weiterentwicklung von Daten und Methodik sowie die Integration in freiwillige Labels erfolgen. Die Erhebung der Ökobilanzen von Infrastrukturprojekten ist hierfür von grosser Bedeutung. Einige Referenzwerte wie zum Beispiel von Fahrbahnen (Gehweg, Gemeinde-, Kanton- und Nationalstrassen, Bushaltestellen und Kreisell) könnten in den SNBS-Infrastruktur aufgenommen werden.

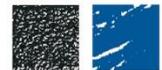


Referenzen

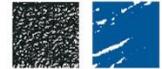
- [1] EN 15643-5:2017, „Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Teil 5 Leitfaden zu den Grundsätzen und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke,“ SN EN 15643-5:2017, 2018-11-01.
- [2] KBOB, ecobau, IPB, „Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 7.0,“ Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich, Bern, 2024.
- [3] KBOB, ecobau und IPB, „UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2022: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022,“ Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern, 2022.
- [4] IPCC 2021, „Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group + to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York USA, 2021.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Climate Change 2007: Synthesis Report,“ Valencia, 2007.
- [6] R. Frischknecht und S. Büsser Knöpfel, „Ökofaktoren Schweiz 2013 gmäss der Methode der ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2013.
- [7] A. Gautschi, „Green Economy - The Method of Ecological Scarcity in Policy Making, in Economics and Environmental Monitoring Division,“ *Bundesamt für Umwelt (BAFU)*, 2013.
- [8] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren UBP'21,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2022.
- [9] T. Kägi, F. Dinkel, R. Frischknecht, S. Humbert, J. Lindberg, S. De Mester, T. Ponsioen, S. Sala und U. W. Schenker, „Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?" - SETAC Europe 25th Annual Meeting,“ *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 Mai 2015.
- [10] KBOB, ecobau und IPB, „KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2022: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022,“ Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern, 2023.
- [11] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, R. Hischier, S. Hellweg, S. Humbert, M. Margni, T. Nemecek und M. Spielmann, „Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods,ecoinvent report No. 3,“ ecoinvent, Zürich, 2007.
- [12] A. Horat, C. Leibacher, R. Luchsinger und R. Elmer, „Kostenanalyse Kreisel Sonnenplatz, Semesterarbeit HS22,“ OST Ostschweizer Fachhochschule, Bauingenieurwesen, Rapperswil, 2022.
- [13] S. Kytzia, L. Wörle und P. Grewenig, „Treibhausgas- und Umweltbilanzierung von Bauprojekten im Tiefbau,“ Ost Schweizer Fachhochschule, Institut für Bau und Umwelt IBU, Zürich, 2024.
- [14] S. Conrad, G. Roberts, T. Kägi und C. Stettler, Umweltbilanz Bahninfrastruktur - Inventare Bau Infrastruktur und illustrative Betrachtung Entwicklung, Basel: Bundesamt für Verkehr BAV, Carbotech, 2024.



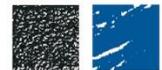
- [15] S. Prof. Dr. Kytzia, L. Dipl. Ing. Mathis und U. Dr.-Ing. Stöckner, „Dekarbonisierung von Lärmschutzsystemen für eine nachhaltige Zukunft der Straßeninfrastruktur,“ Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Deutschland, Bundesministerium für Klimaschutz, Österreich, Bundesamt für Straßen, Schweiz, FFG, Juli 2024.
- [16] IPCC 2021, „Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group + to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom an New York USA, 2021.
- [17] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Ökoinventardaten der Bundesverwaltung (BAFU:2022),“ Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern, 2022.
- [18] F. Werner und R. Frischknecht, „Arbeitsbericht: Technische Grundlagen zur Prüfung eines Wechsels auf die europäischen EPD Normen für die ökologische Bewertung von Baustoffen und Gebäuden,“ Studie im Auftrag von cemsuisse, Lignum, Stahlbau Schweiz, KBOB, BAFU und Amt für Hochbauten Stadt Zürich, Zürich, 2018.
- [19] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Wald, Holz und CO2,“ [Online]. Available: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/fachinformationen/funktionen_leistungen/wald--holz-und-co2.html. [Zugriff am 01 04 2025].
- [20] IBU, UMTEC Ostschweizer Fachhochschule, Ökobilanzierung zu Kaltmischfundationen im Einsatz für Tragschichten, IBU, UMTEC Ost im Auftrag des Kanton Zürichs, 2021.
- [21] European Asphalt Pavement Association EAPA, „Towards Net Zero - A Decarbonisation Roadmap for the Asphalt Industry,“ EAPA, Brüssel, Belgien, 2024.
- [22] A. Favier, C. De Wolf, K. Scrivener und G. Habert, „A sustainable future for the european cement and concrete industry, technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050,“ ETH Zürich, Zürich, 2018.
- [23] M. Alig, R. Frischknecht, L. Krebs, . L. Ramseier und P. Stolz, „LCA of climate friendly construction materials,“ Treeze im Auftrag vom Bundesamt für Energie BFE und dem Amt für Hochbauten der Stadt Zürich AHB, Uster, 2020.
- [24] F. Winnefeld, A. Leemann, A. German und B. Lothenbach, „CO2 storage in cement and concrete by mineral carbonation,“ Elsevier, 2022.
- [25] M. Klingler und D. Savi, „Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen,“ im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Zürich, 2021.
- [26] C. Bataille, S. Stiebert und F. Li, „Net Zero Steel - Facility Level Global Net-Zero Pathways under varying Trade and geopolitical Scenarios, FINAL TECHNICAL & POLICY REPORT FOR THE NET-ZERO STEEL PROJECT,“ Global Energy Monitor, Columbia, USA, 2024.
- [27] ETH, EPFL, EMPA, PSI und weitere private Ökobilanzbüros, „Life Cycle Inventory Ecoinvent 3.8,“ ecoinvent.org, Zürich, 2022.
- [28] KBOB, ecobau und IPB, „KBOB Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2016; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2016,“ Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern, 2016.
- [29] C. Stettler und G. Vorhoff, „Ökoinventare für Verkehrsinfrastruktur,“ Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2023.



- [30] Bundesrat, „Aktionsplan zur Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030,“ 2024. [Online]. Available: www.admin.ch.
- [31] J. Buchheister, C.-H. Demory, T. Pohl und D. Osterwalder, „Dokumentation Ökobilanz-Methode, Anwendung für die Infrastruktur von Nationalstrassen, ASTRA 8B001,“ Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strassennetze N, Standards und Sicherheit SSI, Bern, 2024.
- [32] Fedlex, „SR 730.0 - Energiegesetz vom 30. September 2016,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/762/de?version=20240201>.
- [33] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Climate Change 2022: Synthesis Report,“ Genf, 2022.
- [34] R. Frischknecht, P. Gerber, N. Egli, A. Braunschweig und F. Dinkel, „Ökofaktoren Schweiz 2021 gmäss der Methode der ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2021.
- [35] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit,“ Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2021.
- [36] ETH Zürich, Prof. Dr. Stefanie Hellweg, „Vorlesung: Grundzüge “Ökologische Systemanalyse”,“ in *Methodik Ökobilanz Wirkungsbilanz*, Zürich, 2017.
- [37] C. Holldorb und . T. Mayer, „Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen,“ Im Auftrag des Deutschen Asphaltverbandes e.V. DAV, Biberbach, 2009.
- [38] T. Zinke, „Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken - Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte,“ Karlsruher Institut für Technologie KIT, Karlsruhe, 2016.
- [39] S. . Setsobhonkul, S. Kaewunruen und J. Sussman , „Lifecycle Assessments of Railway Bridge Transitions Exposed to Extreme Climate Events. *Front. Built Environ.* 3:35.,“ doi: 10.3389/fbuil.2017.00035, 2017.
- [40] V. Thiebault, G. Du und R. Karoumi, „Design of railway bridges considering life cycle assessment, institution of Civil Engineering, *Bridge Engineering*,“ 2011.
- [41] T. C. E. Dequidt, „Life Cycle Assessment of a Norwegian Bridge,“ NTNU, Trondheim, 2012.
- [42] J. Hammervold, M. Reenaas und H. Brattebo, „Environmental Life Cycle Assessment of Bridges,“ *Journal of Bridge Engineering*, 2013.
- [43] D. Marinez-Munoz, J. V. Marti und V. Yepes, „Comparative Life Cycle Analysis of Concrete and Composite Bridges varying Steel Recycling Ratio, *Materials*,“ 2021.
- [44] N. Bertola, C. Küpfer, E. Kälin und E. Brühwiler, „Assessment of the Environmental Impacts of Bridge Designs Involving UHPFRC. *Sustainability*,“ 2021.
- [45] Prof. Dr. Götz, „Forschungsprojekt zur Optimierung von Brückenbauwerken im Hinblick auf die CO2-Bilanz, Kiehl,“ Fachhochschule Kiel, Kiel, 2021.
- [46] G. Du und R. Karoumi, „Environmental life cycle assessment comparison between two bridge types: reinforced concrete bridge and steel composite bridge,“ KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [47] S. Kytzia, T. Pohl und A. Bachmann, „Vergleichende Ökobilanz für zwei Varianten der Wildtierbrücke zur Wiederherstellung der Landschaftsverbinding Nr. 49,“ Baudirektion, Kanton Zürich, Zürich, 2021.



- [48] T. Pohl und S. Haessig, „Ökobilanzierung für die Wildtierüberführung A1 im Kanton Thurgau,“ Tiefbauamt des Kantons Thurgau, Frauenfeld, 2024.
- [49] SCHIG mbH, „Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastrukturbau - Ermittlung von Emissionskennwerten für die Bewertungsprozesse im Zuge der Erarbeitung des Zielnetzes 2040,“ Wien, 2022.
- [50] J. Sauer, „Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur,“ Technische Universität München, München, 2016.
- [51] EBP Schweiz AG, „Optimierung des Energieverbrauchs, der Kosten sowie der Klimawirkung beim Bau und Betrieb von Bahntunnel, Schlussbericht des Projekts "Graue Energie Bahntunnel" (GreTu),“ EBP Schweiz AG, 2023.
- [52] E. Hoxa, M. Scherz, H. Kreiner und A. Passer, „Life cycle assessment of tunnel structures: Assessment of the New Austrian Tunneling Method using a case study, Earth and Environmental Science,“ DOI: 10.1088/1755-1315/1078/1/012117, 2022.
- [53] F. Gschösser, „Fernpasstunnel Ökobilanzstudie 2023, Land Tirol - Landesstrassenverwaltung B179 Fernpasstrasse,“ floGeco GmbH, Natters, 2023.
- [54] M. Koehler, A. Braun und K. Czirwitzky, „Klinaneutraler Lärmschutz - Nachhaltige Optimierung und ganzheitliche Bilanzierung von Lärmschutzbauwerken,“ Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2022.
- [55] R. McGinley, „Noise Wall Materials Life Cycle Analysis and Suitability Investigation,“ Report for Department of Planning, Transport and Infrastructure, EDGE, 2020.
- [56] F. Werner, „Ökobilanz von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände, eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA,“ Lignum, Verband der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft, 2019.
- [57] S. Tavajoh, „Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of the Roadside Noise barriers - master's thesis in Design and Construction Project Management,“ Department of architecture and civil engineering Chalmers University of Technology, Götheburg, Schweden.
- [58] J. Pons, V. Penadés-Plà, V. Yepes und J. V. Marti, „Life cycle assessment of earth-retaining walls: An environmental comparison,“ Journal of Cleaner Production, 2018.
- [59] I. P. Damians, A. Josa und R. J. Barhur, „Environmental assessment of earth retaining wall structures,“ Environmental Geotechnics, Institution of Civil Engineering, 2015.
- [60] S. Kytzia, „Ökobilanz Wildtierbrücke: Das Wichtigste zum Vergleich Holz - Stahlbeton,“ Ostschweizer Fachhochschule, Zürich, 2021.
- [61] T. Pohl und S. Haessig, „Ökobilanzierung für die Wildtierüberführung A1 im Kanton Thurgau,“ Umtec Technologie AG im Auftrag der Jagd- und Fischereiverwaltung des Kanton Thurgau, Hombrechtikon, 2024.
- [62] A. Chabrelie und H. Thömen, „Dekarbonisierung Infrastrukturbau,“ Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Biel/Bienne, 2024.
- [63] J. Stark, *Erforschung und Innovation des Werkstoffs Holz für den Einsatz im Infrastrukturbau als Dekarbonisierungs-Beitrag*, 2021.

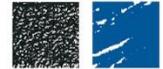


- [64] C. Brunner, „Climate effect of temporarily stored CO₂ within building materials,“ in *80. Discussion forum on life cycle assesment*, Zürich, ETH Zentrum Campus, 2022.
- [65] Y. Niu und G. Fink, „Life Cycle Assessment on modern timber bridges,“ *Wood Material Science & Engineerin*, Nr. 14:4, pp. 212-225, 2019.
- [66] L. Bouhaya, R. Le Roy und A. Feraille-Fresnet, „Simplified environmental study on innovative bridge structure,“ *Environmental Science and Technology*, p. 2066–2071, 2009.
- [67] Bundesamt für Strassen ASTRA, „Handbuch NISTRA 2022 - Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte,“ 2023.
- [68] Bundesamt für Statistik, „Infrastruktur und Streckenlänge,“ 01 01 2024. [Online]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/streckenlaenge.html>. [Zugriff am 11 2024].
- [69] M. F. Dejan Lukic, „Zustandserhaltung und Werterhaltung der Schweizer Kantonsstrassen,“ Infra Suisse, 2017.
- [70] Rensch/Grud, „Viele Bushaltestellen sind immer noch nicht behindertengerecht,“ Schweiz Aktuell, SRF, 2021.
- [71] F. Flepp, „Testen Sie ihr Kreiselwissen,“ SRF, Schweiz, 2024.
- [72] B. f. U. BAFU, „Schweizer Abwasserreinigung - Eine Erfolgsgeschichte,“ BAFU, Schweiz, 2017.
- [73] J. S. H.-P. D. D. B. K. Dr. Stefan Binggeli, „Kosten und Leistungen der Abwasserentsorgung,“ Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Glattbrugg, Schweizerischer Verband Kommunale Infrastruktur (SVKI), Bern, Schweiz, 2023.
- [74] T. Pohl, „Reduktion der Umweltbelastung des Tiefbauamts des Kantons Zürich,“ Umtec Technologie AG, Hombrechtikon, 2021.



Begriffe und Abkürzungen

CO ₂ eq	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente («equivalents»)
Erhaltungsmassnahmen	Erhaltungsmassnahmen sind bauliche Massnahmen, die darauf abzielen, den Zustand eines Bauwerks zu verbessern oder dessen Verschlechterung zu verlangsamen. Zu diesen Massnahmen zählen Instandhaltungs-, Instandsetzungs- sowie Erneuerungsmassnahmen.
FU	Funktionelle Einheit der Ökobilanz, engl. «Functional unit»
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotential
Graue Emissionen	Nach SIA Merkblatt 2032:2020 «Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden» umfassen die «grauen Treibhausgasemissionen» die Herstellungsphase (inkl. Rohstoffaufbereitung, Transporte und Herstellung), die Errichtungsphase (Transport, Errichtung, Einbau), einen allfälligen Ersatz während der Nutzungsphase sowie die Entsorgungsphase (Rückbau, Transport, Abfallbehandlung, Beseitigung)
Instandsetzung	Durch eine Instandsetzung wird eine Verbesserung der Bausubstanz erreicht. Eine Instandsetzungsmassnahme kann zum Beispiel der Ersatz einer Asphaltdeckschicht sein.
KEA	Kumulierter Energieaufwand; Ökobilanzmethode zur Erfassung des Gesamtenergiebedarfs inkl. «Grauer Energie». KEA zeigt den direkten und auch den indirekten nicht-erneuerbaren Energieverbrauch, welche über Charakterisierungsfaktoren in MJ Öl-Equivalente umgerechnet werden. Diese Wirkungskategorie beinhaltet die energetischen Inputs für die Gewinnung, Herstellung und Entsorgung aller benötigten Materialien und Hilfsstoffe und bewertet dabei den Bedarf an nicht erneuerbaren primären Energieträgern wie Kohle, Öl oder Uran.
Klimawirkung	Durch Treibhausgase verursachte Erwärmung des Klimas, nur klimaschutzrelevante Emissionen werden berücksichtigt. Die Bewertung wird anhand eines Charakterisierungsfaktors in kg CO ₂ -Äquivalente vorgenommen. Methan ist z.B. 28-mal so klimaschädlich wie Kohlenstoffdioxid → 1kg Methan = 28 kg CO ₂ -eq, Die Klimawirkung berücksichtigt keine anderen Auswirkungen auf die Umwelt wie z.B. Giftigkeit eines Stoffes auf Mensch & Natur.
Lebensdauer	Die Lebensdauer (= Nutzungsdauer) bezieht sich auf die Dauer von der Errichtung oder dem Neubau einer Infrastruktur bis zu ihrem Abbruch.
LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse = Ökobilanz, die Ökobilanz, auch Lebenszyklusanalyse oder life cycle assessment (LCA) genannt, ist ein Hilfsmittel zur Analyse der Umweltwirkung. Der Wortteil «Öko» steht dabei für die Umweltwirkung und der Wortteil «Bilanz» für die buchhalterische Erfassung sämtlicher Umweltwirkungen über den ganzen Lebenszyklus eines Produkts oder Prozesses in quantitativer/numerischer Form. Wichtig dabei ist, dass alle Emissionen und Ressourcenverbräuche während der Entstehung, über die eigentliche Lebenszeit bis zur Entsorgung oder Wiederverwertung in die Lebenszyklusanalyse einfließen – «von der Wiege bis zur Bahre».
THG	Abkürzung für Treibhausgasemissionen
UBP	Umweltbelastungspunkte, Einheit der Methode der ökologischen Knappheit



Umweltwirkung

Gesamtheitliche Betrachtung aller relevanten Wirkungskategorien wie z.B. Überdüngung, Übersäuerung des Bodens, Wasserverbrauch, Energieressourcen, Emissionen in Luft, Wasser und Boden, die Biodiversität sowie auch Klima (Klimawirkung ist eine Teilmenge der Umweltwirkung). Bei der Bewertung der Umweltwirkung werden viel mehr Umweltaspekte berücksichtigt als in einer Klimawirkungsanalyse.



Abbildungen

- Abb. 2-1: Lebenszyklusphasen von Infrastrukturbauwerken im Allgemeinen. Eigene Grafik basierend auf der DIN EN 15643..... 20
- Abb. 3-1: Treibhausgasemissionen einer Schweizer Autobahn-Anschlussstrecke. Berücksichtigt wurden die Herstellung der Materialien, die Transporte und Baumaschinen für die Errichtung und die Entsorgung (inkl. Transport) der Materialien (Lebensdauer 80 Jahre). Die Instandsetzung und Nutzung wurden nicht berücksichtigt..... 23
- Abb. 3-2: Treibhausgasemissionen von je fünf Standard-Bushaltestellen von verschiedenen Kantonen aus Beton und Asphalt. Die Lebensdauer beträgt 40 Jahre (Beton: keine Instandsetzung, Asphalt: zweimal Deckschicht und einmal Binderschicht ersetzt). 25
- Abb. 3-3: Treibhausgasemissionen von Standard – Gehwegen inklusive beidseitigem Randstein von verschiedenen Gemeinden und Städten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG) und Graubünden (GR), Zug (ZG), Luzern (LU) und Solothurn (SO). Lebensdauer aller Projekte: 80 Jahre. Instandsetzungen: 3x Deckschicht, 1x Tragschicht..... 25
- Abb. 3-4: Treibhausgasemissionen von je vier Asphalt- und Betonkreiseln sowie einem Betonkreisel inklusive Asphaltanschlüssen aus einem Gesamtprojekt (Nr. 9). Standardfahrbahnaufbauten der Kantone: Graubünden, St. Gallen, Thurgau, Zug und vom ASTRA. Nummer 4 und 8 stammen aus einer Studie [12]. Lebensdauer: 80 Jahre. 26
- Abb. 3-5: Treibhausgasemissionen der Fahrbahnaufbauten inklusive beidseitigem Randstein von 10 verschiedenen Gemeinden in den Kantonen Zürich, Luzern und Graubünden. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht. 27
- Abb. 3-6: Treibhausgasemissionen der Standardaufbauten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG), Graubünden (GR), Zug (ZG), Basel-Stadt (BS), Freiburg (FR), Solothurn (SO) und Luzern (LU) über alle Lebenszyklusphasen und für verschiedene Belastungsklassen (T1 bis T6). Als Vergleich ist ganz rechts schraffiert der Mittelwert von 17 Kantonsstrassen aus einer Studie des städtischen Tiefbauamtes der Stadt Zürich [13] angegeben. Rot gestrichelt ist der Mittelwert der Standardaufbauten abgebildet. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht. 28
- Abb. 3-7: Treibhausgasemissionen verschiedener Schweizer Standardfahrbahnaufbauten in Asphaltbauweise (kompletter Aufbau: Deck-, Binder- Trag- und Foundationsschicht mit Frostschuttschicht) sowie ein Vergleichswert aus der Literatur. Bei den Standardaufbauten unterscheiden sich die Schichtstärken, die Belagsarten (z.B. Deckschicht SDA 8-12 oder MR 8 und Binder-/ Tragschicht mit EME oder PmB) und der Recyclinganteil (RC) in den verschiedenen Schichten von 0% (Deckschicht) bis zu 100% (Foundationsschicht) (Details siehe Anhang B1.6). Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht. Abkürzungen; SDA: Semidichter Asphalt, MR: Rauasphalt, EME: Hochmodul-Asphalt, PmB: Polymermodifiziertes Bitumen, RC: Recyclinganteil eingestuft in 3 Klassen..... 29
- Abb. 3-8: Treibhausgasemissionen pro Meter Gleis und Jahr für einen eingleisigen und einen zweigleisigen Streckenabschnitt der SBB sowie die Literaturwerte aus der BAV Studie «Umweltbilanz Bahninfrastruktur» [14]. Die THG des zweigleisigen Projektes beziehen sich ebenfalls auf die tatsächliche Gleislänge (zwei statt vier Schienen in der Breite). Die Lebensdauer der ausgewerteten Projekte variiert je nach Material und wurde aus der Studie [14] übernommen (z.B. Stahlschiene 25 Jahre, Schwellen 40 Jahre, Schotter 60 Jahre, Rest 33 Jahre)..... 30
- Abb. 3-9: Mittlere Treibhausgasemissionen von Projekten der UTech und aus der Literatur (siehe Anhang B3) von verschiedenen Brückentypen. Der Fehlerbalken gibt jeweils die Standardabweichung der gemittelten Werte je Brückentyp an. Die Datengrundlage und Unsicherheiten sind unterschiedlich je nach Projekt und Brückentyp. 31



Abb. 3-10:	Treibhausgasemissionen für einen Laufmeter Tunnel von verschiedenen Tunnelbauweisen wie Fussgänger, Bahn- und Strassentunnel. Legende: TVM: Tunnelvortriebsmaschine, SBW: Spritzbetonbauweise, TBM: Tunnelbohrmaschine, MUF: Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels, SM: Schildmaschine, SPV: Sprengvortrieb. Der Wert bezieht sich jeweils auf eine Tunnelröhre (Ausnahme: Projekte 12, 13 & 15: 2 Röhren, jedoch wurde hier nur der Rohbau bilanziert). Hintergrundinformationen zu den Tunnelbauwerken: Tabelle 26 im Anhang.....	32
Abb. 3-11:	Treibhausgasemissionen einer Instandsetzung einer Galerie. Nutzungsdauer: 100 Jahre. .	33
Abb. 3-12:	Treibhausgasemissionen einer Böschungssicherung mit einer rückverankerten Spritzbetonschale und einer Böschungssicherung einer flexiblen Geflechtsabdeckung pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet ist nur die Herstellung der Materialien, ohne Einbau, Transporte, Entsorgung oder Instandsetzung.	34
Abb. 3-13:	Treibhausgasemissionen verschiedener Lärmschutzwände inkl. Foundation aus unterschiedlichen Materialien pro Quadratmeter Sichtfläche und Jahr. Lebensdauer: 80 Jahre.	34
Abb. 3-14:	Treibhausgasemissionen der Herstellung von verschiedenen Ankertypen mit unterschiedlichen Durchmessern (DN [mm]).....	36
Abb. 3-15:	Treibhausgasemissionen verschiedener Winkelstützmauern und Schwergewichtsmauern pro Quadratmeter Sichtfläche (Länge mal totale Höhe) und Jahr. Lebensdauer aller Projekte: 100 Jahre.....	37
Abb. 3-16:	Treibhausgasemissionen verschiedener Freileitungssysteme zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind die Phasen der Herstellung, Errichtung, Instandsetzung und Entsorgung.	37
Abb. 3-17:	Treibhausgasemissionen einer Instandsetzung einer Flugpiste. Lebensdauer: 40 Jahre.	38
Abb. 3-18:	Treibhausgasemissionen der Herstellung des Materials pro Laufmeter und Jahr der jeweiligen Rohre für die drei betrachteten Durchmessern 300 mm, 600 mm und 800 mm.	39
Abb. 3-19:	Treibhausgasemissionen von Leitungsgräben mit einer Kiessandumhüllung (inkl. Vergleich zur Betonumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.	40
Abb. 3-20:	Treibhausgasemissionen von Leitungsgräben mit einer Betonumhüllung (inkl. Vergleich zur Kiessandumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.	40
Abb. 3-21:	Treibhausgasemissionen der Herstellung verschiedener Pumpen mit unterschiedlicher Leistung pro Kilowatt und Jahr.	41
Abb. 3-22:	Treibhausgasemissionen der Herstellung von verschiedenen Schachttypen aus Beton pro Stück und Jahr.	42
Abb. 3-23:	Treibhausgasemissionen einer Strassenabwasserbehandlungsanlage (SABA) und verschiedener Teilelemente davon, wie beispielsweise ein Absetzbecken. Berücksichtigt wurden die Herstellung des Materials und dessen Entsorgung, jedoch kein Einbau und keine Instandsetzungen.....	43
Abb. 3-24:	Treibhausgasemissionen verschiedener Erdverkabelungsvarianten zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind alle Phasen des Lebenszyklus.	44
Abb. 4-1:	Beitrag der Treibhausgasemissionen der Materialien, die für den Bau, Betrieb und Unterhalt kantonaler und städtischer Infrastruktur eingesetzt werden. 4 Materialien ergeben zusammen fast 90% der Treibhausgasemissionen aller Materialien und Bauabfälle. Daten stammen von der UTech. ..	48



Abb. 4-2: Reduktionspotenzial durch den Einsatz von Recyclingasphalt in neuen Belägen im Vergleich zur Verwendung von Belägen ohne Recycling. 50% RC-Gehalt bezieht sich auf die Deck- und 60% RC-Gehalt auf die Binder-, Trag- und Fundationsschicht.....	50
Abb. 4-3: Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Niedertemperaturasphalt im Vergleich zu Heissasphalt.	51
Abb. 4-4: CO ₂ -Absenkpfad des europäischen Asphaltverbandes EAPA, Quelle: [21]	52
Abb. 4-5: Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von emissionsreduzierten Belägen gemäss «Netto-Null»-Fahrplan des EAPA.	53
Abb. 4-6: Treibhausgasemissionen pro Kubikmeter Tiefbaubeton NPK D (ohne Bewehrung) gemäss KBOB [3] und gemäss Projektdaten der UTech.	54
Abb. 4-7: CO ₂ -Absenkpfad der globalen Zement- und Betonindustrie GCCA. Quelle: GCCA, 2024.....	55
Abb. 4-8: Treibhausgasemissionen-Vergleich von 1 m ³ Beton und Flüssigboden (hergestellt vor Ort – in-situ oder im Flüssigboden-Werk, ex-situ).....	56
Abb. 4-9: Treibhausgasemissionen pro Maschinenstunde eines beispielhaften Hydraulikbaggers mit einem Einsatzgewicht von 18 Tonnen und einer maximalen Leistung von 120 kW.....	59
Abb. 5-1: Treibhausgasemissionen verschiedener Infrastruktur pro Quadratmeter Fahrbahn- oder Sichtfläche (Lärmschutzwände, Stützmauern) und Jahr. Die Säulen stellen jeweils den Mittelwert je Bauwerkstyp für die angegebene Lebensdauer (z.B. 80 Jahre, mit oder *ohne Instandsetzung) dar. Die Datenqualität/Detailgrad der Infrastrukturbauten ist unterschiedlich.	61
Abb. 0-1: Treibhausgasemissionen von je drei Bushaltestellen aus Beton (Projekte 1 bis 3) und Asphalt (Projekte 4 bis 6). Projekt 1: Betonplatte und behindertengerechte Haltekante, Projekt 2: Einschichtige Betonplatte, Projekt 3: Zweischichtige Betonplatte, Projekt 4: Asphaltbelag T5, Projekt 5: Asphaltbelag SDA 4-16, Projekt 6: Asphaltbelag Gussasphalt. Lebensdauer aller Projekte: 40 Jahre.....	110
Abb. 0-2: Treibhausgasemissionen der von 10 verschiedenen Gemeindestrassenprojekten. Betrachtet wurden die Herstellung, Errichtung und Entsorgung, jedoch keine Instandsetzung. Lebensdauer: 80 Jahre.	114
Abb. 0-3: Treibhausgasemissionen verschiedener Deutscher Nationalstrassen in Asphalt und Betonbauweise. Lebensdauer Asphaltbauweise: 80 Jahre, Lebensdauer Betonbauweise: 90 Jahre. Die mit Stern * Markierten Betonprojekte verwendeten Waschbeton anstelle von Grinding.....	121
Abb. 0-4: Böschungsstabilisierung mit einer flexiblen Geflechtsabdeckung	132
Abb. 0-5: Böschungsstabilisierung mit einer rückverhängten Spritzbetonschale.....	132
Abb. 0-6: Treibhausgasemissionen verschiedener Lärmschutzwände aus der Literatur. Die Lebensdauern sind je nach Studie unterschiedlich und in den Klammern angegeben (z.B. 20 Jahre)	135
Abb. 0-7: Gesamtumweltbelastung einer Schweizer Autobahn-Anschlussstrecke. Berücksichtigt wurden die Herstellung der Materialien, die Transporte und Baumaschinen für die Errichtung und die Entsorgung (inkl. Transport) der Materialien (Lebensdauer 80 Jahre). Die Instandsetzung und Nutzung wurden nicht berücksichtigt.....	143
Abb. 0-8: Kumulierter Energieaufwand einer Schweizer Autobahn-Anschlussstrecke. Berücksichtigt wurden die Herstellung der Materialien, die Transporte und Baumaschinen für die Errichtung und die Entsorgung (inkl. Transport) der Materialien (Lebensdauer 80 Jahre). Die Instandsetzung und Nutzung wurden nicht berücksichtigt.....	143
Abb. 0-9: Gesamtumweltbelastung von Standard – Gehwegen von verschiedenen Gemeinden und Städten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG) und Graubünden (GR), Zug (ZG), Luzern (LU) und	



Solothurn (SO). Lebensdauer aller Projekte: 80 Jahre. Instandsetzungen: 3x Deckschicht, 1x Tragschicht.	144
Abb. 0-10: Kumulierter Energieaufwand von Standard – Gehwegen von verschiedenen Gemeinden und Städten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG) und Graubünden (GR), Zug (ZG), Luzern (LU) und Solothurn (SO). Lebensdauer aller Projekte: 80 Jahre. Instandsetzungen: 3x Deckschicht, 1x Tragschicht.	144
Abb. 0-11: Gesamtumweltbelastung der Fahrbahnaufbauten von 10 verschiedenen Gemeinden in den Kantonen Zürich, Luzern und Graubünden. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.....	145
Abb. 0-12: Kumulierter Energieaufwand der Fahrbahnaufbauten von 10 verschiedenen Gemeinden in den Kantonen Zürich, Luzern und Graubünden. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.....	145
Abb. 0-13: Gesamtumweltbelastung der Standardaufbauten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG), Graubünden (GR), Zug (ZG), Basel-Stadt (BS), Freiburg (FR), Solothurn (SO) und Luzern (LU) über alle Lebenszyklusphasen und für verschiedene Belastungsklassen (T1 bis T6). Rot gestrichelt ist der Mittelwert der Standardaufbauten abgebildet. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.....	146
Abb. 0-14: Kumulierter Energieaufwand der Standardaufbauten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG), Graubünden (GR), Zug (ZG), Basel-Stadt (BS), Freiburg (FR), Solothurn (SO) und Luzern (LU) über alle Lebenszyklusphasen und für verschiedene Belastungsklassen (T1 bis T6). Rot gestrichelt ist der Mittelwert der Standardaufbauten abgebildet. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.....	146
Abb. 0-15: Gesamtumweltbelastung verschiedener Schweizer Standardfahrbahnaufbauten in Asphaltbauweise. Bei den Standardaufbauten unterscheiden sich die Schichtstärken, die Belagsarten und der Recyclinganteil (RC) (Details siehe Anhang B1.6). Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.....	147
Abb. 0-16: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Schweizer Standardfahrbahnaufbauten in Asphaltbauweise. Bei den Standardaufbauten unterscheiden sich die Schichtstärken, die Belagsarten und der Recyclinganteil (RC) (Details siehe Anhang B1.6). Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.....	147
Abb. 0-17: Gesamtumweltbelastung von je fünf Standard-Bushaltestellen von verschiedenen Kantonen aus Beton und Asphalt. Die Lebensdauer beträgt 40 Jahre (Beton: keine Instandsetzung, Asphalt: zweimal Deckschicht und einmal Binderschicht ersetzt).	148
Abb. 0-18: Kumulierter Energieaufwand von je fünf Standard-Bushaltestellen von verschiedenen Kantonen aus Beton und Asphalt. Die Lebensdauer beträgt 40 Jahre (Beton: keine Instandsetzung, Asphalt: zweimal Deckschicht und einmal Binderschicht ersetzt).	148
Abb. 0-19: Gesamtumweltbelastung von je vier Asphalt- und Betonkreiseln sowie einem Betonkreisel inklusive Asphaltanschlüssen aus einem Gesamtprojekt (Nr. 9). Standardfahrbahnaufbauten der Kantone: Graubünden, St. Gallen, Thurgau, Zug und vom ASTRA. Nummer 4 und 8 stammen aus einer Studie [12]. Lebensdauer: 80 Jahre.....	149
Abb. 0-20: Kumulierter Energieaufwand von je vier Asphalt- und Betonkreiseln sowie einem Betonkreisel inklusive Asphaltanschlüssen aus einem Gesamtprojekt (Nr. 9). Standardfahrbahnaufbauten der Kantone: Graubünden, St. Gallen, Thurgau, Zug und vom ASTRA. Nummer 4 und 8 stammen aus einer Studie [12]. Lebensdauer: 80 Jahre.....	149
Abb. 0-21: Umweltbelastungspunkte pro Meter Gleis und Jahr für einen eingleisigen und einen zweigleisigen Streckenabschnitt der SBB. Die UBP des zweigleisigen Projektes beziehen sich ebenfalls auf	



die tatsächliche Gleislänge (zwei statt vier Schienen in der Breite). Die Lebensdauer der Schienen beträgt 25 Jahre, der Schwellen 40 Jahre, des Schotters 60 Jahre und sonst 33 Jahre.	150
Abb. 0-22: Kumulierter Energieaufwand pro Meter Gleis und Jahr für einen eingleisigen und einen zweigleisigen Streckenabschnitt der SBB. Die KEA des zweigleisigen Projektes beziehen sich ebenfalls auf die tatsächliche Gleislänge (zwei statt vier Schienen in der Breite). Die Lebensdauer der Schienen beträgt 25 Jahre, der Schwellen 40 Jahre, des Schotters 60 Jahre und sonst 33 Jahre.	150
Abb. 0-23: Mittlere Gesamtumweltbelastung von Projekten der UTech und ein Literaturwert von verschiedenen Brückentypen. Der Fehlerbalken gibt jeweils die Standardabweichung der gemittelten Werten je Brückentyp an. Die Datengrundlage und Unsicherheiten sind unterschiedlich je nach Projekt und Brückentyp.	151
Abb. 0-24: Mittlerer kumulierter Energieaufwand von Projekten der UTech von verschiedenen Brückentypen. Der Fehlerbalken gibt jeweils die Standardabweichung der gemittelten Werten je Brückentyp an. Die Datengrundlage und Unsicherheiten sind unterschiedlich je nach Projekt und Brückentyp.	151
Abb. 0-25: Gesamtumweltbelastung verschiedener Tunnelbauweisen für Fussgänger und Strassentunnel. Legende: TBM: Tunnelbohrmaschine, MUF: Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels, SPV: Sprengvortrieb.	152
Abb. 0-26: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Tunnelbauweisen für Fussgänger und Strassentunnel. Legende: TBM: Tunnelbohrmaschine, MUF: Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels, SPV: Sprengvortrieb.	152
Abb. 0-27: Gesamtumweltbelastung verschiedener Lärmschutzwände aus unterschiedlichen Materialien pro Quadratmeter Sichtfläche und Jahr. Lebensdauer 80 Jahre inklusive Instandsetzungen. ...	153
Abb. 0-28: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Lärmschutzwände aus unterschiedlichen Materialien pro Quadratmeter Sichtfläche und Jahr. Lebensdauer 80 Jahre inklusive Instandsetzungen. ...	154
Abb. 0-29: Umweltbelastung der Herstellung von verschiedenen Ankertypen mit unterschiedlichen Durchmesser (DN [mm]).....	154
Abb. 0-30: Gesamtumweltbelastung verschiedener Winkelstützmauern und Schwergewichtsmauern pro Quadratmeter Sichtfläche (Länge mal totale Höhe) und Jahr. Lebensdauer aller Projekte: 100 Jahre.....	155
Abb. 0-31: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Winkelstützmauern und Schwergewichtsmauern pro Quadratmeter Sichtfläche (Länge mal totale Höhe) und Jahr. Lebensdauer aller Projekte: 100 Jahre.....	155
Abb. 0-32: Gesamtumweltbelastung verschiedener Freileitungssysteme zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind die Phasen der Herstellung, Errichtung, Instandsetzung und Entsorgung.....	156
Abb. 0-33: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Freileitungssysteme zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind die Phasen der Herstellung, Errichtung, Instandsetzung und Entsorgung.	156
Abb. 0-34: Gesamtumweltbelastung einer Instandsetzung einer Flugpiste. Lebensdauer 40 Jahre.....	157
Abb. 0-35: Kumulierter Energieaufwand einer Instandsetzung einer Flugpiste. Lebensdauer 40 Jahre.	157



Abb. 0-36: Gesamtumweltbelastung der Herstellung des Materials pro Laufmeter und Jahr der jeweiligen Rohre für die drei betrachteten Durchmessern 300 mm, 600 mm und 800 mm.	158
Abb. 0-37: Kumulierter Energieaufwand der Herstellung des Materials pro Laufmeter und Jahr der jeweiligen Rohre für die drei betrachteten Durchmessern 300 mm, 600 mm und 800 mm.	158
Abb. 0-38: Gesamtumweltbelastung von Leitungsgräben mit einer Kiessandumhüllung (inkl. Vergleich zur Betonumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.	159
Abb. 0-39: Kumulierter Energieaufwand von Leitungsgräben mit einer Kiessandumhüllung (inkl. Vergleich zur Betonumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.	159
Abb. 0-40: Gesamtumweltbelastung von Leitungsgräben mit einer Betonumhüllung (inkl. Vergleich zur Kiessandumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.	160
Abb. 0-41: Kumulierter Energieaufwand von Leitungsgräben mit einer Betonumhüllung (inkl. Vergleich zur Kiessandumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.	160
Abb. 0-42: Gesamtumweltbelastung der Herstellung verschiedener Pumpen mit unterschiedlicher Leistung pro Kilowatt und Jahr.	161
Abb. 0-43: Umweltbelastung der Herstellung von verschiedenen Schachttypen aus Beton pro Stück und Jahr.	161
Abb. 0-44: Gesamtumweltbelastung einer Strassenabwasserbehandlungsanlage (SABA) und verschiedener Teilelemente davon, wie beispielsweise ein Absetzbecken. Berücksichtigt wurden die Herstellung des Materials und dessen Entsorgung, jedoch kein Einbau und keine Instandsetzungen....	162
Abb. 0-45: Kumulierter Energieaufwand einer Strassenabwasserbehandlungsanlage (SABA) und verschiedener Teilelemente davon, wie beispielsweise ein Absetzbecken. Berücksichtigt wurden die Herstellung des Materials und dessen Entsorgung, jedoch kein Einbau und keine Instandsetzungen....	162
Abb. 0-46: Gesamtumweltbelastung verschiedener Erdverkabelungsvarianten zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind alle Phasen des Lebenszyklus.	163
Abb. 0-47: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Erdverkabelungsvarianten zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind alle Phasen des Lebenszyklus.	163
Abb. 0-48: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 41%.	164
Abb. 0-49: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 55%.	165
Abb. 0-50: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisel in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 40%.	165



Abb. 0-51: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisel in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 58%.	166
Abb. 0-52: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gehwege und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 51%.	166
Abb. 0-53: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gemeindestrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 57%.	167
Abb. 0-54: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kantonsstrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 55%.	167
Abb. 0-55: Mittlere Treibhausgasemissionen der Nationalstrassen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 56%.	168
Abb. 0-56: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gleise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Beton, und Stahl, sowie der Baumaschinen und Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 47%.	168
Abb. 0-57: Mittlere Treibhausgasemissionen der Tunnel und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 31%.	169
Abb. 0-58: Mittlere Treibhausgasemissionen der Wildtierbrücken und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 38%.	169
Abb. 0-59: Mittlere Treibhausgasemissionen der Lärmschutzwände (alle Typen zusammengefasst) und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 22%.	170
Abb. 0-60: Mittlere Treibhausgasemissionen der Winkelstützmauer und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 41%.	171
Abb. 0-61: Mittlere Treibhausgasemissionen der Schwergewichtsmauer und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 43%.	171
Abb. 0-62: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 77%.	172



Abb. 0-63: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 71%.	172
Abb. 0-64: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisel in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 74%.	173
Abb. 0-65 Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisel in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 72%.	173
Abb. 0-66 Mittlere Treibhausgasemissionen der Gehwege und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 68%.	174
Abb. 0-67: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gemeindestrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 70%.	174
Abb. 0-68: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kantonsstrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 68%.	175
Abb. 0-69: Mittlere Treibhausgasemissionen der Nationalstrassen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 69%.	175
Abb. 0-70: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gleise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Beton und Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 85%. ..	176
Abb. 0-71: Mittlere Treibhausgasemissionen der Tunnel und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 58%.	176
Abb. 0-72: Mittlere Treibhausgasemissionen der Wildtierbrücken und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 61%.	177
Abb. 0-73: Mittlere Treibhausgasemissionen der Lärmschutzwände (alle Typen vom TBA zusammengefasst) und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 44%.	177
Abb. 0-74: Mittlere Treibhausgasemissionen der Winkelstützmauer und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 78%.	178



Abb. 0-75: Mittlere Treibhausgasemissionen der Schwergewichtsmauern und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 80%. 178



Tabellen

Tabelle 1:	Funktionelle Einheit je nach Bauwerkstyp	21
Tabelle 2:	Anteil der Treibhausgasemissionen verschiedener Bauwerkstypen im Infrastrukturbau....	47
Tabelle 3:	Treibhausgasemissionen von Naturstein-Platten verschiedener Herkunftsländer. Zusätzlich wurde ganz links der Wert für die Wiederverwendung von ausgebauten und neu aufbereiteten Natursteinen aufgeführt.....	58
Tabelle 4:	Zusammenfassung der Reduktionspotenziale der Herstellung der wichtigsten Materialien im Infrastrukturbau (Beton, Asphalt, Stahl und Natursteine) sowie der Baumaschinen und Transporte. Die Hintergründe zu den Zahlen befinden sich in Kap. 4.....	62
Tabelle 5:	Referenzwerte (Mittelwerte), Bestes Projekt (ausgewertetes Projekt mit niedrigsten Treibhausgasemissionen) und Vorschlag für mögliche Zielwerte im Infrastrukturbau basierend auf der Auswertung von Projektdaten und Literatur. (Tabelle wird auf den nächsten Seiten fortgeführt).....	64
Tabelle 6:	Zusammenfassung der THG-Reduktionspotenziale der unterschiedlichen Ambitionsniveaus in Bezug auf den Mittelwert aus Kap. 5.1.1. Es sind grosse Spannweiten aufgeführt. Die Idee dahinter ist, dass je Objekttyp ein konkreter Wert innerhalb der Spannweite gewählt resp. festgesetzt wird.	72
Tabelle 7:	Einteilung der Bauwerkstypen im Infrastrukturbereich in Objektgruppen und Objekttypen. In der rechten Spalte werden die Bauwerkstypen spezifiziert.....	101
Tabelle 8:	Lebensdauer und Instandsetzungszyklen der ausgewerteten Projekte je Objekttyp (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt)	103
Tabelle 9:	Objekttyp und ausgewertete Projekte der Fahrbahn.....	106
Tabelle 10:	Schichtmächtigkeit der Bushaltestellen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht)	108
Tabelle 11:	Asphalt- und Betonsorten der Bushaltestellen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.	108
Tabelle 12:	Schichtmächtigkeit der Gemeindestrassen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht)	110
Tabelle 13:	Asphaltsorten der Gemeindestrassen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.	111
Tabelle 14:	Schichtmächtigkeit der Gemeindestrassen (Standardaufbauten) je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht).....	112
Tabelle 15:	Asphaltsorten der Gemeindestrassen (Standardaufbauten) nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.....	112
Tabelle 16:	Schichtmächtigkeit der projektspezifischen Gemeindestrassen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht).....	114
Tabelle 17:	Asphaltsorten der projektspezifischen Gemeindestrassen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.	114
Tabelle 18:	Schichtmächtigkeit der Standardaufbauten der Kantonsstrassen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht).....	115



Tabelle 19:	Asphaltsorten der Gemeindestrassen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet. ...	116
Tabelle 20:	Zusammensetzung des Strassenaufbaus der Standardaufbauten der Nationalstrassen in der Schweiz	117
Tabelle 21:	Schichtmächtigkeit der Standardaufbauten der Nationalstrassen in der Schweiz je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht, FSS = Frostschuttschicht).....	118
Tabelle 22:	Schichtmächtigkeit der Standardaufbauten der Nationalstrassen in Deutschland je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht, FSS = Frostschuttschicht).....	119
Tabelle 23:	Zusammensetzung des Strassenaufbaus der ausgewerteten Nationalstrassen in Deutschland	120
Tabelle 24:	Schichtmächtigkeit der Kreisel je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht (bei Kreisel 9 gesamte Gesteinskörnung im Projekt)	122
Tabelle 25:	Asphalt- und Betonsorten der Bushaltestellen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.	122
Tabelle 26:	Hintergrundinformationen zu den ausgewerteten Tunnelbauwerken im Vergleich.....	128
Tabelle 27:	Materialzusammensetzung eines Bauwerks zur Böschungsstabilisierung mit einer flexiblen Stabil – Geflechtsabdeckung für eine 100 m lange Böschung	133
Tabelle 28:	Materialzusammensetzung eines Bauwerks zur Böschungsstabilisierung mit einer rückverhängten Spritzbetonschale für eine 100 m lange Böschung	133
Tabelle 29:	Betrachtete Komponenten und Materialien für Abwasserleitungen und für die Kanalisation	137
Tabelle 30:	Grundlagendaten für die Strassenabwasserbehandlungsanlagen SABA und Berechnung der typischen Dimension einer SABA des Typen Boden- und Raumfilter des TBA ZH. Die weiteren Komponenten einer SABA sind in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt.	138
Tabelle 31:	Objekttyp und ausgewertete Projekte der Werkleitungen.	142



Anhang

Anhang A. Ergänzende Informationen und methodische Grundlagen

A1. Umtec Technologie AG

Die Umtec Technologie AG (kurz UTech) verfügt über langjährige Erfahrung in der Erstellung von Umweltbilanzen und Ökoeffizienzanalysen im Bereich der Bauwirtschaft. Das Unternehmen verfügt über ausgewiesene Kompetenz in den Bereichen Bauwirtschaft und Ökobilanzierung von Rohstoffkreisläufen. In der jüngeren Vergangenheit hat die Umtec Technologie AG für diverse Baustoffproduzenten, Bauunternehmen, Behörden und Verbände Ökobilanzen erstellt. Des Weiteren hat die Umtec Technologie AG im Auftrag des Infrastrukturbau-Branchenverbandes Infra Suisse ein Ökobilanz-Tool für Infrastrukturbauprojekte entwickelt. Das Tool findet in der Branche grossen Anklang und hat bereits eine Vielzahl von Daten zu Projekten zusammengetragen. Die Umtec Technologie AG hat mit Erlaubnis von Infra Suisse Zugriff auf diese Daten, welche unter anderem eine wichtige Quelle für die vorliegende Studie darstellen. Des Weiteren hat die Umtec Technologie AG in der jüngeren Vergangenheit diverse Projekte für kantonale Tiefbauämter sowie für Bundesbehörden auf ihre Ökobilanz evaluiert. Auch diese Daten bilden eine Grundlage für das vorliegende Projekt.

A2. Einteilung in Objekttypen

Tabelle 7: Einteilung der Bauwerkstypen im Infrastrukturbereich in Objektgruppen und Objekttypen. In der rechten Spalte werden die Bauwerkstypen spezifiziert.

Objektgruppe	Objekttypen	Anzahl der Standardnormalbauwerkstypen
Fahrbahn, Strasse	Anschluss und Verzweigung	vernachlässigt
	Anschlussstrecke	1 (Strassenaufbau)
	Bahnübergang	vernachlässigt
	Bushaltestelle	2 (Asphalt- und Betonbauweise)
	Gehweg	1 (Asphalt)
	Kreisel	2 (Beton- und Asphaltbauweise)
	Offene Strecke ohne Richtungstrennung	2 (Gemeinde-, Kantonsstrasse)
	Offene Strecke mit Richtungstrennung	1 (Nationalstrasse)
	Parkplätze	vernachlässigt
	Unterhaltungsweg	vernachlässigt
	Umfahrung	vernachlässigt
Fahrbahn, Gleis	1-spurig	1
	2-spurig	1
Brücke	Brücke	11 (Bogenbrücke, Eisenbahnbrücke, Balkenbrücke, Holzbrücke, Rahmenbrücke, Stahlbetonbrücke, Strassenbrücke, Stahlbrücken, Stahlbetonbrücken, Hangstrasse, Wildtierüberführungen)
Tunnel	Bergmännische Tunnel	1 (geschlossene Bauweise)
	Tagbautunnel	1 (offene Bauweise)
Galerie	Galerie	1 (Stahlbetonbau)
Übrige Bauten	Böschungssicherungen und Steinschlag-schutz	2 (Diverse Netze, Geflechte), vernachlässigt: Geokunststoffe, Stabilisierungen
	Lärmschutzwand	9 (diverse Materialaufbauten)
	Stützanker	9 (u.a. Verpress-, Stab-, Fels-, Seilanker)
	Stützmauern	2 (Winkel- & Schwergewichtstützmauern)



	Freileitungen	3 (verschiedene Fundamenttypen in unterschiedlichem Gelände)
	Flugpiste	1
	Bunker	vernachlässigt
<i>Entwässerung und Kanalisation</i>	Abwasserleitungen	10 (kreisrunde Rohrleitungen für alle gängigen Werkstoffe: Beton, Stahlbeton, Polymerbeton, Geopolymerbeton, GFK, PP, PE, PVC, Steinzeug, Gusseisen)
	Becken	vernachlässigt
	Kanäle	vernachlässigt
	Leitungsgräben	2 (Betonumhüllung, Kiessand)
	Pumpstation	1 (Anzahl Pumpen und Leistung in kW)
	Schacht und Ablauf	3 (Beton, Steinzeug, Kunststoff)
	Strassenabwasserbehandlungsanlage	2 (natürliche und technische SABA)
<i>Werkleitungen</i>	Gasleitungen	vernachlässigt
	Kabelkanal, Kabelrohrblock	mit Stromübertragung zusammengefasst
	Trinkwasserleitungen	vernachlässigt
	Stromübertragung	4 (Strang- & Phasenrohr, Mikrotunnel, Leitungskanal, Stollen)
<i>Gebäude oder NS und andere Anlagen</i>	Rastplätze & -stätten	vernachlässigt
	Verkehrsmanagementzentrale	vernachlässigt
	Werkhof und Stützpunkt	vernachlässigt



Tabelle 8: Lebensdauer und Instandsetzungszyklen der ausgewerteten Projekte je Objekttyp (Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgeführt)

Objektgruppe		Objekttypen		Ausgewertete Projekte												
Fahrbahn, Strasse	Anschlussstrecke	Projektname / Nr.	Autobahn-anschluss													
		Lebensdauer	80													
		Instandsetzungszyklen	-													
	Bushaltestelle Betonaufbau	Projektname / Nr.	1	2	3	4	5									
		Lebensdauer	40	40	40	40	40									
		Instandsetzungszyklen	-	-	-	-	-									
	Bushaltestelle Asphaltaufbau	Projektname / Nr.	6	7	8	9	10									
		Lebensdauer	40	40	40	40	40									
		Instandsetzungszyklen	DS: 20 a (2x ersetzt), BS: 30 a (1x ersetzt)													
	Gehweg	Projektname / Nr.	ZH 1	ZH 2	ZH 3	ZH 4	ZH 5	SG 1	SG 2	GR 1	GR 2	GR 3	ZG 1	LU 1	SO 1	
		Lebensdauer	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
		Instandsetzungszyklen	DS: 20 a (3x ersetzt), TS: 50 a (1x ersetzt)												DS: 20 a	
	Kreisel Asphaltaufbau	Projektname / Nr.	1 GR	2 TG	3 SG	4 Studie										
		Lebensdauer	80	80	80	80										
		Instandsetzungszyklen	DS: 20 a, BS: 30 a und TS: 50 a					DS: 20 a, BS und TS: 40 a								
Kreisel Betonaufbau	Projektname / Nr.	5 ZG	6 ASTRA	7 SG	8 Studie	9 Projekt										
	Lebensdauer	80	80	80	80	80										
	Instandsetzungszyklen	Keine Instandsetzungen in 80 a														
Gemeindestrasse	Projektname / Nr.	ZH 1: T1,2	LU 1: T2	ZH 2: T3	LU 2: T3	ZH 3	ZH 4	GR 1	GR 2	GR 3	GR 4					
	Lebensdauer	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80					
	Instandsetzungszyklen	DS: 20 a (3x ersetzt), TS: 50 a (1x ersetzt)						& BS: 30 a			DS: 20 a, TS: 50 a					
Kantonsstrasse	Projektname / Nr.	T1, T2, SO	T2 ZH	T3 ZH	T3 SG	T3 ZG	T3 BS	T3, T4 SO	T2, 3, 4* GR	FR: Projektdaten	T4 ZH	T4 SG	T4a ZG	T4b ZG		
	Lebensdauer	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80		
	Instandsetzungszyklen	DS: 20 a, TS: 50 a		& BS: 30 a		DS: 20 a, TS: 50 a		DS: 20 a, BS: 30 a und TS: 50 a		DS: 20 a, TS: 50 a		DS: 20 a, BS: 30 a und TS: 50 a				
Kantonsstrasse	Projektname / Nr.	T4b GR	T4b* GR	T4.1 LU	T4a GR	T4, T5 BS	T5 ZH	T5 SG	T5a GR	T5a* GR	T5 LU	T6 ZH	Literatur			
	Lebensdauer	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80 (angepasst)			
	Instandsetzungszyklen	DS: 20 a, BS: 30 a und TS: 50 a														
Nationalstrasse Asphaltaufbau	Projektname / Nr.	SDA 8-12, EME, RC 1	SDA 8-12, PmB, RC 1	SDA 8-12, EME, RC 2	SDA 8-12, PmB, RC 2	SDA 8-12, EME, RC 3	MR 8, EME, RC 1	MR 8, PmB, RC 1	MR 8, EME, RC 2	MR 8, PmB, RC 2	MR 8, EME, RC 3	Literatur				
	Lebensdauer	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80 (angepasst)				
	Instandsetzungszyklen	DS: 20 a, BS: 30 a und TS: 50 a											Total in 50 a			
Fahrbahn, Gleis	Gleisbau	Projektname / Nr.	Eingleisig SBB	Zweingleisig SBB	1-Gleis Literatur	2-Gleis Literatur										
		Lebensdauer	25, 40, 60, 33	25, 40, 60, 33	25, 40, 60	25, 40, 60										
		Instandsetzungszyklen	-	-	-	-										
Kunstbauten	Brücken (Mittelwert aus Brückentypen)	Projektname / Nr.	nachfolgend für die einzelnen Brückentypen angegeben													
		Lebensdauer allg.	100 (wenn nicht anderst erwähnt)													
		Instandsetzungszyklen	-													
	Balkenbrücken	Projektname / Nr.	1	2 (Instandsetzung, 50a)	3 (Literatur)	4 (Literatur)	5 (Literatur)									
		Strassenbrücken	1	2	3											
		Hangstrasse	1	2												
		Bogenbrücken	1	2	3											
		Rahmenbrücken	1													
		Stahlbrücken	1 (Literatur)	2 (Literatur)	3 (Literatur)	4 (Literatur)	5 (Literatur)									
		Stahlbetonbrücken	1 (Literatur)	2 (Literatur)	3 (Literatur)	4 (Literatur)										
		Betonbrücken	1 (Literatur)	2 (Literatur)	3 (Literatur)	4 (Literatur)										
		Holzbrücke	1 (Literatur)	2 (Literatur)												
		Eisenbahnbrücke	1	2 (Literatur)	3 (Literatur)											
Diverse weitere Brücken	Projektname / Nr.	TBA														
Wildtier-überführungen	Projektname / Nr.	Rahmentragwerk	Bogentragwerk	Platte mit Mittelstütze	Platte ohne Mittelstütze	Bogentragwerk Holz	Holztragwerk mit Mittelstütze	Holztragwerk ohne Mittelstütze								
	Unterführung	Projektname / Nr.	Unterführung 1													
	Überführung	Projektname / Nr.	Nationalstrasse													



Objektgruppe	Objekttypen	Ausgewertete Projekte													
Tunnels	Strassentunnels, geschlossene Bauweise	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Strassentunnels, offene Bauweise	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Eisenbahntunnels, geschlossene Bauweise	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Eisenbahntunnels, offene Bauweise	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Galerie	Lebensdauer der Instandsetzung: 100 Jahre													
Entwässerung / Kanalisation	Abwasserleitungen, 300	Lebensdauer 80 Jahre, keine Instandsetzung nötig in dieser Zeit													
	Abwasserleitungen, 600	Lebensdauer 80 Jahre, keine Instandsetzung nötig in dieser Zeit													
	Abwasserleitungen, 800	Lebensdauer 80 Jahre, keine Instandsetzung nötig in dieser Zeit													
	Leitungsgräben mit Abwasserleitungen, mit Kiessandumhüllung	Lebensdauer 80 Jahre, keine Instandsetzung nötig in dieser Zeit													
	Leitungsgräben mit Abwasserleitungen, mit Betonumhüllung	Lebensdauer 80 Jahre, keine Instandsetzung nötig in dieser Zeit													
	Pumpstation	Lebensdauer 15 Jahre, nur Herstellung													
	Betonschächte	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Strassensammler (Beton)	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Kontrollschächte (aus Beton)	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Strassenabwasserbehandlungsanlage	Lebensdauer 70 Jahre, keine Instandsetzung													
	Absetzbecken	Lebensdauer 70 Jahre, keine Instandsetzung													
	Rückhaltebecken	Lebensdauer 70 Jahre, keine Instandsetzung													
	Grobabscheider	Lebensdauer 70 Jahre, keine Instandsetzung													
	Ölrückhaltebecken	Lebensdauer 70 Jahre, keine Instandsetzung													
Verkabelung	Kabelkanal, Kabelrohrblock	Lebensdauer 80 Jahre													
	Stromübertragung mit Erdverkabelung	Lebensdauer 80 Jahre, alle Instandsetzungen innerhalb der 80 Jahre berücksichtigt													
Übrige Bauten	Böschungssicherungen und Steinschlagschutz	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung													
	Lärmschutzwand, Projekte	Projektname / Nr.	Lava, Acryl, Betonriegel	Lavabeton	Beton 1	Alu auf Betonriegel	Aluminium 1	Alu, Glas, Betonriegel	Holz auf Betonriegel	Holz, Glas, Betonriegel	Steinkorb				
		Lebensdauer	80	80	80	80	80	80	80	80	80				
		Instandsetzungszyklen	Wandelement 40 a		-	Wandelement 40 a						-			
Lärmschutzwand, Literatur	Projektname / Nr.	Lavabeton auf Beton	Stahlbeton	Aluminium auf Beton	Holz_Einzelfundament	Holz_Bohrpfähle	Holz_Mikropfähle	Glas/20mm	Glas/12mm	Schilf-Lehm auf Beton	Steilwall 1	Steilwall 2	Erdwall 1	Erdwall 2	
	Lebensdauer	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80		
	Instandsetzungszyklen	inklusive													
Stützanker	Lebensdauer 100 Jahre, nur Herstellung														
Stützmauern, Winkelstützmauer	Projektname / Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
	Lebensdauer	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
	Instandsetzungszyklen	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Stützmauern, Schwergewichtsstützmauer	Projektname / Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21					
	Lebensdauer	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100				
	Instandsetzungszyklen	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Stromübertragung mit Freileitungen	Lebensdauer 80 Jahre, alle Instandsetzungen innerhalb der 80 Jahre berücksichtigt														
Flugpiste	Nur Instandsetzung inkl. Entsorgung: 40 Jahre														



A3. Technische Vordergrunddaten und generische Hintergrunddaten

Technische Vordergrunddaten sind zum Beispiel Materialmengen, welche für die Errichtung des Bauwerks und die Entsorgung benötigt werden, sowie Maschinenstunden oder Emissionen der einzelnen Baumaschinen und die Tonnenkilometer der Transportfahrzeuge. Diese Daten sind projektspezifisch und müssen für alle betrachteten Lebenszyklusphasen erfasst werden.

Generische Hintergrunddaten sind Einheitsprozesse aus Ökobilanz-Datenbanken. Beispiele dafür sind die Herstellung eines Liters Diesel ab Regionallager oder die Herstellung eines Liters Bitumen ab Werk. Dabei liefern die generischen Hintergrunddaten Angaben zur vorgelagerten Wertschöpfungskette.

Die Verknüpfung der technischen Vordergrunddaten mit den generischen Hintergrunddaten ermöglicht über Wirkungsabschätzungsmethoden (siehe dazu Anhang A4) die Ermittlung der Umweltwirkungen. Am Beispiel des Diesels würde aus den technischen Vordergrunddaten zum Beispiel hervorgehen, dass 100 Liter Diesel für ein bestimmtes Projekt benötigt werden. Somit würden die Umweltwirkungen des Einheitsprozesses «ein Liter Diesel» mal 100 gerechnet werden, woraus die Umweltwirkungen des Projektes resultieren.

Die Umweltbelastungen wurden grösstenteils direkt aus den in früheren Studien ausgewerteten Projekten übernommen. Die generischen Hintergrunddaten jener Projekte stammen mehrheitlich aus der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung (BAFU:2022, ehemals UVEK-Datenbank), aus der Ecoinvent-Datenbank oder aus der KBOB/ecobau-Liste Ökobilanzdaten im Baubereich. Datenlücken in den Projekten wurden mit generischen Hintergrunddaten von der genannten Ökoinventardatenbanken (BAFU, KBOB oder Ecoinvent) oder durch Daten aus der ECO₂nstruct-Datenbank gefüllt.

Bei den Daten für Baumaschinen & Baustellengeräte bezieht sich die UTech AG auf die Leistungskennwerte der Standardanalysen des TB-Viewers (Technik & Betriebswirtschafts-Viewer) des Schweizerischen Baumeisterverbandes. Damit gelingt es bei Bauprojekten, Standardwerte für Maschinenstunden mit den Materialien und den Bauprozessen zu verknüpfen, z.B. beim Grabenaushub werden 0.09 h pro m³ mit einem Hydraulikbagger von 16 Tonnen Einsatzgewicht, einer Leistung von 140 kW und einem entsprechenden mittleren Dieserverbrauch von 12 Liter pro Stunde ausgehoben. Auch die Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Baumaschine kann berechnet werden über die Angaben der Inventargrunddatenliste des Schweizerischen Baumeisterverbandes. Für die Emissionen der Luftschadstoffe greift die UTech AG auf die Non-Road-Datenbank des BAFU zurück. Dort gibt es Luftemissionsfaktoren für verschiedene Baumaschinen (eingeteilt in Typ, Leistung und Einsatzgewicht).

A4. Wirkungsabschätzung

Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100a): Dieses Wirkungsmodell beschreibt die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO₂. Die Treibhauswirkung wird auf Basis der Treibhauspotenziale des 6. Sachstandberichts des IPCC (2021) quantifiziert [16], [33]. Die Methode IPCC 2021 GWP 100a wurde für die Berechnungen verwendet.

Umweltbelastungspunkte (UBP 2021): Mit der Methode der ökologischen Knappheit wird ein vollständiges Bild der Umweltwirkungen aufgezeigt [34]. Sie basiert auf der schweizerischen Umweltpolitik. Die Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP'21) quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen, von Land und Süswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch die Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung sowie durch Verkehrslärm. In der Schweiz gilt die UBP-Methode als Standard bei Ökobilanzen [7], [35], [36]. Sie wurde von S. Ahbe, A. Braunschweig und R. Müller-Wenk erarbeitet und im Auftrag des BAFU weiterentwickelt. Sie gilt als besonders hilfreich für die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen, da die Methode die Umweltpolitik der Schweiz widerspiegelt und umfassend ist.

Kumulierter Energieaufwand (KEA): Dieses Wirkungsmodell quantifiziert den kumulierten Energieaufwand der fossilen und nuklearen Energieträger, Holz aus Kahlschlag von Primärwäldern sowie auch den Energieaufwand erneuerbarer Energieträger. Verwendet wurde die Cumulative Energy Demand Version 1.09 Methode.



Da in dieser Studie teilweise Umweltwirkungen aus früheren Projekten mitberücksichtigt wurden, ist nicht auszuschliessen, dass ältere Versionen der oben genannten Methoden in einzelnen Projekten verwendet wurden. Die Wirkungsabschätzungsmethoden unterliegen periodischen Updates, wodurch auch in Zukunft Änderungen in den Umweltwirkungen aufgrund der Anpassungen der generischen Hintergrunddaten nicht auszuschliessen sind.

Anhang B. Technische Vordergrunddaten

B1. Fahrbahn

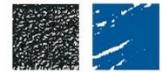
Fahrbahnprojekte wurden in verschiedene Objekttypen wie Gehwege, Gemeindestrassen und Bushaltestellen etc. unterteilt (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Objekttyp und ausgewertete Projekte der Fahrbahn.

Objekttyp	Ausgewertete Projekte	Anzahl	Kommentar
Anschlussstrecke	Beispielprojekt ASTRA	1	
Bushaltestellen	Standard TBA	5	Betonplatte
	Standard TBA	5	Asphaltbelag
	Projektspezifisch CH	6	Betonplatte und Asphaltbelag: Im Anhang
Gehwege	Standard TBA	13	Asphaltbelag
Gemeindestrassen	Standard TBA Gemeinde	10	
	Projektspezifisch CH	10	Im Anhang
Kantonsstrassen	Standardaufbauten TBA	24	
	Literatur	1	Mittelwert von 17 Strassen
Nationalstrassen	Standardaufbau ASTRA	10	
	Standardaufbau ÖKOPOST	12	Im Anhang, nur für Deutschland
	Literatur	1	
Kreisel	Standard TBA	2	Betondecke
	Standard TBA	3	Asphaltbelag
	Literatur angepasst	2	Beton und Asphalt
	Beispielprojekt	1	Betonkreisel inkl. Asphaltanschlüsse
	Standardaufbau ASTRA	1	Betondecke

Nachfolgend wird die Datengrundlage und die Annahmen für die Ermittlung der Orientierungswerte je Objekttyp beschrieben.

Bei den Standardaufbauten von Kantonen und Gemeinden wurde zur Auswertung das SABINA-Tool verwendet. Lebenszyklusmodellierung des Oberbaus basiert auf folgenden Annahmen:



- Nutzungsdauer: Sofern nicht anders angegeben, werden für die Nutzungsdauern des Oberbaus folgende Annahmen getroffen: Die Nutzungsdauer der Deckschicht wird mit 20 Jahren, der Binderschicht mit 30 Jahren, der Tragschicht mit 50 Jahren und der Fundationschicht mit 80 Jahren angesetzt. Diese Werte basieren auf dem Mittelwert aus Angaben verschiedener kantonaler Tiefbauämter.
 - Wird eine gesamte Lebensdauer von 80 Jahren für die gegebenen Objekttypen betrachtet, werden während dieser Nutzungsdauer die Deckschicht dreimal, die Binderschicht zweimal und die Tragschicht einmal erneuert. Für die Fundationschicht wird angenommen, dass über die gesamte Lebensdauer keine Instandhaltungsmassnahmen erforderlich sind.
 - Die Wahl der Instandsetzungszyklen ist sehr umstritten. Das ASTRA Fachhandbuch gibt gewisse Instandsetzungszyklen vor, welche jedoch in der Praxis nicht immer umsetzbar sind.
- Recyclinggehalt: Sofern keine weiteren Informationen zu den verschiedenen Schichten vorlagen, wurde für die Deckschicht ein RC-Gehalt von 0 % angenommen, für die Binderschicht 30 % und die Tragschicht 40 %. Für die Fundationschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.
- Strommix: Für alle Schichten des Oberbaus wurde der Schweizer Strommix (Strommix CH) verwendet.
- Wärmemix: Für alle Schichten des Oberbaus wurde Erdgas verwendet.
- Transportdistanzen: Sofern keine detaillierten Informationen zu Transportdistanzen vorlagen, wurden folgende Annahmen getroffen: 30 km von der Ausbruchstelle zur Deponie, 10 km zum Recycling und 20 km vom Hersteller zur Baustelle.
- Antriebssysteme: Für alle Transporte und Baumaschinen wurde als Antriebssystem Diesel verwendet.
- Verwertungsquoten: Die Verwertungsquoten basieren auf den Ergebnissen der MatCH-Studie der EMPA. Für Asphalt gelten folgende Verwertungsquoten: 17 % Deponierung und 83 % Recycling. Für Beton liegt die Deponierungsquote bei 15 %, während 85 % recycelt werden.
- Rückbauart: Für alle Rückbauten wurden Fräsen als Rückbauart gewählt.

B1.1 Anschlussstrecke

In Bezug auf Anschlussstrecken war die Datengrundlage sehr dünn. Ein Projekt eines Autobahn-Anschlusses in der Schweiz konnte jedoch anhand eines konkreten Projektes ausgewertet werden. Die Anschlussstrecke weist eine Gesamtfläche von 43'800 m² auf. Anhand der angegebenen Massen wurde der Fahrbahnaufbau abgeschätzt. Heruntergerechnet auf die einzelnen Schichten besteht die Fahrbahn aus einer 2 cm dicken Asphalt-Deckschicht, je einer 11 cm dicken Asphalt Binder- und Tragschicht und einer ca. 38 cm dicken Fundationschicht aus losen Gesteinskörnungen. Zudem wurde weiteres Gesteinsmaterial für die Terrainaufschüttung der Rampe verwendet. Die Transporte und Baumaschinen für die Errichtung wurden abgebildet. Die Lebensdauer der Anschlussstrecke wurde auf 80 Jahre gesetzt. Instandsetzungsarbeiten wurden aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt.

B1.2 Bushaltestelle



Die Bushaltestellen wurden pro Quadratmeter und Jahr ausgewertet. Für alle Bushaltestellen mit Betonbelag wurde eine Lebensdauer von 40 Jahren angenommen, ohne Berücksichtigung von Instandsetzungsmassnahmen.

Die Bushaltestellen 1 bis 10 sind Standardaufbauten, die von Tiefbauämtern der Kantone Zürich, Zug, Solothurn, Luzern, Basel-Landschaft und St. Gallen sowie von Gemeinden aus dem Kanton Graubünden und Kanton Zürich verwendet werden. Die Bushaltestellen 1 bis 5 mit Betondecke bestehen aus einer Betonschicht, die aus Vorsatzbeton und Kernbeton zusammengesetzt ist, sowie einer Fundationsschicht aus Kies. Die Bushaltestellen 6 bis 10 mit Asphaltbelag setzen sich aus einer Deck-, Binder- und Tragschicht aus unterschiedlichen bituminösen Asphaltarten und einer Kiesfundation zusammen. Die Daten wurden mit dem SABINA-Tool ausgewertet. Die Standardbushaltestellen weisen eine Breite von 3 m auf. Die Schichtmächtigkeiten und die Asphalt- / Betonsorten der Standardaufbauten sind in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgelistet.

Für die Modellierung des Randsteins wurden die Materialien Splittbeton C20/25 mit einer Menge von 0.178 m³/m, ein Randstein 12/15x25 cm aus Gneis mit 0.1 t/m, sowie die entsprechenden Transporte berücksichtigt. Die Gesamtumweltwirkung wurde dann durch die Bushaltestellenbreite von 3 m dividiert, um den entsprechenden Wert pro Quadratmeter Bushaltestelle zu erhalten. Für alle Bushaltestellen wurde der gleiche Randstein angenommen.

Tabelle 10: Schichtmächtigkeit der Bushaltestellen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht)

	Nr.	Bushaltestelle	Beton [cm]	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	Summe [cm]
Beton	1	ZG 1	260	-	-	-	50	310
Beton	2	SO 1	220	-	-	-	50	270
Beton	3	SG 1	220	-	-	-	50	270
Beton	4	GR 1	260	-	-	-	80	340
Beton	5	ZH 1	260	-	-	-	50	310
Asphalt	6	LU 1	-	3	9	9	50	71
Asphalt	7	ZH 2	-	3	8	8	50	69
Asphalt	8	ZH 3	-	3	8	7	50	68
Asphalt	9	ZH 4	-	3	8	7	50	68
Asphalt	10	BL 1	-	1	10	12	50	73

Tabelle 11: Asphalt- und Betonsorten der Bushaltestellen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.

	Bushaltestelle	Beton [cm]	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]
Beton	ZG 1	NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3	-	-	-
Beton	SO 1	Beton nach Norm SN EN 206-1, Kranbeton,	-	-	-



		NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3			
Beton	SG 1	NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3	-	-	-
Beton	GR 1	NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3	-	-	-
Beton	ZH 1	NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3	-	-	-
Asphalt	LU 1	-	AC 8 H, PmB Typ E 45/80-65	AC B 22 H, PmB Typ E 25/55-65	AC T 22 H, PmB Typ E 25/55-65
Asphalt	ZH 2	-	AC 8 H, PmB 45/80-80	AC B 22 H, PmB 45/80-80	AC T 22 H, PmB 45/80-80
Asphalt	ZH 3	-	AC 8 H, PmB 45/80-80	AC B 22 H, PmB 45/80-80	AC T 22 N, B 70/100
Asphalt	ZH 4	-	AC 8 H, PmB 45/80-80	AC B 22 H, PmB 25/55-65	AC T 22 N, B 70/100
Asphalt	BL 1	-	AC 4 L, B 70/100 einge- streut	AC B 22 H, PmB 45/80-80	AC T 32 H, PmB 10/40/70 CH-E

Als Vergleich dazu wurden sechs projektspezifische Bushaltestellen ausgewertet: drei mit Betonbelag (P1 bis P3) und drei mit Asphaltbelag (P4 bis P6). Die Treibhausgasemissionen sind in Abb. 0-1 ersichtlich.

Das Projekt Bushaltestelle P1 bezieht sich auf ein reales Bauprojekt einer Stadt, bei welchem eine Verschiebung der Bushaltestelle und der Neubau mit behindertengerechter Haltekante ausgeführt wurden. Das Gesamtprojekt beinhaltete noch weitere Bauarbeiten. Die entsprechenden Materialien, Transporte und Maschinenstunden wurden so gut es ging für die Bushaltestelle herausgelesen. Die Bauabfälle und die Transporte des Materials zur Baustelle oder zur Entsorgungsstelle wurden ergänzt und die entsprechende Umweltwirkung zusätzlich berechnet. Folgende Annahmen wurden dabei getroffen:

- Das Eingebaute Material wird am Ende des Lebenszyklus wieder ganzheitlich entsorgt.
- Für die Transporte wurde eine durchschnittliche Transportdistanz von 30 km für Natursteine und Gesteinskörnungen und eine Transportdistanz von 20 km für Asphalt, Beton und die Entsorgung angenommen.

In der Bushaltestelle P1 enthalten sind Beton, Züribord-Natursteine und verschiedene Baumaschinen wie Bagger, Dumper, Radlader und Kompressoren, sowie Lastwagen für die Materialtransporte. Die Bushaltestelle hat eine Fläche von 156 m².

Die Bushaltestellen P2 bis P6 stammen aus einem Projekt der UTech, bei welchem zwei Betonplatten- und drei Asphaltbushaltestellen anhand von Standardaufbauten modelliert und hinsichtlich der Umweltwirkung ausgewertet wurden. Die Standardbushaltestellen weisen eine Breite von 3 m und eine Länge von 35.2 m auf. Im Gegensatz zur Bushaltestelle P1 wurden Instandsetzungsarbeiten berücksichtigt.

Bei den zwei Bushaltestellen mit Betonplatten (Bushaltestelle P2 und P3) wurden weitere Materialien wie Bewehrungsstahl, Bitumen, Quarzsand und Hartschaumstoffe für Fugenabschlüsse, sowie die jeweiligen Transporte vernachlässigt, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den im Hauptbericht ausgewerteten



Standard-Bushaltestellen zu erzielen. Die Auswertung beinhaltet eine Kiesfundation, eine Asphalt Trag-schicht und eine Beton Deckschicht. Transportiert wurden die Materialien mit einem LKW 32 t. Für den Einbau wurden verschiedene Baumaschinen wie Hydraulikbagger, Dumper, Radlader, Walzen, Schwarzde-ckenfertiger und Fugenfräsen modelliert. Die Bauabfälle umfassen Aushubmaterial und Betonabbruch in die Deponie und ins Recycling.

Die Bushaltestellen mit einem Asphaltbelag aus Gussasphalt (Bushaltestellen P4 bis P6) weisen eine As-phalt Fundation-, Trag-, Binder- und Deckschicht auf. Als Bauabfälle fallen demnach Aushubmaterial und Asphalt in die Deponie und ins Recycling an. Die Transportmittel und die Baumaschinen sind die gleichen wie bei der Betonvariante.

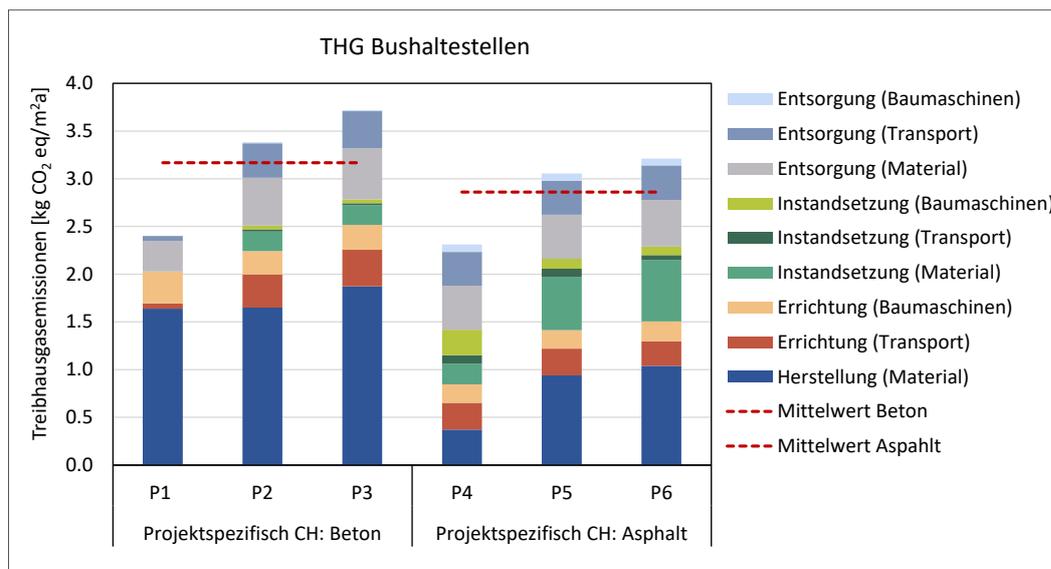


Abb. 0-1: Treibhausgasemissionen von je drei Bushaltestellen aus Beton (Projekte 1 bis 3) und Asphalt (Projekte 4 bis 6). Projekt 1: Betonplatte und behindertengerechte Haltekante, Projekt 2: Einschichtige Betonplatte, Projekt 3: Zweischichtige Betonplatte, Projekt 4: Asphaltbelag T5, Projekt 5: Asphaltbelag SDA 4-16, Projekt 6: Asphaltbelag Gussasphalt. Lebensdauer aller Projekte: 40 Jahre.

Bei der Asphaltbauweise schneidet die Asphaltbauweise Nr. 4 am besten ab, weil es eine hohe Recyclingasphalt-Verwendungsrate aufweist. Die hohen Treibhausgasemissionen der Entsorgung sind vor allem auf des Aushubmaterials zurückzuführen.

Mittels Auswertung der Umweltbelastungspunkte der Projekte P2 bis P6 weisen die Asphaltbushaltestellen im Mittel mit ca. 6'500 UBP/m²a höhere Umweltwirkungen auf als die Betonbushaltestellen mit ca. 5'500 UBP/m²a.

B1.3 Gehwege

Die Gehwege 1 bis 13 sind Standardaufbauten, die in verschiedenen Kantonen und Gemeinden verwendet werden. Sie bestehen aus einer Deckschicht, einer Tragschicht und einer Kiesfundation. Die Daten wurden mit dem SABINA-Tool ausgewertet. Die Schichtmächtigkeiten und die Asphaltarten der analysierten Gehwege sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 ersichtlich. Die Gehwege wurden pro Quadratmeter und Jahr ausgewertet. Zusätzlich wurde ein beidseitiger Randstein modelliert (Gneis Randstein 12/15x25 cm mit einer Masse von 0.05 t/m und Splittbeton C20/25 mit 0.1 m³/m, sowie die jeweiligen Transporte).

Tabelle 12: Schichtmächtigkeit der Gemeindestrassen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht)

Nr.	Gehweg	DS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	Summe [cm]
-----	--------	---------	---------	---------	------------



1	ZH 1	3	6	50	59
2	ZH 2	3	6	40	48
3	ZH 3	3	6	36	45
4	ZH 4	3	5	40	47
5	ZH 5	3	5	30	37
6	SG 1	3	5	50	58
7	SG 2	3	5	40	48
8	GR 1	3	5	50	58
9	GR 2	3	6	40	49
10	GR 3	3	5	40	47
11	ZG 1	3	7	40	50
12	LU 1	5	0	40	45
13	SO 1	3	5	40	47

Tabelle 13: Asphaltarten der Gemeindestrassen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.

Gehweg	DS	TS
ZH 1	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
ZH 2	AC 8 L, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
ZH 3	AC 8 L, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
ZH 4	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
ZH 5	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
SG 1	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
SG 2	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
GR 1	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
GR 2	AC 8 N, B 70/100	AC T 22 N, B 70/100
GR 3	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100
ZG 1	AC 8 N, B 70/100	AC T 22 N, B 70/100
LU 1	AC TDS 16 N, B 70/100	-
SO 1	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100

B1.4 Gemeindestrassen

Für die Gemeindestrassen wurden Standardbauweisen herangezogen, die von verschiedenen Tiefbauämtern der Gemeinden in den Kantonen Zürich, Graubünden und Luzern bereitgestellt wurden. Die Auswertung der Gemeindestrassen beinhaltet nur die Fahrbahn und ein beidseitiger Randstein (Gneis Randstein



12/15x25 cm mit einer Masse von 0.05 t/m und Splittbeton C20/25 mit 0.1 m³/m, sowie die jeweiligen Transporte). Die Fahrbahnen entsprechen Belastungsklassen im Bereich von T1 bis T3. Wo vorhanden, wird die Belastungsklasse angegeben.

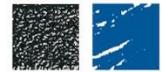
Tabelle 14: Schichtmächtigkeit der Gemeindestrassen (Standardaufbauten) je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht)

Gemeindestrassen	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	Summe [cm]
ZH 1: T1,2	3	0	7	60	70
LU 1: T2	3	0	7	50	60
ZH 2: T3	3	0	10	60	73
LU 2: T3	3	0	10	50	63
ZH 3	3	0	8	50	61
ZH 4	3	0	7	45	55
GR 1	3	0	9	80	92
GR 2	4	8	8	80	100
GR 3	3	0	9	100	112
GR 4	3	0	9	110	122

Tabelle 15: Asphaltarten der Gemeindestrassen (Standardaufbauten) nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.

Gemeindestrassen Nr.	DS	BS	TS
ZH 1: T1,2	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100
LU 1: T2	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100
ZH 2: T3	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 S, B 50/70
LU 2: T3	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100
ZH 3	AC 8 N, PmB 45/80-80	-	AC T 22 N, B 70/100
ZH 4	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 16 N, PmB 45/80-80
GR 1	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100
GR 2	AC 8 N, B 70/100	AC B 22 S, B 50/70	AC T 22 S, B 50/70
GR 3	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100
GR 4	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100

Als Vergleich dazu wurden zehn projektspezifische Gemeindestrassen ausgewertet (siehe Abb. 0-2).



Die Gemeindestrasse P1 konnte aus dem ECO2nstruct-Tool übernommen werden. Es handelt sich um eine Strassensanierung. Die Asphalt Deck- und Tragschicht sowie das Strassenkies wurden modelliert. Als Baumaschinen waren ein Schwarzdecken-Fertiger und eine Pneuradwalze angegeben. Zusätzlich wurden ein Hydraulikbagger und ein Kleindumper ergänzt. Dafür wurde der Mittelwert der anderen neun Gemeindestrassen von diesen zwei Baumaschinen verwendet. Die Transporte sind im Projekt enthalten. Die Berechnung der Umweltwirkung basiert auf den Hintergrunddaten von Eco2nstruct.

Die Gemeindestrassen P2 bis P7 stammen aus realen Gemeindestrassenprojekten einer Schweizer Stadt. Die Materialien und Aufwände für den Gehweg und die Werkleitungen wurden entfernt, so dass möglichst nur der Bau der Fahrbahn der Gemeindestrasse in die Auswertung einfließt. Abgebildet sind jeweils die Asphalt Deck- und Tragschicht, Kies für die Foundationsschicht und Planierarbeiten, die Entsorgung der Materialien sowie der Transport zur Baustelle und zur Entsorgung und die Baumaschinen für die Errichtung. Die Transporte wurden wie bei den Bushaltestellen über die Masse berechnet.

Gemäss der Experteneinschätzung wurde angenommen, dass 40% der Baumaschinenstunden für den Bau der Fahrbahn der Gemeindestrassen aufgewendet wurden. Die Fahrbahnbreite wurde wo nicht angegeben mit «map.geo.admin» selbst abgeschätzt und variierte je nach Projekt zwischen 6 m und 7 m. Nachfolgend ist für jedes Gesamtprojekt eine kurze Beschreibung angegeben:

- Gmd.Str. P2: Verschmälerung, Neugestaltung Anschluss, neue Fussgängerquerung, Belagersatz und teilweise Erneuerung der Foundation
- Gmd.Str. P3: Totalersatz Strassenoberbau (Foundationsschichten, Beläge, Abschlüsse, Strassenentwässerung)
- Gmd.Str. P4: Totalersatz Strassenoberbau (Foundationsschichten, Beläge, Abschlüsse, Strassenentwässerung), Neubau Gehweg, inkl. Ausgestaltung Baumgruben
- Gmd.Str. P5: Strassensanierung, Verschiebung Bushaltestelle
- Gmd.Str. P6: Erneuerung Belag und Randabschlüsse, Neugestaltung Strassenraum (Verkehrsberuhigung)
- Gmd.Str. P7: Sanierung Fahrbahn, Gehweg und Werkleitungen, bei der Fahrbahn wurde auch die Foundationsschicht erneuert
- Gmd.Str. P8: Sanierung Fahrbahn, Gehweg und Werkleitungen, keine Erneuerung der Foundationsschicht

Die Gemeindestrasse P9 stammt aus einem anderen Projekt der UTech. Das Gesamtprojekt beinhaltet folgendes: Strassensanierung und Neugestaltung, Reduktion der Fahrbahnbreite, Parkbuchten in bestehende Rabatte. Wie bereits bei den anderen Gemeindestrassen wurde auch hier nur die Fahrbahn berücksichtigt und Gehwege, Werkleitungen, Energie und Betriebsmittel herausgerechnet. Die Transporte wurden wie bei den Bushaltestellen über die Massen abgebildet. Die Mengen der Asphalt Deck- und Tragschicht sowie der Kiesfoundationsschicht wurden mit Eco2nstruct Hintergrunddaten verknüpft. Die Baumaschinen und dessen Umweltwirkung stammen aus dem Originalprojekt.

Die Gemeindestrasse P10 beinhaltet eine Strassensanierung. Die Gehwege und Werkleitungen wurden aus dem Gesamtprojekt entfernt, so dass nur die Fahrbahn der Gemeindestrasse berücksichtigt wird. Abgebildet sind somit die Asphalt Deck- und Tragschicht und die Kies Foundationsschicht. Die Transporte wurden wie bei den Bushaltestellen über die Masse abgebildet. Für die Baumaschinen wurde gemäss Experteneinschätzung angenommen, dass 40% der Maschinenstunden für die Fahrbahn nötig waren.

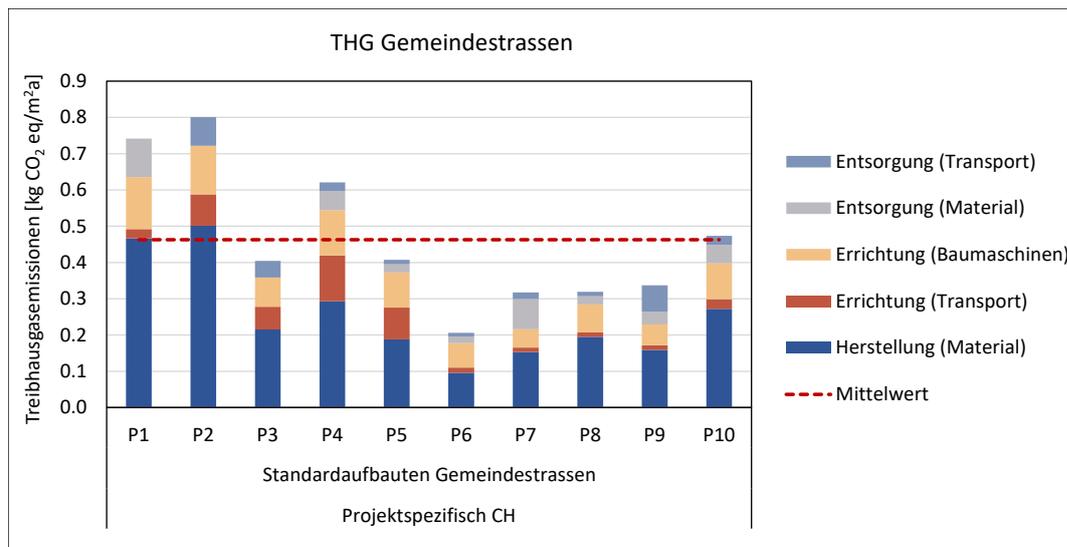


Abb. 0-2: Treibhausgasemissionen der von 10 verschiedenen Gemeindestrassenprojekten. Betrachtet wurden die Herstellung, Errichtung und Entsorgung, jedoch keine Instandsetzung. Lebensdauer: 80 Jahre.

Da die Baumaschinen für die Gesamtprojekte vorhanden waren und über eine Annahme auf die Fahrbahn heruntergerechnet werden mussten, kann es sein, dass diese Annahme zu einer Überschätzung der Baumaschinen führte. Gemeindestrasse Nr. 6 schneidet ökobilanziell am besten ab, weil die Schichtmächtigkeiten geringer sind als bei den anderen Gemeindestrassenprojekten.

Tabelle 16: Schichtmächtigkeit der projektspezifischen Gemeindestrassen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht)

Gemeindestrassen	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	Summe [cm]
P1	5	0	15	24	43
P2	5	9	13	51	79
P3	4	0	14	68	86
P4	3	8	9	106	126
P5	4	0	12	69	84
P6	3	0	7	7	17
P7	3	0	13	20	37
P8	6	0	11	0	17
P9	3	0	7	5	15
P10	7	0	19	4	20

Tabelle 17: Asphaltarten der projektspezifischen Gemeindestrassen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.

Gemeindestrassen Nr.	DS	BS [cm]	TS [cm]
P1	Mischgutsorte PA, PA 11, 15% RC	-	Mischgutsorte EME, AC EME 22, C2, 0% RC



P2	AC 8 H	AC B 22 H	ACT 22 H
93	AC 8 N, 40% RC	-	ACT 22 N, 80% RC
P4	SDA 8-12, 0% RC	AC B 22 S, 60% RC	ACT 22 S, 80% RC
P5	AC 11 N, 40% RC	-	ACT 22 N, 80% RC
P6	AC 8 N, 40% RC	-	ACT 22 N, 80% RC
P7	AC 8 N, B 70/100	-	ACT 22 N, B 70/100
P8	AC 8 N, B 70/100	-	ACT 22 N, B 70/100
P9	Mischgutsorte N, AC 11 N, B 70/100, 30% RC		Mischgutsorte N, ACT 22 N, B 70/100, 30% RC
P10	AC 8 N, B 70/100	-	ACT 22 N, B 70/100

B1.5 Kantonsstrassen

Für Kantonsstrassen gibt es verschiedene Standardaufbauten von kantonalen Tiefbauämtern. Standardaufbauten der Kantone Zürich, St. Gallen, Graubünden, Zug, Fribourg, Solothurn, Basel und Luzern wurden mit dem SABINA-Tool ausgewertet. Modelliert wurden jeweils die Asphalt Deck-, Binder- und Tragschicht, die Fundationsschicht (RC-Kiesgemisch) und die Bauabfälle ins Recycling und in die Deponie. Der Transport der Materialien wurde mit einem LKW 32 t abgebildet. Für den Einbau sind verschiedene Baumaschinen wie Walzen, Schwarzdeckenfertiger und Raupenlader modelliert worden. Die Fahrbahnen entsprechen Belastungsklassen im Bereich von T2 bis T5.

Nachfolgend sind die modellierten Schichtdicken und Asphaltarten der jeweiligen Standardaufbauten aufgelistet.

Tabelle 18: Schichtmächtigkeit der Standardaufbauten der Kantonsstrassen je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht)

Standardtyp Kantonsstrasse	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	Summe [cm]
T1/T2 SO	4	0	7	50	60
T2 ZH	3	0	14	50	67
T3 ZH	3	8	7	50	68
T3 SG	3	0	10	50	63
T3 ZG	3	0	10	50	63
T3 BS	3	7	7	43	60
T3/T4 SO	4	6	6	50	65
T2,3,4a GR (besondere Beanspr.)	3	5	7	50	65
FR : Projektdaten	4	0	9	50	63
T4 ZH	3	8	8	50	69
T4 SG	3	7	7	50	67
T4a ZG	3	7	7	50	67



T4b ZG	3	7	7	50	67
T4b GR	3	7	7	50	67
T4b GR (besondere Beanspruchung)	3	7	7	50	67
T4.1 LU	3	7	7	50	67
T4a GR	3	5	7	50	65
T4, T5 BS	3	9	9	39	60
T5 ZH	3	9	10	50	72
T5 SG	3	9	10	50	72
T5a GR	3	8	9	50	70
T5a GR (besondere Beanspruchung)	3	8	9	50	70
T5 LU	3	10	10	50	72
T6 ZH	3	9	8	60	80

Tabelle 19: Asphaltarten der Gemeindestrassen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binder-schicht, TS = Tragschicht). Für die Foundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.

Standardtyp Kantonsstrasse	DS	BS	TS
T1/T2 SO	AC 11 N, B 50/70	-	AC T 22 N, B 50/70
T2 ZH	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100
T3 ZH	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 22 N, B 70/100
T3 SG	AC 8 S, B 50/70	AC B 22 S, B 50/70	AC T 22 S, B 50/70
T3 ZG	AC 8 N, B 70/100	-	AC T 22 N, B 70/100
T3 BS	AC MR 8 LN, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 25/55-65	AC T 22 H, PmB 25/55-65
T3/T4 SO	SMA 11, PmB 45/80-65	AC B 16 S, PmB 45/80-50	AC T 22 N, B 50/70
T2,3,4a GR (besondere Beanspr.)	AC 8 S, B 50/70	AC B 16 S, B 50/70	AC T 22 S, B 50/70
FR : Projektdaten	AC MA 8 N, B 50/70	-	AC T 22 L, B 70/100
T4 ZH	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 25/50-65	AC T 22 S, B 50/70
T4 SG	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 25/50-65	AC T 22 S, B 50/70
T4a ZG	AC 8 S, B 50/70	AC B 22 S, B 50/70	AC T 22 S, B 50/70



T4b ZG	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 22 H, PmB 45/80-65
T4b GR	AC 8 S, B 50/70	AC B 16 S, B50/70	AC T 22 S, B 50/70
T4b GR (besondere Beanspruchung)	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 22 H, PmB 45/80-65
T4.1 LU	AC 8 S, B 50/70	AC B 22 S, B 50/70	AC T 22 S, B 50/70
T4a GR	AC 8 N, B 70/100	AC T 16 N, B 70/100	AC T 22 N, B 70/100
T4, T5 BS	AC MR 8 LN PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 25/55-65	AC T 22 H, PmB 25/55-65
T5 ZH	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 25/50-65	AC T 22 H, PmB 45/80-65
T5 SG	AC MR 8, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 22 H, PmB 45/80-65
T5a GR	AC 8 S, B 50/70	AC B 22 S, B 50/70	AC T 22 S, B 50/70
T5a GR (besondere Beanspruchung)	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 22 H, PmB 45/80-65
T5 LU	AC 8 H, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 22 H, PmB 25/55-65
T6 ZH	SDA 8-12, PmB 45/80-80	AC B 22 H, PmB 25/50-65	AC T 22 H PmB 45/80-65

Für den Literaturwert wurden die Werte aus der Studie «Treibhausgas- und Umweltbilanzierung von Bauprojekten im Tiefbau, 2024» [13] gemittelt und als Vergleich in die Grafik eingefügt. Die Lebensdauer in der Studie betrug 40 Jahre und ist im Vergleich zu jener der Standardaufbauten halb so lange. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wurden die Werte aus der Studie auf eine Lebensdauer von 80 Jahren umgerechnet. Die Standardabweichung der 17 betrachteten Strassen in der Studie [13] betrug 0.26 kg CO₂ eq/m² a.

B1.6 Nationalstrassen

Analog zu den Kantonsstrassen wurden zehn Standardaufbauten des ASTRA mit dem SABINA-Tool ausgewertet. Die zehn Standardaufbauten unterscheiden sich in ihrer Schichtstärke und -zusammensetzung und im Recyclinggehalt (vgl. Tabelle 20 und Tabelle 21).

Tabelle 20: Zusammensetzung des Strassenaufbaus der Standardaufbauten der Nationalstrassen in der Schweiz

Standardtyp	Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	Fundation	Frostschutz
SDA 8-12: EME, RC 1	SDA 8-12, PmB 45/80-65	AC EME 22 C1, B 15/25, RC 40%	AC EME 22 C2, B 10/20, RC 50%	AC F 22 B 50/70, RC 90%	KG-UG 0/45



SDA 8-12: PmB, RC 1	SDA 8-12, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65, RC 50%	AC T 22 H, PmB 45/80-65, RC 50%	AC F 22, B 50/70, RC 90%	KG-UG 0/45
SDA 8-12: EME, RC 2	SDA 8-12, PmB 45/80-65	AC EME 22, C1 B 15/25, RC 60%	AC EME 22 C2 B 10/20, RC 60%	AC F 22, B 50/70, RC 95%	KG-UG 0/45
SDA 8-12: PmB, RC 2	SDA 8-12, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 65/105-60, RC 60%	AC T 22 H, PmB 65/105-60, RC 60%	AC F 22, B 50/70, RC 95%	KG-UG 0/45
SDA 8-12: EME, RC 3	SDA 8-12, PmB 45/80-65	AC EME 22 C1, B 15/25, RC 40%	AC EME 22 C2, B 10/20, RC 50%	AC F 22 B 50/70, RC 90%	Wandkies 0/32
MR 8: EME, RC 1	AC MR 8, PmB 45/80-65	AC EME 22, C1, B 50/70, RC 40%	AC EME 22, C2, B 10/20, RC 50%	AC F 22, B 70/100, RC 90%	KG-UG 0/45
MR 8: PmB, RC 1	AC MR 8, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65, RC 50%	AC T 22 H, PmB 45/80-65, RC 50%	AC F 22, B 50/70, RC 90%	KG-UG 0/45
MR 8: EME, RC 2	AC MR 8, PmB 45/80-65	AC EME 22, C1, B 15/25, RC 60%	AC EME 22, C1, B 10/20, RC 60%	AC F 22 B 50/70, RC 95%	KG-UG 0/45
MR 8: PmB, RC2	AC MR 8, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 65/105-60, RC 60%	AC T 22 H, PmB 65/105-60, RC 60%	AC F 22, B 50/70, RC 95%	KG-UG 0/45
MR 8: EME, RC 3	AC MR 8, PmB 45/80-65	AC EME 22, C1, B 50/70, RC 40%	AC EME 22, C2, B 50/70, RC 50%	AC F 22, B 70/100, RC 90%	Wandkies 0/32

Tabelle 21: Schichtmächtigkeit der Standardaufbauten der Nationalstrassen in der Schweiz je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht, FSS = Frostschuttschicht)

Standardtyp	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	FSS [cm]	Summe [cm]
SDA 8-12: EME, RC 1	3	8	8	8	50	77
SDA 8-12: PmB, RC 1	3	9	10	10	50	82
SDA 8-12: EME, RC 2	3	8	8	8	50	77
SDA 8-12: PmB, RC 2	3	9	10	10	50	82
SDA 8-12: EME, RC 3	3	8	8	8	50	77
MR 8: EME, RC 1	3	8	8	8	50	77
MR 8: PmB, RC 1	3	9	10	10	50	82
MR 8: EME, RC 2	3	8	8	8	50	77



MR 8: PmB, RC2	3	9	10	10	50	82
MR 8: EME, RC 3	3	8	8	8	50	77

Die verwendeten Materialien werden ganzheitlich recycelt oder auf der Deponie oder entsorgt. Die Transporte und die Baumaschinen für den Einbau sind ebenfalls berücksichtigt worden, sowohl bei der Herstellung als auch bei der Instandsetzung.

Literaturwerte konnten aus der Studie «Ökoprofil für Asphalt- und Betonbauweisen von Fahrbahnen» [37] herangezogen werden. Letztere nahm eine Lebensdauer von 40 Jahren an, was halb so viel ist wie bei den Standardaufbauten angenommen wurde, weshalb der Literaturwert ebenfalls auf eine Lebensdauer von 80 Jahren skaliert wurde.

Aus einem ehemaligen Projekt der UTech in Deutschland konnten je sechs weitere Standardaufbauten in Asphaltbauweise und Betonbauweise ausgewertet werden (Details siehe Tabelle 24 und Tabelle 25). Für die Betonbauweise wurde eine Lebensdauer von 90 Jahren angenommen. Im Rahmen der Instandsetzung wurde angenommen, dass jeweils zwei Mal der Oberbeton und der Unterbeton ersetzt werden. In der Asphaltbauweise wurde dreimal die Deckschicht, dreimal die Binderschicht und einmal die Tragschicht als Instandsetzungsmassnahmen ersetzt. Damit wurde die Binderschicht einmal mehr ersetzt als bei den Schweizer Standardaufbauten. Zusätzlich wurde in Deutschland angenommen, dass 2% in der KVA entsorgt werden, was zu erhöhten Umweltwirkungen führte.

Tabelle 22: Schichtmächtigkeit der Standardaufbauten der Nationalstrassen in Deutschland je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht, FSS = Frostschuttschicht)

Standardtyp	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	FSS [cm]	Summe [cm]
P1 Asphalt	4	8	22	0	50	84
P2 Asphalt	4	8	14	0	44	70
P3 Asphalt	4	8	18	15	45	90
P4 Asphalt (75 cm frostsicherer Oberbau)	4	8	18	15	40	85
P5 Asphalt (75 cm frostsicherer Oberbau)	4	8	18	0	35	65
P6 Asphalt (75 cm frostsicherer Oberbau)	4	8	18	0	25	55
P7 Beton	5	22	20	0	43	90
P8* Beton	5	22	20	0	43	90
P9 Beton	5	21	10	0	49	85
P10* Beton	5	21	10	0	49	85
P11 Beton	5	24	20	0	36	85
P12* Beton	5	24	20	0	36	85



Tabelle 23: Zusammensetzung des Strassenaufbaus der ausgewerteten Nationalstrassen in Deutschland

Standardtyp	Deckschicht	Binderschicht	Tragschicht	Fundation	Frostschutz
P1 Asphalt	SMA 11 S	AC 16 BS, PmB	AC 32 T S	-	FSS
P2 Asphalt	SMA 11 S	AC 16 BS, PmB	AC 32 T S	-	FSS
P3 Asphalt	SMA 11 S	AC 16 BS, PmB	AC 32 T S	HGT	SfM
P4 Asphalt (75 cm frostsicherer Oberbau)	SMA 11 S	AC 16 BS, PmB	AC 32 T S	STS Kies/ Schotter	FSS
P5 Asphalt (75 cm frostsicherer Oberbau)	SMA 11 S	AC 16 BS, PmB	AC 32 T S	KTS Kies/ Schotter	FSS
P6 Asphalt (75 cm frostsicherer Oberbau)	SMA 11 S	AC 16 BS, PmB	AC 32 T S	STS/KTS Kies/ Schotter	SfM
P7 Beton	OB 0/22 mm Grinding	UB 0/32 mm	HGT	-	FSS
P8* Beton	OB 0/22 mm Waschbeton	UB 0/32 mm	HGT	-	FSS
P9 Beton	OB 0/22 mm Grinding	UB 0/32 mm	Asphalttragschicht	-	FSS
P10* Beton	OB 0/22 mm Waschbeton	UB 0/32 mm	Asphalttragschicht	-	FSS
P11 Beton	OB 0/22 mm Grinding	UB 0/32 mm	Schottertragschicht	-	FSS
P12* Beton	OB 0/22 mm Waschbeton	UB 0/32 mm	Schottertragschicht	-	FSS

In der Abb. 0-3 sind die Resultate der Auswertung der Treibhausgasemissionen der Nationalstrassen in Deutschland in Asphalt- und Betonbauweise ersichtlich.

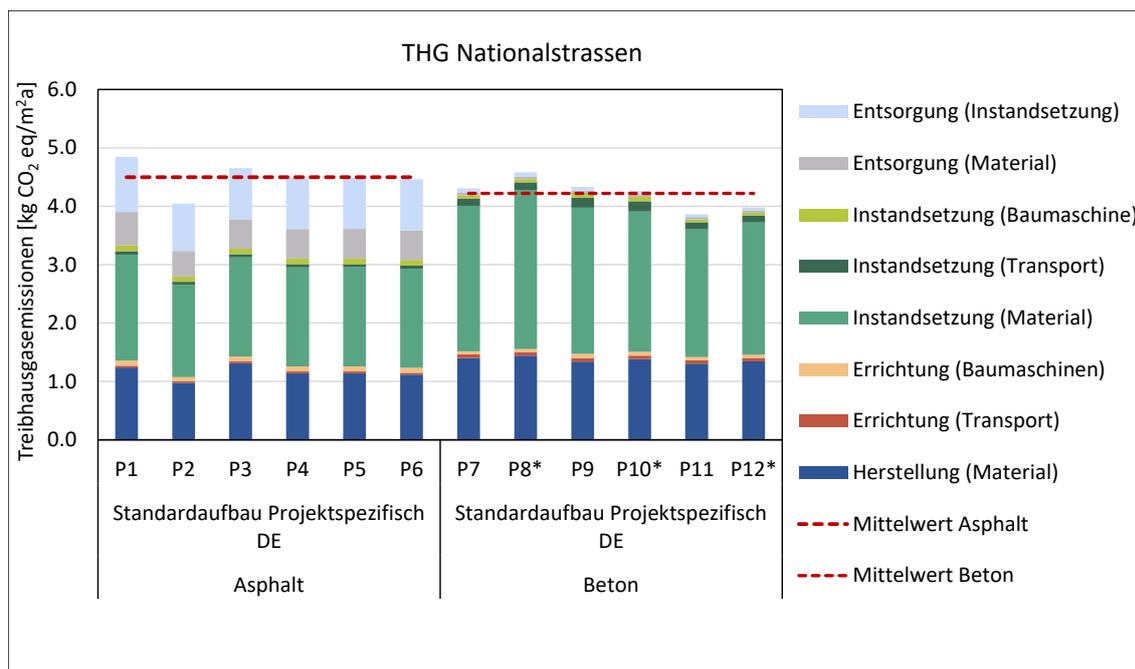


Abb. 0-3: Treibhausgasemissionen verschiedener Deutscher Nationalstrassen in Asphalt und Betonbauweise. Lebensdauer Asphaltbauweise: 80 Jahre, Lebensdauer Betonbauweise: 90 Jahre. Die mit Stern * Markierten Betonprojekte verwendeten Waschbeton anstelle von Grinding.

B1.7 Kreisel

Standardaufbauten von Beton- und Asphaltkreiseln wurden von den Tiefbauämtern der Kantone St. Gallen, Zug, Graubünden und Thurgau sowie vom ASTRA ausgewertet. Aus der Studie [12] konnten die Mengen und die Materialien, sowie Transportdistanzen zu je einem Beton- und Asphaltkreisel herausgezogen werden. Im Unterschied zu den angenommenen Instandsetzungszyklen wird in der Studie [12] die Binderschicht nur alle 40 Jahre ersetzt. Dies wurde angepasst und ebenfalls ein zweifacher Ersatz der Binderschicht eingerechnet. Die Lebensdauer aller Kreisel wurde auf 80 Jahre gesetzt und bei den Asphaltkreiseln die 3 Instandsetzungsmassnahmen zusätzlich modelliert. Bei einem Betonkreisel werden gemäss der Studie alle 20 Jahre die Fugen ersetzt. Der Fugenersatz wurden jedoch aufgrund fehlender Daten und der eher geringen Umweltwirkung vernachlässigt. Dies führt dazu, dass für den Betonkreisel in den 80 Jahren keine Instandsetzungsmassnahmen modelliert wurden.

Ein Beispielprojekt aus dem Kanton Graubünden wurde ebenfalls als Vergleich ausgewertet. Bei diesem Projekt handelt es sich jedoch um eine Kombination von verschiedenen Massnahmen, unter anderem dem Bau des Betonkreisels, den anliegenden Asphaltstrassen, Gehwegen, Banketten, Böschungsschüttungen und Kunstbauten. So gut es ging wurden auf einer teilaggregierten Stufe die verwendeten Materialien, welche nicht zum Bau des Kreisels und den Asphaltanschlüssen gehören herausgelöscht, so dass nur noch die Umweltwirkung dieser beiden Bauelemente berechnet werden konnte. Ebenfalls darin enthalten sind 4 Betonbushaltestellen. Da die Umweltwirkung auf einen Quadratmeter heruntergerechnet wurde, ergab sich eine leichte Vermischung der Bauelemente, jedoch wird davon ausgegangen, dass der Einfluss der Bushaltestellen und der Anschlüsse nicht überwiegen. Die Fläche wurde grob aus dem Bauplan entnommen, weist jedoch Unsicherheiten auf. Das Beispielprojekt dient als Anhaltspunkt und dem Vergleich. Die Unsicherheiten in diesem Projekt sind deutlich höher als bei den Standardaufbauten.



Tabelle 24: Schichtmächtigkeit der Kreisel je Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht, FS = Fundationsschicht (bei Kreisel 9 gesamte Gesteinskörnung im Projekt))

	Kreisel	Quelle	Beton [cm]	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]	FS [cm]	Summe [cm]
Asphalt	1	TBA SG	-	3	8	10	50	71
Asphalt	2	TBA TG	-	3	10	10	50	73
Asphalt	3	TBA SG	-	4	9	9	50	72
Asphalt	4	TAZ ZH [12]	-	3	7	7	50	67
Beton	5	TBA ZG	26	-	-	8	50	84
Beton	6	ASTRA	26	-	-	8	50	84
Beton	7	TBA SG	26	-	-	8	50	84
Beton	8	PAW [12]	25	-	-	8	50	83
Beton	9	Projekt GR	13	4	7	12	180	216

Tabelle 25: Asphalt- und Betonsorten der Bushaltestellen nach Schichttyp (DS = Deckschicht, BS = Binderschicht, TS = Tragschicht). Für die Fundationsschicht wird ein RC-Kiesgemisch 0/45 mm verwendet.

	Kreisel	Kernbeton [cm]	DS [cm]	BS [cm]	TS [cm]
Asphalt	1	-	SMA 8	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 32 H, PmB 45/80-65
Asphalt	2	-	AC MR 8, PmB 45/80-65 -E	AC B 22 H, PmB 45/80-65-E	AC T 22 H, PmB 45/80-65-E
Asphalt	3	-	AC MR 11, PmB 45/80-65	AC B 22 H, PmB 45/80-65	AC T 22 H, PmB 45/80-65
Asphalt	4	-	Mischgutsorte S, AC 8 S, B 50/70, 30% RC	Mischgutsorte S, AC B 22 S, B 50/70, 30% RC	Mischgutsorte S, AC T 22 S, B 50/70, 30% RC
Beton	5	NPK G, C30/37, 0/32 mm, XF4, XC4, XD3, CEM II/B	-	-	AC F 22 B 50/70
Beton	6	NPK A, C 25/30, XC2 (CH), C2, CI 0.10, Dmax 32 mm	-	-	AC F 22 B 50/70
Beton	7	C 30/70 XC 4, XD 3, XF4, CEM I oder CEM II	-	-	AC T 22 N, B70/100
Beton	8	NPK F, C30/37, 0/32 mm, XF2, XC4, XD3, CEM II/B-LL	-	-	Mischgutsorte S, AC T 22 S, B 50/70, 30% RC



Beton	9	C 30/70	-	-	ACT 22 N
-------	---	---------	---	---	----------

B2. Gleise

Einerseits wurde ein eingleisiges Beispielbauprojekt der SBB und andererseits ein zweigleisiges Projekt ausgewertet. Bei den Beispielprojekten handelt es sich jeweils um eine Fahrbahnerneuerung inklusive Schotterreinigung. Der Vollständigkeitshalber wurde die Schotterreinigung nicht modelliert, sondern die Herstellung und die Entsorgung des Schotters über einen Brechschotter abgebildet. Für die Stahlschienen wurde in der Ökobilanz ein niedrig legierter Stahl verwendet. Die Herstellung des Stahls verursacht die grössten Umweltwirkungen. Positionen wie Betonfertigteile, Schienenklemmen und Kupferkabel wurden zuerst anhand des zweigleisigen Projektes ausgewertet. Da diese Positionen zusammen jedoch maximal 0.3% der Gesamtumweltwirkung ausgemacht haben, wurden sie schlussendlich in beiden Projekten vernachlässigt. Zusätzlich wurde angenommen, dass die Betonkabelschutzrohre, PE-Kabelschutzrohre und Kupferkabel entlang der gesamten Gleislänge verbaut sind und nicht nur den Mengen des Erneuerungsbeispielprojektes entsprechen. Die Baumaschinenstunden inklusive Transportfahrzeuge für den Bau wurden anhand des Bauprogrammes grob abgeschätzt. Es wurde angenommen, dass die Baumaschine in 50% der Arbeitszeit im Einsatz ist. Unter diesen Annahmen weist das eingleisige Projekt verhältnismässig mehr Baumaschinenstunden auf als das zweigleisige Projekt. Die Unsicherheit bei den Baumaschinen ist aufgrund der schlechten Datengrundlage sehr gross. Zusätzliche Transporte wurden nicht modelliert.

Das eingleisige Beispielprojekt wurde für eine Gleislänge von 105 m ausgewertet. Im Rahmen des Gesamtprojektes wurden 424 m erneuert, jedoch war die Datengrundlage auf dem Teilabschnitt von 105 m am besten, weshalb dieser Bereich gewählt wurde. Allgemeine Positionen wie die Baumaschinenstunden wurden dann auf die 105 m heruntergerechnet.

Das zweigleisige Beispielprojekt weist eine Länge von 4831 m auf, wobei dies die Gleislänge und nicht die Schienenlänge (Doppel so lang) oder die tatsächliche Länge (halb so lang) darstellt.

Die Lebensdauern der Schienen (25 a), Schwellen (40 a) und des Schotters (60 a) wurden der Studie [14] entnommen, während die restlichen Materialien und Maschinen eine Lebensdauer von 33 Jahren haben.

B3. Brücken

Objekttyp	Ausgewertete Projekte	Anzahl	Kommentar
Balkenbrücke	Beispielprojekte	2	Brücke inkl. Hilfsbrücke und eine Instandsetzung
	Literatur	3	3 Brücken aus einer Studie
Bogenbrücke	Beispielprojekte	3	Ohne Instandsetzung
Rahmenbrücke	Beispielprojekt	1	
Strassenbrücke	Beispielprojekte TBA	3	
Hangstrassenbrücke	Beispielprojekte TBA	2	
Eisenbahnbrücke	Beispielprojekte	1	Ohne Gleisoberbau
	Literatur	2	
Betonbrücke	Beispielprojekte	2	
	Literatur	4	
Stahlbetonbrücke	Literatur	4	
Stahlbrücke	Literatur	5	



Holzbrücke	Literatur	2	
Wildtierbrücken	Beispielprojekte	7	Stahl- und Holzbrücken
Unterführungen	Beispielprojekte	1	
Überführungen	Beispielprojekte	1	

B3.1 Balkenbrücke

Das Beispielprojekt «Balkenbrücke 1» stammt aus einem früheren Projekt der UTech und stellt eine Brücke mit einer Länge von 13.3 m und einer Breite von ca. 5.2 m dar. Für die Erstellung dieser Brücke war eine Hilfsbrücke von 18 m Länge und 4.5 m Breite erforderlich. Die Umweltwirkung der Hilfsbrücke ist einkalkuliert und wurde ebenfalls pro Quadratmeter der normalen Brücke ausgewertet. Die Brücke weist eine Asphaltfahrbahn auf. Die Transporte und Baumaschinen für die Erstellung beider Brücken und den Rückbau der Hilfsbrücke sind abgebildet. Die benötigten Materialmengen wurden dem Leistungsverzeichnis eines kantonalen Tiefbauamtes entnommen. Die Auswertung der Treibhausgasemissionen je Leistungsposition wurde aus dem damaligen Projekt in einer aggregierten Version übernommen. Die Lebensdauer wurde auf 100 Jahre geschätzt.

Das zweite Beispielprojekt stammt ebenfalls aus einem früheren Projekt der UTech und umfasst die Instandsetzung einer Brücke inklusive der Fahrbahn direkt vor und nach der Brücke. Die Brücke weist eine Länge von 15 m auf, während die Gesamtprojektlänge 45 m beträgt. Letztere war für die Berechnung der Fläche entscheidend. Die totale Breite beträgt 9.4 m, wobei die Breite der Fahrbahn ca. 7 m entspricht. Die Lebensdauer der Instandsetzung stammt aus dem Handbuch des ASTRA zu Lebensdauern und Instandsetzungsintervallen und beträgt 50 Jahre.

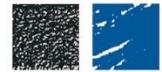
Die Literaturwerte stammen aus einer Studie zur Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken [38], bei welcher Autobahnbrücken ökobilanziell bewertet wurden. Folgende drei Balkenbrücken wurden analysiert: Integralbrücke, Zweifeld-Stahlverbundbrücke und Zweifeld-Stahlbetonbrücke). Dabei wurde die Herstellung, die Nutzung und Instandsetzung, sowie der Rückbau abgebildet. Die Lebensdauer wurde auf 100 Jahre gesetzt.

B3.2 Bogenbrücke

Aus vergangenen Projekten der UTech konnten die Daten von kantonalen Tiefbauämtern zu drei verschiedenen Bogenbrücken ausgewertet werden. Die erste Bogenbrücke ist eine Brücke mit einer Asphaltfahrbahn und zwei Stahlbögen oberhalb der Brücke auf beiden Seiten. Die Brücke ist knapp 27 m lang und ca. 11 m breit. Die Transporte und Baumaschinen wurden ergänzt, da hierzu keine Daten im damaligen Projekt vorlagen. Für die Baumaschinen wurde der Mittelwert aus den zwei anderen Bogenbrücken verwendet und auf den Quadratmeter heruntergerechnet. Für den Transport wurde eine Distanz von 20 km angenommen und mit dem Materialgewicht in Tonnen multipliziert (Einheit Tonnenkilometer). In der Berechnung sind die Herstellung der Brücke sowie die Entsorgung des Aushubmaterials enthalten, jedoch keine Instandsetzung und kein Rückbau der Brücke.

Die zweite Brücke hat einen tragenden Bogen unterhalb der Asphalt-Fahrbahn. Die Brücke ist ca. 142 m lang und 5.6 m breit. Die Transporte und die Baumaschinen wurden modelliert. Die benötigten Mengen wurden dem Leistungsverzeichnis entnommen. Ergänzt wurde das Bogentragwerk, das Fundament und die Pfeiler aus Stahlbeton anhand der Baupläne.

Die dritte Bogenbrücke besteht aus zwei Bögen und einer Asphaltfahrbahn. Die Brücke hat gemäss Bauplan eine Gesamtlänge von 45.2 m und eine Breite von 5.2 m. Aus dem Leistungsverzeichnis konnten die Mengen für den Ersatz des Brückenaufbaus entnommen werden. Die Asphalt-Fahrbahn wurde mit einer



6 cm dicken Deckschicht und einer 15 cm dicken Tragschicht ergänzt, da diese nicht im Leistungsverzeichnis enthalten war. Die Brücke ist in der Mitte auf einem Felsen abgestützt. Diese Brückenart erscheint typisch für Brücken in hoher Lage.

Die Lebensdauer aller drei Bogenbrücken wurde auf 100 Jahre gesetzt. Berücksichtigt wurden jeweils die Herstellung der Brücke inklusive Transporte und Baumaschinen, sowie die Entsorgung des Aushubmaterials und bei Letzteren zwei Brücken auch die Entsorgung von Asphalt und Beton. Eine Instandsetzung wurde nicht modelliert.

B3.3 Rahmenbrücke

Aus einem früheren Projekt der UTech konnte ein Beispielprojekt für eine Rahmenbrücke ausgewertet werden. Eine Strasse führt unter der Brücke hindurch und eine weitere Strasse verläuft in einem rechten Winkel über die Brücke. Die Asphaltbeläge wurden nicht berücksichtigt, sondern lediglich das Betontragwerk und die angrenzenden Stützmauern. Die Brücke ist 11 m breit und knapp 29 m lang. Die Materialien wurden anhand von Plänen und Fotos abgeschätzt. Die Transporte und Baumaschinen wurden ergänzt, wobei für die Baumaschinen die Summe der Baumaschinen einer Strassenbrücke pro Quadratmeter verwendet wurde. Die Lebensdauer wurde auf 100 Jahre gesetzt.

B3.4 Strassenbrücke

Von den kantonalen Tiefbauämtern Zürich und Graubünden konnten insgesamt drei Strassenbrückenprojekte ausgewertet werden. Bei zwei Projekten handelt es sich Gesamtprojekte, bei welchen es nicht möglich war, der reine Brückenbau herauszurechnen. Die Datenqualität zwei der drei Strassenbrücken ist somit eher gering.

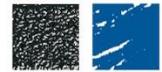
B3.5 Hangstrassenbrücke

Hierbei handelt es sich um Strassenbrücken, welche am Hang gebaut und mit Pfeilern abgestützt sind. Das Ausgewertete Projekt der Hangstrasse 1 umfasst die Erstellung der Brücke, sowie der talseitigen Stütz- und Flügelmauern mit einer Länge von 50 m und die Erstellung des Strassenoberbaus inklusive Belags. Die Länge beträgt gemäss Plan 176 m und die Breite 3 m. Die Mengen wurden aus dem Leistungsverzeichnis eines kantonalen Tiefbauamtes entnommen. Die Transporte und die Baumaschinen sind abgebildet, jedoch keine Instandsetzung. Die Lebensdauer wurde auf 100 Jahr gesetzt.

Die zweite Hangstrassenbrücke umfasst ein Projekt zur Strassenkorrektur. Die Länge beträgt gemäss einer groben Abschätzung anhand des Bauplanes 1920 m und die Breite 4.5 m. Abgebildet wurden die Herstellung der verwendeten Materialien und die Entsorgung der Rückbaumaterialien sowie die Transporte und Baumaschinen. Verbaut wurden in grossen Mengen Beton, Stahl und Gesteinskörnungen. Die Lebensdauer wurde ebenfalls auf 100 Jahre gesetzt.

B3.6 Eisenbahnbrücke

Aus einem früheren Projekt der UTech konnten Daten zu einer Eisenbahnbrücke ausgewertet werden. Dabei wurden die Materialien für die Brücke aus Plänen und Fotos abgeschätzt. Der Gleisoberbau wurde nicht berücksichtigt. Die Transporte und Baumaschinen wurden ergänzt. Für die Transporte wurde eine Distanz von 20 km angenommen. Die Baumaschinen wurden aufgrund mangelnder Daten mit dem Mittelwert der Baumaschinen von Bogenbrücken angenähert. Die Umweltwirkung wurde mit den Hintergrunddaten von Eco2nstruct berechnet. Die Eisenbahnbrücke hat eine Länge von 48.5 m und eine Breite von 5.5 m. Die Lebensdauer wurde auf 100 Jahre gesetzt.



Aus der Literatur konnten zwei weitere Werte übernommen werden. In der Studie [39] wurde eine Eisenbahnbrücke mit einer Länge von 64 m und einer Breite von 10.5 m untersucht. Die Lebensdauer betrug 40 Jahre und ist somit tiefer, wie die der Eisenbahnbrücke 1.

In der Studie von Vincent Thiebault et al. [40] wurde eine Eisenbahnbrücke mit einer Länge von 42 m und einer Breite von 7.7 m bilanziert. Die Lebensdauer betrug 30 Jahre.

B3.7 Betonbrücke

Die erste Betonbrücke stammt aus einem Projekt aus Eco2nstruct. Eingesetzt werden die Materialien Beton, Bewehrungsstahl, Gussasphalt und eine Dichtungsbahn aus Gummi. Ergänzt wurden die Transporte und die Baumaschinen, welche jenen der Balkenbrücke pro Quadratmeter gleichgesetzt wurden. Die Breite der Brücke beträgt 7.4 m und die Länge 60 m.

Die zweite Betonbrücke stammt aus einem früheren Projekt der UTech, bei welchem die Materialien anhand von Plänen und Fotos abgeschätzt wurden. Es handelt sich hierbei um eine Fussgängerbrücke. Die Transporte und Baumaschinen wurden ergänzt, wobei wieder die Baumaschinen der Balkenbrücke übernommen wurden. Die Lebensdauer wurde für beide Brücken auf 100 Jahre gesetzt.

Ergänzend zu den diesen zwei Brücken konnten Werte aus der Literatur übernommen werden. In einer Studie von Thomas Charles Edouard Dequidt [41] wurden Ökobilanzen von verschiedenen Brücken durchgeführt. Verwendet wurde der Mittelwert aus 19 Betonbrücken. Aus zwei weiteren Studien von Johanne Hammervold et al. [42] und David Marinez-Munoz et al. [43] wurden die Werte für Betonbrücken-Hohlkastenbrücken übernommen, wobei Letzterer wieder ein Mittelwert aus vier Brücken ist. Die Lebensdauer der Brücken beträgt jeweils 100 Jahre. In einer weiteren Studie von Bertola, N. et al. [44] weist die Betonbrücke eine Lebensdauer von 30 Jahren auf. Die Betonbrücken aus den Studien weisen Spannweiten von 10 bis 40 Metern auf.

B3.8 Stahlbetonbrücke

Die Werte zu den Stahlbetonbrücken stammen alle aus der Literaturrecherche. Verwendet wurden die Studien von Prof. Dr. Götz [45], Thomas Charles Edouard Dequidt [41] (Mittelwert aus 5 Brücken und eine Stahlbeton – Hohlkastenbrücke), Johanne Hammervold et al. [42] (Stahlbrücke – Hohlkastenbrücke) und Guangli Du et al. [46] (Stahlbetonbrücke mit einer Spannweite von 373 m und einer Breite von 29.5 m). Die Lebensdauer aller Brücken beträgt 100 Jahre.

B3.9 Stahlbrücke

Die Werte zu den Stahlbetonbrücken stammen ebenfalls alle aus der Literaturrecherche. Verwendet wurden wiederum die Studien von Prof. Dr. Götz [45] (Stahlbrücke, Stahlverbundbrücke), Thomas Charles Edouard Dequidt [41] (Mittelwert aus 3 Hohlkastenbrücken und der Mittelwert aus 4 Bogenbrücken aus Stahl), Johanne Hammervold et al. [42] (Stahlbrücke – Hohlkastenbrücke) und Guangli Du et al. [46] (Stahlverbundbrücke mit einer Spannweite von 373 m und einer Breite von 29.5 m). Die Lebensdauer aller Brücken beträgt 100 Jahre.

B3.10 Holzbrücke

Für Holzbrücken konnten ebenfalls die Werte aus den Studien von Thomas Charles Edouard Dequidt [41] (Mittelwert aus 4 Holzbrücken) und von Johanne Hammervold et al. [42] (Holzbogenbrücke mit einer Spannweite von 37.9 m und einer Breite von 6.1 m) verwendet werden. Die Lebensdauer beträgt jeweils 100 Jahre.



B3.11 Wildtierbrücke

Im Rahmen zweier früherer Studien der UTech wurden verschiedene Wildtierbrücken ökologisch bewertet und konnten nun für diese Studien [47], [48] verwendet werden. Es wurden mehrere Stahlbeton- und Holzvarianten auf ihre Ökobilanz verglichen. Dabei wurde die ganze Materialisierung, alle relevanten Baumaschinen und Transporte miteinbezogen. Es wurden alle Lebenszyklusphasen berücksichtigt: Herstellung, Errichtung, Nutzung (Instandhaltung und Instandsetzung) und Errichtung. Als Nutzungsdauer wurden jeweils 100 Jahre angesetzt.

B3.12 Unterführungen

Als Unterführung wurde ein Beispielprojekt ausgewertet. Dabei wurden die Materialien anhand von Fotos und vereinfachten Bauplänen abgeschätzt und die Transporte und Baumaschinen (über eine Annäherung eines anderen Projektes) ergänzt. Die Hintergrunddaten von Eco2nstruct wurden verwendet. Das Bauwerk weist eine Länge von 40 m und eine Breite von 6 m auf. Die Lebensdauer wurde wie bei den meisten Brücken auf 100 Jahre gesetzt. Die Instandsetzung wurde aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt.

B3.13 Überführungen

Aus einem früheren Projekt der UTech konnten die Daten einer Strassen-Überführung über eine Strasse und eine Bahnlinie ausgewertet werden. Die Länge der Überführung beträgt 87 m und die Breite 4 m. Es handelt sich nicht um einen klassischen Neubau, sondern um eine umfassende Sanierung inklusive Fahrbahnerweiterung, was in dieser Studie jedoch dem Neubau gleichgesetzt wurde. Die Lebensdauer beträgt 100 Jahre. Berücksichtigt wurden die Herstellung, die Entsorgung der Materialien und die Errichtung, jedoch keine Instandsetzung.

B4. Tunnel

Objekttyp	Ausgewertete Projekte	Anzahl	Kommentar
Fussgängertunnel	Beispielprojekt	1	Eco2nstruct
Bahntunnel: offene Bauweise	Beispielprojekt	1	Projekt aus Deutschland
	Literatur	2	
Bahntunnel: geschlossene Bauweise	Literatur	13	
Strassentunnel	Beispielprojekte	2	ASTRA
	Literatur	5	

Nachfolgend werden einige Hintergrundinformationen der betrachteten Tunnel bereitgestellt. Zusätzlich befindet sich in der Tabelle eine Zusammenstellung der wichtigsten Informationen für einen einfacheren Vergleich.



Tabelle 26: Hintergrundinformationen zu den ausgewerteten Tunnelbauwerken im Vergleich



Tunnel	Lebensdauer [a]	Tunnelröhre	Fahrbahn	Lebenszyklusphasen	Tunnel-länge [m]	Tunnelbreite [m]	inkl. Technische Ausrüstung	Bauweise	inkl. Notausgang	Bemerkung
Fussgängertunnel	100	eine	Gehweg	A1-A5	400	9	-	-	-	-
1. Einleisig, U-Bahn DE	100	eine	Gleis	A1-A5, C1-C4	1370	6	-	Offene Bauweise	-	Auf Stufe Vorplanung inkl. Gleis ohne Nebenanlagen
2. Einleisig	100	eine	Gleis	A1-A5	1000	7	Streckenbezogene Fahrleitung, Signal- und Energiekabel	Offene Bauweise, Konventioneller Vortrieb, Sicherungsmittel, Spritzbeton, Füllbeton	nein	12% Emissionsaufschläge zur Berücksichtigung von Energieaufwand für Bauprozess und Baustellenlogistik
3. Zweigleisig	100	eine	Gleis	A1-A5	1000	13	Streckenbezogene Fahrleitung, Signal- und Energiekabel	Offene Bauweise, Konventioneller Vortrieb, Sicherungsmittel, Spritzbeton, Füllbeton	nein	12% Emissionsaufschläge zur Berücksichtigung von Energieaufwand für Bauprozess und Baustellenlogistik
4. Einleisig	100	eine	Gleis	A1-A5	1000	7	Streckenbezogene Fahrleitung, Signal- und Energiekabel	Geschlossene Bauweise, Konventioneller Vortrieb, Sicherungsmittel, Spritzbeton, Füllbeton	nein	12% Emissionsaufschläge zur Berücksichtigung von Energieaufwand für Bauprozess und Baustellenlogistik
5. Zweigleisig	100	eine	Gleis	A1-A5	1000	13	Streckenbezogene Fahrleitung, Signal- und Energiekabel	Geschlossene Bauweise, Konventioneller Vortrieb, Sicherungsmittel, Spritzbeton, Füllbeton	nein	12% Emissionsaufschläge zur Berücksichtigung von Energieaufwand für Bauprozess und Baustellenlogistik
6. TVM	100	eine	Gleis	A1-A5	8984	11.4	-	TVM Vortrieb, Tübbingschale, Füllbeton, Sicherungsmittel	-	-
7. SBW	100	eine	Gleis	A1-A5	8984	11	-	SBW, Sicherungsmittel, Sprengstoffe	-	-
8. TVM	100	eine	Gleis	A1-A5	8800	11.4	-	TVM Vortrieb, Tübbingschale, Füllbeton, Sicherungsmittel	-	-
9. SBW	100	eine	Gleis	A1-A5	8800	11	-	SBW, Sicherungsmittel, Sprengstoffe	-	-
10. TBM	100	eine	Gleis	A1-A5 + Betone: B1 Stahlbau: C1-	55000	-	-	TBM Vortrieb, Innenschale, Sicherungsmittel	nein	Tunnelquerschnitt 70 m ² , Ausbau wird nicht betrachtet
11. TBM inkl. Nebenanlagen	100	eine	Gleis	A1-A5 + Betone: B1 Stahlbau: C1-	55000	-	Zufahrtstunnel, Erkundungsstollen	TBM Vortrieb, Innenschale, Sicherungsmittel	ja	Tunnelquerschnitt 70 m ² , Ausbau wird nicht betrachtet
12. 82% SM, 18% MUF, 2 Röhren	100	zwei	Gleis	A1-A5	8610	8.3	-	23% Erdruck, 59% Mechanisch, 18% MUF, Sicherungsmittel	-	Einspurtunnel, nur Rohbau berücksichtigt
13. SPV, 2 Röhren	100	zwei	Gleis	A1-A5	15461	8.1	-	SPV, Sicherungsmittel	-	Einspurtunnel, nur Rohbau berücksichtigt
14. SM, 1 Röhre	100	eine	Gleis	A1-A5	2575	12.15	-	70% SM (Mechanisch), 30% SM (Hydro), Sicherungsmittel	-	Doppelspurtunnel, nur Rohbau berücksichtigt
15. 85% SM, 15% SPV, 2 Röhren	100	zwei	Gleis	A1-A5	12400	8.9	-	85% SM (Mechanisch), 15% SPV, Sicherungsmittel	-	Auf Stufe Vorplanung / Einspurtunnel, nur Rohbau berücksichtigt
16. maschinelle Bauweise	100	eine	Gleis	A1-A5	1288.75	-	-	NATM, Spritzbeton und Sicherungsmittel	-	-
17. MUF	100	eine	Strasse	A1-A5	3309	11	-	MUF	-	inkl. Fahrbahn und Werkleitungen
18. SPV, MUF	100	eine	Strasse	A1-A5	70	6.2	-	SPV, MUF, MUL	-	inkl. Fahrbahn und Werkleitungen
19. SBW	100	eine	Strasse	A1-A3, A5	2628	9.5	-	SBW, Innenschale, Sicherungsmittel, Sprengstoffe	ja	Nordröhre = 1345 m, Südröhre = 1283 m
20. SBW	100	eine	Strasse	A1-A3, A5	1242.7	10.5	-	Konventioneller Vortrieb, Unbewehrte Innenschale, Sicherungsmittel, Sprengstoffe	ja	-
21. konventionell	100	eine	Strasse	A1-A5 + Betone: B1 Stahlbau: C1-3	1500	-	-	Konventioneller Vortrieb, Innenschale, Sicherungsmittel	nein	Tunnelquerschnitt 90 m ² , Ausbau wird nicht betrachtet
22. konv. inkl. Nebenanlagen	100	eine	Strasse	A1-A5 + Betone: B1 Stahlbau: C1-3	1500	-	Strassenoberbau	Konventioneller Vortrieb, Innenschale, Sicherungsmittel	ja	Tunnelquerschnitt 90 m ² , Ausbau wird nicht betrachtet
23. maschinelle Bauweise	100	eine	Strasse	A1-A5, B2, B6	2381	-	Belüftungssystem, Beleuchtung, Strassenoberbau	Konventioneller Vortrieb, Innenschale, Sicherungsmittel	ja	Instandhaltung mit 10% Emissionsaufschlag



Die Daten des Fussgängertunnels stammen aus einem Beispielprojekt aus Eco2nstruct. Die Länge des Tunnels beträgt 400 m und die Breite 9 m. Für den Tunnel wurden die Hauptmaterialien Spritzbeton, Füllbeton, Stahl und Bewehrungsstahl modelliert. Zusätzlich sind der Aushub, ein Tunnelbagger und Hydraulikbagger abgebildet. Ergänzt wurde der Transport der Materialien mit einer durchschnittlichen Transportdistanz von 20 km. Die Lebensdauer des Tunnels wurde auf 100 Jahre gesetzt.

Im Bereich Bahntunnel konnten Daten zu einem U-Bahntunnel in Deutschland ausgewertet werden. Modelliert wurden die Materialien für die Herstellung der Tunnelröhre ohne Bahnhof und ohne Nebenanlagen. Der Strassenbau ist ebenfalls nicht in die Auswertung eingeflossen. Der Streckentunnel weist eine Länge von knapp 1.4 km auf und einen Durchmesser von ca. 6 m auf. Die Lebensdauer beträgt 100 Jahre. Allfällige Instandsetzungen des Tunnels wurden nicht berücksichtigt.

Ergänzend zu diesen Projekten wurden weitere Werte aus der Literatur beigezogen. Die Lebensdauer wurde, wenn nicht explizit erwähnt, auf 100 Jahre gesetzt.

In der SchiG-Studie [49] wurden die Treibhausgasemissionen für die offene und die geschlossene Bauweise jeweils für ein eingleisiger und ein zweigleisiger Tunnel ermittelt (Projekt 4 und 5 in Abb. 3-10).

Eine weitere Studie von Julia Sauer [50] enthält Werte zu zwei Eisenbahntunnel und zwei Strassentunnel (Projekt 19 und 20 in Abb. 3-10). Für die zwei Eisenbahntunnel wurde jeweils der Bau mittels Tunnelvortriebsmaschine und Spritzbetonbauweise untersucht (Projekt 6 bis 9 in Abb. 3-10).

In einer Studie von EBP Schweiz AG [51] wurden verschiedene Bahntunnel mit verschiedenen Vortriebsarten untersucht (Nummern 12 bis 15 in Abb. 3-10). Die Tunnellängen variieren zwischen ca. 2.5 km und 15 km mit Durchmessern von 8.6 m bis 11.2 m.

Des Weiteren konnten die Daten (Projekt 16 in Abb. 3-10) aus der Studie von Endrith Hoxa et. al. [52] für ein Tunnelbau in geschlossener, maschineller Bauweise beigezogen werden. Die Tunnellänge beträgt ca. 1.3 km.

Zusätzlich zu den Bahntunnel wurden in der Literatur auch Strassentunnel ökologisch bewertet. Die Studie von Florian Gschösser [53] untersuchte ein Strassentunnel in geschlossener, maschineller Bauweise (Projekt 23 in Abb. 3-10). Die Tunnellänge betrug 2.4 km. In einer weiteren Studie ermittelte er die Umweltwirkung für einen Tunnel in konventionellem Vortrieb (Projekte 21 und 22 in Abb. 3-10). Dabei wurde zum einen nur die Innenschale, der Transport und die Deponierung abgebildet und zum andern zusätzlich noch die Nebenbauwerke und der Strassenoberbau. In der Studie von Julia Sauer [50] wurde ebenfalls ein Strassentunnel in der Spritzbetonbauweise untersucht (Projekt 20 in Abb. 3-10).

Zwei reale Strassentunnelprojekte des ASTRA konnten anhand der Mengenangaben in den Leistungsverzeichnissen ausgewertet werden. Dabei wurden nicht nur die Materialien, sondern auch die Transporte und die Baumaschinen modelliert. Das erste Tunnelprojekt (Nr. 17. in Abb. 3-10) befindet sich im Kanton Zürich und weist eine Länge von ca. 3300 m und eine Breite von 11 m auf. Das zweite Tunnelprojekt (Nr. 18. in Abb. 3-10) ist 70 m lang und befindet sich im Kanton Uri.

B5. Galerie

Objekttyp	Ausgewertete Projekte	Anzahl	Kommentar
Galerie	Beispielprojekt	1	Instandsetzung

Zu Galerien lagen nur Daten zu einem Projekt vor. Bei diesem Projekt handelt es sich um die Instandsetzung einer Galerie. Die Galerie hat eine Länge von ca. 90 m und eine Breite von ca. 8.5 m. Im Projekt wurden die Asphalt-Deckschicht (ca. 5 cm) und Tragschicht (21 cm) sowie die Foundationsschicht mit einer Dicke von ca. 90 cm ersetzt. Zudem wurde Beton verbaut, Anker gesetzt und die Werkleitungen Instand



gesetzt. Abgebildet wurde die Herstellung der neuen Materialien, die Entsorgung der alten Materialien, die Transporte sowie die Baumaschinen für die Instandsetzung.

B6. Übrige Bauten

Objektyp	Ausgewertete Projekte	Anzahl	Kommentar
Böschungssicherung und Steinschlagschutz	Diverse Netze aus einem Beispielprojekt	1	Rückverhängten Spritzbetonschale
	Geflechte aus einem Beispielprojekt	1	Böschungssicherung mit einer flexiblen Geflechtsabdeckung
Lärmschutzwand	Beispielprojekte: Aluminium	2	
	Beispielprojekte: Beton	1	
	Beispielprojekt: Holz	2	
	Beispielprojekte: Lavabeton	3	Projekte des ASTRA und TBA
	Beispielprojekt: Steinkorb	1	
	Literaturbeispiele	13	Studie decarboNoise [15]
Stützanker	Diverse Beispielanker	22	Diverse Anker aus einem früheren Projekt
Stützmauern	Winkelstützmauer	10 und 2	Beispielprojekte und Literatur
	Schwergewichtstützmauer	7 und 2	Beispielprojekte und Literatur
Freileitungen	Beispielprojekt	1	Stromübertragung
Flugpiste	Beispielprojekt	1	Instandsetzung

B6.1 Böschungssicherung

Es sollen zwei verschiedene Varianten einer Böschungssicherung auf ihre Ökobilanz untersucht werden. Hierfür wird eine flexible Geflechtsabdeckung (siehe Abb. A-2) mit einer rückverhängten Spritzbetonschale (siehe Abb. A-3) verglichen. Die entsprechenden Materialien für 100 Meter Böschungssicherung sind in den Tabellen Tabelle 27 und Tabelle 28 aufgeführt.

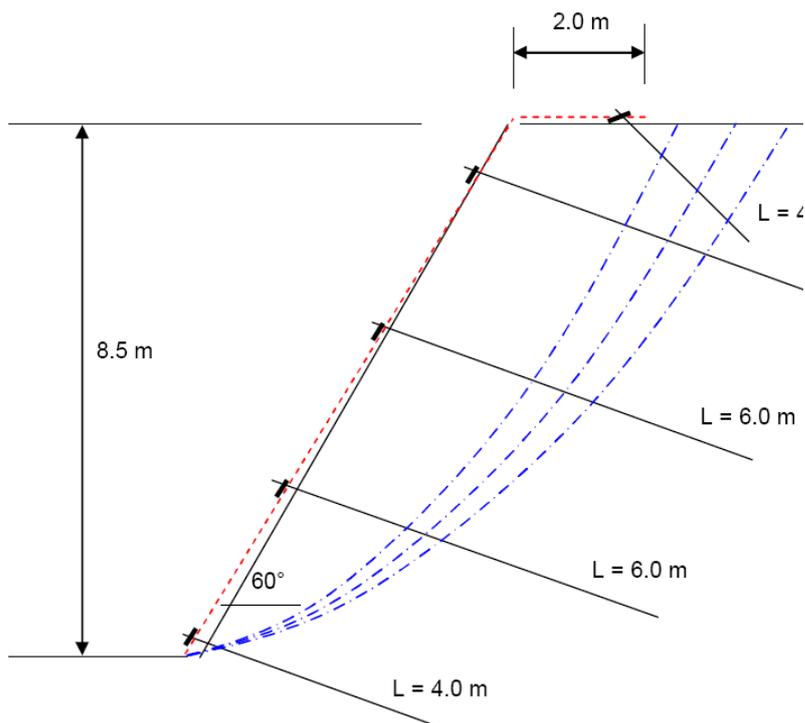
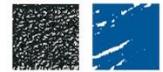


Abb. 0-4: Böschungsstabilisierung mit einer flexiblen Geflechtsabdeckung

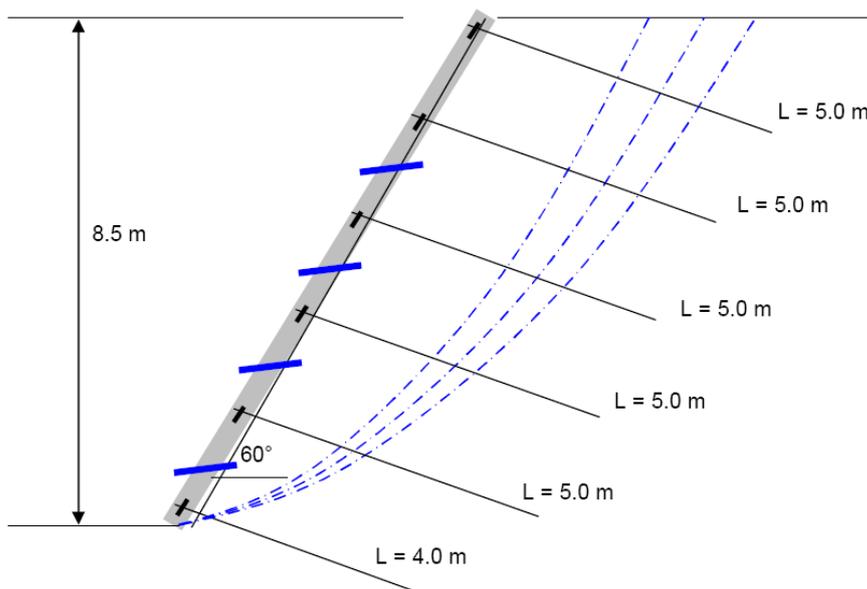


Abb. 0-5: Böschungsstabilisierung mit einer rückverhängten Spritzbetonschale



Tabelle 27: Materialzusammensetzung eines Bauwerks zur Böschungsstabilisierung mit einer flexiblen Stabil – Geflechtsabdeckung für eine 100 m lange Böschung

Geflechtsabdeckung		Material	Gewicht (kg)
<i>Vernagelung (GEWI 32 roh)</i>	Nagel = 4.0m	Stahl	1'817.3
	Nagel = 6.0m	Stahl	4'088.9
	Injektion für Nägel	Zement, w/z = 0.4	23'400.0
<i>Geflechtsabdeckung</i>	TECCO Geflecht	hochfester Draht	1'963.6
	Korrosionsschutz: Galvanisierung	Zink	169.6
	Korrosionsschutz: Galvanisierung	Alu	8.9
	Krallplatte	Blech	495.0
	Korrosionsschutz Krallplatte	Verzinkung	
	Pressklauen	Stahl	123.8
	Korrosionsschutz	Verzinkung	
	Litzenseil (als Randseil, oben/unten)	hochfester Draht	100.0
	Korrosionsschutz Litzenseil	Verzinkung	0.5
	Spiralseilanker = 4.0m (oben/unten)	hochfester Draht	42.4
	Korrosionsschutz Spiralseilanker	Verzinkung	0.2
	Injektion für Spiralseilanker	Zement	896.0
<i>Begrünung</i>	Erosionsschutzmatte TECMAT	Polypropylen	714.0

Tabelle 28: Materialzusammensetzung eines Bauwerks zur Böschungsstabilisierung mit einer rückverhängten Spritzbetonschale für eine 100 m lange Böschung

Rückverhängte Spritzbetonschale		Material	Gewicht (kg)
<i>Vernagelung (GEWI 28 roh)</i>	Nägel = 4.0m	Stahl	1'081.9
	Nägel = 5.0m	Stahl	6'713.7
	Injektion für Nägel	Zement, w/z = 0.4	40'350.0
<i>Spritzbetonschale</i>			



	Spritzbeton Total (Spritzverlust ~25%)		564'360.0
	Bewehrung	Stahl	6'324.8
	Kopfplatte	Stahl	589.2
	Korrosionsschutz Kopfplatte	Verzinkung	
<i>Entwässerung</i>	Drainage Röhrrchen	PVC	64.0

B6.2 Lärmschutzwände

Im Rahmen eines früheren Projektes der UTech wurden verschiedene Lärmschutzwände untersucht und konnten nun spezifisch für diese Studie ausgewertet werden. Dabei wurden nur die Umweltwirkungen der Herstellung der Materialien betrachtet, nicht aber der Baumaschinen und der Transporte. In der Studie «Reduktionspotenziale des Tiefbauamts des Kantons Zürich, 2021» wurde darauf hingewiesen, dass die Baumaschinen vernachlässigbar sind. Da keine Daten zur Errichtung der Lärmschutzwände vorlagen wurde diese Annahme auch für diese Studie übernommen. Einzig das Beispielprojekt «Alu_Glaswolle auf Betonriegel», bei welchem Daten vorhanden waren, wurde unter Berücksichtigung der Baumaschinen und der Transporte ausgewertet. Die Lebensdauer der Lärmschutzwände der Beispielprojekte wurde auf 80 Jahre gesetzt, damit sie mit den Literaturwerten der Studie «DecarboNoise» vergleichbar sind [15].

In der Literatur existieren weitere Studien zu den Treibhausgasemissionen von Lärmschutzwänden. Die Lebensdauern der gesamten Lärmschutzwände schwanken jedoch zwischen 20 Jahren und 50 Jahren und konnten deshalb nicht umgerechnet und für einen direkten Vergleich verwendet werden. Eine Zusammenstellung der weiteren Literaturwerte ist im letzten Abschnitt und in Abb. 0-6 ersichtich.

Bei der Lärmschutzwand «Alu_Glaswolle auf Betonriegel», aus der Abbildung Abb. 3-13, handelt es sich um eine Lärmschutzwand aus Lavabeton und Glaswolle auf einem Betonriegel. In diesem Projekt wurden die Baumaschinen und der Transport auf die Baustelle berücksichtigt. Die betrachtete Lärmschutzwand weist eine Höhe von 4 m und eine Länge von 410 m auf. Die Auswertung wurde jedoch pro Quadratmeter Sichtfläche gemacht. Dies bedeutet, dass die Umweltwirkungen der gesamten Lärmschutzwand durch 410 m und durch 4 m geteilt wurden.

Für die Lärmschutzwände aus dem Beispielprojekt des TBA aus der Abbildung Abb. 3-13 wurde eine Höhe von 2 m angenommen. Der jeweilige Materialbedarf wurde anhand von Bauplänen und Fotos abgeschätzt. Die Datenqualität wird auf «Mittel» eingestuft. Als generische Hintergrunddaten wurden bei allen Lärmschutzwänden die aktuellen Daten aus der KBOB/ecobau- und ECO2nstruct-Datenbanken verwendet. Dafür wurden die Materialien leicht aggregiert und ein kleiner Teil des ursprünglichen Detaillierungsgrades ging verloren. Nachfolgend werden die Lärmschutzwände des TBA etwas detaillierter beschrieben. In diesen Projekten wird nur die Herstellung der Materialien und die Entsorgung des Aushubmaterials sowie allfällige Instandsetzungen von Materialien mit einer kürzeren Lebensdauer als 80 Jahre berücksichtigt. Die Foundation ist jeweils inbegriffen. Bei der Bezeichnung Betonriegel handelt es sich um einen zusätzlichen Betonsockel, welcher sichtbar ist.

- Lava, Acryl, Betonriegel: Hierbei handelt es sich um eine Lärmschutzwand aus Lavabeton auf einem bewehrten Betonriegel und einem Acrylglasaufsatz. Stahlträger befinden sich unter der Glaswand und als Zwischenteile alle drei Meter.
- Lavabeton auf Betonriegel: Ähnlich wie beim Aluminium hat auch die Lärmschutzwand aus Lavabeton einen kleinen Betonriegel und Stahlstützen.
- Beton 1 auf Betonriegel: Diese Lärmschutzwand besteht gänzlich aus Beton und Stahlstützen.
- Alu auf Betonriegel: Diese Lärmschutzwand besteht aus Aluminium auf einem bewehrten Betonriegel mit Stahlstützen und Steinwolle.



- Aluminium 1 auf Betonriegel: Die Lärmschutzwand aus Aluminium weist hauptsächlich Aluminium auf, hat jedoch ebenfalls einen dünnen Betonriegel, etwas Steinwolle und Stahlstützen.
- Holz mit Betonriegel: Diese Lärmschutzwand aus Holz steht ebenfalls auf einem bewehrten Betonriegel und hat Stahlstützen alle drei Meter. Zusätzlich existiert eine dünne Aluminiumabdeckung.
- Holz_Glas, Betonriegel: Anstelle von Lavabeton wird diese Lärmschutzwand mit Holz hergestellt und weist zusätzlich einen Acrylglassaufsatz, Stahlstützen und einen Betonriegel auf.
- Steinkorb: Auf einer Flachfundation aus bewehrtem Beton befinden sich mit Kies und Steinen gefüllte Drahtkörbe aus Stahl.

Die weiteren Lärmschutzwände stammen aus der Studie «DecarboNoise» [15]. In dieser Studie variieren die Lebensdauern der Paneele, Steher/Pfosten, Abdeckungen, Sockelelemente sowie des Fundaments zwischen 20 und 80 Jahren. Die einzelnen Bauteile wurden entsprechend mit der maximalen Lebensdauer von 80 Jahren verrechnet.

Ergänzung aus der Literatur: Die Lärmschutzwände Holz 1, Beton 2 und Aluminium 2 stammen aus der Studie [54] und weisen eine Lebensdauer von 20 Jahren auf. Die Lärmschutzwände Holz & Kunststoff, Beton 3, Leichtbeton, EPS, PET in Abb. 3-13 wurden der Studie [55] entnommen und mit der von der UTech angenommenen Lebensdauer von 40 Jahren verrechnet. Die Fundation wurde in diesen zwei Studie berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurden die Fundation und die Stützen bei Holz 2 und Beton 4 (aus der Studie [56]) mit 30 Jahren als Lebensdauer. Die letzten beiden Lärmschutzwände Aluminium 3 und Steinwolle sind aus der Studie [57] mit einer Lebensdauer von 50 Jahren und enthalten ebenfalls keine Fundation.

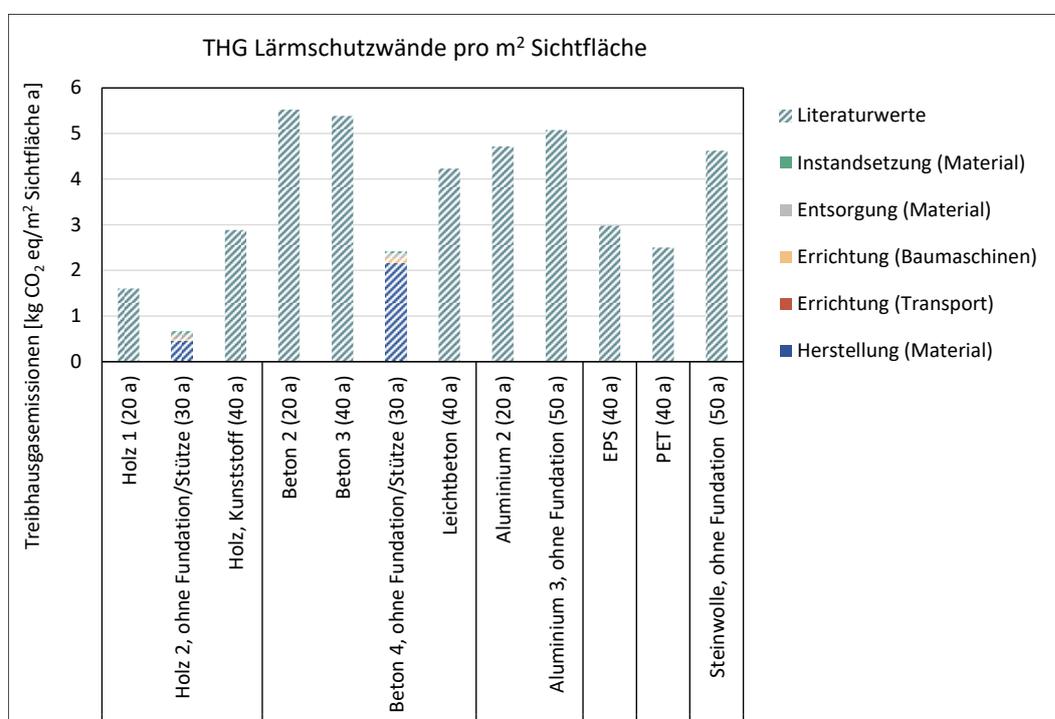


Abb. 0-6: Treibhausgasemissionen verschiedener Lärmschutzwände aus der Literatur. Die Lebensdauern sind je nach Studie unterschiedlich und in den Klammern angegeben (z.B. 20 Jahre)

B6.3 Stützanker



Für Stützanker lagen keine detaillierten Grundlagen zur Materialisierung und zum Herstellungsprozess vor. Sie wurden mit dem Einheitsprozess «steel, low-alloyed, at plant, CH U» anhand des Durchmessers und des entsprechenden Gewichts pro Laufmeter modelliert.

B6.4 Stützmauern

Die Stützmauern werden unterteilt in Winkelstützmauern und Schwergewichtsmauern. Aus Eco2nstruct konnten die Daten für jeweils eine talseitige und eine bergseitige Winkelstützmauer entnommen werden (Projekte 7 und 8 in Abb. 3-15). Die Höhe beträgt jeweils 6 m und die Länge 4 m. Abgebildet sind jeweils die Materialien Beton und Bewehrungsstahl. Die Baumaschinenstunden waren nur bei der bergseitigen Winkelstützmauer angegeben. Der Aushub, die Transporte und die Baumaschinenstunden wurden jeweils ergänzt. Für den Aushub wurde die vereinfachte Annahme getroffen, dass dieser dem Volumen des eingebauten Betons entspricht. Als Transportdistanz wurden 20 km angenommen und die Baumaschinenstunden wurden angenähert mit Baumaschinen und den Werten aus dem TB-Viewer des Schweizerischen Baumeisterverband.

Für sechs weitere Winkelstützmauern (Projekte 1 bis 5 und 9 in Abb. 3-15) konnten anhand von Bauplänen die Materialmengen abgeschätzt werden. Hierbei wurden die Materialien Beton, Stahl, Gesteinskörnung, teilweise Kunststoffrohre und das Aushubmaterial erfasst. Die Transporte und die Baumaschinenstunden wurden ebenfalls wie oben beschrieben ergänzt. Die Höhen der Stützmauern schwanken zwischen 1.2 m und 6.5 m, während die Länge von 63 m bis zu 230 m betragen.

Bei den letzten zwei Winkelstützmauern (Projekte 6 (TBA ZH) und 10 (ASTRA) in Abb. 3-15) sind in einem höheren Detaillierungsgrad (z. B. beim ASTRA-Projekt anhand des Leistungsverzeichnis) ausgewertet worden. Die Beispielstützmauer des ASTRA weist eine Länge von 241.7 m und eine Höhe von 7 m auf. Der Fuss der Stützmauer ist 4.5 m breit.

Für die Schwergewichtsmauern konnten ebenfalls die Materialien Beton und Stahl für bergseitige und talseitige Stützmauern (mit und ohne Steinverkleidung) aus Eco2nstruct entnommen werden (Projekte 16 (bergseitig, ohne Steinverkleidung) bis 19 (talseitig, mit Steinverkleidung) in Abb. 3-15). Der Aushub, die Transporte und die Baumaschinenstunden wurden analog zu den anderen Projekten ergänzt.

Die Stützmauern 13 und 14 in Abb. 3-15 sind wiederum anhand von Bauplänen abgeschätzt worden und analog zu den Projekten 3 bis 8 ausgewertet worden.

Die letzte Schwergewichtsmauer (Projekt 15 in Abb. 3-15) wurde analog zum Projekt 9 ausgewertet und stammt ebenfalls aus einer Studie des Tiefbauamtes Zürich.

Die Literaturwerte der Stützmauern 11 und 20 in Abb. 3-15 stammen aus der Studie [58] und die Stützmauern 12 und 21 aus der Studie [59]. Die Lebensdauer wurde jeweils ebenfalls auf 100 Jahre gesetzt.

B6.5 Freileitungen

Die Daten wurden von Swissgrid bereitgestellt und zeigen die Stromübertragungsinfrastruktur auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) mittels Freileitungen in ebenem Gelände, in steilem Gebirge und bei Waldüberspannungen. Ein weiterer Unterschied, der in die Betrachtung mit einbezogen wurde, sind drei verschiedene Fundamenttypen: Es wurden drei verschiedene Fundamenttypen berücksichtigt: Einzelfundament, Rahmenfundament und Riegelfundament. Die Nutzungsdauer beträgt 80 Jahre. Berücksichtigt wurden alle Lebenszyklusphasen von der Herstellung über die Errichtung, die Nutzung (Instandhaltung und Instandsetzung) sowie die Entsorgungsphase. Die Bilanzierung umfasst neben den verwendeten Materialien auch die eingesetzten Baumaschinen und Transportmittel.

B6.6 Flugpiste

Die Datengrundlage im Bereich Flugpisten ist gering. Für ein Neubau sind momentan noch keine Daten vorhanden. Eine Instandsetzung einer Schweizer Flugpiste konnte jedoch anhand der Daten aus dem Leistungsverzeichnis eines Beispielprojektes modelliert werden. Die Fläche der Flugpiste beträgt ca. 9'500 m². Die Lebensdauer wurde auf 40 Jahre gesetzt.



B7. Entwässerung und Kanalisation

Nachfolgend sind in Tabelle 29 die betrachteten Objekttypen und betrachteten Objekte der Entwässerung und Kanalisation.

Tabelle 29: Betrachtete Komponenten und Materialien für Abwasserleitungen und für die Kanalisation

Objekttyp	Objekte	Anzahl	Kommentar
Abwasserleitungen	Beton	1	
	Stahlbeton	1	
	Geopolymerbeton	1	
	Polymerbeton	1	
	Steinzeug	1	
	Gussrohr	1	
	PP	1	
	PE	1	
	PVC	1	
Leitungsgräben	Betonumhüllung	1	
	Kiessandumhüllung	1	
Pumpstation	Pumpen	9	Einheit in Kilowatt
Schacht und Ablauf	Beton	11	
	Strassenabläufe	7	7 Schachttypen
	Kontrollschacht	6	6 Schachttypen
Strassenabwasserbe- handlungsanlage	SABA	1	
	Teilelemente der SABA	5	Absetzbecken, (Öl-)Rückhalte- becken, Grobabscheider, Sta- pelkanal

B7.1 Abwasserleitungen

Die hier verwendeten Daten und Grundlagen stammen aus dem Merkblatt "Materialwahl für Abwasserleitungen und -kanäle". Im Rahmen der Untersuchung wurde ausschliesslich die offene Bauweise (keine grabenlose Bauweise) auf ihre Ökobilanz hin analysiert. Im Rahmen der Untersuchung wurden kreisrunde Rohre mit den in Tabelle 29 aufgeführten Materialien für die Durchmesser 300, 600 und 800 mm betrachtet. Die Sohlentiefe betrug drei Meter und das Einbauprofil entsprach den Vorgaben der SIA 190. In die Untersuchung wurden die Profile 1, 2, 2a, 3 und 4 einbezogen. Berücksichtigt wurden alle Lebenszyklusphasen der offenen Grabenbauweise. Die Bilanzierung umfasst die Phasen Herstellung, Errichtung und Entsorgung. Die Nutzungsdauer wurde mit 80 Jahren angenommen, wobei davon auszugehen ist, dass während dieser Zeit keine Instandsetzung stattfindet. Des Weiteren wurden die Maschinenstunden und Transporte für die Errichtung berücksichtigt.

B7.2 Leitungsgräben



Für Leitungsgräben wurde die Bauart "Offene Bauweise/Grabenbau" (Rohrblock) betrachtet. Diese eignet sich für flaches oder gleichmässig geneigtes Gelände sowie für Lockergesteinsböden und weichen Felsen. Diese Methode erfordert einen Grabenaushub mit einem Bautrassee von ca. 20 m Breite und einem freien Zugang von der Oberfläche. Der Rohrblock und der begehbare Leitungskanal sind klassische Lösungen für Kabeltrassees, die den Aushub eines Grabens über die gesamte Leitungsabschnittslänge erfordern. Der Rohrblock wird etappenweise aus Magerbeton erstellt. Ein zweisträngiger Kabelrohrblock hat eine Breite von 1,3 m und eine Höhe von 0,9 m, wobei der Graben eine Sohle von 2,5 m Breite und 2,0 m Tiefe hat. Die Grabenbreite auf Terrainniveau beträgt 6,5 m. Nach der Verlegung wird der Graben mit Aushubmaterial verfüllt und die Oberfläche rekultiviert. Die Nutzungsdauer wurde mit 80 Jahren eingerechnet.

B7.3 Pumpstationen

Zur Modellierung der Pumpstation wurden lediglich verschiedene Pumpen mit unterschiedlicher Leistung verwendet. Der Hintergrunddatensatz stammt aus der Ökoinventardatenbank der Bundesverwaltung und stellt die Herstellung, Betrieb und Entsorgung der Pumpe dar. Es wurden keine Instandhaltungen und Instandsetzungen betrachtet. Die Nutzungsdauer wurde mit 15 Jahren einbezogen.

B7.4 Schacht und Ablauf

Schächte und Abläufe wurden im Rahmen der Ökobilanz diverser kantonaler und städtischer Tiefbauämter zusammengestellt. Die betrachteten Schächte und Abläufe umfassen eine grosse Bandbreite an Durchmessern mit unterschiedlicher hydraulischer Kapazität. Sie bestehen alle grösstenteils aus Beton. Hierbei wurde die Herstellung und die Entsorgung der betrachteten Schächte und Abläufe mittels dem KBOB Betonfertigteilrechner bilanziert. Instandhaltung und Instandsetzung wurde während der Nutzungsphase nicht betrachtet. Als Nutzungsdauer wurden 80 Jahre angesetzt.

B7.5 Strassenabwasserbehandlungsanlage SABA

Die hier modellierte Strassenabwasserbehandlungsanlage SABA besteht aus mehreren einzelnen Komponenten: Natürliche Boden-/Raumfilter, Grobabscheider, Rückhaltebecken, Absetzbecken und Ölabscheider. Die einzelnen Komponenten einer SABA wurde in dieser Studie auch separat modelliert. Die Daten stammen vom TBA Zürich aus der Studie «Reduktion der Umweltbelastung des Tiefbauamts des Kantons Zürich - Ökobilanz, Reduktionspotentiale und Ökoeffizienzanalyse (SEBI)». Die Daten sind in Tabelle 30.

Tabelle 30: Grundlegenden Daten für die Strassenabwasserbehandlungsanlagen SABA und Berechnung der typischen Dimension einer SABA des Typen Boden- und Raumfilter des TBA ZH. Die weiteren Komponenten einer SABA sind in den nachfolgenden Tabellen aufgeführt.

SABA aus dem SABA-Kataster:		
ANZAHL: 35		
NORMAL: Boden-/Raumfilter (18), Grobabscheider (1), Rückhaltebecken (2)		
Absetzbecken (5), Grobabscheider (9)		
Materialien Boden-/Raumfilter SABA (natürliche SABA), gemäss Plan SABA 4 Filterbecken Forchstrasse K 52:		
Mittlere Filterfläche	500	m ²
Mittlerer Landbedarf	1'000	m ²
Tiefe	1.35	m
Beton	103.35	m ³
	Wandstärke	0.15 m



Umfang (z.B. bei 50 x 20 m Fläche)	140	m
Sand und Kies (1.35 m Schichtstärke)	675	m ³
Aushub, wobei:	1'350	m ³
<i>wiederverwendet</i>	400	m ³
<i>deponiert</i>	950	m ³
Asphalt Trag-, Binder- und Deckschicht (ca. 0.3m)	150	m ³
Ungebundene Foundationsschicht und Kies für weitere Flächen (0.5m)	200	m ³
Polypropylen PP für Leitungen (ca. 10 Sickerleitungen DN200 und je 50 m Länge, Wandstärke 0.01 m, 3 Zu- und Ableitungen von 56 m, 70 m und 10 m Länge, DN500, Wandstärke 0.02 m)	27.99	m ³

Materialien für Grobabscheider:		
Beton	20	m ³
2 Seitenwände (20 m lang und 2 m tief, Schichtstärke 0.15 m)	12	m ³
2 Wände (vorne und hinten, 2 m breit, 2 m tief, Schichtstärke 0.15 m)	8	m ³
Schichtstärke	0.15	m
Aushub (Zuschlag von 10% des Betonvolumens)	22	m ³
Total für alle 10 Gobabscheider:		
Beton	200	m ³
Aushub	220	m ³
Lebensdauer gemäss TBA ZH (60-80 Jahre)	70	Jahre

Materialien für Rückhaltebecken:		
Beton	84	m ³
Tiefe	2	m
Länge	20	m
Breite	20	m
Schichtstärke	0.15	m
Aushub	800	m ³
Total für Rückhaltebecken:		
Beton	168	m ³
Aushub	1'600	m ³
Lebensdauer gemäss TBA ZH (60-80 Jahre)	70	Jahre



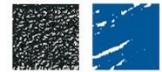
Materialien für Absetzbecken:		
Beton	23.25	m ³
Tiefe	2	m
Länge	15	m
Breite	5	m
Schichtstärke	0.15	m
Aushub	150	m ³
Total für Absetzbecken:		
Beton	116	m ³
Aushub	750	m ³
Lebensdauer gemäss TBA ZH (60-80 Jahre)	70	Jahre

Ölabscheider / Ölrückhaltebecken ÖRB:		
Anzahl	21	
Abmessung gemäss Plan Einlaufbauwerk SABA 4 Forchstrasse		
Beton:	94.98	m ³
Seitenwände (0.5*13m x 2 + 0.5*5*2, Tiefe 3.7m)	66.6	m ³
Zwischenwände (3 Stück, 3.7m Tiefe, 0.2 x 4)	8.88	m ³
Fundament (13 x 5, Schichtstärke 0.3)	19.5	m ³
Aushub	160	m ³
Total Ölrückhaltebecken ÖRB		
Beton	1'995	m ³
Aushub	3'360	m ³
Lebensdauer gemäss TBA ZH (60-80 Jahre)	70	Jahre

B8. Werkleitungen

Bei den Werkleitungen wurde nur die erdverkabelte Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) betrachtet. Hierfür wurden Daten der Swissgrid verwendet. Die in Tabelle 31 aufgeführten Bauverfahren der Erdverkabelung wurden betrachtet. Hierbei wurden die Materialien, die Baumaschinen und auch die Transporte ökobilanziell modelliert. Dies betrifft die Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase. Die Nutzungsdauer wurde mit 80 Jahren angesetzt.

Phasenrohr: Das E-Power Pipe-Verfahren mit Phasenrohren eignet sich hervorragend für flaches oder mässig geneigtes Gelände im Lockergestein. Es kann sowohl in trockenen Böden als auch im Grundwasser angewendet werden. Das Verfahren beinhaltet den Vortrieb und Einzug von sechs nebeneinander angeordneten Kabelschutzrohren aus Kunststoff mit einem Durchmesser von 250 mm, die jeweils Platz für ein Kabel bieten. Der Vortrieb erfolgt jeweils von einem Start- zu einem Zielschacht, wobei eine Haltunslänge



von bis zu 1'500 Metern möglich ist. E-Power Pipe, entwickelt von der Firma Herrenknecht, ermöglicht die wirtschaftliche Verlegung von Erdkabeln über lange Strecken. Im ersten Arbeitsschritt treibt eine kleine Tunnelbohrmaschine Vortriebsrohre aus Stahl, die die Ver- und Entsorgungsleitungen der Maschine beinhalten, von einem Startschacht in Richtung Zielschacht vor. Im zweiten Schritt wird das endgültige Ausbaurohr aus Kunststoff eingezogen.

Strangrohr: Das E-Power Pipe-Verfahren mit Strangrohren ist ideal für ebenes oder mässig geneigtes Gelände. Es zeichnet sich durch hohe Vortriebsleistung und dadurch resultierende niedrige Kosten aus. Dieses Verfahren umfasst die unterirdische Erstellung von zwei nebeneinander angeordneten Kunststoffrohren mit einem Innendurchmesser von 600 mm, die Platz für je einen Leitungsstrang bieten. Der Vortrieb erfolgt von einer Start- zu einer Zielbaugrube, wobei eine maximale Haltungslänge von 1'500 Metern erreicht werden kann. Das Verfahren erfordert zwei Arbeitsschritte: Zuerst treibt eine kleine Tunnelbohrmaschine die Vortriebsrohre aus Stahl, die die Ver- und Entsorgungsleitungen der Maschine beinhalten, vor. Anschliessend wird das endgültige Ausbaurohr aus Kunststoff eingezogen.

Mikrotunnel: Die Bauart „Mikrotunnel“ eignet sich für ebenes wie hügeliges Gelände und zeichnet sich durch ein breites geologisches Einsatzspektrum aus. Sie kann mit einem entsprechenden Bohrkopf in sämtlichen Baugründen wie Lockergestein, Mischboden, Fels sowie im Grundwasser eingesetzt werden. Die Lösung umfasst die unterirdische Erstellung von zwei nebeneinander angeordneten Betonrohren mit einem Innendurchmesser von 1.200 mm, die Platz für je einen Leitungsstrang bieten. Der Vortrieb erfolgt von einer Start- in eine Zielbaugrube, wobei eine maximale Haltungslänge von 500 Metern erreicht werden kann.

Der Mikrotunnel ist ein bewährtes maschinelles Vortriebsverfahren. Von einem Startschacht aus wird eine Tunnelbohrmaschine, die am Kopf von Rohrelementen angebracht ist, mittels einer Presse in Richtung Zielschacht vorgetrieben. Im Startschacht werden laufend weitere Vortriebsrohre aus Stahlbeton versetzt und vorgeschoben. Vortrieb und Einbau der endgültigen Stollenverkleidung erfolgen in einem Arbeitsschritt.

Leitungskanal: Die Bauart „Offene Bauweise/Grabenbau“ (begehbarer Leitungskanal) eignet sich für flaches oder gleichmässig geneigtes Gelände sowie für alle Lockergesteinsböden und weichen Felsen oberhalb des Grundwasserspiegels. Während der Bauzeit nimmt sie temporär viel Land in Anspruch, mit einer Bautrasseebreite von bis zu 35 Metern pro Leitungskanal.

Das Verfahren sieht vor, den Leitungskanal im offenen Graben aus vorgefertigten Betonelementen zu erstellen. Alternativ kann Ortbeton mittels Gleitschalung verwendet werden, wobei diese Alternative in diesem Bericht nicht vertieft untersucht wird. Der Kanal mit den Aussenabmessungen von 2,6 x 2,8 Metern bietet Platz für zwei Leitungsstränge und hat eine Überdeckung von etwa 1,0 Meter.

Der Rohrblock und der begehbare Leitungskanal sind klassische Lösungen für Kabeltrassen. Sie erfordern den Aushub eines Grabens über die gesamte Länge des Leitungsabschnitts, wobei die Grabenabmessungen für den Leitungskanal deutlich grösser sind als beim Rohrblock. Der Leitungskanal kann entweder durch vorgefertigte Elemente oder durch Ortbeton mittels Gleitschalung erstellt werden. Zum Abschluss wird der Graben mit dem zwischengelagerten Aushubmaterial verfüllt und die Terrainoberfläche rekultiviert.

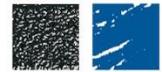
Stollen: Die Bauart „Mechanischer Vortrieb“ mit einer Gripper-Tunnelbohrmaschine wird in steilem und gebirgigem Gelände mit hartem, standfestem Felsen eingesetzt. Sie ermöglicht es, grosse Gebirgszüge ohne Zwischenzugang zu durchqueren.

Diese Lösung umfasst den Vortrieb eines kreisrunden Stollens mit einem Durchmesser von etwa 4,0 Metern, abhängig von der Verfügbarkeit der Maschine. Dieser Durchmesser ermöglicht Vortriebe bis zu 10.000 Metern. Das mechanisierte Verfahren bietet eine hohe Vortriebsleistung, ist jedoch aufgrund der kostenintensiven maschinellen Ausrüstung erst ab einer Tunnellänge von etwa 2 Kilometern wirtschaftlich. Die grossen Querschnittsabmessungen führen zu einem erheblichen Anfall an Ausbruchsmaterial, das abtransportiert und deponiert werden muss.



Tabelle 31: Objekttyp und ausgewertete Projekte der Werkleitungen.

Objekttyp	Ausgewertete Projekte	Anzahl	Kommentar
Stromübertragung	Beispielprojekt	4	Erdverkabelungen: Strang- & Phasenrohr, Mikrotunnel, Leitungskanal, Stollen



Anhang C. Auswertung UBP und KEA

C1. Fahrbahn

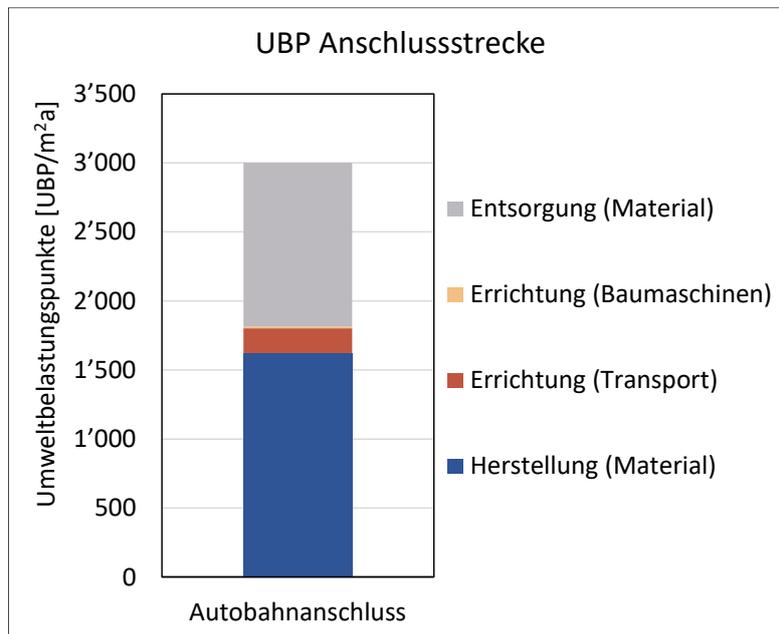


Abb. 0-7: Gesamtumweltbelastung einer Schweizer Autobahn-Anschlussstrecke. Berücksichtigt wurden die Herstellung der Materialien, die Transporte und Baumaschinen für die Errichtung und die Entsorgung (inkl. Transport) der Materialien (Lebensdauer 80 Jahre). Die Instandsetzung und Nutzung wurden nicht berücksichtigt.

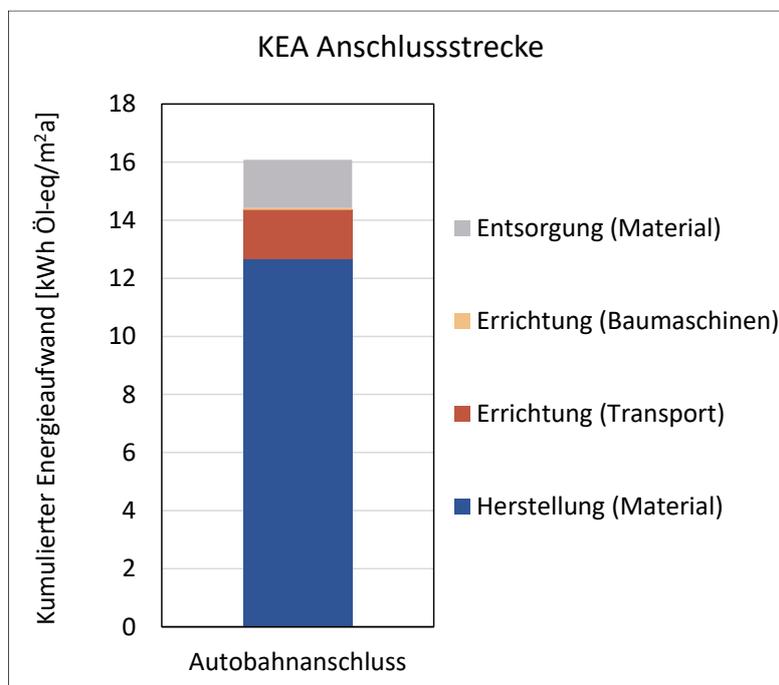


Abb. 0-8: Kumulierter Energieaufwand einer Schweizer Autobahn-Anschlussstrecke. Berücksichtigt wurden die Herstellung der Materialien, die Transporte und Baumaschinen für die Errichtung und die Entsorgung (inkl. Transport) der Materialien (Lebensdauer 80 Jahre). Die Instandsetzung und Nutzung wurden nicht berücksichtigt.

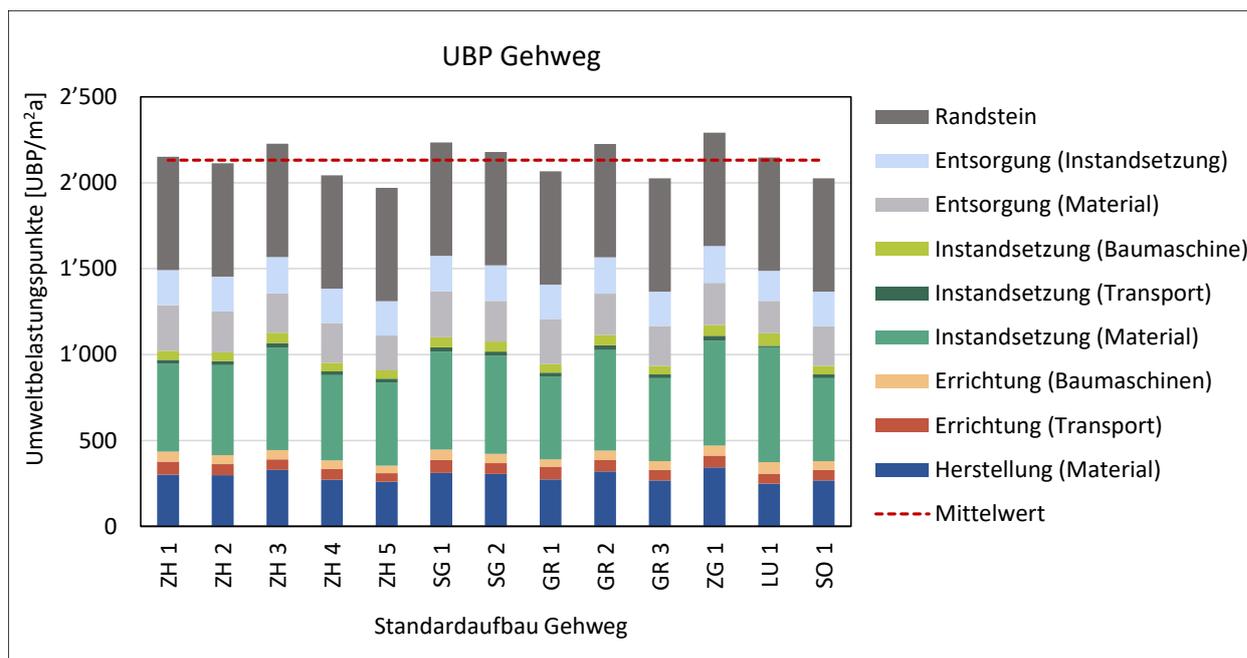


Abb. 0-9: Gesamtumweltbelastung von Standard – Gehwegen von verschiedenen Gemeinden und Städten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG) und Graubünden (GR), Zug (ZG), Luzern (LU) und Solothurn (SO). Lebensdauer aller Projekte: 80 Jahre. Instandsetzungen: 3x Deckschicht, 1x Tragschicht.

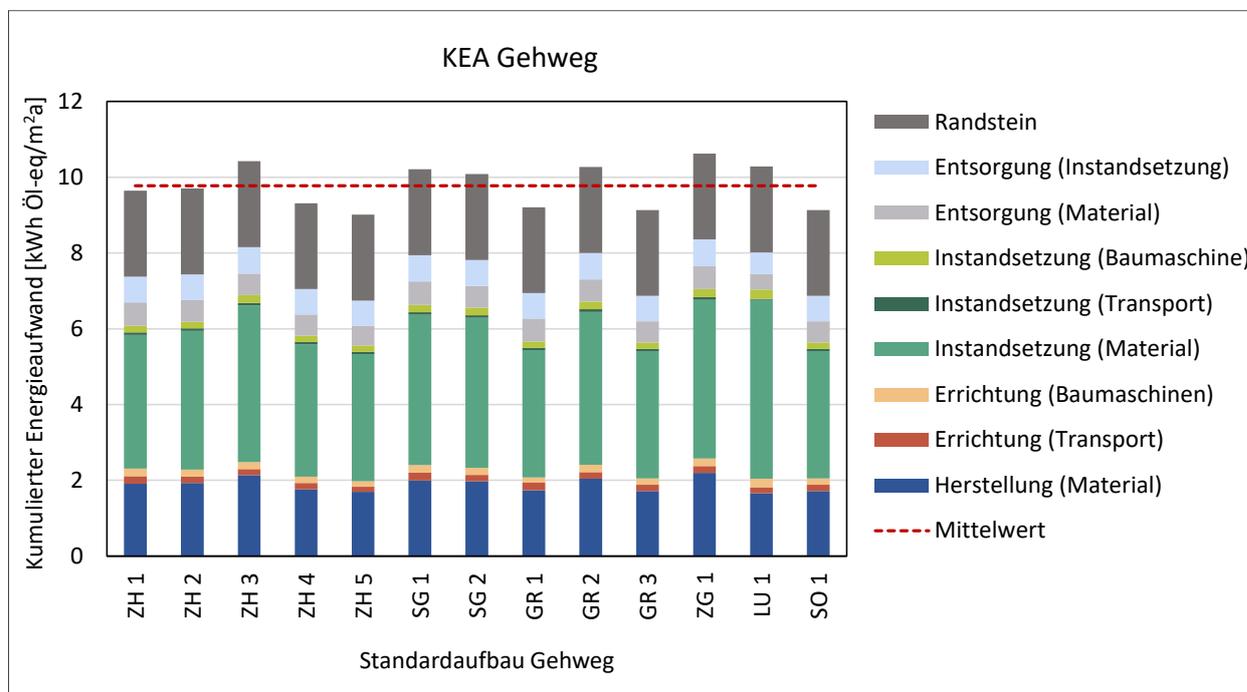


Abb. 0-10: Kumulierter Energieaufwand von Standard – Gehwegen von verschiedenen Gemeinden und Städten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG) und Graubünden (GR), Zug (ZG), Luzern (LU) und Solothurn (SO). Lebensdauer aller Projekte: 80 Jahre. Instandsetzungen: 3x Deckschicht, 1x Tragschicht.

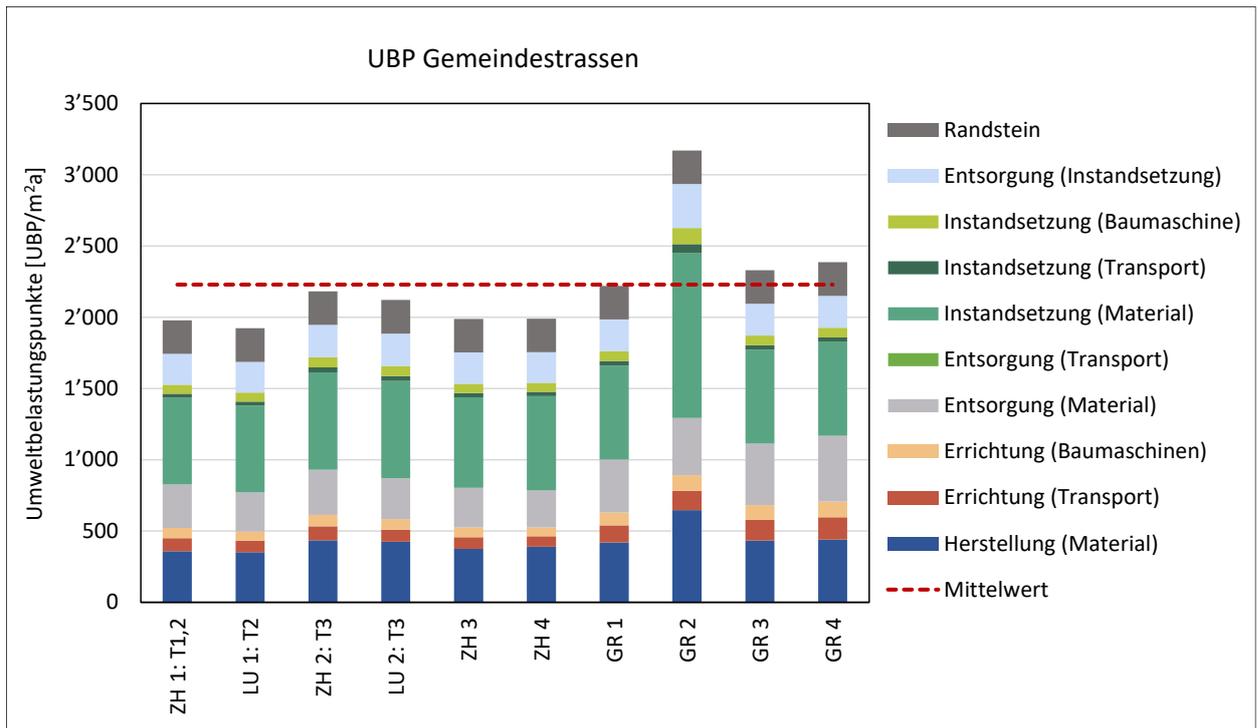
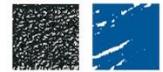


Abb. 0-11: Gesamtumweltbelastung der Fahrbahnaufbauten von 10 verschiedenen Gemeinden in den Kantonen Zürich, Luzern und Graubünden. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

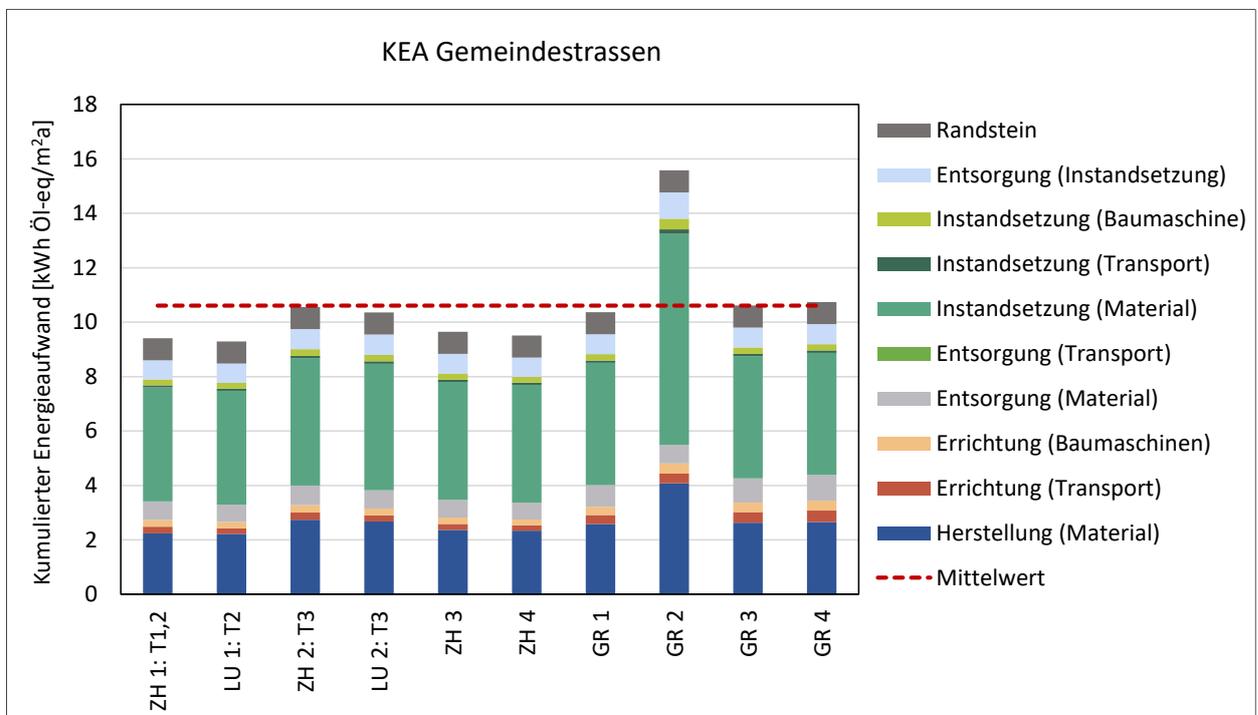


Abb. 0-12: Kumulierter Energieaufwand der Fahrbahnaufbauten von 10 verschiedenen Gemeinden in den Kantonen Zürich, Luzern und Graubünden. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

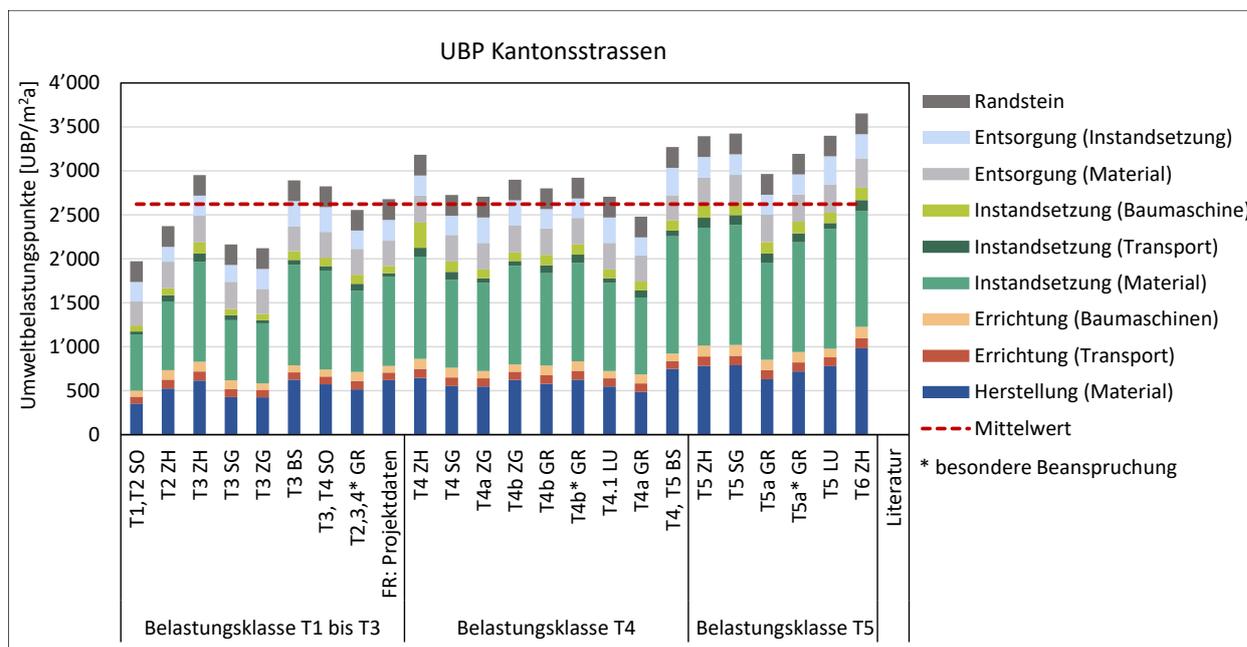


Abb. 0-13: Gesamtumweltbelastung der Standardaufbauten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG), Graubünden (GR), Zug (ZG), Basel-Stadt (BS), Freiburg (FR), Solothurn (SO) und Luzern (LU) über alle Lebenszyklusphasen und für verschiedene Belastungsklassen (T1 bis T6). Rot gestrichelt ist der Mittelwert der Standardaufbauten abgebildet. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

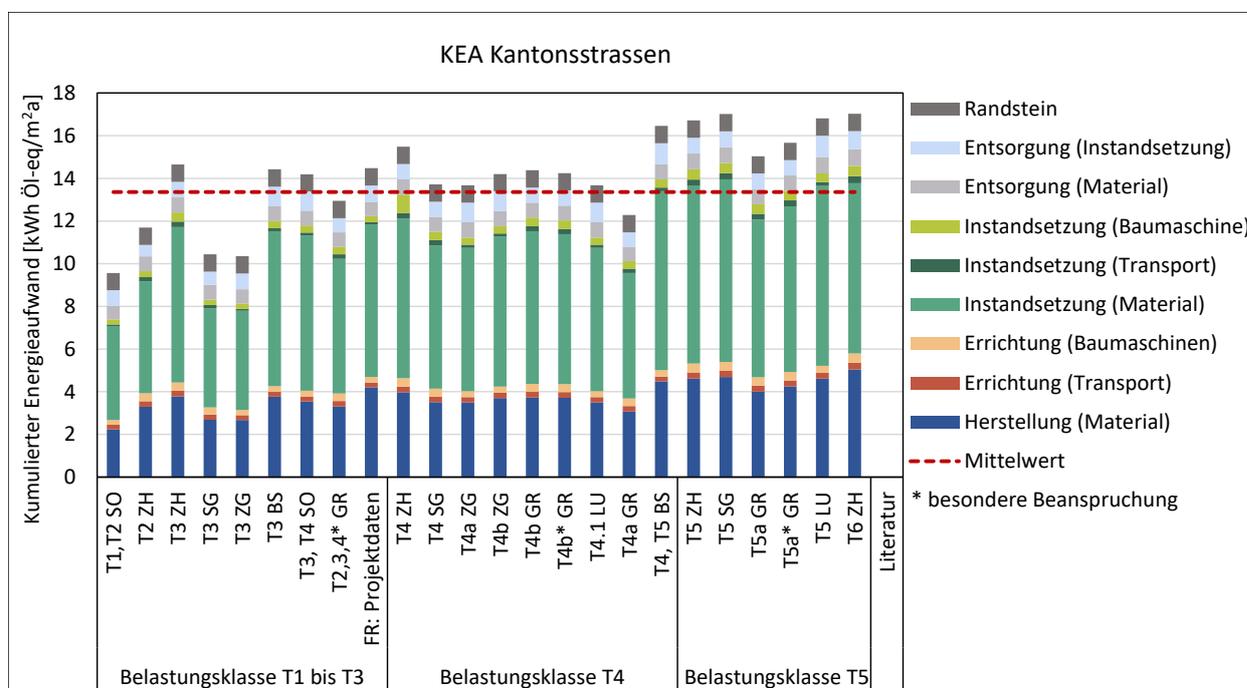


Abb. 0-14: Kumulierter Energieaufwand der Standardaufbauten der Kantone Zürich (ZH), St. Gallen (SG), Graubünden (GR), Zug (ZG), Basel-Stadt (BS), Freiburg (FR), Solothurn (SO) und Luzern (LU) über alle Lebenszyklusphasen und für verschiedene Belastungsklassen (T1 bis T6). Rot gestrichelt ist der Mittelwert der Standardaufbauten abgebildet. Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

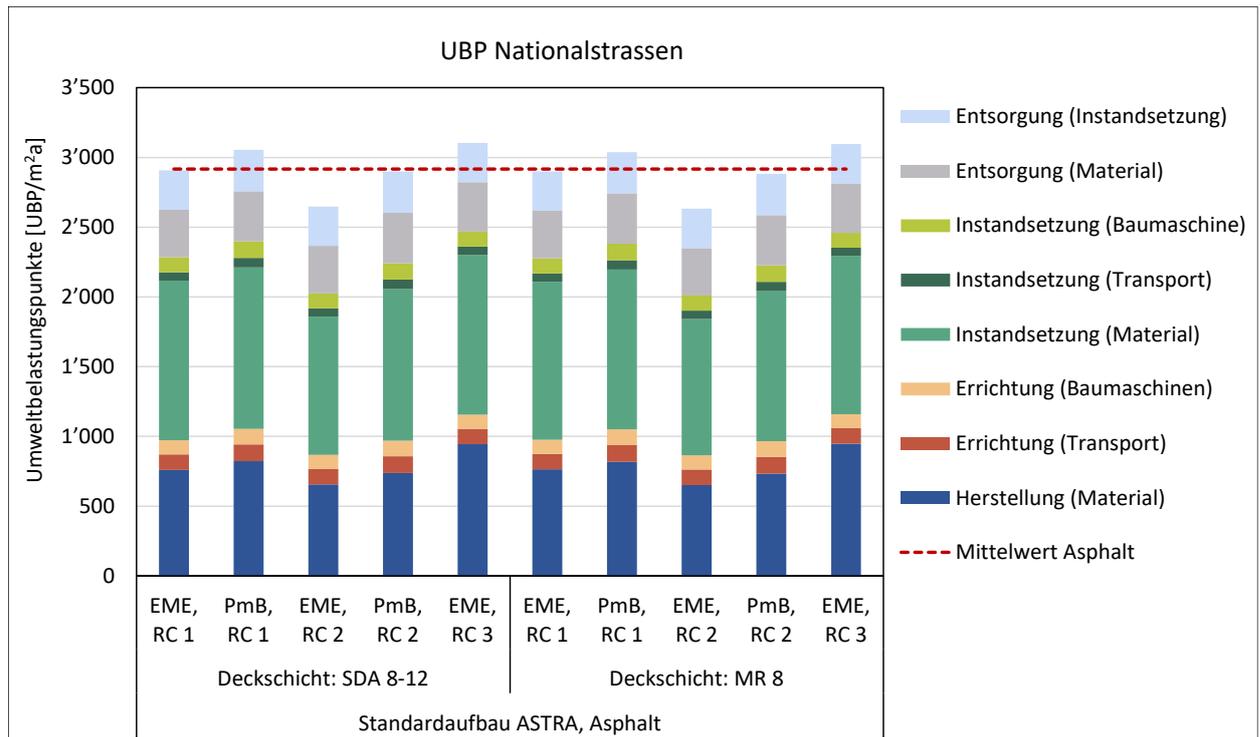
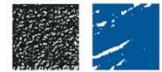


Abb. 0-15: Gesamtumweltbelastung verschiedener Schweizer Standardfahrbahnaufbauten in Asphaltbauweise. Bei den Standardaufbauten unterscheiden sich die Schichtstärken, die Belagsarten und der Recyclinganteil (RC) (Details siehe Anhang B1.6). Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

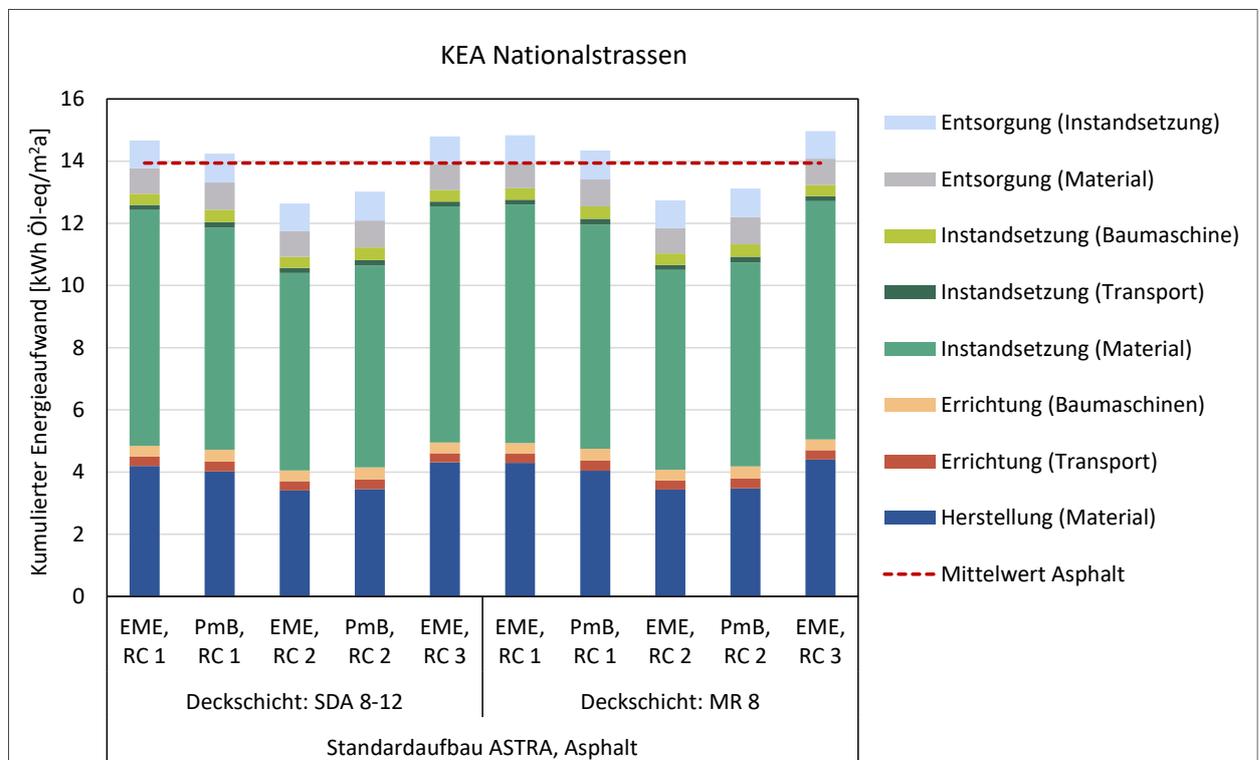


Abb. 0-16: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Schweizer Standardfahrbahnaufbauten in Asphaltbauweise. Bei den Standardaufbauten unterscheiden sich die Schichtstärken, die Belagsarten und der Recyclinganteil (RC) (Details siehe Anhang B1.6). Lebensdauer: 80 Jahre. Instandsetzungen: dreimal Deckschicht, zweimal Binderschicht, einmal Tragschicht.

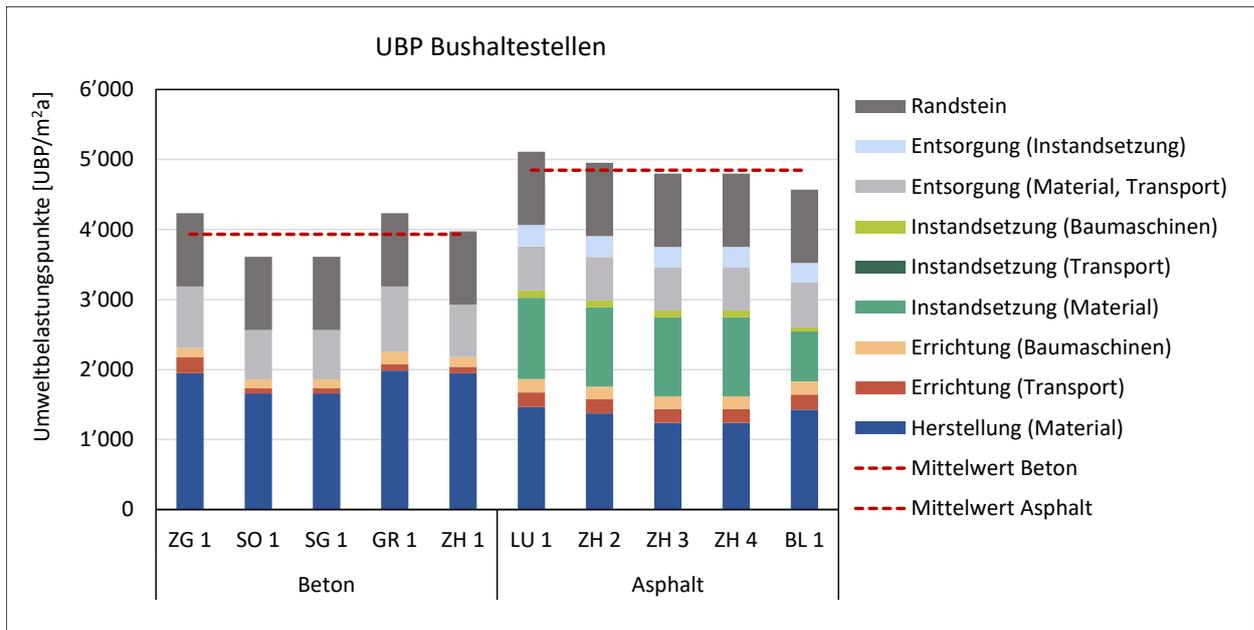
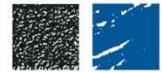


Abb. 0-17: Gesamtumweltbelastung von je fünf Standard-Bushaltestellen von verschiedenen Kantonen aus Beton und Asphalt. Die Lebensdauer beträgt 40 Jahre (Beton: keine Instandsetzung, Asphalt: zweimal Deckschicht und einmal Binderschicht ersetzt).

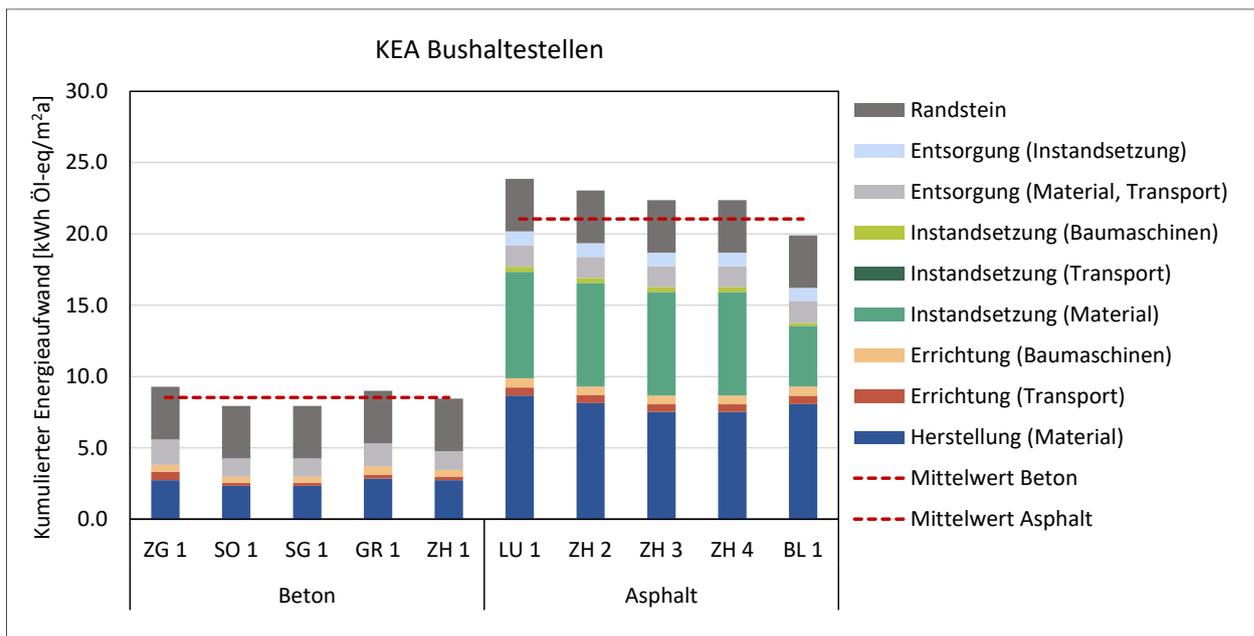


Abb. 0-18: Kumulierter Energieaufwand von je fünf Standard-Bushaltestellen von verschiedenen Kantonen aus Beton und Asphalt. Die Lebensdauer beträgt 40 Jahre (Beton: keine Instandsetzung, Asphalt: zweimal Deckschicht und einmal Binderschicht ersetzt).

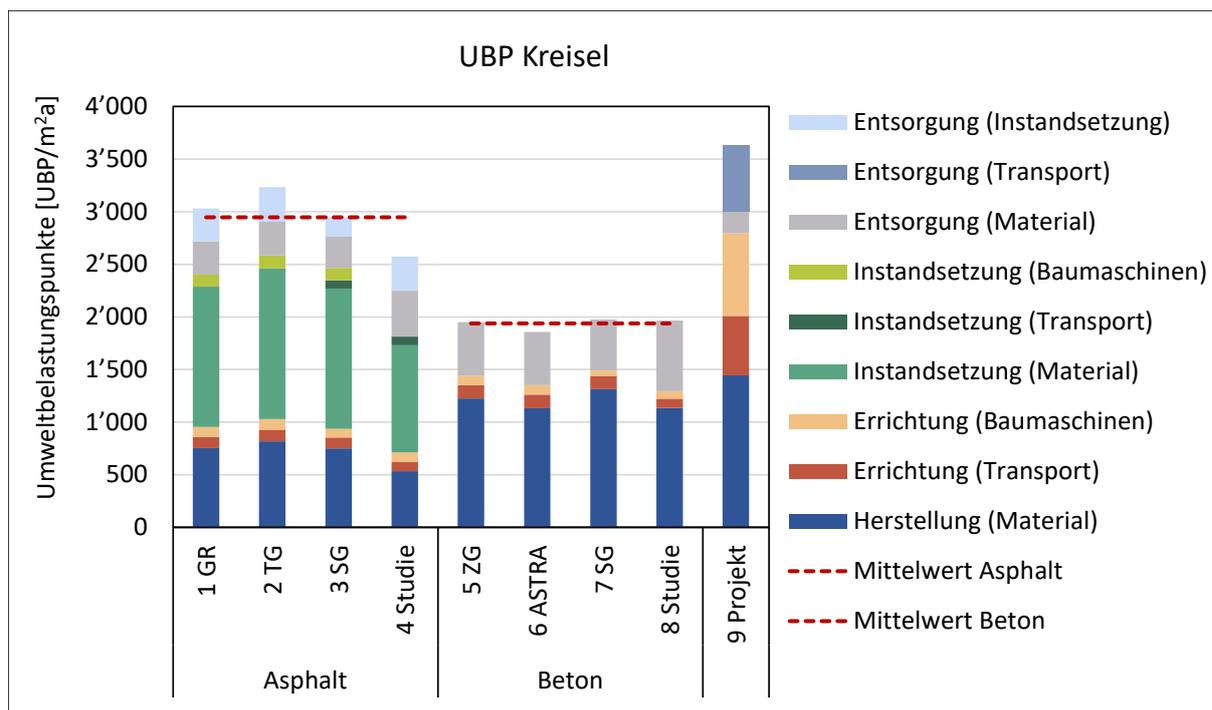


Abb. 0-19: Gesamtumweltbelastung von je vier Asphalt- und Betonkreiseln sowie einem Betonkreisel inklusive Asphaltanschlüssen aus einem Gesamtprojekt (Nr. 9). Standardfahrbahnaufbauten der Kantone: Graubünden, St. Gallen, Thurgau, Zug und vom ASTRA. Nummer 4 und 8 stammen aus einer Studie [12]. Lebensdauer: 80 Jahre.

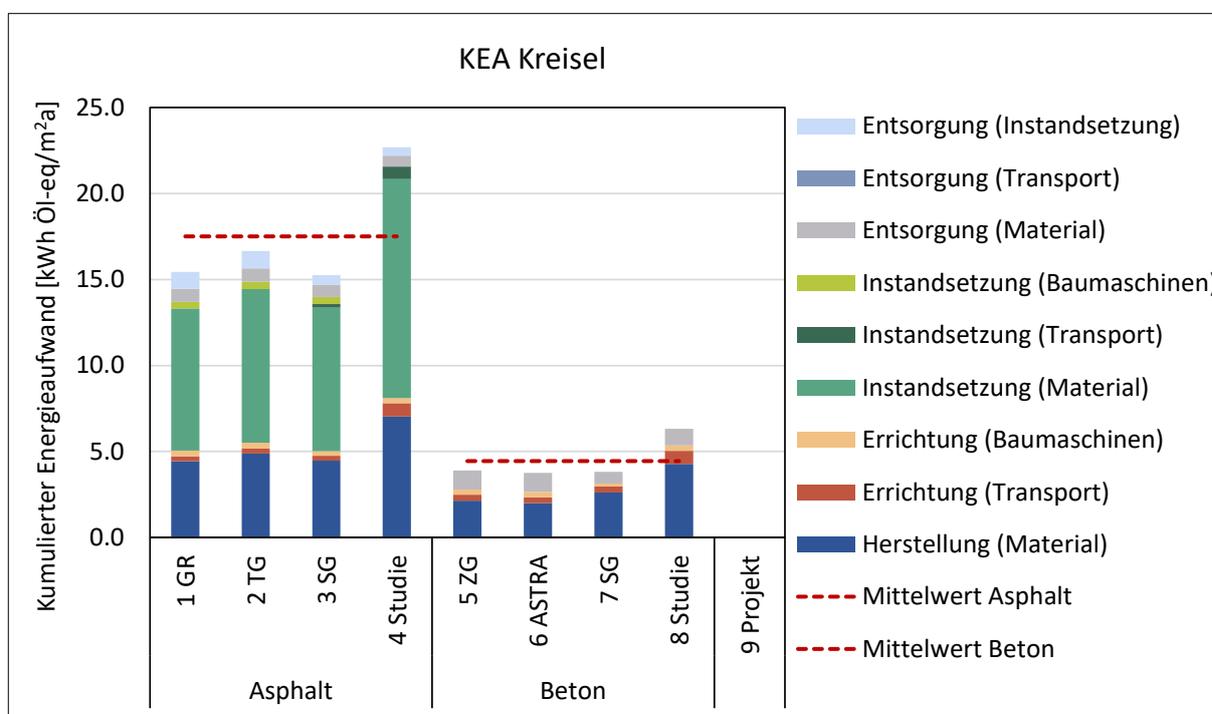
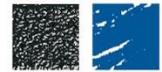


Abb. 0-20: Kumulierter Energieaufwand von je vier Asphalt- und Betonkreiseln sowie einem Betonkreisel inklusive Asphaltanschlüssen aus einem Gesamtprojekt (Nr. 9). Standardfahrbahnaufbauten der Kantone: Graubünden, St. Gallen, Thurgau, Zug und vom ASTRA. Nummer 4 und 8 stammen aus einer Studie [12]. Lebensdauer: 80 Jahre.



C2. Fahrbahn, Gleis

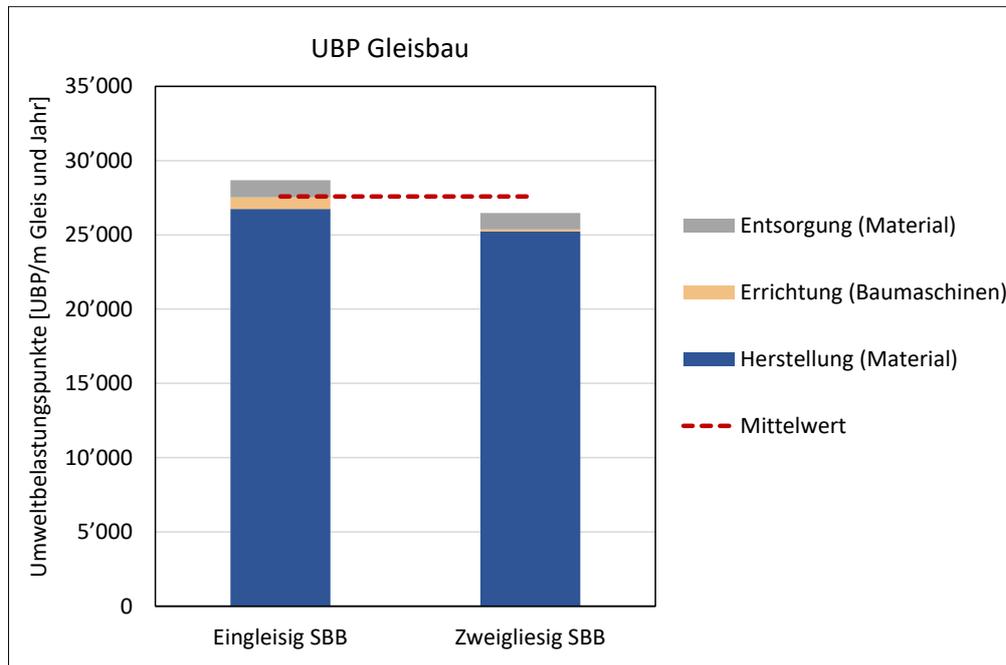


Abb. 0-21: Umweltbelastungspunkte pro Meter Gleis und Jahr für einen eingleisigen und einen zweigleisigen Streckenabschnitt der SBB. Die UBP des zweigleisigen Projektes beziehen sich ebenfalls auf die tatsächliche Gleislänge (zwei statt vier Schienen in der Breite). Die Lebensdauer der Schienen beträgt 25 Jahre, der Schwellen 40 Jahre, des Schotters 60 Jahre und sonst 33 Jahre.

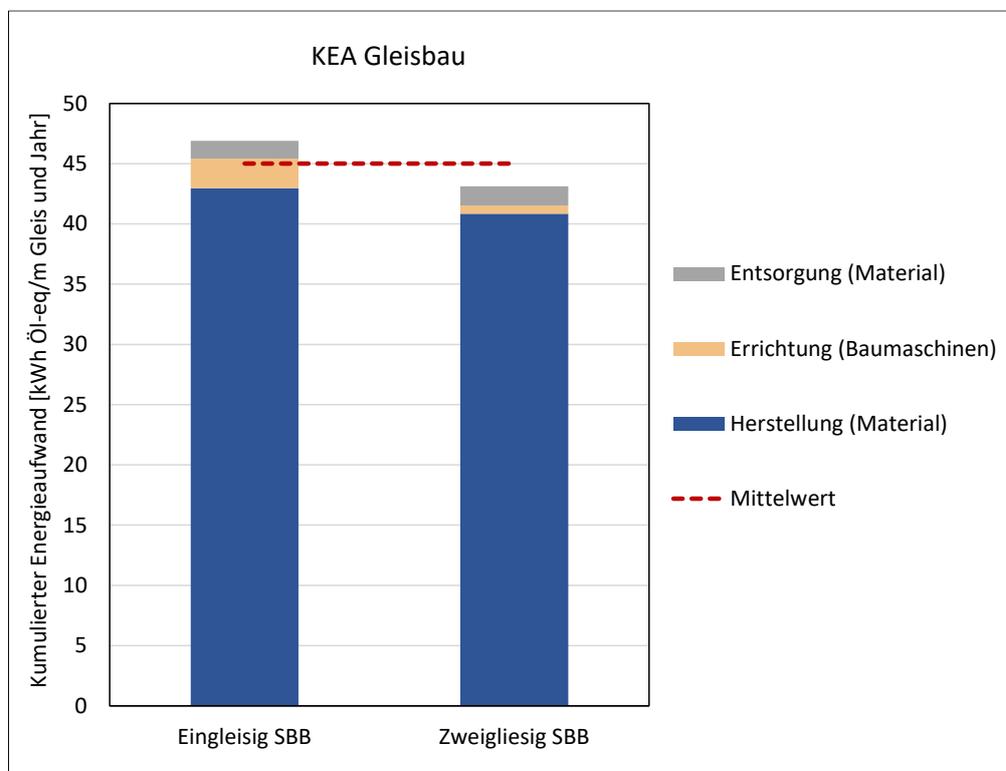


Abb. 0-22: Kumulierter Energieaufwand pro Meter Gleis und Jahr für einen eingleisigen und einen zweigleisigen Streckenabschnitt der SBB. Die KEA des zweigleisigen Projektes beziehen sich ebenfalls auf die tatsächliche Gleislänge (zwei statt vier Schienen in der Breite). Die Lebensdauer der Schienen beträgt 25 Jahre, der Schwellen 40 Jahre, des Schotters 60 Jahre und sonst 33 Jahre.



C3. Brücken

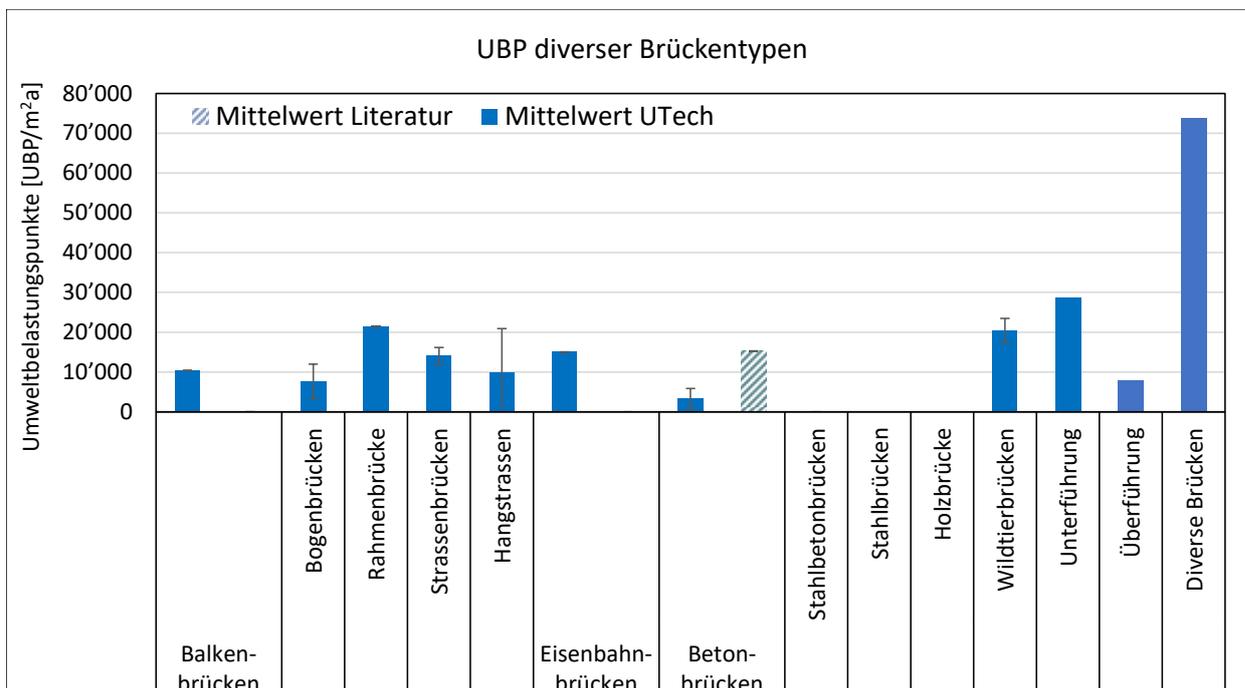


Abb. 0-23: Mittlere Gesamtumweltbelastung von Projekten der UTech und ein Literaturwert von verschiedenen Brückentypen. Der Fehlerbalken gibt jeweils die Standardabweichung der gemittelten Werten je Brückentyp an. Die Datengrundlage und Unsicherheiten sind unterschiedlich je nach Projekt und Brückentyp.

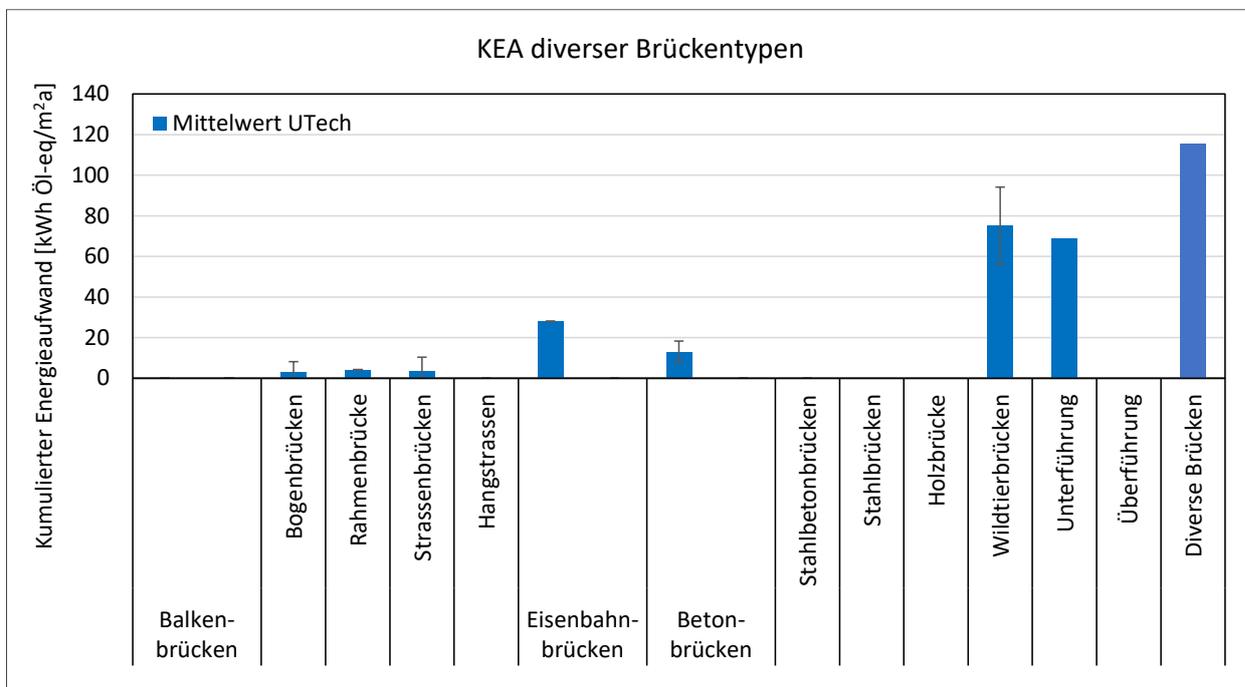
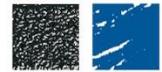


Abb. 0-24: Mittlerer kumulierter Energieaufwand von Projekten der UTech von verschiedenen Brückentypen. Der Fehlerbalken gibt jeweils die Standardabweichung der gemittelten Werten je Brückentyp an. Die Datengrundlage und Unsicherheiten sind unterschiedlich je nach Projekt und Brückentyp.



C4. Tunnel

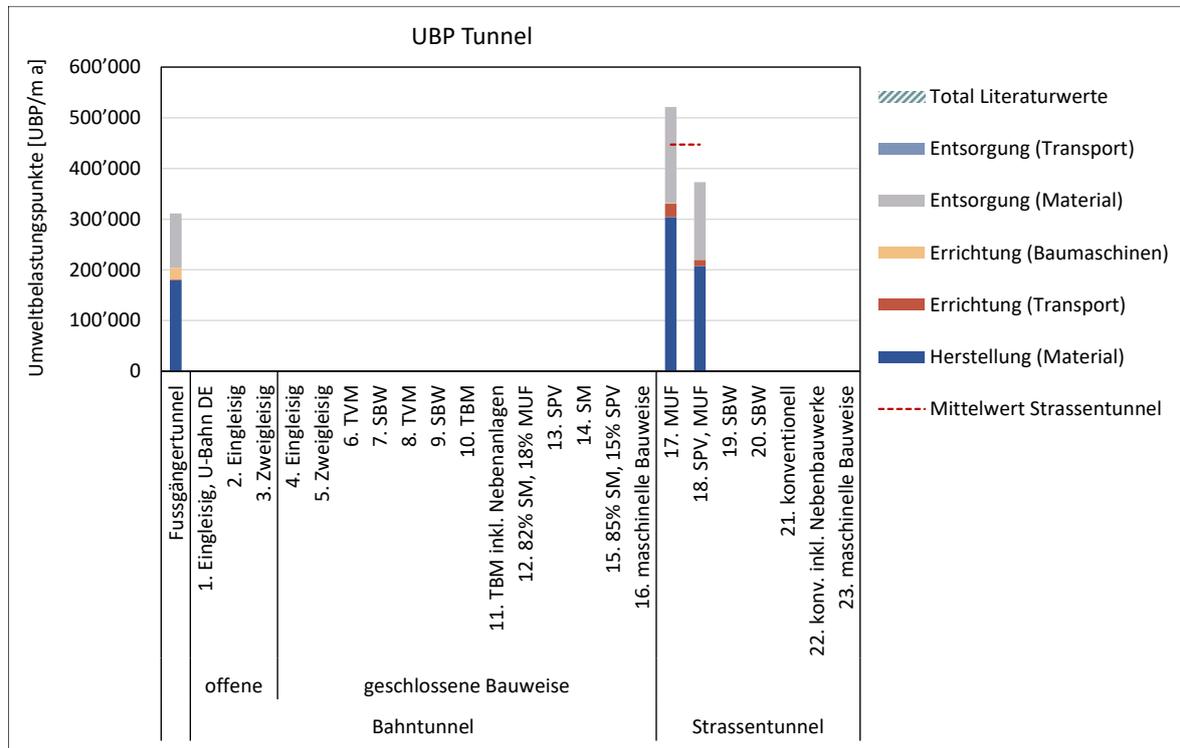


Abb. 0-25: Gesamtumweltbelastung verschiedener Tunnelbauweisen für Fussgänger und Strassentunnel. Legende: TBM: Tunnelbohrmaschine, MUF: Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels, SPV: Sprengvortrieb.

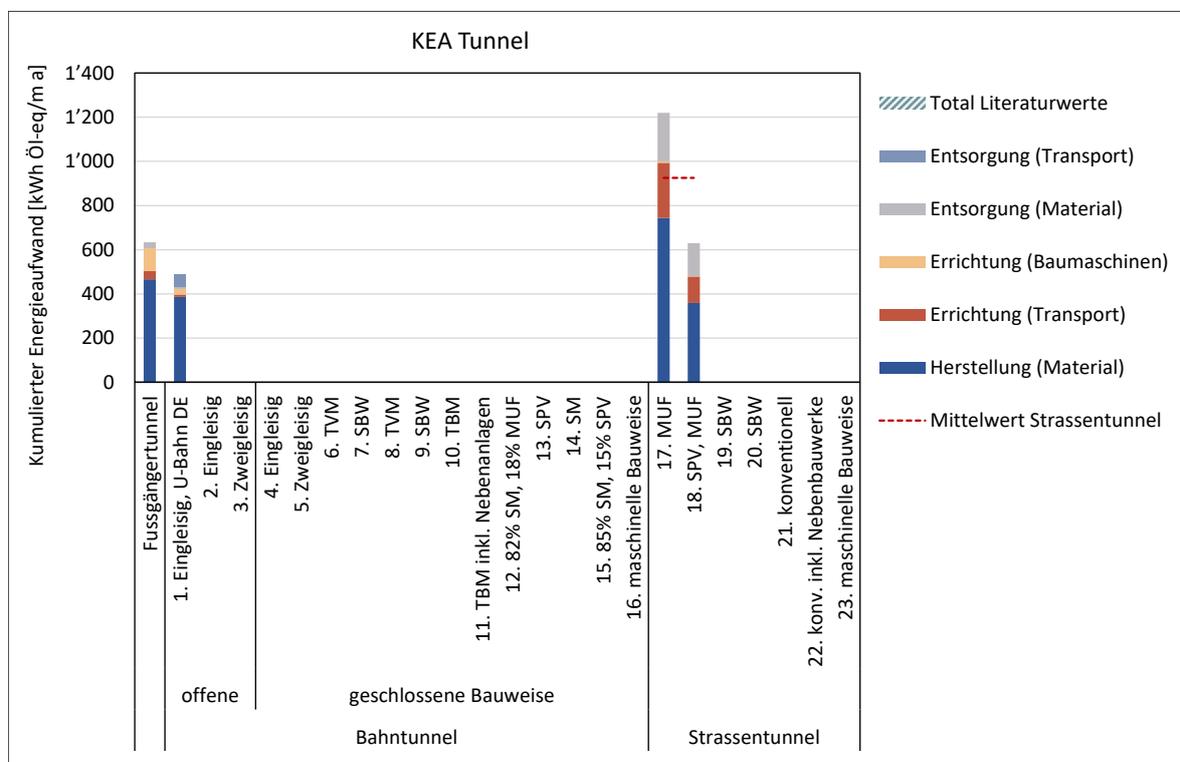


Abb. 0-26: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Tunnelbauweisen für Fussgänger und Strassentunnel. Legende: TBM: Tunnelbohrmaschine, MUF: Maschinenunterstützter Vortrieb im Fels, SPV: Sprengvortrieb.



C5. Übrige Bauten

Die Herstellung des Holzes weist hohe UBP und KEA Werte auf (vgl. KBOB/ecobau Ökobilanzdaten im Baubereich [10]). Die zwei untersuchten Lärmschutzwände aus Holz bestehen aus einer materialintensiven Holzkonstruktion. Die Schwankungen zwischen den Lärmschutztypen beim kumulierten Energieaufwand sind besonders gross. Insbesondere Holz weist einen sehr hohen kumulierten Energieaufwand auf. Dies ist einerseits auf den hohen Anteil erneuerbarer, stofflich genutzter Energie im Holz zurückzuführen, andererseits auf den vergleichsweise energieintensiven Herstellungs- und Trocknungsprozess. Für die Umweltbilanz relevant ist jedoch primär der nicht erneuerbare Energiegehalt – und dieser fällt bei Holz im Vergleich zu anderen Materialien gering aus. Die Auswertung mittels UBP und KEA Methode sollen eine erste Einschätzung vermitteln. Die Datengrundlage ist jedoch zu dünn, um belastbare Aussagen über die Wahl einer ökologisch vorteilhaftesten Lärmschutzwand zu treffen.

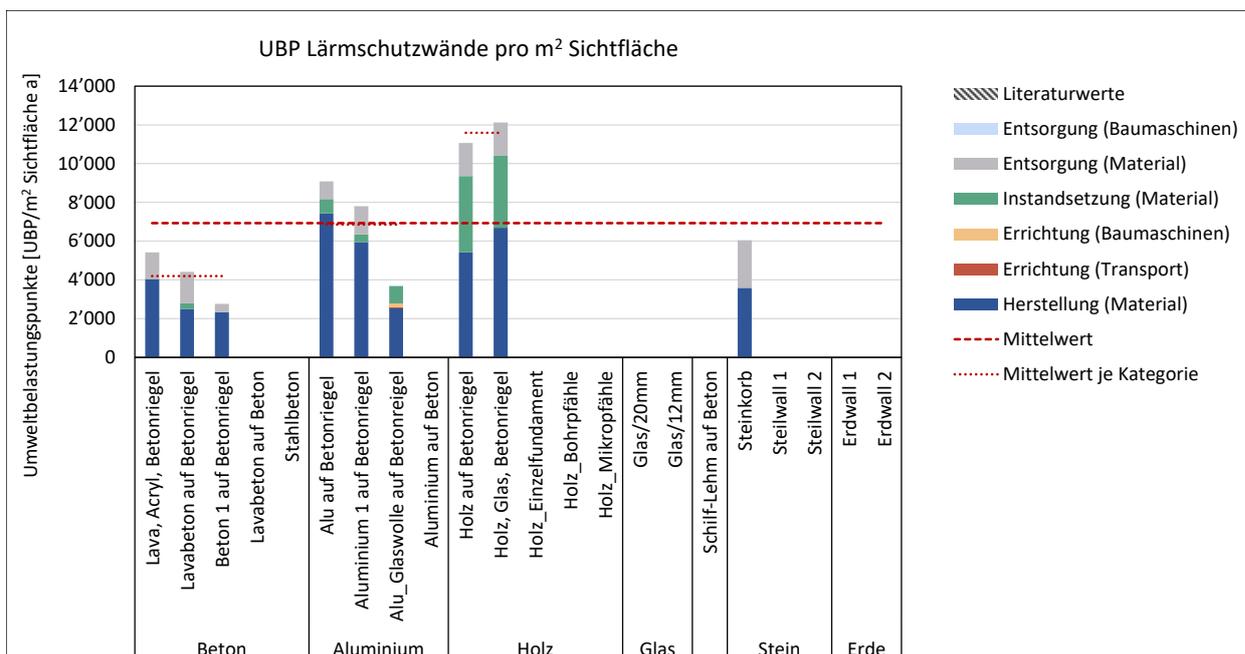


Abb. 0-27: Gesamtumweltbelastung verschiedener Lärmschutzwände aus unterschiedlichen Materialien pro Quadratmeter Sichtfläche und Jahr. Lebensdauer 80 Jahre inklusive Instandsetzungen.

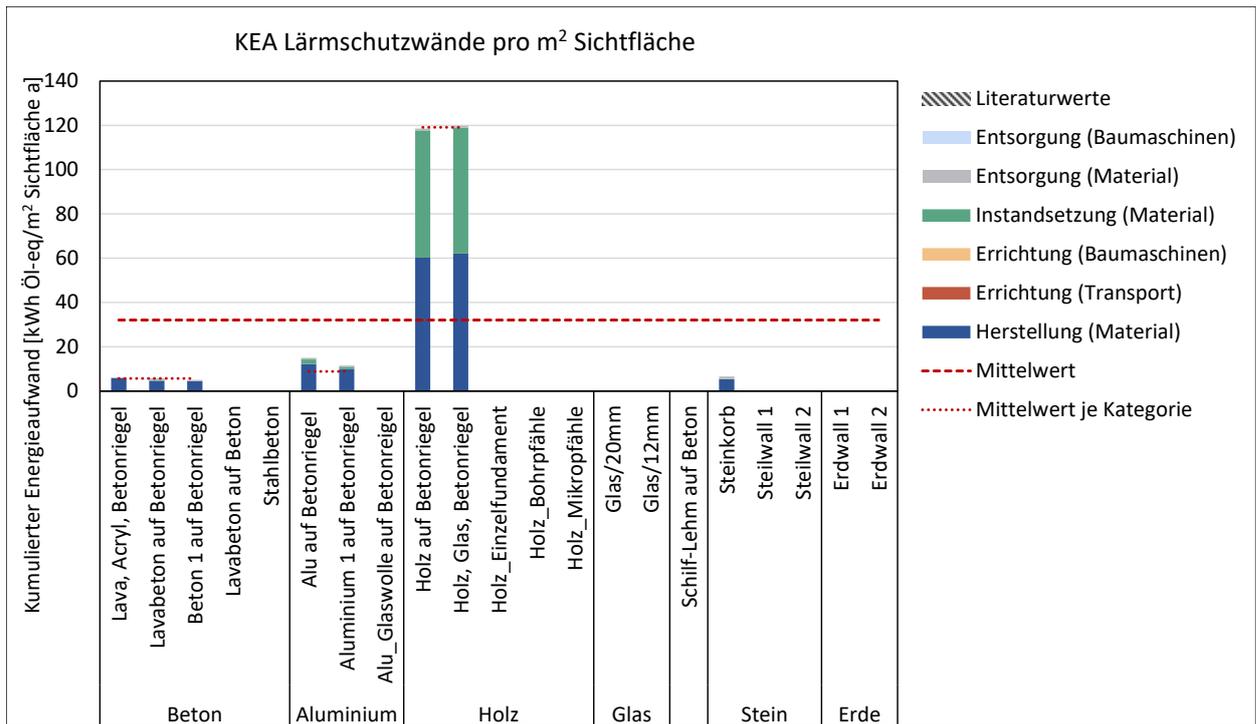
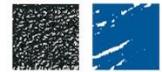


Abb. 0-28: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Lärmschutzwände aus unterschiedlichen Materialien pro Quadratmeter Sichtfläche und Jahr. Lebensdauer 80 Jahre inklusive Instandsetzungen.

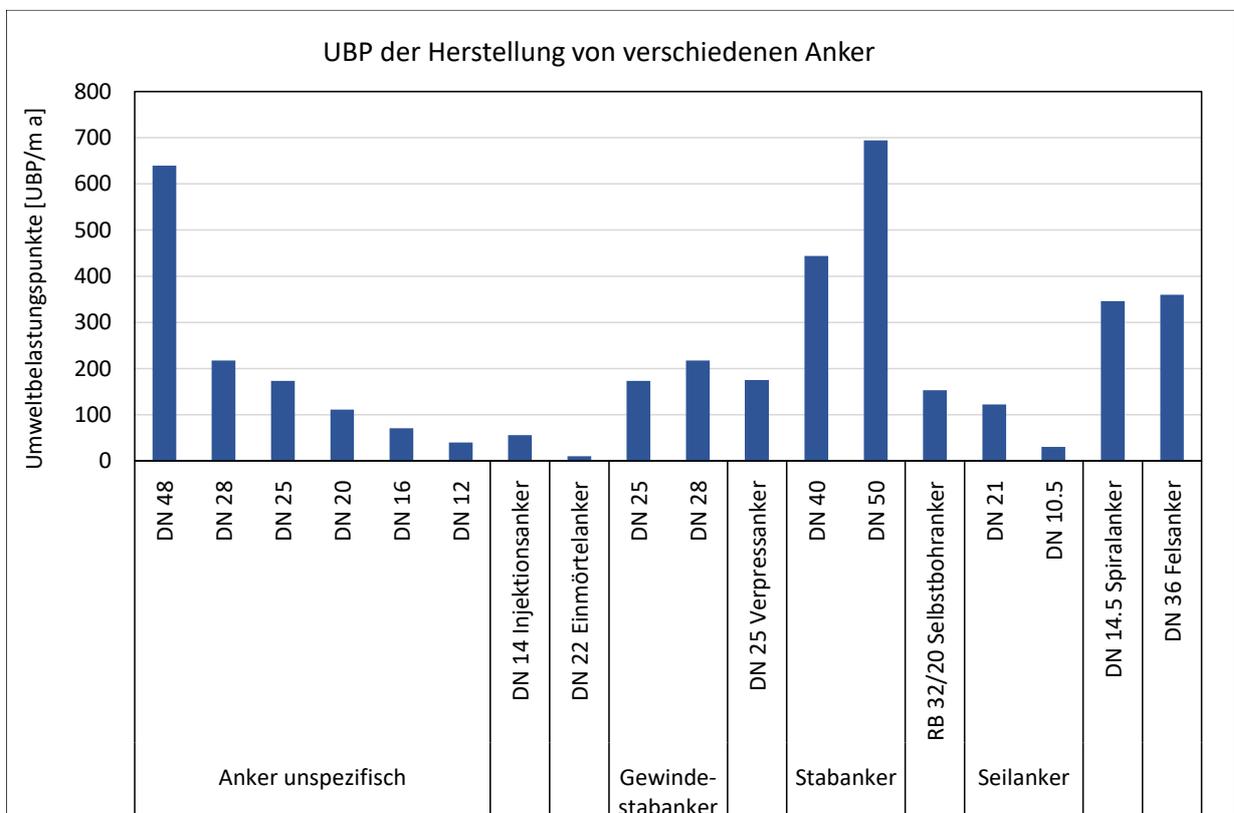


Abb. 0-29: Umweltbelastung der Herstellung von verschiedenen Ankertypen mit unterschiedlichen Durchmessern (DN [mm]).

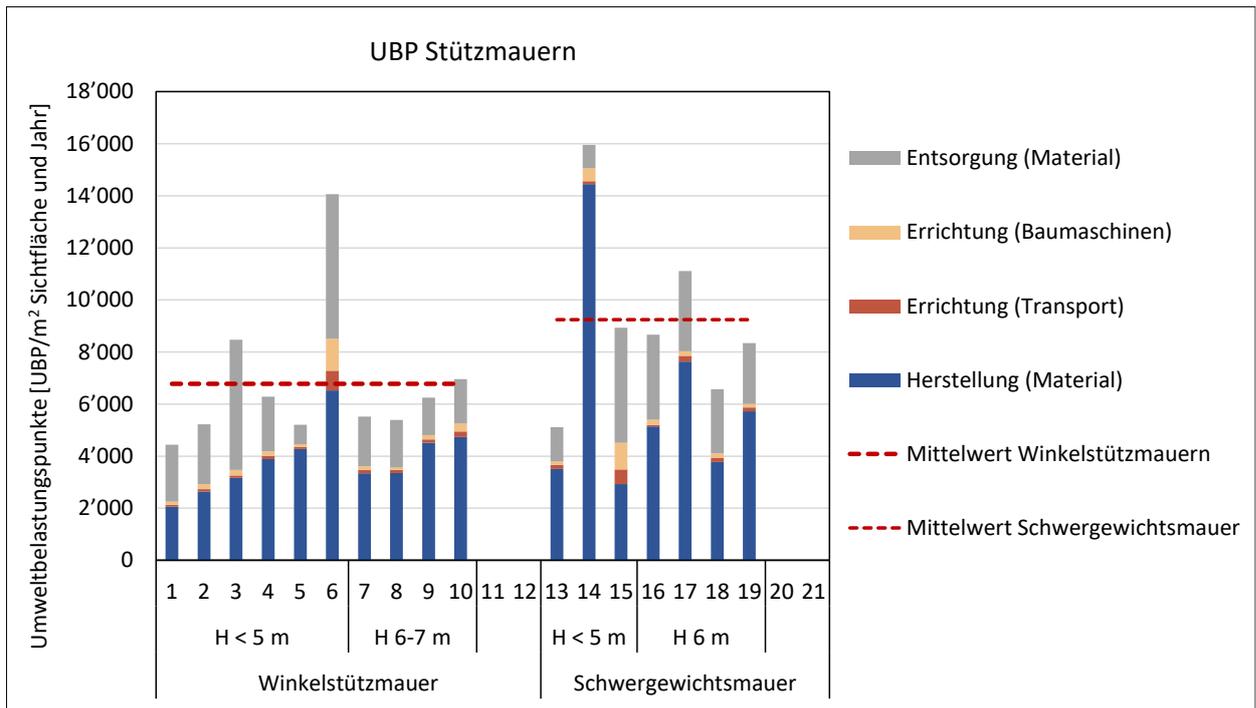
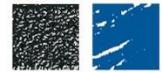


Abb. 0-30: Gesamtumweltbelastung verschiedener Winkelstützmauern und Schwergewichtsmauern pro Quadratmeter Sichtfläche (Länge mal totale Höhe) und Jahr. Lebensdauer aller Projekte: 100 Jahre.

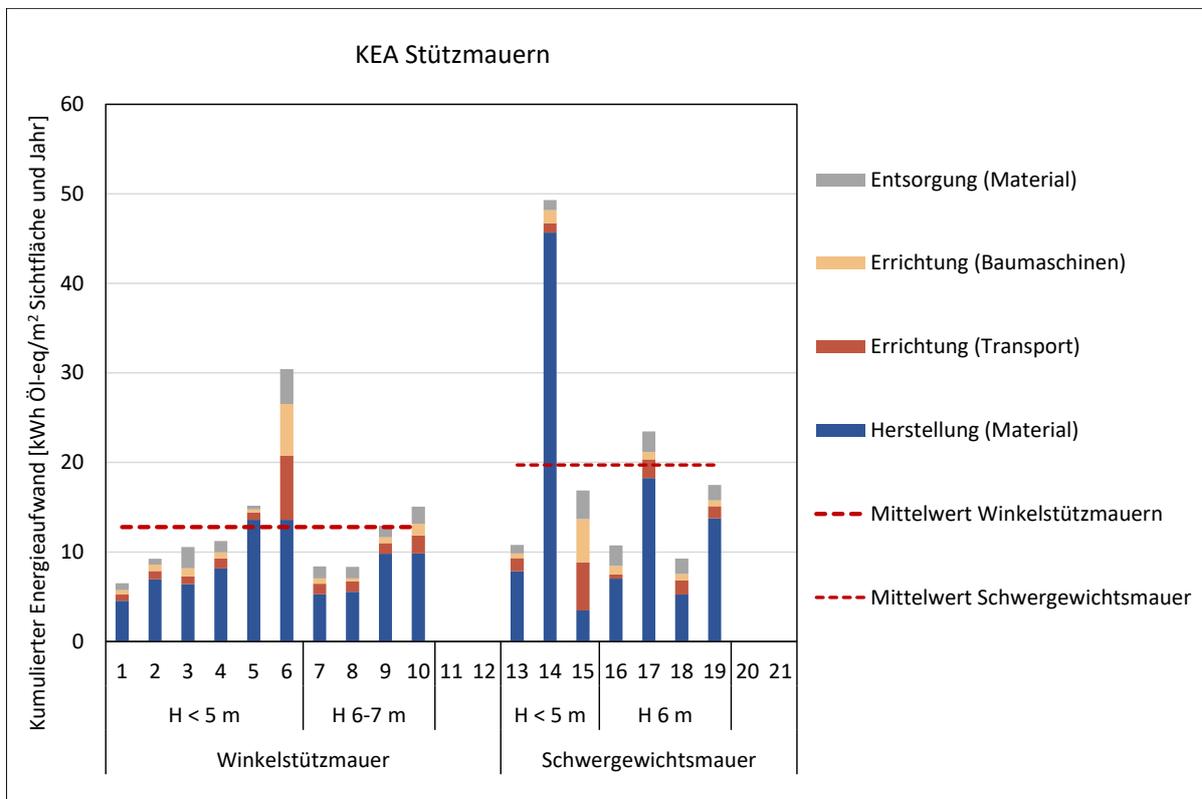


Abb. 0-31: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Winkelstützmauern und Schwergewichtsmauern pro Quadratmeter Sichtfläche (Länge mal totale Höhe) und Jahr. Lebensdauer aller Projekte: 100 Jahre.

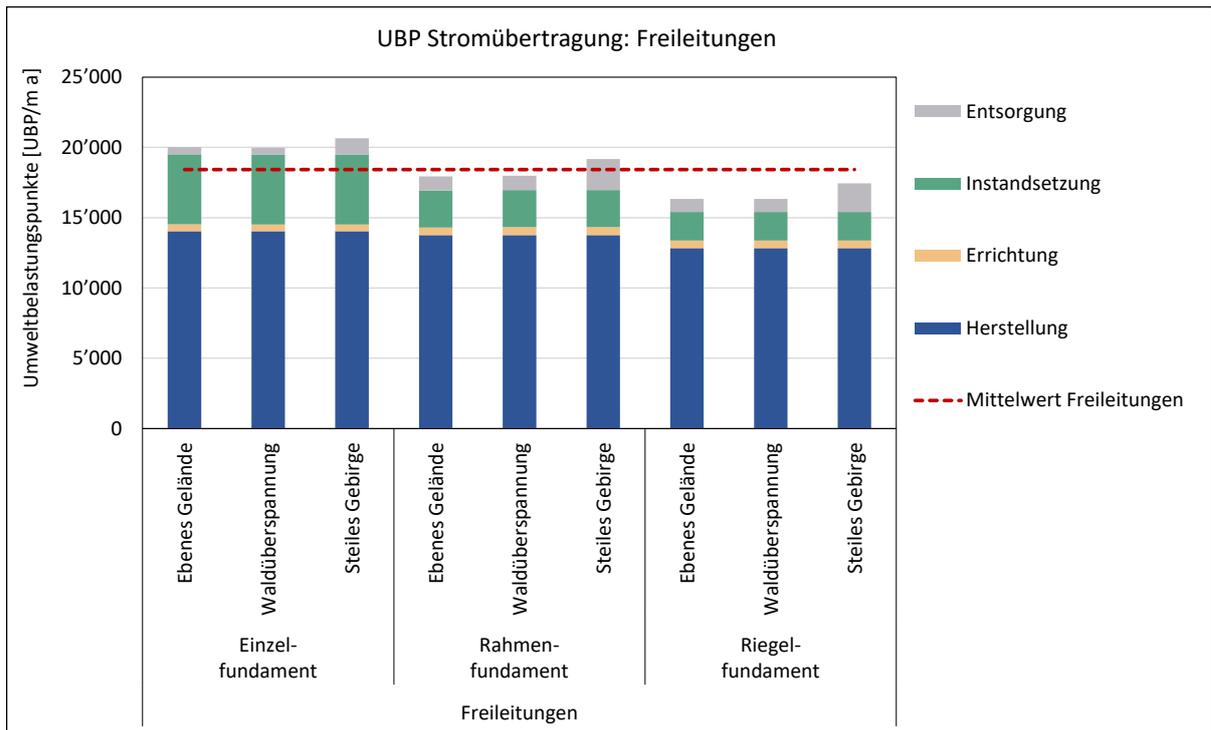
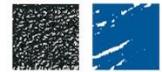


Abb. 0-32: Gesamtumweltbelastung verschiedener Freileitungssysteme zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind die Phasen der Herstellung, Errichtung, Instandsetzung und Entsorgung.

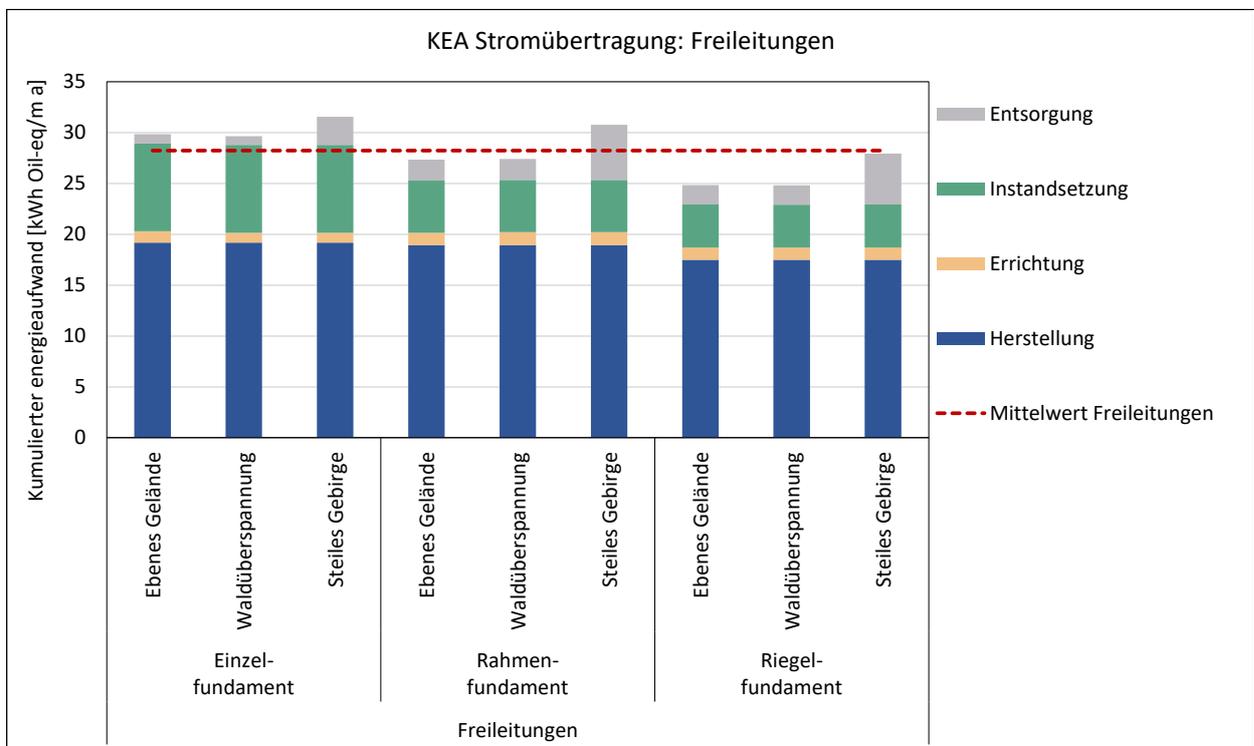


Abb. 0-33: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Freileitungssysteme zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind die Phasen der Herstellung, Errichtung, Instandsetzung und Entsorgung.

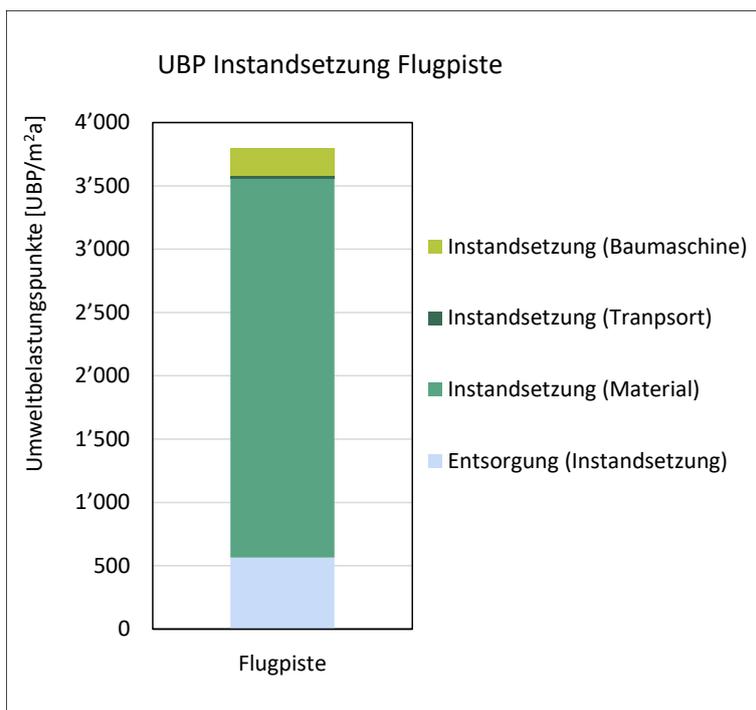


Abb. 0-34: Gesamtumweltbelastung einer Instandsetzung einer Flugpiste. Lebensdauer 40 Jahre.

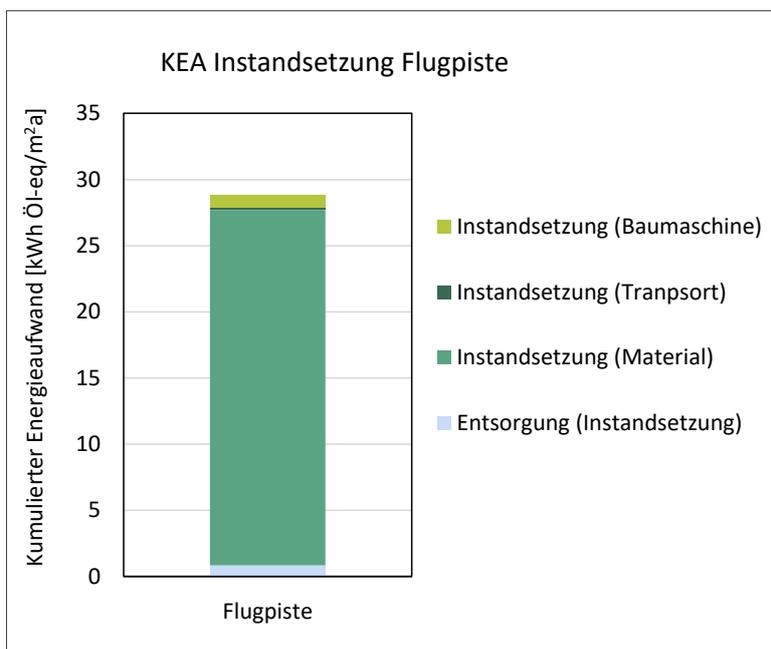
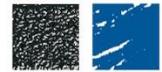


Abb. 0-35: Kumulierter Energieaufwand einer Instandsetzung einer Flugpiste. Lebensdauer 40 Jahre.



C6. Entwässerung und Kanalisation

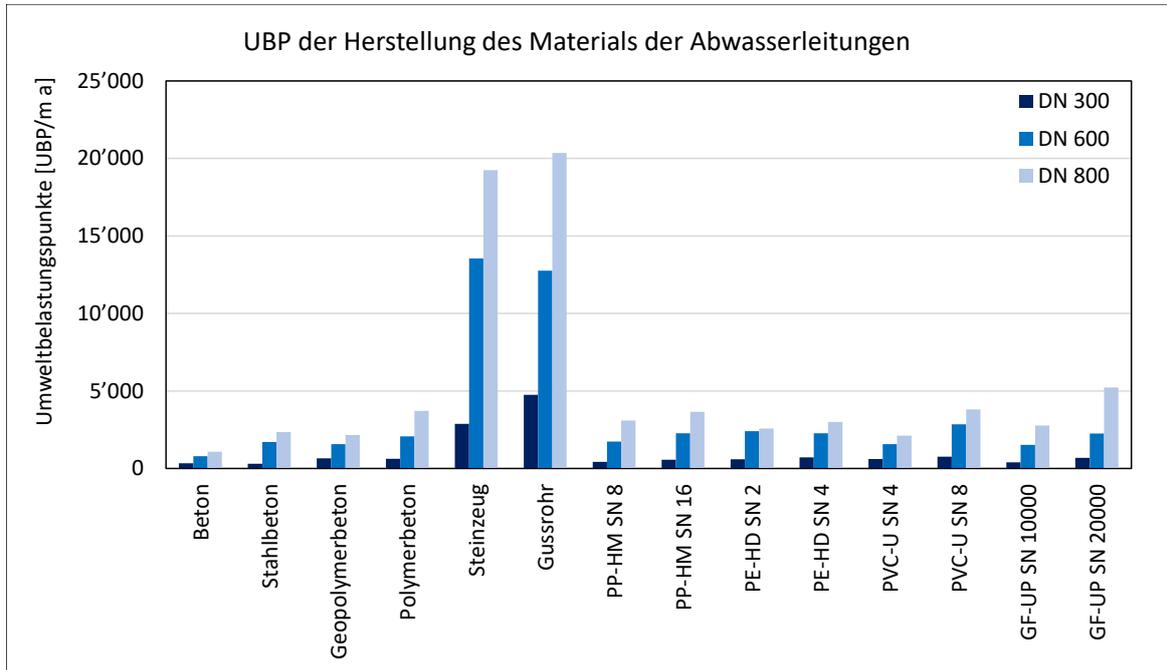


Abb. 0-36: Gesamtumweltbelastung der Herstellung des Materials pro Laufmeter und Jahr der jeweiligen Rohre für die drei betrachteten Durchmesser 300 mm, 600 mm und 800 mm.

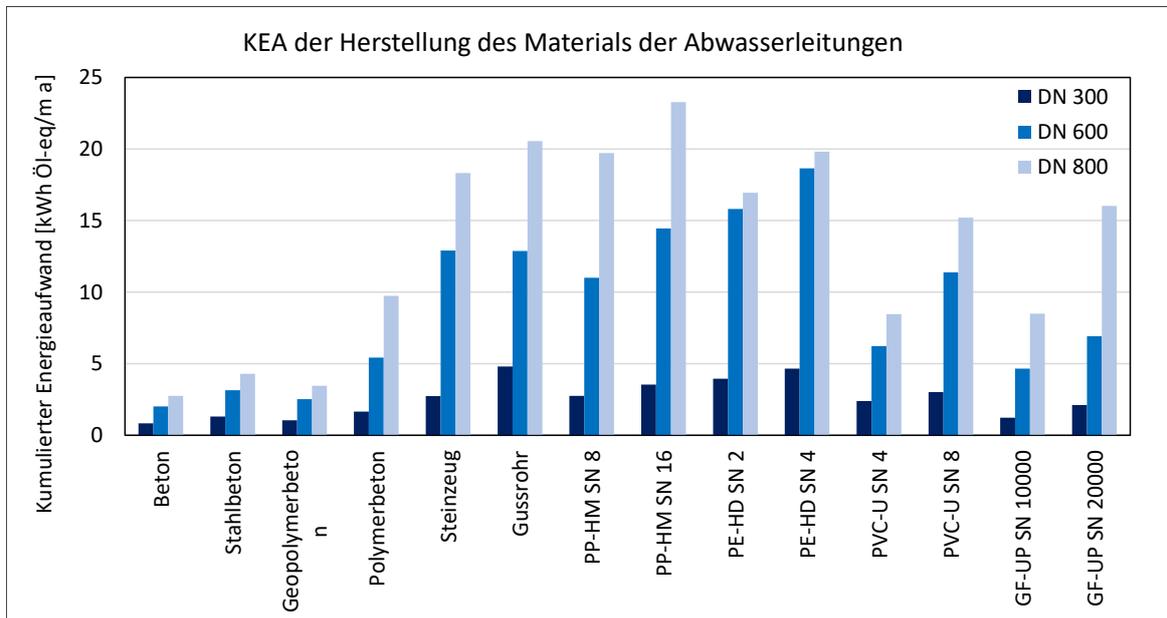


Abb. 0-37: Kumulierter Energieaufwand der Herstellung des Materials pro Laufmeter und Jahr der jeweiligen Rohre für die drei betrachteten Durchmesser 300 mm, 600 mm und 800 mm.

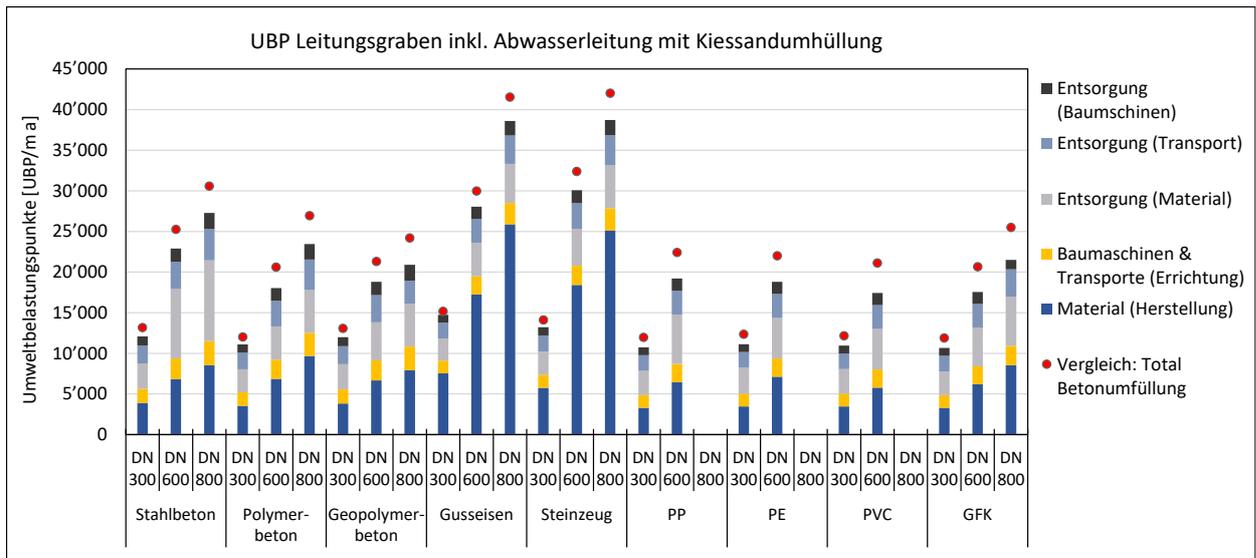
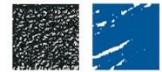


Abb. 0-38: Gesamtumweltbelastung von Leitungsgräben mit einer Kiessandumhüllung (inkl. Vergleich zur Betonumfüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.

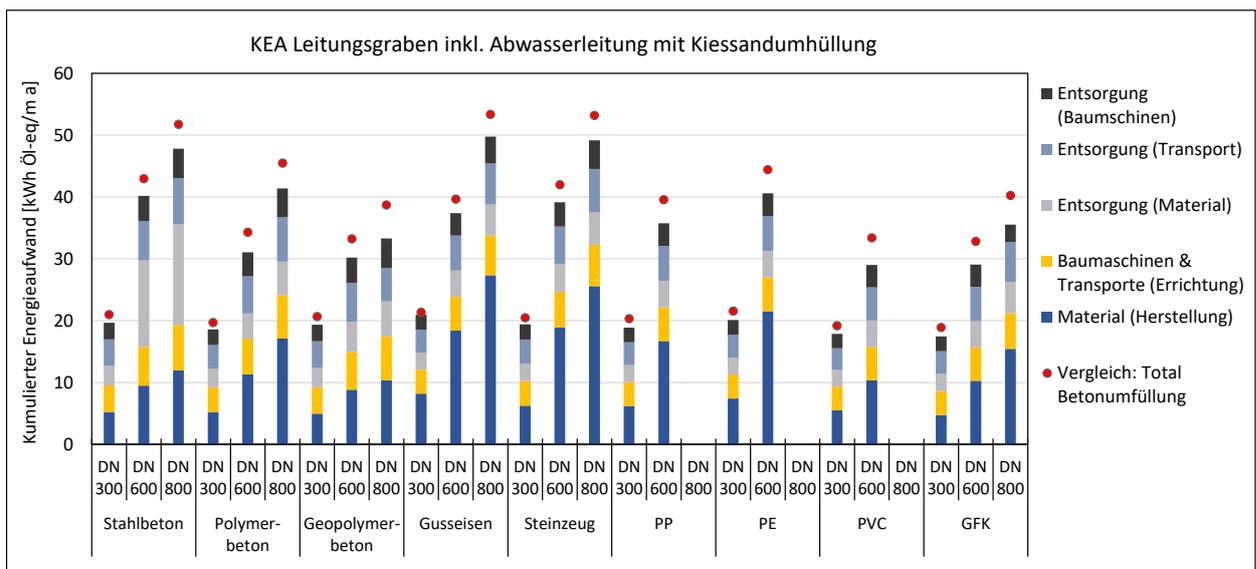


Abb. 0-39: Kumulierter Energieaufwand von Leitungsgräben mit einer Kiessandumhüllung (inkl. Vergleich zur Betonumfüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.

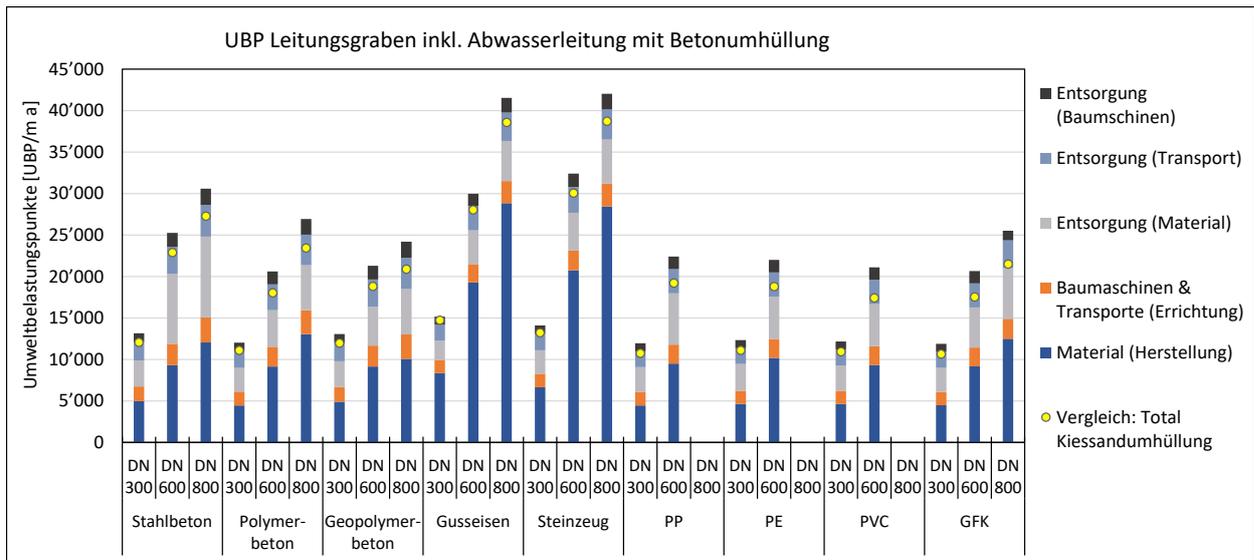
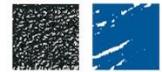


Abb. 0-40: Gesamtumweltbelastung von Leitungsraben mit einer Betonumhüllung (inkl. Vergleich zur Kiessandumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.

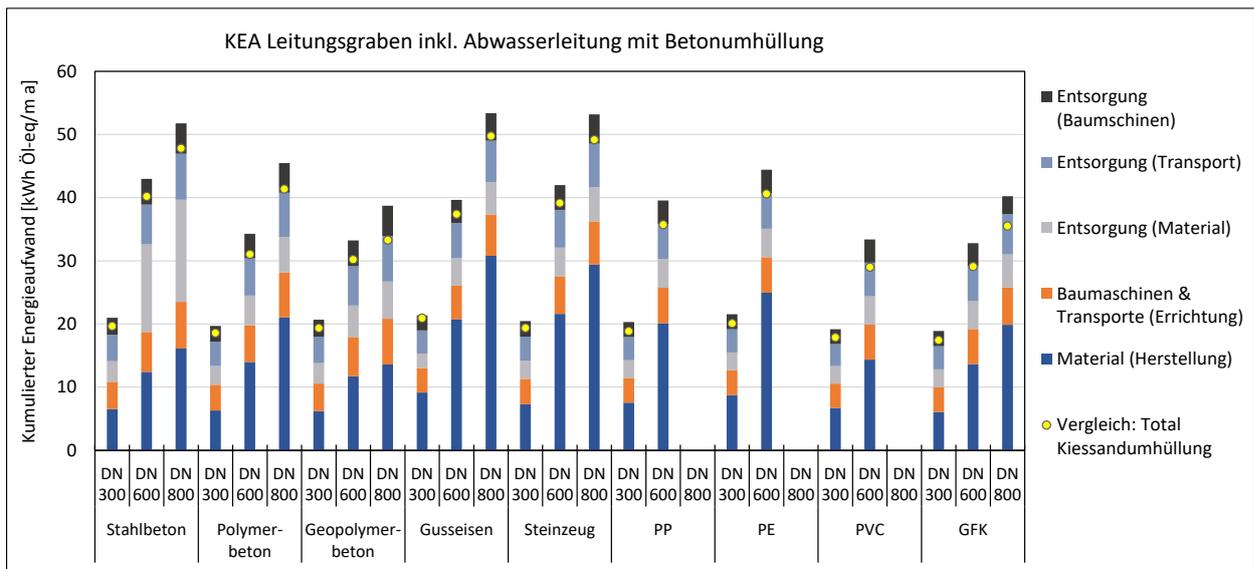


Abb. 0-41: Kumulierter Energieaufwand von Leitungsraben mit einer Betonumhüllung (inkl. Vergleich zur Kiessandumhüllung) mit verschiedenen Abwasserleitungen und Durchmessern. Eine Lebensdauer von 80 Jahren wurde angenommen.

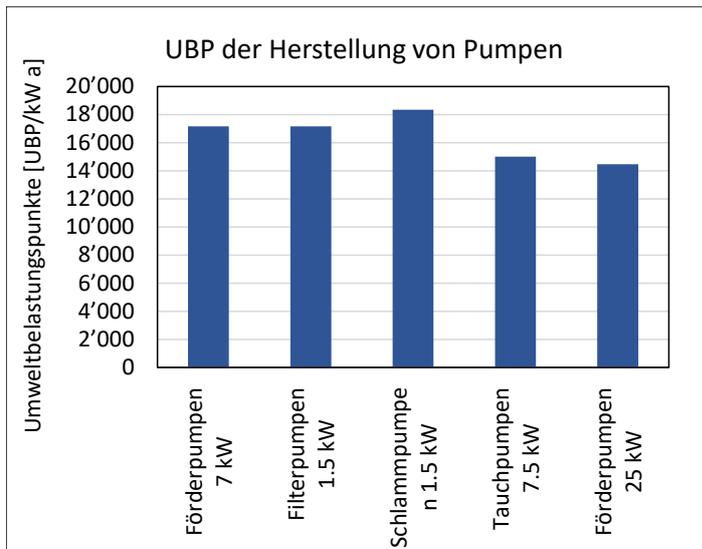
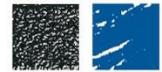


Abb. 0-42: Gesamtumweltbelastung der Herstellung verschiedener Pumpen mit unterschiedlicher Leistung pro Kilowatt und Jahr.

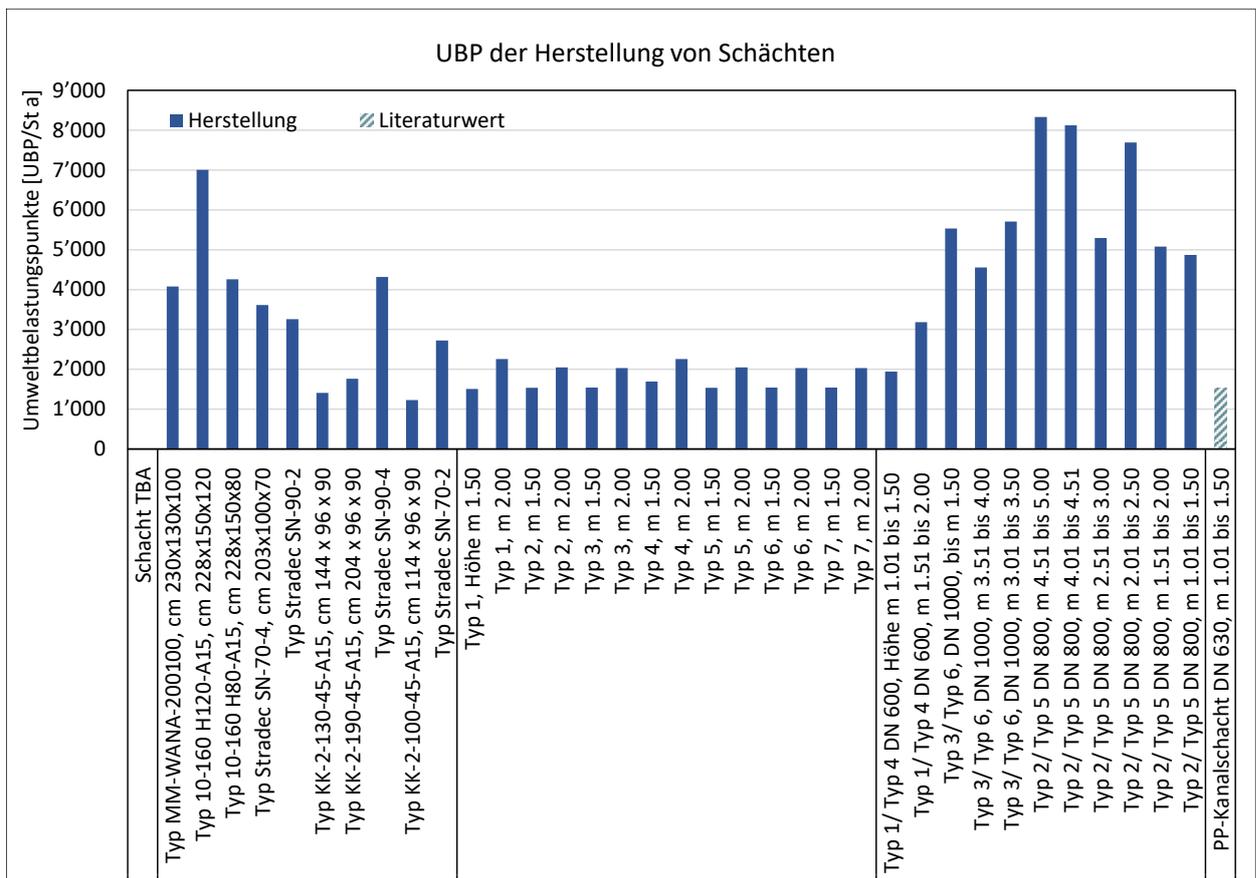


Abb. 0-43: Umweltbelastung der Herstellung von verschiedenen Schachttypen aus Beton pro Stück und Jahr.

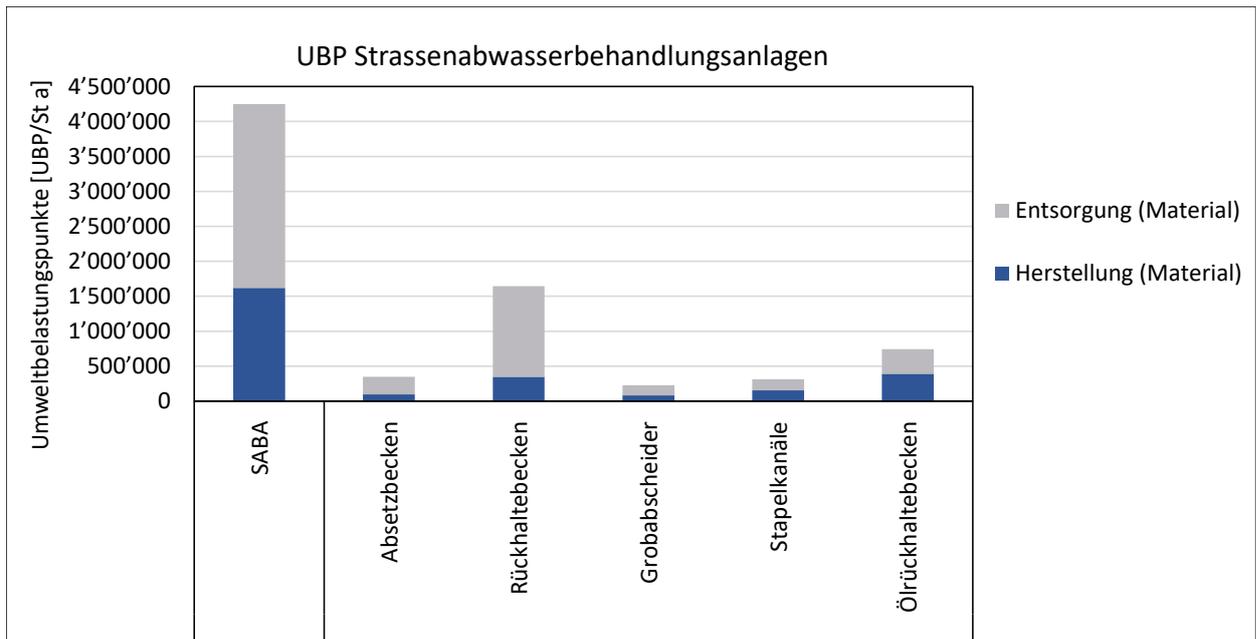
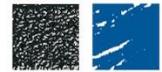


Abb. 0-44: Gesamtumweltbelastung einer Strassenabwasserbehandlungsanlage (SABA) und verschiedener Teilelemente davon, wie beispielsweise ein Absetzbecken. Berücksichtigt wurden die Herstellung des Materials und dessen Entsorgung, jedoch kein Einbau und keine Instandsetzungen.

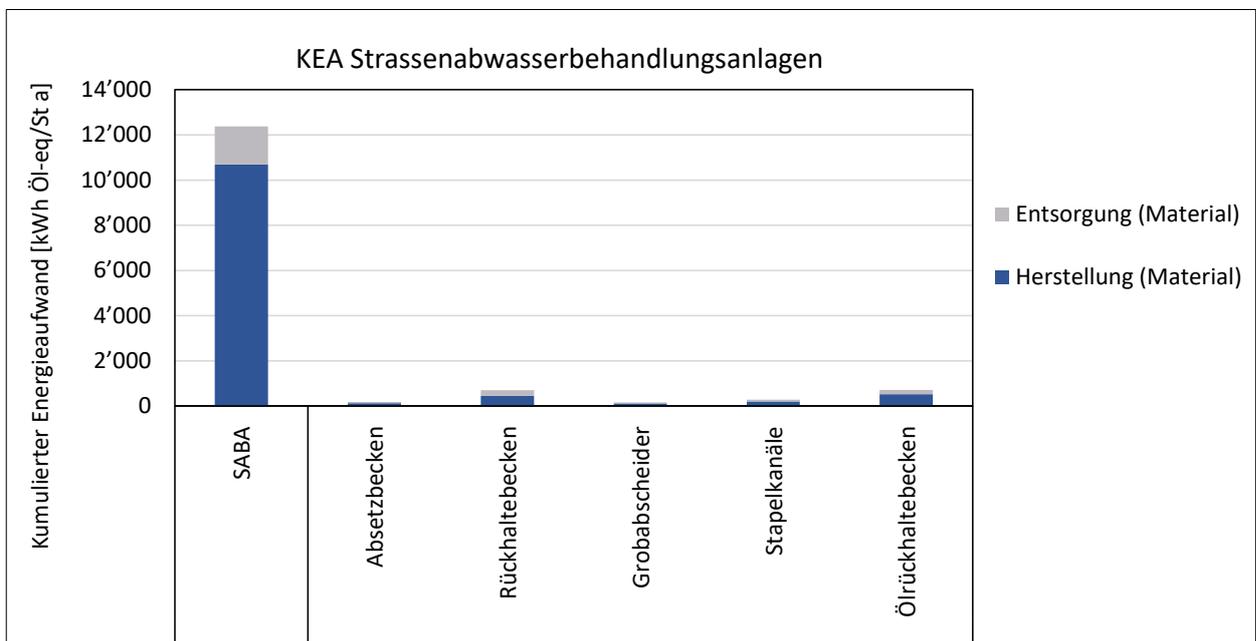
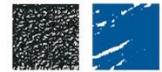


Abb. 0-45: Kumulierter Energieaufwand einer Strassenabwasserbehandlungsanlage (SABA) und verschiedener Teilelemente davon, wie beispielsweise ein Absetzbecken. Berücksichtigt wurden die Herstellung des Materials und dessen Entsorgung, jedoch kein Einbau und keine Instandsetzungen.



C7. Werkleitungen

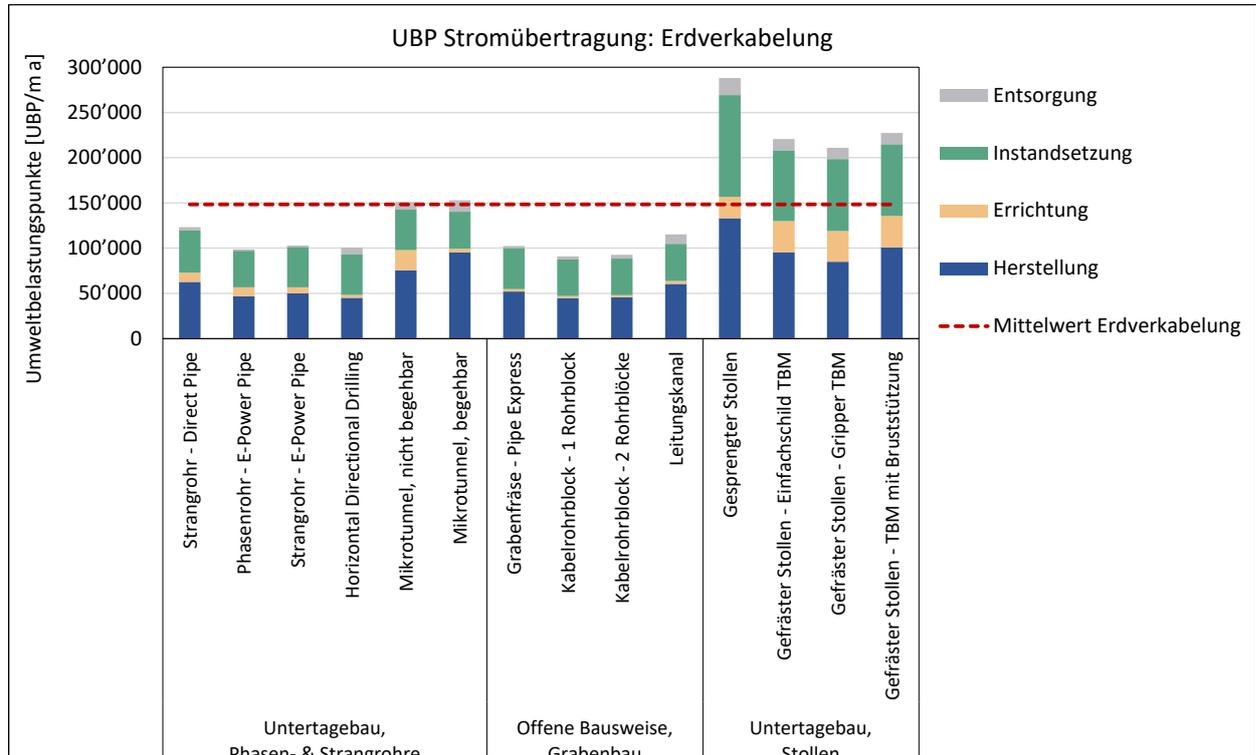


Abb. 0-46: Gesamtumweltbelastung verschiedener Erdverkabelungsvarianten zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind alle Phasen des Lebenszyklus.

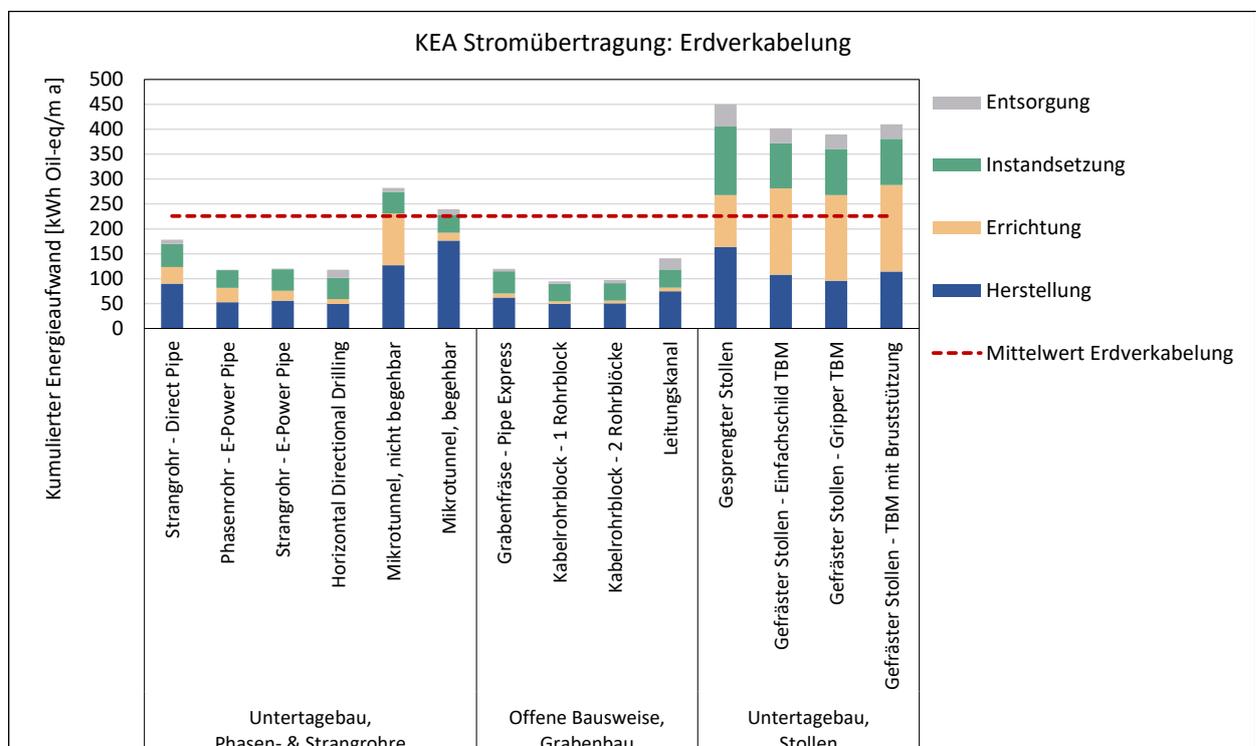


Abb. 0-47: Kumulierter Energieaufwand verschiedener Erdverkabelungsvarianten zur Stromübertragung auf der Höchstspannungsebene (220 – 380 kV) pro Laufmeter und Jahr. Abgebildet sind alle Phasen des Lebenszyklus.



Anhang D. Reduktionspotenziale

Die Resultate der Berechnung zur Abschätzung der Reduktionspotenziale werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt. Über Kategorisierung der Materialien und Bauaufwände in Kategorien wie «Beton», «Asphalt Deckschicht», «LKW Diesel» etc. wurden die entsprechenden Umweltwirkungen mit dem Reduktionsfaktor (siehe Tabelle 4) multipliziert. Anschliessend wurde der Mittelwert über alle Beispielprojekte berechnet, um die mittlere Auswirkung auf ein Gesamtprojekt aufzuzeigen. Diese Berechnung war nur bei einer guten Datengrundlage möglich und setzte voraus, dass die Daten in einer spezifischen Form zur Kategorisierung vorlagen, was nicht bei allen Beispielprojekten und Objekttypen der Fall war. Ausgewertet werden konnten deshalb nur die Objekttypen: Bushaltestelle, Gehweg, Kreisell, Gemeinde-, Kantons- und Nationalstrassen, Wildtierbrücken, Tunnel, Lärmschutzmauern und Stützmauern. Es ist darauf hinzuweisen, dass durch die Verwendung des Mittelwertes bereits ökologisch vorteilhafte Projekte ebenfalls berücksichtigt sind. Dadurch kann es vorkommen, dass bei gewissen Bauwerken oder im Hinblick auf gewisse Materialien das Reduktionspotenzial überschätzt wird.

D1. Reduktionspotenziale bis 2030

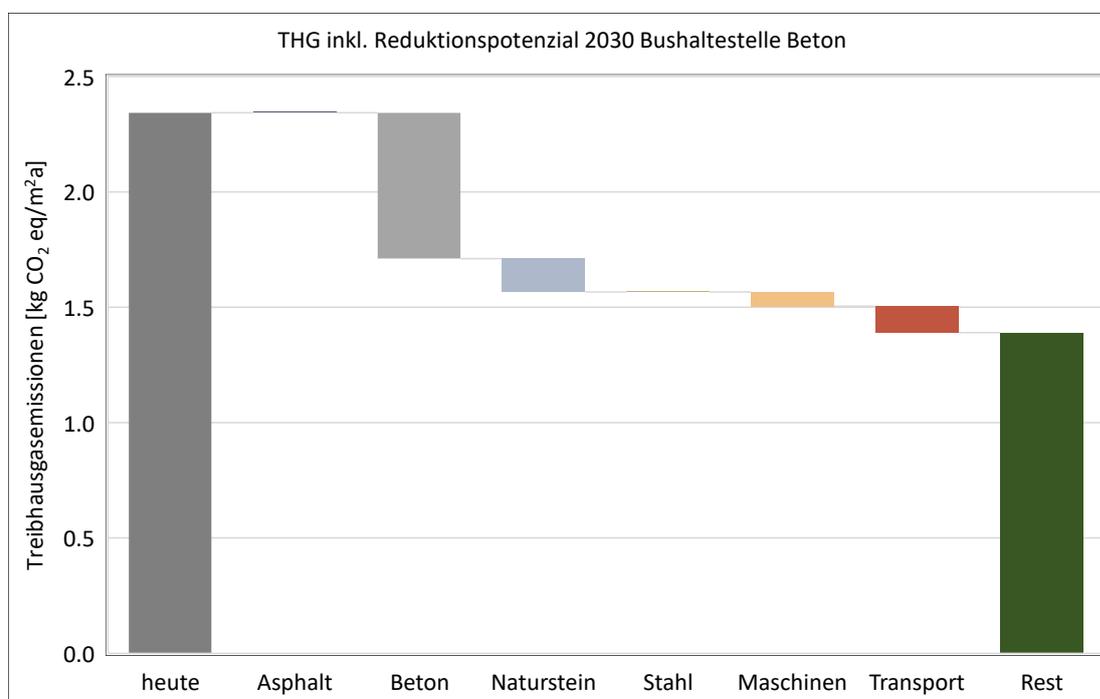


Abb. 0-48: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 41%.

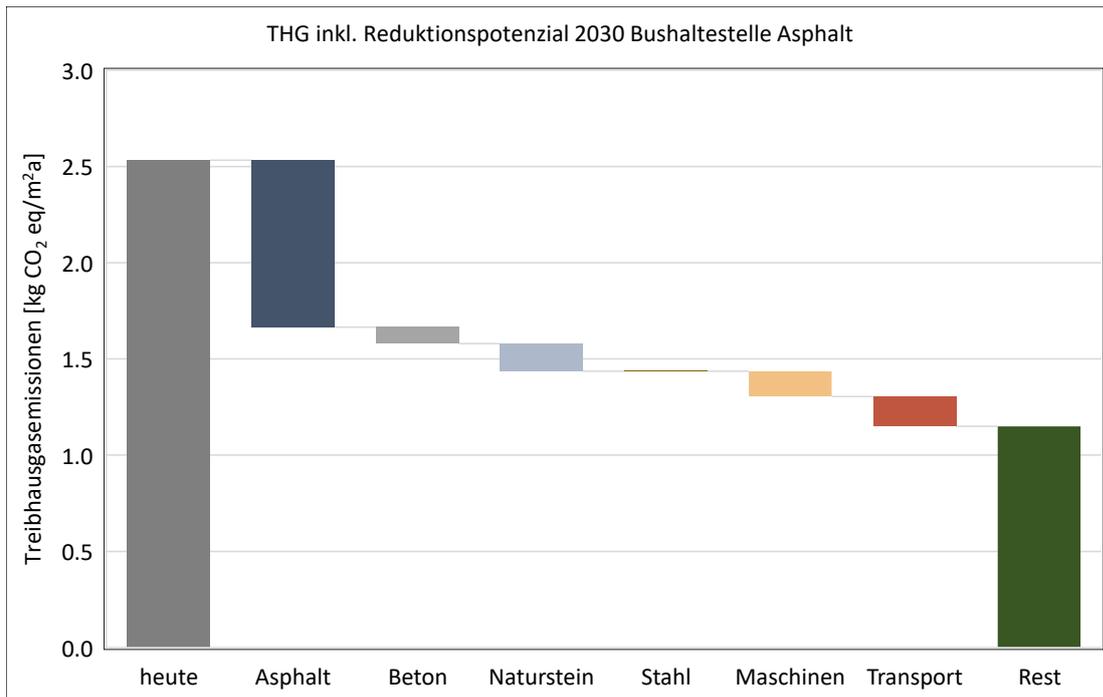
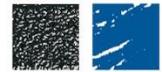


Abb. 0-49: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 55%.

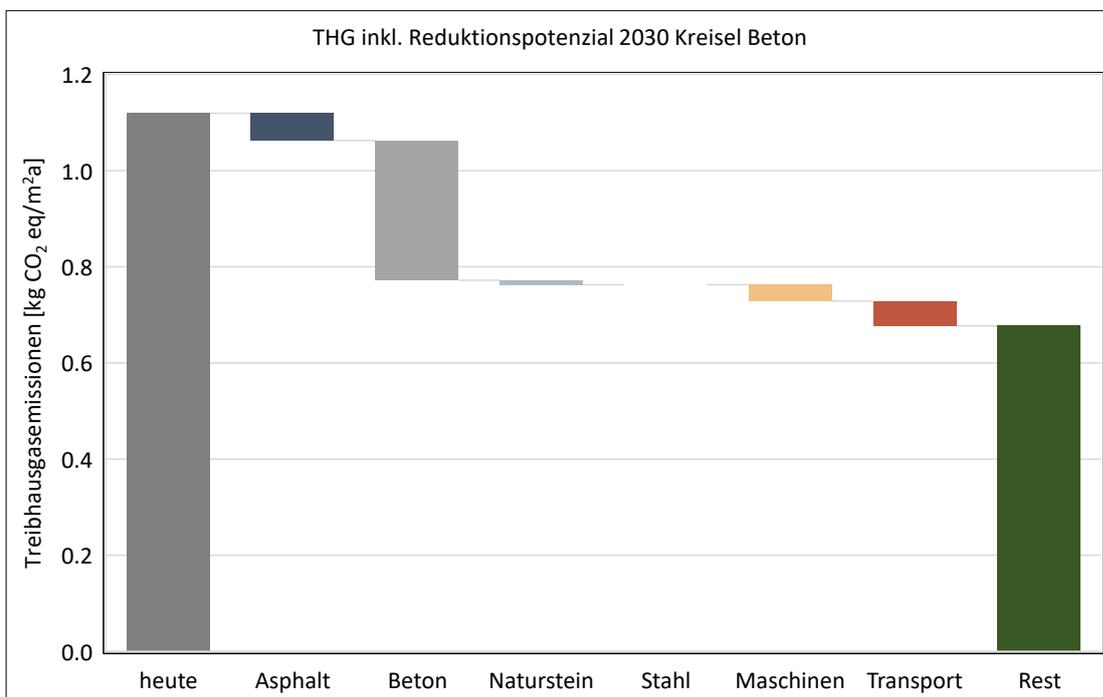


Abb. 0-50: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisel in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 40%.

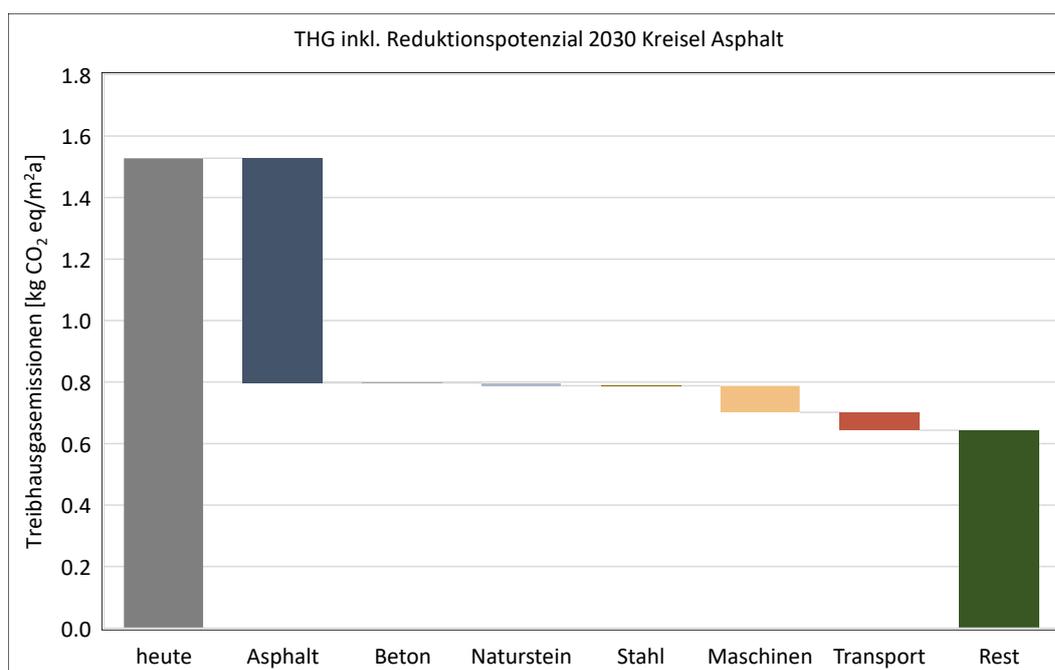


Abb. 0-51: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisell in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 58%.

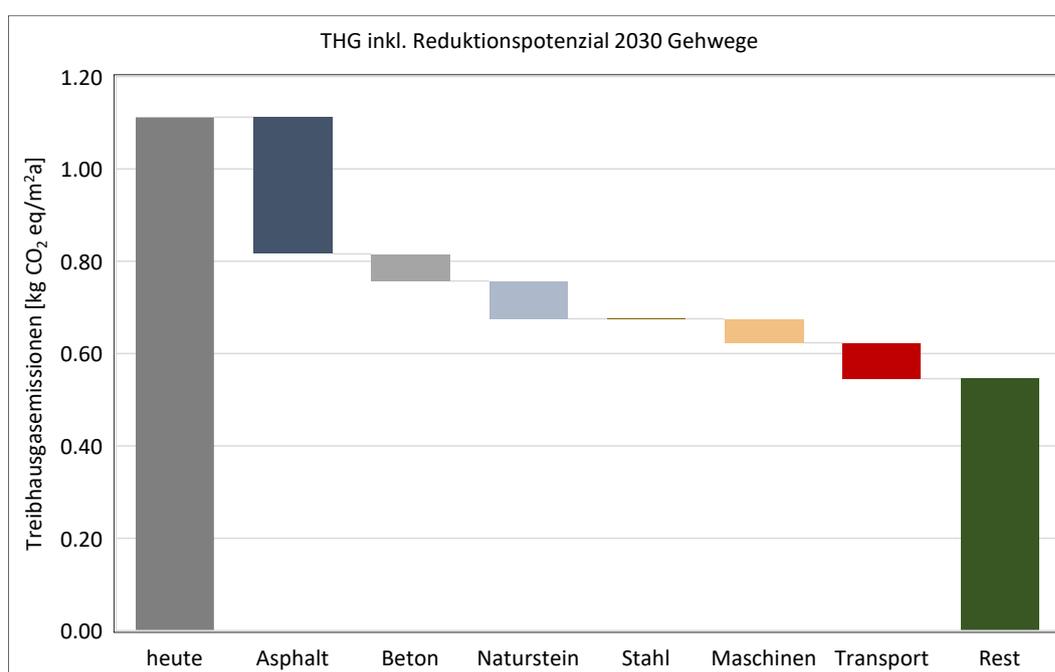


Abb. 0-52: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gehwege und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 51%.

Das Reduktionspotenzial durch die Natursteine der Gehwege wird hier überschätzt, da im Mittelwert, welcher für die Berechnung diente, bereits ein Grossteil der Projekte Schweizer Natursteine beinhaltet. Somit wäre das tatsächliche Reduktionspotenzial geringer als die angenommenen 67%. Das selbe gilt für die Gemeindestrassen und die Kantonsstrassen.

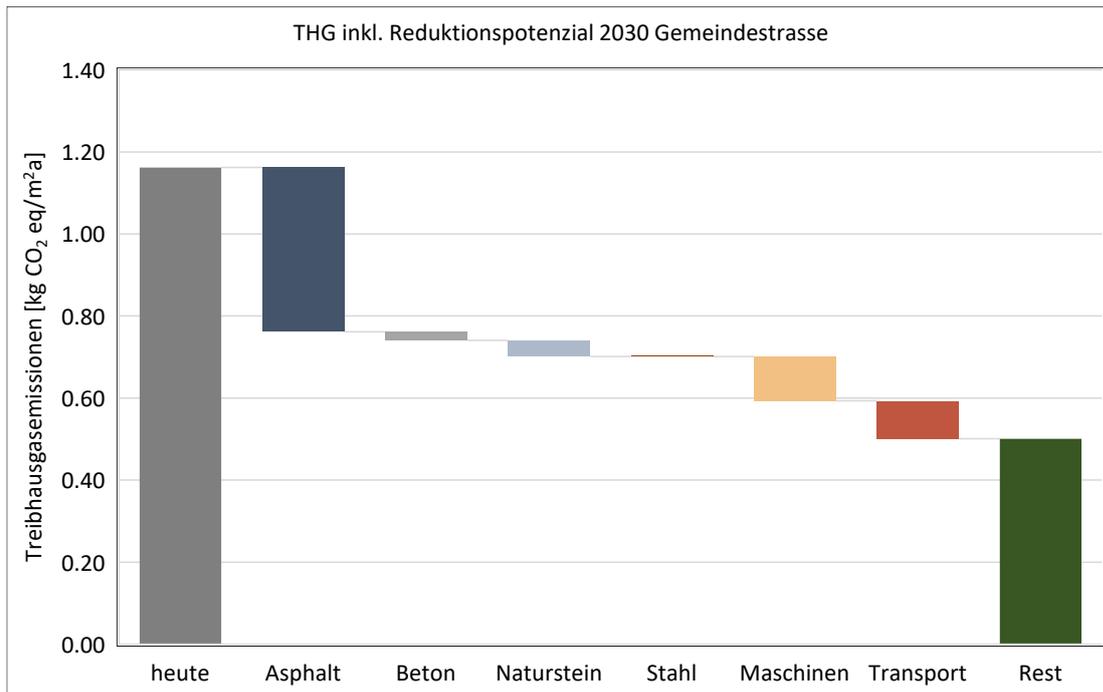
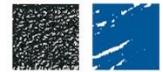


Abb. 0-53: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gemeindestrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 57%.

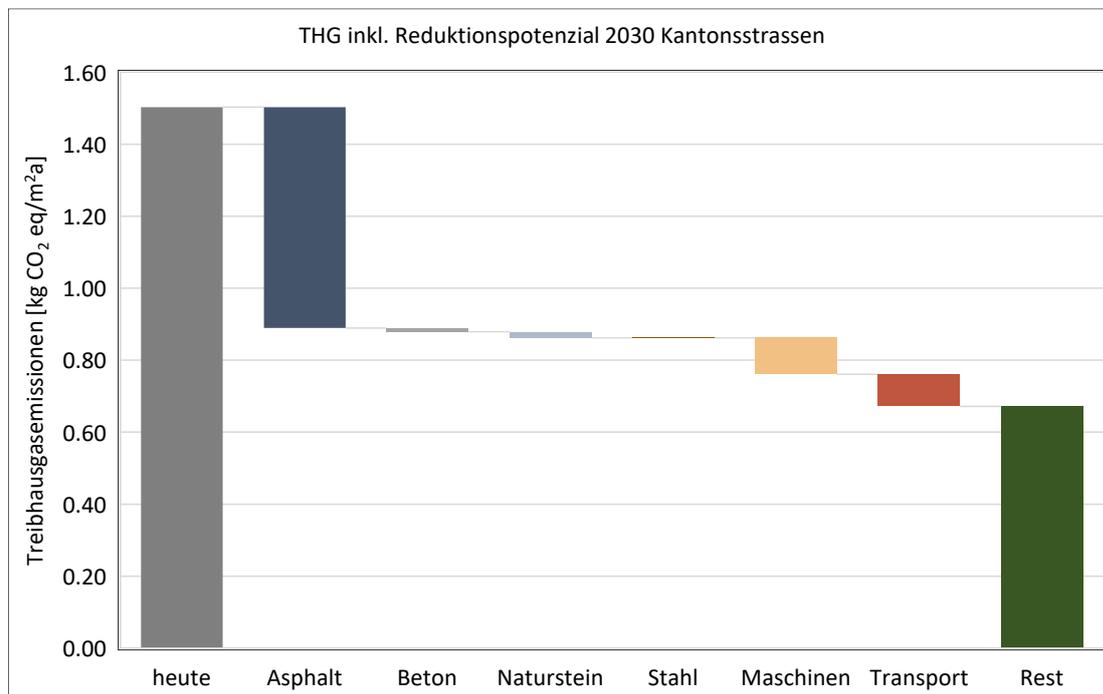


Abb. 0-54: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kantonsstrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 55%.

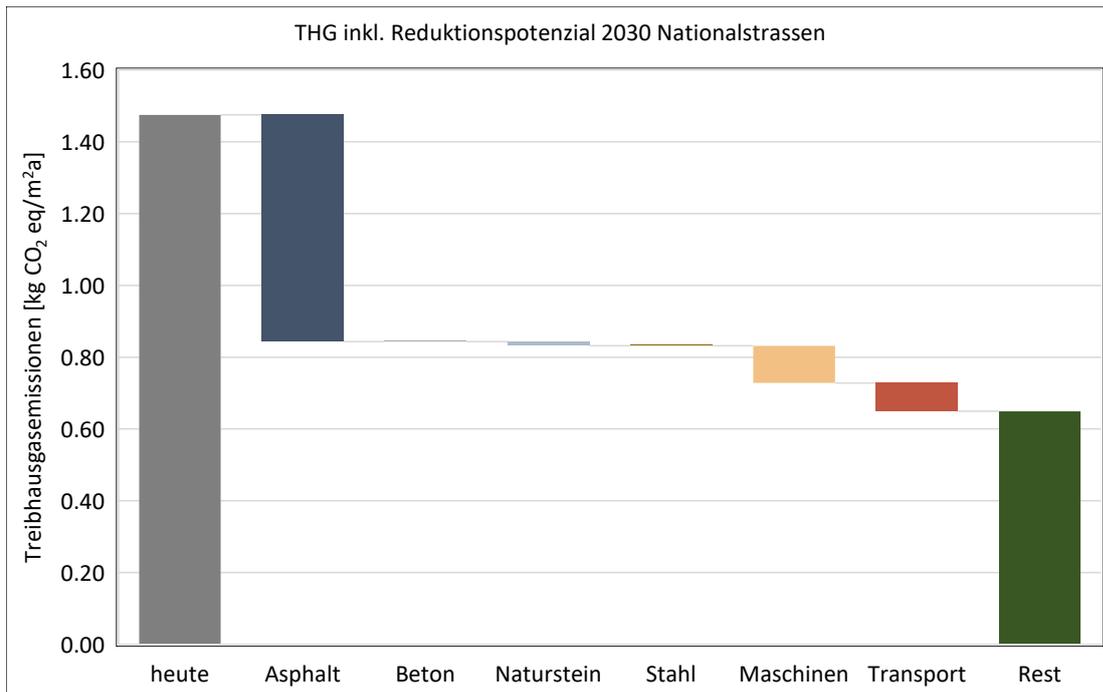
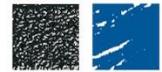


Abb. 0-55: Mittlere Treibhausgasemissionen der Nationalstrassen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 56%.

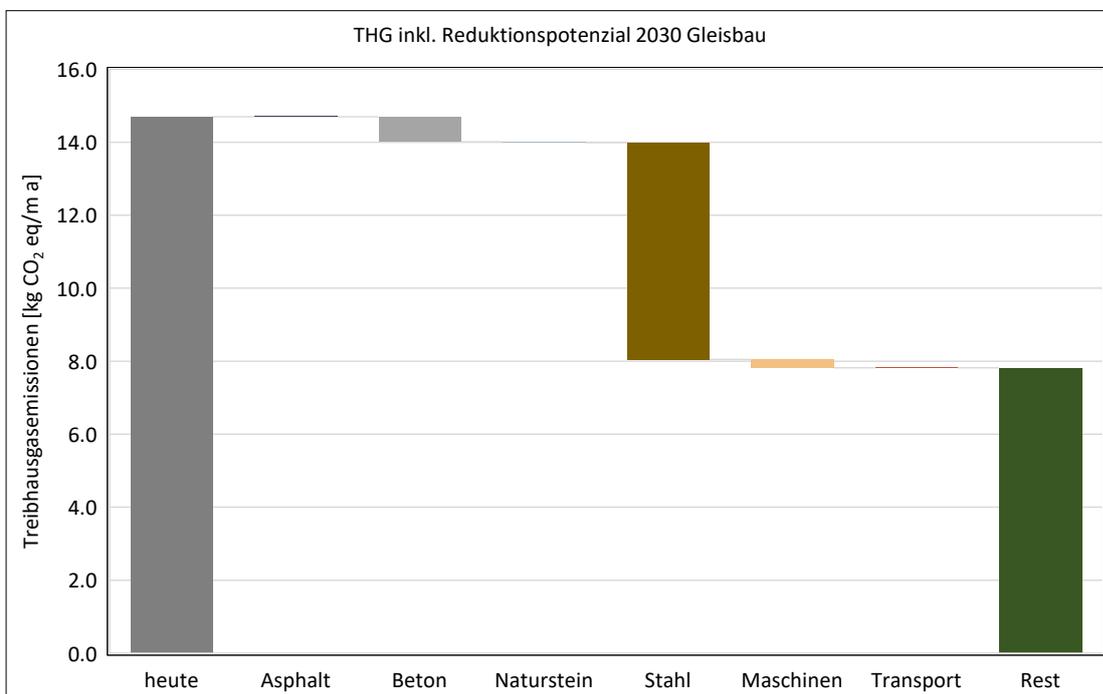


Abb. 0-56: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gleise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Beton, und Stahl, sowie der Baumaschinen und Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 47%.

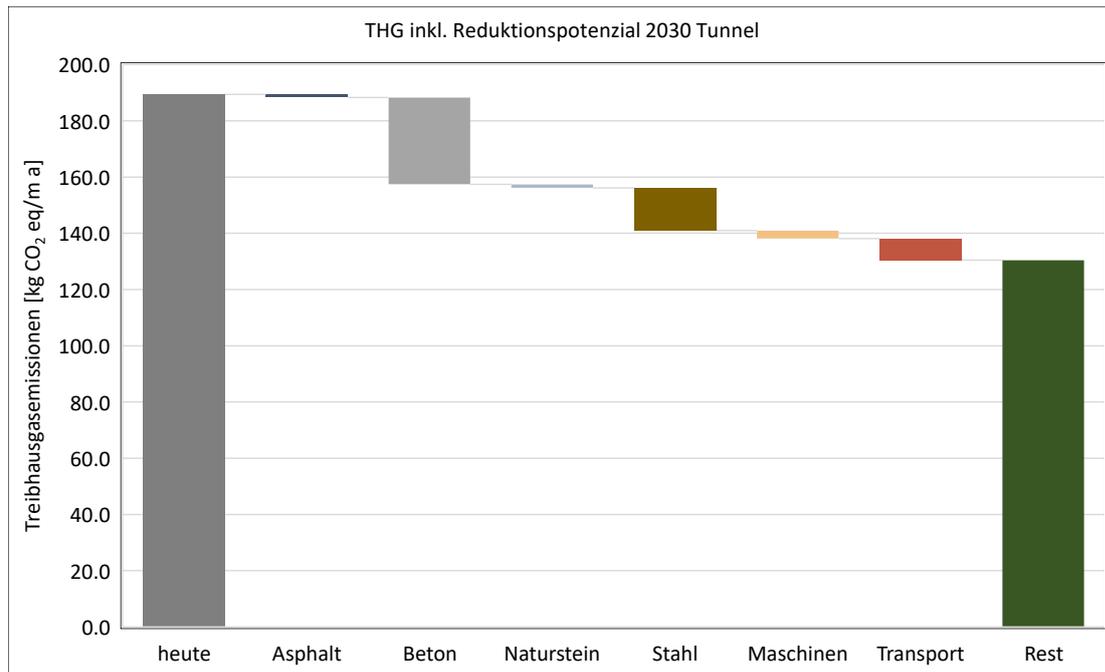
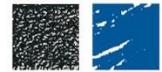


Abb. 0-57: Mittlere Treibhausgasemissionen der Tunnel und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 31%.

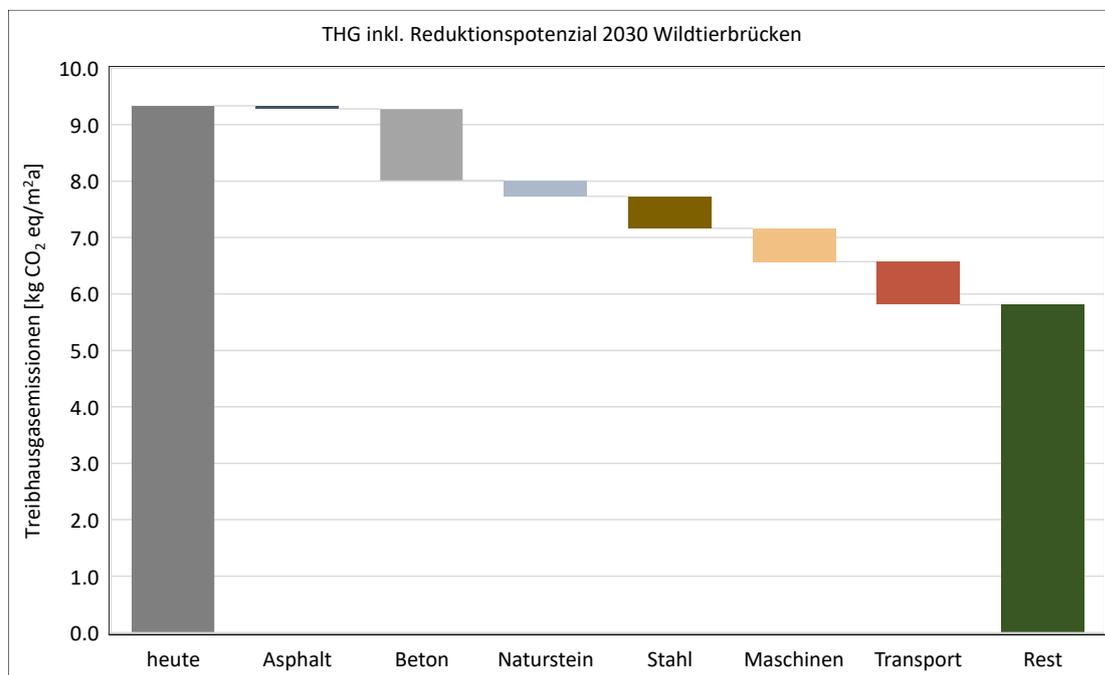
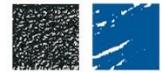


Abb. 0-58: Mittlere Treibhausgasemissionen der Wildtierbrücken und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 38%.

Das Potenzial durch den Einsatz von Holz bei Wildtierbrücken ist gering, da kein bis nur wenig ökologischer Vorteil gegenüber der Betonvariante vorliegt [60] [61]. Obwohl sich die Herstellungsemissionen der zwei Varianten nicht gross unterscheiden, weisen Holzkonstruktionen in der Nutzungsphase eine höhere CO₂-



Speicherung auf als Betonkonstruktionen, wodurch sich die Freisetzung des CO₂ zeitlich verlagert beziehungsweise zukünftig sequestriert werden könnte. Dies ist jedoch in der Ökobilanz nicht ersichtlich.

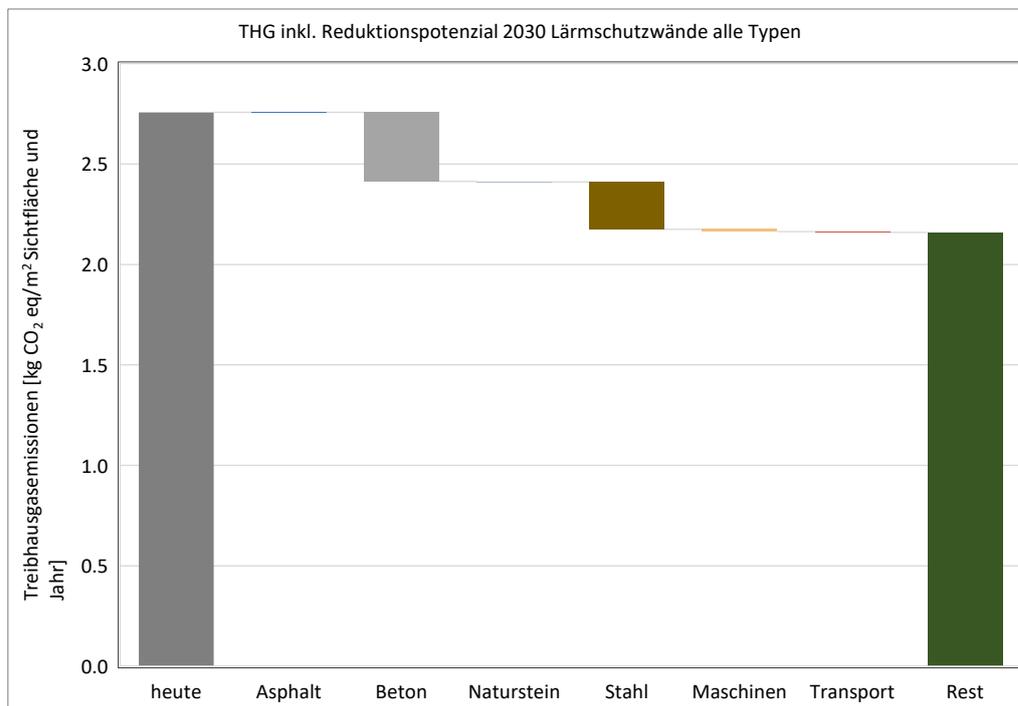


Abb. 0-59: Mittlere Treibhausgasemissionen der Lärmschutzwände (alle Typen zusammengefasst) und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 22%.

Der Einsatz von Holz bei Lärmschutzwänden kann die Reduktion der Treibhausgasemissionen noch erhöhen [62].

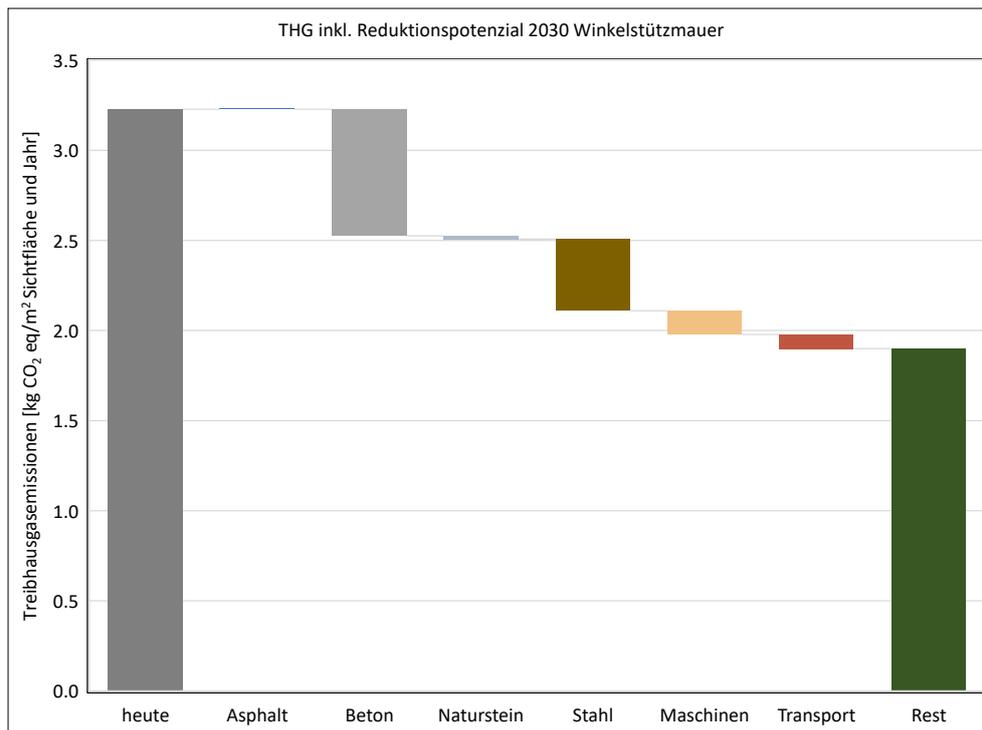
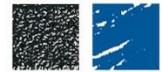


Abb. 0-60: Mittlere Treibhausgasemissionen der Winkelstützmauer und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 41%.

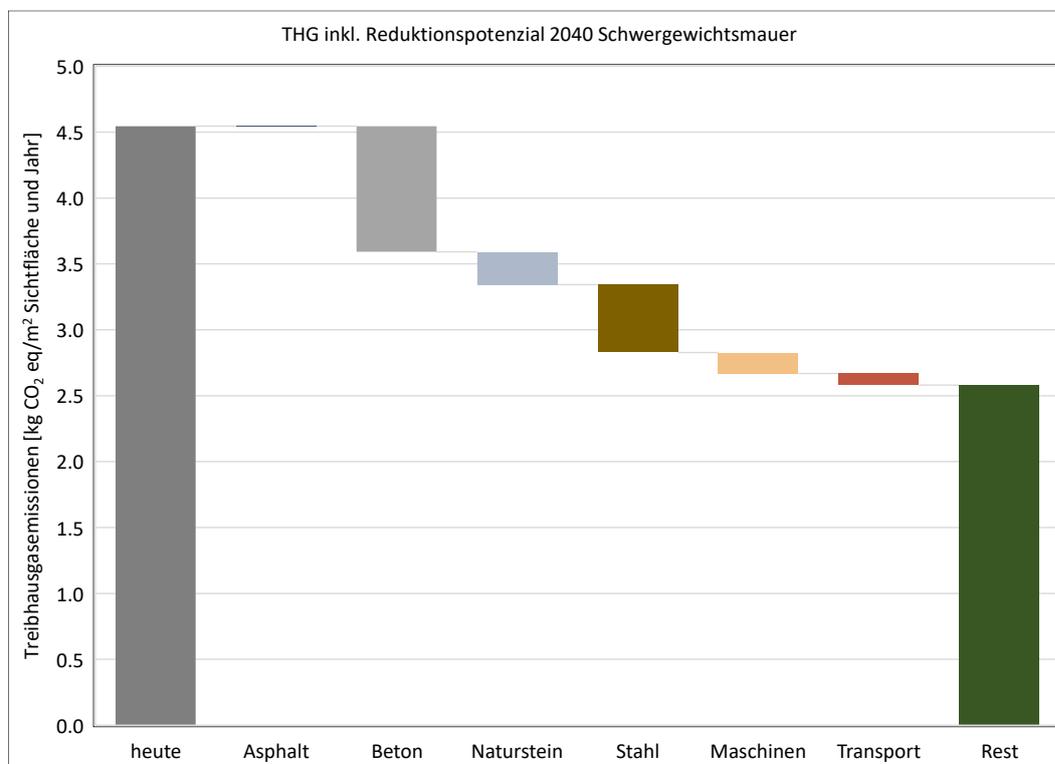


Abb. 0-61: Mittlere Treibhausgasemissionen der Schwergewichtsmauer und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2030 beträgt 43%.



D2. Reduktionspotenziale bis 2040

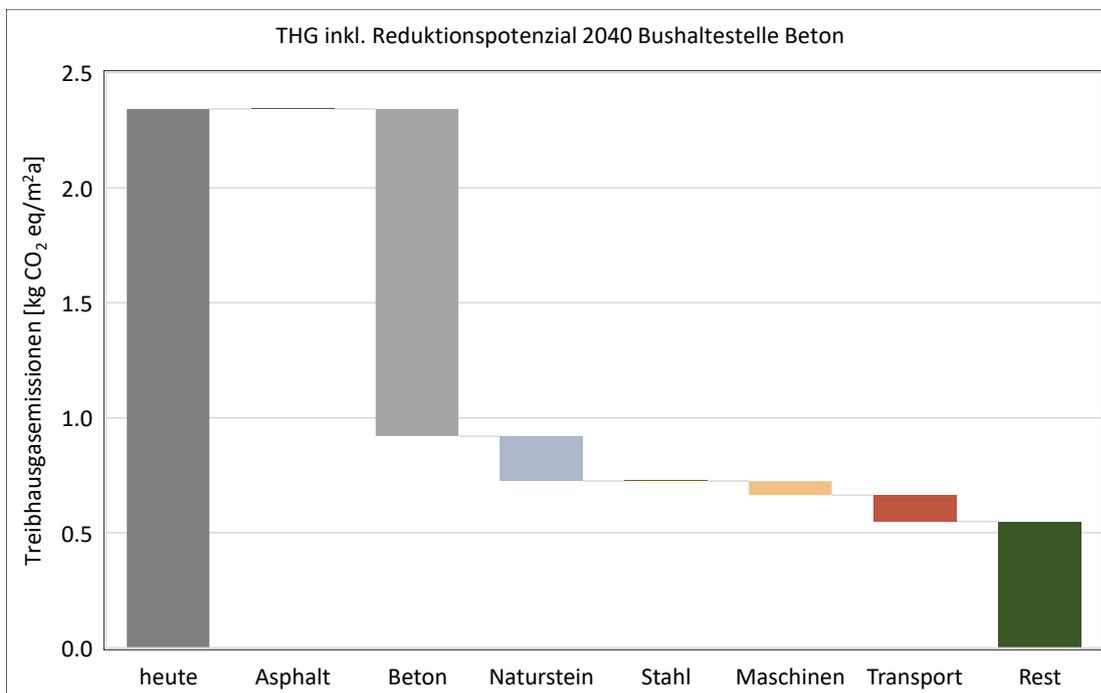


Abb. 0-62: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 77%.

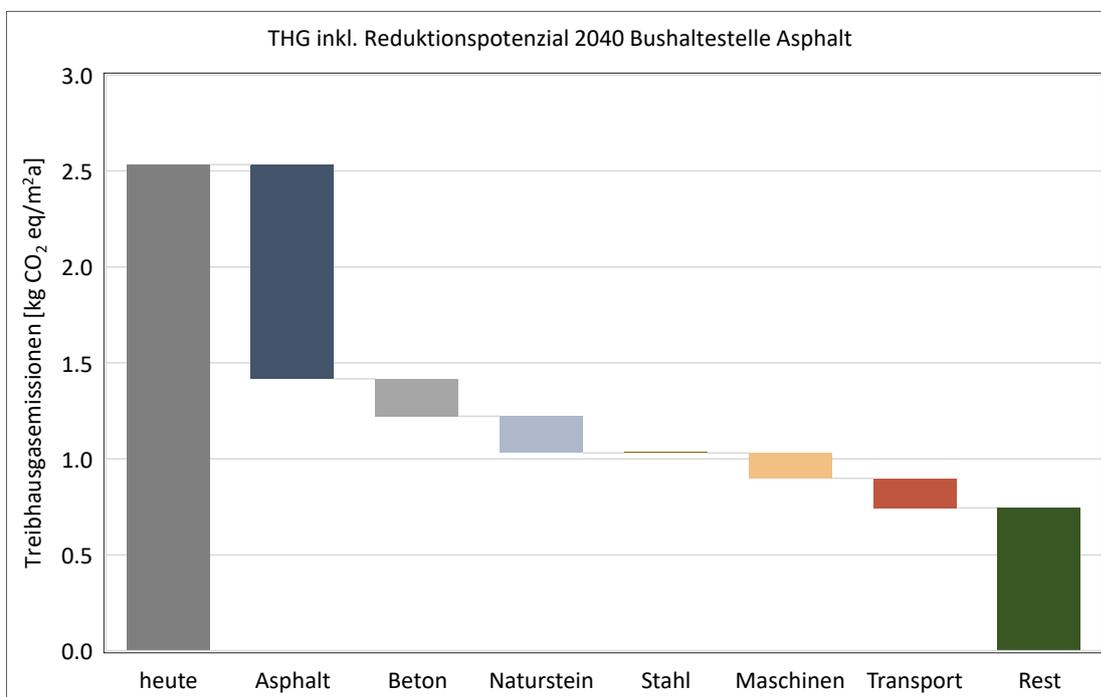


Abb. 0-63: Mittlere Treibhausgasemissionen der Bushaltestellen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 71%.

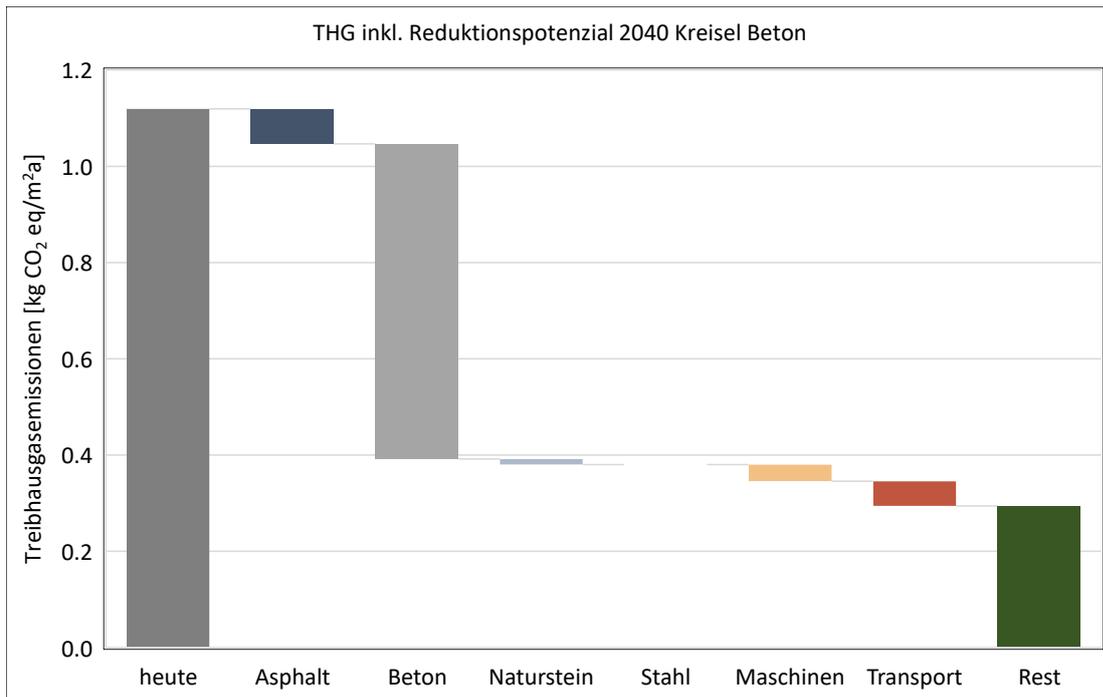
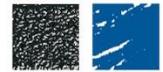


Abb. 0-64: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisel in Betonbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 74%.

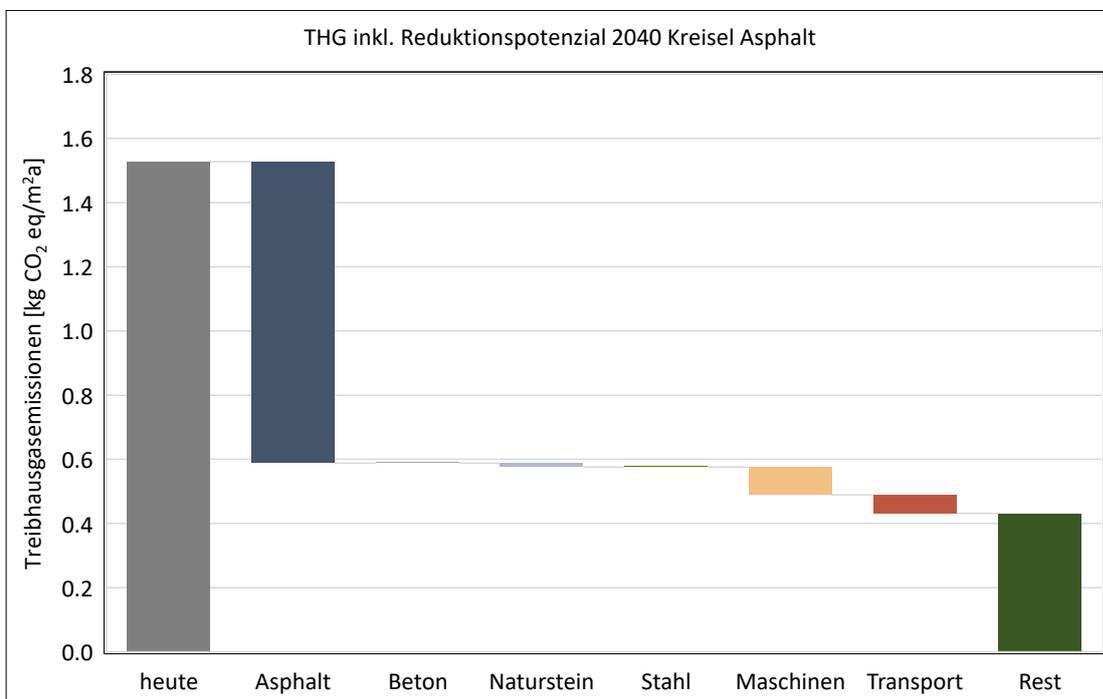


Abb. 0-65 Mittlere Treibhausgasemissionen der Kreisel in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 72%.

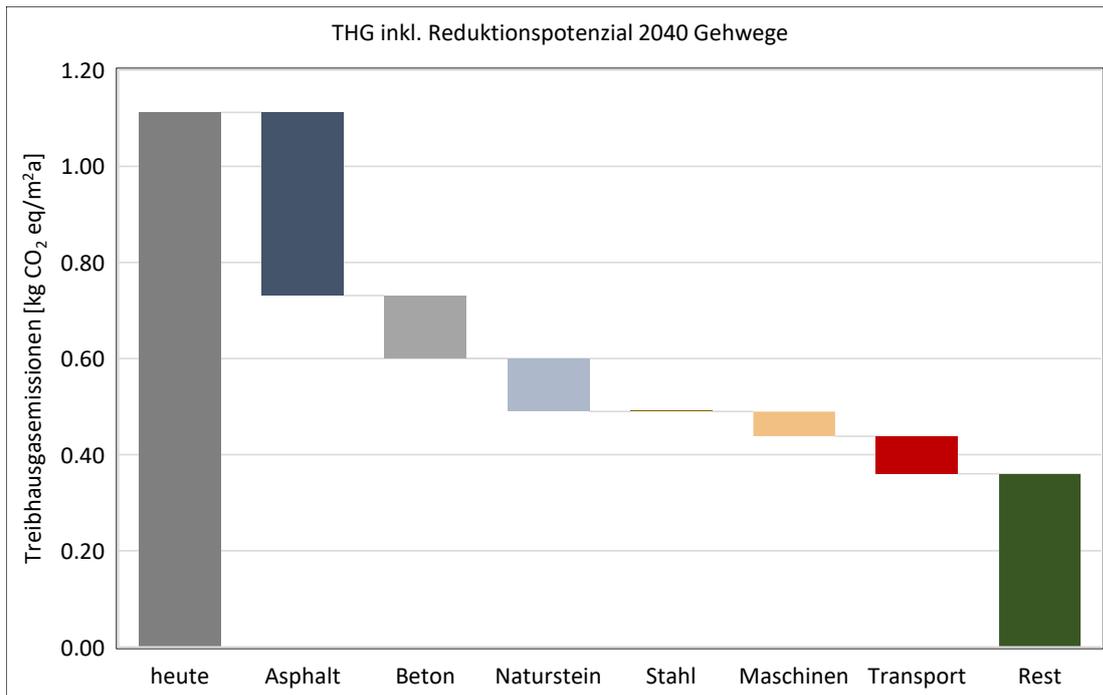
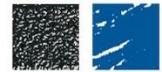


Abb. 0-66 Mittlere Treibhausgasemissionen der Gehwege und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 68%.

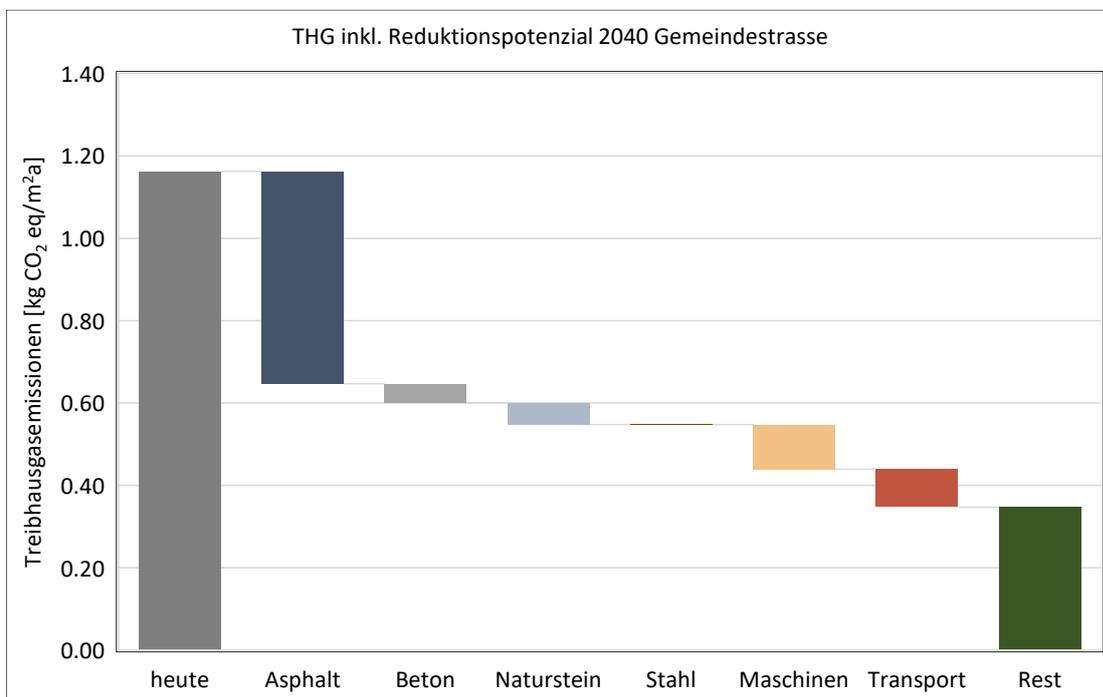


Abb. 0-67: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gemeindestrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 70%.

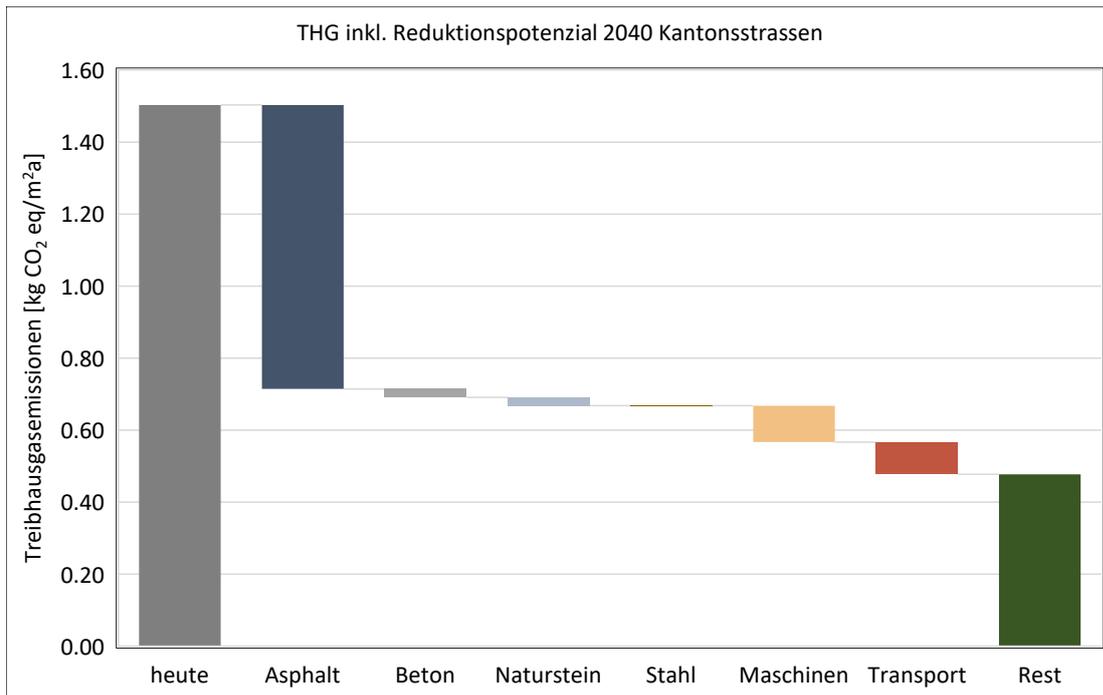
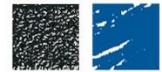


Abb. 0-68: Mittlere Treibhausgasemissionen der Kantonstrassen und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 68%.

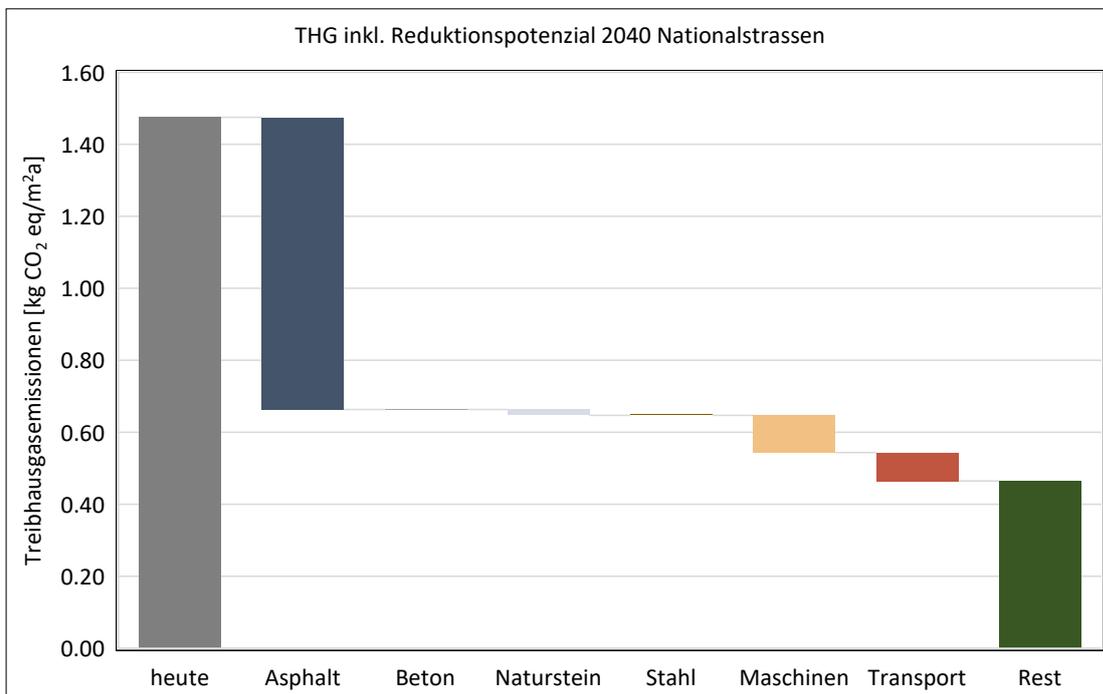


Abb. 0-69: Mittlere Treibhausgasemissionen der Nationalstrassen in Asphaltbauweise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte über den gesamten Lebenszyklus. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 69%.

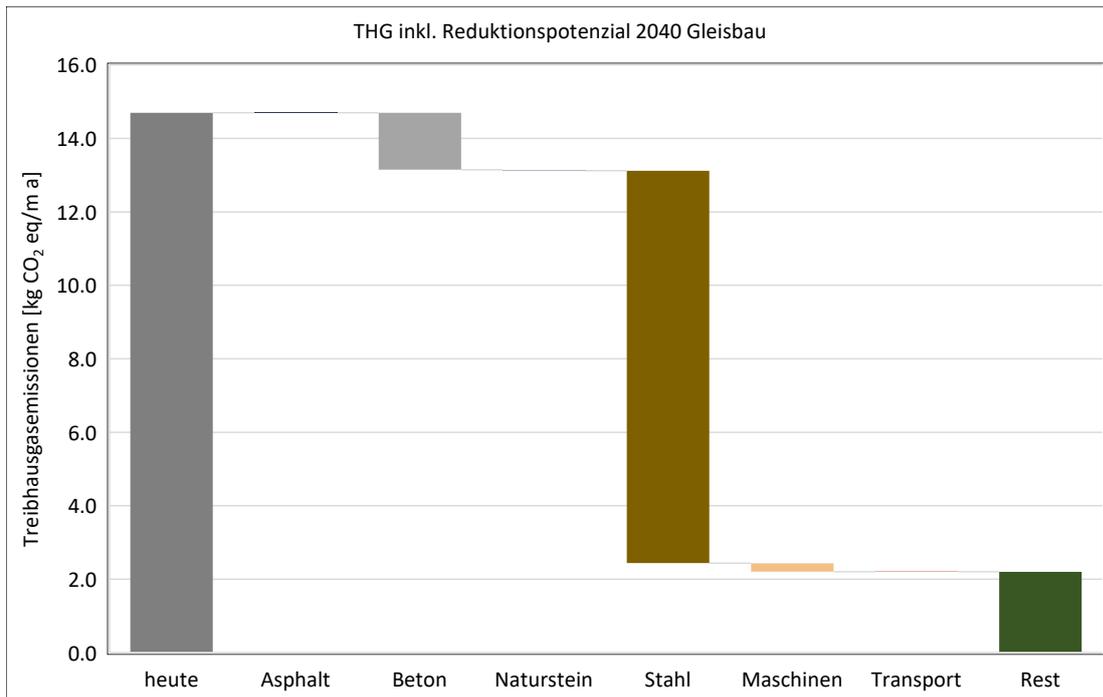
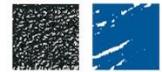


Abb. 0-70: Mittlere Treibhausgasemissionen der Gleise und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Beton und Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 85%.

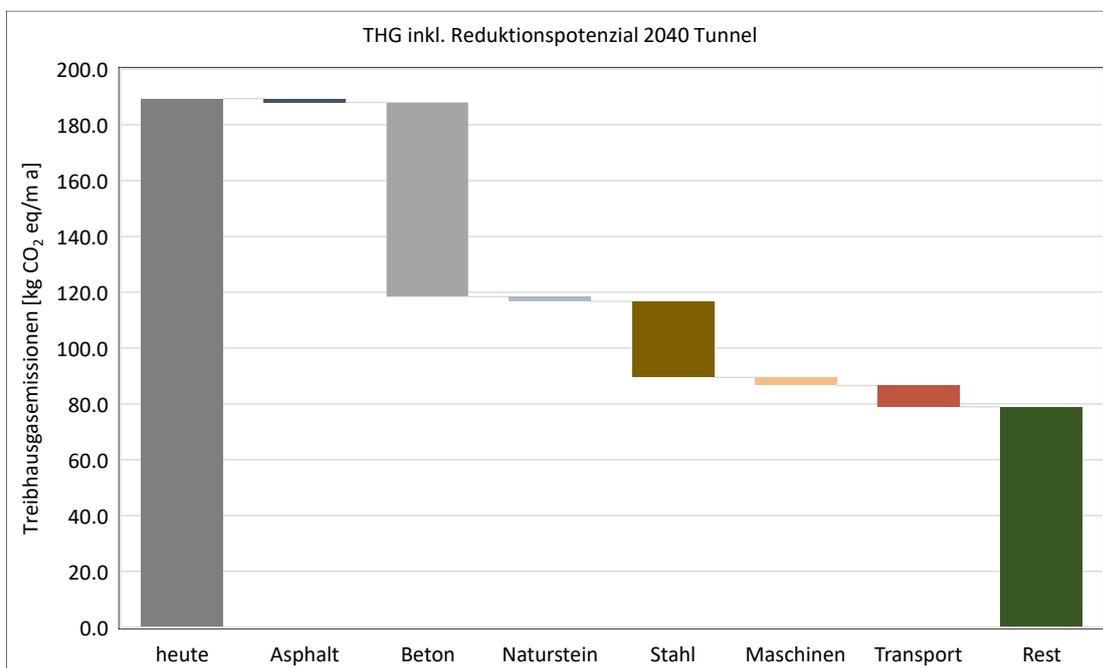


Abb. 0-71: Mittlere Treibhausgasemissionen der Tunnel und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 58%.

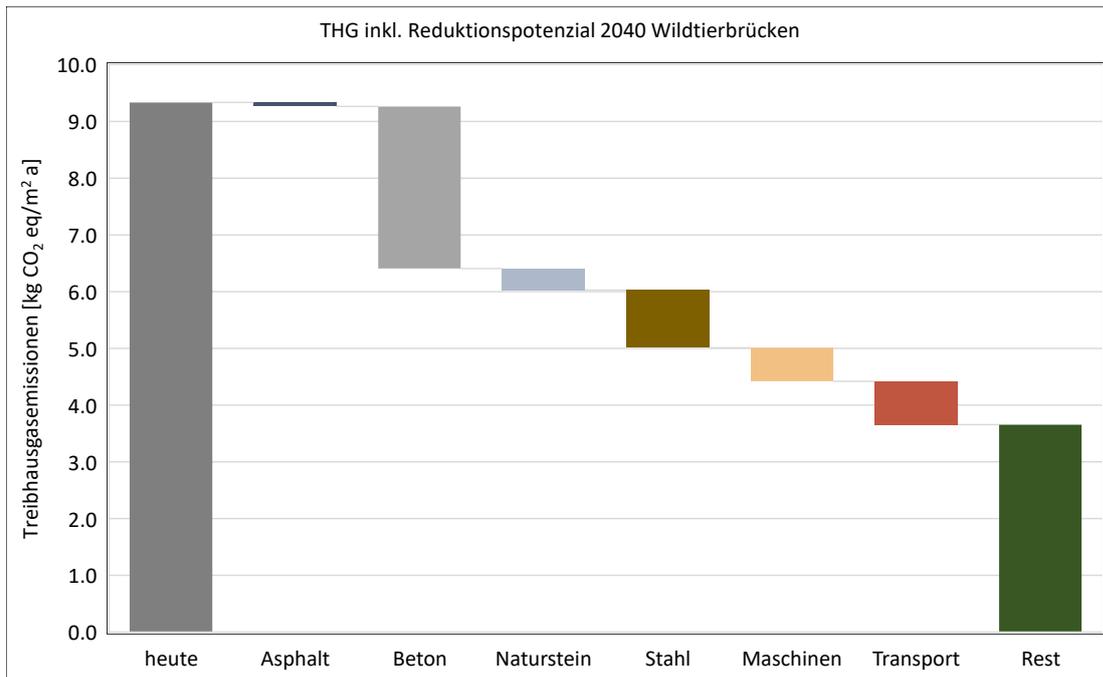
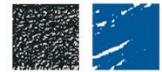


Abb. 0-72: Mittlere Treibhausgasemissionen der Wildtierbrücken und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 61%.

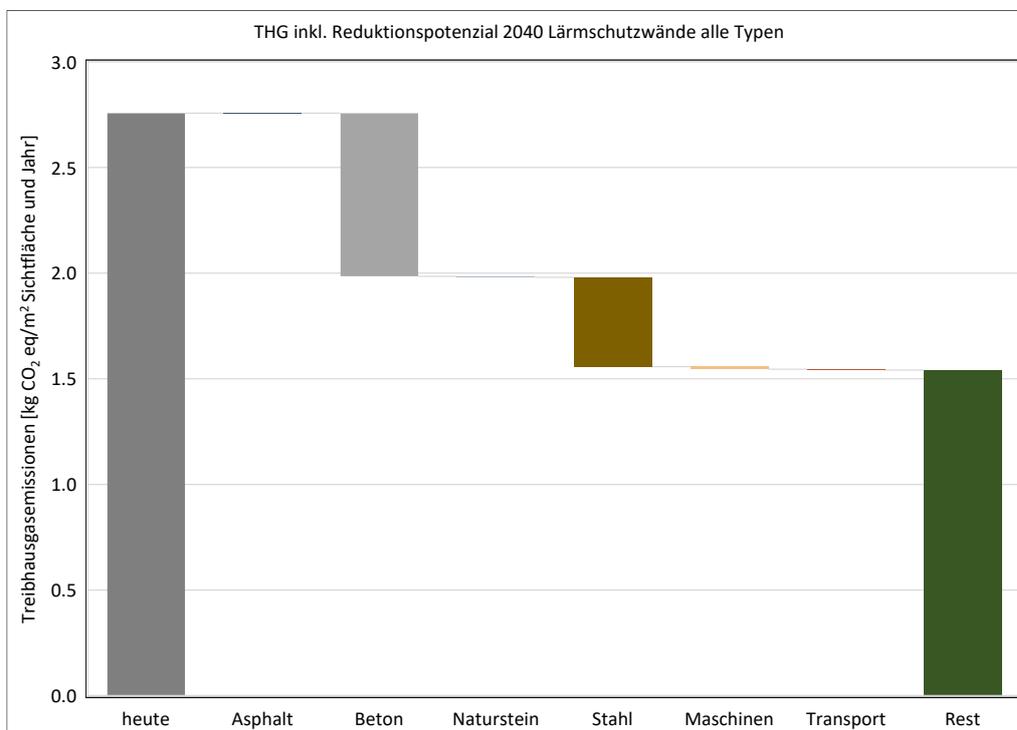


Abb. 0-73: Mittlere Treibhausgasemissionen der Lärmschutzwände (alle Typen vom TBA zusammengefasst) und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 44%.

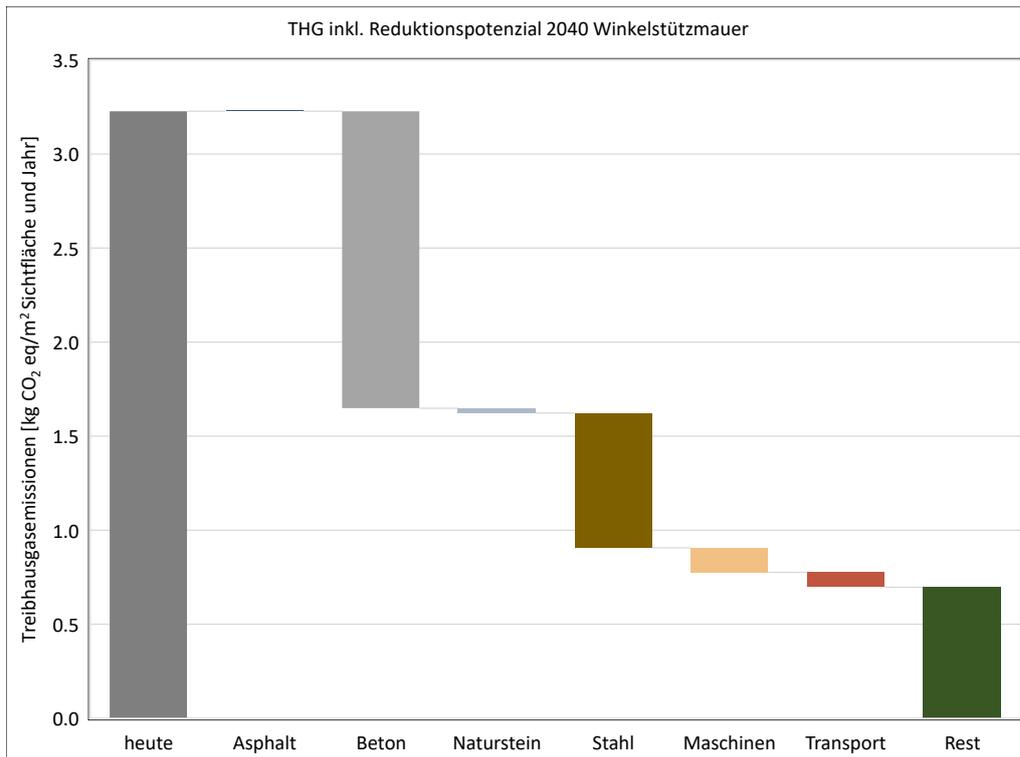
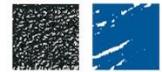


Abb. 0-74: Mittlere Treibhausgasemissionen der Winkelstützmauer und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 78%.

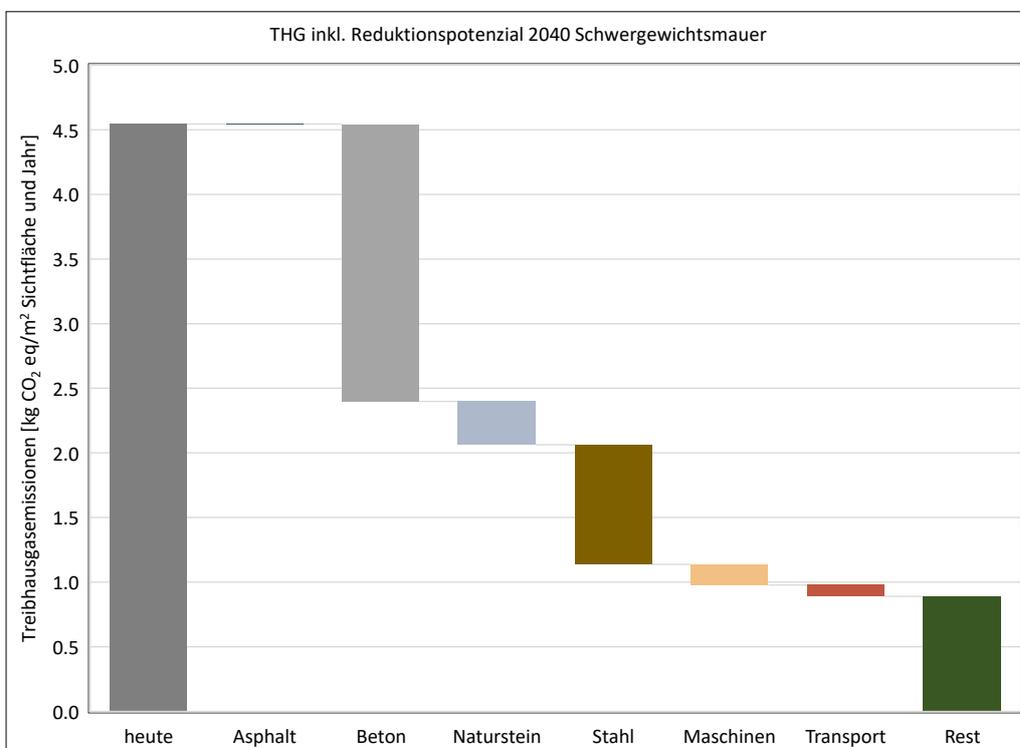
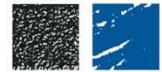


Abb. 0-75: Mittlere Treibhausgasemissionen der Schwergewichtsmauern und die Reduktion der Treibhausgasemissionen mittels Optimierung der Herstellung der Materialien Asphalt, Beton, Naturstein, Stahl, sowie der Baumaschinen und der Transporte. Das gesamte Reduktionspotenzial bis im Jahr 2040 beträgt 80%.



Anhang E. Dekarbonisierung durch den Einsatz von Holz

Die Motion 21.3293, SR Jakob Stark, aus dem Jahr 2021, beauftragte den Bundesrat: «*in Zusammenarbeit mit den Hochschulen und den einschlägigen Normenkommissionen die Möglichkeiten zur Dekarbonisierung des Infrastrukturbaus zu erforschen. Insbesondere [sei] zu prüfen bzw. anzustreben, Stahlbeton durch CO₂-speichernde Materialien zu ergänzen bzw. zu ersetzen. Dabei soll die Erforschung und Innovation des Werkstoffs Holz für den breiten Einsatz im Infrastrukturbau im Vordergrund stehen. Es ist eine entsprechende Forschungs- und Umsetzungs-Strategie auszuarbeiten.*» [63]

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragte als Folge dieser Motion die Berner Fachhochschule (BFH) drei technische Berichte zur Dekarbonisierung von Infrastrukturbauten auszuarbeiten. Der technische Bericht 'Dekarbonisierung Infrastrukturbauten' [62] schliesst das dritte Teilprojekt ab, in welchem Dekarbonisierungspotenziale ausgewählter Infrastrukturbauten abgeschätzt und sowie Massnahmen zur Sicherstellung der stofflichen Wiederverwendung am Ende des Lebenszyklus vorgestellt werden.

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus dem Bericht von Chabrelie & Thömen (2024) [62] zusammengefasst.

E1. Ziel und Methodik

Das Ziel ist es, Dekarbonisierungspotenziale von Infrastrukturbauten zu untersuchen, indem angenommen wird, dass sie aus Holz anstelle von Beton gebaut werden. Um die Potentiale abzuschätzen, wurde eine vereinfachte Ökobilanzierung für Infrastrukturbauten in zwei unterschiedlichen Bauweisen durchgeführt. Die Bestimmung und der Vergleich der Treibhausgasemissionen und Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) lag dabei im Fokus. Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) stellte repräsentative Objekte im Infrastrukturbau für die Untersuchung zur Verfügung.

Die BFH betrachtete in ihrem Bericht die folgenden Objekte: Wildtierüberführungen, Lärmschutzwände, Brücken quer zur Achse, Tunnelzischendecken, Lärmschutzgalerien und Tagbautunnel. Die Objekte Brücken quer zur Achse, Tunnelzischendecken, Lärmschutzgalerien und Tagbautunnel liegen nur als Konzepte in der Holzausführung vor. Die restlichen zwei Objekte wurden bereits in Holz realisiert. Die Motion 21.3293 fordert eine Forschungs- und Umsetzungsstrategie, die auch Infrastrukturbauten aus Holz in Betracht zieht, selbst wenn diese nach aktuellen Normen und Vorschriften noch nicht realisierbar sind. Die Berichte enthalten absichtlich auch Konzepte, deren Umsetzbarkeit noch nicht bewiesen ist, um Wissenslücken, Forschungsbedarf und mögliche Potenziale aufzuzeigen.

E2. Ökobilanzierung

Die Lebenszyklusphasen A1 bis A4 und C1 bis C4 wurden in dieser Studie in Ökobilanzierungen abgedeckt. Diese wurde mit einer separaten Berechnung der CO₂-Emissionsrückgewinnung ergänzt («Cradle-to-Gate mit Optionen»). In die Berechnung geht auch der Austausch von Bauteilen ein, welche eine kürzere Lebensdauer als das gesamte Bauobjekt aufweisen. Die daraus resultierenden Emissionen und Primärenergiewerte wurden den Modulen A1 bis A4 und C1 bis C4, basierend aus ihrer Austauschhäufigkeit, zugeschlagen. Die angenommenen Lebensdauern der Objekte basieren auf dem Fachhandbuch Kunstbauten (2023) des ASTRA.

Als Datenbank für die Treibhausgasemissionen wurden die KBOB/ecobau-Datenbank 2009/1:2022 Version 3 verwendet. Für Daten, welche nicht vorhanden waren, wurde auf die Datenbank Ecoinvent 3.7.1 zurückgegriffen (betrifft Holzimprägnierung und Brandschutzband).



Für die vereinfachte Ökobilanzierung wurde die Methodik 0/0³ angewendet, bei der biogenes CO₂ nicht berücksichtigt wird. Dieses Vorgehen orientiert sich an den Regeln der KBOB, Ecobau und IPB für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz und von R. Frischknecht (2022) angewendet.

E3. Resultate

Die Studie zeigt, in welchem Ausmass der Einsatz von Holz anstelle von Beton bei Infrastrukturbauten zur Reduktion von CO₂-Emissionen beitragen kann. Die betrachteten Objekte wurden exemplarisch ausgewählt, sind jedoch nicht repräsentativ für alle in der Schweiz verfügbaren oder geplanten Infrastrukturbauten. Die Analyse basiert auf sechs Objektpaaren und die Ergebnisse wurden durch wesentliche Aussagen aus drei Vergleichsstudien untermauert, was die Aussagekraft der Ergebnisse stützt. Die Ergebnisse werden nachfolgend zusammengefasst:

Die Treibhausgasemissionen können durch Holzbauweise um 2 bis 70% verringert werden, je nach Objekt. Von den untersuchten Objekten zeigt die Lärmschutzwand die deutlichste Absenkung auf 30% (70% Reduktion). Die Wildtierüberführung dagegen lässt sich nur auf 98% (2% Reduktion) reduzieren und weist somit die geringste Absenkung auf.

Für die Berechnung der CO₂-Reduktionen wurden die Standardwerte der KBOB/ecobau-Datenbank Ökobilanzdaten im Baubereich verwendet. Diese setzt sich aus einer Kombination aus Schweizer und eingeführtem Holz zusammen. Bei Verwendung von 100% Schweizer Holz können die Emissionen zusätzlich um 1 bis 19 Prozentpunkte gesenkt werden. Bei 100% Importholz steigen die Treibhausgasemissionen an. Diese Annahme führt bei der Tunnelzwischenwand dazu, dass die Emissionen über der Betonvariante liegen.

In den meisten Fällen ist der Verbrauch an nicht-erneuerbarer Primärenergie (PENRE) bei Holz niedriger als bei Beton, ausser bei Tunnelzwischenwänden, da liegt der Wert über derjenigen der Betonvariante. Der Gesamtenergieverbrauch erhöht sich, wenn die Primärenergie erneuerbar (PERE) einbezogen wird. Bei Objekten, die vergleichsweise viel Holz verbaut haben, liegen die Werte über jenen der Betonvarianten (aufgrund des im Holz gespeicherten erneuerbaren Energiegehalts).

Holzbauweisen können trotz der kürzeren Lebensdauer und häufigerer Ersatzmassnahmen gleiche Emissionswerte wie Beton aufweisen. Am deutlichsten zeigte sich dies bei den Lärmschutzwänden.

Holz aus abgerissenen Infrastrukturbauten kann am Lebenszyklusende als Rohstoff wiederverwendet werden (Stichwort Kaskadennutzung). Dies jedoch nur, wenn das Holz frei von chemischem Holzschutz, Metallen und anderen Fremdstoffen ist. Festigkeitseinbussen müssen überprüft werden.

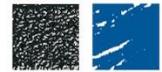
Insgesamt zeigt die Studie, dass die Holzbauweise signifikante Vorteile bei der Reduktion von CO₂-Emissionen und nicht-erneuerbarem Energieverbrauch bieten kann - jedoch mit einigen Einschränkungen und Variationen je nach spezifischer Anwendung.

E4. Speicherleistung Holz: Temporäre Speicherung biogenes CO₂

In ihrem Bericht geben Chabrelie & Thömen (2024) an, dass es in der wissenschaftlichen Literatur sowie in politischen und normativen Diskussionen bisher keinen Konsens darüber gibt, wie die Speicherung biogenen Kohlenstoffs in Bauwerken in Bezug auf ihre Klimaauswirkungen zu bewerten ist. Deshalb werden hier die wichtigsten Punkte aus dem Bericht zusammengefasst. Die Frage, wie mit der Anrechenbarkeit der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten umzugehen ist, ist jedoch nicht abschliessend geklärt. Dieses Thema ist auch bei Ökobilanzexperten umstritten und viel diskutiert.

E4.1 Temporäre Speicherung von Kohlenstoff

³ Gemäss der Methodik 0/0 wird sowohl die Aufnahme von biogenem CO₂ aus der Atmosphäre während des Baumwachstums (Modul A1) als auch die Freisetzung von biogenem CO₂ durch die Verbrennung/Zersetzung nach dem Lebensende (Modul C4) nicht berücksichtigt



Die temporäre Speicherung von Kohlenstoff, unabhängig davon, ob es sich um biogenen oder fossil-basierten Kohlenstoff handelt, hat hauptsächlich einen Verzögerungseffekt auf die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Unter der Annahme einer konstanten oder steigenden CO₂-Konzentration und globalen Durchschnittstemperaturen verzögert die temporäre Speicherung den Anstieg der CO₂-Emissionen. Nach der Freisetzung des temporär gespeicherten Kohlenstoffs stellt sich die CO₂-Konzentration ein, die auch ohne diese Speicherung erreicht worden wäre, jedoch zeitlich versetzt.

E4.2 Permanente Speicherung von Kohlenstoff

Die Wirkung der temporären Kohlenstoffspeicherung ändert sich, wenn Technologien für permanente Negative Emissions-Technologien (NET), wie zum Beispiel Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BECCS), weiterentwickelt und gleichzeitig die globalen CO₂-Emissionen deutlich reduziert werden. In einem Szenario, in dem diese Entwicklungen zu einer Umkehrung der Temperaturentwicklung führen, kann die temporäre Kohlenstoffspeicherung die maximale Erwärmung reduzieren. Dies hätte positive Effekte für den Erhalt der Artenvielfalt und die Vermeidung von Extremwittersituationen. Wenn der temporär gespeicherte Kohlenstoff nach dem Zeitpunkt der maximalen Erwärmung freigesetzt wird, können die positiven Effekte wie abgemilderte Maximalerwärmung auftreten.

E4.3 Permanenz

Bei der Diskussion über eine geeignete Definition der Permanenz eines Kohlenstoffspeichers sollte man berücksichtigen, dass es in erster Linie um einen Konsens zwischen verschiedenen Interessengruppen bezüglich des Betrachtungszeitraums geht und erst in zweiter Linie um die physikalische Dauerhaftigkeit. In der Schweiz existieren zahlreiche Definitionen von Permanenz, von denen hier zwei vorgestellt werden:

- In der Schweizer CO₂-Verordnung (nach den Änderungen von 2022) wird die Permanenz der Kohlenstoffbindung für Projekte und Programme dann angenommen, wenn die Kohlenstoffspeicherung für mindestens 30 Jahre sichergestellt ist. Dieser Zeitraum könnte als angemessene Mindestlebensdauer langlebiger Produkte oder als minimale Wirkdauer von Kohlenstoffspeicherprojekten betrachtet werden. Der Begriff "Permanenz" scheint allerdings unglücklich gewählt für Massnahmen, die über mehrere Generationen hinweg wirksam sein sollen.
- Ein physikalischer Ansatz zur Definition der Permanenz wird von Brunner (2022) vorgeschlagen. Demnach ist das Kriterium der Permanenz erfüllt, wenn die Halbwertszeit eines Kohlenstoffspeichers zwischen 3'000 und 8'000 Jahren liegt. Diese Abschätzung wurde bisher weder durch einen wissenschaftlichen Reviewprozess bestätigt, noch ist aus der Präsentation von Brunner (2022) ersichtlich, ob es sich um eine Einzelmeinung handelt. Brunner erwähnte in seinem Vortrag am 80. LCA-Forum im Jahr 2022, dass es zu diesem Thema bis anhin nur wenig Forschung gibt. [64]

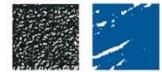
E4.4 Auswirkung auf betrachtete Objekte

Die im Bericht von Chabrelie & Thömen (2024) errechneten Zahlenwerte verdeutlichen, dass in Infrastrukturbauten signifikante Mengen an CO₂ gespeichert werden. Durch die Implementierung von Mechanismen zur Nutzung der positiven Effekte temporärer Kohlenstoffspeicher kann ein bedeutender Beitrag zur Erreichung der Klimaziele geleistet werden.

Die in Holz-Infrastrukturbauten gespeicherten Mengen an biogenem CO₂ sind beträchtlich und können die CO₂-Emissionen, die bei Herstellung, Transport und Entsorgung der Baumaterialien entstehen, sogar übersteigen. Aufgrund der langen, aber nicht permanenten Lebensdauer dieser Bauten kann die CO₂-Speicherung als langfristig, jedoch nicht als dauerhaft betrachtet werden.

E5. Einschätzung UTech

Auf Basis jüngst abgeschlossener Projekte, in denen Holz- und Betonvarianten (z. B. Wildtierbrücken und weitere Brücken) verglichen wurden, schätzen wir das Potenzial der Reduktion der Umweltwirkung respektive der Reduktion der Treibhausgasemissionen mit Holz im Infrastrukturbau als eher gering ein. Der Hauptgrund hierfür liegt in der eingeschränkten Eignung von Holz für stark dem Wetter ausgesetzte Bauteile und Baukomponenten. Beim Vergleich von Varianten (z.B. Holz vs. Beton) muss immer der gesamte



Lebenszyklus betrachtet werden. Der Einsatz von Holz in der Nutzungsphase kann aufgrund der damit verbundenen ökologischen Aufwendungen (z.B. Neubeschichtung, Ersatz, Instandhaltungsarbeiten) nachteilig für die Umweltbilanz sein. Für den Einsatz von Holz im Infrastrukturbau sind geeignete Holzarten und bauliche Massnahmen unabdinglich, damit allfälliges Wasser und Feuchtigkeit im Holz wieder austrocknen können.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde das mögliche Einsparpotenzial des Einsatzes von Holz im Infrastrukturbau hinsichtlich der Treibhausgasemissionen analysiert. Die Anwendung der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) sowie des kumulierten Energieaufwandes (KEA) führt zu dem Ergebnis, dass der potenzielle Nutzen des Einsatzes von Holz gegenüber anderen Materialien im Infrastrukturbau tendenziell geringer ausfällt. Im Rahmen der UBP-Methode wäre die Entsorgung des Holzes über einen Verbrennungsprozess (KVA oder Zementwerk) als nachteilig zu beurteilen, da auch toxische Schadstoffe wie Feinstaub und Schwermetalle die Ökobilanz beeinflussen. Bei der Betrachtung des kumulierten Energieaufwandes erweist sich der Aufwand für die Holzrocknung, Holzbearbeitung (Biegen, Verkleben, Zuschneiden, Beschichten etc.) sowie auch der erneuerbare stofflich genutzte Energiegehalt in der Ökobilanz als nachteilig.



Anhang F. Abfälle im Infrastrukturbau

Die nachfolgende Abbildung zeigt den kumulativen Beitrag der Treibhausgasemissionen der Abfälle, die aus dem Bau, Betrieb und Unterhalt kantonaler und städtischer Infrastruktur anfallen. 4 Abfälle ergeben zusammen fast 90% der Treibhausgasemissionen der gesamten Abfälle. Daten stammen von der UTech aus den Projekten zum Reduktionspotenzial der kantonalen Tiefbauämter Zürich und Graubünden.

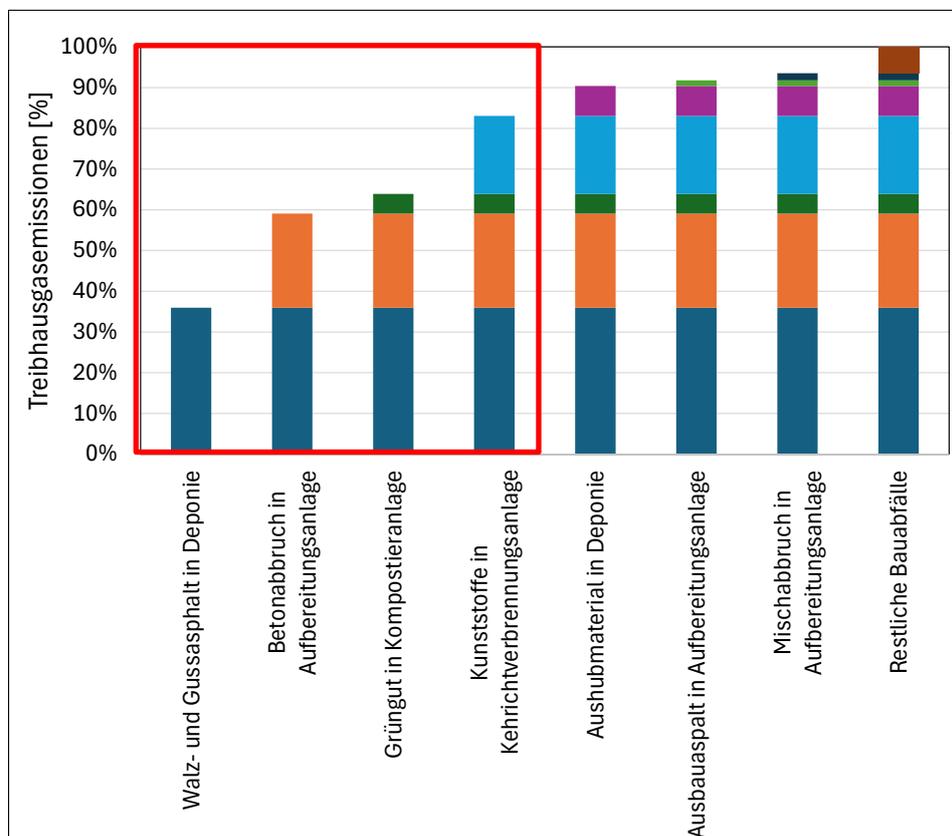
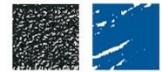


Abb. F-1: Kumulativer Beitrag der Treibhausgasemissionen der Abfälle, die aus dem Bau, Betrieb und Unterhalt kantonaler und städtischer Infrastruktur anfallen. 4 Abfälle ergeben zusammen fast 90% der Treibhausgasemissionen der gesamten Abfälle. Daten stammen von der UTech.



Anhang G. Diskussion Workshop

Im Rahmen dieser Studie wurde ein Workshop mit 22 Personen durchgeführt. Vertreter von verschiedenen Tiefbauämtern (BS, ZH, FR, BE, GR SO), dem BAFU, ASTRA, Armasuisse, KBOB, Carbotech, Implenia, F. Preisig, der Ostschweizer Fachhochschule, OPAN Concept / SNBS und Ecobau nahmen am Workshop teil. Diese Studie wurde kurz vorgestellt und danach wurden drei Schwerpunktthemen, welche sich aus den Begleitgruppensitzungen als besonders wichtig herauskristallisiert haben, gemeinsam in Form eines «World Cafés» diskutiert. Nachfolgend sind die Erkenntnisse aus den Diskussionen zusammengefasst.

Thema: Lebensdauer, Lebenszyklusphasen und Objektklassifizierung

Soll die Lebensdauer in die Referenz-, Grenz- und Zielwerte einfließen (Grenzwert z.B. pro Laufmeter und Jahr)?

- Lebensdauer im Grenz- und Zielwert berücksichtigen, um die Vergleichbarkeit der Projekte zu gewährleisten
- Info: Im Hochbau gibt es keine Lebensdauern auf der Materialebene
- Tatsächliche Lebensdauer schwer vorherzusagen: Frühzeitiger Umbau, weil etwas «ausser Mode» gekommen ist, weil Umgestaltungskonzepte priorisiert werden (Nachhaltigkeit) oder wenn Werkleitungen früher ersetzt werden müssen.
- Der Einbezug der Lebensdauer nicht zwingend für jeden Bauwerkstyp sinnvoll.

Wie soll die Lebensdauer in die Referenz-, Grenz- und Zielwerte einfließen? (Wie sieht die Datenverfügbarkeit aus?)

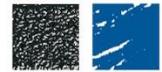
- Lebensdauer bauteilspezifisch einrechnen (Herausforderung: fehlendes Know-How bei neuen Materialien) → für die einzelnen Bauteile oder Strassenschichten werden unterschiedliche Lebensdauern angenommen (unterschiedliche Instandsetzungsintervalle)
- Hochbau: Lebensdauer ist in SIA 112 pro Bauwerksteil definiert → dies könnte analog im Tiefbau erfolgen. Es wurde betont, dass diese Lebensdauern nicht der Realität entsprechen (Werkleitung muss früher ausgebaut werden etc.) → Die Herausforderung besteht darin sich auf eine Lebensdauer je Bauwerkstyp zu einigen und diese als Standard festzuhalten.

Welche Lebenszyklusphasen sollen im Grenz- und Zielwert enthalten sein?

- Herstellungs- und Instandsetzungsphasen beide berücksichtigen (Nutzung und Betrieb nicht berücksichtigen im ersten Schritt, ausser bei Tunnel würde der Betrieb (Beleuchtung etc.) einen grossen Einfluss haben und sollte berücksichtigt werden)
- Nur ein Grenzwert für die Errichtung (ohne Berücksichtigung der Instandsetzungen) soll nicht verwendet werden, da die Gefahr besteht, dass kurzfristig Materialien und Massnahmen besser abschneiden, welche aber über einen langen Zeithorizont betrachtet deutlich schlechter abschneiden (aufgrund höherer Instandsetzungsmassnahmen).
- Baukasten: separate Referenz-, Grenz- und Zielwerte für Errichtung und Instandsetzung (Rahmenbedingungen müssen klar sein für die Vergleichbarkeit)
- Grenzwert für Instandsetzungen separat ausweisen. (Wunsch: Einrechenbarkeit, wenn bei der zweiten Instandsetzung eine andere Deckschicht gewählt wird)

Wie sollen die Objekte klassifiziert werden?

- **Nach ihrer Funktion** (z.B. muss 80 Jahre halten, Lärmschutz, Belastung, Lastklassen, Durchfahrten) → Grenzwerte für eine bestimmte Nutzungseinheit (anstelle von Grenzwerten je Bauwerkstyp). Dies wurde mehrmals hervorgehoben.



- Die Suffizienz ist mit der Einheit pro m² nicht immer gegeben (Strasse mit Tempo 30 kann schmaler gebaut werden als mit Tempo 50)

Auf welcher Stufe sind Grenzwerte erwünscht? Soll es unterschiedliche Grenzwerte für verschiedene Planungsphasen geben? (Material, Bauwerkskomponente, gesamtes Bauwerk)

- Grenzwerte in möglichst früher Planungsphase erwünscht
- Grenzwerte für Bauprojekte (unterschiedliche Grenzwerte für den Ersatz der Deckschicht oder den Ersatz der Deck-, Binder- und Tragschicht inkl. Foundation) wären anwenderfreundlich. Es braucht wahrscheinlich einen totalen Grenzwert (frühe Planungsphase) und Grenzwerte auf Bauwerksteilebene (spätere Planung).
- Allgemeiner Grenzwert für das Vorprojekt und Vorstudie

Allgemein

- Aufpassen, dass der Optimierungsspielraum durch Grenzwerte nicht eingeschränkt wird oder Abstriche beim Bauwerk gemacht werden, nur um unter dem Grenzwert zu liegen (z.B. längere Erneuerungszyklen, allgemeine Projektoptimierungen)
- Wunsch für weiteres Vorgehen: Bewertungstool bereitstellen → in erster Linie Projekte vergleichen und nicht Grenzwerte definieren → Reportingpflicht wichtiger → ökobilanzieller Vergleich im Variantenentscheid integrieren.
- Wunsch: Lebensdauer selbst anpassen zu können (Instandsetzungszyklen etc.)
- Vergangenheit als Benchmark (Projekte aus der Vergangenheit auswerten und diese als Benchmark nehmen und nicht nur vom Stand heute ausgehen) → ist mit einem grossen Aufwand verbunden
- Generell ist eine Sensibilisierung des Themas notwendig

Thema 2: Reduktionspotenziale und Ambitionsniveaus

Wie schätzen Sie die vorgestellten Reduktionspotenziale ein?

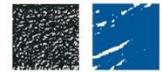
Einschätzung der Industrie wird als eher unrealistisch eingestuft. Ohne Carbon Capture und Storage wird das wohl nicht erreichbar sein. Bei den einzelnen Baustoffen müsste allenfalls der Absenkpfad angepasst werden (zu ambitioniert). Am realistischsten scheint noch der Absenkpfad des Baumaterials Asphalt (nicht beim Beton oder Stahl). Die Reduktionspotenziale und Absenkpfade in der Studie scheinen realistischer – dennoch etwas ambitioniert.

Eine Herausforderung im Tiefbau ist, dass die Baumaterialien stark exponiert sind und Recyclingmaterialien nicht in jedem Baustoff zulässig sind, z.B. beim Beton.

Ein positiver Effekt, der durch einen «Umweltwettbewerb» innerhalb einer Branche und auch Branchenübergreifend auftreten kann ist, dass sich die Baustoffhersteller versuchen in Sachen Treibhausgasemission ihrer Produkte zu unterbieten. Dies treibt wiederum die Innovation an. Dieser Effekt wird auch «Limbo-Effekt» genannt → die Messlatte wird stetig gesenkt.

Bei den Reduktionspotenzialen muss auch berücksichtigt werden, dass es auch Ausnahmen geben muss. Das heisst, es darf nicht sein, dass Referenz-, Grenz- und Zielwerte einen negativen Einfluss auf die Bauwerkssicherheit haben. Dies kann in gewissen Fällen der Fall sein – hier müssen dann Ausnahmen gemacht werden.

Absenkpfade und Reduktionen werden in der Realität wohl nicht linear verlaufen, sondern aktuell eher noch schleppend und hoffentlich durch Innovation dann progressiv zunehmen. Erste Ansätze für Reduktionsmassnahmen existieren. Doch wir stehen noch ganz am Anfang.



Wo sehen Sie weitere Reduktionspotenziale?

Es ist schon wichtig, die Reduktionspotenziale bei den wichtigsten Baumaterialien zu suchen und umzusetzen. Es wurde genannt, dass der Gedanke zur Reduktion in einer sehr frühen Planungsphase erfolgen muss anhand des Konzepts «Design-to-Cost» analog wie bei der Kostenermittlung. Die Frage, wie viel ist uns ein Bauwerk an Treibhausgasemissionen wert sollte vermehrt im Vordergrund stehen. Stichworte wie Suffizienz sind genannt worden.

Auch planerisch gesamtheitliche Ansätze im Hinblick auf die konstruktive Ausgestaltung gilt es zu berücksichtigen.

Früher Einbezug von Nachhaltigkeitsüberlegungen: Braucht es den Tunnel überhaupt? Wie viel THG ist uns dies wert? Analog zu den Kosten.

Einführung von Labels / Gütesiegel analog zu Ecobau.

Wie gehen wir mit unterschiedlichen Datengrundlagen um? Stichwort Allokation, Stichwort EPD vs. KBOB-Ansatz?

Vermutlich sind die Schwankungen innerhalb der ausgewerteten Bauwerkstypen grösser als die Streubreiche der Ökobilanzdaten.

Wichtig wäre ein vereinheitlichtes, harmonisiertes Tool. Es muss uns gelingen, dass dieser Prozess gut in bestehende Workflows integriert werden kann, ohne einen grossen Zusatzaufwand auszulösen. Die Baubranche kämpft schon mit grossen Herausforderungen wie Fachkräftemangel. Zusätzliche Aufgaben müssen effizient erledigt werden können. Ein einfaches Tool kann hierbei helfen. Digitalisierung ist ein weiterer wichtiger Schritt.

Fehlt die Forschung im Bereich nachhaltigerer Baustoffe (Beton, Asphalt, Stahl etc.)?

Teilweise, ja. Es fehlen auch gute Pilotprojekte. Besonders auf Bundesebene sollten vermehrt Leuchtturm und Pilotprojekte erstellt werden. Die Verantwortung des Einbezugs der Nachhaltigkeit liegt bei den Bauherren. Die Bauherren haben eine «Nachfrage-Macht» und sollten diese besser nutzen.

Gut wäre, wenn wir die Studie als Grundlage für einen jetzt losgetretenen Lernprozess verstehen und daraus «Best-Practice» Guidelines erstellen und der Branche zur Verfügung stellen. Es sollten auch konkrete Massnahmen für alle Bauherren erarbeitet werden. Schlussendlich haben alle Bauherren die gleichen «Sorgen» und Fragen. Hierfür wären Erfa-Gruppen hilfreich.

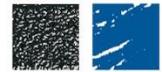
Ist im Infrastrukturbereich aufgrund hoher bautechnischer Anforderung eine gewisse «Skepsis» für Recycling-Baustoffe im Hinblick auf Langlebigkeit / Belastbarkeit / Exposition etc. vorhanden? Und führt dies zu einer innovationshemmenden Risikoaversion?

Im Tiefbau herrscht ein grosses Sicherheitsbedürfnis und deshalb wird die «Normen-Treue» stark gelebt. Dies kann auch ein Verhinderer von Innovation sein. Deshalb braucht es auch Mut seitens Bauherrschaft und gute Pilotprojekte mit Vorreiterrollen-Charakter.

Heute können Projekte nicht alle Normen erfüllen und gleichzeitig innovativ sein. Es besteht somit auch ein Bedarf auf Seite der Normen.

Es gibt Baustoffe, für die ein Einsatz mit RC-Anteil im Tiefbau als kaum möglich betrachtet wird (Beton) während sich andere wiederum gut eignen (Asphalt).

Wichtig ist, dass zukünftige BauingenieurInnen eine Befähigung in Sachen Nachhaltigkeit erfahren. Sie müssen die richtigen «Tools» in der Ausbildung erhalten, sodass sie mit Unterstützung eines geeigneten Tools und Datenbanken solche Berechnungen durchführen können.



Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass wir vorwärts machen müssen und die Zeit für Detailstudien und weitere lang andauernde Befähigung der Fachleute zeitlich nicht zielführend ist. Es muss jetzt gehandelt werden und die Weichen müssen jetzt entsprechend gestellt werden.

Was halten Sie von den vorgeschlagenen drei Ambitionsniveaus?

- Sollen diese direkt mit den Zieljahren 2030 und 2040 verknüpft sein oder unabhängig eines Zeitraums gelten? **Ambitioniert, doch gut.**
- Wie breit darf der Bereich je Ambitionsniveau sein? Welchen Streubereich lassen wir zu? **Das kommt auf den Bauwerkstypen drauf an und auch auf andere Aspekte wie Topografie (Stichwort Bergkanton vs. Flachlandkanton).**

Wichtig erscheint, dass die Kommunikation gelingt. Lieber von Richt- als von Referenz-, Grenz- und Zielwerten sprechen. Leute sollen nicht aussen vorgelesen, sondern mitgenommen werden. Ansonsten sabotieren sie unser Vorhaben.

Wichtig ist auch, dass Partnerschaften geschlossen werden und dass die Umsetzung nur gelingt, wenn alle mitmachen, Verbände, Behörden, Planer und Bauunternehmen.

Wie könnten alternative Ambitionsniveaus aussehen?

Schwellenwerte mit Bonus-System, Punktevergabe anhand Schwellenwerten im Bereich der Zuschlagskriterien.

Ein innovativer Ansatz wäre ein Treibhausgasemissions-Budget für Bauherren. Dann käme man weg von der Detailbetrachtung pro m² oder Laufmeter und hätte auch die ewige Diskussion um den Einbezug der Lebensdauer erledigt.

Wo sehen Sie konkrete Anwendermöglichkeiten der Ambitionsniveaus?

SNBS-Infrastruktur, bei Zuschlagskriterien

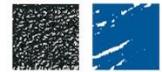
Gibt es weitere Möglichkeiten, Anreize zu schaffen? Wie soll dies kontrolliert und umgesetzt werden?

Falls mit finanziellen Anreizen gearbeitet wird, wäre es sinnvoller mit Boni anstelle von Pönalen (positives Mindset). Dies kann auch für Planer, nicht nur für Bauunternehmen eingesetzt werden. Der Ansatz wäre dann, dass Planer, die eine gewisse THG-Menge reduzieren schaffen, dafür belohnt werden.

Eine Herausforderung ist, dass Umweltschutz in vielen Fällen was kostet. Schlussendlich zahlt dies der Steuerzahler. Ob dann die gesellschaftliche Akzeptanz gegeben ist, wenn die nachhaltige Beschaffung laufend teurer wird und dies am Ende der Steuerzahler spürt, ist fraglich. Es wird dagegegehalten, dass es auch positive Beispiele gibt, wo Nachhaltigkeit und Kosten sparen Hand in Hand gehen (meistens Energiethemen).

Wie soll sanktioniert oder belohnt werden? Stichwort Konventionalstrafe oder Boni?

Lieber keine Pönalen, sondern mit positiven Anreizen arbeiten.



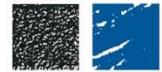
Thema 3: Umsetzbarkeit und Anwendung in der Praxis

Wo ist die Verwendung / Integration von Grenz- und Zielwerten besonders sinnvoll und warum?

1. Planung von Tiefbauprojekten
 - Mögliche Verbesserungspotenziale bei Normalien?
 - Könnte die Konferenz der Kantonsingenieure oder BPUK eine Rolle spielen, ähnlich wie die EnDK bei den MuKE?
2. Labels wie SNBS (Beispiel anhand der Ambitionsniveaus: Basis, Fortgeschritten, Hoch oder mittels Medaillen wie Bronze, Silber und Gold)
 - Ansatz sollte bei der Weiterentwicklung des SNBS-Infrastruktur geprüft werden.
3. Normen
 - Allenfalls könnte eine neue Norm Sinn machen, wie SIA 390/1 (gültig ab 1.2.2025) oder Merkblatt SIA 2032.
 - Bestehende Normen müssen Fortschritte bei der Emissionsreduktion ermöglichen
4. Fachhandbücher
 - Die Bilanzierung und der Entwurf müssen durch den gleichen Planer oder Planerin erfolgen können.
5. Weiteres?
 - Die Synergien mit Hilfsmitteln im Hochbau sollten genutzt werden wie z.B. ecoBKP, ecoDevis, eco-Prdukte

Auf welcher Planungsstufe sollten Grenzwerte eingesetzt werden? Was braucht es für optimale Wirkung?
Allgemein: ein Tool zur Berechnung der Emissionen muss die Planung pro Phase berücksichtigen und ermöglichen.

1. Strategische Planung (Benchmarks für gesamte Bauwerktypen)
 - Je früher das Thema im Projekt berücksichtigt wird, desto besser.
 - Die Konstruktionsweise hat einen grossen Einfluss.
 - In den frühen Phasen braucht es auch Gesamtkonzepte und nicht allein den Blick auf graue Emissionen.
2. Vorplanung (Variantenvergleiche, Auswahl unterschiedlicher Baumaterialien)
 - Zielwerte sollten auch projektbezogen vorgegeben werden.
 - Mindestanforderungen für technische Spezifikationen und Zuschlagskriterien sollten auch bereits früh mitgedacht werden.
3. Detailplanung (Benchmarks für spezifische Materialien)
 - Bei der Materialisierung können Grenzwerte eine wichtige Rolle spielen.
4. In der Ausschreibung
 - Zuschlagskriterien mit hoher Gewichtung
 - Grenzwerte als Mindestanforderung für technische Spezifikationen (Erfüllung ja/nein)
 - Produktvorgaben sind nicht möglich (Marktfreiheit gewährleisten)



- Ausschreibung Baumeisterleistungen sollte gezielt angepasst werden (KYS)

Was fehlt aus Ihrer Sicht noch, für die Anwendbarkeit in der Praxis? Was sind Ihre konkreten Anliegen an

1. Daten?

- Es sollten Daten für möglichst alle Materialien verfügbar sein.
- Die Daten sollten in die KBOB/ecobau-Liste aufgenommen werden.
- Die Daten von Baumaschinen sollten noch geprüft werden.
- Daten für Schienen-Infrastruktur sollten ebenfalls aufgenommen werden (BAV-SBB-Projekt)
- Rechner der Stadt-Zürich → TAZ (Tiefbauamt der Stadt Zürich) / UGZ (Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich)

2. Tools?

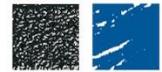
- Die Synergien mit Hilfsmitteln im Hochbau sollten genutzt werden wie z.B. ecoNPK
- Ein Tool muss auch als Bauteilrechner genutzt werden können (z.B. Lärmschutzpaneele)
- Es sollte ein standardisiertes Tool sein, dass in verschiedenen Planungsphasen eingesetzt werden kann.
- Das Tool muss so gestaltet sein, dass es keine Expertinnen und Experten braucht, sondern durch die zuständige Planerin / den Ingenieur verwendet werden kann.
- Auch hier Zusammenarbeit Hochbau / Tiefbau

3. Weiteres

- Kalkulation Baumeisterverband
- crb
- BIM
- Modellrechnungen für fiktive Bauwerke / Parametrisierung
- Konkrete gute Beispiele Sammeln, ev. Datenbank mit Projekten
- Der in Bauwerken und Bauprodukten enthaltene biogene Kohlenstoff sollte ausgewiesen werden.

Fragen zur Umsetzung und zum weiteren Vorgehen:

1. Wie könnte das Bewusstsein und die Bereitschaft in der Branche verbessert werden?
 - Das revidierte BöB bietet in Ausschreibungen neue Möglichkeiten, die immer noch nicht überall bekannt sind.
 - Mit dem BöB wäre auch ein Treibhausgas-Wettbewerb für ein individuelles Projekt möglich
 - Erste Erfahrungen für Bauaufgabe sammeln anhand einfacher Beispiele → Reallabor für z.B. Oberbau
 - LCA bei Beschaffungen braucht einen Standard und ein Tool
2. Die Vergrößerung der Datengrundlage und Erfahrungen ist wichtig. Könnten Sie sich vorstellen, bei eigenen Projekten Daten für die Weiterentwicklung der Grundlagen zu sammeln? (Mündlich: Hierfür könnte z.B. ein standardisiertes Format erarbeitet werden für die zu erhebenden Daten.)
 - Daten von ecobau zu Materialien könnten genutzt werden.
 - Mehrere TBA-Vertreter könnten sich das vorstellen.
 - Das BAFU könnte einen Aufruf an Unternehmen oder TBAs machen.
 - Für die Datensammlung bräuchte es aber klare Vorgaben für Vergleichbarkeit.
 - Es braucht nicht nur den Blick auf die Grenzwerte für graue THG, sondern auch eine Gesamtsicht (bspw. haben Lärmarme Beläge eine kürzere Lebensdauer)
 - UBP sollten als Vergleichsgrösse genutzt werden
 - Allenfalls braucht es eine Bagatellschwelle für kleine Projekte. Andererseits sollte verhindert werden, dass so ein zu grosser Teil von Projekten aussen vor ist.



- Es sollte auch eine Check-Liste oder einen Massnahmenkatalog pro Objekttyp geben, was die grossen Hebel für die Reduktion der Treibhausgasemissionen sind.
 - Es sollte Beispiele für Zuschlagskriterien und technische Spezifikationen geben.
 - Unterschiedlicher Geografie und Geologie sollte Rechnung getragen werden.
 - Eine Schwierigkeit liegt darin, begründbare Ausnahmen zu ermöglichen, und gleichzeitig Missbrauch zu verhindern. Die Fälle, wo Ausnahmen geltend gemacht werden können, müssten voraussichtlich klar definiert werden.
3. Empfehlungen für das weitere Vorgehen? Erwartungen an das BAFU oder andere Akteure?
- Aufbauen auf Erfahrungen im Hochbau
 - Einige Teilnehmende berücksichtigen heute Baumaschinen nicht oder separat. Heute gibt es noch kaum elektrische Baumaschinen.
 - Struktur und Tragwerke müssen einbezogen werden
4. Sehen Sie ergänzende oder alternative Instrumente?
- CO₂-Preise für Projekte und Ausschreibung würden einen Anreiz bieten, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren.
 - Treibhausgas-Budget für Bauherren
 - Ausschreibung Baumeisterleistungen sollte gezielt angepasst werden
 - Grenzwerte auf Materialebene, wie z.B. bei ecobau
 - Best-Practice-Vorgaben
 - Pilotprojekte und Beispiele, um zu testen sowie aus- und weiterzubilden
 - EPD