

Sous-groupe KFG Asphalte

Projet 3 : Procédure uniforme de présentation de l'écobilan des revêtements

Novembre 2024

KIES FÜR GENERATIONEN

Berner Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Bern University of Applied Sciences

Partenaires et groupe d'accompagnement technique Projet 3

Organisme responsable

Plate-forme « Gravier pour des générations »
(nom allemand « Kies für Generationen KFG »)

Pilotage du projet KFG sous-groupe asphalte : Dr Rupert Lieb et Gregor Schguanin
Chef de projet : Hans-Peter Beyeler

Partenaire financier

Office fédéral des routes OFROU, offices de l'environnement et/ou des ponts et chaussées des cantons d'Argovie, de Bâle-Ville, de Bâle-Campagne, de Fribourg, des Grisons, de Lucerne, d'Obwald, de Saint-Gall, de Thurgovie, du Tessin, d'Uri, de Vaud, du Valais, de Zoug, de Zurich, office des ponts et chaussées de la ville de Zurich ainsi que les associations Baustoff Kreislauf Schweiz, asphaltsuisse et SBV.

Commission d'accompagnement technique

Christoph Abegg, TBA du canton de Zurich
Thierry Berset, TBA canton de Fribourg
Stefano Bradanini, TBA du canton d'Argovie
Philip Bürgisser, TBA du canton de Bâle-Campagne
Gion Dosch, TBA du canton des Grisons
Benedikt Eberle, TBA du canton de Thurgovie
Christoph Gassmann, TBA du canton de Zurich
Bernhard Hirschi, asphaltsuisse Baustoff Kreislauf Schweiz
Martin Horat, TBA ville de Zurich
Roman Kohler, VZS SBV ZH/SH
Bernhard Kunz, asphaltsuisse
Dominik Oetiker AWEL canton de Zurich
Olga Paperna, TBA du canton d'Argovie
Fabian Traber, OFROU
Volker Wetzig, Baustoff Kreislauf Schweiz

Partenaires scientifiques / Auteurs

Haute école spécialisée bernoise (HESB-ABGC), Institut des matériaux de construction et des produits biosourcés, groupe spécialisé Matériaux de construction des routes et groupe spécialisé Matériaux et écobilan

- Patrick Fuchs
- Prof. Dr Aude Chabrelie
- Paola Catalano
- Prof. Dr Aybike Öngel, responsable des groupes spécialisés

Résumé

Dans le cadre de ce projet de la plateforme "Gravier pour des générations", une méthode uniforme de présentation du bilan écologique des revêtements bitumineux a été développée sur la base d'une analyse bibliographique. L'objectif était d'établir une méthodologie standardisée pour l'évaluation de l'impact écologique de différents revêtements bitumineux, en particulier ceux qui contiennent une part importante de matériaux recyclés, afin de servir de base à l'établissement d'écobilans pour de futurs projets de construction routière. La méthodologie a été validée sur la base d'un audit externe. Les remarques de l'auditeur externe ont été mises en œuvre ou complétées à titre informatif. Cette méthodologie a été appliquée à trois couches d'enrobé bitumineux (couche de roulement, couche de liaison et couche de base), en calculant les émissions de gaz à effet de serre, la saturation écologique en unités de charge écologique (UCE'21) ainsi que la consommation d'énergie primaire. Conformément à la norme EN 15804+A2, les phases suivantes du cycle de vie ont été prises en compte : Phase de fabrication, phase de construction, phase d'utilisation (remplacement sur 60 ans de durée d'utilisation) et phase d'élimination. Pour ce faire, les avantages et les contraintes en dehors des limites du système sont également pris en compte. Les trois indicateurs d'impact environnemental examinés présentent des résultats comparables en ce qui concerne la pertinence des modules étudiés. C'est particulièrement pour la couche de roulement et de liaison que le remplacement est d'une importance capitale - plus on remplace souvent, plus l'impact environnemental est élevé. La préparation de la matière première liant bitumineux, la fabrication de l'asphalte et le processus de pose ont également un impact environnemental élevé. Les résultats montrent une diminution de l'impact environnemental des couches bitumineuses contenant une part de matières premières secondaires ou une part élevée de recyclé.

Table des matières

1	Introduction	5
2	Analyse de la littérature	6
	2.1 Normalisation	6
	2.2 Logiciels et outils	7
	2.3 Bases de données	9
	2.4 Écobilans des revêtements routiers	10
3	Méthodologie	12
	3.1 Méthodologie de base	12
	3.2 Hypothèses spécifiques au projet	12
	3.3 Approvisionnement en matières premières (A1)	13
	3.4 Transports (A2, A4 et C2)	16
	3.5 Fabrication d'asphalte (A3)	16
	3.6 Construction et déconstruction (A5 et C1)	17
	3.7 Remplacement (B4)	17
	3.8 Traitement des déchets et mise en décharge (C3 et C4)	17
	3.9 Module D	18
4	Résultats et discussion	20
	4.1 Émissions de gaz à effet de serre	20
	4.2 Saturation écologique	25
	4.3 Énergie primaire	27
	4.4 Module D	28
5	Conclusion	30
6	Liste des figures	31
7	Liste des tableaux	32
8	Bibliographie	33
Annexe A - Rapport d'essai Umtec Technologie AG		34
Annexe B - Figures et tableaux supplémentaires de résultats		40
Annexe C - Modélisation des processus dans openLCA		42

1 Introduction

La plate-forme "Gravier pour des générations" (KFG) est une plate-forme d'innovation et d'échange soutenue par des membres de l'association sectorielle "Matériaux de construction circulaires Suisse" et la direction des travaux publics du canton de Zurich. En raison de la quantité croissante d'agrégats d'enrobés (asphalte déconstruit) générée par les assainissements réguliers des voies de circulation, le recyclage de l'asphalte de déconstruction prend de plus en plus d'importance.

Au cours de la première phase du projet (2019-2021), des mesures fondamentales ont été élaborées pour promouvoir la réutilisation des agrégats d'enrobés bitumineux et enrobés bitumineux tièdes. Il est toutefois apparu un besoin de recherche supplémentaire, notamment en ce qui concerne le développement d'une méthode uniforme de présentation de l'analyse du cycle de vie des revêtements bitumineux. C'est pourquoi ce projet se concentre précisément sur ce développement.

L'objectif principal est d'établir une méthode standardisée d'évaluation de l'impact environnemental de différents revêtements bitumineux, en particulier ceux qui contiennent un pourcentage élevé de matériaux recyclés. Grâce à une analyse approfondie de la littérature et en collaboration avec Umtec Technologie AG, une méthodologie permettant de calculer et de présenter l'impact environnemental des couches de roulement, de liaison et de base a été élaborée. Cette méthodologie sera validée lors d'un examen externe final.

Une analyse bibliographique sur les analyses du cycle de vie des revêtements bitumineux constitue un préalable au développement d'une méthodologie. Les normes utilisées, les solutions logicielles, les bases de données et les indicateurs d'impact environnemental calculés sont résumés. Sur la base de cette analyse bibliographique et en concertation avec des experts, une méthodologie pour l'analyse du cycle de vie des revêtements bitumineux est définie. La méthodologie comprend l'évaluation des impacts écologiques lors de la phase de fabrication, de la phase de construction, du remplacement, de la phase d'élimination et des avantages et contraintes en dehors des limites du système. Elle prend en compte différents indicateurs d'impact environnemental tels que les émissions de gaz à effet de serre, la saturation écologique et la consommation d'énergie primaire.

Cette méthodologie a été appliquée à trois couches bitumineuses (couche de roulement, couche de liaison et couche de base). Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel openLCA et de la base de données DETEC 2018. Les résultats de cette étude offrent un aperçu précieux de l'impact environnemental des revêtements bitumineux et mettent en évidence les avantages de l'utilisation de l'agrégat d'enrobé, désigné dans ce rapport par l'abréviation RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), les gravillons secondaires n'étant pas considérés. La méthodologie développée a finalement été validée dans le cadre d'un audit externe et doit servir de base pour l'analyse du cycle de vie de futurs projets de construction routière.

2 Analyse de la littérature

L'analyse de la littérature sert de base à la méthodologie élaborée par la suite pour calculer l'analyse du cycle de vie (ACV) des revêtements bitumineux. Cette analyse comprend l'examen des études sur l'analyse du cycle de vie des revêtements bitumineux ainsi que des bases de données, des logiciels et des outils disponibles pour la réalisation d'analyses du cycle de vie. Elle a également analysé les indicateurs d'impact environnemental calculés dans les études examinées et les normalisations prises en compte.

2.1 Normalisation

Dans le domaine des normalisations pour l'analyse du cycle de vie des revêtements bitumineux, trois normes sont centrales : ISO 14040 (principes et cadre), ISO 14044 (exigences et lignes directrices) et EN 15804+A2 (durabilité des ouvrages, déclarations environnementales de produits, règles de base pour la catégorie de produits "produits de construction"). Les normes ISO définissent la procédure générale et les conditions cadres. La norme EN 15804+A2 traite spécifiquement de l'analyse du cycle de vie des produits de construction pour l'établissement des déclarations environnementales de produits (Environmental Product Declaration EPD).

Selon la norme ISO 14040, une analyse du cycle de vie est "une compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ". Dans ce contexte, un cycle de vie est défini comme "l'ensemble des phases d'un système de produits, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale ". Selon la norme ISO 14040, une analyse du cycle de vie est divisée en quatre phases :

- Définition des objectifs et du champs de l'étude
- Inventaire
- Évaluation de l'impact
- Interprétation

Dans la norme EN 15804+A2, une analyse du cycle de vie est divisée en différentes phases du cycle de vie. Une phase du cycle de vie (telle que la phase de fabrication) se compose de plusieurs modules (tels que l'approvisionnement en matières premières, le transport et la fabrication). Les impacts environnementaux sont calculés et représentés dans les différents modules. Illustration 1 montre les phases du cycle de vie avec les modules d'une analyse de cycle de vie selon EN 15804+A2. En jaune, les modules qui ont été calculés dans cette étude. En dehors de la limite du système, le module D est indiqué à titre informatif. Selon la norme EN 15804+A2, "le module d'information D vise à assurer la transparence des avantages ou des charges pour l'environnement générés par les produits recyclables, les matières recyclées et/ou les sources d'énergie utilisables qui quittent le système de produits, par exemple sous forme de matières ou de combustibles secondaires".

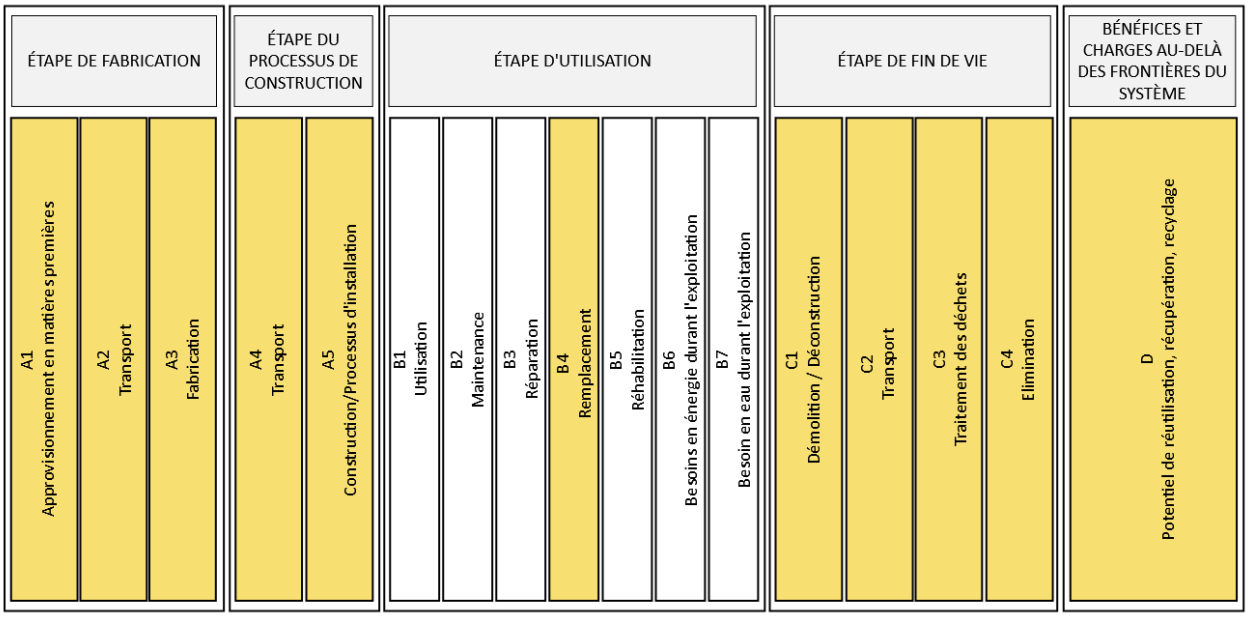

Illustration 1 : Phases du cycle de vie et modules d'une analyse du cycle de vie selon la norme EN 15804+A2. En jaune, les modules pris en compte dans cette étude.

Pour pouvoir comparer les différents calculs d'analyse du cycle de vie, il faut utiliser une unité fonctionnelle ou une unité déclarée. Cette unité définie doit être mesurable. Si le calcul s'applique à une fonctionnalité ou à un scénario spécifique, une unité fonctionnelle est appliquée (par exemple 1 m^2 de façade extérieure, nombre de fondations ponctuelles avec une reprise de charge définie ou 1 m^2 de mur extérieur avec une valeur U définie). Si le calcul s'applique à plusieurs fonctionnalités et scénarios, une unité déclarée est appliquée (par ex. en masse ou en volume). Sur la base de cette unité de référence, les impacts environnementaux sont calculés dans les modules considérés et les résultats sont présentés (EN 15804+A2).

2.2 Logiciels et outils

Il existe sur le marché de nombreux logiciels ou outils pour le calcul des écobilans. Il y a ceux qui peuvent être utilisés de manière uniforme dans tous les secteurs (p. ex. SimaPro) et les outils plus petits pour des secteurs et des problèmes spécifiques (p. ex. Palate). Dans cette étude, les solutions intersectorielles plutôt grandes sont appelées des logiciels et les solutions spécifiques aux branches plutôt petites sont appelées des outils. Une autre délimitation devrait être faite par rapport aux méthodes d'analyse du cycle de vie (p.ex. IPCC 2021, ReCiPe ou IMPACT 2002+). Celles-ci définissent la méthodologie de calcul des indicateurs d'impact environnemental et peuvent être appliquées dans différents logiciels ou outils.

Les dix logiciels d'analyse du cycle de vie les plus répandus sont énumérés ci-dessous (logiciels ACV 2024) :

1. SimaPro
2. GaBi

3. openLCA
4. Umberto
5. Ecochain Mobius
6. SOLIDWORKS Sustainability
7. sphera (anciennement GaBi)
8. One Click LCA
9. OpenIO
10. QED

Le tableau 1 présente une comparaison de différents outils et leur capacité à évaluer différents indicateurs d'impact environnemental. Les outils comparés sont Palate, ECORCE2, LCA Pave, eLCAP, TRACI et Eco2struct. Les indicateurs d'impact environnemental évalués comprennent les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie primaire, la saturation écologique en points de charge environnementale (UCE'21 / UBP'21 en allemand), la formation d'ozone au sol (POCP), le potentiel d'acidification, l'écotoxicité, le potentiel d'eutrophisation (eau salée, eau douce, terre), la santé humaine (toxicité humaine, bruit), le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone et l'épuisement des ressources de combustibles fossiles. On constate dans le tableau que les émissions de gaz à effet de serre et l'énergie primaire peuvent être calculées avec la plupart des outils.

Tableau 1 : Outils spécifiques à la branche pour les écobilans des revêtements routiers avec les possibilités de calcul des indicateurs d'impact environnemental.

Indicateur	Palate	ECORCE2®	LCA Pave	eLCAP	TRACI	Eco2struct
Émissions de gaz à effet de serre	👍	👍	👍	👍	👍	👍
Énergie primaire	👍	👍	👍	👍		
Saturation écologique (UCE)		👍				👍
Formation d'ozone au sol (POCP)					👍	
Potentiel d'acidification			👍	👍	👍	
Écotoxicité			👍	👍	👍	
Potentiel d'eutrophisation (eau salée, eau douce, terre)		👍	👍	👍	👍	
Santé humaine (toxicité pour l'homme, bruit)			👍	👍	👍	
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone			👍	👍	👍	
Épuisement des ressources en combustibles fossiles			👍	👍	👍	

2.3 Bases de données

Une analyse du cycle de vie peut être calculée sur la base d'une ou de plusieurs bases de données. Selon le logiciel ou l'outil, il y a plus ou moins de bases de données disponibles. Le bilan environnemental est modélisé avec tous les inputs et outputs en se basant sur les processus existants d'une ou de plusieurs bases de données. Le logiciel openLCA, par exemple, permet d'importer aussi bien des bases de données gratuites que payantes. L'utilisation de la base de données ecoinvent est très répandue pour la réalisation d'analyses du cycle de vie dans le secteur de la construction ; en Suisse, on utilise la base de données du DETEC, qui s'appuie sur ecoinvent. La Illustration 2 présente à titre d'exemple quelques bases de données disponibles dans openLCA.

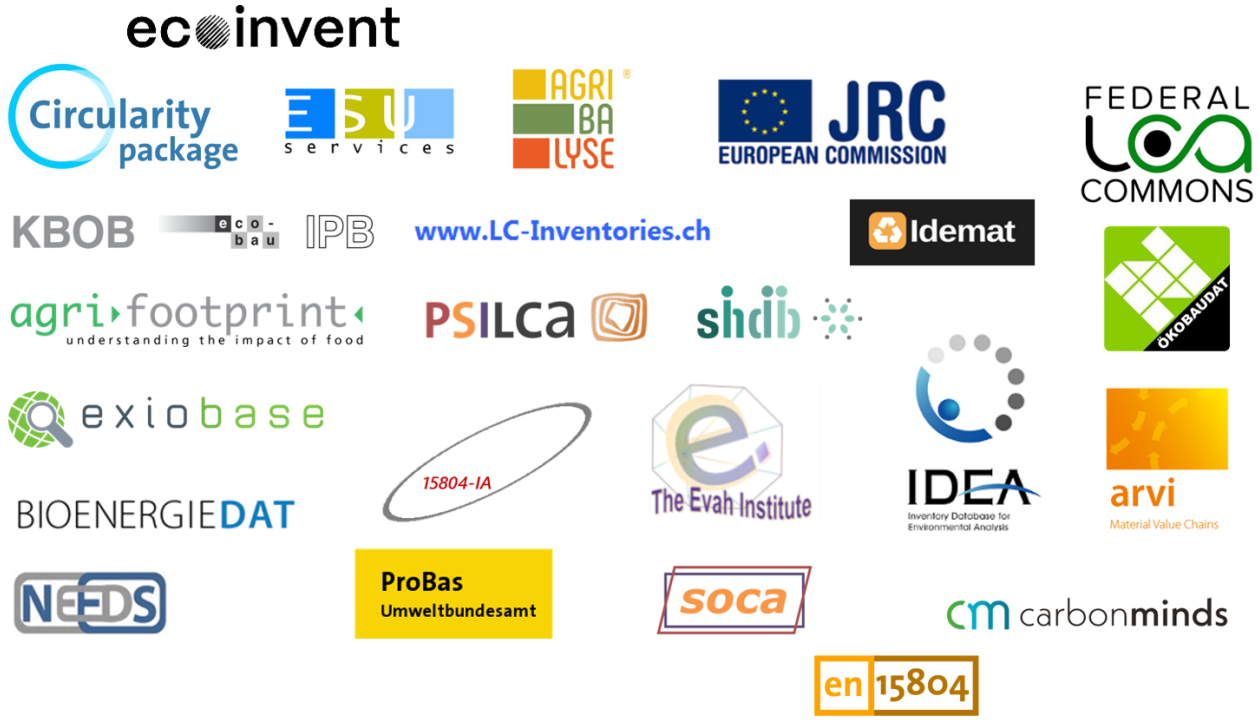

Illustration 2 : Exemples de bases de données d'ACV (image : openLCA 2024).

2.4 Écobilans des revêtements routiers

Dans le cadre de l'analyse bibliographique, huit études sur les écobilans des revêtements routiers ont été évaluées (Schindler et al. 2024, Piao et al. 2022, Liechti et al. 2016, Bueche et Dumont 2016, Gauch et al. 2016, Kytzia et Pohl 2014, Gschösser et al. 2013, Milachowski et al. 2010). Comme les études ont été menées dans des contextes différents, avec des objectifs et des méthodes différents, les résultats ne sont pas facilement comparables. Par exemple, la composition des matières premières (notamment la proportion de bitume et l'utilisation de RAP, les phases du cycle de vie prises en compte, l'unité fonctionnelle définie et la durée de vie hypothétique des produits bitumineux jouent un rôle décisif. Si ces aspects fondamentaux sont définis différemment dans les analyses du cycle de vie, les résultats sont difficilement comparables.

La plupart des études sur l'analyse du cycle de vie des revêtements routiers se concentrent sur les phases de fabrication, de construction, de remplacement et d'élimination. Dans la phase d'utilisation, les impacts environnementaux sont étudiés pendant la durée d'utilisation des couches d'asphalte. Cela comprend les travaux de réfection, notamment l'énergie nécessaire à ces travaux et les émissions liées à la circulation routière. Souvent, l'analyse du cycle de vie dans la phase d'utilisation se limite à la remise en état et à l'assainissement de la surface routière (p. ex. Kytzia et al. 2014). Cependant, l'utilisation de la route par les véhicules et les émissions qui y sont liées ne sont souvent pas prises en compte de manière détaillée dans l'analyse du cycle de vie. Cela est principalement dû au fait qu'il est difficile d'obtenir des données précises et complètes sur les émissions des véhicules au cours de la durée de vie de différents types de chaussées. Pour modéliser ces émissions avec précision, il est nécessaire d'avoir accès à des données détaillées sur le trafic, spécifiques à chaque lieu.

Toutes les études analysées dans le tableau 2 ont effectué un calcul des émissions de gaz à effet de serre en tant qu'indicateur d'impact environnemental central. En outre, la consommation d'énergie primaire ainsi que la saturation écologique ont souvent été comptabilisées sous forme de d'unités de charge environnementale.

Tableau 2 : Études d'écobilans de revêtements bitumineux avec les indicateurs d'impact environnemental calculés dans chaque cas.

Indicateur	Lärmarme Strassenbeläge Ökobilanz und Lebenszykluskosten (Schindler et al. 2024)	Life cycle assessment with noise considerations (Piao et al. 2022)	PLANET EP-2 (Liechti et al. 2016)	PLANET EP-5 (Bueche et Dumont 2016)	Projekt MatCH (Gauch et al. 2016)	Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen (Kytzia et Pohl 2014)	Life Cycle Assessment of Swiss Road (Gschösser et al. 2013)	Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts (Milachowski et al. 2010)
Émissions de gaz à effet de serre	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍
Énergie primaire	👍	👍	👍	👍	👍	👍	👍	
Saturation écologique (UCE)	👍	👍			👍	👍	👍	
Formation d'ozone au sol (POCP)			👍	👍				👍
Potentiel d'acidification			👍	👍				👍
Écotoxicité			👍	👍				
Potentiel d'eutrophisation (eau salée, eau douce, terre)			👍	👍				👍
Santé humaine (toxicité pour l'homme, bruit)		👍	👍	👍				
Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone			👍					👍

En outre, le projet "SABINA" en cours se concentre sur le développement d'un cadre d'évaluation global pour la durabilité des infrastructures routières. En Suisse, les indicateurs d'impact environnemental que sont les émissions de gaz à effet de serre, l'énergie primaire et la saturation écologique sont pris en compte dans toutes les phases du cycle de vie. Le projet, dirigé par Umtec Technologie AG, prévoit une collaboration avec des partenaires tels que l'Institut für Software de la Haute école spécialisée de Suisse orientale OST, afin d'intégrer pleinement les aspects techniques et écologiques.

3 Méthodologie

Sur la base de l'analyse bibliographique, une première proposition de méthodologie pour le calcul des écobilans des revêtements bitumineux a été élaborée. Ce point a fait l'objet de discussions et d'un accord avec Umtec Technologie AG. Les parties se sont notamment mises d'accord sur l'utilisation d'une base de données unique pour l'analyse du cycle de vie des revêtements bitumineux. De même, les processus de production d'asphalte, de production de bitume modifié par des polymères, de traitement des déchets, y compris le recyclage de l'asphalte de déconstruction, et plus généralement les processus utilisés pour les matières premières et les transports ont été convenus avec Umtec Technologie SA. Après la réalisation de l'analyse du cycle de vie, la méthodologie et les résultats ont été examinés de manière critique par un autre département spécialisé d'Umtec Technologie SA (rapport de contrôle en annexe A). Les points critiques mentionnés dans le rapport d'audit concernent plutôt des modifications mineures, qui ont toutes été mises en œuvre dans cette étude ou complétées à titre informatif.

Le sous-chapitre 3.1 ci-dessous présente la méthodologie de base issue de l'analyse bibliographique et de la concertation avec Umtec Technologie AG. Conjointement avec les bilans factuels modélisés des principaux processus (annexe C), cette méthodologie de base est proposée pour les futurs écobilans des revêtements routiers. Le sous-chapitre 3.2 présente ensuite des hypothèses spécifiques au projet, suivies des bases de calcul dans les différents modules (sous-chapitres 3.3 à 3.9).

3.1 Méthodologie de base

Afin de pouvoir réaliser à l'avenir des écobilans comparables de revêtements routiers en asphalte, il est important d'harmoniser certaines méthodes de base. En particulier, une normalisation, une base de données, une limite de système, une unité fonctionnelle et une durée d'utilisation de référence uniformes contribuent à une meilleure comparabilité. Après analyse de la littérature et concertation avec Umtec Technologie AG, la méthodologie suivante peut être proposée comme base pour d'autres analyses de cycle de vie :

- Normes : ISO 14040, ISO 14044 et EN 15804+A2
- Base de données : base de données des écobilans du DETEC basée sur ecoinvent 2.2 (également appelée base de données des écobilans de l'OFEV)
- Limite du système : "du berceau à la sortie de l'usine avec options , modules C1-C4 et module D" selon EN 15804+A2
- Unité fonctionnelle : 1 m^2 de chaussée
- Durée d'utilisation de référence : 60 ans

3.2 Hypothèses spécifiques au projet

Dans la présente étude, une analyse du cycle de vie des revêtements bitumineux a été réalisée selon les normes ISO 14040, ISO 14044 et EN 15804+A2. Pour ce faire, la limite du système a été définie comme "du berceau à la sortie de l'usine avec options, modules C1-C4 et module D". En conséquence, en plus des modules obligatoires (phase de fabrication A1-A3, phase d'élimination C1-C4 et bénéfices

et charges en dehors de la frontière du système module D), les modules phase de construction (A4 et A5) et remplacement pendant la phase d'utilisation (B4) ont été calculés. Le cycle de vie considéré commence et se termine avec une route cantonale fraisée.

Une analyse du cycle de vie a été réalisée pour trois couches d'asphalte : Couche de roulement (SDA 4-16), couche de liaison (AC B 16 S/H) et couche de base (AC T 22 S/H). Pour les trois couches d'asphalte, l'unité fonctionnelle a été définie comme une route cantonale suisse de 1 m^2 . L'épaisseur de la couche a été fixée à 30 mm pour la couche de roulement, 50 mm pour la couche de liaison et 70 mm pour la couche de base. Outre l'épaisseur de la couche, la teneur en RAP varie également pour les trois couches analysées. La couche de roulement ne présente aucune teneur en RAP, la couche de liaison une teneur en RAP de 50 % en masse et la couche de base une teneur en RAP de 60 % en masse. Les autres proportions de matières premières ainsi que la densité de l'asphalte varient également pour les trois couches et sont présentées en détail au chapitre Approvisionnement en matières premières (A1).

Les calculs ont été effectués avec le logiciel openLCA (2.1) et la base de données DETEC 2018 (UVEK LCI Data DQRv2:2018). La base de données UVEK 2022, récemment publiée, n'a pas encore pu être utilisée dans cette étude, car elle n'est pas encore disponible pour openLCA. Lors d'une future analyse de cycle de vie, l'état actuel de la base de données devrait être utilisé.

Les indicateurs d'impact environnemental des émissions de gaz à effet de serre (ecoinvent 3.10, IPCC 2021, GWP100), de la saturation écologique (ecoinvent 3.10, Ecological Scarcity 2021, Total UCE'21) et de l'énergie primaire (ecoinvent 3.10, Cumulative Energy Demand) ont été calculés pour les trois couches. L'énergie primaire a été divisée en énergie primaire renouvelable, qui a été utilisée sous forme de matière (PERM, par ex. bois utilisé dans une charpente) ou d'énergie (PERE, par ex. bois brûlé comme source d'énergie thermique), et en énergie primaire non renouvelable, qui a été utilisée sous forme de matière (PENRM, par ex. bitume utilisé dans l'asphalte) ou d'énergie (PENRE, par ex. diesel brûlé dans une machine). La répartition a été calculée avec un pouvoir calorifique supérieur du bitume de 41,39 MJ/kg (Ecoquery : "market for waste bitumen"). Ci-dessous, les quatre catégories d'énergie primaire sont à nouveau présentées à titre indicatif :

- PENRM : énergie primaire non renouvelable, utilisée comme matériau
- PENRE : énergie primaire non renouvelable, utilisée comme énergie
- PERM : énergie primaire renouvelable, utilisée comme matériau
- PERE : énergie primaire renouvelable, utilisée comme énergie

3.3 Approvisionnement en matières premières (A1)

L'illustration 3 montre la répartition en pourcentage des matières premières bitume primaire, PmB primaire (bitume modifié par des polymères), RAP, gravillons, sable de concassage et filler dans les trois couches analysées (couche de roulement SDA 4-16, couche de liaison AC B 16 S/H + RAP et couche de base AC T 22 S/H + RAP). Dans la couche de roulement, 6,2 % en masse de PmB primaire sont inclus et dans la couche de liaison, 2,3 % en masse de PmB primaire. Dans la couche de base, 1,7 % en masse de bitume non modifié (bitume primaire) sont inclus. La couche de roulement ne contient pas de RAP, tandis que la couche de liaison contient 50 % en masse de RAP et la couche de base 60 % en masse.

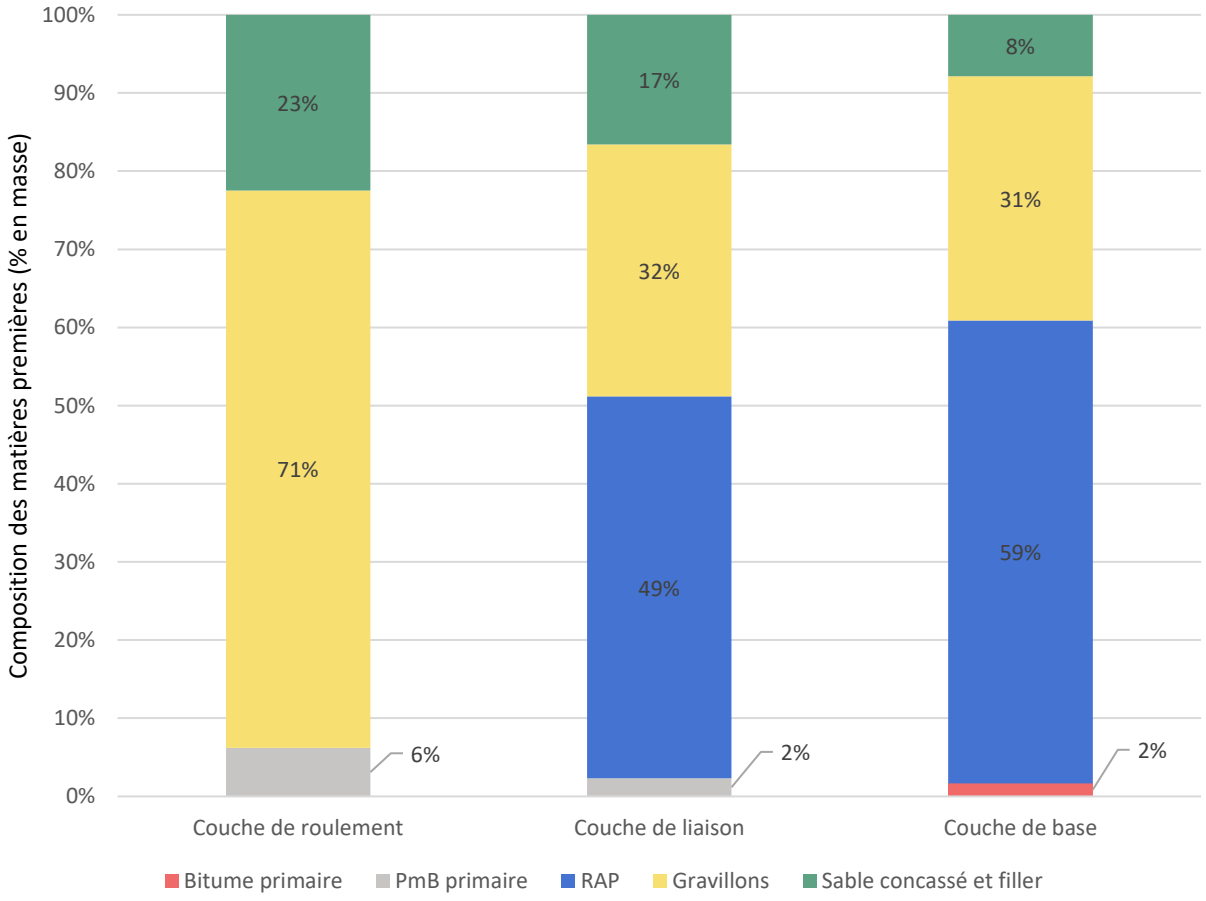

Illustration 3: Répartition en pourcentage des matières premières bitume primaire, PmB primaire, RAP, gravillons, sable concassé et filler pour les trois couches étudiées : Couche de roulement, de liaison et de base.

Le tableau 3 montre les épaisseurs et les masses volumiques des couches de roulement, de liaison et de base, ainsi que le volume et la masse par mètre carré calculés à partir de ces données. La couche de roulement a une épaisseur de 30 mm et une masse volumique de 2453 kg/m³, ce qui donne un volume de 0,03 m³ et une masse de 73,6 kg/m². La couche de liaison a une épaisseur de 50 mm et une masse volumique de 2484 kg/m³, ce qui donne un volume de 0,05 m³ et une masse de 124,2 kg/m². La couche de base a une épaisseur de 70 mm et une masse volumique de 2510 kg/m³, ce qui donne un volume de 0,07 m³ et une masse de 175,7 kg/m².

Il est important de prendre en compte la durée de vie des revêtements bitumineux, car elle exerce une influence considérable sur la rentabilité et la durabilité. La durée de vie de la couche de roulement est estimée à 10 ans, celle de la couche de liaison à 20 ans et celle de la couche de base à 60 ans. Ces estimations se basent sur les expériences et les données recueillies par différents cantons dans le cadre de ce projet.

Tableau 3: épaisseur et densité de la couche de roulement, du liant et de la couche de base sélectionnés, ainsi que le volume et la masse calculés à partir de ces données.

	Épaisseur de la couche (mm)	Masse volumique (kg/m^3)	Volume (m^3)	Masse surfacique (kg/m^2)
Couche de roulement (SDA 4-16)	30	2453	0.03	73.6
Couche de liaison (AC B 16 S/H + RAP)	50	2484	0.05	124.2
Couche de base (AC T 22 S/H + RAP)	70	2510	0.07	175.7

Les fillers peuvent être fabriqués à partir de grès broyé. Le grès est composé de nombreux minéraux. Le tableau 4 montre la composition minéralogique des fillers à titre d'exemple selon l'entreprise Famsa. Étant donné qu'il n'existe pas de grès broyé dans la base de données du DETEC pour les calculs de l'impact environnemental de cette étude, les jeux de données des différents minéraux ont été supposés. Compte tenu des faibles quantités de filler et des impacts environnementaux relativement faibles, cette approche semble justifiable. A l'avenir, ces hypothèses devraient être remplacées par un grès broyé modélisé à l'aide des données du fabricant.

Le tableau 4 présente les proportions initiales des matières premières du filler de Famsa et leur affectation aux noms correspondants dans la base de données du DETEC, suivies de la nouvelle répartition en pourcentage. La matière première quartz, qui représente 33,3 % chez Famsa, est appelée sable siliceux dans la base de données du DETEC et représente désormais 57 % de la nouvelle répartition. Le feldspath K, représenté à l'origine par 4,2 %, est appelé Feldspar dans la base de données du DETEC et représente 7 % dans la nouvelle répartition. Le plagioclase de Na et la pyrite, qui représentent respectivement 12,3 % et 0,8 % chez Famsa, ne sont pas présents dans la base de données du DETEC et ne sont donc pas pris en compte dans la nouvelle répartition. La calcite, qui représente 17,3 % des fillers chez Famsa, est appelée limestone dans la base de données du DETEC et représente désormais 30 %. La dolomite reste pratiquement inchangée avec une part de 3,2 % (dolomites) et représente 6 % dans la nouvelle répartition. La muscovite / illite et la chlorite, qui représentent respectivement 6,6 % et 3,3 % chez Famsa, ne sont pas non plus présentes dans la base de données du DETEC et ne sont pas prises en compte dans la nouvelle répartition.

Tableau 4: Nouvelle répartition des matières premières du filler de Famsa selon les jeux de données existants dans la base de données du DETEC 2018.

Désignation de Famsa	Répartition des remplisseurs Famsa (%)	Désignation dans la base de données du DETEC	nouvelle répartition (%)
Quartz	33.3%	Sable de silice	**57%**
K-Feldspath	4.2%	Économie de terrain	**7%**
Na-Plagioclases	12.3%	non disponible	non pris en compte
Calcite	17.3%	Limestone	**30%**
Dolomite	3.2%	Dolomite	**6%**
Pyrite	0.8%	non disponible	non pris en compte
Muscovite / Illite	6.6%	non disponible	non pris en compte
Chlorite	3.3%	non disponible	non pris en compte

3.4 Transports (A2, A4 et C2)

Le tableau 5 montre les trajets de transport supposés pour différentes matières premières et produits utilisés dans le projet, et indique les sources respectives. Tous les transports sont supposés être effectués par un camion suisse standard (32-40 tonnes). Toutes ces hypothèses sont importantes pour évaluer l'impact environnemental des transports et analyser la durabilité de l'approvisionnement en matériaux.

Tableau 5: distances de transport admises par matériau, avec indication de la source.

Matériau	Distance de transport (km)	Source
Bitume/PmB (A2)	300	Lenk 2023
Filler (A2)	150	Lenk 2023
Agrégats d'enrobé RAP (A2)	34	Schindler et al. 2024
Gravillons (A2)	50	Lenk 2023
Sable concassé (A2)	50	Lenk 2023
Enrobé à poser (A4)	34	Schindler et al. 2024
Enrobé de déconstruction (C2)	34	Schindler et al. 2024

3.5 Fabrication d'asphalte (A3)

Pour la production d'une tonne de couche de roulement, on a supposé 4 kWh/t pour l'électricité (Lenk 2023) et 75 kWh/t pour la chaleur (Milachowski et al. 2010). Pour la couche de liaison et la couche de base, on a également calculé 4 kWh/t d'électricité, mais on a supposé une consommation légèrement inférieure pour la chaleur, soit 61,4 kWh/t (valeur empirique Umtec Technologie AG). En outre, une halle industrielle en acier, un tapis roulant, des machines industrielles et leur consommation de diesel ont été pris en compte. Les émissions liées à la production d'asphalte ont été reprises de l'étude de Liechti et al. (2016). Une liste de tous les ensembles de données utilisés pour la production d'asphalte figure à l'Annexe C.

3.6 Construction et déconstruction (A5 et C1)

Les processus de pose et de dépose ont été repris de Lenk (2023). Sa modélisation se base sur une piste d'essai à Frick AG d'une largeur de 7,55 m et d'une longueur de 150 m. Celle-ci a été réalisée avec la centrale d'asphalte GABAG.

La pose des couches d'asphalte commence par le nettoyage de la route fraisée à l'aide d'un compresseur à vis et d'une machine de nettoyage des routes, de sorte qu'une surface fraisée sèche et propre soit disponible pour la pose. Comme le nettoyage de la surface fraisée n'est effectué qu'une seule fois (compresseur à vis et machine de nettoyage des routes), cette activité est répartie uniformément sur toutes les couches renouvelées.

La pose est ensuite effectuée avec un finisseur d'asphalte, des rouleaux vibrants, des petits rouleaux vibrants et des rouleaux statiques à trois roues. La modélisation des différentes machines reprise de Lenk (2023) a été adaptée pour 1 m^2 et supposée identique pour les trois couches.

Le remplacement commence par l'enlèvement des couches à l'aide d'une fraiseuse routière. La modélisation de la fraiseuse routière a également été reprise de Lenk (2023) et adaptée pour 1 m^2 . Ensuite, la pose est effectuée comme décrit ci-dessus. Après 60 ans, les trois couches sont enlevées à l'aide d'une fraiseuse routière. Une liste de tous les jeux de données utilisés pour les machines de pose et de dépose est présentée à l'annexe C.

3.7 Remplacement (B4)

Le module B4 modélise le remplacement pendant 60 ans. Cela comprend à chaque fois le démontage de l'ancienne ou des anciennes couches et leur élimination, ainsi que la fabrication d'une nouvelle ou de nouvelles couches et leur mise en place. En 60 ans, la couche de roulement est remplacée 5 fois (années 10, 20, 30, 40 et 50), la couche de liaison 2 fois (années 20 et 40) et la couche de base n'est pas remplacée.

3.8 Traitement des déchets et mise en décharge (C3 et C4)

Selon l'étude de Gauch et al. (2016), on suppose que l'asphalte retiré est recyclé à 83 % en masse et mis en décharge à 17 % en masse. L'efficacité et les pertes pendant le processus de recyclage n'ont pas été prises en compte. Les flux de matières pourraient être précisés à l'avenir à l'aide de données provenant d'entreprises de recyclage. Lors du traitement des déchets, il convient de déterminer si les étapes du processus de recyclage doivent être considérées à l'intérieur ou à l'extérieur des limites du système. En d'autres termes, si ces étapes de processus sont considérées comme l'élimination des déchets ou la production de RAP. Dans cette étude, une allocation économique a donc été appliquée. Selon les listes de prix publiées, les usines de recyclage reçoivent nettement plus d'argent pour l'élimination des déchets que pour le RAP produit. Selon ces listes de prix et les informations fournies par Umtec Technologie AG, l'allocation économique a été définie comme suit dans cette étude : 81% des processus de recyclage sont considérés dans les limites du système (élimination des déchets) et 19% en dehors des limites du système (production de RAP).

3.9 Module D

Le calcul des charges et des avantages au-delà des limites du système a été effectué conformément à la norme EN 15804+A2. Pour ce faire, les charges et avantages ont été calculés par rapport à l'exportation de matières secondaires. On suppose que le RAP remplace 1:1 les matières premières primaires. L'impact environnemental de la production du RAP (soit 19 % du total, voir l'allocation économique au sous-chapitre 3.8) est comparé à l'impact environnemental de la production des matières premières primaires que sont le bitume, les gravillons, le sable concassé et les fillers. Les matières premières secondaires contenues dans le RAP (bitume, gravillons, sable concassé et filler) ont été calculées sur la base de la composition des matières premières des différentes couches dans ce projet.

Dans le module D, ce n'est pas seulement la quantité extraite en 60 ans qui est prise en compte, mais tous les flux de déchets sur l'ensemble des 60 ans. Finalement, seule la quantité recyclée est prise en compte, moins la quantité de RAP déjà prise en compte dans les limites du système. La quantité de RAP déjà prise en compte dans les limites du système est celle qui est prise en compte dans cette étude lors de la mise à disposition des matières premières (A1) ou lors du remplacement (B4) et qui a déjà conduit à une réduction des matières premières primaires.

Pour mieux comprendre quelles quantités ont été prises en compte dans le module D, la figure 4 montre à titre d'exemple les quantités pour les couches de liaison. Sur l'ensemble de l'asphalte des 3 couches de liaison (372 kg), 83% de la masse est recyclée (309 kg) et 17% de la masse est mise en décharge (63 kg). Dans les limites du système, des matières premières secondaires ont déjà été prises en compte pour la couche de liaison (48,8 % en masse de RAP, 182 kg pour 3 couches de liaison). Cette quantité ne peut plus être considérée dans le module et est donc déduite de la quantité recyclée. Il reste donc 127 kg des 3 couches de liaison démontées, qui pourraient remplacer des matières premières primaires dans un autre cycle de vie. La répartition des matières premières primaires comparées se fait en fonction de la composition de la couche déconstruite. Dans l'exemple de la couche de liaison, les 127 kg d'asphalte retiré pourraient ainsi remplacer 6 kg de bitume primaire, 100 kg de gravillons primaires et 21 kg de sable concassé et de filler primaires.

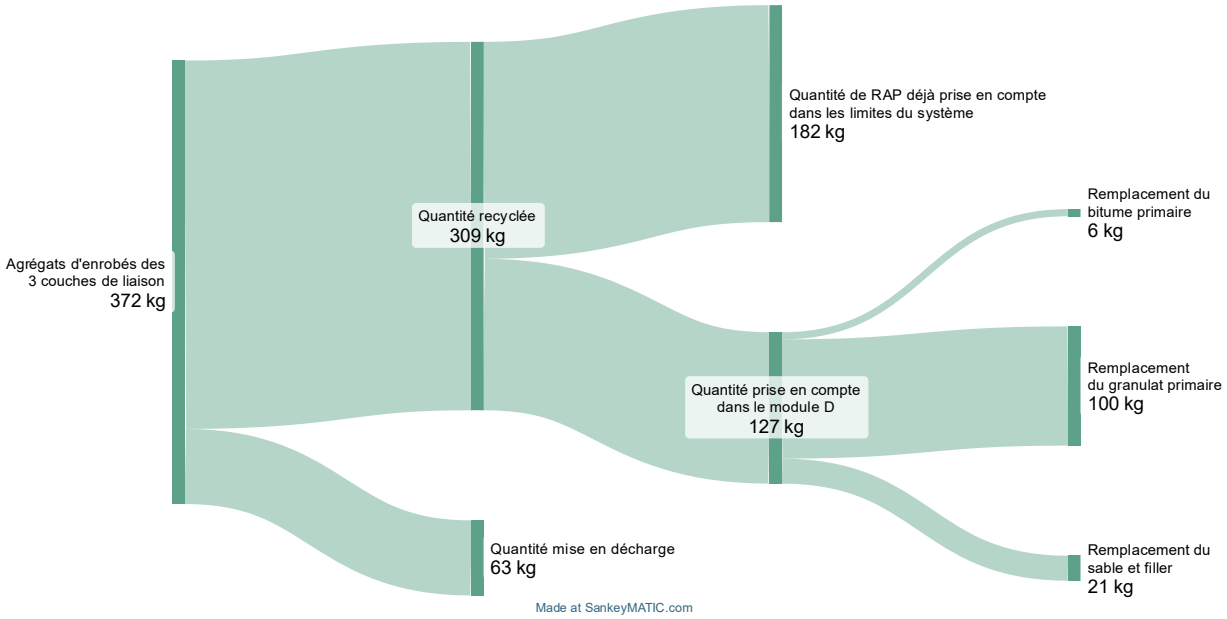

Illustration 4 : Calcul des quantités prises en compte dans le module D pour les couches de liaison.

4 Résultats et discussion

4.1 Émissions de gaz à effet de serre

Sur l'ensemble des phases du cycle de vie considérées et sur 60 ans, 1[2] m de couche de roulement génère 73,8 kg de CO_2 -eq., 1 m^2 de couche de liaison 36,2 kg de CO_2 -eq. et 1 m^2 de couche de base 13,7 kg de CO_2 -eq. Les grandes différences entre les couches proviennent principalement de la durée de vie supposée différente et des cycles de remplacement qui y sont liés. Ainsi, en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, la phase de vie du remplacement (B4) représente environ 84 % pour la couche de roulement (remplacée 5 fois en 60 ans) et environ 67 % pour la couche de liaison (remplacée 2 fois en 60 ans). Comme la couche de base n'est jamais remplacée en 60 ans, il n'y a pas de remplacement (B4).

Comme aucun RAP n'est utilisé dans la couche de roulement, la mise à disposition de matières premières (A1) de bitume, de gravillons, de sable concassé et de filler pour 1 m^2 de couche de roulement (4.1 kg CO_2 -eq.) provoque plus d'émissions de gaz à effet de serre que pour 1 m^2 de couches de liaison et de base dans lesquelles du RAP est utilisé (respectivement 2.7 kg CO_2 -eq. et 2.2 kg CO_2 -eq.). Et ce, bien que la couche de liaison et la couche de base nécessitent davantage de matières premières, en raison de leur plus grande épaisseur. Le processus de construction/installation (A5) fait également partie des modules qui génèrent d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Pour les trois couches, ces processus ont été supposés identiques en raison d'un manque d'informations de base, ce qui donne ici un résultat de 3,4 kg CO_2 -eq. Les processus de montage et de démontage pourraient être développés dans le cadre de travaux ultérieurs. Il serait certainement intéressant de considérer les heures-machine en fonction des équipes et de leurs épaisseurs.

Les émissions de gaz à effet de serre lors de la fabrication (A3) dépendent de la quantité d'asphalte à produire. Pour 1 m^2 de couche de roulement, on a le moins besoin d'asphalte (2,1 kg CO_2 -eq.), la couche de liaison se situe au milieu en termes de quantité (3,0 kg CO_2 -eq.) et pour 1 m^2 de couche de base on a le plus besoin d'asphalte (4,2 kg CO_2 -eq.). La cinquième phase de vie la plus importante en termes d'émissions de gaz à effet de serre est la déconstruction/démolition (C1), qui a été supposée identique pour les trois couches (1.0 kg CO_2 -eq, Illustration 5).

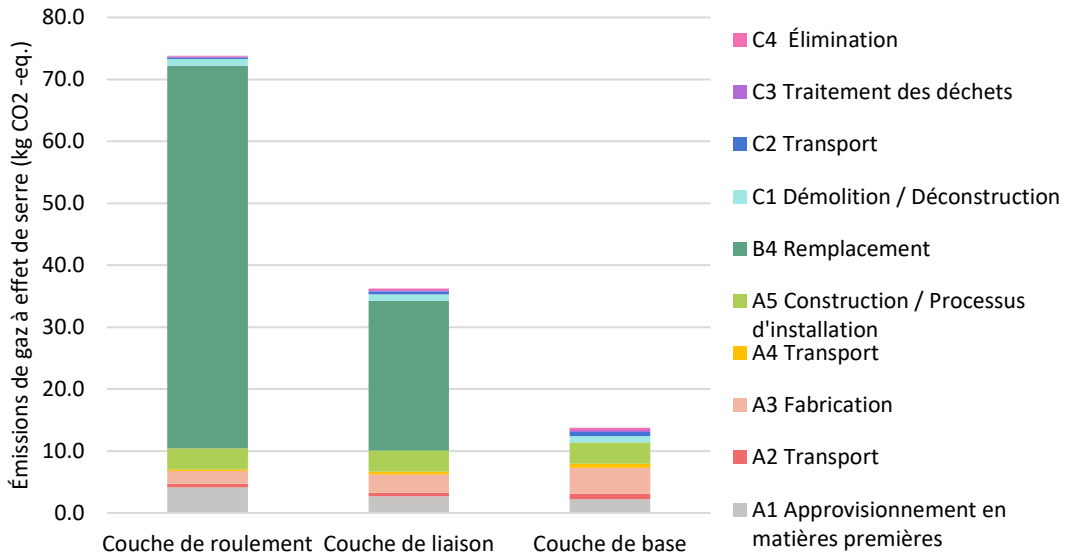

Illustration 5 : Émissions de gaz à effet de serre de 1 m² Couche de roulement, couche de liaison et couche de base dans les modules étudiés. Pendant la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans, la couche de roulement est remplacée 5 fois, la couche de liaison 2 fois et la couche de base n'est pas remplacée.

L'illustration 6 montre, à l'exemple de la couche de base, la répartition en pourcentage des émissions de gaz à effet de serre des modules considérés (figure pour la couche de liaison et la couche de roulement à l'annexe B). Comme décrit précédemment, cette répartition est légèrement différente pour la couche de liaison et la couche de roulement, mais sert ici de classement approximatif de la pertinence des modules. Outre le remplacement, le processus de construction/installation (A5), la fabrication (A3) et la mise à disposition des matières premières (A1) sont donc d'une grande importance. Si l'on additionne les transports A2, A4 et C2, ceux-ci représentent également une part importante avec 16 %. Les processus de traitement des déchets C3, avec 2 %, et de mise en décharge C4, avec 3 %, ont une influence mineure.

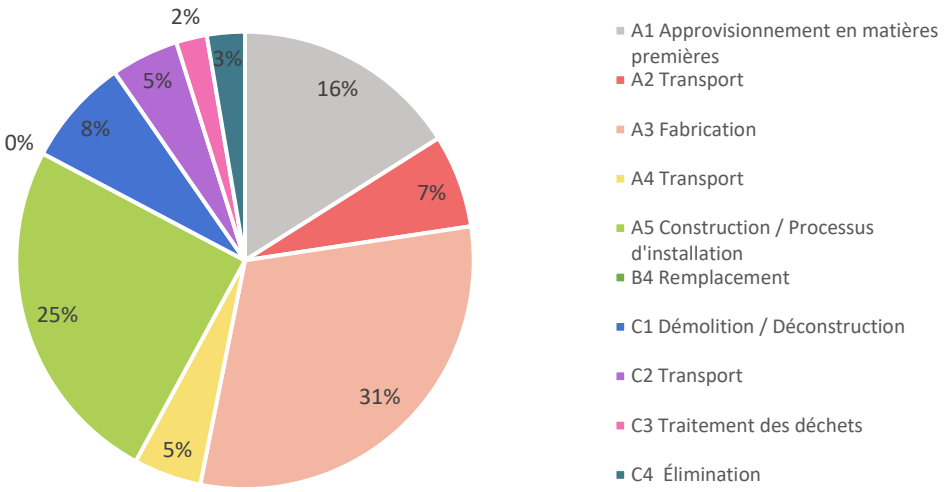

Illustration 6 : Répartition en pourcentage des émissions de gaz à effet de serre dans les modules considérés pour la couche de base.

Les émissions de gaz à effet de serre lors de l'approvisionnement en matières premières (A1) sont principalement (81 % à 92 %) causées par la matière première bitume ou bitume modifié par des polymères (PmB). Dans l'illustration 7 on constate en outre que les émissions de gaz à effet de serre dues au bitume sont plus faibles pour les couches de liaison et de base que pour la couche de roulement. Ceci parce que le bitume "primaire" est remplacé par du bitume dans le RAP et que ce bitume "secondaire" dans le RAP génère nettement moins d'émissions de gaz à effet de serre lors de la préparation. Les autres matières premières génèrent nettement moins d'émissions de gaz à effet de serre et présentent des impacts environnementaux comparables pour toutes les couches : Gravillons 6 - 12 %, Sable concassé et filler 2 - 4 % et RAP 0 - 2 %.

Pour la couche de roulement et la couche de liaison, on utilise du bitume modifié par des polymères (PmB). Dans cette étude, le PmB est composé de 96 % en masse de bitume et de 4 % en masse de polybutadiène. Les émissions de gaz à effet de serre lors de la préparation des matières premières du polybutadiène sont environ 6,5 fois plus élevées que celles du bitume (3,99 kg de CO_2 -eq./kg de polybutadiène et 0,61 kg de CO_2 -eq./kg de bitume). De plus, le PmB est produit dans le cadre d'un processus de mélange avant la fabrication de l'asphalte, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre supplémentaires dues à l'infrastructure et à la fourniture d'énergie.

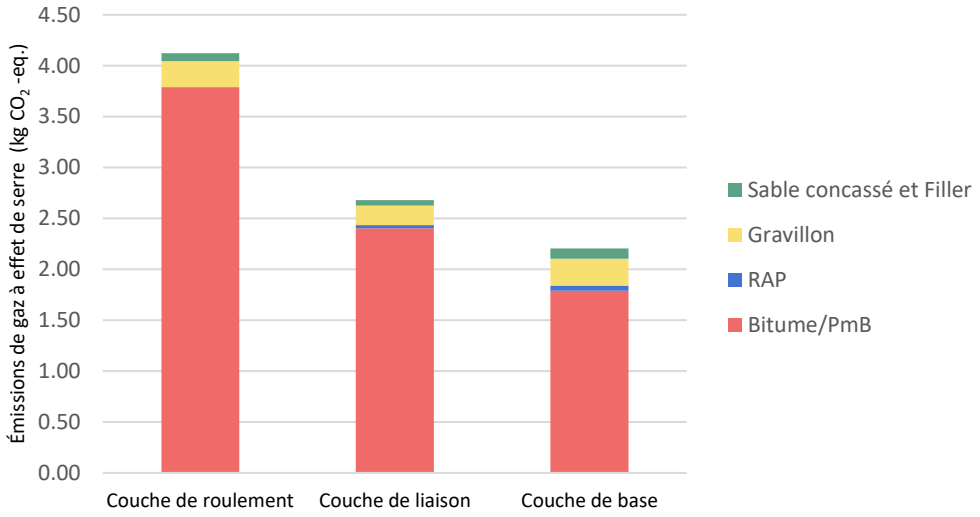

Illustration 7 : Émissions de gaz à effet de serre liées à l'approvisionnement en matières premières (A1) de 1 m^2 Couche de roulement, couche de liaison et couche de base.

Différentes machines sont utilisées lors du processus de construction/installation (A5) et de déconstruction/démolition (C1). Le rouleau vibrant, le finisseur d'asphalte et la fraiseuse routière produisent la plupart des émissions de gaz à effet de serre lors de la pose ou de la dépose de 1 m^2 d'asphalte. Comme le processus de construction/pose a été supposé identique pour la couche de roulement, la couche de liaison et la couche de base en raison du manque d'informations de fond, les résultats sont également identiques pour les trois couches (Illustration 8). Les processus de pose et de dépose pourraient être développés dans le cadre de travaux ultérieurs. Il serait certainement intéressant de considérer les heures de travail des machines en fonction des couches et de leurs épaisseurs.

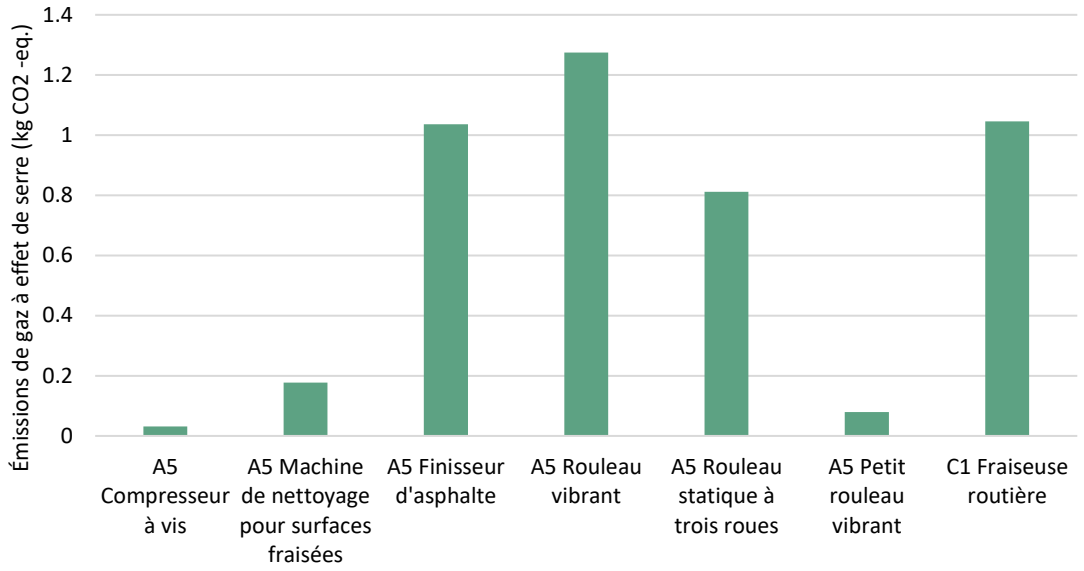

Illustration 8 : émissions de gaz à effet de serre des processus de pose et de dépose (A5 et C1) pour une couche d'enrobé de 1 m^2 (les couches de roulement, de liaison et de base sont identiques).

La durée de vie des couches d'asphalte, respectivement le nombre de cycles de remplacement pris en compte, joue un rôle décisif dans les émissions totales de gaz à effet de serre (GES). Si l'on tient compte du temps, l'"année 0" génère des émissions de GES pour la phase de fabrication (A1-A3) et la phase de construction (A4-A5), l'"année 10, 20, 30, 40 et 50" des émissions de GES pour le remplacement (B4) et l'"année 60" des émissions de GES pour la phase d'élimination (C1-C4). En Illustration 9 on peut voir que les différences entre les couches analysées sont principalement dues au remplacement (B4) dans les "années 10 à 50".

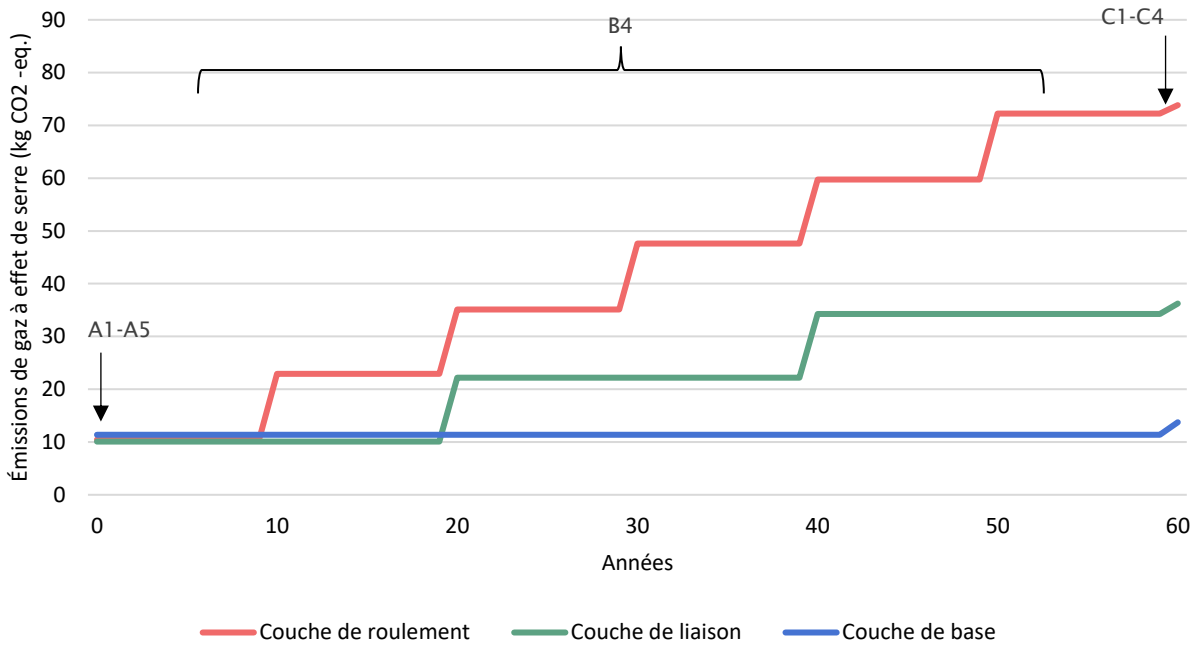

Illustration 9 : émissions de gaz à effet de serre de la couche de roulement, de la couche de liaison et de la couche de base en fonction du temps sur la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans.

4.2 Saturation écologique

L'influence des phases du cycle de vie sur l'impact environnemental considéré est comparable, pour la saturation écologique, aux résultats obtenus pour les émissions de gaz à effet de serre. Les modules remplacement (B4), mise à disposition de matières premières (A1), processus de construction/installation (A5) et fabrication (A3) jouent également un rôle central dans les résultats de la saturation écologique. Contrairement aux résultats des émissions de gaz à effet de serre, la mise à disposition des matières premières (A1) a toutefois un peu plus de poids dans la saturation écologique. L'approvisionnement en matières premières (A1) représente 23 % pour la saturation écologique et 16 % pour les émissions de gaz à effet de serre (à l'exemple de la couche de base, Illustration 10).

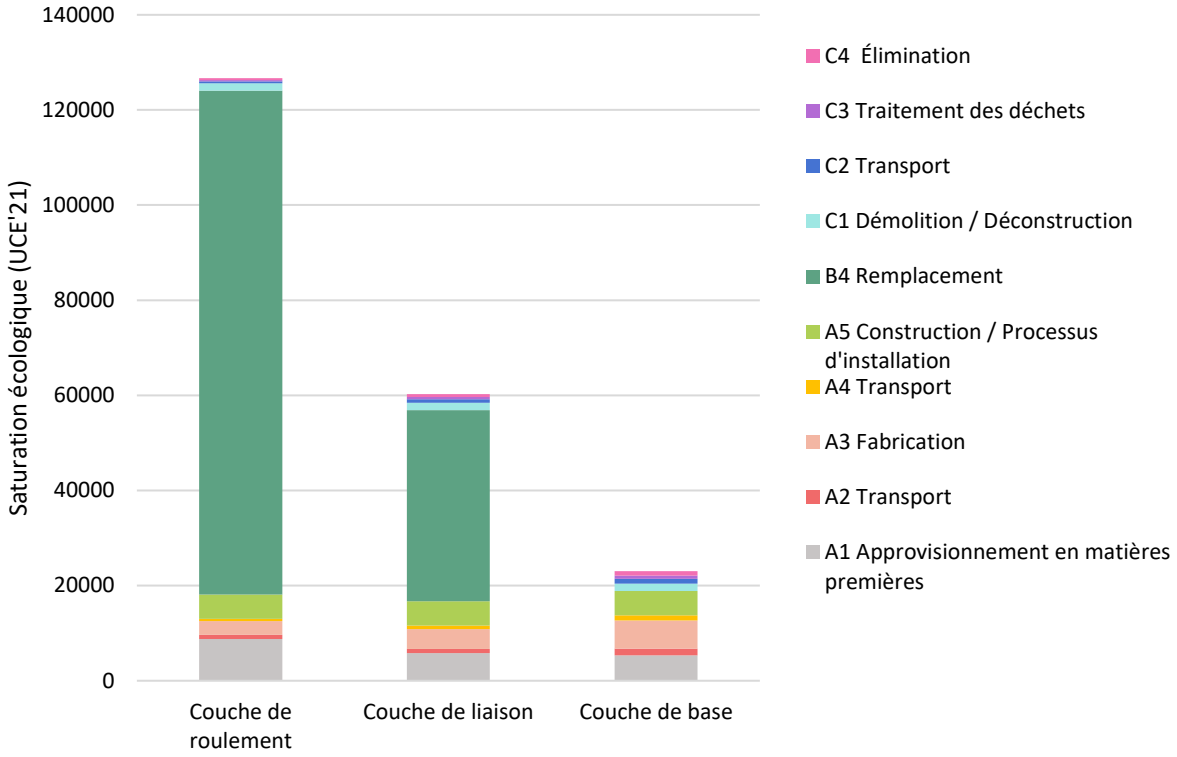

Illustration 10 : Saturation écologique en points de charge environnementale (UCE'21) de 1 m^2. Couche de roulement, couche de liaison et couche de base dans les modules étudiés. Pendant la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans, la couche de roulement est remplacée 5 fois, la couche de liaison 2 fois et la couche de base n'est pas remplacée.

La méthodologie de la saturation écologique calcule les points de charge environnementale sur la base de quelques catégories d'impact pondérées. Si l'on considère les résultats au niveau des catégories d'impact à l'exemple de la couche de roulement (Illustration 11), il y a trois catégories centrales. La catégorie d'impact "Climate Change" est responsable de 58 %, "Energy resources" de 16 % et "Emissions to air" de 15 % du total des points de charge écologique (tous les résultats des trois couches sont présentés dans l'annexe B).

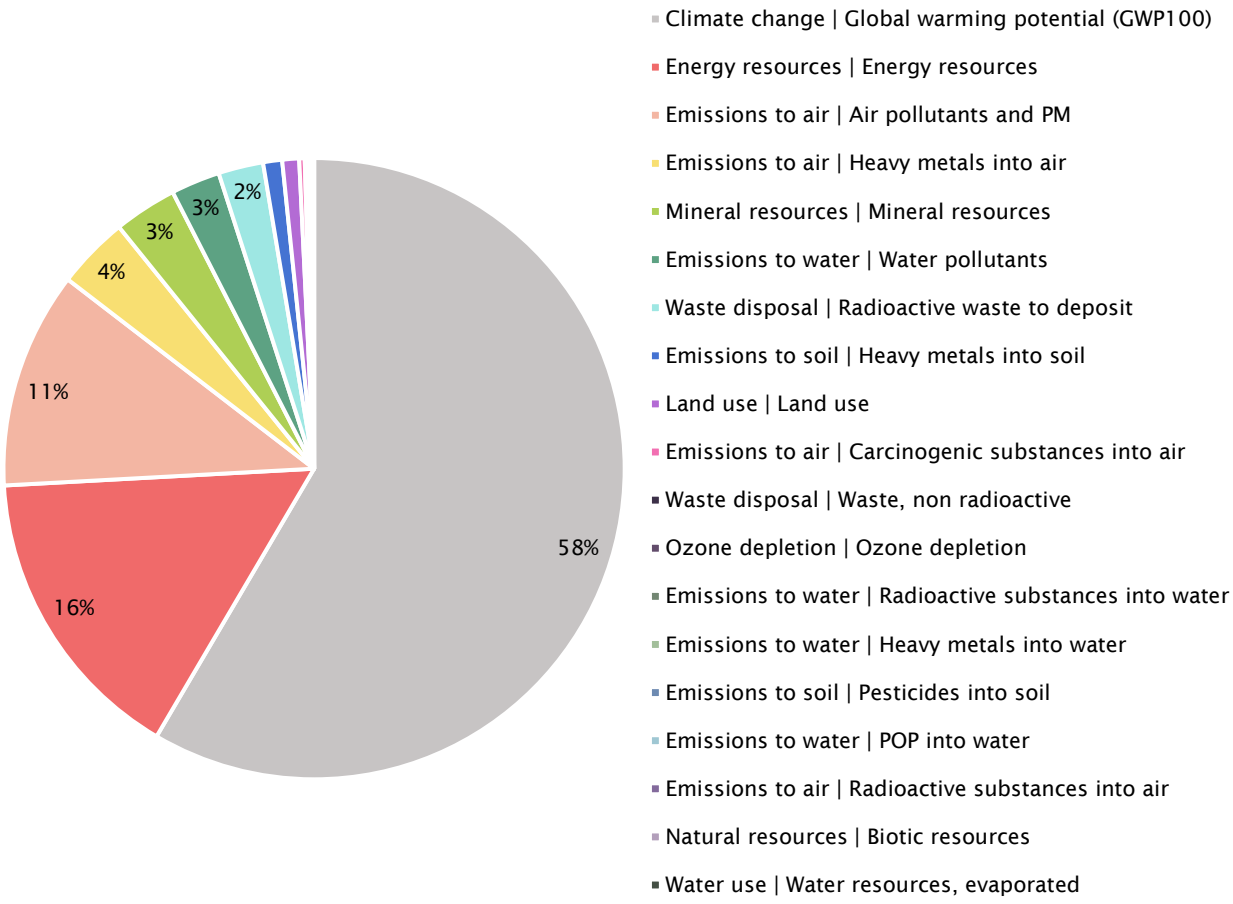

Illustration 11 : Répartition en pourcentage des points d'impact environnemental UCE'21 sur les catégories d'impact prises en compte pour une couche de roulement de 1 m^2 sur l'ensemble des modules et une durée d'utilisation de référence de 60 ans.

4.3 Énergie primaire

En ce qui concerne l'énergie primaire, on distingue l'énergie renouvelable et l'énergie non renouvelable, ainsi que l'énergie utilisée comme matière et l'énergie utilisée comme énergie. Dans le cas des couches d'asphalte considérées, il n'y a pas d'énergie renouvelable qui soit utilisée comme matériau - comme ce serait par exemple le cas pour les produits en bois (PERM). En revanche, l'énergie stockée dans le bitume est indiquée comme énergie primaire non renouvelable, utilisée sous forme de matière (PENRM). La part d'énergie primaire renouvelable (PERE) dans l'utilisation énergétique est nettement plus faible (2-3 %) que la part d'énergie primaire non renouvelable (PENRE).

L'illustration 12 présente toutes les catégories d'énergie primaire dans un souci d'exhaustivité. L'accent est toutefois mis sur l'énergie primaire non renouvelable qui est utilisée à des fins énergétiques (PENRE). L'influence des phases du cycle de vie est ici comparable aux résultats obtenus pour les émissions de gaz à effet de serre. On peut donc émettre l'hypothèse que la mise à disposition de l'énergie primaire non renouvelable à des fins énergétiques est responsable des émissions de gaz à effet de serre.

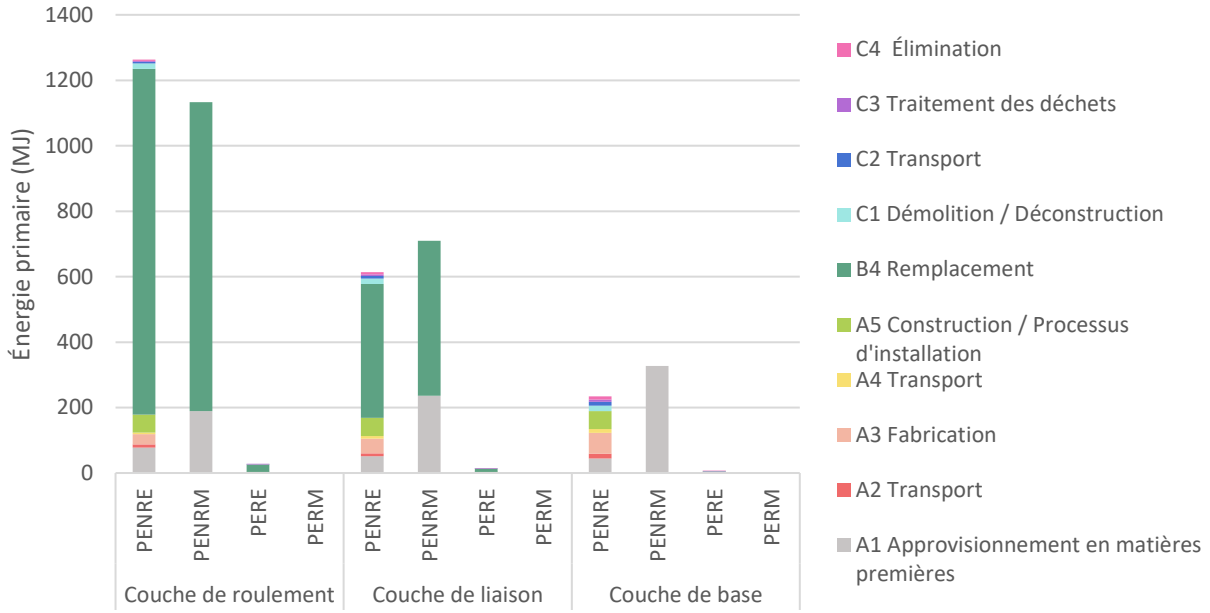

Illustration 12 : Énergie primaire de 1 m^2 Couche de roulement, couche de liaison et couche de base dans les modules étudiés. Pendant la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans, la couche de roulement est remplacée 5 fois, la couche de liaison 2 fois et la couche de base n'est pas remplacée. Répartition de l'énergie primaire en énergie renouvelable utilisée à des fins énergétiques (PERE) ou matérielles (PERM), et en énergie non renouvelable utilisée à des fins énergétiques (PENRE) ou matérielles (PENRM). (PERM = 0)

4.4 Module D

Dans le module D, les avantages et les charges en dehors des limites du système sont consignés à titre informatif (voir chapitre 3.9). Ce chapitre décrit les avantages pour l'exportation de RAP (matière première secondaire). Les calculs montrent que la préparation de la matière première pour l'asphalte primaire génère nettement plus d'émissions de gaz à effet de serre que pour le RAP. Par conséquent, la substitution de l'asphalte primaire par le RAP permet d'économiser des émissions de gaz à effet de serre. L'ampleur de cet avantage dépend du volume et du nombre de cycles de remplacement si l'on considère une couche d'asphalte de 1 m^2. Ainsi, le module D prend en compte une quantité d'asphalte de 366 kg pour la couche de roulement, 127 kg pour la couche de liaison et 42 kg pour la couche de base (calcul et exemple selon le chapitre 3.9). En conséquence, l'avantage le plus important est comptabilisé pour la couche de roulement avec -15,4 kg CO_2 -eq., le deuxième plus important pour la couche de liaison avec -4,1 kg CO_2 -eq. et le plus faible pour la couche de base avec -1,3 kg CO_2 -eq. (Illustration 13).

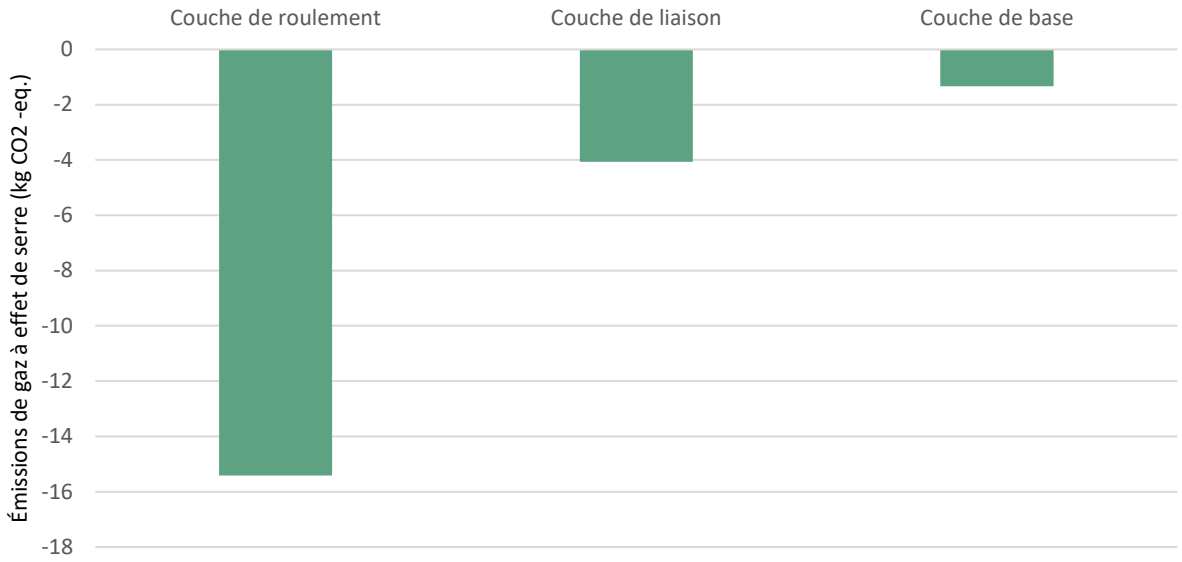

Illustration 13 : Avantages en dehors de la limite du système par rapport à l'exportation de RAP pour 1 m^2 Couche de roulement, de liaison et de base sur la durée d'utilisation de référence de 60 ans.

La Illustration 14 montre l'avantage du RAP par rapport à l'asphalte primaire, tel qu'il a été mentionné précédemment, si l'on considère la fourniture de matières premières pour une tonne d'asphalte. L'approvisionnement en matières premières (A1) d'une tonne de RAP génère 0,5 kg de CO_2 -eq. et une tonne d'asphalte primaire (0 % de RAP) 42,5 kg de CO_2 -eq. Les émissions de gaz à effet de serre pour le RAP semblent ici très faibles. Il convient de noter que les impacts environnementaux pour le processus de recyclage sont attribués à 81 % au traitement des déchets (C3) dans les limites du système et à 19 % seulement au module D (allocation économique). De plus, le processus de recyclage de l'asphalte retiré nécessite nettement moins d'énergie que le processus de fabrication de l'asphalte primaire.

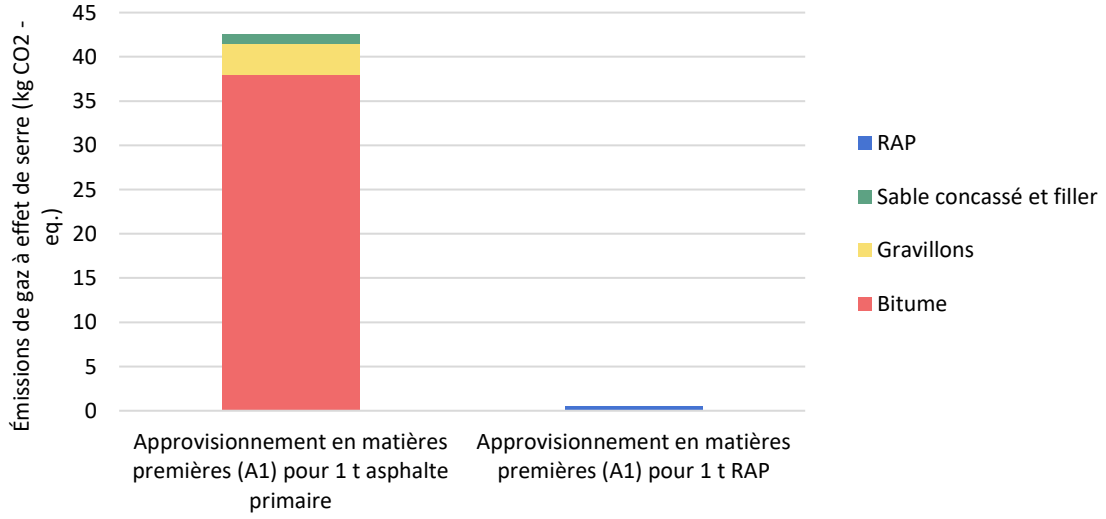

Illustration 14 : Comparaison supposée dans le module D avec les émissions de gaz à effet de serre de l'approvisionnement en matières premières (A1) d'une tonne d'asphalte primaire et d'une tonne de RAP.

5 Conclusion

Dans cette étude, une méthodologie complète d'analyse du cycle de vie des revêtements bitumineux a été développée, appliquée et validée en externe. Basée sur les normes ISO 14040/44 et EN 15804+A2, l'accent a été mis sur l'analyse des différentes phases du cycle de vie et des modules tels que la préparation des matières premières, la fabrication de l'asphalte et le processus de pose. L'évaluation des impacts environnementaux a été réalisée à l'aide des indicateurs suivants : émissions de gaz à effet de serre, énergie primaire et saturation écologique.

En raison de la durée de vie plus courte de la couche de roulement et des cycles de remplacement qui y sont liés, cette couche présente des impacts environnementaux nettement plus élevés par rapport à la couche de liaison ou de base. Cela montre également le potentiel de réduction des impacts environnementaux par une durée de vie plus longue des couches d'asphalte. D'autres modules centraux sont la préparation des matières premières, où les impacts environnementaux sont principalement causés par la préparation du bitume, ainsi que la fabrication de l'asphalte et le processus de construction/de mise en œuvre.

La pertinence écologique des phases du cycle de vie analysées se reflète de manière cohérente dans les trois indicateurs d'impact environnemental considérés. Il est frappant de constater que le résultat de l'énergie primaire non renouvelable utilisée à des fins énergétiques est comparable à celui des émissions de gaz à effet de serre. Cela laisse supposer que la mise à disposition de cette énergie primaire est en grande partie responsable des émissions de gaz à effet de serre.

Les résultats mettent également en évidence des points de départ potentiels pour réduire les impacts environnementaux. Une part plus élevée de RAP et une part plus faible de bitume pourraient avoir des effets positifs du point de vue du bilan écologique. Des alternatives aux matières premières que sont le bitume et les polybutadiènes pourraient avoir un impact environnemental moindre. En ce qui concerne les machines de pose et de dépose, il conviendrait d'examiner la réduction hypothétique de l'impact environnemental des machines électriques par rapport aux machines fonctionnant encore aujourd'hui au diesel.

Dans cette étude, une méthodologie pour le calcul des revêtements routiers a pu être déduite de la littérature et convenue avec Umtec Technologie SA. Après la réalisation de l'écobilan, la méthodologie a été validée par Umtec Technologie AG dans le cadre d'un contrôle externe. Les critiques mineures formulées dans ce rapport ont toutes pu être intégrées dans l'étude ou consignées à titre informatif. La méthodologie présentée ici, en particulier les éléments fondamentaux du sous-chapitre 3.1, peut servir de base à de futures analyses de cycle de vie de revêtements bitumineux. Selon l'objectif et le type d'analyse de cycle de vie, la méthodologie doit être adaptée de manière spécifique. De même, la méthodologie doit être adaptée en permanence aux normes en vigueur ainsi qu'aux jeux de données et aux logiciels actualisés.

6 Liste des figures

Illustration 1 : Phases du cycle de vie et modules d'une analyse du cycle de vie selon la norme EN 15804+A2. En jaune, les modules pris en compte dans cette étude. 7
Illustration 2 : Exemples de bases de données d'ACV (image : openLCA 2024). 10
Illustration 3: Répartition en pourcentage des matières premières bitume primaire, PmB primaire, RAP, gravillons, sable concassé et filler pour les trois couches étudiées : Couche de roulement, de liaison et de base. 14
Illustration 4 : Calcul des quantités prises en compte dans le module D pour les couches de liaison. 19
Illustration 5 : Émissions de gaz à effet de serre de 1 m² Couche de roulement, couche de liaison et couche de base dans les modules étudiés. Pendant la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans, la couche de roulement est remplacée 5 fois, la couche de liaison 2 fois et la couche de base n'est pas remplacée. 21
Illustration 6 : Répartition en pourcentage des émissions de gaz à effet de serre dans les modules considérés pour la couche de base. 22
Illustration 7 : Émissions de gaz à effet de serre liées à l'approvisionnement en matières premières (A1) de 1 m² Couche de roulement, couche de liaison et couche de base. 23
Illustration 8 : émissions de gaz à effet de serre des processus de pose et de dépose (A5 et C1) pour une couche d'enrobé de 1 m² (les couches de roulement, de liaison et de base sont identiques). 24
Illustration 9 : émissions de gaz à effet de serre de la couche de roulement, de la couche de liaison et de la couche de base en fonction du temps sur la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans. 25
Illustration 10 : Saturation écologique en points de charge environnementale (UCE'21) de 1 m². Couche de roulement, couche de liaison et couche de base dans les modules étudiés. Pendant la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans, la couche de roulement est remplacée 5 fois, la couche de liaison 2 fois et la couche de base n'est pas remplacée. 26
Illustration 11 : Répartition en pourcentage des points d'impact environnemental UCE'21 sur les catégories d'impact prises en compte pour une couche de roulement de 1 m² sur l'ensemble des modules et une durée d'utilisation de référence de 60 ans. 27
Illustration 12 : Énergie primaire de 1 m² Couche de roulement, couche de liaison et couche de base dans les modules étudiés. Pendant la durée d'utilisation de référence considérée de 60 ans, la couche de roulement est remplacée 5 fois, la couche de liaison 2 fois et la couche de base n'est pas remplacée. Répartition de l'énergie primaire en énergie renouvelable utilisée à des fins énergétiques (PERE) ou matérielles (PERM), et en énergie non renouvelable utilisée à des fins énergétiques (PENRE) ou matérielles (PENRM). (PERM = 0) 28
Illustration 13 : Avantages en dehors de la limite du système par rapport à l'exportation de RAP pour 1 m² Couche de roulement, de liaison et de base sur la durée d'utilisation de référence de 60 ans. 29
Illustration 14 : Comparaison supposée dans le module D avec les émissions de gaz à effet de serre de l'approvisionnement en matières premières (A1) d'une tonne d'asphalte primaire et d'une tonne de RAP. 29
Illustration 15 : Répartition en pourcentage des émissions de gaz à effet de serre dans les phases de vie considérées pour la couche de liaison. 40
Illustration 16 : Répartition en pourcentage des émissions de gaz à effet de serre dans les phases de vie considérées pour la couche de roulement. 40

7 Liste des tableaux

Tableau 1 : Outils spécifiques à la branche pour les écobilans des revêtements routiers avec les possibilités de calcul des indicateurs d'impact environnemental. 9

Tableau 2 : Études d'écobilans de revêtements bitumineux avec les indicateurs d'impact environnemental calculés dans chaque cas. 11

Tableau 3: épaisseur et densité de la couche de roulement, du liant et de la couche de base sélectionnés, ainsi que le volume et la masse calculés à partir de ces données. 15

Tableau 4: Nouvelle répartition des matières premières du filler de Famsa selon les jeux de données existants dans la base de données du DETEC 2018. 16

Tableau 5: distances de transport admises par matériau, avec indication de la source. 16

Tableau 6 : Évaluation des catégories d'impact dans le calcul de la saturation écologique en points de charge environnementale (UCE21) et en pourcentage de 1 m^2 des couches d'asphalte analysées et sur toute la durée d'utilisation de 60 ans. 41

8 Bibliographie

Bueche, Nicolas, André-Gilles Dumont. «Paquet de recherche PLANET: RS-5: Modèle global d'évaluation,» Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016)

ECO2nstruct. «ECO2nstruct – der Ökobilanzrechner für Infrastrukturbau-Projekte.» besucht 27.06.2024. www.infra-suisse.ch/nachhaltigkeit/eco2nstruct/

ECORCE2. «l'éco-comparateur ECORCE2.» besucht : 27.06.2024. www.ecorce2.ifsttar.fr/

EN 15804:2012+A2:2019. «Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.»

Famsa. «Dossier qualité 2023 - Granulats et filler pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels,» Famsa (2023)

Gauch, Marcel, Cecilia Matasci, Ingrid Hincapié, Raphael Hörler, Heinz Böni. «Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz,» EMPA (2016), Projekt MatCH

Gschösser, Florian, Holger Wallbaum. «Life cycle assessment of representative swiss road pavements for national roads with an accompanying life cycle cost analysis,» Environmental Science and Technology (2013)

ISO 14040:2006. «Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.»

ISO 14044:2006. «Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.»

Kytzia, Susanne, Thomas Pohl. «Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen,» Strasse und Autobahn, Themenheft Asphaltrecycling (2014)

LCA Pave. «LCA Pave Tool.» besucht: 27.06.2024. www.fhwa.dot.gov/pavement/lcatool/

LCA Software. «LCA Software – top 50 overview.» besucht 27.06.2024. www.lca-software.org/lca-top-50-overview/

Lenk, Joel. «Ökobilanz (LCA) von Gussasphalt als Deckschicht auf Schweizer Nationalstrassen,» Masterarbeit Berner Fachhochschule (2023)

Liechti, Jürg, Annina Gaschen, Mathias Breimesser, Christian Angst, Lukas Boesiger, Andrea Bieder. «Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten,» Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016)

Milachowski, Charlotte, Thorsten Strengel, Dirk Lowke, Christoph Gehlen. «Erstellung einer Ökobilanz für die Herstellung und Nutzung eines Autobahnabschnitts,» Forschungsbericht 20-F-0068, TU München (2010)

openLCA. «lca-data.» besucht 27.06.2024. www.openlca.org/lca-data

PaLATE. «Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects» besucht 27.06.2024. www.faculty.ce.berkeley.edu/horvath/palate.html

Piao, Zhengyin, Kurt Heutschi, Reto Pieren, Peter Mikhailenko, Lily D. Poulikakos, Stefanie Hellweg. «Environmental trade-offs for using low-noise pavements: Life cycle assessment with noise considerations," Science of the Total Environment (2022)

Schindler, Johannes, Arthur Braunschweig, Rolf Huwyler, Erik Bühlmann. «Lärmarme Strassenbeläge – Ökobilanz und Lebenszykluskosten,» Arbeitsgemeinschaft LCA-Strasse (2024)

Annexe A - Rapport d'essai Umtec Technologie AG

UTech
Umtec Technologie AG

Ökobilanzierung von Asphaltbelägen

Kritisches Review nach ISO 14040, ISO 14044 und ISO 14071

Autor*innen des geprüften Berichts

Patrick Fuchs, Berner Fachhochschule
Prof. Dr. Aude Chabrelie, Berner Fachhochschule
Paola Catalano, Berner Fachhochschule
Prof. Dr. Aybike Öngel, Berner Fachhochschule

Autor des Reviewberichtes

Dominik Osterwalder
Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon

Zürich, 19.06.2024

1. Einleitung

Die Plattform «Kies für Generationen» ist eine Austausch- und Innovationsplattform. Mitglieder sind der Fachverband der Kies- und Betonwerke Zürich (FKB), der Branchenverband arv Baustoffrecycling Schweiz (neu Baustoff Kreislauf Schweiz) sowie die Baudirektion des Kantons Zürich. Die Plattform besteht aus verschiedenen Arbeitsgruppen, die sich mit den unterschiedlichen Anwendungen von mineralischen Baustoffen befassen. Die Subgruppe Asphalt-Recycling sucht nach praktikablen Ansätzen zur Förderung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt und Niedrigtemperaturasphalt. Bei der Erarbeitung von Grundlagen für eine praxisorientierte technische Unterstützung der Bauherren hat sich jedoch gezeigt, dass in verschiedener Hinsicht weiterer Forschungsbedarf besteht, um den Weg für einen verstärkten Einsatz von Ausbauasphalt zu ebnen. Aus diesem Grund wurde unter anderem das Projekt «Einheitliches Verfahren zur Darstellung der Ökobilanz von Belägen» initiiert, das in diesem Review überprüft wird. Ziel des Projektes ist es, eine einheitliche Methode zur Bewertung von Asphaltbelägen über den gesamten Lebenszyklus mittels Ökobilanzierung zu erarbeiten.

Die Umtec Technologie AG wurde mit einem Review der Studie beauftragt, um die Qualität und Akzeptanz der entwickelten Ökobilanzmethode sicherzustellen, die den Anforderungen der internationalen Standards ISO 14040 und 14044, sowie ISO 14067 und 14071 entsprechen. Diese Normen definieren die Qualitätskriterien, die an eine Ökobilanz gestellt werden, und sichern so die Gültigkeit und Zuverlässigkeit der Studie. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Beantwortung der zentralen Frage, ob die Studie nach dem aktuellen Stand des Wissens durchgeführt wurde und ob die Ergebnisse objektiv genug sind, um verlässliche Schlussfolgerungen für die untersuchten Wildtierbrücken zu ziehen.

In der kritischen Bewertung wurden folgende Schlüsselaspekte geprüft:

- Die Methodik, um sicherzustellen, dass das Vorgehen den Zielen der Studie entspricht und mit den ISO-Normen 14040:2006 und 14044:2006 übereinstimmt.
- Die verwendeten Daten und Annahmen, um zu bewerten, ob sie angemessen und relevant für die Ziele der Studie sind.
- Die Transparenz und Zielkonformität der Unterlagen.
- Ob die Ergebnisse und deren Interpretationen den definierten Zielen und Grenzen der Studie gerecht werden.

Die internationalen Normen dienten dabei als Benchmark, um die methodische Strenge und Aussagekraft der Studienergebnisse zu gewährleisten.

2. Vorgehen

Das Review wurde entsprechend den Anforderungen Abschnitt 6.3 der ISO 14044 bzw. gemäss der Technischen Spezifikation in DIN CEN ISO/TS 14071 als Prüfung durch einen externen, unabhängigen Reviewer vorgenommen. Zusätzlich wurden die Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz v6.0 der Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich als methodische Grundlage in der Prüfung herangezogen.

2.1 Art des Reviews

Es gibt zwei mögliche Vorgehen der kritischen Prüfung einer LCA-Studie:

- Version I:
  kontinuierlich und parallel zur Entwicklung der Ökobilanz.

- Version II:
  separat nach Abschluss der Ökobilanz und getrennt von dieser.

Im vorliegenden Fall wurde die Vorgehensweise gemäss Version II gewählt, d.h. der Reviewer wurde nachträglich um eine kritische Prüfung der Studie gebeten.

2.2 Umfang der Prüfung

Bei der Durchführung einer Ökobilanz müssen einerseits grosse Datenmengen verarbeitet und andererseits Berechnungen der Umweltauswirkungen durchgeführt werden. Eine Überprüfung aller Berechnungen ist für die Reviewer nicht möglich. Entscheidend sind jedoch die Überprüfung und Diskussion des methodischen Vorgehens. Zudem können die verwendeten Daten zumindest stichprobenartig bezüglich ihrer Plausibilität überprüft werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen den Vordergrund- und den Hintergrunddaten.

- Als Vordergrunddaten werden diejenigen Angaben bezeichnet, welche direkt erhoben oder vom Auftraggeber der Studie zur Verfügung gestellt werden. Dabei handelt es sich z.B. um die Art und Menge der verwendeten Materialien, der Transporte und der benötigten Energieträger.
- Als Hintergrunddaten werden die Informationen über die Umweltwirkungen bezeichnet, die für die Vordergrunddaten als Emissionen und Ressourcenbedarf für die Bereitstellung der Materialien und Dienstleistungen auftreten. Die Daten stammen meistens aus anerkannten Ökodatenbanken. Im Rahmen des Review Prozesses wurde die Verknüpfung der Vordergrunddaten mit den Hintergrunddaten geprüft. Dazu hatten die Reviewer Einblick in das gesamte Ökobilanzmodell. Die Berechnungen der Sachbilanz und der Wirkbilanz erfolgte durch anerkannte Softwaretools, eine detaillierte Überprüfung war entsprechend nicht notwendig. Zudem wurde die Plausibilität der Daten, die Transparenz und damit die Nachvollziehbarkeit der Studie begutachtet.

Die relevanten Unterlagen der Studie wurden dem Reviewer am 17. Mai 2024 zur Verfügung gestellt. Am 23. Mai 2024 erfolgte die erste Rückmeldung an die Verfasser sowie eine erste gemeinsame Besprechung. In Kapitel 3.5 sind detaillierte Rückmeldungen und Kommentare aufgeführt, welche von den Verfassern der Studie im Verlauf des Reviews nochmals überarbeitet wurden.

3. Kommentare zum Studien-Bericht

In diesem Kapitel wird zuerst die Arbeit als Ganzes kritisch gewürdigt. Anschliessend wird auf die verschiedenen Schritte bei der Erstellung einer Ökobilanz detaillierter eingegangen.

3.1 Allgemeine Kommentare und Würdigung

Die Vordergrunddaten, Berechnungen und Annahmen sind umfassend und nachvollziehbar aufgeführt. Der Detaillierungsgrad der einzelnen Datensätze und Prozesse ist sehr gut und die Sachbilanz wurde übersichtlich dargestellt. Die Herkunft der Daten ist offen nachgewiesen und es wurden aktuelle und passende Quellen verwendet. Die Erfüllung der technischen und gesetzlichen Anforderungen an das Asphaltmischgut wurden innerhalb dieses Reviews nicht geprüft und werden als gegeben betrachtet.

3.2 Methodik

Das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Studie sind klar definiert. Die Methodik richtet sich nach den relevanten Normen ISO 14040/44 und EN 15804+A2. Als funktionelle Einheit wurde 1 m² Kantonsstrasse, bestehend aus Deck-, Binder- und Tragschicht gewählt, wobei die Ökobilanz separat für die einzelnen Belagstypen berechnet wurde. Ebenfalls wird eine Nutzungsdauer von 60 Jahre in der

funktionellen Einheit berücksichtigt. Die Systemgrenze ist sinnvoll gewählt und gut dokumentiert. Sie umfasst nebst den Errichtungsphasen A1-A5 auch die Nutzungsphase B4, die Entsorgungsphasen C1-C4 und das Modul D. Die Nutzungsdauer wurde so gewählt, dass im Modul B4 alle Schichten mindestens einmal ersetzt werden.

Bei der Wirkungsabschätzung wurden verschiedene Methoden angewandt, was die Aussagekraft über die Umweltwirkung der Studie verstärkt. Nebst den Treibhausgasemissionen IPCC 2021 GWP 100a wurden auch die Methode der ökologischen Knappheit 2021 (UBP21) und die Primärenergie (Cumulative Energy Demand) betrachtet. Gerade bei Baumaterialien, bei denen das Thema natürliche Ressourcen eine wesentliche Rolle spielt, erweist sich die Auswertung in UBP als vorteilhaft. Denn die mit dem Land und Ressourcenverbrauch verbundenen Umweltwirkungen, können mit den Methoden der Treibhausgasemissionen und Primärenergie nicht gesamthaft abgebildet werden. Mit den Ökofaktoren der Methode der ökologischen Knappheit ist dies jedoch möglich.

3.3 Daten

Die Sachbilanz ist gut nachvollziehbar anhand der Module der Norm EN 15804+A2 aufgeführt und alle Quellen sind dokumentiert. Die graphische Darstellung, wie die einzelnen Module miteinander verbunden sind, hilft zusätzlich dem Verständnis.

Die Vordergrunddaten (Material- und Energiebedarf und Transporte) basieren auf spezifischen Daten für die betrachteten Asphaltschichten und weisen einen sehr hohen Detailierungsgrad auf. Dabei widerspiegeln die Daten den aktuellen Stand der Technik. Die Massenbilanzen der Herstellungsprozesse stimmen und die Aufwände der Baumaschinen wurden korrekt auf die betroffenen Schichten aufgeteilt. Die Materialmengen und Annahmen erscheinen als eher konservativ abgeschätzt, was eine Unterschätzung der Umweltwirkung verhindert.

Im Hintergrund wurde für diese Studie die Datenbank der Ökoinventare der Bundesverwaltung (BAFU:2018) verwendet. Wo immer möglich, wurden Datensätze verwendet, die für Herstellungs- und Entsorgungsprozesse in der Schweiz repräsentativ sind. Die Vordergrunddaten konnten mit repräsentativen Hintergrunddatensätzen aus der Datenbank oder vertretbaren Proxys verknüpft werden. Die detaillierte Zuordnung der Vordergrund- mit den Hintergrunddaten ist in der Dokumentation einsehbar.

3.4 Resultate und Interpretation

Die Resultate sind klar und logisch strukturiert, für Dritte gut verständlich und gestaltet. Die Auswertung ist separat für jede Schicht und jede Wirkungsabschätzungsmethode graphisch aufgeführt. Erwähnenswert ist die Darstellung der Umweltwirkung in kg CO_2-eq über die gesamte Nutzungsdauer von 60 Jahren. Dabei wird klar ersichtlich, welchen Einfluss Erhaltungsmassnahmen der einzelnen Schichten in Bezug auf die Treibhausgasemissionen haben. Das Modul D wird separat ausgewiesen und nicht mit den Umweltwirkungen der übrigen Module verrechnet. Aus der Studie gehen verschiedene Schlussfolgerungen hervor, welche durch die Resultate unterstützt werden. Es wäre spannend zu sehen, welchen Einfluss die Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer der Schichten auf die Umweltwirkung des gesamten Lebenszyklus hat. Anhand einer Sensitivitätsanalyse könnte dies untersucht werden.

3.5 Detaillierte Rückmeldungen

Im Folgenden werden detaillierte Rückmeldungen und Kommentare des Prüfers aufgeführt und die anschliessende Bearbeitung dokumentiert.

Pos	Rückmeldung und Kommentar	Bearbeitung
1	Die verwendete Datenbank (UVEK 2018) ist veraltet. Es wird empfohlen, die neuste Version aus dem Jahr 2022 zu verwenden.	Aus technischen Gründen war es den Verfassern nicht möglich, die aktuelle Version der Datenbank zu verwenden. Da es sich bei diesem Projekt um eine Methodenentwicklung handelt, genügt der Hinweis, dass für die Anwendung die neueste Version der Datenbank zu verwenden ist.
2	In der Methodik wird angegeben, dass die Methode der ökologischen Knappheit mit dem Gewichtungsset von ecoinvent 3.10 verwendet wird. Generell sollten die Gewichtungssets von Methoden und Datenbanken nicht vermischt werden. Es wird empfohlen, das Gewichtungsset der UVEK zu verwenden.	Das Gewichtungsset wurde angepasst.
3	Es wurde angenommen, dass die Asphaltproduktion für alle Schichten gleich ist. Der Energiebedarf (Wärme und Strom) der Herstellung von Deckschichten unterscheidet sich von Binder- und Tragschichten. Es wird empfohlen, die Asphaltproduktion je nach Schicht zu bilanzieren.	Der Energiebedarf (Wärme) wurde für die einzelnen Schichten angepasst. Neu beträgt der Wärmebedarf für die Binder- und Tragschicht 61.4 kWh/t und für die Deckschicht 75 kWh/t.
4	Bei der RAP- und Asphaltproduktion sollte die Landnutzung («Transformation» und «Occupation») hinzugefügt werden. Ebenfalls fehlen Infrastrukturelemente («conveyor belt» und «industrial machine, heavy»).	Die Landnutzung und fehlende Infrastruktur-prozesse wurden der Asphaltproduktion hinzugefügt.
5	Bei der Asphaltproduktion sollte eine Ressourcenkorrektur für Primär-Material (Sand und Kies) hinzugefügt werden.	Die Ressourcenkorrektur wurde für Kies und Sand hinzugefügt. Die Recyclingrate (83%) wurde von der Publikation «Gauch et al. 2016, MatCH Studie» übernommen.
6	Die Transportdistanz A4 scheint etwas hoch (115 km) und sollte überprüft und allenfalls angepasst werden.	Die Transportdistanz wurde auf 34 km angepasst.
7	Der Aufwand des Recyclings kann anhand einer ökonomischer Allokation aufgeteilt werden (Modul C3).	Die Aufwände des Recyclings wurden anhand einer ökonomischen Allokation aufgeteilt.
8	Wird das Modul D mit den Umweltwirkungen der übrigen Modulen verrechnet oder separat ausgewiesen?	Das Modul D wird separat ausgewiesen.
9	Es sollte in der Dokumentation beschrieben werden, wie mit Sekundärsplitt umgegangen wird.	Die Herstellung von Sekundärsplitt wird in der Methode nicht berücksichtigt. Aus dem Aufbereitungsprozess von Ausbauasphalt geht nur RAP hervor.

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die entwickelte Ökobilanzmethode für Asphaltbeläge wurde nach dem heutigen Stand der Technik und Wissenschaft erstellt und transparent dokumentiert. Durch die Einführung eines einheitlichen Verfahrens wird eine konsistente und vergleichbare Analyse der ökologischen Auswirkungen verschiedener Asphaltmischungen und Bauweisen ermöglicht. Die Methode berücksichtigt umfassend alle relevanten Phasen des Lebenszyklus eines Asphaltbelags, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und den Einbau bis hin zur Nutzung und Entsorgung. Es wird empfohlen, die Projektdokumentation in einem technischen Bericht zusammenzufassen. Abschliessend lässt sich sagen, dass die vorliegende Studie den internationalen Standards für Ökobilanzen entspricht.

Name und Unterschrift des unabhängigen, externen Prüfers	Ort und Datum
	
Dominik Osterwalder Umtec Technologie AG	Zürich, 19.06.2024

Annexe B - Figures et tableaux supplémentaires de résultats

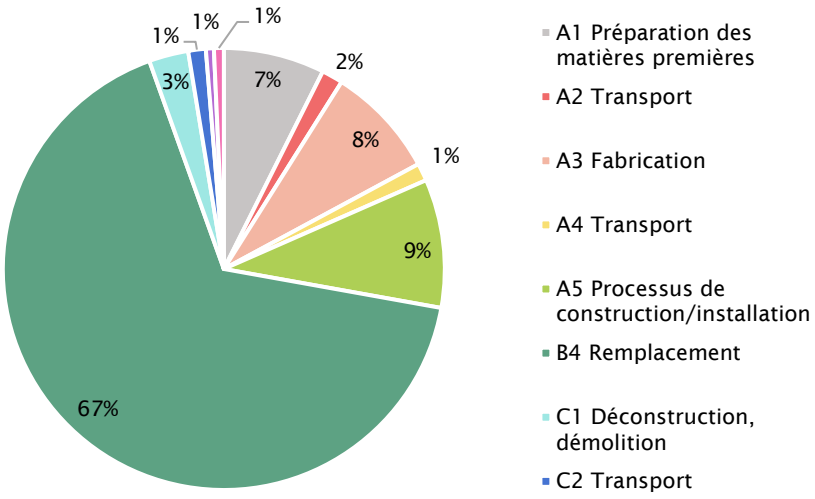

Illustration 15 : Répartition en pourcentage des émissions de gaz à effet de serre dans les phases de vie considérées pour la couche de liaison.

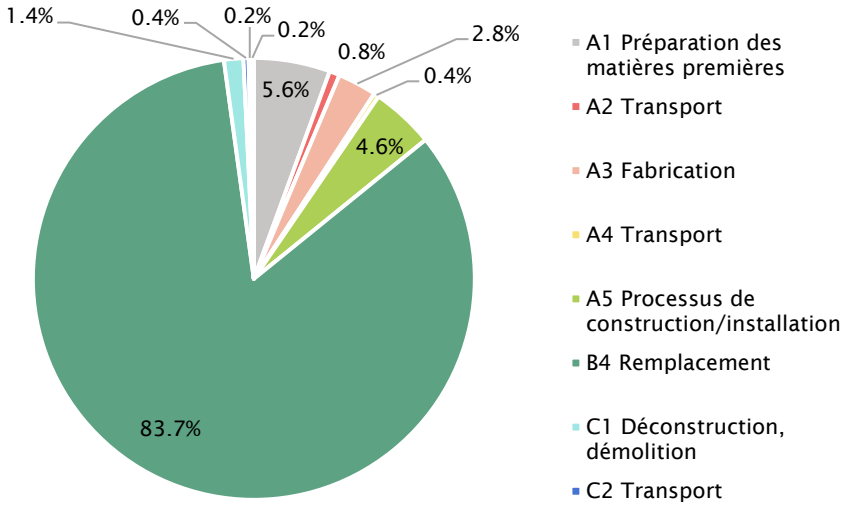

Illustration 16 : Répartition en pourcentage des émissions de gaz à effet de serre dans les phases de vie considérées pour la couche de roulement.

Tableau 6 : Évaluation des catégories d'impact dans le calcul de la saturation écologique en points de charge environnementale (UCE21) et en pourcentage de 1 m^2 des couches d'asphalte analysées et sur toute la durée d'utilisation de 60 ans.

Catégorie d'impact	Couche de roulement (UCE'21)	Couche de roulement (%)	Couche de liaison (UCE'21)	Couche de liaison (%)	Couche de base (UCE'21)	Couche de base (%)
Climate change | Global warming potential (GWP100)	74069.55	58.46%	36352.44	60.31%	13787.17	59.89%
Energy resources | Energy resources	19859.37	15.68%	8072.50	13.39%	2949.97	12.82%
Emissions to air | Air pollutants and PM	14302.49	11.29%	6585.24	10.93%	2482.05	10.78%
Emissions to air | Heavy metals into air	4768.87	3.76%	2551.38	4.23%	1034.92	4.50%
Mineral resources | Mineral resources	4163.13	3.29%	2013.05	3.34%	838.83	3.64%
Waste disposal | Radioactive waste to deposit	2959.83	2.34%	1589.30	2.64%	700.99	3.05%
Emissions to water | Water pollutants	3234.80	2.55%	1267.80	2.10%	474.01	2.06%
Land use | Land use	1112.00	0.88%	698.35	1.16%	296.59	1.29%
Emissions to soil | Heavy metals into soil	1253.58	0.99%	662.17	1.10%	264.85	1.15%
Emissions to air | Carcinogenic substances into air	360.28	0.28%	192.02	0.32%	76.57	0.33%
Waste disposal | Waste, non radioactive	228.42	0.18%	116.64	0.19%	44.29	0.19%
Emissions to water | Radioactive substances into water	148.97	0.12%	79.31	0.13%	34.67	0.15%
Ozone depletion | Ozone depletion	194.48	0.15%	74.74	0.12%	27.95	0.12%
Emissions to water | Heavy metals into water	30.16	0.02%	12.63	0.02%	4.78	0.02%
Emissions to soil | Pesticides into soil	7.14	0.01%	3.72	0.01%	1.45	0.01%
Emissions to water | POP into water	0.14	0.00%	0.09	0.00%	0.04	0.00%
Emissions to air | Radioactive substances into air	0.10	0.00%	0.05	0.00%	0.02	0.00%
Natural resources | Biotic resources	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
Water use | Water resources, evaporated	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%

Annexe C - Modélisation des processus dans openLCA

Flow	Désignation
bitumen, at refinery/kg/CH U	A1 Bitume primaire
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	C4 Décharge
transport, freight, lorry 32-40 metric ton, fleet average/tkm/CH U	Tous les transports (A2, A4, C2)

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
Sand, at mine/CH U	1	kg	
Gravel	-0.83	kg	- Correction des ressources pour la part de recyclage (car celle-ci est encore disponible en fin de vie) - On a choisi ici les gravillons comme "Elementary Flow", car le processus "Sand, at mine/CH U" est également composé de gravillons. Si le processus devait être structuré différemment à l'avenir, il faudrait l'adapter en conséquence.
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A1 Sable	1	kg	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
Gravel, crushed, at mine/CH U	1	kg	
Gravel	-0.83	kg	- Correction de la ressource pour la part de recyclage (car elle est encore disponible en fin de vie) - N'est qu'un "flux élémentaire".
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A1 Gravillon	1	kg	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
Dolomite, at plant/RER U	0.06	kg	Famsa 2023, Dossier qualité 2023, page 26 (prise en compte des matières premières disponibles dans la base de données du DETEC)
Feldspar, at plant/RER S	0.07	kg	
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	0.3	kg	
Silica sand, at plant/DE U	0.57	kg	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A1 Filler	1	kg	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
bitumen, at refinery/kg/CH U	960	kg	Données Umtec Technologie AG (demande à Ingevity et CTS Bitumen AG)
Chemical plant, organics/RER/I U	9.52E-08	Item(s)	
Conveyor belt, at plant/RER/I U	1.95E-06	m	
diesel, burned in building machine, without particle filter/CH U	0.79611	MJ	
electricity, medium voltage, at grid/kWh/DE U	20	kWh	
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/RER U	100	kWh	
Polybutadiene, at plant/RER U	40	kg	4 % de polybutadiène dans le PmB (accord sur le pourcentage et la matière première avec Umtec Technologie AG)
transport, freight, lorry 32-40 metric ton, fleet average/RER U	40*300+960*300	kg*km	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A1 PmB	1000	kg	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A1 Filler	2.06	kg	
A1 PmB	4.563	kg	
A1 Sable	14.5	kg	
A1 Gravillon	52.47	kg	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A1 Couche de roulement	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A1 Filler	2.894	kg	
A1 PmB	20.62	kg	
A1 Sable	40.03	kg	
A3 Production RAP	60.66*0.19	kg	Allocation économique 81% C3 et 19% Module D
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A1 Couche de liaison	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A1 Filler	3.5	kg	
A1 Bitume primaire	2.92	kg	
A1 Sable	10.31	kg	
A1 Gravillon	54.92	kg	
A3 Production RAP	104.05*0.19	kg	Allocation économique 81% C3 et 19% Module D
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A1 Couche de base	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
Building, hall, steel construction/CH/I U	6.00E-06	m^2	Lenk 2023 (hypothèses : surface 900 m^2 , quantité de production 150'000 t/a, durée de vie 20 ans)
Conveyor belt, at plant/RER/I U	750.0/5000000000	m	à partir de concrete mixing plant CH, 100'000t/a et 50 ans de durée de vie de l'infrastructure
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.00105056	kWh	Liechti et al. 2016, dossier de recherche PLANET EP-2 : Bilan écologique des asphaltes à basse température
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH U	0.004	kWh	Lenk 2023, données de l'usine d'asphalte GABAG
Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/CH U	0.0614	kWh	- Milachowski et al. 2010, Réalisation d'un écobilan pour la construction et l'utilisation d'un tronçon d'autoroute - Réduit selon les données Umtec Technologie AG
Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	160000.0/5000000000	kg	à partir de concrete mixing plant CH, 100'000t/a et 50 ans de durée de vie de l'infrastructure
Occupation, industrial area	6.00E-06	m *a^2	30x30m, 900 m^2 150'000 t/a Production
Occupation, traffic area, rail/road embankment	2.80E-06	m *a^2	Hypothèse : des deux côtés une route de 7m de large, donc 60mx7m = 420 m^2 divisé par 150'000 t/a
Débit de sortie(s)	**Quantité**	**Unité**	
A3 Production de l'asphalt couche de liaison et base	1	kg	
Anthracene	3.80E-08	g	Liechti et al. 2016, dossier de recherche PLANET EP-2 : Bilan écologique des asphaltes à basse température
Benzene	7.13E-04	g	
Benzo(a)pyrene	0	g	
Carbon monoxide	0.2644	g	

Naphthalene	1.17E-05	g	
Nitrogen dioxide	0.02404	g	
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1.64E-05	g	
Particulates	1.67E-04	g	
Phenanthrene	1.14E-06	g	
Sulfur oxides	9.50E-05	g	
Toluene	9.26E-05	g	
VOC, volatile organic compounds	0.01022	g	
Xylenes, unspecified	3.09E-05	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
Building, hall, steel construction/CH/I U	6.00E-06	m^2	Lenk 2023 (hypothèses : surface 900 m^2 , quantité de production 150'000 t/a, durée de vie 20 ans)
Conveyor belt, at plant/RER/I U	750.0/5000000000	m	à partir de concrete mixing plant CH, 100'000t/a et 50 ans de durée de vie de l'infrastructure
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.00105056	kWh	Liechti et al. 2016, dossier de recherche PLANET EP-2 : Bilan écologique des asphaltes à basse température
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH U	0.004	kWh	Lenk 2023, données de l'usine d'asphalte GABAG
Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/CH U	0.075	kWh	Milachowski et al. 2010, réalisation d'un écobilan pour la construction et l'utilisation d'un tronçon d'autoroute
Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	160000.0/5000000000	kg	à partir de concrete mixing plant CH, 100'000t/a et 50 ans de durée de vie de l'infrastructure
Occupation, industrial area	6.00E-06	m *a^2	30x30m, 900 m^2 150'000 t/a Production
Occupation, traffic area, rail/road embankment	2.80E-06	m *a^2	Hypothèse : des deux côtés une route de 7m de large, donc 60mx7m = 420 m^2 divisé par 150'000 t/a
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A3 Production d'asphalte couche de roulement	1	kg	
Anthracene	3.80E-08	g	Liechti et al. 2016, dossier de recherche PLANET EP-2 : Bilan écologique des asphaltes à basse température
Benzene	7.13E-04	g	
Benzo(a)pyrene	0	g	
Carbon monoxide	0.2644	g	
Naphthalene	1.17E-05	g	
Nitrogen dioxide	0.02404	g	
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1.64E-05	g	
Particulates	1.67E-04	g	
Phenanthrene	1.14E-06	g	
Sulfur oxides	9.50E-05	g	
Toluene	9.26E-05	g	
VOC, volatile organic compounds	0.01022	g	
Xylenes, unspecified	3.09E-05	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.0035943	MJ	- Données Umtec Technologie AG (valeur moyenne de diverses usines d'asphalte) - A l'avenir, celui-ci pourrait être amélioré dans le domaine de l'infrastructure (voir également la modélisation de la fabrication d'asphalte A3). Par exemple, grâce au processus "Sorting plant for construction waste/CH/I U".
diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	0.0058407	MJ	
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH U	0.0052	kWh	
Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	3.70E-04	kg	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A3 Production RAP	1	kg	

Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH U	0.05	kg	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
Building machine/RER/I U	3.61E-06	Item(s)	Lenk 2023 : Annexe Construction d'une piste d'essai à Frick (largeur : 7,55 m et longueur : 150 m) avec l'usine d'asphalte GABAG. Lenk a calculé elle-même les polluants atmosphériques des machines de pose et de dépose en se basant sur le modèle de calcul Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.134867	kg	
Lastwagen Transport	7.92*3.775	t*km	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Finisseurs d'asphalte	3.775	m^2	
Ammonia	0.00108	g	
Carbon black	0.00108	g	
Carbon dioxide, fossil	424.9434	g	
Carbon monoxide, fossil	1.74769	g	
Dinitrogen monoxide	0.01896	g	
Methane	0.00163	g	
Nitrogen monoxide	0.43507	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.14273	g	
Particulates, < 10 um	0.00813	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.00764	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
Building machine/RER/I U	8.33E-07	Item(s)	Lenk 2023 : Annexe Construction d'une piste d'essai à Frick (largeur : 7,55 m et longueur : 150 m) avec l'usine d'asphalte GABAG. Lenk a calculé elle-même les polluants atmosphériques des machines de pose et de dépose en se basant sur le modèle de calcul Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.017733	kg	
Lastwagen Transport	0.61*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Petit rouleau vibrant	7.55	m^2	
Ammonia	1.10E-04	g	
Carbon black	0.01707	g	
Carbon dioxide, fossil	55.776	g	
Carbon monoxide, fossil	0.45429	g	
Dinitrogen monoxide	0.00187	g	
Methane	8.50E-04	g	
Nitrogen monoxide	0.65113	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.07351	g	
Particulates, < 10 um	0.02133	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.02005	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
Building machine/RER/I U	1.11E-06	Item(s)	Lenk 2023 : Annexe Construction d'une piste d'essai à Frick (largeur : 7,55 m et longueur : 150 m) avec l'usine d'asphalte GABAG. Lenk a calculé elle-même les polluants atmosphériques des machines de pose et de dépose en se basant sur le modèle de calcul Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.133933	kg	
Lastwagen Transport	0.20*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Compresseur à vis	7.55	m^2	
Ammonia	7.30E-04	g	
Carbon black	7.30E-04	g	
Carbon dioxide, fossil	421.806	g	

Carbon monoxide, fossil	1.73514	g	
Dinitrogen monoxide	0.01283	g	
Methane	0.00367	g	
Nitrogen monoxide	2.80518	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.31216	g	
Particulates, < 10 um	0.0055	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.00517	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
Building machine/RER/I U	3.88E-06	Item(s)	Lenk 2023 : Annexe Construction d'une piste d'essai à Frick (largeur : 7,55 m et longueur : 150 m) avec l'usine d'asphalte GABAG. Lenk a calculé elle-même les polluants atmosphériques des machines de pose et de dépose en se basant sur le modèle de calcul Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.153533	kg	
Lastwagen Transport	5.69*3.775	t*km	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Rouleau statique à trois roues	3.775	m^2	
Ammonia	0.00123	g	
Carbon black	0.00123	g	
Carbon dioxide, fossil	483.6825	g	
Carbon monoxide, fossil	2.91819	g	
Dinitrogen monoxide	0.02158	g	
Methane	0.00185	g	
Nitrogen monoxide	0.49531	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.1625	g	
Particulates, < 10 um	0.00925	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.0087	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
Building machine/RER/I U	1.11E-06	Item(s)	Lenk 2023 : Annexe Construction d'une piste d'essai à Frick (largeur : 7,55 m et longueur : 150 m) avec l'usine d'asphalte GABAG. Lenk a calculé elle-même les polluants atmosphériques des machines de pose et de dépose en se basant sur le modèle de calcul Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.133933	kg	
Lastwagen Transport	3.25*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Machine de nettoyage pour surface fraisée	7.55	m^2	
Ammonia	0.00267	g	
Carbon black	0.00267	g	
Carbon dioxide, fossil	1185.24	g	
Carbon monoxide, fossil	4.302	g	
Dinitrogen monoxide	0.04667	g	
Methane	0.004	g	
Nitrogen monoxide	1.07093	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.35135	g	
Particulates, < 10 um	0.02	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.0188	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
Building machine/RER/I U	4.16E-06	Item(s)	Lenk 2023 : Annexe Construction d'une piste d'essai à Frick (largeur : 7,55 m et longueur : 150 m) avec l'usine d'asphalte GABAG.
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.157533	kg	

Transport par camion	8.12*1.88 750	t*km	Lenk a calculé lui-même les polluants atmosphériques des machines de pose et de dépose en se basant sur le modèle de calcul Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Rouleau vibrant	1.8875	m²	
Ammonia	0.00112	g	
Carbon black	0.00112	g	
Carbon dioxide, fossil	496.4064	g	
Carbon monoxide, fossil	2.64215	g	
Dinitrogen monoxide	0.01954	g	
Methane	0.00168	g	
Nitrogen monoxide	0.44845	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.14713	g	
Particulates, < 10 um	0.00838	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.00787	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
A5 Finisseurs d'asphalte	1	m²	Comme la couche de roulement, la couche de liaison et la couche de base sont toutes les trois refaites lors de la première pose, le nettoyage de la surface de base est réparti de manière égale sur tous les processus.
A5 Petit rouleau vibrant	1	m²	
A5 Compresseur à vis	1/3	m²	
A5 Rouleau statique à trois roues	1	m²	
A5 Machine de nettoyage pour surface de fraisée	1/3	m²	
A5 Rouleau vibrant	1	m²	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Couche de roulement	1	m²	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
A5 Finisseurs d'asphalte	1	m²	Comme la couche de roulement, la couche de liaison et la couche de base sont toutes les trois refaites lors de la première pose, le nettoyage de la surface de base est réparti de manière égale sur tous les processus.
A5 Petit rouleau vibrant	1	m²	
A5 Compresseur à vis	1/3	m²	
A5 Rouleau statique à trois roues	1	m²	
A5 Machine de nettoyage pour surface fraisée	1/3	m²	
A5 Rouleau vibrant	1	m²	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Couche de liaison	1	m²	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
A5 Finisseurs d'asphalte	1	m²	Comme la couche de roulement, la couche de liaison et la couche de base sont toutes les trois refaites lors de la première pose, le nettoyage de la surface de base est réparti de manière égale sur tous les processus.
A5 Petit rouleau vibrant	1	m²	
A5 Compresseur à vis	1/3	m²	
A5 Rouleau statique à trois roues	1	m²	
A5 Machine de nettoyage pour surface fraisée	1/3	m²	
A5 Rouleau vibrant	1	m²	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
A5 Couche de base	1	m²	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**

Building machine/RER/I U	1.24E-05	Item(s)	Lenk 2023 : Annexe Construction d'une piste d'essai à Frick (largeur : 7,55 m et longueur : 150 m) avec l'usine d'asphalte GABAG. Lenk a calculé elle-même les polluants atmosphériques des machines de pose et de dépose en se basant sur le modèle de calcul Tier 3 (EMEP/EEA air polutant emission inventory guidebook 2019 - non road mobile source and machinery).
diesel, at regional storage/kg/CH U	0.498	kg	
Transport par camion	6.78*7.55	t*km	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
C1 Fraiseuse routière	7.55	m²	
Ammonia	0.00572	g	
Carbon black	0.00572	g	
Carbon dioxide, fossil	1568.7	g	
Carbon monoxide, fossil	9.21972	g	
Dinitrogen monoxide	0.10001	g	
Methane	0.00857	g	
Nitrogen monoxide	20.08251	g	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds	0.75298	g	
Particulates, < 10 um	0.12859	g	
Particulates, > 0.2 um, and < 2.5 um	0.12087	g	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
A5 Finisseurs d'asphalte	1	m²	Comme la couche de roulement et la couche de liaison sont toutes deux renouvelées en 20 et 40, le nettoyage de la surface de base est réparti de manière égale sur tous les processus.
A5 Petit rouleau vibrant	1	m²	
A5 Compresseur à vis	0.5	m²	
A5 Rouleau statique à trois roues	1	m²	
A5 Machine de nettoyage pour surface fraisée	0.5	m²	
A5 Rouleau vibrant	1	m²	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
B4 Pose de la couche de liaison 20a, 40a	1	m²	

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**
A5 Finisseurs d'asphalte	1	m²
A5 Petit rouleau vibrant	1	m²
A5 Compresseur à vis	1	m²
A5 Rouleau statique à trois roues	1	m²
A5 Machine de nettoyage pour surface fraisée	1	m²
A5 Rouleau vibrant	1	m²
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**
B4 Pose de la couche de roulement 10a, 30a, 50a	1	m²

Input Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	**Sources/remarques**
A5 Finisseurs d'asphalte	1	m²	Comme la couche de roulement et la couche de liaison sont toutes deux renouvelées en 20 et 40, le nettoyage de la surface de base est réparti de manière égale sur tous les processus.
A5 Petit rouleau vibrant	1	m²	
A5 Compresseur à vis	0.5	m²	
A5 Rouleau statique à trois roues	1	m²	
A5 Machine de nettoyage pour surface fraisée	0.5	m²	
A5 Rouleau vibrant	1	m²	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
B4 Pose de la couche de roulement 20a, 40a	1	m²	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A3 Production RAP	61.08*0.81	kg	Allocation économique 81% C3 et 19% Module D
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
C3 Couche de roulement	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A3 Production RAP	103.09*0.81	kg	Allocation économique 81% C3 et 19% Module D
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
C3 Couche de liaison	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A3 Production RAP	145.83*0.81	kg	Allocation économique 81% C3 et 19% Module D
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
C3 Couche de base	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A1 Filler	-10.26	kg	- Filler, bitume primaire, sable et gravillons : produits substitués - PmB négligé dans l'asphalte recyclé et supposé être "seulement" du bitume primaire. - Répartition des produits substitués selon la composition des matières premières dans A1 - Allocation économique 81% C3 et 19% module D
A1 Bitume primaire	-22.72	kg	
A1 Sable	-72.2	kg	
A1 Gravillons	-261.3	kg	
A3 Production RAP	366.48*0.19	kg	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
D Recyclage Couche de roulement	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A1 Bitume primaire	-5.85	kg	- Bitume primaire, sable et gravillons : produits substitués - PmB négligé dans l'asphalte recyclé et supposé être "seulement" du bitume primaire. - Répartition des produits substitués selon la composition des matières premières dans A1 - Allocation économique 81% C3 et 19% module D
A1 Sable	-21.13	kg	
A1 Gravillons	-100.27	kg	
A3 Production RAP	127.28*0.19	kg	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
D Recyclage Couche de liaison	1	m^2	

Input Flow(s)	Quantité	Unité	Sources/remarques
A1 Filler	-0.83	kg	- Filler, bitume primaire, sable et gravillons : produits substitués - Répartition des produits substitués selon la composition des matières premières en A1 - Allocation économique 81% C3 et 19% module D
A1 Bitume primaire	-1.88	kg	
A1 Sable	-2.45	kg	
A1 Gravillons	-36.61	kg	
A3 Production RAP	41.78*0.19	kg	
Output Flow(s)	**Quantité**	**Unité**	
D Recyclage Couche de base	1	m^2	