

Potentiels du sol fluide dans le génie civil



Source de la photo de couverture: Photo prise par nos soins lors de la mise en place de sol fluide sur un chantier dans le canton de Zurich

Hombrechtikon, le 7 juillet 2026

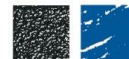
Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Impressum

Mandant	Office fédéral de l'environnement (OFEV) CH-3003 Berne
Mandataire	Umtec Technologie AG Eichalstrasse 54 8634 Hombrechtikon
Auteurs	Angie Celis Thomas Pohl
Groupe d'accompagnement	Niklas Nierhoff, Office fédéral de l'environnement (OFEV) David Hiltbrunner, Office fédéral de l'environnement (OFEV) Pierryves Padey, Office fédéral de l'environnement (OFEV) Jelena Dolecek, Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Remarque

Cette étude a été réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le mandataire est seul responsable de son contenu. L'étude est également publiée en allemand.



Résumé

Le sol fluide est un matériau de remblayage temporairement fluide et autocompactant, composé principalement de matériaux d'excavation traités et stabilisé par de faibles ajouts de liants hydrauliques (généralement du ciment), d'eau et d'additifs. Après mise en œuvre, le matériau durcit et atteint une portance comparable, du point de vue géotechnique, à celle du sol environnant. Cela permet de valoriser les matériaux d'excavation et de réduire l'utilisation de matières premières primaires.

Le présent rapport évalue le potentiel écologique du sol fluide dans le génie civil suisse sur la base d'un écobilan. L'étude porte sur une formulation moyenne de sol fluide, dérivée de douze formulations pratiques (également appelée «sol fluide conventionnel» dans le présent rapport). Sur cette base, une variante améliorée avec un type de ciment adapté ainsi que des variantes à base de charbon végétal sont examinées à partir des indications fournies par les fabricants. Les résultats des variantes de sol fluide examinées sont ensuite comparés à ceux des remblais de tranchées conventionnels à base de grave et de grave avec une couche de béton d'enrobage. Il est également tenu compte du fait que le sol fluide permet de réduire la largeur de la tranchée grâce à ses propriétés fluides et à l'absence de travaux de compactage, ce qui réduit encore davantage les besoins en matériaux et donc les impacts environnementaux.

En complément de l'évaluation écologique, l'étude examine de manière approfondie la compatibilité environnementale des composants utilisés dans le sol fluide, les conditions techniques générales et les domaines d'application, ainsi que sa classification au regard de la législation sur les déchets, les obstacles et les solutions proposées.

Conditions-cadres, frontières du système et méthodologie de l'écobilan

Afin de pouvoir comparer les différentes variantes de remblayage (grave avec béton d'enrobage, grave sans béton d'enrobage, sol fluide, sol fluide avec charbon végétal et sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal), une tranchée de conduite simplifiée a été définie comme système de référence. L'unité fonctionnelle est le remblayage de 1 m³ de tranchée répondant à des exigences techniques définies. Pour les cas d'application examinés dans cette étude, les systèmes sont considérés comme fonctionnellement équivalents.

L'écobilan couvre la phase de fabrication (A1 – A3), le transport et la mise en œuvre (A4 – A5) ainsi que le démantèlement et l'élimination en fin de vie (C1 – C4).

Umtec Technologie AG (UTech) a réalisé l'écobilan conformément aux règles KBOB v8.1 [1]. Pour évaluer les impacts environnementaux, les méthodes suivantes ont été utilisées : émissions de gaz à effet de serre (GES), unités de charge écologique (UCE = UBP) selon la méthode de la saturation écologique, et consommation d'énergie cumulée (CEC). Les données d'écobilan élaborées dans le cadre de ce projet sont publiées dans la base de données d'écobilan de l'OFEV.

Résultats de la formulation moyenne de sol fluide

Les émissions totales de gaz à effet de serre de la formulation moyenne de sol fluide s'élèvent à 54.6 kg CO₂-eq par m³ de remblayage de tranchée (figure 0-1). 74 % des émissions sont imputables à la phase de fabrication (A1 – A3), 7 % à la mise en œuvre (A4 – A5) et 19 % à la phase d'élimination (C1 – C4).

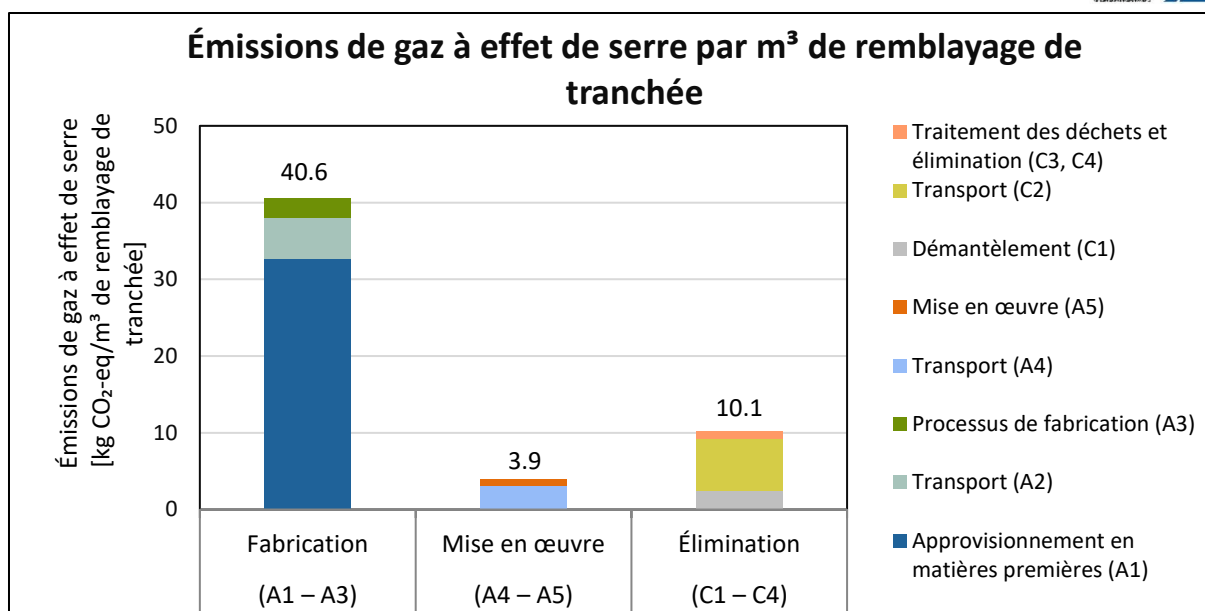
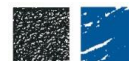


Figure 0-1: Émissions totales de gaz à effet de serre de la formulation moyenne de sol fluide par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).

L'impact environnemental total de la formulation moyenne de sol fluide s'élève à 120'588 UBP par m³ de remblayage de tranchée (figure 0-2). La répartition des contributions diffère de celle des émissions de gaz à effet de serre: le principal facteur est la phase d'élimination (C1 – C4), qui représente 49 % de l'impact environnemental total. Cela s'explique par la pondération de l'occupation des sols pour la mise en décharge. La phase de fabrication (A1 – A3) génère 45 % de l'impact environnemental total, tandis que la mise en œuvre (A4 – A5) en représente 6 %.

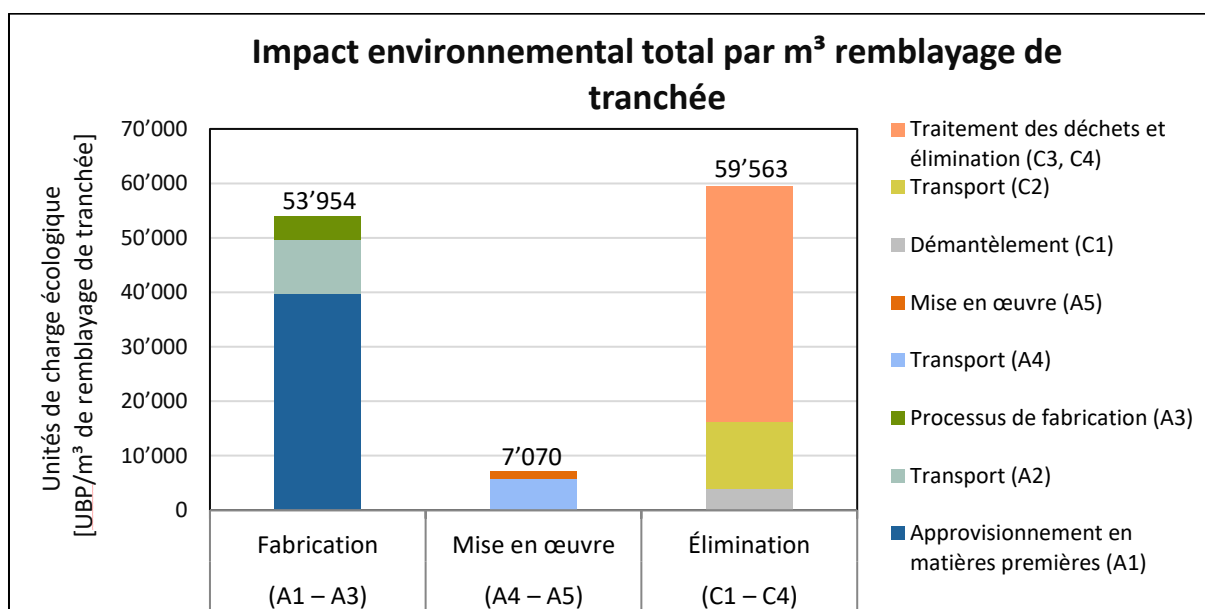
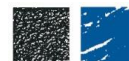


Figure 0-2: Impact environnemental total de la formulation moyenne de sol fluide par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).



Type de ciment

Le ciment contribuant de manière significative aux impacts environnementaux du sol fluide, le choix du type de ciment constitue un levier essentiel pour réduire ces impacts. L'utilisation de CEM III A à la place de CEM I 42.5 R permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 23 % et l'impact environnemental total de 11 %.

Résultats de la comparaison des remblais de tranchées

Pour la comparaison, différents systèmes de remblayage ont été évalués sur la base d'un volume de 1 m³ de remblayage de tranchée sur l'ensemble du cycle de vie considéré (A1 – A5, C1 – C4). Ce faisant, ce ne sont pas seulement des matériaux individuels qui ont été comparés, mais des méthodes de construction ayant une fonction technique comparable. Pour la méthode de construction «grave avec béton d'enrobage», une répartition volumique fixe de 20 % de béton d'enrobage et 80 % de grave a été supposée à des fins de simplification.

La figure 0-3 présente les émissions de gaz à effet de serre des matériaux de remblayage étudiés par m³ de remblayage de tranchée sur l'ensemble du cycle de vie considéré (A1 – A5, C1 – C4) en cas d'utilisation de ciment CEM I 42.5 R pour le béton d'enrobage et le sol fluide. La grave avec béton d'enrobage présente les émissions les plus élevées, tandis que la grave sans béton d'enrobage affiche les émissions les plus faibles. Les différentes variantes de sol fluide se situent entre les deux.

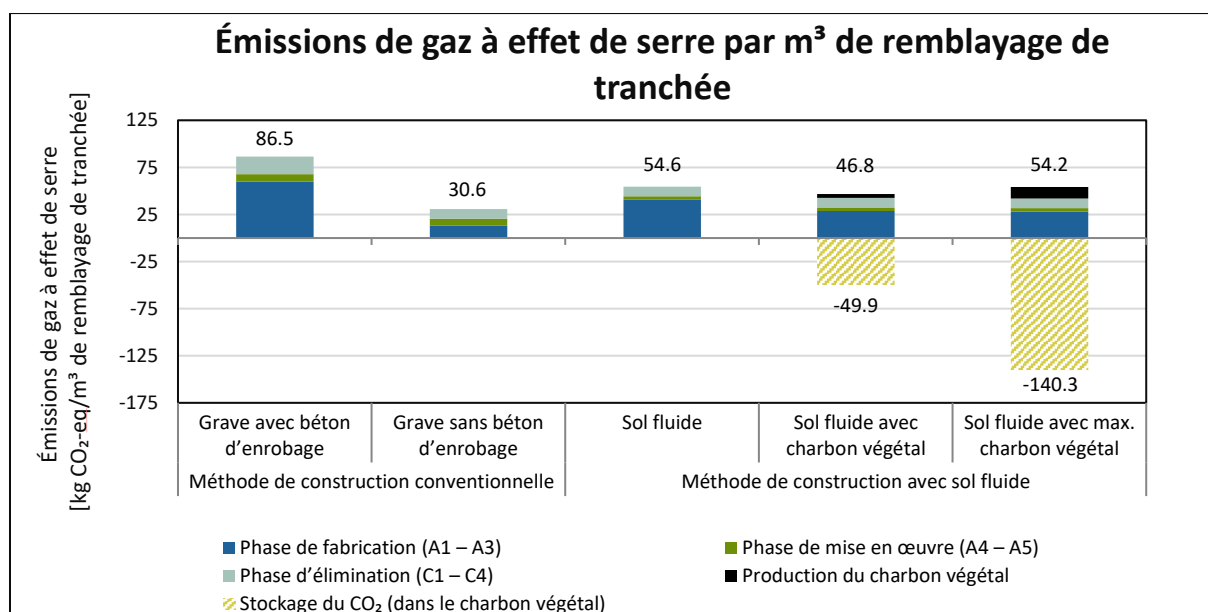


Figure 0-3: Émissions totales de gaz à effet de serre par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le sol fluide et le béton d'enrobage, le CEM I 42.5 R a été modélisé.

La figure 0-4 montre l'impact environnemental total des matériaux de remblayage étudiés par m³ de remblayage de tranchée sur l'ensemble du cycle de vie considéré (A1 – A5, C1 – C4) en cas d'utilisation de ciment CEM I 42.5 R pour le béton d'enrobage et le sol fluide. Toutes les variantes de sol fluide examinées présentent un impact environnemental total inférieur à celui des méthodes de construction conventionnelles. C'est le sol fluide avec du charbon végétal qui présente l'impact environnemental total le plus faible.

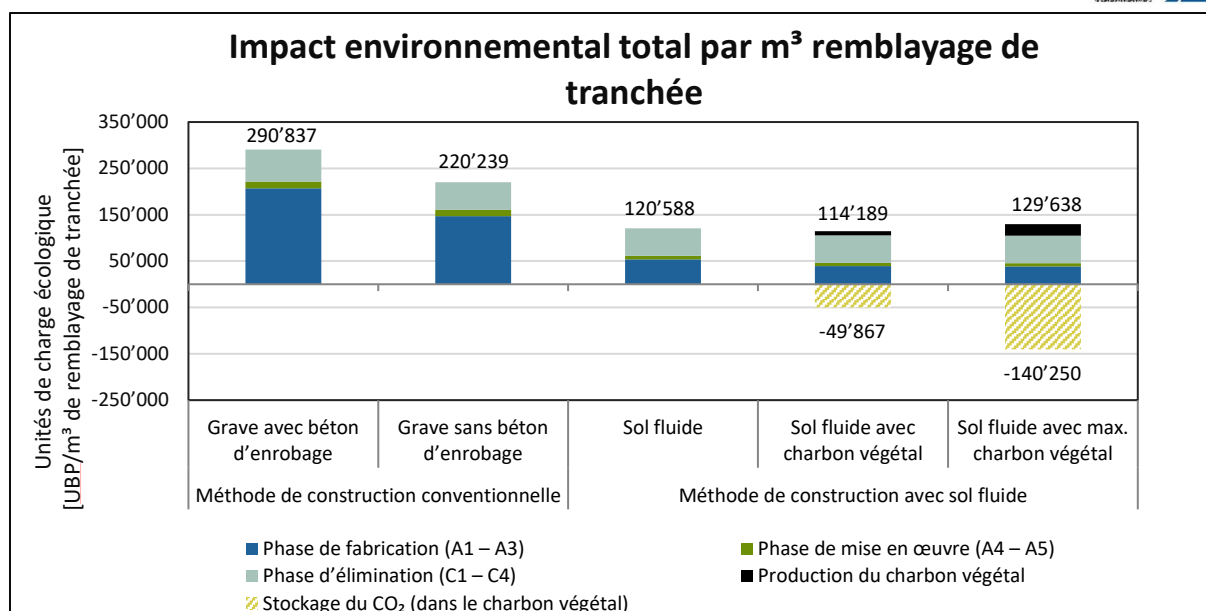
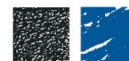


Figure 0-4: Impact environnemental global par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le sol fluide et le béton d'enrobage, on considère l'utilisation de ciment CEM I 42.5 R.

Type de ciment

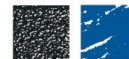
L'utilisation de CEM III A à la place de CEM I 42.5 R permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 21 % pour la grave avec béton d'enrobage, de 23 % pour le sol fluide, de 17 % pour le sol fluide avec charbon végétal et de 15 % pour le sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal. L'impact environnemental total diminue de 6 % pour la grave avec béton d'enrobage, de 11 % pour le sol fluide, de 7 % pour le sol fluide avec du charbon végétal et de 6 % pour le sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal.

Largeur de tranchée

La réduction de la largeur de tranchée avec le sol fluide constitue un facteur d'influence important sur l'impact environnemental. Comme le sol fluide peut être mis en place sans compactage mécanique, l'espace de travail latéral dans la tranchée peut être plus réduit qu'avec la méthode de construction conventionnelle. Cela permet de réduire la quantité de matériau de remblayage nécessaire, ce qui diminue considérablement l'impact environnemental des variantes de sol fluide pour tous les indicateurs environnementaux considérés. En combinaison avec du ciment à teneur réduite en clinker (CEM III A), le sol fluide présente même des émissions de gaz à effet de serre plus faibles que la grave sans béton d'enrobage.

Évaluation des matériaux et pertinence environnementale du sol fluide

En complément de l'écobilan, il a été examiné si le sol fluide pouvait entraîner des apports significatifs de polluants dans le sol ou les eaux souterraines. Les résultats montrent que, lorsque sa fabrication et sa mise en œuvre sont conformes aux règles de l'art, le sol fluide ne pose en principe aucun problème d'un point de vue environnemental. La principale pertinence matérielle provient des matériaux d'excavation utilisés, car des pollutions propres au site peuvent ainsi être introduites dans le sol fluide. Des essais de lixiviation et des surveillances des eaux souterraines indiquent toutefois qu'aucun relargage significatif de métaux lourds ou de polluants organiques n'est à attendre.



Classification technique et utilisation du sol fluide

Dans le domaine de la construction de conduites, le sol fluide doit être considéré, d'un point de vue technique, comme une alternative valable aux méthodes de construction conventionnelles. Ses avantages résident notamment dans le remblayage homogène, la suppression du compactage par couches et la réduction potentielle de l'espace de travail. Le sol fluide convient à de nombreuses applications standard, mais des justifications spécifiques au projet sont nécessaires lorsque les exigences sont plus élevées. Les expériences menées en Allemagne et en Autriche montrent en outre que le sol fluide est utilisé avec succès depuis des années dans le génie civil. À ce jour, il n'existe pas encore de normalisation nationale complète pour le sol fluide. Une base correspondante est toutefois en cours d'élaboration avec la norme SIA 4016. Jusqu'à sa publication, l'assurance qualité et la documentation revêtent une importance particulière.

Classification du sol fluide au regard de la législation sur les déchets

Le sol fluide se compose en grande partie de matériaux d'excavation et peut, par analogie, être traité comme tel pour son élimination. L'élimination du sol fluide peut donc s'appuyer sur les dispositions de l'art. 19 et des annexes 3 et 5 de l'ordonnance sur les déchets (OLED). Pour que les matériaux d'excavation soient considérés comme non pollués, ils doivent, conformément à l'annexe 3, ch. 1, de l'OLED, être composés d'au moins 99 % en poids de roches meubles ou de roches concassées et ne peuvent contenir au maximum que 1 % en poids de déchets de construction minéraux.

Lors de la fabrication de sol fluide, les matériaux d'excavation sont mélangés à du ciment et de la bentonite. D'autres additifs, tels que le charbon végétal, peuvent également être ajoutés au sol fluide.

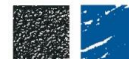
La classification du sol fluide au regard de la législation sur les déchets dépend de la qualité des matériaux d'excavation utilisés ainsi que du type et de la quantité d'additifs. Pour la fabrication, il convient d'utiliser en priorité des matériaux d'excavation non pollués. Toutefois, en cas de fabrication directement sur le chantier, les matériaux d'excavation faiblement pollués produits sur place peuvent également être valorisés (art. 19, al. 2, let. d, OLED). La bentonite utilisée n'a aucune incidence sur l'environnement ni sur le choix de la filière d'élimination. En revanche, le ciment peut être assimilé à un déchet de chantier minéral. D'éventuels autres additifs, tels que le charbon végétal, doivent également être pris en compte dans le choix de la filière d'élimination. Étant donné que de telles formulations ne sont actuellement pas encore utilisées à grande échelle et que le thème du charbon végétal évolue de manière très dynamique, nous renonçons ici à une évaluation plus approfondie.

Un sol fluide moyen, tel qu'il est couramment utilisé aujourd'hui, contient 2,3 % de ciment (voir chapitre 3.1.1) et est donc considéré, en raison de sa teneur en ciment, comme un matériau d'excavation faiblement pollué. Il doit donc être valorisé conformément à l'art. 19, al. 2, OLED. Le sol fluide excavé peut alors soit

- être utilisé pour la fabrication de matériaux de construction à liant hydraulique ou bitumineux, ou
- réutilisé sur le lieu de production (pour le remblayage de la tranchée).

Ce n'est que si une telle valorisation n'est pas possible qu'il peut être mis en décharge de type B, dans le respect des prescriptions de l'annexe 5, ch. 2, OLED.

En revanche, la valorisation sur place n'est pas autorisée pour le béton maigre excavé, qui est utilisé dans la méthode de construction traditionnelle «grave avec béton d'enrobage».



Obstacles et pistes de solution pour le sol fluide

L'utilisation jusqu'ici limitée du sol fluide en Suisse est moins due à des lacunes techniques qu'à des facteurs normatifs, liés à l'application de la réglementation et à la perception. Les principaux obstacles sont les incertitudes concernant la protection des eaux, l'absence de couche de délimitation rigide lors du démantèlement, l'absence de normalisation nationale contraignante ainsi que la traçabilité à long terme des matériaux. Les principales pistes de solution consistent en une base normative plus uniforme, une documentation spécifique aux projets, des projets de référence et une standardisation accrue de l'assurance qualité.

Conclusion

Cette étude montre que le sol fluide présente un potentiel écologique important dans le génie civil suisse, notamment lorsqu'il remplace les méthodes de construction avec enrobage de béton. Les principaux leviers d'action sont la réduction de la largeur de tranchée, la diminution de la teneur en ciment et le choix d'un liant à faible teneur en clinker. D'un point de vue technique et environnemental, le sol fluide est en principe adapté à de nombreuses applications standard. Les expériences pratiques montrent en outre que ces applications ne posent généralement pas de problèmes techniques, pour autant que les conditions spécifiques au projet soient prises en compte et que les justifications requises soient fournies.

Dans l'ensemble, le sol fluide doit être considéré comme un matériau de remblayage pertinent pour une construction plus respectueuse des ressources et de l'environnement. Pour une application plus large dans la pratique, il est judicieux de mener d'autres projets pilotes et de référence afin d'évaluer systématiquement les expériences acquises, d'harmoniser davantage la pratique d'application et d'accroître la sécurité d'utilisation.

La figure 0-5 présente un outil d'aide à la décision qui résume de manière simplifiée les principaux leviers permettant de réduire les impacts environnementaux dans la construction de conduites. Les potentiels de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES, en vert) et des unités de charge écologique (UBP, en bleu) indiquent respectivement la réduction par rapport à la méthode de construction «grave avec béton d'enrobage» par m³ de remblayage de tranchée.

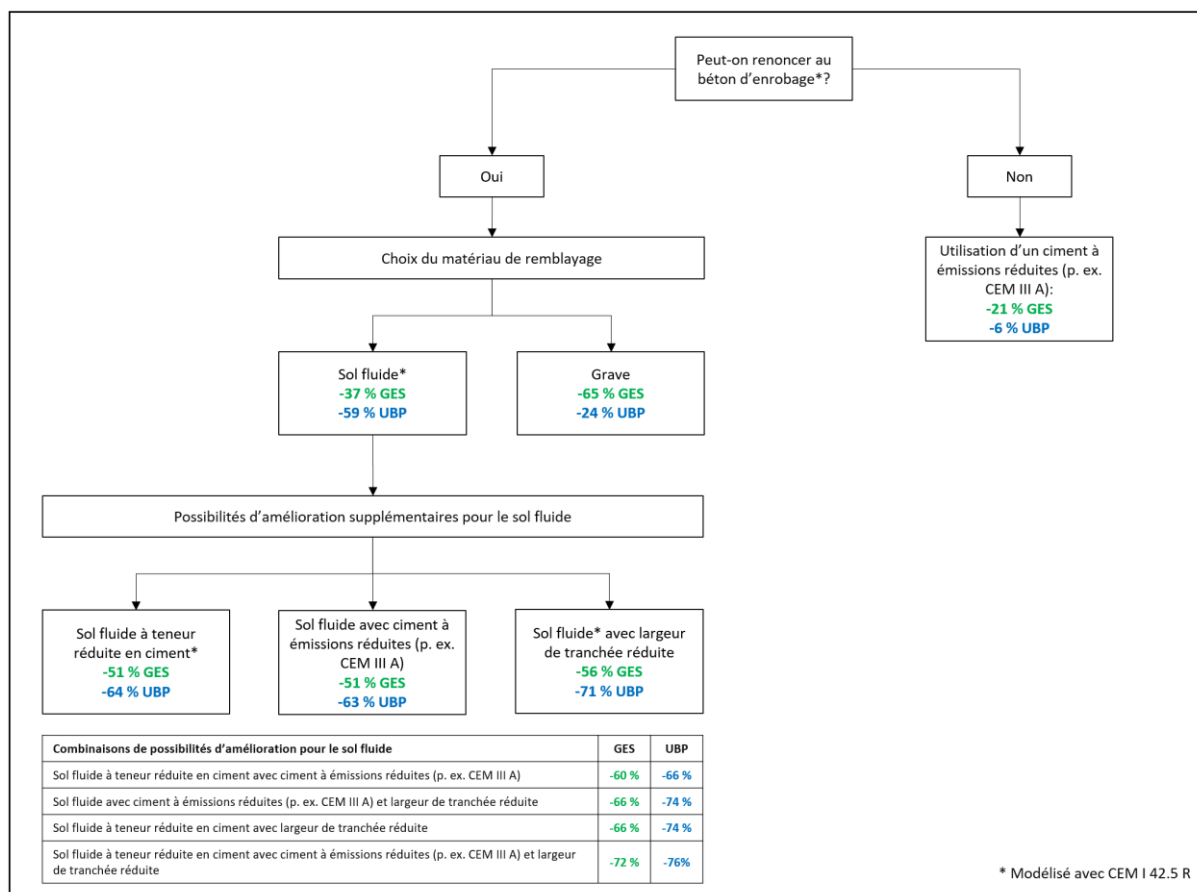
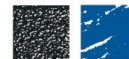


Figure 0-5: Aide à la décision pour la réduction des impacts environnementaux dans la construction de conduites.

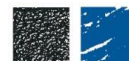
Limites de l'étude

Les résultats de cette étude sont entachés d'incertitudes en raison de plusieurs simplifications. Cela concerne principalement les hypothèses relatives à la comparabilité fonctionnelle des méthodes de construction, à la proportion de béton d'enrobage dans la méthode de construction conventionnelle, à la réduction de la largeur de tranchée lors de l'utilisation de sol fluide et à la substituabilité technique de la grave et du béton par le sol fluide. Il convient d'approfondir davantage la question des quantités de sol fluide qui pourraient effectivement être utilisées dans le génie civil suisse dans des conditions techniques, normatives et opérationnelles réelles. En ce qui concerne l'utilisation du charbon végétal, il faut tenir compte du fait que sa disponibilité est limitée. Il convient donc de l'envisager dans une perspective systémique: avec son utilisation possible dans différents matériaux de construction ainsi que d'autres formes d'utilisation du bois.

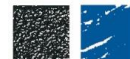


Table des matières

Résumé	3
1 Introduction	12
1.1 Contexte et objectif du projet	12
1.2 Définition du sol fluide	12
2 Méthodologie et procédure.....	14
2.1 Principes méthodologiques	14
2.2 Équivalence fonctionnelle	14
2.3 Frontières du système.....	15
2.4 Inventaire de l'écobilan et indicateurs environnementaux.....	16
3 Écobilan du sol fluide	17
3.1 Objectif et conditions-cadres	17
3.2 Inventaire de l'écobilan	20
3.3 Évaluation des impacts de la formulation moyenne de sol fluide	28
3.4 Résultats de la formulation moyenne de sol fluide	28
3.5 Interprétation.....	31
4 Écobilan du sol fluide avec charbon végétal.....	37
4.1 Définition des variantes de sol fluide avec charbon végétal.....	37
4.2 Modélisation du stockage du carbone	38
4.3 Résultats des variantes de sol fluide avec du charbon végétal	40
4.4 Interprétation.....	43
4.5 Faisabilité technique du sol fluide à base de charbon végétal	43
4.6 Réflexions sur l'approche systémique du charbon végétal	44
5 Écobilan comparative des remblayages de tranchée	46
5.1 Définition des scénarios de comparaison	46
5.2 Description du système des scénarios de comparaison	48
5.3 Résultats des scénarios de comparaison	49
5.4 Largeur de tranchée réduite	54
5.5 Conclusion de l'écobilan comparatif	56
5.6 Autres approches techniques visant à réduire les impacts environnementaux	57
5.7 Estimation du potentiel du sol fluide dans le génie civil suisse	59
5.8 Analyse des coûts.....	59
6 Évaluation matérielle et pertinence environnementale du sol fluide	62
6.1 Ciment	62
6.2 Bentonite.....	63



6.3	Charbon végétal	63
6.4	Matériaux d'excavation	64
6.5	Comportement à la lixiviation et incidence sur les eaux souterraines	65
6.6	Conclusion de l'évaluation matérielle du sol fluide	66
7	Classification technique et utilisation du sol fluide	67
7.1	Données techniques.....	67
7.2	Différence technique par rapport aux méthodes de construction conventionnelles.....	67
7.3	Cadre technique et assurance qualité.....	68
7.4	Aperçu des applications existantes et des expériences	71
7.5	Recommandations pour la mise en œuvre pratique	74
7.6	Besoin d'actions supplémentaires sur le plan technique et normatif.....	74
8	Classification du sol fluide au regard de la législation sur les déchets	76
9	Obstacles et pistes de solution pour le sol fluide	78
10	Conclusion.....	80
11	Limites de l'étude.....	81
	Bibliographie.....	83
	Termes et abréviations.....	87
	Table des Figures.....	88
	Liste des tableaux.....	92
	Appendice.....	94
Appendice A.	Principes méthodologiques de l'écobilan	94
Appendice B.	Évaluation des impacts de la formulation moyenne de sol fluide.....	97
Appendice C.	Figures supplémentaires.....	100
Appendice D.	Estimation du potentiel du sol fluide dans le génie civil	112
Appendice E.	Justificatifs techniques relatifs à la statique des conduits et aux conditions de mise en œuvre	128



1 Introduction

1.1 Contexte et objectif du projet

L'impact environnemental du secteur de la construction est considérable, notamment en raison de l'utilisation intensive de matières premières primaires, de liants à fortes émissions ainsi que du transport et de la mise en décharge des matériaux d'excavation. Dans ce contexte, le sol fluide représente une alternative prometteuse, car il permet la valorisation des matériaux d'excavation tout en nécessitant des quantités de liants nettement inférieures à celles des méthodes de construction conventionnelles en béton ou en béton d'enrobage. Cela permet de boucler les cycles des matériaux, de réduire les transports, de soulager les décharges et de diminuer les proportions de ciment, sources d'émissions et de forte consommation d'énergie.

L'objectif du projet est d'évaluer de manière scientifiquement fondée les potentiels et les limites écologiques de l'utilisation du sol fluide dans le génie civil suisse et de les classer pour la pratique. À cette fin, une formulation moyenne de sol fluide a d'abord été définie et ses impacts environnementaux ont été calculés. L'écobilan réalisée a été vérifiée par un expert externe, Cornelia Stettler, du bureau d'écobilan Carbotech AG.

Dans un deuxième temps, des possibilités d'amélioration ont été étudiées afin de réduire davantage les impacts environnementaux du sol fluide. L'accent a été mis sur l'utilisation d'un ciment à teneur réduite en clinker ainsi que sur deux variantes de sol fluide contenant des proportions différentes de charbon végétal. Pour les variantes à base de charbon végétal, l'influence du type de ciment a également été étudiée. Il a ensuite été examiné comment le sol fluide se comportait par rapport aux remblais de tranchées conventionnels (grave avec et sans béton d'enrobage), afin de permettre une première évaluation de son potentiel écologique.

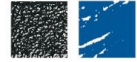
Enfin, une évaluation matérielle, technique et normative a été réalisée afin d'évaluer l'utilisation du sol fluide dans le contexte des réglementations et des exigences existantes.

1.2 Définition du sol fluide

Le sol fluide est un matériau de remblayage composé principalement de matériaux d'excavation minéraux. Afin que le matériau durcisse et devienne stable après la mise en place, on y ajoute un liant hydraulique, généralement du ciment. De plus, le sol fluide contient un lubrifiant, le plus souvent à base de bentonite, qui assure une bonne fluidité. De l'eau est ajoutée pour faciliter la mise en œuvre du matériau et permettre son autocompactage. En fonction de la teneur en humidité des matériaux d'excavation, de la chaux peut également être utilisée pour fixer l'excès d'humidité. Le sol fluide est également appelé matériau de remblayage autocompactant à fluidité temporaire (ZFSV).

Il n'existe actuellement aucune norme technique pour le sol fluide, raison pour laquelle il n'y a pas de définition uniforme avec des spécifications physiques et chimiques correspondantes. Certains fabricants de sol fluide en Suisse se réfèrent aux exigences définies par l'association allemande RAL Gütergemeinschaft Flüssigboden e.V. dans la norme RAL GZ 507 [2]. Il y est clairement stipulé que le sol fluide est défini comme un matériau à consolidation par friction et cohésion, sans structures étrangères contraignantes et rigides. À l'inverse, il existe des matériaux à prise hydraulique comportant des structures étrangères contraignantes et rigides (par exemple des structures en ciment) qui ne sont pas considérés comme des sols fluides. Ces matériaux sont réglementés dans la fiche d'information de la FGSV (Forschungsgesellschaft Strassen- und Verkehrswesen) [3].

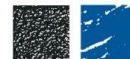
Le principe du procédé de sol fluide repose sur la préservation des propriétés essentielles du sol excavé. D'un point de vue de la physique des matériaux de construction, le sol fluide doit se comporter de manière comparable au sol environnant, présenter une portance et un comportement de consolidation



similaires. Cela permet d'éviter les tassements différentiels, les soulèvements, les fissures dans les routes et l'introduction d'un «corps étranger». Selon la formulation, certaines propriétés techniques peuvent également être modifiées de manière ciblée, telles que la vitesse de consolidation, la pompabilité, l'évolution de la poussée ascensionnelle, la capacité de rétention et la stabilité à la ségrégation.

La formulation doit être adaptée aux exigences de l'application concrète. La perméabilité hydraulique est un paramètre qui ne peut être influencé de manière ciblée que dans une mesure limitée. Le traitement et le mélange modifient légèrement les propriétés du sol par rapport au matériau d'origine. En règle générale, le sol fluide présente une perméabilité hydraulique dix fois inférieure à celle du matériau d'excavation d'origine (par exemple, réduction de 10^{-5}m/s à environ 10^{-6}m/s).

En Suisse, la norme SIA 4016 relative aux sols fluides est actuellement en cours d'élaboration. Elle est élaborée au sein de la commission SIA 190 (construction de canalisations) et vise à établir pour la première fois une définition technique uniforme, une délimitation claire par rapport aux matériaux liés hydrauliquement ainsi que des exigences techniques minimales recommandées pour l'utilisation des sols fluides [4]. Jusqu'à sa publication, les sols fluides continueront d'être évalués dans la pratique sur la base des réglementations internationales.



2 Méthodologie et procédure

2.1 Principes méthodologiques

Cette étude comprend la réalisation de plusieurs écobilans pour différents systèmes de remblayage de tranchées. L'objectif est d'analyser de manière nuancée les impacts environnementaux de ces variantes et de les comparer entre elles. L'accent est mis sur les impacts écologiques via des phases de fabrication, de construction et d'élimination des systèmes de remblayage considérés.

Tous les écobilans ont été réalisés conformément à la norme ISO 14040:2006 [5] et à la norme ISO 14044:2006 [6]. Selon cette norme, un écobilan comprend les étapes suivantes:

1. Objectif et conditions-cadres
2. Inventaire de l'écobilan
3. Évaluation des impacts
4. Analyse des résultats et interprétation

La méthodologie et la définition de ces quatre étapes de l'écobilan sont décrites en détail dans l'appendice A. Les chapitres suivants se concentrent sur l'application concrète de cette méthodologie aux variantes de remblayage mentionnées.

2.2 Équivalence fonctionnelle

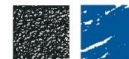
Étant donné que le sol fluide est utilisé dans la pratique dans différents domaines du génie civil et que la présente étude se base sur une composition moyenne de sol fluide dérivée de douze formulations, aucun domaine d'application spécifique n'a été examiné. À la place, une tranchée de conduite simplifiée sert de système de référence représentatif afin de présenter les différentes variantes de remblayage de manière comparable.

L'équivalence fonctionnelle de toutes les variantes de remblayage examinées dans cette étude découle, conformément à la norme EN 15643-5, des exigences fonctionnelles et techniques imposées à l'ouvrage. On part du principe que tous les systèmes de remblayage examinés satisfont aux exigences définies ci-après. La fonction commune considérée est le remblayage durable d'une tranchée de conduite présentant les caractéristiques suivantes:

- Géométrie de la tranchée: 1 mètre de longueur, 1 mètre de largeur et 1 mètre de profondeur (volume 1 m³)
- Atteindre une capacité portante suffisante du système de remblayage avec un module de déformation¹ $ME \geq 30 \text{ MN/m}^2$
- Durée de vie de 100 ans

L'unité fonctionnelle est définie comme le remblayage d'une tranchée d'un volume de 1 m³ répondant aux exigences fonctionnelles et techniques susmentionnées. Elle comprend la fabrication des matériaux de remblayage (modules A1 – A3), la mise en œuvre (modules A4 – A5) et le démantèlement ainsi que l'élimination à la fin de la durée de vie (modules C1 – C4). Les matériaux de remblayage suivants

¹ Le module de déformation ME est déterminé lors d'un essai de charge sur plaque et décrit la capacité portante ou la déformabilité du matériau mis en œuvre. Conformément à la norme SN 670 317b, une valeur de $ME \geq 30 \text{ MN/m}^2$ correspond au critère minimal au niveau du sol ou de la plate-forme. Dans cette étude, cette valeur est utilisée comme critère minimal pour l'équivalence fonctionnelle de toutes les variantes de remblayage considérées.



sont pris en compte: grave avec béton d'enrobage, grave sans béton d'enrobage, sol fluide, sol fluide avec charbon végétal et sol fluide avec une teneur en charbon végétal maximale.

2.3 Frontières du système

Conformément à la norme EN 15643-5 [7] (figure 2-1), le système analysé comprend la phase de fabrication des matériaux de construction (modules A1 à A3), la phase de construction de l'ouvrage (modules A4 et A5), ainsi que la phase d'élimination (modules C1 à C4). Les avantages et les impacts (module D) situés en dehors des frontières du système ne sont pas pris en compte.

Au cours de la phase de fabrication, l'extraction des matières premières, le transport vers le fabricant et la fabrication des principaux composants de construction utilisés sont pris en compte. L'accent est mis sur les matériaux de construction utilisés: matériaux d'excavation, liants et additifs chimiques. Pour ces matériaux, les chaînes de processus de fabrication ont été représentées de la manière la plus réaliste possible.

Au cours de la phase de construction, le transport du matériau de remblayage vers le chantier ainsi que la mise en place et le remblayage de la tranchée sont pris en compte. L'accent est mis ici sur le remblayage de la tranchée lui-même.

Pendant la phase d'utilisation, le matériau de remblayage reste dans le sous-sol et assure durablement la fonction d'un remblayage stable et homogène. Pour les variantes de sol fluide examinées dans cette étude, on ne s'attend pas à des émissions significatives dans le sol, l'eau ou l'air. On part du principe que le remblayage de la tranchée ne sera pas endommagé pendant la durée d'utilisation de 100 ans et qu'aucune mesure de remise en état ne sera nécessaire.

Au cours de la phase d'élimination, l'ouvrage est démantelé et les déchets ainsi générés sont valorisés (directement sur place ou sur un chantier externe) ou stockés. Tous les processus associés, y compris les transports, sont pris en compte, sur la base de l'état actuel de la technique. Conformément à la norme EN 15643-5 [7], la phase d'élimination comprend les processus jusqu'au traitement ou à l'élimination définitive des matériaux démantelés (modules C1 à C4).

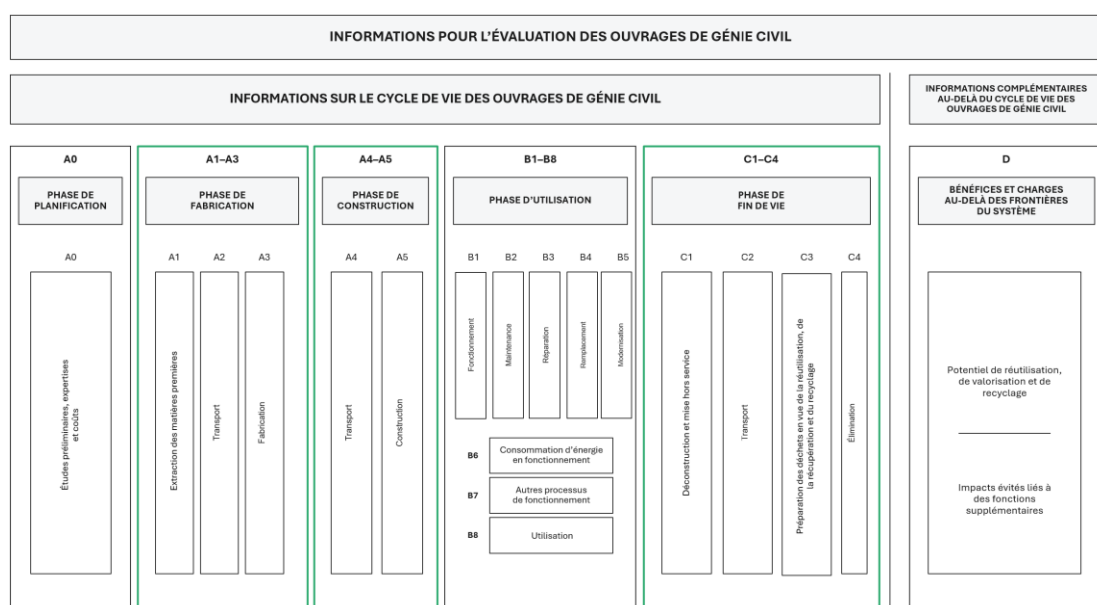
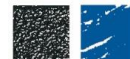


Figure 2-1: Délimitation du système, représentation propre d'après la norme EN 15643-5 [7].

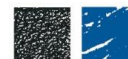


2.4 Inventaire de l'écobilan et indicateurs environnementaux

L'inventaire de l'écobilan se compose, d'une part, des données techniques de premier plan issues de projets réels et, d'autre part, des données de fond génériques provenant des bases de données d'écobilans (par exemple: chaîne de processus d'un litre de diesel).

La mise en relation des données techniques de premier plan avec les données de fond génériques permet de déterminer les impacts environnementaux à l'aide de méthodes d'évaluation des impacts. Dans cette étude, trois indicateurs environnementaux ont été utilisés afin d'obtenir une vision multidimensionnelle et holistique des impacts environnementaux. Ces trois indicateurs sont également prescrits dans les règles de l'écobilan des matériaux et produits de construction de la KBOB [1].

- **Émissions de gaz à effet de serre (IPCC 2021, GWP 100a):** cet indicateur environnemental décrit les effets cumulés de différents gaz à effet de serre par rapport au CO₂ comme substance de référence. L'effet de serre est quantifié sur la base des potentiels de réchauffement global du 6e rapport d'évaluation du IPCC (2021) [8], [9].
- **Méthode de la saturation écologique 2021 (méthode UBP 2021, unités de charge écologique):** la méthode de la saturation écologique permet de dresser un tableau complet des impacts environnementaux [10]. Elle s'appuie sur la politique environnementale suisse. Les Unités de charge écologique 2021 (UCE = UBP) quantifient les impacts environnementaux liés à l'utilisation de ressources énergétiques et matérielles, à l'utilisation du sol et de l'eau douce, aux émissions dans l'air, les eaux et le sol, au dépôt de résidus issus du traitement des déchets ainsi qu'au bruit du trafic. En Suisse, la méthode UBP est considérée comme un standard pour les écobilans [11], [12]. Elle a été élaborée à la demande de l'OFEV et est particulièrement utile pour établir des bases de décision, car elle reflète la politique environnementale de la Suisse et est exhaustive.
- **Consommation d'énergie cumulée (CEC):** cet indicateur environnemental quantifie la consommation d'énergie cumulée, c'est-à-dire le besoin en énergie primaire: l'énergie primaire non renouvelable comprend l'énergie issue des sources fossiles et nucléaires ainsi que le bois provenant du défrichement de forêts primaires. L'énergie primaire renouvelable comprend l'énergie hydraulique, le bois / la biomasse (hors défrichement de forêts primaires), l'énergie solaire, éolienne, géothermique et la chaleur ambiante. C'est la quantité d'énergie récoltée qui est évaluée [13]. La somme des besoins en énergie primaire renouvelable et non renouvelable correspond au besoin total en énergie primaire. Il s'agit d'un indicateur clé de la société à 2000 watts. Les différentes catégories sont ainsi classées dans les deux groupes «renouvelable» et «non renouvelable».



3 Écobilan du sol fluide

3.1 Objectif et conditions-cadres

L'objectif est d'établir un écobilan pour une formulation moyenne représentative de sol fluide, couvrant les phases de fabrication, de mise en œuvre et d'élimination (A1 – A5 et C1 – C4). En outre, une variante améliorée est étudiée, dans laquelle un ciment à teneur réduite en clinker est utilisé dans la même formulation. Des analyses de sensibilité sont réalisées sur les hypothèses centrales du modèle.

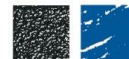
3.1.1 Définition de la composition moyenne du sol fluide

Pour modéliser la formulation moyenne de sol fluide, la présente étude a utilisé la moyenne de 12 formulations suisses de sol fluide (tableau 3-1), sur la base des formulations de sol fluide présentées lors de cours spécialisés et dans des travaux de recherche documentés de l'OTH Regensburg et de la FHNW Muttensz [14] ainsi que des formulations des fabricants EcoSoil AG [15] et KIBAG [16] (voir chapitre 3.2.1). Les formulations de sol fluide prises en compte ont été préparées avec des matériaux d'excavation non pollués et représentent des applications standard typiques dans le génie civil et la construction de conduits; elles ne se limitent pas à un seul segment d'application spécifique.

Tableau 3-1: Données utilisées pour le calcul de la moyenne de la formulation type de sol fluide.

Formulation	Matériau d'excavation [kg]	Ciment CEM I 42,5 R [kg]	Bentonite [kg]	Chaux [kg]	Eau [kg]	Total [kg/m ³]
Formulation 1	1'325	37.5	37.5	0	400	1'800
Formulation 2	1'500	45.0	35.0	15	340	1'935
Formulation 3	1'320	27.3	34.0	0	410	1'791
Formulation 4	767	47.0	33.0	0	668	1'515
Formulation 5	1'222	28.0	28.0	0	505	1'783
Formulation 6	1'083	51.0	37.0	0	561	1'732
Formulation 7	1'317	47.0	27.0	0	478	1'869
Formulation 8	1'203	59.0	27.0	0	517	1'806
Formulation 9	1'478	25.0	33.0	0	406	1'942
Formulation 10	1'293	38.0	33.0	0	472	1'836
Formulation 11	1'450	48.0	31.0	0	180	1'709
Formulation 12	1'640	50.0	31.0	0	180	1'901
Moyenne	1'299.8	41.9	32.2	1.3	426.4	1'801.6
Valeurs modélisées²	1'300.0	42.0	32.0	1.0	426.0	1'801.0

² Afin de simplifier la modélisation, les valeurs moyennes ont été arrondies aux chiffres significatifs. L'arrondi n'a pas d'influence significative sur les résultats d'écobilan.



3.1.2 Description du système de sol fluide

Phase de fabrication (modules A1 à A3)

La fabrication de sol fluide fait appel à différentes matières premières, notamment une structure granulaire minérale issue de matériaux d'excavation disponibles localement, ainsi que des additifs liants et régulateurs de fluidité. Les matériaux d'excavation proviennent du chantier concerné; ils sont extraits à l'aide d'une pelle hydraulique puis transportés par camion vers l'installation de sol fluide. En général, les chantiers se situent à une distance de 5 à 10 km du site de production; c'est pourquoi cette étude a retenu une distance de transport prudente de 10 km. Les matières premières complémentaires telles que le ciment, la bentonite, la chaux et l'eau sont livrées directement au site de production de sol fluide. Dans cette étude, le sol fluide est modélisé exclusivement comme un produit fabriqué ex situ, ce qui signifie que le traitement et le mélange du sol fluide s'effectuent dans une installation fixe située en dehors du chantier³.

Au site de production de sol fluide, les matériaux d'excavation sont traités en premier: les éléments grossiers sont séparés à l'aide d'un séparateur à godets ou d'un crible mobile afin de garantir une granulométrie homogène. Selon les indications du fabricant, les résidus de criblage ainsi obtenus sont généralement réutilisés dans la fabrication du béton et se situent donc, conformément au principe de cut-off, en dehors des limites définies du système. Les matières fines restantes sont ensuite dosées avec les additifs et mélangées de manière homogène dans une centrale de malaxage fixe.

Diverses machines, telles que des convoyeurs à bande, des camions malaxeurs, des chargeuses sur pneus et des silos, sont utilisées pour le dosage, le mélange et le transport. Celles-ci fonctionnent, selon leur fonction, à l'électricité, au diesel ou à l'essence. La consommation d'électricité concerne principalement les unités de commande, de dosage et de mélange, tandis que les engins de chantier fonctionnent principalement au diesel.

Selon les indications du fabricant, la production de sol fluide ne génère pas d'autres déchets de production à éliminer à l'intérieur des limites définies du système.

Phase de construction (modules A4 à A5)

Immédiatement après sa fabrication, le sol fluide frais est chargé dans des camions malaxeurs et transporté directement du site de production vers le chantier. Une distance de transport de 10 km a été retenue ici, comme pour la distance précédente. La mise en œuvre s'effectue directement à partir du camion malaxeur, via une goulotte ou un système de tuyaux, dans la tranchée ou la section de chantier. Un compactage conventionnel n'est pas nécessaire, car le sol fluide est autocompactant.

La figure 3-1 présente l'analyse des flux de matériaux ainsi que les distances de transport retenues pour les modules A1 à A5.

³ Le terme «ex situ» désigne la fabrication de sol fluide dans une centrale de malaxage fixe en dehors du chantier, tandis que le terme «in situ» désigne la fabrication directement sur le chantier à l'aide d'une centrale de malaxage mobile. Selon la taille du projet, la production s'effectue soit ex situ, soit in situ. Dans la pratique, cependant, la production ex situ prédomine, car elle nécessite moins d'espace et permet d'obtenir une qualité constante des matériaux. La production in situ peut offrir des avantages écologiques dans le cas de très grands projets de construction (par exemple, moins de transport), mais elle nécessite une plus grande surface pour les silos, les dépôts et les voies d'accès et n'est donc pas réalisable dans de nombreux projets.

Dans le cadre de cette étude, tous les scénarios de sols fluides ont été modélisés ex situ, car cette méthode est plus répandue en Suisse que la production in situ et repose sur des données plus fiables.

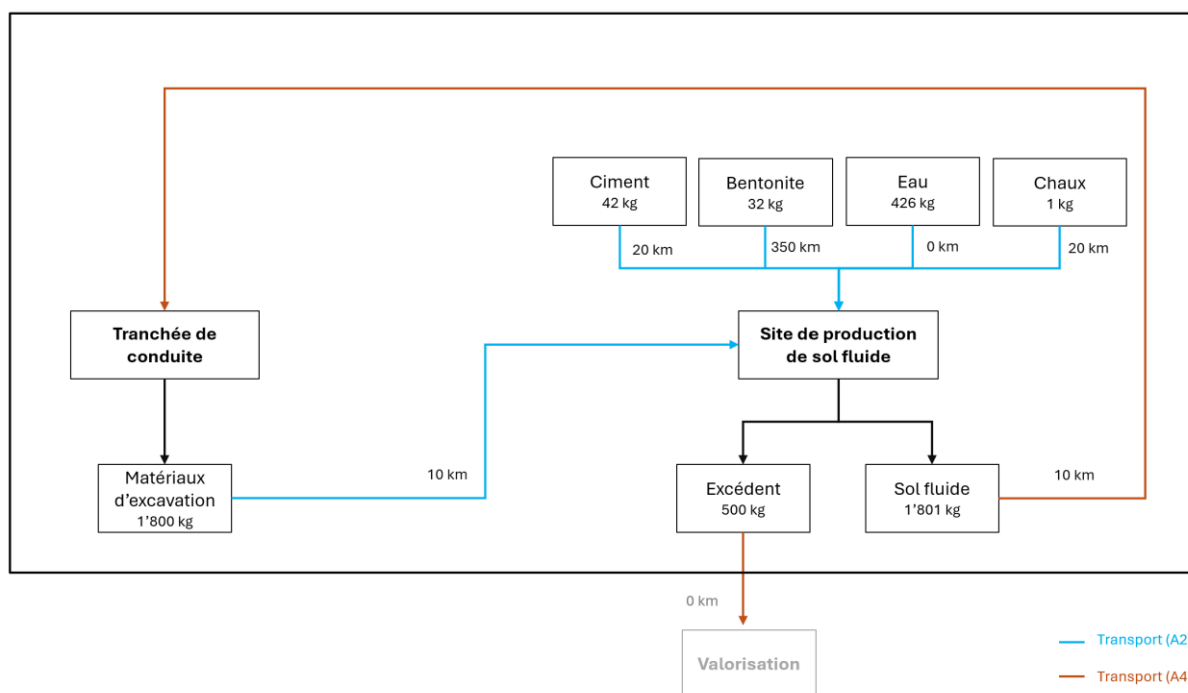
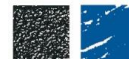


Figure 3-1: Analyse des flux de matières et distances de transport du sol fluide (A1 – A5).

Phase d'utilisation (modules B1 à B7)

Pendant la phase d'utilisation, le sol fluide reste dans le sous-sol et assure en permanence la fonction d'un remblai stable et homogène. Aucun entretien ni apport d'énergie n'est donc nécessaire. Pour les variantes de sol fluide examinées dans cette étude, il ne faut pas s'attendre à des émissions significatives dans le sol, l'eau ou l'air.

Phase d'élimination (modules C1 à C4)

Lors de travaux de rénovation ou de remplacement de conduites, le sol fluide solidifié est excavé à l'aide d'une pelleuse sur pneus et d'une benne. Cela entraîne une consommation de diesel pour les engins de chantier utilisés. Les matériaux excavés se présentent sous une forme minérale valorisable.

Sur la base des indications des fabricants, on part du principe qu'à la fin de sa durée de vie, le matériau d'excavation démantelé peut être mis en décharge et valorisé à parts égales. Dans la modélisation, on considère donc que 50 % sont mis en décharge et 50 % valorisés, dont 20 % sur place et 30 % sur d'autres chantiers.

La figure 3-2 présente l'analyse des flux de matériaux ainsi que les distances de transport sous-jacentes des modules C1 à C4.

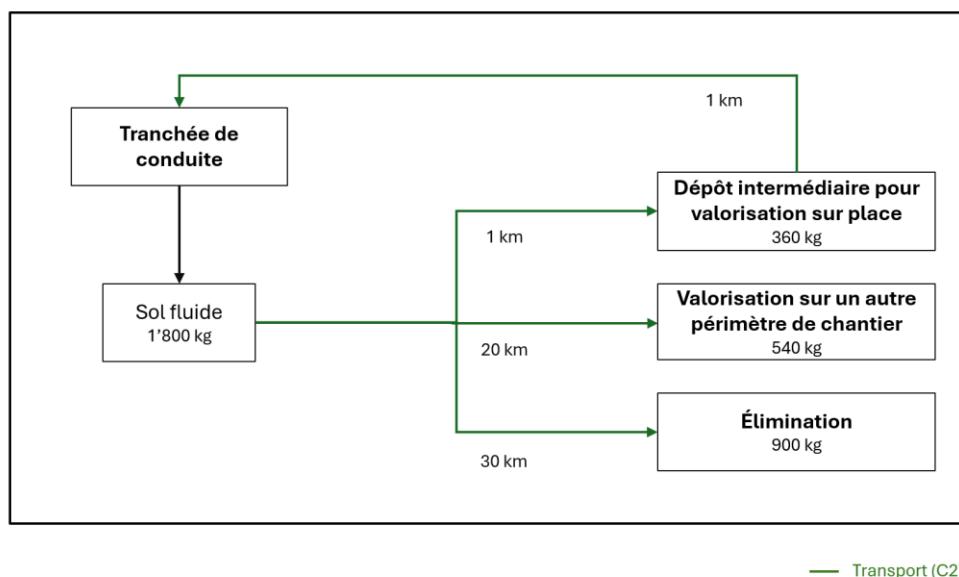
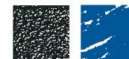


Figure 3-2: Analyse des flux de matières et distances de transport du sol fluide (C1 – C4).

3.2 Inventaire de l'écobilan

3.2.1 Base de données: données primaires

Les données techniques de base utilisées dans cette étude s'appuient sur des données primaires issues de l'industrie et de la recherche, qui ont déjà été utilisées dans des études antérieures de l'UTech [17], [18], [19] et [20]. Ces études s'appuient sur les sources de données primaires énumérées ci-dessous et ont été reprises de manière cohérente dans le présent travail.

Sources de données primaires

Les données principales suivantes ont été recueillies directement à partir de projets pratiques, d'informations fournies par les fabricants et d'instituts de recherche:

- Données relatives aux matériaux: Formulations de sols fluides issues de cours spécialisés et d'instituts de recherche (OTH Regensburg, FHNW Muttenez [14]) ainsi que de formulations de fabricants (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Livraisons de matériaux: Informations sur les flux de matériaux et les livraisons issues de projets pratiques (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Processus de production: Descriptions des processus et concepts d'installations pour la fabrication de sol fluide (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Consommation énergétique des machines: Données d'exploitation et de consommation des machines utilisées (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Consommation énergétique des véhicules: Informations sur les types de véhicules, les modes de propulsion et la consommation énergétique (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).
- Données relatives aux déchets: Informations sur les déchets générés lors de la fabrication et de la pose (EcoSoil AG [15], KIBAG [16]).



3.2.2 Base de données: données d'arrière-plan

Des données génériques issues de bases de données environnementales sont utilisées pour la modélisation écologique des données techniques primaires. Ces données sont appelées «données d'arrière-plan». Dans la présente étude, toutes les données de base proviennent de la base de données d'écobilan de l'OFEV BAFU:2025, état 2026» [21]. Le modèle d'écobilan est mis en œuvre à l'aide du logiciel d'écobilan SimaPro et les données techniques de premier plan sont reliées aux données de base.

3.2.3 Inventaire de l'écobilan de la formulation moyenne de sol fluide

Le présent inventaire de l'écobilan se rapporte à l'unité fonctionnelle d'un mètre cube de remblayage de tranchée avec du sol fluide. Les tableaux suivants (du tableau 3-2 au tableau 3-9) présentent l'inventaire de l'écobilan pour la formulation moyenne du sol fluide.

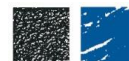
Le tableau 3-2 présente les matières premières nécessaires à la fabrication de 1 m³ de sol fluide selon la formulation moyenne définie (voir chapitre 3.1.1). Sur le chantier, 1 m³ de matériaux d'excavation est excavé, avec une densité supposée de 1'800 kg/m³.

Tableau 3-2: Inventaire de l'écobilan – Approvisionnement en composants de sol fluide (A1).

Données techniques de base		Processus de la base de données environnementale	Dérivation / Remarque
Paramètres	Quantité/FU		
Matériaux d'excavation	1'800 kg	Excavation, hydraulic digger, average {CH} U	Capacité d'excavation de 1 m ³ par une pelle hydraulique moyenne
Matériaux d'excavation destinés à la production de sol fluide	1'800 kg	Pas de jeu de données	Pas de jeu de données, car le matériau est utilisé pour la production de sol fluide.
Ciment CEM I 42,5 R	42 kg	Portland cement, strength class Z 42.5, at plant {CH} U	Selon la formulation moyenne du sol fluide
Bentonite	32 kg	Bentonite, at mine {DE} U	Selon la formulation moyenne du sol fluide
Eau	426 kg	Tap water, at user {CH} U	Selon la formulation moyenne du sol fluide
Chaux	1 kg	Limestone, milled, loose, at plant {CH} U	Selon la formulation moyenne du sol fluide

Le tableau 3-3 présente le transport des matières premières vers l'installation de sol fluide. La distance de transport des matériaux d'excavation vers l'installation de sol fluide a été déterminée sur la base des indications du fabricant. Selon celles-ci, les chantiers se situent généralement à une distance de 5 à 10 km du site de production. Pour la présente étude, une distance prudente de 10 km a été retenue.

Pour les transports de ciment en Suisse, Frischknecht et al. (2007) [22] indiquent des distances de transport routier typiques de 20 km. Cette distance a été reprise dans la présente étude. La chaux est une matière première minérale primaire et est généralement disponible au niveau régional. Par conséquent, par analogie avec les produits minéraux standard selon Frischknecht et al. (2007) [22], une distance de transport de 20 km a été retenue. En l'absence d'informations spécifiques au projet concernant le choix effectif du mode de transport, un transport exclusivement par camion a été modélisé de manière prudente pour les transports de ciment et de chaux.



En Europe, la bentonite est principalement extraite en Allemagne, en Grèce et en Turquie. Dans la présente étude, on part du principe que la bentonite importée en Suisse provient d'Allemagne. En Allemagne, les sites d'extraction et de traitement concernés se trouvent dans les régions de l'ouest et du centre du pays. En l'absence de données spécifiques au projet concernant l'origine concrète et les distances de transport réelles, une distance de transport moyenne de 350 km entre ces régions et le centre de la Suisse a été retenue pour la modélisation. Dans la pratique, l'importation de matières premières minérales telles que la bentonite s'effectue souvent en transport combiné (train et camion). Dans cette étude, on a délibérément modélisé un transport exclusivement routier, car son indicateur écologique est plus conservateur que celui du transport ferroviaire.

Le transport de l'eau vers le site de production de sol fluide n'a pas été pris en compte, car on part du principe que l'eau est disponible sur le site de production.

Tableau 3-3: Inventaire de l'écobilan – Transport des composants du sol fluide vers le site de production de sol fluide (A2).

Données techniques de base		Processus de la base de données environnementale	Dérivation / Remarque
Paramètre	Quantité/FU		
Matériaux d'excavation	18 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Poids: 1.8 t Distance de transport: 10 km[15], [16]
Ciment CEM I 42.5 R	0.8 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Poids: 0.042 t Distance de transport: 20 km [22]
Bentonite	11.2 tkm	Transport, freight, lorry, fleet average {RER} U	Poids: 0.032 t Distance de transport: 350 km (estimation d'UTech)
Chaux	0.02 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Poids: 0.001 Distance de transport: 20 km [22]

Le tableau 3-4 présente l'infrastructure nécessaire à la fabrication de sol fluide ainsi que les machines utilisées.

Les matériaux d'excavation sont d'abord traités à l'aide d'une cribreuse mobile. Environ 70 % des matériaux d'excavation (environ 1'300 kg) sont utilisés pour la fabrication de sol fluide. En raison de sa composition, le surplus de matériaux se prête à une réutilisation dans la fabrication de béton et est valorisé en conséquence. Dans le cadre de cette délimitation du système, la fabrication de sol fluide ne génère aucun déchet.

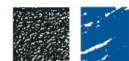
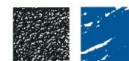


Tableau 3-4: Inventaire de l'écobilan – Production de sol fluide (A3).

Données techniques principales		Processus de la base de données environnementale	Dérivation / Remarque
Paramètre	Quantité/FU		
Crible mobile avec séparateur à godets	5.57E-3 kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant {RER} U	Poids de la cribleuse: 13 t [15], durée de vie ⁴ : 15 ans, heures de fonctionnement ⁴ : 1'000 h/a, débit: 280 t/h [23], poids du sol fluide: 1.8 t → $13 \text{ t} / (15 \text{ a} \times 1'000 \text{ h/a} \times 280 \text{ t/h}) \times 1.8 \text{ t/m}^3 \times 1'000 \text{ kg/t}$
Diesel pour crible avec séparateur à pales	1.62 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Consommation de diesel: 7 L/h [24], pouvoir calorifique: 35.95 MJ/L[22], temps de fonctionnement: $(1 / 280 \text{ t/h} [23]) \times 1.8 \text{ t}$ → $7 \text{ L/h} \times 35,95 \text{ MJ/L} \times (1 / 280 \text{ t/h}) \times 1.8 \text{ t}$
Excédent de matière en vrac	500 kg	Pas de jeu de données	Pas de jeu de données, car les matériaux sont réutilisés dans la fabrication du béton [15].
Silos	8.0-3 kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant {RER} U	Poids des silos ⁵ : 6 t (3 silos de 2 t chacun) [15], durée de vie ⁴ : 20 ans, heures de fonctionnement ⁴ : 1'000 h/an [15], débit du site de production de sol fluide: 37.5 m ³ /h [15], [16] → $6 \text{ t} / (20 \text{ a} \times 1'000 \text{ h/a} \times 37.5 \text{ m}^3/\text{h}) \times 1'000 \text{ kg/t}$
Convoyeur	1.67E-5 m	Conveyor belt, at plant {RER} U	Longueur du convoyeur: 12 m [15], [16], durée de vie ⁴ : 20 ans, heures de fonctionnement ⁴ : 1'000 h/an[15], débit du site de production de sol fluide: 37.5 m ³ /h[15], [16] → $12 \text{ m} / (20 \text{ a} \times 1'000 \text{ h/a} \times 37.5 \text{ m}^3/\text{h})$
Camion malaxeur	2.78E-2 kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant {RER} U	Poids du malaxeur sur roues ⁴ : 10 t, durée de vie ³ : 10 ans, heures de service ⁴ : 1'000 h/an [15], débit du site de production de sol fluide: 37.5 m ³ /h → $10 \text{ t} / (10 \text{ a} \times 1'000 \text{ h/a} \times 37.5 \text{ m}^3/\text{h}) \times 1'000 \text{ kg/t}$
Diesel pour bétonnière automotrice	14.9 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Consommation de diesel: 15 L/h[15], pouvoir calorifique: 35.95 MJ/L[22], temps de fonctionnement: $1/37.5 \text{ m}^3/\text{h}[15], [16]$ → $15 \text{ L/h} \times 35.95 \text{ MJ/L} \times 1/37.5 \text{ m}^3/\text{h}$

⁴ Hypothèse de l'UTech

⁵ Un silo distinct est nécessaire pour chaque matériau utilisé: un silo pour le ciment, un silo pour la bentonite ainsi qu'un silo ou réservoir d'eau pour le dosage dans le processus de fabrication du sol fluide. Aucun silo n'est nécessaire pour les Matériaux d'excavation, car ceux-ci sont transportés directement du chantier vers l'installation de sol fluide et y sont traités sans stockage intermédiaire.



Chargeuse sur pneus	1.8E-6 unités	Building machine {RER} U	Durée de vie ⁴ : 10 ans, heures de service ⁴ : 1'000 h/an [15], débit: 0.018 h/m ³ [25] → $1 / (10 \text{ a} \times 1'000 \text{ h/a}) \times 0.018 \text{ h/m}^3$
Diesel pour chargeuse sur pneus	4.5 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Consommation de diesel: 7 L/h [15], pouvoir calorifique: 35.95 MJ/L [22], débit: 0.018 h/m ³ [25] → $7 \text{ L/h} \times 35.95 \text{ MJ/L} \times 0.018 \text{ h/m}^3$
Électricité ⁶	0.5 kWh	Electricity, medium voltage, at grid {CH} U	Il faut 18 kWh d'électricité pour 36 m ³ de sol fluide, soit 0.5 kWh/m ³ [15].
Site de production de sol fluide	5.56-4 m ²	Building, hall, steel construction {CH} U	Surface du hall ⁴ : 400 m ² , durée de vie ⁴ : 20 ans, débit: 37.5 m ³ /h [15], [16], heures de fonctionnement ⁴ : 1'000 h/an → $400 \text{ m}^2 / (20 \text{ a} \times 37.5 \text{ m}^3/\text{h} \times 1'000 \text{ h/a})$

Le tableau 3-5 présente le transport du sol fluide produit depuis le site de production de sol fluide jusqu'au chantier. Comme pour le transport des matériaux d'excavation, une distance de 10 km a été prise en compte. Le transport s'effectue à l'aide d'un camion malaxeur.

Tableau 3-5: Inventaire de l'écobilan – Transport du sol fluide vers le chantier (A4).

Données techniques principales		Processus de la base de données environnementale	Dérivation / Remarque
Paramètre	Quantité/FU		
Camion malaxeur	18 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Poids: 1.8 t Distance de transport: 10 km[15], [16]

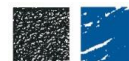
Le tableau 3-6 montre le remblayage de la tranchée avec du sol fluide. Ce processus nécessite exclusivement l'utilisation d'un camion malaxeur, c'est pourquoi sa consommation de diesel a été modélisée.

Tableau 3-6: Inventaire de l'écobilan – Mise en œuvre du sol fluide (A5).

Données techniques principales		Processus de la base de données environnementale	Dérivation / Remarque
Paramètres	Quantité/FU		
Camion malaxeur et tuyau	7.7 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Consommation de diesel: 15 L/h [15], pouvoir calorifique: 35.95 MJ/L[22], débit ⁷ : 0.0143 h/m ³ [26] → $15 \text{ L/h} \times 35.95 \text{ MJ/L} \times 0.0143 \text{ h/m}^3$

⁶ L'électricité est nécessaire pour les unités de dosage et de tarage.

⁷ Temps de fonctionnement du malaxeur sur chenilles, y compris le tuyau de remplissage, par m³ de remblayage de tranchée.



Le tableau 3-7 présente la phase de démantèlement modélisée à la fin de la durée de vie de la tranchée. Étant donné que le sol fluide présente des propriétés physiques comparables à celles du sol environnant, le démantèlement est modélisé de manière simplifiée comme un déblaiement à l'aide d'une pelle hydraulique (godet d'excavation).

Tableau 3-7: Inventaire de l'écobilan – Démantèlement du sol fluide (C1).

Données techniques principales		Processus de la base de données environnementale	Dérivation / Remarque
Paramètre	Quantité/FU		
Pelle sur pneus et godet	23.81 MJ	Diesel, burned in building machine, with particle filter {CH} U	Consommation de diesel: 11.59 L/h[27], pouvoir calorifique: 35.95 MJ/L[22], débit: 1/17.5 h/m ³ [28] → 11.59 L/h × 35.95 MJ/L × 1/17.5 h/m ³

Le tableau 3-8 présente le transport du sol fluide issu du démantèlement en vue de son élimination ou de sa valorisation. Sur la base des indications du fabricant, on part du principe que 50 % des matériaux sont mis en décharge et 50 % valorisés. Dans ce cadre, 50 % des matériaux d'excavation sont acheminés vers une décharge de type B. Les 50 % restants sont valorisés, 30 % étant utilisés sur un autre chantier et 20 % étant entreposés temporairement puis valorisés sur place. La valorisation du sol fluide sous forme de sol fluide constitue, dans la pratique, la voie de valorisation la plus probable et la plus pertinente sur le plan économique. L'hypothèse d'une mise en décharge de la moitié des matériaux doit donc être considérée comme prudente et reflète une estimation conservatrice des taux de valorisation réels.

Les distances de transport retenues pour l'élimination ont été reprises de l'étude «Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen» [29]. Pour l'élimination des matériaux d'excavation dans une décharge de type B, on retient une distance de transport moyenne de 30 km, modélisée comme un transport routier.

On suppose que les matériaux d'excavation valorisés sur un autre chantier présentent une distance de transport de 20 km. Cette hypothèse s'appuie sur les distances de transport standard indiquées pour les produits minéraux selon Frischknecht et al. (2007) [22].

Une partie des matériaux d'excavation issus du démantèlement n'est pas directement réutilisée, mais entreposée temporairement pour des raisons de logistique de chantier (p. ex. déroulement des travaux, espace disponible), afin d'être réutilisée ultérieurement sur place. Dans la modélisation, on suppose pour cela un dépôt intermédiaire situé à 1 km. Il en résulte pour les matériaux d'excavation valorisés une distance de transport totale de 2 km (1 km pour l'entreposage intermédiaire et 1 km pour le retour au chantier).

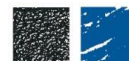


Tableau 3-8: Inventaire de l'écobilan – Transport du chantier vers le site d'élimination ou de valorisation (C2).

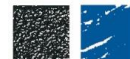
Données techniques principales		Processus de la base de données environnementales	Dérivation / Remarque
Paramètre	Quantité/FU		
Transport vers la décharge	27 tkm	Transport, freight, lorry, 16t-32t gross weight, fleet average {CH} U	Distance jusqu'à la décharge: 30 km [29] Part de matériaux d'excavation ⁸ : 50 % → $30 \text{ km} \times 1.8 \text{ t/m}^3 \times 0.5$
Transport vers un autre périmètre de chantier	10.8 tkm		Distance vers un autre périmètre de chantier ⁸ : 20 km [22] Part de matériaux d'excavation ⁸ : 30 % → $20 \text{ km} \times 1.8 \text{ t/m}^3 \times 0.3$
Transport vers le dépôt intermédiaire	0.7 tkm		Distance jusqu'au dépôt intermédiaire ⁸ 2 km (transport aller-retour) Part des matériaux d'excavation ⁸ : 20 % → $2 \text{ km} \times 1.8 \text{ t/m}^3 \times 0.2$

Le tableau 3-9 présente l'élimination ou la valorisation du sol fluide en fin de vie. La présente étude ne modélise que l'élimination de 50 % du sol fluide démantelé dans une décharge de type B. La valorisation des 50 % restants n'est pas prise en compte, conformément au principe de cut-off.

Tableau 3-9: Inventaire de l'écobilan – Élimination du sol fluide (C3, C4).

Données techniques principales		Processus de la base de données environnementale	Dérivation / Remarque
Paramètres	Quantité/FU		
Élimination des matériaux de sol	0.9 t	Disposal, inert waste, 5% water, to construction waste landfill {CH} U	Mise en décharge de 50 % des matériaux de remblayage démantelés ⁸
	0.54 t	-	Pas de données disponibles, car 30 % des matériaux de remblayage sont valorisés sur un chantier externe ⁸ .
	0.36 t	-	Pas de données disponibles, car 20 % des matériaux de remblayage sont valorisés directement sur place ⁸ .

⁸ Hypothèse d'UTech basée sur les données du fabricant.



3.2.4 Analyses de sensibilité

Afin de vérifier la robustesse des résultats, des analyses de sensibilité sont réalisées dans la présente étude pour les hypothèses centrales.

Variation de la teneur en ciment dans les formulations de sol fluide prises en compte

La formulation de sol fluide utilisée dans l'étude repose sur la moyenne de douze formulations couramment utilisées. Étant donné que ces formulations diffèrent notamment par leur teneur en ciment, une analyse de sensibilité est réalisée afin d'étudier l'influence de cette fourchette sur les résultats de l'écobilan. À cette fin, la formulation moyenne de sol fluide est comparée à deux formulations sélectionnées qui, parmi les douze formulations recensées, présentent respectivement la plus faible (formulation 8) et la plus élevée teneur en ciment (formulation 9) (voir chapitre 3.1.1).

Les scénarios suivants sont pris en compte:

- **Scénario de référence:** formulation moyenne de sol fluide (moyenne des 12 formulations)
- **Sensibilité 1:** formulation présentant la plus faible teneur en ciment parmi les 12 formulations
- **Sensibilité 2:** formulation présentant la teneur en ciment la plus élevée parmi les 12 formulations

Valorisation des résidus de criblage issus de la production de sol fluide

Le traitement des matériaux d'excavation dans le cadre de la production de sol fluide génère des résidus de criblage. D'après des entretiens avec des fabricants de sol fluide, ces résidus se composent principalement de grosses particules de gravier et de pierres, qui sont généralement réutilisées dans la fabrication du béton [15]. Dans l'hypothèse de référence de cette étude, on part du principe que cet excédent de matériaux est entièrement valorisé. En conséquence, les impacts environnementaux associés sont placés en dehors des frontières du système, conformément au principe de cut-off.

Comme une autre option d'élimination de ce matériau ne peut être exclue d'emblée, une analyse de sensibilité est réalisée à titre complémentaire dans l'hypothèse où les résidus de criblage seraient mis en décharge.

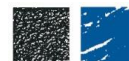
- **Scénario de référence:** Les matériaux excédentaires sont valorisés à 100 % → aucun impact environnemental à l'intérieur des frontières du système
- **Sensibilité 1:** Les matériaux excédentaires sont valorisés à 50 % → impacts environnementaux liés au transport vers la décharge et au processus de mise en décharge lui-même
- **Sensibilité 2:** Les matériaux excédentaires sont valorisés à 0 % → impacts environnementaux liés au transport vers la décharge et au processus de mise en décharge lui-même

Transport entre le chantier et le site de production de sol fluide (aller-retour)

D'après les discussions avec des experts, il est techniquement possible de transporter de sol fluide sur une durée de trajet d'environ 45 minutes, ce qui correspond, selon les conditions de circulation, à une distance d'environ 30 à 40 km. Selon les indications du fabricant, on privilégie toutefois dans la pratique une livraison locale, car les longues distances sont évitées pour des raisons de qualité et de logistique. En général, les chantiers se situent à une distance de 5 à 10 km du site de production, c'est pourquoi une distance de transport de 10 km a été retenue dans le scénario de référence.

Afin d'étudier l'influence de distances de transport plus longues sur l'écobilan de la formulation moyenne de sol fluide, les scénarios suivants sont pris en compte:

- **Scénario de référence:** 10 km



- **Sensibilité 1:** 15 km (augmentation de 50 % par rapport au scénario de référence)
- **Sensibilité 2:** 20 km (augmentation de 100 % par rapport au scénario de référence)
- **Sensibilité 3:** 25 km (augmentation de 150 % par rapport au scénario de référence)

Scénarios d'élimination du sol fluide

Étant donné que, lors de mesures de démantèlement ou d'assainissement, on ne sait souvent pas dans quelle mesure les matériaux de remblayage retirés seront valorisés ou mis en décharge, une analyse de sensibilité supplémentaire examine l'influence de différents taux de valorisation (tableau 3-10).

Tableau 3-10: Aperçu des scénarios d'élimination du sol fluide examinés dans l'analyse de sensibilité.

Scénario	Mise en décharge	Valorisation sur d'autres chantiers	Valorisation sur place
Sensibilité 1	0 %	60 %	40 %
Sensibilité 2	25 %	45 %	30 %
Référence	50 %	30 %	20 %
Sensibilité 3	75 %	15 %	10 %
Sensibilité 4	100 %	0 %	0 %

3.3 Évaluation des impacts de la formulation moyenne de sol fluide

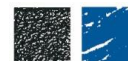
L'évaluation des impacts de la formulation moyenne de sol fluide (ci-après également désignée par «sol fluide conventionnel» ou «sol fluide»), analysée au moyen des indicateurs GES, UBP et CEC, figure dans l'appendice B.

3.4 Résultats de la formulation moyenne de sol fluide

Ce chapitre présente les résultats de l'écobilan de la formulation moyenne de sol fluide. Les résultats se rapportent aux impacts environnementaux par unité fonctionnelle, définie comme un mètre cube de remblayage de tranchée réalisé avec du sol fluide. Le tableau 3-11 donne un aperçu des résultats des trois indicateurs environnementaux considérés ainsi que de leur répartition entre les différentes phases du cycle de vie.

Tableau 3-11: Aperçu des impacts environnementaux de la formulation moyenne du sol fluide par m³ sol fluide, répartis par phases du cycle de vie.

Indicateurs environne- mentaux	Unité	Fabrication (A1 – A3)	Mise en œuvre (A4 – A5)	Élimination (C1 – C4)	Total
GES	kg CO ₂ -eq/m ³	40.6	3.9	10.1	54.6
UBP	UBP/m ³	53'954	7'070	59'563	120'588
CEC (total)	kWh Oil-eq/m ³	76.2	17.2	44.4	137.8
CEC (non renouvelable)	kWh Oil-eq/m ³	69.4	16.3	42.0	127.6
CEC (renouvelable)	kWh Oil-eq/m ³	6.8	0.9	2.4	10.1



3.4.1 Émissions de gaz à effet de serre

Les émissions totales de gaz à effet de serre s'élèvent à 54.6 kg CO₂-eq par m³ de remblayage de tranchée avec du sol fluide (figure 3-3). La phase de fabrication (A1 – A3) y contribue le plus, avec 40.6 kg CO₂-eq. Au sein de cette phase, l'approvisionnement en matières premières (A1) est déterminant. À lui seul, le ciment génère 31.3 kg CO₂-eq en A1, soit 96 % des émissions de cette sous-phase. Ce chiffre est intéressant, car selon la formulation moyenne de sol fluide, le ciment ne représente que 2.3 % de la masse totale du sol fluide (voir chapitre 3.1.1).

La phase de mise en œuvre (A4 – A5) a un impact moindre, avec 3.9 kg CO₂-eq. La phase d'élimination (C1 – C4) génère 10.1 kg CO₂-eq, principalement en raison du transport du sol fluide démantelé vers le site d'élimination ou de valorisation.

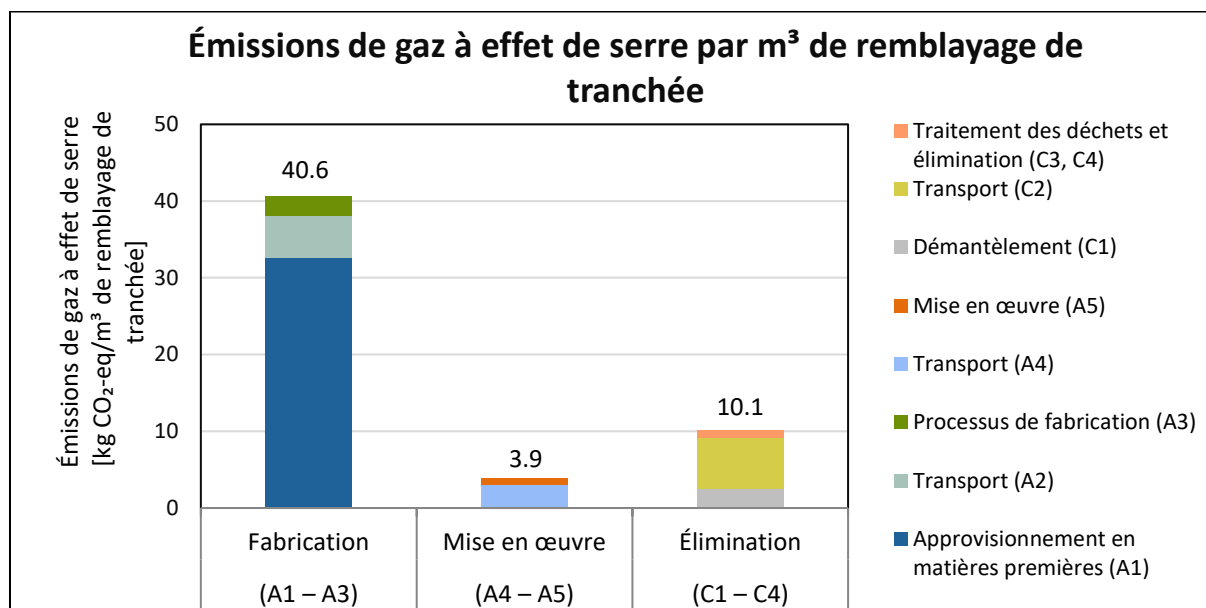


Figure 3-3: Émissions totales de gaz à effet de serre de la formulation moyenne de sol fluide par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).

3.4.2 Impact environnemental total

L'impact environnemental total du sol fluide s'élève à 120'588 UBP par m³ de remblayage de tranchée (figure 3-4). Contrairement aux émissions de gaz à effet de serre, c'est la phase d'élimination (C1 – C4) qui contribue le plus à l'impact environnemental total, avec 59'563 UBP. Cela s'explique principalement par le traitement et l'élimination de la moitié du sol fluide démantelé qui, selon le modèle, n'est pas valorisée mais mise en décharge de type B (voir chapitre 3.2.3).

La phase de fabrication (A1 – A3) représente également une part importante de l'impact environnemental total, avec 53'954 UBP. En comparaison, la phase de construction (A4 – A5) ne contribue que faiblement à l'impact environnemental total, avec 7'070 UBP.

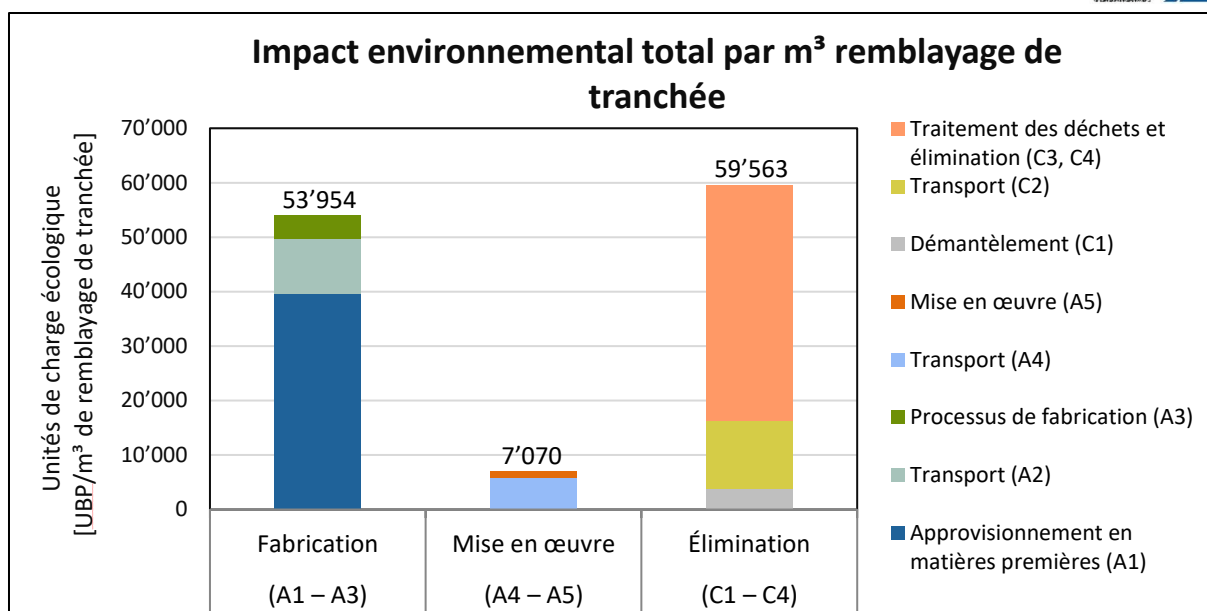
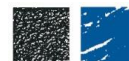


Figure 3-4: Impact environnemental total par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.

3.4.3 Consommation d'énergie cumulée

La consommation d'énergie cumulée s'élève à 137.8 kWh oil-eq par m³ de remblai de tranchée avec du sol fluide (figure 3-5). La phase de fabrication (A1 – A3) représente la plus grande part avec 76.2 kWh oil-eq, suivie de la phase d'élimination (C1 – C4) avec 44.4 kWh équivalent pétrole. La phase de mise en œuvre (A4 – A5) est la moins importante, avec 17.2 kWh oil-eq. Sur la consommation énergétique cumulée totale, 93 % proviennent de sources d'énergie non renouvelables et 7 % de sources d'énergie renouvelables.

L'appendice C contient des graphiques complémentaires sur la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable (voir figure 0-3 et figure 0-4).

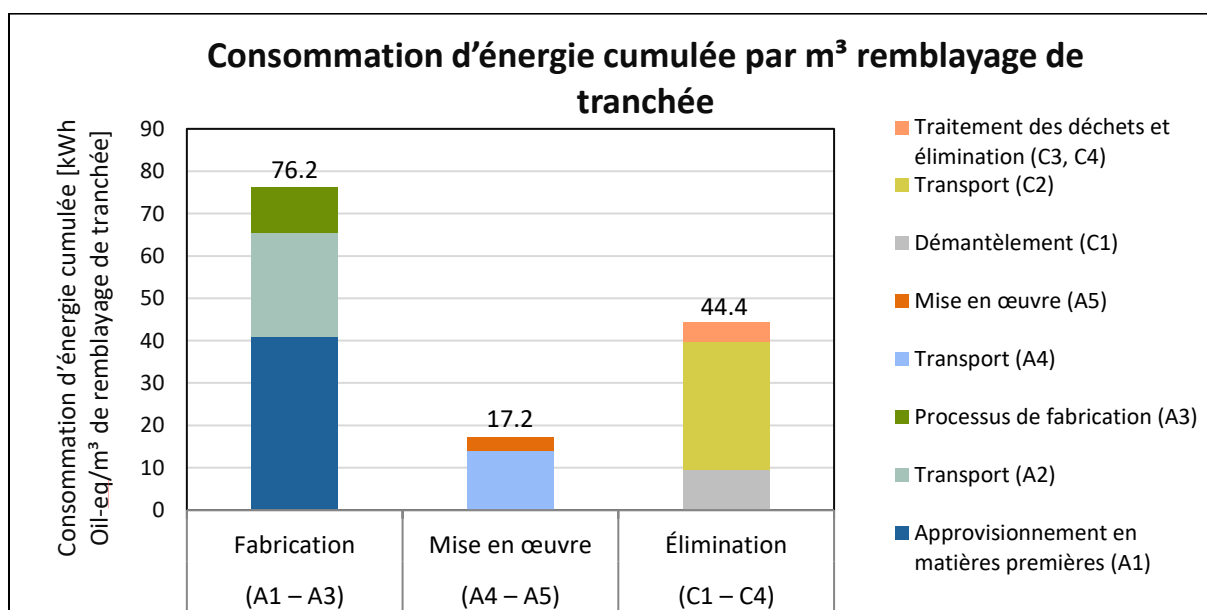
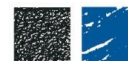


Figure 3-5: Consommation d'énergie cumulée par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.



3.5 Interprétation

Les résultats de l'écobilan de la formulation moyenne de sol fluide montrent que les impacts environnementaux sont répartis de manière variable entre les différentes phases du cycle de vie, selon l'indicateur environnemental considéré. Alors que la phase de fabrication (A1 – A3) représente la plus grande part des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation d'énergie cumulée, c'est la phase d'élimination (C1 – C4) qui représente la plus grande part de l'impact environnemental total exprimé en unités de charge écologique. Cela s'explique principalement par le traitement et l'élimination de la moitié du sol fluide qui, en fin de vie, est mise en décharge de type B, tandis que l'autre moitié est valorisée. Dans la méthode UBP, la mise en décharge a un poids plus important que dans l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre, car outre les émissions de gaz à effet de serre, d'autres aspects environnementaux tels que l'occupation du volume de décharge sont également évalués. Dans l'ensemble de données sur les décharges utilisé, la masse de déchets stockée est prise en compte en conséquence, ce qui explique la contribution élevée de la phase d'élimination à l'impact environnemental total exprimé en UBP.

Il est également frappant de constater que, dans tous les indicateurs environnementaux, l'approvisionnement en matières premières représente une part importante des impacts environnementaux. Afin de mieux contextualiser les résultats, une analyse des points sensibles a été réalisée pour la phase de fabrication (A1 – A3). La raison en est que cette phase constitue le levier central pour une optimisation écologique du sol fluide. Alors que la phase d'élimination dépend fortement des conditions-cadres spécifiques au projet (par exemple, les filières de valorisation effectives, les distances de transport, les structures régionales de mise en décharge ou les futures pratiques de démantèlement) et ne peut donc pas toujours être influencée par la conception du produit, la formulation est directement contrôlable.

La figure 3-6 présente l'analyse des points sensibles de la phase de fabrication pour les indicateurs environnementaux que sont les émissions de gaz à effet de serre, les unités de charge écologique et la consommation d'énergie cumulée. Dans ces trois catégories, la part de ciment domine. Le levier décisif pour réduire davantage les impacts environnementaux du sol fluide réside donc dans la réduction ou la substitution de la part de ciment.

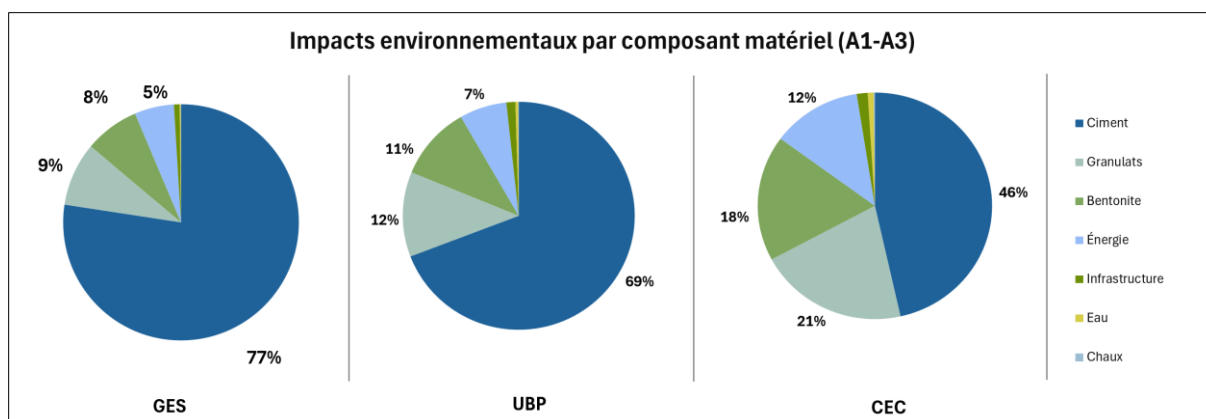
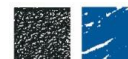


Figure 3-6: Analyse des hotspots: impacts environnementaux de la formulation de référence par composant (A1 – A3).

3.5.1 Variante de sol fluide améliorée

L'analyse des hotspots de la phase de fabrication a montré que l'utilisation de ciment est le facteur qui contribue le plus aux impacts environnementaux du sol fluide. Dans la formulation moyenne de sol fluide, on a modélisé pour cela un ciment de la catégorie CEM I 42.5 R (voir chapitre 3.1.1). Étant donné que le choix du liant constitue donc le principal levier écologique, nous examinons ici l'impact de l'utilisation d'un ciment à teneur réduite en clinker sur l'écobilan. À cette fin, une variante améliorée de sol fluide a été calculée, dans laquelle la formulation, les frontières du système et les hypothèses du modèle restent strictement identiques à celles de la formulation moyenne de sol fluide. Seul l'ensemble



de données concernant le ciment a été adapté: au lieu de l'ensemble de données «Portland cement, strength class Z 42.5, at plant {CH} U», on a utilisé «CEM III, A cement, at plant {CH} U».

La figure 3-7 présente une comparaison des émissions de gaz à effet de serre du sol fluide conventionnel à base de CEM I 42.5 R et la variante améliorée à base de CEM III A.

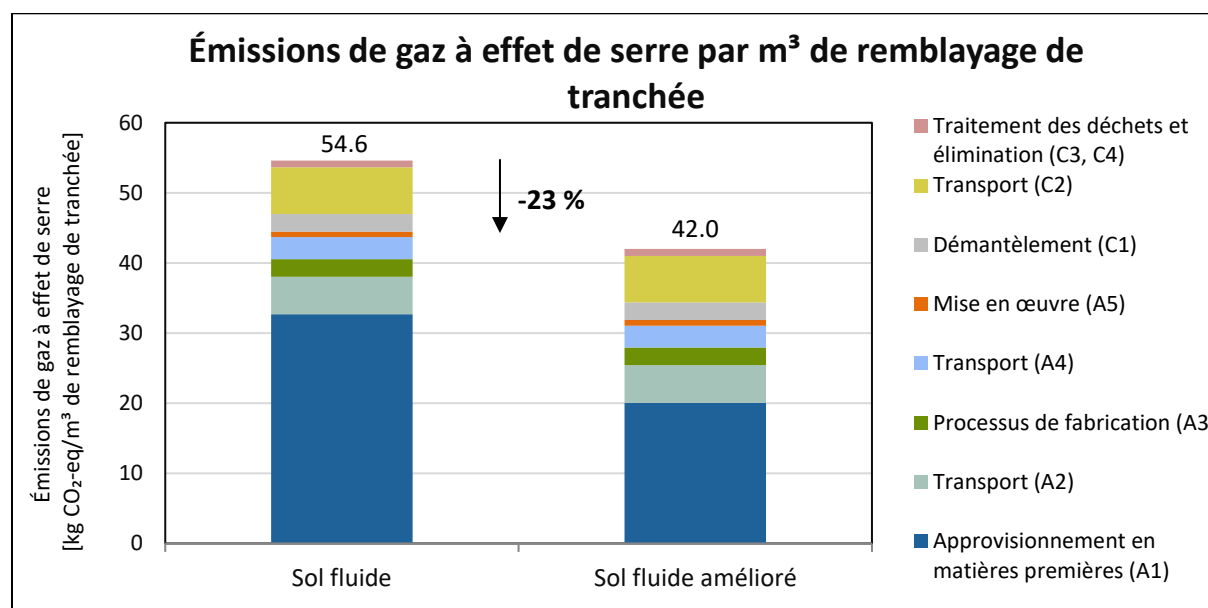


Figure 3-7: Émissions de gaz à effet de serre du sol fluide conventionnel et du sol fluide amélioré (CEM I 42.5 R vs CEM III A).

L'utilisation de ciment à teneur réduite en clinker permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 23 % sur l'ensemble du cycle de vie. En ce qui concerne l'indicateur d'impact environnemental, on observe une réduction de 11 % (voir figure 0-5 dans l'appendice C) et, pour la consommation d'énergie cumulée, une réduction de 1 % (voir figure 0-6 jusqu'à figure 0-8 dans l'appendice C).

Le sol fluide à base de CEM III A, dont l'impact environnemental a été amélioré, est utilisé comme variante améliorée de sol fluide dans les analyses suivantes de cette étude. D'autres liants à faibles émissions, ou systèmes de liants alternatifs, sont en principe disponibles et font l'objet d'une analyse qualitative au chapitre 5.6.1. Une optimisation supplémentaire de la variante améliorée considérée ici n'est donc pas à exclure. Une amélioration supplémentaire peut en outre être obtenue en réduisant la teneur en ciment dans le sol fluide.

3.5.2 Résultats des analyses de sensibilité

Les résultats suivants montrent dans quelle mesure l'écobilan du sol fluide réagit aux hypothèses centrales et dans quelle mesure les résultats de référence sont robustes face à des conditions limites modifiées.

Variation de la teneur en ciment dans les formulations de sol fluide prises en compte

Les formulations de sol fluide prises en compte se distinguent notamment par leur teneur en ciment (voir chapitre 3.2.4). Le tableau 3-12 présente les résultats absolus de l'analyse de sensibilité relative à la variation de la teneur en ciment. La figure 3-8 illustre les écarts des deux formulations comparées par rapport à la formulation moyenne de sol fluide.

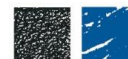


Tableau 3-12: Résultats de l'analyse de sensibilité concernant la variation de la teneur en ciment dans les 12 formulations de sol fluide prises en compte.

Analyse de sensibilité	Teneur en ciment [%]	GES [kg CO ₂ -eq/m ³]	UBP [UBP/m ³]	CEC (total) [kWh Oil-eq/m ³]
Formulation moyenne de sol fluide (référence)	2.3	55	120'588	138
Formulation de sol fluide présentant la plus faible teneur en ciment	1.3	42	106'059	125
Formulation de sol fluide présentant la plus élevée teneur en ciment	3.3	67	134'838	150

Les résultats montrent que l'utilisation d'une formulation à faible teneur en ciment réduit considérablement les émissions de gaz à effet de serre. À l'inverse, une formulation à forte teneur en ciment entraîne des émissions proportionnellement plus élevées.

Étant donné qu'une moyenne de plusieurs formulations courantes sur le marché a été utilisée pour la formulation moyenne de sol fluide, les résultats peuvent être considérés comme fiables. Ils reflètent une fourchette réaliste du marché actuel. L'analyse de sensibilité confirme néanmoins que la teneur en ciment, ou plutôt le liant, constitue un paramètre d'influence central pour les impacts environnementaux du sol fluide.

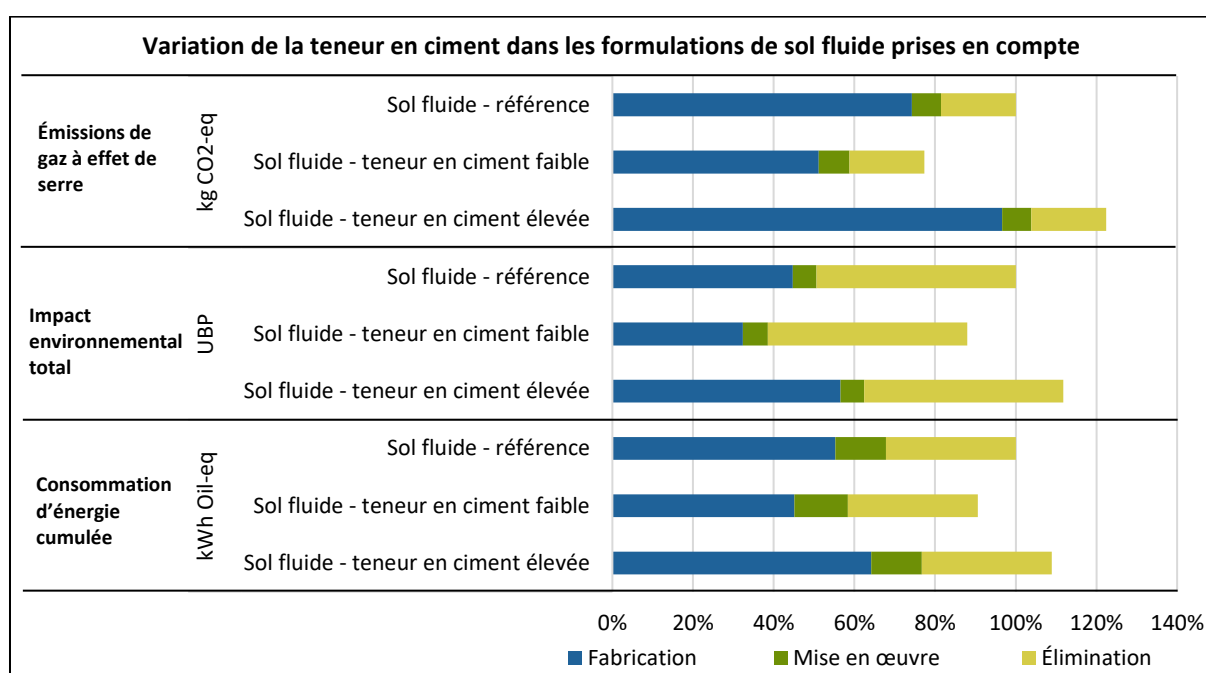


Figure 3-8: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan par rapport à la formulation moyenne de sol fluide pour différentes teneurs en ciment.

Valorisation des résidus de criblage issus de la production de sol fluide

La valorisation des résidus de criblage issus de la production de sol fluide peut varier selon les projets (voir chapitre 3.2.4). Le tableau 3-13 présente les résultats absolus de l'analyse de sensibilité à ce sujet. La figure 3-9 illustre les écarts des scénarios comparatifs par rapport au scénario de référence.

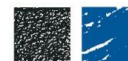


Tableau 3-13: Résultats de l'analyse de sensibilité concernant la valorisation des résidus de criblage lors de la production de sol fluide.

Analyse de sensibilité	GES [kg CO ₂ -eq/m ³]	UBP [UBP/m ³]	CEC (total) [kWh Oil-eq/m ³]
100 % de valorisation (référence)	55	120'588	138
50 % de valorisation	56	133'582	144
0 % de valorisation	57	146'576	151

La figure 3-9 illustre l'influence de différentes hypothèses concernant l'élimination des résidus de criblage sur les résultats de l'écobilan. Si les résidus de criblage sont entièrement mis en décharge au lieu d'être entièrement valorisés, les émissions de gaz à effet de serre augmentent de 4 %, l'impact environnemental total (UBP) de 13 % et la consommation totale d'énergie de 5 %. Bien que les hypothèses relatives à la valorisation aient une incidence sur les résultats, les écarts restent faibles par rapport à l'incertitude globale du modèle. La valorisation ou la mise en décharge des résidus de criblage ne constitue donc pas un paramètre d'influence critique pour les résultats.

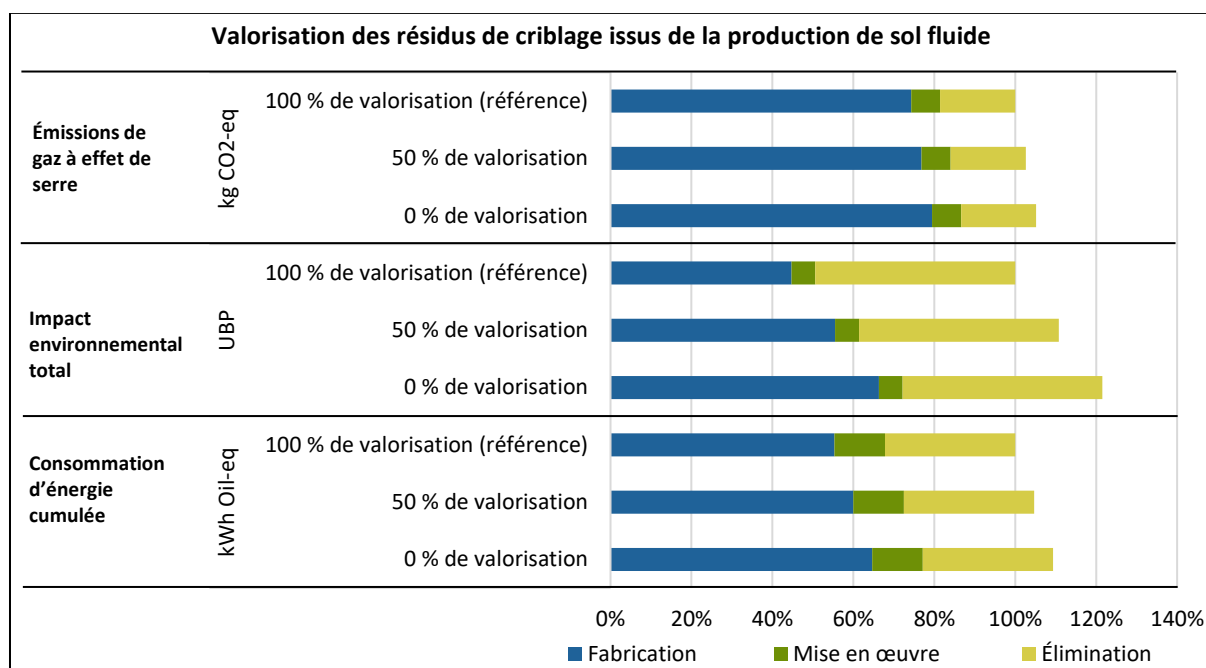


Figure 3-9: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan en fonction des différentes valorisations options de valorisation des résidus de criblage issus de la production de sol fluide par rapport au scénario de référence.

Transport entre le chantier et le site de production de sol fluide (aller-retour)

La distance entre le chantier et le site de production de sol fluide peut varier en fonction du site (voir chapitre 3.2.4). Le tableau 3-14 présente les résultats absolus de l'analyse de sensibilité. La figure 3-10 illustre les écarts des scénarios comparatifs par rapport au scénario de référence.

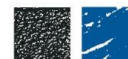


Tableau 3-14: Résultats de l'analyse de sensibilité concernant les distances de transport en amont entre le chantier et le site de production de sol fluide.

Analyse de sensibilité	GES [kg CO ₂ -eq/m ³]	UBP [UBP/m ³]	CEC (total) [kWh Oil-eq/m ³]
10 km (référence)	55	120'588	138
15 km	58	126'404	152
20 km	61	132'221	166
25 km	64	138'037	180

La figure 3-10 montre l'influence de l'augmentation de la distance de transport entre le site de production de sol fluide et le chantier. Le transport aller-retour est pris en compte dans chaque cas. Par rapport au scénario de référence de 10 km, une augmentation de la distance de transport à 25 km entraîne une hausse des émissions de gaz à effet de serre de 14 %, de l'impact environnemental (UBP) de 9 % et de la consommation totale d'énergie de 17 %.

Les résultats montrent que les transports en amont peuvent avoir une influence significative sur l'écobilan global du sol fluide. La distance de 10 km retenue comme référence est basée sur les indications du fabricant et représente une valeur pratique typique. Parallèlement, des distances de transport plus longues sont techniquement possibles et peuvent également se présenter en fonction de l'emplacement du chantier et de la disponibilité de sites de production de sol fluide appropriés. Dans la pratique, pour des raisons logistiques, on vise toutefois généralement des distances de transport courtes.

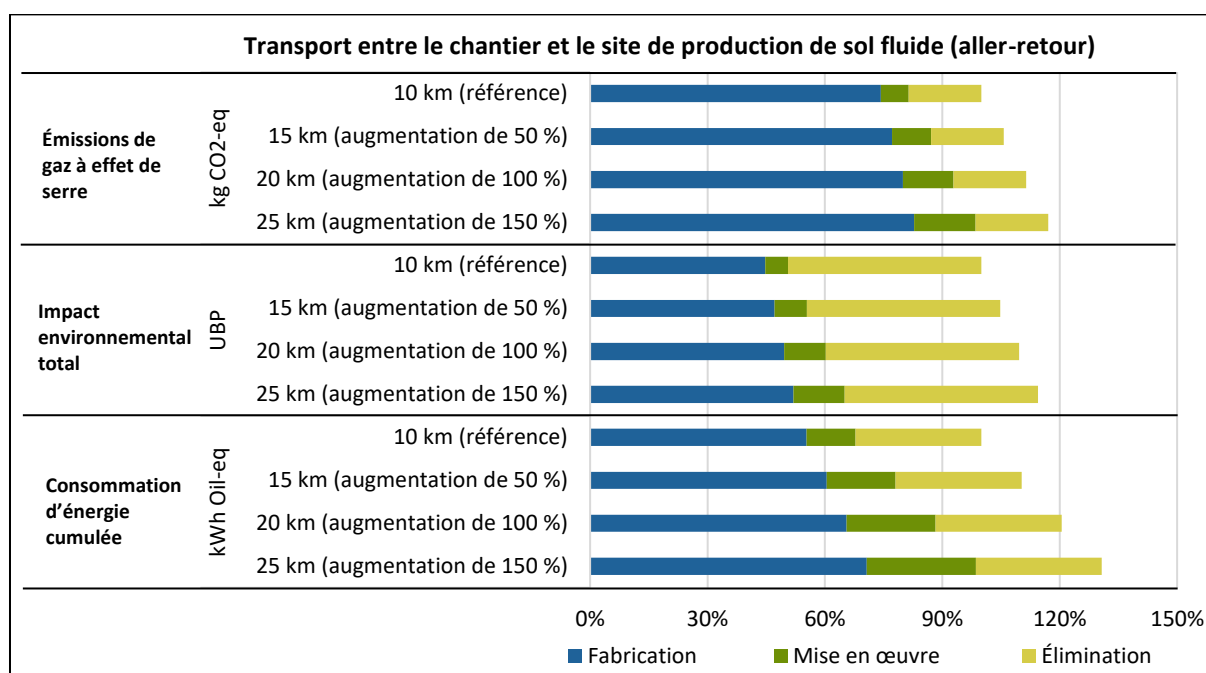
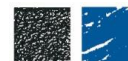


Figure 3-10: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan pour différentes distances de transport entre le chantier et le site de production de sol fluide par rapport à la référence.



Scénarios d'élimination du sol fluide

Les taux de valorisation et de mise en décharge du sol fluide démantelé peuvent varier d'un projet à l'autre (voir chapitre 3.2.4). Le tableau 3-15 présente les résultats absolus de l'analyse de sensibilité. La figure 3-11 illustre les écarts des différents scénarios par rapport au scénario de référence prévoyant 50 % de valorisation.

Tableau 3-15: Résultats de l'analyse de sensibilité pour différents scénarios d'élimination du sol fluide.

Analyse de sensibilité	GES [kg CO ₂ -eq/m ³]	UBP [UBP/m ³]	CEC (total) [kWh Oil-eq/m ³]
0 % de valorisation	58	168'849	155
25 % de valorisation	56	144'722	146
50 % de valorisation (scénario de référence)	55	120'588	138
75 % de valorisation	53	96'467	129
100 % de valorisation	51	72'340	121

La figure 3-11 montre l'influence de différents scénarios d'élimination du sol fluide démantelé sur les résultats de l'écobilan. Par rapport au scénario de référence avec 50 % de valorisation, une mise en décharge totale (0 % de valorisation) entraîne une augmentation des émissions de gaz à effet de serre de 5 %, de l'impact environnemental total (UBP) de 24 % et de la consommation totale d'énergie de 7 %.

Les résultats montrent que le choix de la stratégie d'élimination du sol fluide démantelé peut avoir une influence significative sur les résultats de l'écobilan, en particulier en ce qui concerne l'impact environnemental total.

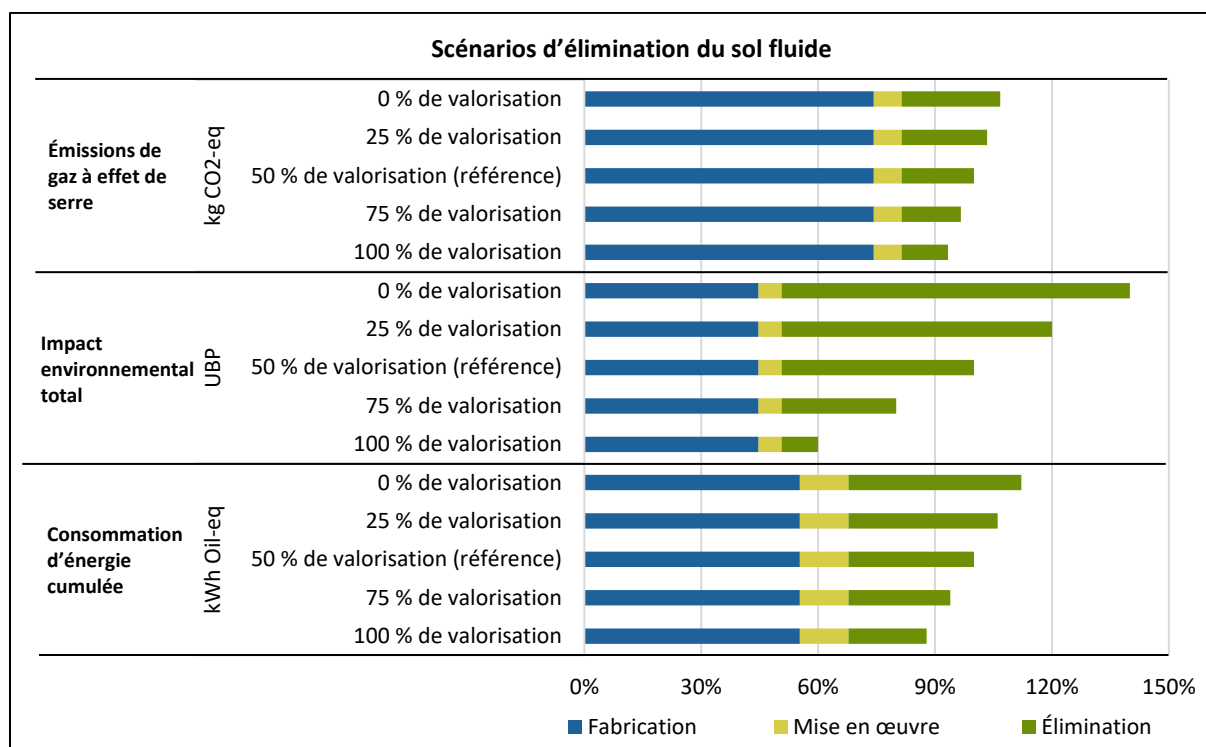


Figure 3-11: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan pour différents scénarios d'élimination du sol fluide par rapport à la référence.



4 Écobilan du sol fluide avec charbon végétal

Le charbon végétal peut compléter le sol fluide d'un point de vue écologique, car il contient du carbone biogène qui, s'il est utilisé de manière appropriée, peut rester stocké à long terme dans le matériau. Il existe ainsi un potentiel d'amélioration du bilan climatique du sol fluide. Ce chapitre examine comment différentes proportions de charbon végétal dans la formulation du sol fluide influencent les impacts environnementaux, ainsi que la faisabilité technique et le potentiel de déploiement.

4.1 Définition des variantes de sol fluide avec charbon végétal

Trois scénarios ont été définis pour analyser le potentiel du charbon végétal dans le sol fluide:

- Sol fluide sans charbon végétal (formulation moyenne de sol fluide selon le chapitre 3, ci-après: sol fluide)
- Sol fluide avec une teneur modérée en charbon végétal (ci-après: sol fluide avec charbon végétal)
- Sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal techniquement réalisable (ci-après: sol fluide avec max. charbon végétal)

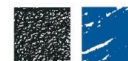
Les trois scénarios ont été modélisés une fois avec du ciment CEM I 42.5 R et une fois avec du ciment à teneur réduite en clinker CEM III A, afin d'étudier l'influence tant de la teneur en charbon végétal que du type de ciment sur les impacts environnementaux.

Les formulations de sol fluide utilisées s'appuient sur des formulations courantes, telles qu'elles sont déjà employées de manière ponctuelle aujourd'hui dans le génie civil suisse pour le sol fluide. Le tableau 4-1 présente les formulations utilisées.

Tableau 4-1: Formulations des variantes de sol fluide avec différentes teneurs en charbon végétal.

Composants	Sol fluide [kg/m³]	Sol fluide avec charbon végétal [kg/m³]	Sol fluide avec max. charbon végétal [kg/m³]
Matériaux d'excavation	1'300	1'332	1'345
Ciment (CEM I 42,5 R ou CEM III A)	42	27	26
Bentonite	32	21	20
Eau	426	316	312
Chaux	1	0	0
Charbon végétal	0	16	45
Total	1'801	1'713	1'749

Le modèle d'écobilan pour les variantes utilisant du charbon végétal correspond au modèle de la formulation moyenne de sol fluide présenté au chapitre 3.1.1. Les ajustements concernent principalement les modules A1, A2 et A4, car les matériaux utilisés, leurs quantités ainsi que les masses transportées diffèrent de ceux de la formulation moyenne du sol fluide. Les autres hypothèses du modèle et les étapes du processus ont été reprises telles quelles.



4.2 Modélisation du stockage du carbone

Pour modéliser le stockage du carbone, l'impact environnemental de la production de charbon végétal a d'abord été évalué. L'ensemble de données «Biochar, from spruce wood pyrolysis {CH} U» a été utilisé à cette fin [21]. Dans ce processus, le charbon végétal est modélisé sur la base d'un procédé de pyrolyse lente, au cours duquel le bois d'épicéa est décomposé thermiquement en l'absence d'oxygène. Ce processus génère du charbon végétal comme produit principal, ainsi que du gaz de pyrolyse et de l'huile de pyrolyse comme sous-produits. Les sous-produits sont traités selon l'approche «cut-off». Le tableau 4-2 présente les impacts environnementaux de la production de 1 kg de charbon végétal.

Tableau 4-2: Impacts environnementaux de la production de charbon végétal [21].

Indicateurs environnementaux	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable selon)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/kg de charbon végétal]	[UBP/kg de charbon végétal]	[kWh Oil-eq/kg de charbon végétal]	[kWh Oil-eq/kg de charbon végétal]	[kWh Oil-eq/kg de charbon végétal]
Valeur	0.271	550	10.62	1.5	9.27

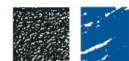
Selon la fiche d'information «Utilisation de charbon végétal dans l'agriculture en Suisse», la teneur en carbone du charbon végétal issu de matières premières ligneuses se situe entre 75 et 95 % [30]. Dans la présente étude, une teneur en carbone de 85 % a été retenue. Cela correspond à un stockage de carbone de 0.85 kg C par kg de charbon végétal. Cette valeur a été convertie en équivalents CO₂ à partir du rapport entre les masses molaires du carbone et du dioxyde de carbone. Il en résulte un stockage de carbone converti en CO₂ de 3.12 kg de CO₂ par kg de charbon végétal. Selon les «Écofacteurs suisses 2021», 1 g CO₂-eq correspond à une unité de charge écologique (UBP) [10]. Il en résulte une réduction de l'impact environnemental de 3'117 UBP par kg de charbon végétal. Il n'est pas possible de refléter cela dans la dépense énergétique cumulée (CEC), car le stockage du carbone correspond à une fixation de matière et non à un flux d'énergie.

Une comparaison avec d'autres études d'écobilan montre que le stockage de carbone du charbon végétal, exprimé en CO₂, se situe entre -1.8 et -4.8 kg CO₂-eq par kg de charbon végétal ([31], [32], [33]). La valeur de -3.12 kg de CO₂ par kg de charbon végétal calculée ici peut donc être considérée comme plausible.

Pour la présente étude, on suppose que le charbon végétal utilisé a été produit à partir de matières biogènes non polluées. On suppose en outre que le carbone biogène contenu dans le charbon végétal reste stable pendant toute la durée de vie du sol fluide et qu'il n'est pas réémis lors du démantèlement du remblayage de la tranchée.

Les indicateurs environnementaux utilisés pour la modélisation comprennent les émissions de gaz à effet de serre (GES), les unités de charge écologique (UBP) et la dépense énergétique cumulée (CEC), renouvelable et non renouvelable, par kg de charbon végétal. La part de carbone biogène du charbon végétal est entièrement prise en compte et considérée comme stockée à long terme⁹. L'effet du stockage du carbone par le charbon végétal est présenté séparément et n'est pas inclus dans le résultat total du sol fluide.

⁹ Il convient de noter que le stockage du carbone ne peut être pris en compte qu'une fois le sol fluide mis en place. Aucune émission négative n'est comptabilisée pendant la production de charbon végétal, l'effet ne se produit qu'à travers la fixation durable du carbone biogénique dans le sol fluide mis en place, sur l'ensemble de son cycle de vie.



La figure 4-1 présente les émissions de gaz à effet de serre liées à la production de charbon végétal ainsi que le stockage de carbone indiqué séparément. Le bois représente la principale source d'émissions de gaz à effet de serre. Ce chiffre inclut le transport du bois vers l'usine ainsi que son prétraitement par broyage et séchage.

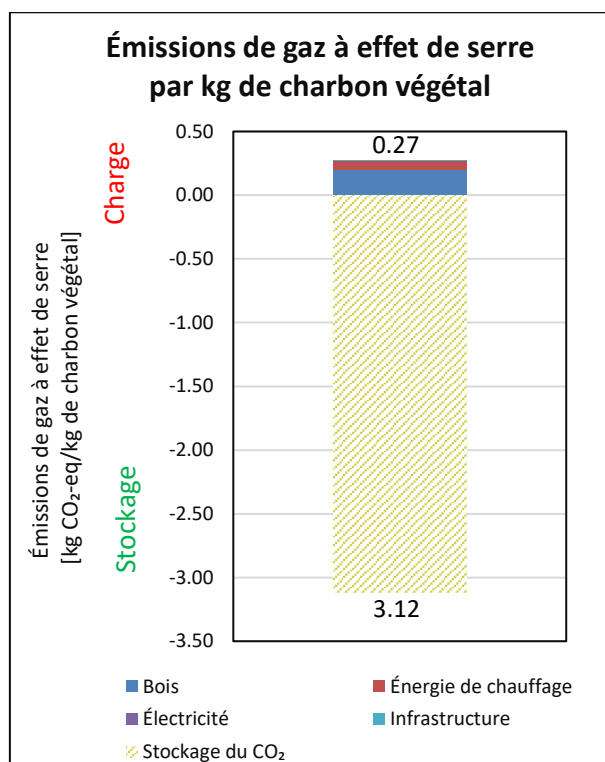


Figure 4-1: Émissions de gaz à effet de serre liées à la production de charbon végétal et stockage de carbone indiqué séparément (par kg de charbon végétal).

L'appendice C contient les graphiques complémentaires sur l'impact environnemental total et la consommation d'énergie de la production de charbon végétal (voir figure 0-9 à figure 0-12).

Digression: Le charbon végétal en tant que technologie à émissions négatives (NET)

Le charbon végétal est considéré comme une technologie potentielle à émissions négatives (NET), car la pyrolyse des résidus biogènes permet de transformer le carbone atmosphérique en une forme stable et solide et de le stocker à long terme. Pour être reconnue comme NET, la technologie doit permettre un stockage du CO₂ quantifiable et durable.

Conformément à l'ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ (ordonnance sur le CO₂, RS 641.711), les technologies de capture du CO₂ doivent satisfaire à des exigences en matière de durabilité, de surveillance et d'écobilan. Pour que les performances des puits de carbone soient reconnues, une durée minimale de stockage de 30 ans est requise [34].

Dans la présente étude, on part du principe que le carbone biogène contenu dans le charbon végétal reste stocké de manière stable pendant toute la durée d'utilisation du remblayage de la tranchée (100 ans) et qu'aucune intervention prématurée n'a lieu. Dans cette hypothèse, la durée minimale requise serait en principe respectée. Toutefois, si des interventions substantielles devaient être effectuées sur l'infrastructure au cours de cette période, la durabilité devrait être vérifiée au cas par cas pour le projet concerné. Pour une reconnaissance formelle en tant qu'émission négative, une évaluation distincte liée au projet serait dans tous les cas nécessaire, conformément à l'ordonnance sur le CO₂. Le stockage de carbone présenté dans cette étude doit donc être considéré comme une effet de puits dans le écobilan, compte tenu de la durée minimale de stockage de 30 ans.



4.3 Résultats des variantes de sol fluide avec du charbon végétal

Ce chapitre présente les résultats des variantes de sol fluide avec du charbon végétal. Les résultats se rapportent aux impacts environnementaux par unité fonctionnelle, définie comme un mètre cube de remblayage de tranchée avec du sol fluide. Le tableau 4-3 donne un aperçu des résultats des trois indicateurs environnementaux considérés.

Tableau 4-3: Aperçu des impacts environnementaux des variantes de sol fluide étudiées, avec et sans charbon végétal, par m³ de remblayage de tranchée.

Variante de sol fluide	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	kg CO ₂ -eq/m ³	UBP/m ³	kWh Oil-eq/m ³	kWh Oil-eq/m ³	kWh Oil-eq/m ³
Sol fluide	54.62	120'588	137.76	127.64	10.12
Sol fluide amélioré	42.01	107'459	137.24	126.57	10.68
Sol fluide avec charbon végétal	46.84	114'189	290.05	133.52	156.53
Sol fluide amélioré avec charbon végétal	38.65	105'676	289.78	132.87	156.91
Sol fluide avec max. charbon végétal	54.22	129'638	597.87	172.68	425.18
Sol fluide amélioré avec max. charbon végétal	46.28	121'387	597.61	172.05	425.55

4.3.1 Émissions de gaz à effet de serre

La figure 4-2 présente la comparaison des émissions de gaz à effet de serre des six variantes de sol fluide étudiées. Les émissions de gaz à effet de serre du sol fluide à teneur modérée en charbon végétal s'élèvent à 46.8 kg CO₂-eq/m³, celles du sol fluide amélioré à teneur modérée en charbon végétal à 38.7 kg CO₂-eq/m³. Cela correspond à une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 17 %. Pour les variantes présentant une teneur maximale en charbon végétal, les valeurs s'élèvent respectivement à 54.2 kg CO₂-eq/m³ et 46.3 kg CO₂-eq/m³, ce qui correspond à une réduction de 15 %. Ces valeurs ne tiennent pas compte de la compensation nette liée au stockage de CO₂ par le charbon végétal utilisé, le stockage du CO₂ est présenté séparément dans le graphique.

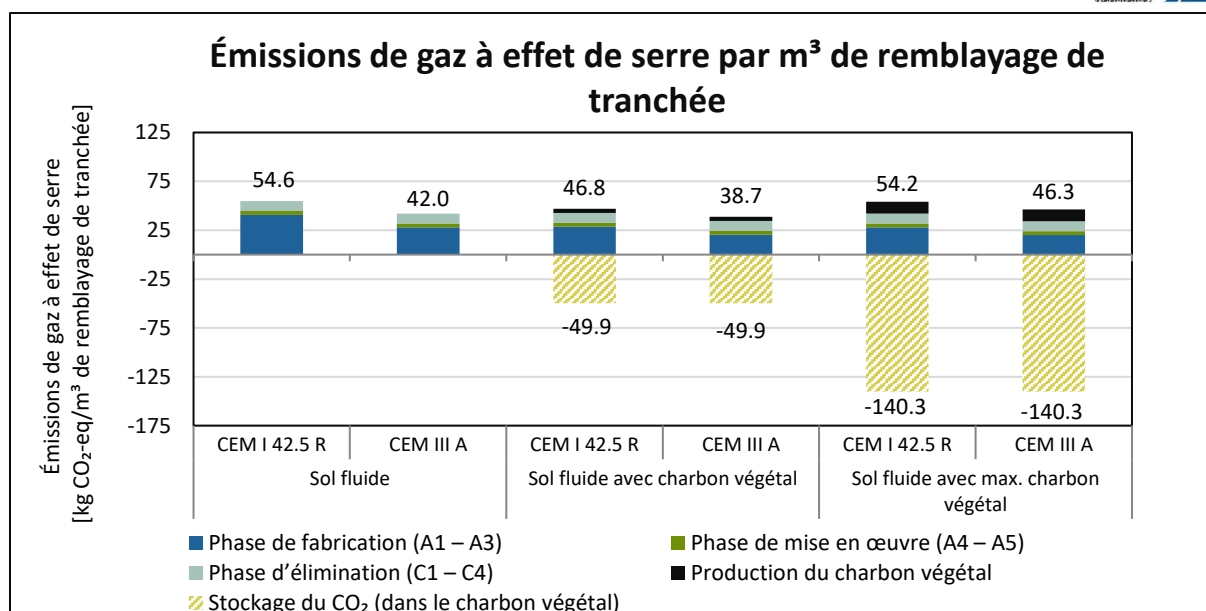
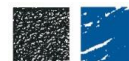


Figure 4-2: Émissions totales de gaz à effet de serre des variantes de sol fluide étudiées, avec et sans charbon végétal, par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4). Le stockage de carbone du charbon végétal, converti en CO₂, est indiqué séparément.

Bien que, dans les variantes de sol fluide utilisant du charbon végétal, les émissions liées au ciment et à la bentonite diminuent légèrement en raison de la réduction des quantités utilisées, la production du charbon végétal génère des émissions supplémentaires de gaz à effet de serre. Les étapes du processus tout au long du cycle de vie (fabrication A3, transport vers le chantier A4, mise en œuvre A5 et fin de vie C1 – C4) restent identiques pour toutes les variantes. Les différences entre les variantes résultent donc principalement des quantités de matières premières adaptées dans les formulations et de la production supplémentaire de charbon végétal. L'utilisation de CEM III A à la place de CEM I permet de réduire encore davantage les émissions de gaz à effet de serre dans les trois variantes de formulation.

4.3.2 Impact environnemental total

L'impact environnemental total des six variantes de sol fluide considérées suit la même tendance que les émissions de gaz à effet de serre (figure 4-3). L'impact environnemental total du sol fluide à teneur modérée en charbon végétal s'élève à 114'189 UBP/m³, celui du sol fluide amélioré à teneur modérée en charbon végétal à 105'676 UBP/m³. Cela correspond à une réduction de 7 %. Pour les variantes à teneur maximale en charbon végétal, on obtient des valeurs de 129'638 UBP/m³ et 121'387 UBP/m³ respectivement, ce qui correspond à une réduction de 6 %. Ces valeurs ne tiennent pas compte de la compensation nette liée au stockage du CO₂ par le charbon végétal utilisé, le stockage du CO₂ est présenté séparément dans le graphique.

À l'instar de la formulation moyenne de sol fluide, les impacts environnementaux totaux se concentrent sur deux points clés: l'approvisionnement en matières premières (A1) et le traitement et l'élimination des déchets (C3, C4) (voir chapitre 3.4.2). Dans le module A1, les impacts environnementaux des variantes à charbon végétal sont principalement liés au ciment et au charbon végétal. L'impact lors de la phase d'élimination est principalement dû à la mise en décharge du sol fluide non valorisé.

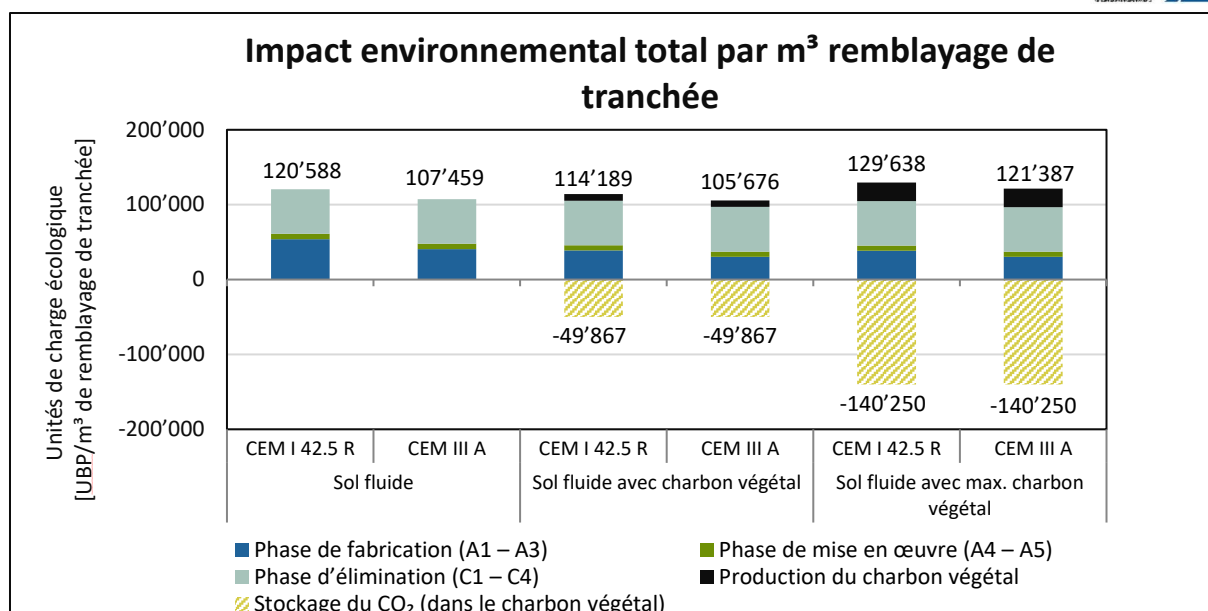
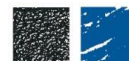


Figure 4-3: Impact environnemental total des variantes de sol fluide étudiées, avec et sans charbon végétal, par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4). Le stockage de carbone du charbon végétal, converti en CO₂, est indiqué séparément

4.3.3 Consommation d'énergie cumulée

La figure 4-4 montre la consommation d'énergie cumulée des six variantes de sol fluide étudiées. Celle-ci diffère nettement entre les variantes avec et sans charbon végétal. La consommation d'énergie cumulée du sol fluide avec une teneur modérée en charbon végétal s'élève à 290.0 kWh Oil-eq/m³, celle du sol fluide amélioré avec une teneur modérée en charbon végétal à 289.8 kWh Oil-eq/m³. Pour les variantes à teneur maximale en charbon végétal, on obtient des valeurs de 597.9 kWh Oil-eq/m³ et 597.6 kWh Oil-eq/m³.

La principale raison de la forte consommation d'énergie dans les variantes de sol fluide contenant du charbon végétal est l'utilisation importante d'énergies renouvelables pour la fourniture du bois nécessaire à la production de charbon végétal. Dans le cas du sol fluide à teneur modérée en charbon végétal, 54 % de la consommation d'énergie cumulée provient d'énergies renouvelables, contre 71 % pour le sol fluide à teneur maximale en charbon végétal.

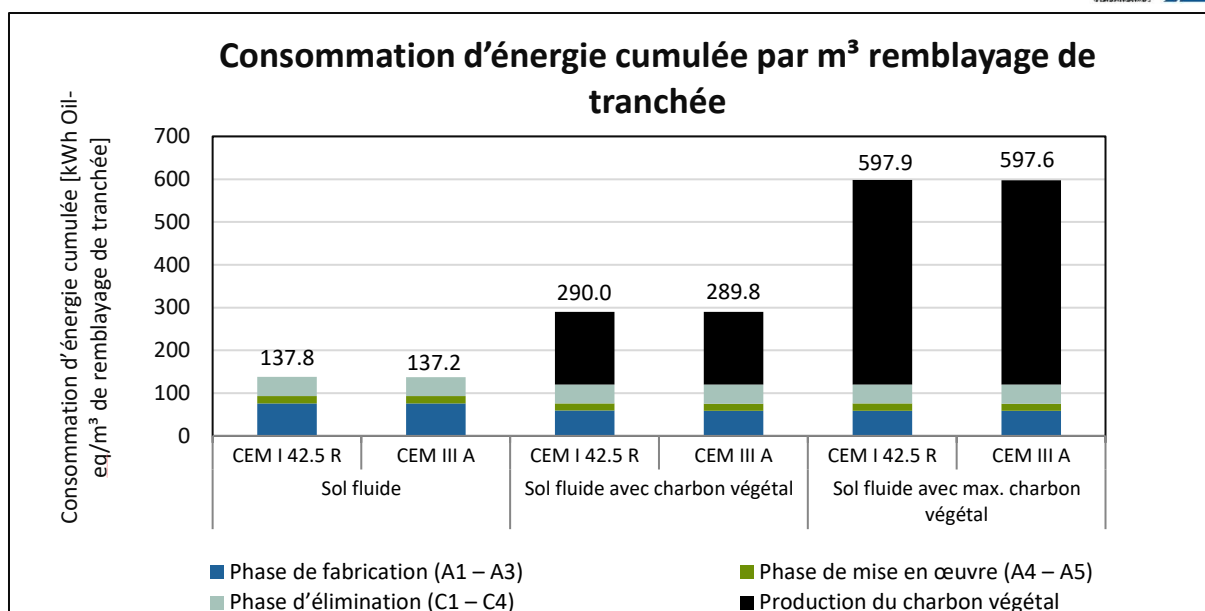
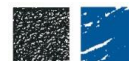


Figure 4-4: Consommation d'énergie cumulée par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide. Comparaison entre la formulation moyenne de sol fluide, la variante améliorée et deux variantes avec du charbon végétal.

L'appendice C contient les graphiques complémentaires sur la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable (voir figure 0-13 et figure 0-14).

4.4 Interprétation

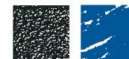
Les résultats montrent que l'utilisation de charbon végétal dans le sol fluide doit être évaluée de manière nuancée du point de vue de l'écobilan. Sans prise en compte du stockage CO₂ biogène, la variante présentant une teneur modérée en charbon végétal affiche des émissions de gaz à effet de serre et des impacts environnementaux inférieurs à ceux du sol fluide conventionnel. La variante avec une teneur maximale en charbon végétal se situe en revanche dans un ordre de grandeur similaire à celui du sol fluide conventionnel. La réduction des quantités de ciment et de bentonite rendue possible par l'utilisation de charbon végétal a un effet réducteur sur les émissions, tandis que la production du charbon végétal entraîne des impacts environnementaux supplémentaires.

La consommation d'énergie cumulée est nettement plus élevée pour les deux variantes de sol fluide contenant du charbon végétal, ce qui s'explique principalement par l'utilisation de bois pour la production de charbon végétal. Les besoins énergétiques supplémentaires proviennent toutefois majoritairement de sources renouvelables.

Si le stockage du CO₂ est pris en compte dans l'écobilan, l'avantage des variantes de sol fluide avec du charbon végétal s'accroît nettement dans les indicateurs environnementaux GES et UBP. L'évaluation écologique globale dépend donc essentiellement de la pondération des indicateurs environnementaux considérés ainsi que de l'hypothèse d'une stabilité à long terme du carbone biogène stocké.

4.5 Faisabilité technique du sol fluide à base de charbon végétal

Des essais menés par les fabricants montrent que le charbon végétal s'intègre techniquement bien dans la formulation du sol fluide [19]. L'ajout de charbon végétal broyé a un effet positif sur les propriétés du matériau et peut contribuer à augmenter la résistance. Cela permet une réduction significative de la teneur en ciment et en bentonite sans nuire aux performances techniques de la construction.



Les variantes de sol fluide à base de charbon végétal répondent aux exigences typiques du sol fluide en matière de portance, de maniabilité, d'autocompactage et de durabilité [19].

L'aptitude technique du charbon végétal dans le sol fluide dépend également de sa qualité. La matière première, la température de pyrolyse et la conduite du processus sont particulièrement déterminantes, car ces paramètres influencent la porosité, la réactivité et l'absorption d'eau. Pour les scénarios analysés dans ce chapitre, on utilise du charbon végétal issu de résidus forestiers, transformés en charbon végétal par pyrolyse. Ces charbons végétaux à base de bois présentent généralement une structure stable, une faible teneur en polluants et un comportement technique favorable, ce qui favorise leur utilisation dans le sol fluide.

Les expériences pratiques et les études existantes montrent globalement que l'utilisation de charbon végétal dans le sol fluide est techniquement réalisable et que le matériau obtenu répond aux exigences en matière de propriétés constructives. Des proportions plus élevées de charbon végétal sont théoriquement possibles, mais doivent faire l'objet d'études plus approfondies en ce qui concerne la pompabilité, la miscibilité et le comportement à la mise en œuvre.

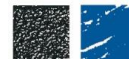
4.6 Réflexions sur l'approche systémique du charbon végétal

Les résultats présentés au chapitre 4.3 montrent que l'utilisation de charbon végétal dans le sol fluide peut présenter un fort potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre et des impacts environnementaux, en particulier lorsque le stockage du CO₂ est pris en compte dans le bilan. Même si l'ajout de charbon végétal peut compliquer la recyclabilité du sol fluide (voir chapitre 8), il faut s'attendre à ce que cette question gagne en importance à l'avenir. La question se pose donc de savoir si les quantités de charbon végétal nécessaires à cet effet seraient en principe disponibles en Suisse. Afin de situer l'ordre de grandeur du charbon végétal potentiellement nécessaire dans le génie civil, une estimation fortement simplifiée a été réalisée ci-après. Celle-ci sert exclusivement à donner une idée du système et ne reflète ni la situation réelle du marché ni la disponibilité effective du charbon végétal dans le génie civil.

Pour le calcul de la biomasse nécessaire, les flux de matières contenus dans l'ensemble de données «Biochar, from spruce wood pyrolysis {CH} U» ont été réutilisés (voir chapitre 4.2) [21]. Selon cet ensemble de données, 1.62 kg de bois (matière sèche) sont nécessaires pour produire 1 kg de charbon végétal. On a supposé que le bois utilisé présentait une teneur en eau de 50 %. Il en résulte une masse humide de bois nécessaire de 3.24 kg par kg de charbon végétal.

Les données issues de l'étude « Déchets de construction en Suisse – Génie civil, mise à jour 2015 » [35] servent de base pour les quantités de matériaux. Selon cette étude, les réseaux d'infrastructure d'approvisionnement en eau, d'assainissement, d'approvisionnement en gaz et d'approvisionnement en électricité disposent de stocks de matériaux comprenant 80 millions de tonnes de béton et 252 millions de tonnes de grave. Pour la présente estimation, on a ensuite supposé, par souci de simplification, que 1 % du stock était remplacé chaque année dans le cadre de travaux de remise en état. Cette valeur sert exclusivement de référence approximative pour évaluer l'ordre de grandeur des besoins potentiels en charbon végétal et en bois. Elle ne doit pas être interprétée comme une prévision des taux de remise en état réels, de la pénétration du marché ou de la faisabilité technique. De plus, il n'est pas tenu compte du fait qu'une partie du matériau est, dans la pratique, valorisée directement sur place.

Pour le sol fluide à base de charbon végétal, la formulation définie au chapitre 4.1 a été utilisée. Celle-ci présente une teneur en charbon végétal d'environ 1 % en masse. Selon les hypothèses fortement simplifiées retenues, le remplacement de la grave par du sol fluide à base de charbon végétal entraîne un besoin annuel de 24'812 t de charbon végétal, ce qui correspond à 80'392 t de masse humide de bois. Si le béton est remplacé par un sol fluide contenant du charbon végétal, il en résulte un besoin supplémentaire de 6'280 t de charbon végétal, soit 20'348 t de masse humide de bois.



Si, dans le remblayage des tranchées, le béton n'est pas remplacé par du sol fluide contenant du charbon végétal, mais par du béton contenant du charbon végétal (voir chapitre 5.6.4), les besoins en charbon végétal sont légèrement supérieurs en raison de la densité plus élevée du béton. En partant de l'hypothèse simplificatrice d'une teneur en charbon végétal d'environ 1 % en masse, il faudrait pour cela 8'025 tonnes de charbon végétal ainsi que 26'000 tonnes de masse humide de bois.

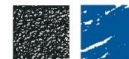
Selon la statistique de poche «L'économie forestière en Suisse», la récolte de bois s'élevait en 2024 à 4'803'397 m³ [36]. En supposant une densité de 825 kg/m³ [37], on obtient une biomasse d'environ 3'962'803 tonnes de bois humide. Les besoins en bois estimés correspondraient ainsi, en cas de remplacement de la grave par du sol fluide enrichi en charbon végétal, à 2 % de la récolte annuelle de bois en Suisse, à 0.5 % en cas de remplacement du béton par du sol fluide enrichi en charbon végétal et à 0.7 % en cas de remplacement du béton par du béton enrichi en charbon végétal.

D'un point de vue purement mathématique, ces parts de la récolte de bois suisse ne semblent pas très élevées à première vue. Cependant, pour évaluer la faisabilité réelle, il ne faut pas seulement tenir compte de la biomasse théoriquement disponible, mais aussi de la production actuelle de charbon végétal. Selon l'étude «Production quantities and C-sink potential of EBC-certified Biochar in 2023», la production de charbon végétal certifié EBC dans la région UE + AELE s'élevait à 64'106 tonnes en 2023 [38]. Les besoins estimés à 6'280 tonnes de charbon végétal pour remplacer le béton dans le remblayage des tranchées par du sol fluide enrichi en charbon végétal correspondraient ainsi à près de 10 % de cette production annuelle actuelle. Cela montre que les besoins estimés sont significatifs tant par rapport à la récolte de bois qu'à la production actuelle de charbon végétal.

Il convient en outre de tenir compte du fait que le charbon végétal peut également être utilisé dans d'autres matériaux de construction, tels que le béton, ce qui pourrait entraîner une demande nettement plus élevée à l'avenir.

Dans le même temps, l'utilisation de la biomasse doit toujours être envisagée dans le contexte d'éventuelles concurrences d'utilisation. Dans l'esprit de la Stratégie intégrée pour la forêt et le bois 2050, l'utilisation en cascade revêt une importance centrale. Elle décrit l'utilisation en plusieurs étapes et aussi efficace que possible de la matière première qu'est le bois. Le bois doit toujours être utilisé en priorité là où il offre le plus grand bénéfice économique, la plus grande valeur ajoutée écologique et le plus large potentiel d'utilisations multiples. L'accent est donc mis sur son utilisation comme matériau de construction durable ainsi que comme matière première pour l'industrie des matériaux dérivés du bois, du papier et de la pâte à papier. Ce n'est qu'après avoir épuisé ces niveaux d'utilisation à forte valeur ajoutée que les fractions de bois restantes doivent être valorisées dans un processus énergétique. En outre, outre le stockage du carbone, les forêts assument d'autres fonctions écologiques essentielles, notamment pour la biodiversité, le régime hydrologique et la régulation du climat.

La question de savoir dans quelle mesure la biomasse destinée au charbon végétal devrait être utilisée dans le secteur de la construction devrait donc être examinée dans un contexte plus large. Les résultats présentés ici doivent être considérés comme une estimation indicative. Ils indiquent un ordre de grandeur possible des besoins, mais ne permettent pas de déterminer si les quantités de charbon végétal nécessaires seraient effectivement disponibles à court ou moyen terme.



5 Écobilan comparative des remblayages de tranchée

Afin d'évaluer l'avantage écologique du sol fluide, différents systèmes de remblayage sont comparés au niveau de l'unité fonctionnelle de 1 m³ de remblayage de tranchée. La comparaison porte non seulement sur les matériaux, mais aussi sur les méthodes de construction ayant une fonction technique comparable. Dans la construction de conduites, les matériaux de remblayage assurent notamment le lit de pose et le recouvrement de la conduite, la répartition des charges, la stabilisation latérale ainsi que, selon les exigences, la protection mécanique et la garantie de la portance dans la superstructure.

5.1 Définition des scénarios de comparaison

À titre de référence pour le sol fluide, on considère deux méthodes de construction conventionnelles couramment utilisées dans le génie civil suisse: «grave sans béton d'enrobage» et «grave avec béton d'enrobage». La grave sert ici de matériau non cohésif pour le lit de pose et le recouvrement de la conduite, ainsi que pour la répartition des charges par compactage. Si du béton d'enrobage est également utilisé, celui-ci assure la protection mécanique et la fixation de la conduite et est généralement employé en cas d'exigences mécaniques accrues (par exemple, charges de trafic élevées, faible recouvrement ou conduites sensibles). De plus, un scénario est modélisé dans lequel un béton d'enrobage à faibles émissions (ciment à teneur réduite en clinker) est utilisé. En principe, il est également possible d'incorporer du charbon végétal dans le béton d'enrobage. Cela nécessiterait toutefois une étude technique spécifique sur les matériaux et ne fait pas l'objet de la présente étude. L'ajout de charbon végétal n'a pas non plus été pris en compte pour la grave, car son aptitude technique et sa stabilité à long terme dans des matériaux non liés sont associées à des incertitudes supplémentaires (voir chapitre 5.6.3).

Le sol fluide est un matériau de remblayage autocompactant qui, grâce à sa mise en place fluide, permet un enrobage homogène et sans vide de la conduite. Cette classification fonctionnelle s'applique à toutes les variantes de sol fluide examinées dans la présente étude. Les variantes de sol fluide peuvent ainsi assumer pleinement les fonctions de la grave compactée (lit de pose, remblayage et répartition des charges). En fonction des exigences spécifiques au projet, le sol fluide peut en outre remplir en partie les fonctions du béton d'enrobage, notamment en ce qui concerne la stabilisation latérale et la protection mécanique (voir chapitre 7). Ainsi, le sol fluide est en principe adapté dans la plupart des cas d'application pour remplacer aussi bien la grave sans béton d'enrobage que la combinaison de grave et de béton d'enrobage.

Les scénarios suivants sont étudiés et comparés entre eux:

1. Grave sans béton d'enrobage
2. Grave avec béton d'enrobage
3. Sol fluide (formulation moyenne de sol fluide selon le chapitre 3)
4. Sol fluide avec charbon végétale (formulation selon le chapitre 4)
5. Sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal (formulation selon le chapitre 4)

Un scénario supplémentaire «sol fluide avec béton d'enrobage» n'est pas pris en compte, car cette combinaison est généralement redondante sur le plan fonctionnel et n'est en outre pas judicieuse d'un point de vue économique. Dans le scénario «grave avec béton d'enrobage» ainsi que dans toutes les variantes de sol fluide, le ciment CEM I 42.5 R et le ciment à teneur réduite en clinker CEM III A ont été pris en compte. Dans le scénario «grave sans béton d'enrobage», cette distinction n'a pas lieu d'être, car aucun matériau contenant du ciment n'est utilisé. Les différentes formulations sont répertoriées dans le tableau 5-1.



Tableau 5-1: Formulation des matériaux de remblayage étudiés.

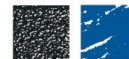
Composant	Grave avec béton d'enrobage	Grave sans béton d'enrobage	Sol fluide	Sol fluide avec charbon végétal	Sol fluide avec max. charbon végétal
Unité	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]
Matériaux d'excavation	288	360	1'300	1'332	1'345
Béton d'enrobage (avec CEM I 42,5 R ou CEM III A)	460	0	0	0	0
Gravier primaire	576	720	0	0	0
Sable primaire	576	720	0	0	0
Ciment (CEM I ou CEM III A)	0	0	42	27	26
Bentonite	0	0	32	21	20
Chaux	0	0	1	0	0
Charbon végétal	0	0	0	16	45
Eau	0	0	426	316	312
Total	1'900	1'800	1'801	1'713	1'749

Béton d'enrobage

Pour le béton d'enrobage, on a utilisé le jeu de données «Concrete, normal, at plant, with resource correction {CH} U». Selon ce jeu de données, 300 kg de ciment sont utilisés pour la fabrication de 1 m³ de béton. Avec une densité de béton supposée de 2'300 kg/m³, cela correspond à une teneur en ciment de 13 % en masse. Le béton d'enrobage modélisé ici correspond donc, dans le présent contexte, à un système de béton présentant une teneur en ciment relativement faible et non à un béton de construction classique.

Hypothèses concernant la répartition des volumes dans la tranchée

Pour l'évaluation écologique des variantes de remblayage, cette étude a retenu, par souci de simplification, l'hypothèse suivante: pour un remblayage de tranchée de 1 m³, le scénario «grave avec béton d'enrobage» se compose à 20 % de béton d'enrobage et à 80 % de grave. Les variantes sans béton d'enrobage ont en revanche été modélisées comme un remblayage complet de 1 m³ de tranchée avec le matériau de remblayage correspondant. Cette hypothèse sert à assurer la comparabilité des scénarios et constitue une représentation proche de la pratique, délibérément simplifiée. En réalité, le béton d'enrobage n'est pas mis en place de manière homogène sur l'ensemble du volume de la tranchée, mais de manière ciblée pour assurer une protection mécanique supplémentaire de certains éléments de construction, par exemple pour l'enrobage de conduites, de tuyaux ou de câbles. Dans la présente étude, on a délibérément renoncé à modéliser géométriquement de manière explicite l'objet protégé (par exemple un tuyau). Au lieu de cela, la proportion de béton d'enrobage a été appliquée de manière forfaitaire à l'ensemble du volume de la tranchée. Cette simplification a pour conséquence que la pro-



portion de béton d'enrobage supposée est plutôt prudente par rapport à la pratique réelle de la construction. La valeur de 20 % est néanmoins considérée comme réaliste, car elle reflète les géométries de tranchée et les variantes d'exécution typiques.

Avec une densité de béton de $2'300 \text{ kg/m}^3$, la proportion de béton d'enrobage estimée à 20 % correspond à une quantité de béton d'enrobage de 460 kg par m^3 de remblai de tranchée. Combinée à la teneur en ciment décrite ci-dessus, il en résulte une utilisation de ciment de 60 kg par m^3 de remblai de tranchée.

Il faut en outre tenir compte du fait que la proportion de béton d'enrobage n'augmente pas proportionnellement à la profondeur de la tranchée. Dans le cas de tranchées plus profondes, l'objet à protéger (par exemple une conduite) reste généralement le même, tandis que c'est principalement le volume du matériau de remblayage qui augmente. La figure 5-1 présente un schéma bidimensionnel simplifié illustrant les hypothèses retenues concernant la répartition des volumes entre le béton d'enrobage et le matériau de remblayage, pour plus de clarté.

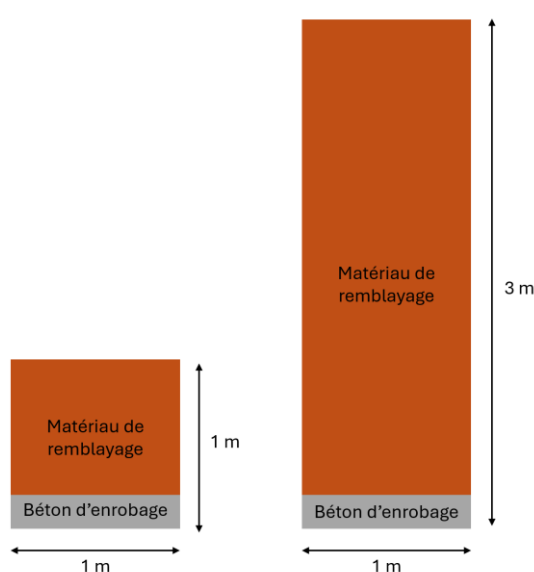


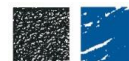
Figure 5-1: Répartition schématique des volumes de béton d'enrobage et de matériau de remblayage pour deux profondeurs de tranchée différentes (2D) .

5.2 Description du système des scénarios de comparaison

Pour les variantes de sol fluide considérées, on prend en compte le même système que celui décrit au chapitre 3.1.2. Les frontières du système, les phases du cycle de vie prises en compte ainsi que la modélisation de la fabrication, de la mise en œuvre et du démantèlement correspondent donc à la procédure qui y est décrite.

Pour les méthodes de construction conventionnelles «grave avec béton d'enrobage» et «grave sans béton d'enrobage», un système légèrement différent a été modélisé. Comme pour le sol fluide, la tranchée est d'abord creusée. Les matériaux primaires nécessaires sont ensuite livrés directement sur le chantier, à savoir du gravier primaire et du sable primaire, ainsi que du béton d'enrobage dans le scénario «grave avec béton d'enrobage». Une petite partie des matériaux d'excavation est également réutilisée. Pour la mise en œuvre des méthodes de construction conventionnelles, le processus de compactage a également été pris en compte.

Des différences apparaissent également au niveau du démantèlement par rapport aux variantes de sol fluide. Alors que dans le scénario «grave sans béton d'enrobage», la démolition correspond essentiellement au retrait de la grave compactée, le scénario «grave avec béton d'enrobage» prend également



en compte l'utilisation d'une pelle hydraulique équipée d'un marteau-piqueur pour briser le béton d'enrobage.

Les analyses des flux de matières et les distances de transport retenues pour la variante de remblayage « grave avec béton d'enrobage » sont présentées dans l'appendice C (figure 0-15 et figure 0-16). Les représentations correspondantes pour la variante «grave sans béton d'enrobage» se trouvent également dans l'appendice C (figure 0-17 et figure 0-18).

5.3 Résultats des scénarios de comparaison

Ce chapitre présente les résultats des différentes variantes de remblayage. Les résultats se rapportent aux impacts environnementaux par unité fonctionnelle, définie comme un mètre cube de remblayage de tranchée avec des matériaux de remblayage. Le tableau 5-2 donne un aperçu des résultats des variantes de remblayage étudiées.

Tableau 5-2: Aperçu des impacts environnementaux des variantes de remblayage étudiées par m³ de remblayage de tranchée.

Variante avec sol fluide	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	kg CO ₂ -eq/m ³	UBP/m ³	kWh Oil-eq/m ³	kWh Oil-eq/m ³	kWh Oil-eq/m ³
Grave avec béton d'enrobage	86.47	290'837	247.19	226.62	20.57
Grave avec béton d'enrobage amélioré	68.48	272'129	246.60	226.12	21.41
Grave sans béton d'enrobage	30.64	220'239	151.85	139.04	12.81
Sol fluide	54.62	120'588	137.76	127.64	10.12
Sol fluide amélioré	42.01	107'459	137.24	126.57	10.68
Sol fluide avec charbon végétal	46.84	114'189	290.05	133.52	156.53
Sol fluide amélioré avec charbon végétal	38.65	105'676	289.78	132.87	156.91
Sol fluide avec max. charbon végétal	54.22	129'638	597.87	172.68	425.18
Sol fluide amélioré avec max. charbon végétal	46.28	121'387	597.61	172.05	425.55

5.3.1 Émissions de gaz à effet de serre

La figure 5-2 présente les émissions totales de gaz à effet de serre par mètre cube de remblayage de tranchée pour les matériaux de remblayage étudiés sur l'ensemble du cycle de vie (A1 – A5, C1 – C4). Parmi les variantes examinées, la grave avec béton d'enrobage présente les émissions de gaz à effet de serre les plus élevées, tandis que la grave sans béton d'enrobage affiche les émissions les plus faibles.

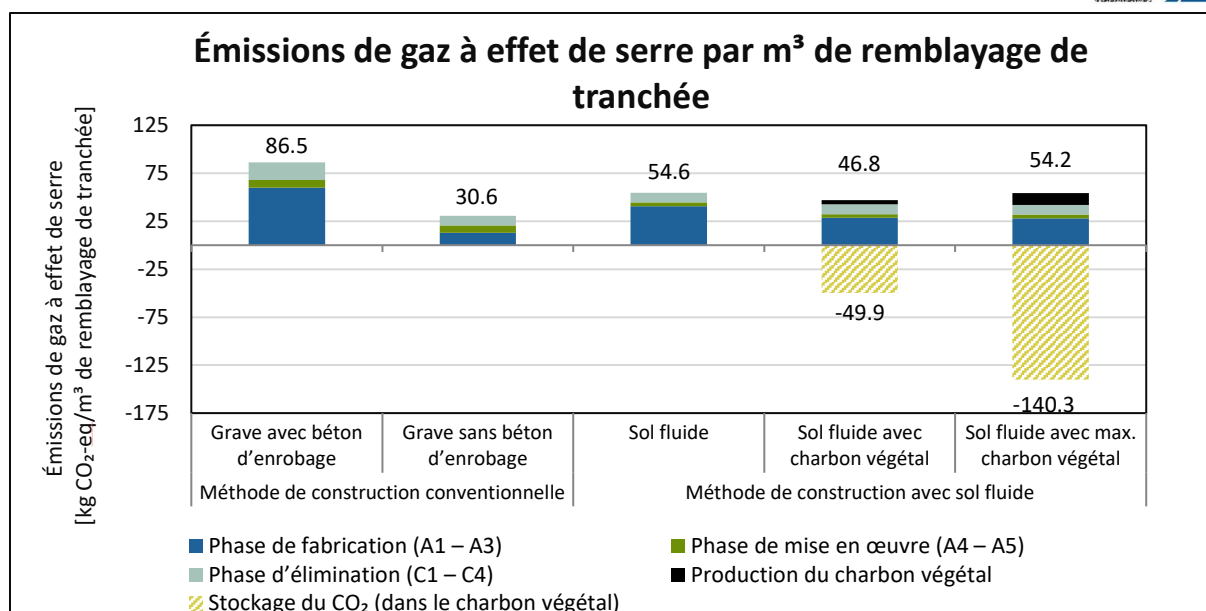
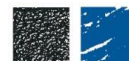


Figure 5-2: Émissions totales de gaz à effet de serre par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.

La figure 5-3 montre en complément l'influence du type de ciment sur les émissions totales de gaz à effet de serre des variantes de remblayage considérées. Le stockage de carbone du charbon végétal utilisé reste inchangé et n'est donc pas représenté séparément dans cette comparaison.

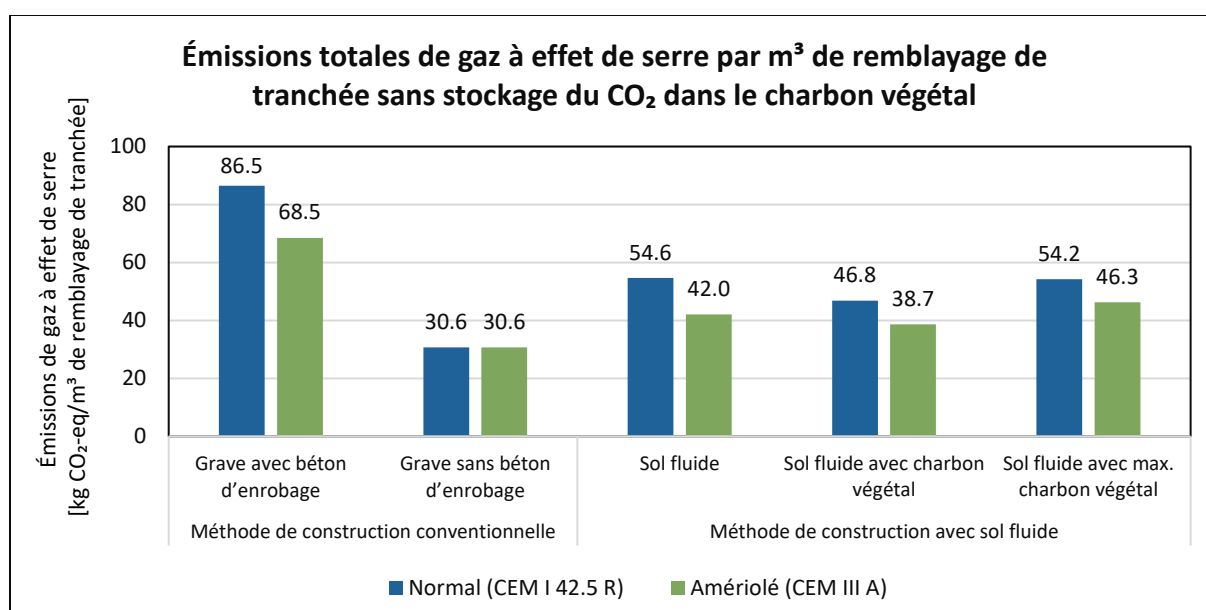
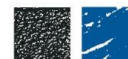


Figure 5-3: Comparaison des émissions totales de gaz à effet de serre par m³ de remblayage de tranchée sans stockage de CO₂ dans le charbon végétal, en cas d'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A.

Dans le scénario «grave avec béton d'enrobage», l'utilisation de CEM III A par rapport à CEM I 42.5 R entraîne une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 21 %. Dans le scénario «grave sans béton d'enrobage», il n'y a, comme prévu, aucun changement, car aucun matériau contenant du ciment n'est utilisé. Pour le sol fluide, la réduction est de 23 %, pour le sol fluide avec une teneur modérée en charbon végétal de 17 % et pour le sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal de



15 %. Dans l'ensemble, il apparaît que l'utilisation de ciment à teneur réduite en clinker constitue un levier efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, tant pour le béton d'enrobage que pour toutes les variantes de sol fluide étudiées.

5.3.2 Impact environnemental total

La figure 5-4 montre l'impact environnemental total par mètre cube de remblayage de tranchée pour les matériaux de remblayage étudiés. On observe ici une tendance différente de celle des émissions de gaz à effet de serre: toutes les variantes des méthodes de construction conventionnelles (grave avec et sans béton d'enrobage) présentent un impact environnemental total plus élevé que les variantes de sol fluide. Cela s'explique principalement par le fait que les méthodes de construction conventionnelles ont été modélisées dans cette étude avec du gravier et du sable primaires, tandis que les variantes de sol fluide sont principalement constituées des matériaux d'excavation existants. Cette réutilisation des matériaux d'excavation permet d'éviter l'extraction et le traitement de matières premières primaires, ce qui se traduit clairement par un impact environnemental total moindre.

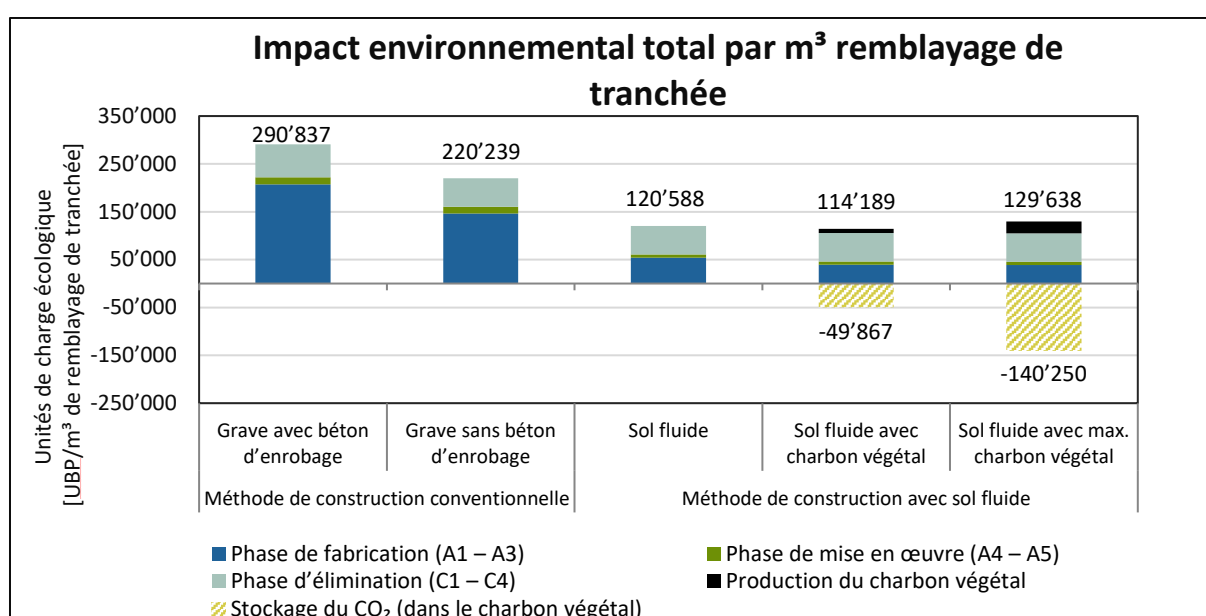


Figure 5-4: Impact environnemental total par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.

La figure 5-5 illustre en outre l'influence du type de ciment sur l'impact environnemental total des variantes de remblayage étudiées. L'utilisation de CEM III A réduit l'impact environnemental total de 6 % pour la grave avec béton d'enrobage, de 11 % pour le sol fluide, de 7 % pour le sol fluide avec une teneur modérée en charbon végétal et de 6 % pour le sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal.

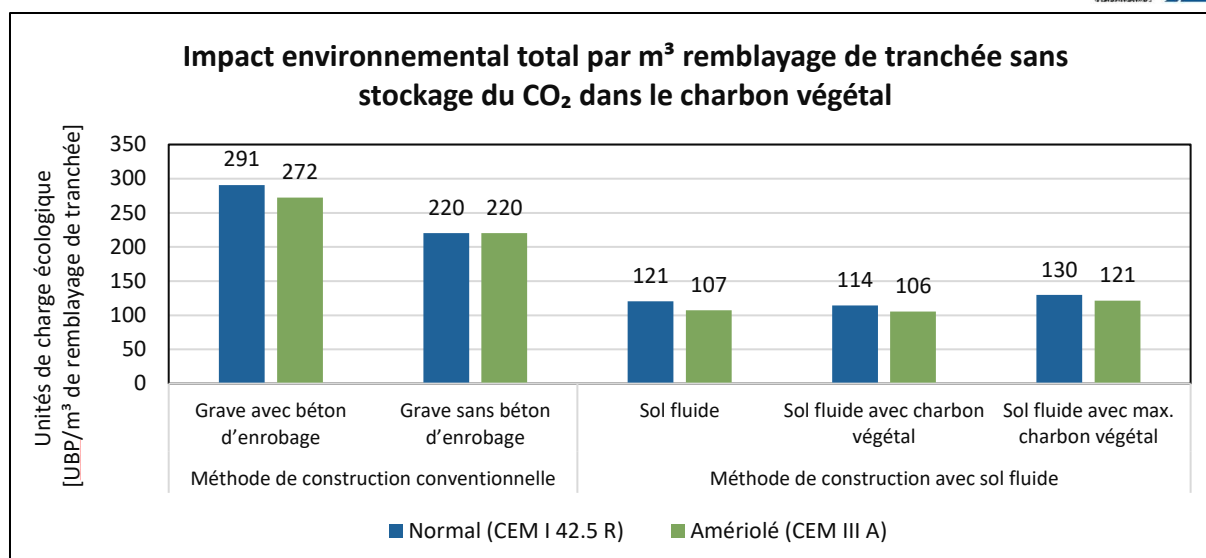
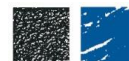


Figure 5-5: Comparaison des impacts environnementaux totaux par m³ de remblayage de tranchée lors de l'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A, sans tenir compte du stockage inchangé de CO₂ dans le charbon végétal.

5.3.3 Consommation d'énergie cumulée

La figure 5-6 montre la consommation d'énergie cumulée par mètre cube de remblayage de tranchée pour les matériaux de remblayage étudiés. La comparaison entre les méthodes de construction conventionnelles et la variante de sol fluide sans charbon végétal montre que toutes les variantes conventionnelles présentent des besoins énergétiques plus élevés. Les variantes à sol fluide avec charbon végétal présentent en revanche la consommation d'énergie cumulée la plus élevée. Cela s'explique principalement par les besoins en énergie renouvelable liés à la production de charbon végétal. Dans l'ensemble, le sol fluide conventionnel présente la consommation d'énergie cumulée la plus faible.

L'appendice C contient les figures complémentaires sur la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable (voir figure 0-19 et figure 0-20).

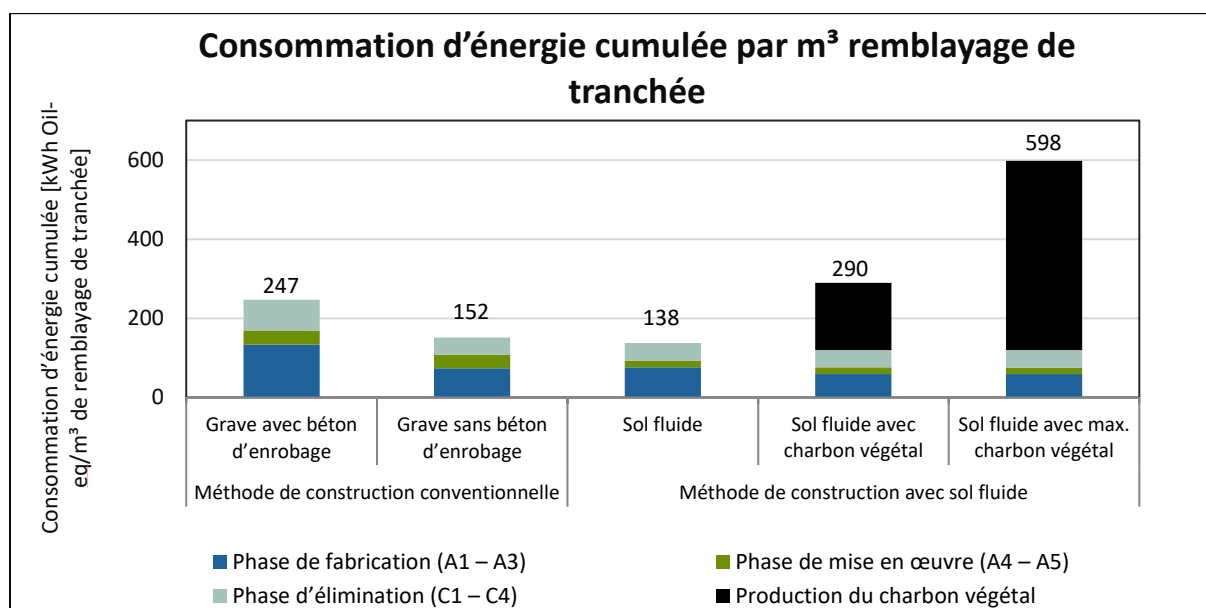
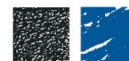


Figure 5-6: Consommation d'énergie cumulée par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.



La figure 5-7 montre en complément l'influence du type de ciment sur la consommation d'énergie cumulée des variantes de remblayage considérées. Contrairement aux émissions de gaz à effet de serre et l'impact environnemental total, on ne constate ici pratiquement aucun effet lié au type de ciment. Cela s'explique par le fait que la fabrication du ciment est associée à une consommation d'énergie élevée, quel que soit le type de ciment utilisé.

L'appendice C contient des graphiques complémentaires sur la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable (voir figure 0-21 et figure 0-22).

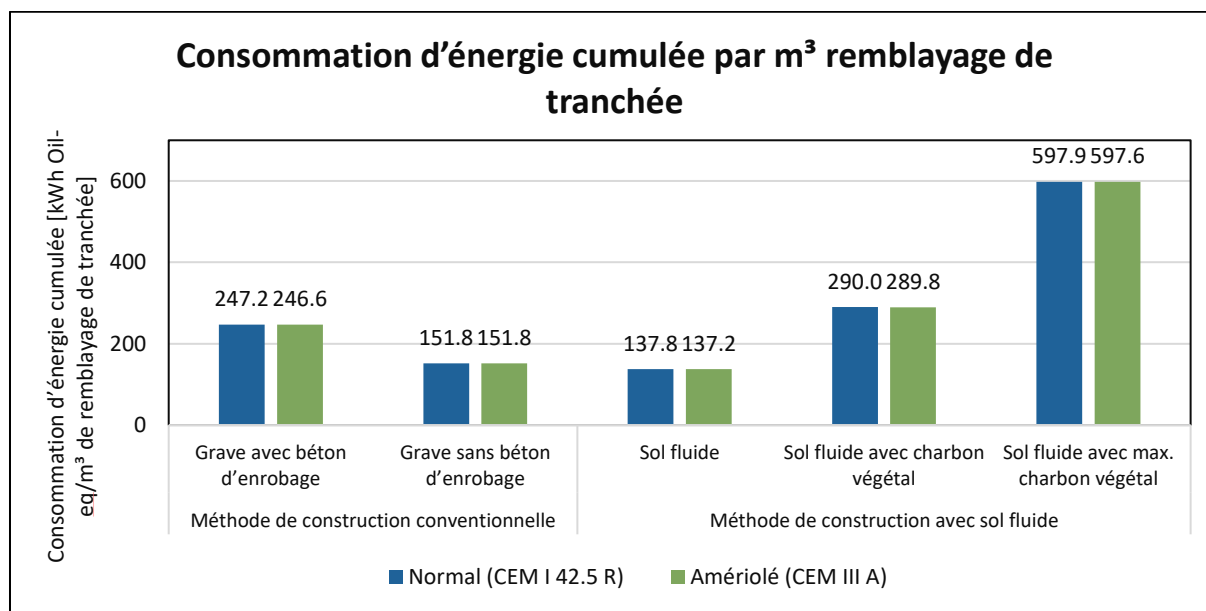


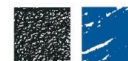
Figure 5-7: Comparaison de la consommation d'énergie cumulée par m³ de remblayage de tranchée en cas d'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A.

5.3.4 Interprétation

Les résultats montrent clairement que le sol fluide présente un avantage écologique par rapport aux méthodes de construction utilisant du béton d'enrobage. Cela vaut aussi bien par rapport à la grave avec béton d'enrobage que par rapport à la grave avec béton d'enrobage amélioré. La raison principale réside dans le béton d'enrobage lui-même, dont les impacts environnementaux sont principalement déterminés par le ciment qu'il contient. Parallèlement, les méthodes de construction conventionnelles sont modélisées dans cette étude avec du gravier et du sable primaires, tandis que pour les variantes de sol fluide, les matériaux d'excavation existants constituent le composant principal. Cette hypothèse s'appuie sur la pratique actuelle, car pour les remblayages de tranchées conventionnels, on utilise généralement du gravier et du sable conformes aux normes et l'utilisation de matériaux secondaires ne correspond pas à la règle.

La situation est différente lorsqu'on compare avec la grave sans béton d'enrobage. Cette variante présente les émissions de gaz à effet de serre les plus faibles. Dans le même temps, le sol fluide conventionnel et le sol fluide amélioré obtiennent de meilleurs résultats en termes d'impact environnemental total et de consommation d'énergie cumulée. Cela signifie que l'avantage écologique du sol fluide dépend fortement de la méthode de construction conventionnelle à laquelle on le compare et de l'indicateur environnemental privilégié.

Les variantes de sol fluide avec du charbon végétal offrent en outre un potentiel de stockage du CO₂, mais présentent des valeurs plus élevées en termes de consommation d'énergie cumulée. Cette consommation d'énergie supplémentaire est toutefois principalement renouvelable et liée à la production du charbon végétal.



Concrètement, cela signifie que le sol fluide présente un intérêt écologique particulier lorsqu'il peut remplacer des méthodes de construction avec béton d'enrobage. En revanche, si l'on compare avec une méthode de construction conventionnelle sans béton d'enrobage, l'avantage est moindre, voire inexistant selon l'indicateur environnemental.

Pour résumer les résultats, le tableau 5-3 montre les différences en pourcentage entre les variantes de remblayage examinées et la variante de référence «grave avec béton d'enrobage».

Tableau 5-3: Résumé des résultats de l'écobilan comparatif. Sont représentées les différences en pourcentage des variantes de remblayage examinées par rapport à la variante de référence «grave avec béton d'enrobage».

Indicateur environnemental	Grave avec béton d'enrobage	Grave avec béton d'enrobage amélioré	Grave sans béton d'enrobage	Sol fluide	Sol fluide amélioré	Sol fluide charbon végétal	Sol fluide avec max. charbon végétal
GES	0 %	-21 %	-65 %	-37 %	-51 %	-46 %	-37 %
UBP	0 %	-6 %	-24 %	-59 %	-63 %	-61 %	-55 %
CEC	0 %	0 %	-39 %	-44 %	-44 %	17 %	142 %

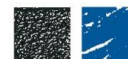
5.4 Largeur de tranchée réduite

Un aspect à prendre en compte dans le cadre de l'écobilan comparatif est la possibilité de réduire la largeur de la tranchée grâce à l'utilisation de sol fluide. Le sol fluide peut être mis en œuvre en tant que matériau de remblayage fluide sans compactage mécanique. Cela permet potentiellement de réduire l'espace de travail nécessaire par rapport à la méthode conventionnelle de creusement de tranchées.

Selon la SUVA, l'espace de travail prescrit peut être réduit à l'espace de travail technique, à condition qu'il soit garanti qu'aucune personne ne doit travailler sur le côté de la conduite [39]. Cette condition peut notamment être remplie avec des matériaux de remblayage fluides, car aucun processus de compactage n'est nécessaire. L'adaptation des processus de travail doit toutefois être examinée au cas par cas en fonction du projet. La réduction possible de la largeur de la tranchée n'est pas définie comme un pourcentage fixe, mais dépend notamment du diamètre de la conduite ainsi que de l'espace nécessaire pour la mise en place de la conduite et du matériau de remblayage. À titre de règle empirique approximative, on peut partir d'une distance minimale d'environ 15 cm de chaque côté entre la conduite et la paroi latérale de la tranchée [39].

Dans cette étude, la largeur réduite de la tranchée a été modélisée de manière simplifiée avec une réduction forfaitaire de 0.30 m par rapport à la méthode de creusement conventionnelle. La profondeur et la longueur de la tranchée sont restées inchangées. La réduction de la largeur de la tranchée a été prise en compte exclusivement pour les variantes de sol fluide. Pour les méthodes de construction conventionnelles «grave avec béton d'enrobage» et «grave sans béton d'enrobage», aucune réduction de la largeur de la tranchée n'a été prise en compte, car de la grave doit encore être mise en place et compactée au-dessus du béton d'enrobage. Un espace de travail latéral reste donc nécessaire, raison pour laquelle cette étude a, par souci de simplification, supposé une largeur de tranchée inchangée.

La figure 5-8 montre les émissions totales de gaz à effet de serre par mètre cube de remblayage de tranchée sur l'ensemble du cycle de vie (A1 – A5, C1 – C4), en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes de sol fluide. La largeur de la tranchée étant réduite d'environ 30 %, la quantité de matériaux nécessaire diminue en conséquence, ce qui entraîne une réduction de 30 % des impacts environnementaux pour tous les indicateurs environnementaux. Le sol fluide devient ainsi encore plus avantageux sur le plan écologique par rapport aux méthodes de construction conventionnelles. Il



est particulièrement intéressant de noter que, compte tenu de cet aspect, toutes les variantes de sol fluide ne dépassent que légèrement les émissions de gaz à effet de serre de la «grave sans béton d'enrobage». Pour les variantes de sol fluide avec du charbon végétal, la largeur de tranchée réduite signifie toutefois également que l'on utilise moins de charbon végétal et que, par conséquent, la quantité de CO₂ stockée en valeur absolue est moindre.

Les mêmes tendances se dégagent pour les autres indicateurs environnementaux. Les graphiques correspondants se trouvent dans l'appendice C (voir figure 0-23 et figure 0-24).

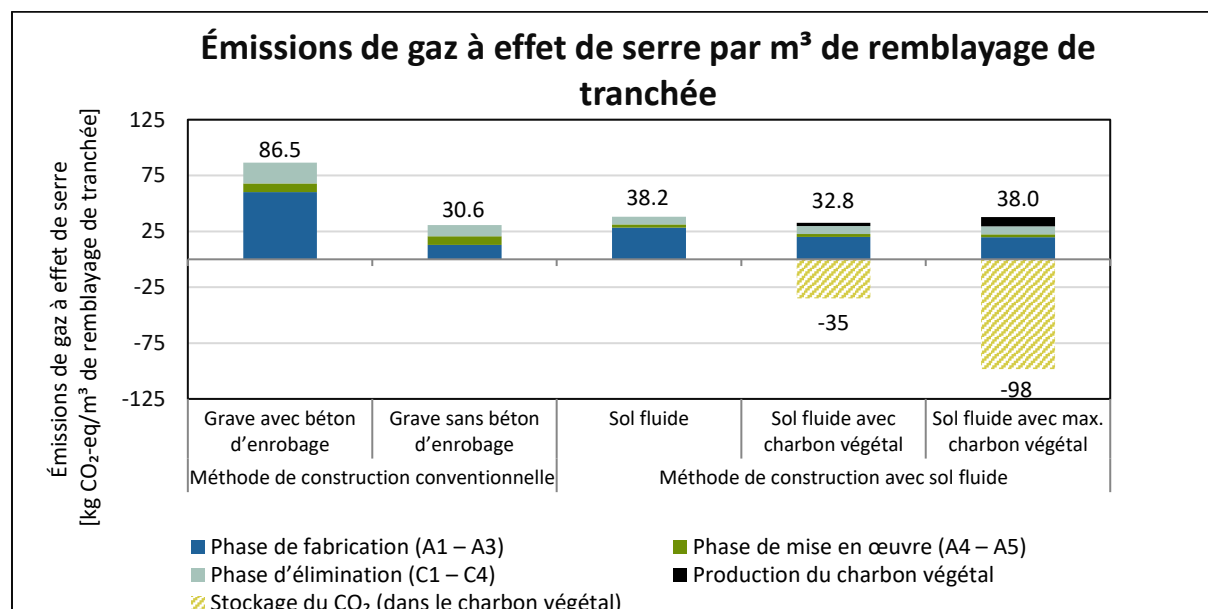


Figure 5-8: Émissions totales de gaz à effet de serre par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes de sol fluide.

Comme l'ont montré les résultats obtenus jusqu'à présent, tant le choix du liant que le mode de construction ont une influence significative sur les impacts environnementaux des systèmes de remblayage étudiés. Dans une prochaine étape, on examinera donc comment la combinaison d'une largeur de tranchée réduite et d'un ciment à teneur réduite en clinker influe sur les impacts environnementaux. La figure 5-9 montre que, dans ces hypothèses, le sol fluide amélioré présente même des émissions de gaz à effet de serre plus faibles que la grave sans béton d'enrobage. La combinaison d'une largeur de tranchée réduite et du CEM III A renforce ainsi davantage l'avantage écologique des variantes de sol fluide. Le stockage de carbone du charbon végétal utilisé reste inchangé et n'est donc pas présenté séparément dans cette comparaison.

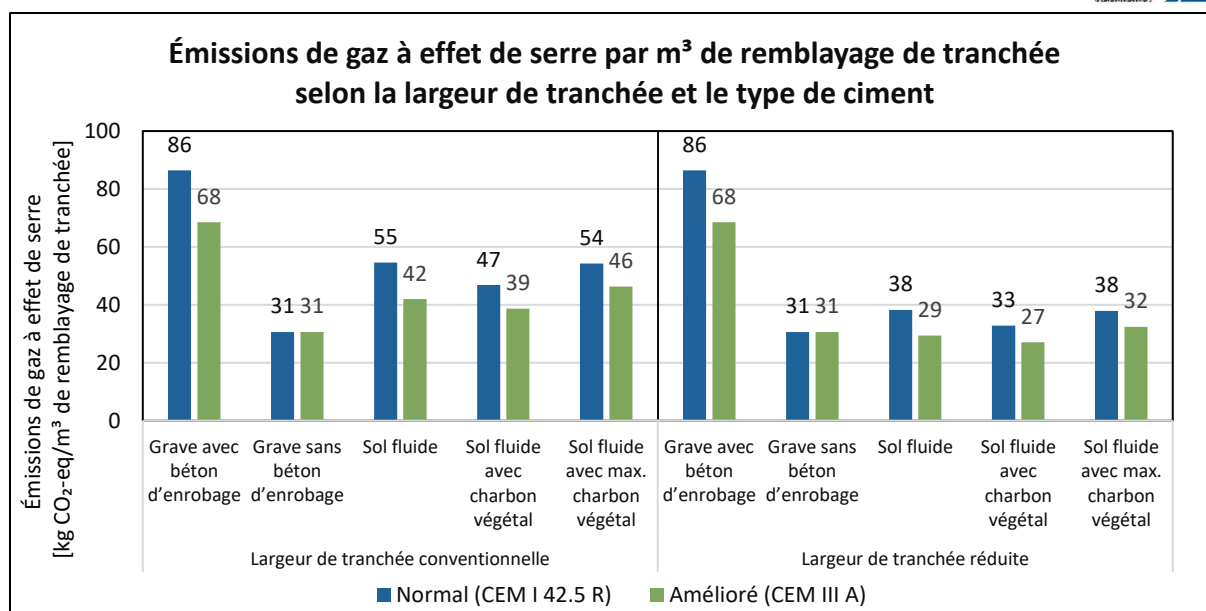
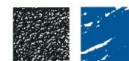


Figure 5-9: Comparaison des émissions totales de gaz à effet de serre par m³ de remblayage de tranchée, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes de sol fluide ainsi que de l'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A.

Les autres indicateurs environnementaux (UBP et CEC) montrent les mêmes tendances. Les figures correspondantes se trouvent dans l'appendice C (voir figure 0-25 et figure 0-26).

5.5 Conclusion de l'écobilan comparatif

Les résultats de l'écobilan comparatif montrent que l'avantage écologique du sol fluide dépend fortement de la méthode de construction conventionnelle à laquelle il est comparé et des leviers d'optimisation supplémentaires utilisés. La figure 5-10 présente un outil d'aide à la décision simplifié pour la réduction des impacts environnementaux dans la construction de conduites et résume les principaux résultats de l'écobilan comparatif. Les potentiels de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES, en vert) et des unités de charge écologique (UBP, en bleu) indiquent respectivement la réduction de la variante considérée par rapport à la méthode de construction «grave avec béton d'enrobage» par m³ de remblayage de tranchée.

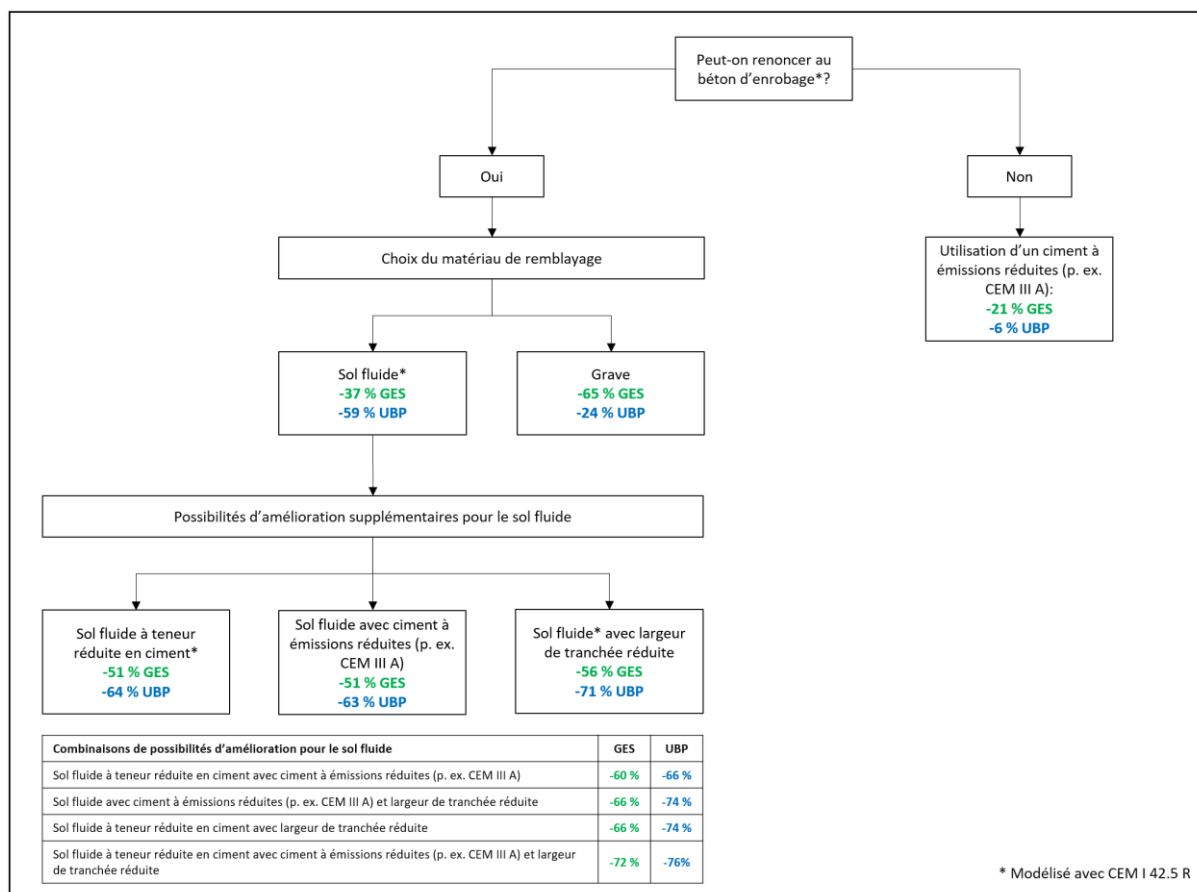
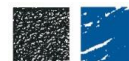


Figure 5-10: Aide à la décision pour la réduction des impacts environnementaux dans la construction de conduites.

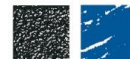
5.6 Autres approches techniques visant à réduire les impacts environnementaux

Outre la substitution du ciment Portland par du ciment à teneur réduite en clinker, examinée dans cette étude, l'analyse de sensibilité relative à la teneur en ciment montre également qu'il existe un potentiel de réduction supplémentaire au sein de la formulation du sol fluide. La réduction éventuelle de la largeur de la tranchée constitue en outre un levier technique permettant de réduire les impacts environnementaux. En complément des options déjà décrites, il existe d'autres approches techniques relatives aux matériaux permettant de réduire les impacts environnementaux des systèmes de sol fluide et de béton d'enrobage. Ce chapitre présente ces options de manière qualitative et évalue leur potentiel d'amélioration. Les approches présentées n'ont pas été examinées en tant que partie intégrante des scénarios principaux et doivent donc être considérées comme des considérations indicatives.

5.6.1 Liant minéral

La présente étude a déjà pris en compte deux liants minéraux: le ciment Portland CEM I 42.5 R et le ciment à teneur réduite en clinker CEM III A (voir chapitres 3.5.1, 4.3 et 5.3). Par ailleurs, des liants minéraux alternatifs sont développés dans le secteur de la construction, qui reposent soit sur une réduction de la teneur en clinker, soit sur le remplacement des matières premières primaires par des matériaux secondaires.

Certains ciments utilisent des granulats de démolition mélangés et traités comme composant principal. Selon les indications du fabricant, cela permet de réduire les émissions de CO₂ de 10 % par rapport à un ciment Portland suisse (CEM II/A) [40].



Une autre évolution est le LC3 (Limestone Calcined Clay Cement). Il s'agit d'un ciment à teneur réduite en clinker, composé généralement d'environ 50 % de clinker, 30 % d'argile calcinée, 15 % de calcaire et 5 % de gypse. Selon les informations fournies par un fabricant, les émissions de gaz à effet de serre du LC3 peuvent être réduites jusqu'à 28 % par rapport au ciment Portland suisse (CEM II/A) [41] [42].

Les liants sans ciment, à base de matériaux de démolition finement broyés et d'un activateur minéral, constituent un autre exemple. Selon les indications du fabricant, les émissions de gaz à effet de serre s'élèvent à 0.244 kg CO₂-eq/kg. Cela correspond à une réduction de 68 % par rapport au ciment Portland CEM I 42.5 R [43].

D'une manière générale, ces liants minéraux alternatifs présentent un intérêt tant pour les systèmes de remblayage cohésifs, tels que le sol fluide, que pour les méthodes de construction conventionnelles avec béton d'enrobage, pour autant que les exigences techniques soient respectées. Il convient toutefois de tenir compte du fait que les conditions générales varient considérablement en fonction du liant utilisé. Pour les liants reposant entièrement ou partiellement sur des matières premières secondaires, les impacts environnementaux dépendent notamment de la composition, de la qualité et du traitement des matériaux utilisés. Une évaluation fondée nécessiterait donc des analyses approfondies de la composition des matériaux, par exemple en ce qui concerne les teneurs potentielles en polluants.

5.6.2 Béton à teneur réduite en ciment

Avec la norme SIA 262.051+A2/ND, il est possible depuis février 2025 en Suisse de lancer des appels d'offres et de livrer du béton sur la base de ses performances. Les propriétés et les valeurs d'essai respectées sont déterminantes. Entre autres, la teneur minimale en ciment n'est plus requise dans les appels d'offres basés sur les performances, ce qui permet de réduire davantage les émissions de gaz à effet de serre du béton. Les premiers outils à cet effet sont déjà disponibles¹⁰.

Cette approche est fondamentalement pertinente pour les systèmes de béton d'enrobage examinés dans cette étude, car les exigences basées sur les performances peuvent, moyennant des adaptations appropriées, être transposées à d'autres types de béton, tels que les bétons maigres et les bétons de remblayage.

5.6.3 Le charbon végétal dans la grave

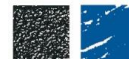
La littérature montre que le charbon végétal présente une porosité élevée et une grande surface spécifique et qu'il peut améliorer la rétention d'eau [32]. En raison de ces propriétés, le charbon végétal semble principalement adapté à des applications dans des systèmes liés ou structurés, tels que le sol fluide. Dans les matériaux non liés tels que la grave, il existe en revanche des incertitudes quant à la fixation spatiale et à la stabilité à long terme du charbon végétal. En particulier, la ségrégation, le remaniement ou le lessivage ne peuvent être exclus. À cela s'ajoute le fait que les matières étrangères non minérales présentes dans la grave doivent être minimisées d'un point de vue normatif et au regard de la législation sur les déchets.

5.6.4 Le charbon végétal dans le béton

Les premières applications existent déjà dans la pratique, par exemple sous la forme de bétons contenant du charbon végétal, dans lesquels du carbone biogène produit par pyrolyse est mélangé au béton et lié à long terme dans l'élément de construction [44].

Pour la présente étude, cette option n'est toutefois pas examinée de manière quantitative, car l'accent est mis sur la comparaison entre les systèmes conventionnels de remblayage de tranchées et le sol fluide. Une modélisation approfondie du béton d'enrobage avec du charbon végétal nécessiterait des formulations spécifiques au projet ainsi que des justifications techniques supplémentaires concernant

¹⁰ Béton basé sur les performances pour les appels d'offres (en allemand). OFROU (2025)



les matériaux. L'intégration de charbon végétal dans le béton constitue donc une option d'optimisation pertinente, mais distincte, qui devrait faire l'objet d'une évaluation approfondie dans le cadre d'une étude séparée.

5.7 Estimation du potentiel du sol fluide dans le génie civil suisse

Les résultats de l'écobilan comparatif ont été transposés au génie civil suisse afin d'estimer l'ampleur potentielle de la réduction de l'impact environnemental grâce au sol fluide. À cette fin, on a examiné la quantité annuelle de matériaux de remblayage générée lors de la réfection et de l'extension des réseaux de distribution d'eau, d'eaux usées, de gaz et d'électricité, et qui pourrait potentiellement être remplacée par du sol fluide. Pour le sol fluide et le béton d'enrobage, on a utilisé le CEM I 42.5 R. Les bases méthodologiques, les hypothèses et les résultats détaillés sont documentés dans l'appendice D.

En tenant compte des travaux de réfection et de l'extension du réseau, environ 71'700 tonnes de grave et 375'000 tonnes de béton d'enrobage peuvent être remplacées chaque année par du sol fluide. Au total, pour l'ensemble des réseaux considérés, cela représente un potentiel de réduction annuel de 37'767 tonnes CO₂-eq par an. Le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre modélisé correspond à environ 0.1 % des émissions territoriales totales de gaz à effet de serre de la Suisse [45].

Cette estimation du potentiel est simplifiée et optimiste; elle repose sur des hypothèses concernant la substituabilité, les flux de matériaux ainsi que le développement des réseaux d'infrastructure.

5.8 Analyse des coûts

En complément de l'évaluation écologique du sol fluide, une analyse simplifiée des coûts a été réalisée afin de comparer, sur le plan économique, la méthode de construction conventionnelle « grave avec béton d'enrobage » et la méthode de construction à base de sol fluide. Deux niveaux d'analyse ont été distingués:

- une analyse des coûts sur le cycle de vie basée sur un modèle, fondée sur des coûts de matériaux, de transport et d'élimination calculés de manière indépendante, ainsi qu'
- une analyse des coûts sur le cycle de vie basée sur la pratique, s'appuyant sur des postes d'exécution standardisés (TB-Viewer).

5.8.1 Analyse des coûts sur le cycle de vie basée sur un modèle

Dans un premier temps, les coûts par mètre cube de remblayage de tranchée ont été estimés pour les modules A1 – A5 et C1 – C4. Ont été pris en compte les coûts des matériaux et du transport, des frais de machinerie simplifiés calculés à partir de la consommation de diesel, ainsi que les coûts d'élimination basés sur les valeurs moyennes de différentes décharges.

Comme le tableau 5-4 montre, les coûts totaux estimés à partir du modèle pour la méthode de construction conventionnelle s'élèvent à 216 CHF/m³. Pour le sol fluide, deux variantes ont été calculées: l'exemple A donne 185 CHF/m³ (-14 %), tandis que l'exemple B s'élève à 281 CHF/m³ (+30 %).

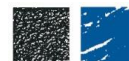


Tableau 5-4: Coûts sur le cycle de vie par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4), estimés à partir d'un modèle.

Phases du cycle de vie	Grave avec béton d'enrobage [CHF/m ³]	Sol fluide – Prix fabricant (exemple A) [CHF/m ³]	Sol fluide – Calcul par le bas (exemple B) [CHF/m ³]
Fabrication et mise en œuvre (A1 – A5)	120	114	211
Phase d'utilisation (B)	0	0	0
Élimination (C1 – C4)	96	71	71
Total	216	185	281
Différence	-	- 14 %	+30 %

Les exemples A et B diffèrent dans le mode de calcul des coûts de mise à disposition. L'exemple A se base sur un prix fabricant pour le produit fini, livraison comprise (modules A1 – A4). Cette variante reflète ainsi un prix de marché réaliste. L'exemple B, en revanche, a été calculé selon une approche ascendante, en déterminant séparément le coût de chaque composant du sol fluide (par exemple, le ciment et la bentonite) par kilogramme, puis en les additionnant. Cette méthode ne tient pas compte des économies d'échelle ni des conditions d'achat spécifiques d'un fabricant. Dans la pratique, les matières premières sont achetées en grandes quantités, ce qui permet d'obtenir des prix unitaires nettement plus bas. Les coûts plus élevés de l'exemple B doivent donc être considérés comme une hypothèse prudente.

L'écart entre les deux variantes de sol fluide montre clairement que les résultats dépendent fortement des hypothèses relatives à l'approvisionnement (en particulier des prix des matières premières, des distances de transport et des structures d'approvisionnement).

5.8.2 Analyse des coûts sur le cycle de vie basée sur la pratique

Dans un deuxième temps, une analyse des coûts globaux liés au chantier a été réalisée. Contrairement au chapitre 5.8.1, cette analyse se base sur des postes d'exécution typiques d'un chantier de taille moyenne. Elle s'appuie sur des postes de prestations standardisés issus du TB-Viewer, une base de données de calcul et d'appel d'offres utilisée dans le secteur suisse du génie civil. Le processus de construction est ainsi représenté de manière plus systémique et plus proche de la pratique.

Le tableau 5-5 montre que les coûts totaux pour la méthode de construction conventionnelle s'élèvent à 283 CHF/m³, tandis que la méthode de construction avec sol fluide est moins coûteuse, à 246 CHF/m³. Cela correspond à une économie de 13 % en faveur du sol fluide. Cet avantage financier résulte principalement de la réduction des coûts de main-d'œuvre et de compactage. Le sol fluide est autocompactant et peut être mis en œuvre plus efficacement, ce qui réduit le temps de travail, l'utilisation de machines et les efforts de coordination.

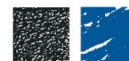
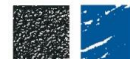


Tableau 5-5: Coûts sur le cycle de vie basés sur la pratique par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).

Phases du cycle de vie	Grave avec béton d'enrobage [CHF/m ³]	Sol fluide [CHF/m ³]
Fabrication et mise en œuvre (A1 – A5)	192	150
Phase d'utilisation	0	0
Élimination (C1 – C4)	91	96
Total	283	246
Différence	-	- 13 %

5.8.3 Conclusion de l'analyse des coûts

L'analyse des coûts montre que la rentabilité du sol fluide dépend fortement de la méthode de calcul choisie et des hypothèses retenues. Alors que l'analyse basée sur un modèle fait apparaître, selon la mise en œuvre, tant des coûts supplémentaires que des économies, l'analyse pratique réalisée sur le chantier met en évidence un avantage financier de 13 % en faveur du sol fluide.



6 Évaluation matérielle et pertinence environnementale du sol fluide

Les chapitres précédents ont quantifié les impacts environnementaux du sol fluide au niveau du système. En complément, il convient d'évaluer la compatibilité environnementale locale. L'accent est mis ici sur la question de savoir si les composants utilisés (ciment, bentonite, charbon végétal et matériaux d'excavation) contiennent des polluants et si un relargage de substances dans le sol ou les eaux souterraines est à prévoir pendant la durée d'utilisation. Les composants pertinents ainsi que le comportement à la lixiviation du sol fluide sont examinés ci-après.

6.1 Ciment

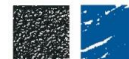
En ce qui concerne les polluants inorganiques, il s'agit principalement de métaux lourds tels que l'arsenic, le zinc ou le chromate provenant du ciment du sol fluide. C'est pourquoi les fabricants de sol fluide utilisent actuellement du ciment Portland sans additifs tels que les cendres volantes, le laitier de haut fourneau ou les granulats de démolition mélangés. Néanmoins, des métaux lourds peuvent être introduits dans le ciment par le biais des composants principaux et secondaires utilisés, des sulfates de calcium et des adjuvants du ciment. Cette étude a toutefois également pris en compte le CEM III A. Il s'agit d'un ciment de haut fourneau qui se distingue du ciment Portland (CEM I) notamment par une proportion plus élevée de laitier de haut fourneau et une proportion correspondante plus faible de clinker de ciment Portland [46].

Une étude menée par l'Agence fédérale allemande pour l'environnement a montré à cet égard que la plupart des éléments se situent dans les fourchettes observées dans les roches naturelles [46]. Selon cette analyse, seules les teneurs en arsenic, plomb, zinc et chrome peuvent être plus élevées en raison de la composition des matières premières et des conditions de cuisson. Le chrome peut être présent à hauteur de 20 % sous forme de chromate toxique (chrome (VI)), qui, contrairement au chrome (III), présente une solubilité élevée. Étant donné que la teneur en chrome (VI) du ciment ne doit pas dépasser 2 mg/kg conformément à l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim), un agent réducteur est toujours ajouté au ciment afin de réduire le chrome (VI) en chrome (III). De plus, des tests à long terme ont montré que les métaux lourds présents dans le clinker de ciment de type CEM III A y restent en grande partie et y sont immobilisés [46]. Pour le CEM III A également, aucune concentration accrue de métaux lourds n'est à craindre, selon l'étude mentionnée au début. Le ciment de haut fourneau (CEM III A) présente généralement des teneurs en métaux lourds plus faibles que le ciment Portland (CEM I), car le laitier de haut fourneau est généralement moins riche en métaux lourds que le clinker de ciment [46].

Digression: Formulations de sol fluide sans ciment

Les formulations de sols fluides qui utilisent des liants alternatifs (par exemple à base de cendres volantes ou de déchets de démolition mélangés) à la place du ciment doivent faire l'objet d'une évaluation distincte sur le plan des matériaux. Ces liants secondaires peuvent, selon leur origine et leur composition, contenir des teneurs accrues en métaux lourds ainsi que des polluants organiques. Par rapport au ciment Portland, il faut donc s'attendre à une plus grande variabilité de la qualité des matériaux. Pour une utilisation conforme aux règles de l'art, des analyses spécifiques au projet des matières solides et des lixiviats ainsi que des preuves fiables de l'origine seraient nécessaires.

Les formulations de sols fluides sans ciment ne faisaient pas partie des scénarios modélisés dans cette étude, car aucun produit de ce type ne s'est encore imposé à grande échelle sur le marché.



6.2 Bentonite

Le composé utilisé pour les formulations de sols fluides est constitué d'un mélange de bentonite de qualité alimentaire. Selon l'évaluation de l'Institut d'hygiène environnementale et de toxicologie de la Ruhr (HY), il ne présente aucun effet écotoxicologique significatif sur le sol et les eaux souterraines existantes, et son utilisation est sans danger d'un point de vue écotoxicologique [20].

6.3 Charbon végétal

Lors de l'utilisation de charbon végétal dans les sols fluides, il convient de tenir compte des risques potentiels liés aux polluants. Les groupes de substances concernés sont notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ainsi que les métaux lourds, en particulier le Cr(VI), qui peuvent provenir de la biomasse utilisée ou se former au cours du processus de pyrolyse. La qualité du charbon végétal varie en fonction de la biomasse et des paramètres du procédé. En conséquence, des analyses de lixiviation et de matières solides spécifiques à chaque lot sont nécessaires afin de pouvoir évaluer de manière technique la teneur en polluants.

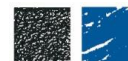
6.3.1 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Les HAP se forment lors de la transformation thermique de matières organiques pendant la pyrolyse. Une revue systématique montre que les teneurs totales en HAP dans le charbon végétal se situent généralement dans une fourchette d'environ 0.1 à 100 mg/kg [47]. Cette large fourchette s'explique par le fait que les teneurs en HAP les plus élevées se trouvent principalement dans les gazéificateurs de bois et dans les installations de pyrolyse traditionnelles mal contrôlées, où les gaz de pyrolyse ne sont pas évacués proprement et où les HAP sous forme de goudron ou de gaz peuvent se condenser sur le charbon. En revanche, dans les installations modernes bien gérées et dotées d'un système d'évacuation des gaz régulé, les teneurs en HAP se situent généralement de l'ordre de quelques mg/kg seulement.

En Suisse, l'ordonnance sur les déchets (OLED) ne prévoit pas de valeurs limites spécifiques pour le charbon végétal. Si le charbon végétal doit être mis sur le marché en tant qu'engrais, son autorisation est délivrée dans le cadre de l'ordonnance sur les engrais (OEng, RS 916.171) par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) [32]. La condition préalable est que du bois à l'état naturel soit utilisé comme matière première et que les autres conditions énoncées dans la fiche technique «Conditions et prescriptions pour l'autorisation du charbon végétal» soient respectées. Celles-ci s'appuient notamment sur les dispositions de l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim) ainsi que sur des normes de qualité telles que l'European Biochar Certificate (EBC) [32].

Si le charbon végétal est autorisé conformément à l'OEng et mis sur le marché en tant qu'engrais, il est considéré juridiquement comme un produit et, à ce titre, n'entre pas dans le champ d'application de l'OLED. Dans la pratique, les producteurs commerciaux s'appuient souvent sur l'European Biochar Certificate (EBC, classe 1 ou 2). L'EBC est un système de certification privé et ne constitue pas une norme juridique à part entière. Pour le charbon végétal pouvant être utilisé en agriculture en Suisse, une valeur limite de 4 mg/kg de matière sèche (MS) s'applique à la somme des 16 HAP de l'EPA, conformément à l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim) [48]. Le respect des valeurs limites EBC peut servir d'indicateur de la qualité du produit, mais ne remplace pas l'autorisation légale selon l'OEng.

Pour l'utilisation du charbon végétal dans le sol fluide, cela signifie que si l'on utilise du charbon végétal de qualité garantie et conforme à l'OPD, issu de matières premières naturelles, le risque lié aux HAP est considéré comme faible d'un point de vue matériel. Pour les charbons végétaux qui ne sont pas homologués en tant que produits, il manque toutefois actuellement une base légale claire permettant une évaluation définitive de leur utilisation dans le sol fluide.



6.3.2 Métaux lourds

Les métaux lourds présents dans le charbon végétal ne proviennent pas du processus de pyrolyse, mais principalement de la matière première utilisée, car contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés. Au cours de la pyrolyse, ils peuvent même s'accumuler, car les composants volatils de la biomasse s'échappent et la fraction minérale augmente relativement. La qualité du charbon végétal dépend donc principalement de la pureté de la matière première [47], [48].

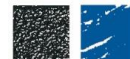
Pour une utilisation dans le génie civil, les exigences de l'OLED s'appliquent également. En vue d'un éventuel stockage ultérieur dans une décharge de type B, les valeurs limites applicables aux matières solides doivent être respectées (OLED, annexe 5) [49]. Le charbon végétal issu de résidus forestiers répond généralement sans difficulté à ces exigences, pour autant qu'aucune matière première contaminée (par exemple du bois usagé pollué) n'ait été utilisée. Le tableau 6-1 présente une comparaison des teneurs en métaux lourds selon l'EBC-AgroBio avec les valeurs limites pour les matières solides applicables aux décharges de type B, ainsi que les concentrations en métaux lourds calculées dans le sol fluide pour une proportion modérée ou maximale de charbon végétal. Les concentrations dans le sol fluide ont été déterminées à partir de la fraction massique respective du charbon végétal et de la densité du sol fluide.

Tableau 6-1: Comparaison des concentrations en métaux lourds du charbon végétal et de son utilisation dans le sol fluide avec les valeurs limites des décharges de type B.

Substance	Valeur limite pour les décharges de type B, OLED [mg/kg MS] [49]	EBC-AgroBio [mg/kg MS] [48]	Charbon végétal dans le sol fluide avec charbon végétal [mg/kg FB]	Charbon végétal dans le sol fluide avec max. charbon végétal [mg/kg FB]
Antimoine	30	Non spécifié	Non spécifié	Non spécifié
Arsenic	30	13	0.12	0.33
Plomb	500	45	0.42	1.16
Cadmium	10	0,7	0.01	0.02
Chrome total	500	70	0.65	1.80
Chrome (VI)	0.1	Non spécifié	Non spécifié	Non spécifié
Cuivre	500	70	1	2
Nickel	500	25	0.23	0.64
Mercure	2	0.4	0.00	0.01
Zinc	1'000	200	2	5

6.4 Matériaux d'excavation

La qualité des matériaux d'excavation utilisés est d'une importance capitale pour la compatibilité environnementale du sol fluide. Alors que les additifs tels que le ciment ou le charbon végétal présentent des teneurs en polluants contrôlées spécifiquement pour chaque produit, des contaminations spécifiques au site peuvent être introduites dans le sol fluide par les matériaux d'excavation utilisés. Ceux-ci sont soumis, dans le cadre du projet de construction, à une évaluation au regard de la législation sur les déchets conformément à l'ordonnance sur la limitation et l'utilisation des déchets (OLED) [49].



Une attention particulière est actuellement accordée aux substances alkylées per- et polyfluoroalkylées (PFAS), car celles-ci sont persistantes et peuvent être présentes dans les sols pollués. La présence éventuelle de PFAS dans le sol fluide est exclusivement due à des matériaux d'excavation contaminés. La possibilité de transformer et de valoriser ces matériaux en sol fluide dépend du degré de contamination et du respect des valeurs limites applicables. Seuls les matériaux d'excavation non pollués au sens de l'annexe 3, ch. 1, OLED peuvent être utilisés pour la production de sol fluide. Par ailleurs, les matériaux d'excavation faiblement pollués au sens de l'annexe 3, ch. 2, de l'OLED peuvent être valorisés sous forme de sol fluide sur le lieu de production [49].

Lors d'un démantèlement ultérieur, une éventuelle contamination par des PFAS dans les matériaux d'excavation persiste en principe, car ces substances ne se dégradent pas. Si des matériaux contaminés sont réutilisés comme sol fluide, il peut théoriquement se produire une accumulation sur plusieurs cycles d'utilisation. Dans la présente étude, on suppose une durée d'utilisation de 100 ans pour le sol fluide. Une accumulation potentielle de substances persistantes telles que les PFAS sur plusieurs cycles d'utilisation ne serait donc pertinente que sur de très longues périodes et en cas de réintroduction répétée de matériaux contaminés. Une accumulation à court terme n'est pas à craindre dans le cadre des intervalles habituels de construction et de rénovation. Il convient toutefois de tenir compte du fait qu'au moment du démantèlement ultérieur, aucune distinction claire, ni matérielle ni visuelle, ne sera possible entre le sol fluide initialement introduit et les matériaux de sol naturels. L'évaluation ultérieure au regard de la législation sur les déchets se fera donc sur la base de l'ensemble des matériaux d'excavation alors disponibles.

6.5 Comportement à la lixiviation et incidence sur les eaux souterraines

Afin d'évaluer les impacts environnementaux potentiels de l'utilisation de sol fluide, les analyses de lixiviats disponibles ainsi que les rapports de surveillance hydrogéologique ont été évalués [20]. L'évaluation s'appuie sur des analyses de lixiviation réalisés, des avis des autorités ainsi que des surveillances des eaux souterraines liées aux projets. Plusieurs fabricants (RSS-Flüssigboden®, KIBAG, Logbau AG, EcoSoil AG) ont mis à la disposition de l'auteur, pour consultation, des rapports d'essais issus des analyses de lixiviation conformes à l'OLED. Les rapports ont été consultés de manière confidentielle ; des informations complémentaires sont disponibles auprès des fabricants concernés.

6.5.1 Essais de lixiviation

Les essais de lixiviation évalués montrent, de manière concordante [20]:

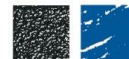
- aucune relargage significative de métaux lourds,
- aucun polluant organique notable
- de faibles teneurs en polluants lixiviables

Des essais approfondis en laboratoire et des essais pilotes ont également été menés sur des systèmes utilisant des liants alternatifs (par exemple, des cendres de bois dans le Ragazer Erdbeton® ou le Ragazer Flüssigboden®). Malgré des teneurs potentiellement élevées en métaux lourds dans les cendres, aucun lessivage notable n'a pu être constaté.

6.5.2 Surveillance des eaux souterraines

Dans le cadre de projets de construction concrets, des surveillances des eaux souterraines spécifiques à chaque projet ont été menées dans le canton de Schwyz. Les paramètres analysés comprenaient notamment le pH, la conductivité électrique, l'ammonium, les sulfates et les métaux lourds. Les surveillances ont montré [20]:

- des augmentations temporaires légères du pH (environ +0,5 unité de pH),



- des valeurs de conductivité et de sulfate temporairement élevées,
- aucun apport détectable de métaux lourds ou de polluants organiques significatifs.

Les paramètres élevés se sont normalisés dans un délai d'environ 9 à 12 mois après la mise en place. Les autorités compétentes ont conclu que la mise en place de sol fluide n'avait pas d'impact plus important sur les eaux souterraines que les méthodes de construction conventionnelles. L'utilisation a ensuite été autorisée dans le secteur Au de protection des eaux¹¹.

6.5.3 Perméabilité hydraulique

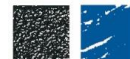
Outre les essais sur les matériaux, la perméabilité hydraulique (valeur k_f) est également pertinente pour l'évaluation du transport potentiel de substances. Selon le matériau de départ, le sol fluide présente généralement une perméabilité à l'eau comprise entre 10^{-5} et 10^{-10} m/s [20]. Le traitement et la recompactation réduisent souvent la valeur k_f d'un ordre de grandeur par rapport à celle du matériau d'excavation d'origine. Une perméabilité plus faible peut limiter le volume potentiel de transport d'eau et, par conséquent, le transport de matières.

6.6 Conclusion de l'évaluation matérielle du sol fluide

L'évaluation des substances montre que, s'il est fabriqué dans les règles de l'art et utilisé conformément aux normes, le sol fluide ne pose aucun problème d'un point de vue environnemental. Les composants utilisés ne présentent, sous réserve du respect des exigences de qualité en vigueur, aucune teneur en polluants ni aucun potentiel de lixiviation significatifs. Des essais de lixiviation ainsi que des surveillances des eaux souterraines confirment qu'aucun relargage significatif de substances vers le sol ou les eaux souterraines n'est à craindre.

Les éventuelles pollutions spécifiques au site résultent principalement des matériaux d'excavation utilisés et doivent être évaluées au cas par cas, conformément aux dispositions de la législation sur les déchets et de la législation environnementale.

¹¹ La zone «Au» comprend les eaux souterraines exploitables ainsi que les zones adjacentes nécessaires à leur protection.



7 Classification technique et utilisation du sol fluide

Ce chapitre classe le sol fluide d'un point de vue technique et le compare aux méthodes de construction conventionnelles dans le domaine de la pose de conduites. L'objectif est de présenter les différences systémiques, les limites d'utilisation et les particularités techniques, ainsi que d'évaluer son adéquation pour différents cas d'application.

7.1 Données techniques

Les caractéristiques des matériaux ci-dessous dépendent essentiellement du type de sol des matériaux d'excavation utilisés et présentent une fourchette correspondante. Les paramètres techniques typiques du sol fluide, qui dépendent de la classification des sols selon la norme DIN 18196, sont les suivants [50]:

- Densité apparente: 1,6 – 2,1 kg/dm³ (état à la mise en œuvre et état final identiques)
- Résistance à la compression selon la norme DIN 18136: 28 jours = 0,1-0,8 N/mm²
- Aptitude au terrassement selon la norme DIN 18300: classe de sol¹² 3-5
- Valeur EV2¹³ selon la norme DIN 18134: après 28 jours > 45 MN/m²
- Perméabilité à l'eau selon la norme DIN 18310: 10⁻⁵ – 10⁻¹⁰ m/s

7.2 Différence technique par rapport aux méthodes de construction conventionnelles

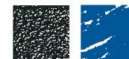
Comme déjà mentionné au chapitre 1.2, le sol fluide doit être classé techniquement comme un matériau de remblayage temporairement fluide et autocompactant. Dans la construction de conduites, il est directement comparable à la méthode de construction conventionnelle avec du béton d'enrobage dans la zone du tuyau et de la grave dans la zone de conduite sus-jacente.

Dans la méthode de construction conventionnelle, la conduite est d'abord stabilisée en position, souvent à l'aide d'un béton d'enrobage. Le grave est ensuite mis en place par couches pour former la zone de la conduite, avant que le reste de la tranchée ne soit remblayé et compacté avec un matériau approprié. Ce système génère des couches de matériaux clairement délimitées, présentant des rigidités et des états de compactage différents. Le sol fluide repose en revanche sur une stratégie de remblayage homogène. Le matériau est mis en place à l'état fluide, enveloppe complètement la conduite et se compacte de manière autonome. La reconsolidation a lieu après la mise en place. L'objectif est d'obtenir un remblai aussi homogène que possible, dont le module de déformation, le comportement au tassement et la consolidation soient comparables à ceux du sol environnant. La reconsolidation est de type frictionnel-cohésif, ce qui permet de conserver dans une large mesure les caractéristiques mécaniques du sol d'origine.

Une autre différence concerne la protection mécanique et la visibilité de la zone de conduite lors d'interventions ultérieures. Dans la méthode de construction conventionnelle, le béton d'enrobage forme une couche de protection solide et clairement définie autour du tuyau. Celle-ci peut être identifiable

¹² Classification des sols dans le secteur de la construction en fonction de leur solubilité et de leurs propriétés géotechniques en sept classes de sols et de roches au total (appelées familièrement « classes de sols » par simplification). La classification va de la classe de sol 1 «terre végétale» à la classe de sol 7 «roche difficilement soluble».

¹³ Module de déformation, décrit le comportement sous contrainte des sols lorsque leur expansion latérale est entravée, par exemple lors d'un essai de charge sur plaque.



tant visuellement que mécaniquement lors du démantèlement et offre une certaine résistance aux dommages accidentels causés par les travaux d'excavation. Dans le cas du sol fluide, en revanche, on obtient un remblai homogène sans couche de délimitation dure prononcée. Lors d'une ouverture ultérieure, la zone de la conduite peut donc être moins clairement identifiable. Il existe ici un risque que la conduite soit endommagée en cas d'utilisation imprudente des machines. Ce risque dépend toutefois fortement de la documentation relative à la conduite, du respect des procédures de localisation et de sondage ainsi que des pratiques d'exécution lors de la démolition.

Une autre différence systémique concerne l'espace de travail nécessaire dans la tranchée. Étant donné que le sol fluide est mis en place sans compactage mécanique, l'espace de travail latéral peut être réduit sous certaines conditions (voir chapitre 5.4). Dans la méthode de construction conventionnelle, en revanche, un espace de travail latéral au-dessus du béton d'enrobage reste nécessaire pour la mise en place par couches et le compactage de la grave. La possibilité d'une telle réduction dépend toutefois des conditions techniques de sécurité et d'exploitation spécifiques au chantier et doit être vérifiée au cas par cas. Avec la norme SIA 4016 en cours d'élaboration, on peut s'attendre à ce que les conditions préalables, les domaines d'application et les exigences minimales pour une telle réduction soient à l'avenir réglementés de manière plus claire.

Sur le plan technique, il en résulte les différences systémiques suivantes par rapport à la méthode de construction conventionnelle:

- Suppression du compactage par couches
- Éviter les limites de couches au sein du remblai
- Réduction des sauts de rigidité entre la zone des tuyaux et le sol environnant
- Bonne aptitude au démantèlement
- Absence de couche de délimitation dure autour du tuyau
- Espace de travail latéral potentiellement réduit et économies de matériaux qui en découlent

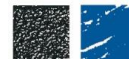
Pour les applications standard en matière de construction de conduites examinées dans le cadre de cette étude, le sol fluide peut être considéré comme une alternative fondamentalement appropriée à la méthode de construction conventionnelle. Les différences essentielles résident moins dans la fonction porteuse fondamentale que dans le principe de mise en œuvre, l'homogénéité du remblai et les exigences en matière d'assurance qualité et de dimensionnement spécifique au projet.

7.3 Cadre technique et assurance qualité

L'analyse des normes suisses pertinentes montre que le sol fluide n'est pas encore entièrement couvert par la réglementation. Il n'existe actuellement aucun document normatif autonome et contraignant. Toutefois, la norme SIA 4016, un référentiel autonome consacré au sol fluide, est en cours d'élaboration et jouera à l'avenir un rôle central dans la classification technique et normative [4].

La norme SIA 4016 est élaborée au sein de la commission SIA 190 (construction DE canalisations) et va au-delà d'une simple définition terminologique. Elle traite notamment:

- La distinction par rapport aux matériaux liés hydrauliquement,
- Les exigences relatives au sol de fondation et au dimensionnement,
- Les spécifications relatives à la mise en œuvre, à la reconsolidation et au développement de la résistance,
- Les aspects liés au comportement à la lixiviation et à l'assurance qualité,
- Ainsi que les questions d'évaluation environnementale, d'élimination et de protection des sols.



Cela permet de créer pour la première fois un cadre global pour la planification, la réalisation et la démolition des applications de sols fluides en Suisse [4].

Jusqu'à la publication de la norme SIA 4016, l'évaluation technique s'effectue dans la pratique en se référant aux réglementations existantes telles que la norme SIA 190:2017, les fiches techniques pertinentes de la VSS ou la norme SN 592000. Les réglementations internationales telles que la RAL GZ 507 offrent en outre des repères éprouvés dans la pratique concernant les exigences en matière de pompabilité, de teneur en eau et de reconsolidation [2].

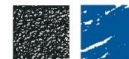
Aucune des normes existantes n'exclut explicitement l'utilisation de sol fluide. Les restrictions normatives découlent plutôt indirectement des justifications techniques requises. Les réglementations suisses telles que la SN 592000 exigent que le lit et l'enrobage des canalisations soient dimensionnés statiquement et adaptés à la situation de pose. Ce qui est déterminant ici, ce n'est pas le type de matériau de construction utilisé, mais le respect des critères de portance et de déformation requis. En fonction des charges de trafic, de la profondeur d'enfouissement, des conditions du sol ou des situations de poussée hydrostatique, il peut être nécessaire de prévoir une rigidité accrue ou des mesures de sécurité supplémentaires. Il convient de vérifier au cas par cas si ces exigences peuvent être satisfaites avec des systèmes conventionnels (par exemple, béton d'enrobage et grave) ou avec un sol fluide. L'admissibilité technique ne dépend donc pas en premier lieu du type de liant, mais du respect des critères de dimensionnement applicables. La norme SIA 4016, actuellement en cours d'élaboration, vise à structurer plus clairement cette distinction à l'avenir et à définir systématiquement les domaines d'application ainsi que les exigences minimales.

La liste suivante résume les exigences essentielles en matière d'assurance qualité lors de la fabrication et de l'application de sol fluide et peut aider les maîtres d'ouvrage à élaborer un catalogue d'exigences pour le sol fluide. Elle s'appuie essentiellement sur la norme RAL-GZ 507, qui constitue actuellement le document de référence le plus important [2]. Les éléments décrits correspondent en principe à une assurance qualité structurée, telle qu'elle est de toute façon nécessaire pour garantir une qualité constante des matériaux. Avec la norme SIA 4016 en cours d'élaboration, il faut s'attendre à ce que ces exigences soient réglementées plus clairement à l'avenir pour la Suisse.

Plan d'assurance qualité

En attendant la publication d'une réglementation suisse spécifique, l'assurance qualité propre à chaque projet revêt une importance particulière. Pour chaque projet de construction, il convient d'élaborer un plan d'assurance qualité qui réglemente de manière contraignante la fabrication, la mise en œuvre et le contrôle du sol fluide. Un tel plan sert en premier lieu à définir de manière transparente les responsabilités, les paramètres de contrôle et les procédures, et correspond ainsi au principe de bonne pratique professionnelle. Il doit au minimum contenir:

- Description du projet et conditions cadres
- Responsabilités (maître d'ouvrage, concepteur, expert en sols, fabricant, entreprise de construction)
- Description des matériaux d'excavation utilisés
- Définition des contrôles de qualité internes et externes
- Critères de contrôle et tolérances admissibles
- Procédure en cas d'écarts
- Dispositions en cas de présence de matériaux d'excavation contaminés
- Mesures de sécurité au travail



Exigences imposées aux fabricants de sols fluides

Le fabricant doit prouver les propriétés techniques du matériau. Cela comprend notamment:

- Aptitude au terrassement (classe de sol 3 – 5)
- Résistance à la compression (par exemple selon la norme DIN 18136)
- Taux d'étalement au point de déchargement
- Taux de décantation
- Documentation relative à la date de fabrication et de mise en œuvre (par exemple, bon de livraison avec indication des dates)

La densité du sol fluide est essentiellement déterminée par les matériaux d'excavation utilisés. La formulation doit donc être adaptée au projet en fonction du type de sol, du mode de construction et des conditions de mise en œuvre. Cela nécessite une analyse professionnelle du sol, tant pour le matériau de départ que pour le matériau environnant.

Contrôles de qualité du sol fluide

Afin de garantir une qualité constante des matériaux, il convient de prévoir une surveillance interne et externe. Dans le cadre de la surveillance interne, on procède généralement à:

- Un contrôle visuel des matériaux d'excavation
- Détermination de la teneur en humidité
- Contrôle de la masse étalée

De plus, à des intervalles de production définis (par exemple 200 à 500 m³), des échantillons doivent être prélevés et testés quant à leurs propriétés techniques et mécaniques (par exemple selon la norme DIN 18136). La surveillance externe doit être effectuée par un laboratoire d'essais de construction spécialisé et certifié.

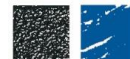
Mise en œuvre et documentation

La mise en œuvre s'effectue généralement à l'aide d'un camion malaxeur équipé d'un tuyau. En fonction des conditions locales, des aides à la mise en œuvre supplémentaires telles que des pompes à béton, des tuyaux de déversement ou des trémies peuvent être nécessaires. Il est recommandé de tenir une documentation complète de la mise en œuvre (journal de mise en œuvre). Cela améliore la traçabilité, facilite l'assurance qualité et réduit les risques de responsabilité ultérieurs.

Réglementation en matière de responsabilité

Les propriétés du matériau dépendant fortement de la formulation spécifique au projet, une répartition claire des responsabilités est nécessaire. Dans la pratique, la responsabilité de la formulation incombe généralement au fabricant de sol fluide.

Les vérifications statiques, notamment en ce qui concerne la statique des canalisations (par exemple, l'enrobage) ou les situations de charge particulières, doivent être clarifiées au cas par cas. Il convient de s'assurer que les couvertures d'assurance appropriées sont en place.



7.4 Aperçu des applications existantes et des expériences

L'évaluation des applications existantes en Suisse, en Allemagne et en Autriche montre que le sol fluide est utilisé avec succès depuis de nombreuses années dans toute une série d'applications typiques du génie civil [20]. Les expériences documentées indiquent que les applications examinées dans le cadre de cette étude ne présentent dans la plupart des cas aucun risque technique, pour autant que les conditions spécifiques au projet soient prises en compte et que les justifications requises soient fournies.

À ce jour, plus de 190 domaines d'application différents ont été documentés, principalement dans le génie civil. Les principaux domaines d'application sont présentés ci-après et classés en domaines d'application non critiques et potentiellement critiques [51].

7.4.1 Domaines d'application non critiques

Ces domaines d'application sont considérés comme techniquement établis, car les propriétés typiques du sol fluide répondent pleinement aux exigences fonctionnelles [51].

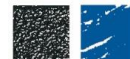
- Remblayage de tranchées dans la construction de conduites et de câbles (y compris la pose de canalisations)
- Couches de fondation et de protection ainsi que remblais dans la construction de conduites de chauffage urbain
- Remblayage de cavités et de fouilles
- Zones de conduites soumises à de faibles charges mécaniques
- Construction de tracés pour câbles standard
- Découplages anti-vibrations dans les zones à faibles charges
- Drainages
- Mise en œuvre dans des zones suffisamment éloignées de la nappe phréatique (> 2 m), à condition qu'il n'y ait pas de sensibilités hydrogéologiques accrues
- Isolation des sols contaminés

Dans ces domaines d'application, le comportement requis du matériau (fluidité, autocompactage, re-consolidation et similitude avec le sol) correspond aux propriétés de toutes les variantes de formulation. Les variantes sans ciment et à base de charbon végétal peuvent être utilisées ici sans restriction.

Des retours d'expérience supplémentaires montrent en outre que, dans de nombreux projets de construction de canalisations, il est possible de renoncer à un béton d'enrobage même en cas de recouvrement important, pour autant que les exigences statiques soient vérifiées en fonction du type de tuyau, du lit de pose et des conditions de mise en œuvre. Cela tend à indiquer que les applications standard considérées ici ne doivent pas être classées comme critiques sur le plan technique dans la plupart des cas. Des exemples de calculs statiques types pour les tuyaux en béton armé selon les normes SIA 190 / SIA 261 le confirment et montrent que des épaisseurs de recouvrement de plusieurs mètres peuvent être justifiées même en cas d'utilisation de matériaux de lit et de remblai non liés (par ex. gravier/sable) sans béton d'enrobage (voir l'appendice E). Cela suggère que les enrobages en béton ne sont pas systématiquement nécessaires dans de nombreuses applications standard.

7.4.2 Domaines d'application potentiellement critiques

Dans ces domaines, des exigences techniques accrues ou des prescriptions normatives peuvent conduire à ce que certaines formulations nécessitent des essais supplémentaires ou des justifications spécifiques au projet [51].



- Zones de circulation soumises à des charges dynamiques élevées (valeurs EV_2 , exigences de compactage et de déformation)
- Zones exposées au gel et au sel de déneigement (bordures de route, zones de service hivernal)
- Lits de canalisations selon des normes strictement réglementées (p. ex. SN 592000, conduites spéciales)
- Ouvrages situés à proximité immédiate de la nappe phréatique ou dans un secteur Au/Ao de protection des eaux¹⁴
- Projets de construction dans des zones de protection des eaux souterraines où des variations de pH ou la mobilisation de sulfates peuvent être pertinentes
- Applications dans le domaine des sites contaminés avec des concepts de surveillance (influence possible sur les paramètres pH/Eh)

Dans ce contexte, certaines propriétés, telles que le développement de la résistance, la perméabilité à l'eau, la durabilité ou les paramètres liés à la carbonatation, peuvent varier en fonction de la formulation. Cela vaut par exemple pour les formulations à forte teneur en charbon végétal, qui sont certes avantageuses en termes de stockage du carbone, mais encore moins standardisées sur le plan mécanique et technique.

Pour les formulations standard éprouvées, il est possible de s'appuyer sur les valeurs empiriques et les preuves existantes. En revanche, pour les formulations innovantes ou très différentes, il est recommandé de prévoir des essais complémentaires et de vérifier l'adéquation dans le cas d'application concret. À long terme, une standardisation accrue, par exemple dans le cadre de la norme SIA 4016 en cours d'élaboration, pourrait contribuer à définir plus clairement les applications récurrentes et à accroître le potentiel de déploiement du procédé. L'objectif serait de limiter les essais supplémentaires spécifiques à un projet aux cas particuliers ou aux variantes innovantes.

Conformément à la méthode RSS® pour sol fluide selon la norme RAL-GZ 507, cela comprend une planification technique systématique avec modélisation du sol, le développement de formulations spécifiques à l'application, des vérifications fonctionnelles (par exemple, absence de retrait, comportement de relaxation et d'amortissement des vibrations, conductivité thermique) ainsi qu'une assurance qualité continue par des organismes de contrôle reconnus [51].

7.4.3 Matrice d'aptitude des variantes de sol fluide

La matrice présentée dans le tableau 7-1, compare les principaux domaines d'application des quatre formulations de sol fluide étudiées. Elle indique en un coup d'œil les domaines dans lesquels l'adéquation est évidente (vert), ceux où des essais spécifiques au projet sont nécessaires (orange) et les cas où des risques ou des restrictions particuliers doivent être pris en compte (rouge). L'évaluation qualitative de l'adéquation s'appuie, outre la littérature [20], notamment sur des projets de référence documentés du procédé de sol fluide RSS® [51].

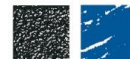
¹⁴ Le secteur Au comprend les eaux souterraines exploitables ainsi que les zones adjacentes nécessaires à leur protection. Le secteur Ao comprend les eaux de surface et leurs berges, dans la mesure où celles-ci doivent être protégées pour une utilisation particulière, par exemple pour l'approvisionnement en eau potable.



Tableau 7-1: Matrice des domaines d'application et de l'adéquation des formulations de sol fluide, sur la base d'une analyse documentaire [20], [51]. La couleur « verte » désigne les applications établies. La couleur « orange » nécessite des justifications spécifiques au projet. La couleur « rouge » indique les applications pour lesquelles les données sont insuffisantes ou qui présentent un risque accru.¹⁵

Domaine d'application	Sol fluide	Sol fluide amélioré	Sol fluide avec charbon végétal	Sol fluide avec une teneur maximale en charbon végétal
Remblayage de tranchées dans la pose de conduites et de câbles (y compris la pose de canalisations)	Verte	Verte	Verte	Verte
Pose de conduites de chauffage urbain	Verte	Verte	Orange	Orange
Couches de fondation et de protection	Verte	Verte	Verte	Verte
Construction de tracés pour câbles standard	Verte	Verte	Verte	Orange
Remblayage de cavités et de fouilles	Verte	Verte	Verte	Orange
Isolation antivibratoire	Verte	Verte	Verte	Verte
Drainages	Verte	Verte	Verte	Verte
Pose à plus de 2 m au-dessus du niveau de la nappe phréatique	Verte	Verte	Verte	Verte
Isolation des sols contaminés	Verte	Verte	Verte	Verte
Zones de circulation / charges dynamiques	Verte	Verte	Orange	Rouge
Zones de gel/dégivrage	Verte	Verte	Orange	Rouge
Lits de pose SN 592000	Orange	Orange	Rouge	Rouge
Supports de fondations	Verte	Verte	Rouge	Rouge
Construction de voies / découplage vibratoire	Verte	Verte	Orange	Rouge
Pose à moins de 2 m au-dessus du niveau de la nappe phréatique	Verte	Verte	Orange	Rouge
Secteurs Au/Ao de protection des eaux	Orange	Orange	Orange	Rouge
Zones sensibles au pH et au potentiel redox	Orange	Orange	Verte	Rouge
Sites contaminés sous surveillance	Orange	Orange	Verte	Orange
Installations soumises à une obligation de démantèlement (OVI)	Orange	Orange	Verte	Verte
Génie hydraulique (en rapport avec l'écoulement)	Orange	Orange	Rouge	Rouge

¹⁵ L'évaluation présentée de l'adéquation des variantes de sol fluide repose sur l'état actuel de la littérature, sur l'expérience acquise dans le cadre de projets ainsi que sur une expertise technique. Elle doit être considérée comme une classification provisoire. Pour certains domaines d'application, des clarifications supplémentaires, des essais spécifiques au projet et des expériences à long terme supplémentaires sont nécessaires.



7.5 Recommandations pour la mise en œuvre pratique

Le sol fluide peut être considéré comme techniquement adapté à une grande partie des applications typiques du génie civil. Cela concerne en particulier le remblayage de tranchées dans la pose de conduites et de câbles, le remblayage de cavités et de fouilles, les couches de fondation et de protection, ainsi que les applications soumises à des contraintes mécaniques faibles à modérées. Pour ces applications standard, les formulations de sol fluide, qu'elles soient conventionnelles ou améliorées, répondent de manière fiable aux exigences fonctionnelles. Les variantes à base de charbon végétal sont également utilisables dans ces domaines, pour autant que les exigences techniques relatives aux matériaux soient respectées.

Pour les applications soumises à des charges de trafic dynamiques élevées, dans les zones exposées au gel et au sel de déneigement, pour les lits de canalisations réglementés par des normes (par exemple SN 592000), dans des situations proches de la nappe phréatique ou dans des zones sensibles de protection des eaux, l'adéquation doit être vérifiée au cas par cas. Dans ces cas, des justifications supplémentaires ou des essais complémentaires peuvent être nécessaires. Les formulations à forte teneur en charbon végétal peuvent également nécessiter des justifications supplémentaires en raison de leurs réserves de résistance plus faibles.

Les systèmes à liant hydraulique avec béton d'enrobage sont particulièrement adaptés lorsque des charges ponctuelles élevées sont requises. Le sol fluide offre en revanche des avantages en termes d'intégration dans le système. La structure homogène du remblayage réduit les variations de rigidité au sein de la tranchée, ce qui peut avoir un effet positif sur le comportement au tassement. Parallèlement, le remblai reste généralement facile à excaver, ce qui facilite l'accessibilité et l'adaptabilité ultérieures des réseaux de canalisations.

Les retours d'expérience ainsi que les pratiques observées en Allemagne et en Autriche montrent que, dans de nombreux projets de pose de canalisations, de grandes épaisseurs de remblai sont techniquement maîtrisables même sans enrobage en béton, à condition que la statique des canalisations, le lit de pose et les conditions d'installation soient justifiés et réalisés en conséquence. Cela confirme que l'adéquation technique ne doit pas être déterminée de manière générale par la présence d'un enrobage en béton.

Pour une application pratique, il est recommandé d'étudier le recours au sol fluide notamment là où les méthodes de construction conventionnelles avec béton d'enrobage peuvent être remplacées ou là où la suppression du compactage mécanique permet de réduire la largeur de la tranchée. Le choix de la formulation doit toujours être adapté aux exigences spécifiques du projet en matière de transfert des charges, de durabilité, de situation des eaux souterraines et de prescriptions normatives.

7.6 Besoin d'actions supplémentaires sur le plan technique et normatif

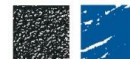
Bien que le sol fluide puisse être largement utilisé sur le plan technique, des efforts supplémentaires sont nécessaires en matière de normalisation, de standardisation et de valorisation matière du sol fluide démantelé.

La norme SIA 4016, actuellement en cours d'élaboration, établit pour la première fois une base technique uniforme à l'échelle nationale. À l'avenir, une standardisation plus poussée des exigences de performance, des méthodes d'essai et des obligations de documentation serait toutefois judicieuse afin d'améliorer la comparabilité des différentes formulations et de faciliter déploiement sur le marché.

Un autre aspect concerne la transparence des matériaux à long terme. Une fois mis en place, le sol fluide forme un remblai homogène qui, lors d'un démantèlement ultérieur, ne se distingue pas facilement du sol environnant. Compte tenu de la durée de vie de 100 ans retenue dans cette étude, une documentation systématique revêt donc une importance croissante. À l'instar des passeports matériaux ou des passeports bâtiments dans le génie civil, un enregistrement standardisé des matériaux mis



en œuvre pourrait à l'avenir être mis en place dans le génie civil. Celui-ci contiendrait des informations sur la formulation, le lieu de mise en œuvre et la qualité des matériaux, faciliterait l'évaluation ultérieure lors du démantèlement et présenterait des avantages en termes d'économie circulaire, de valorisation et de gestion des matériaux potentiellement pollués.



8 Classification du sol fluide au regard de la législation sur les déchets

Outre l'évaluation technique et écologique, la question se pose de savoir comment classer le sol fluide en fin de vie au regard de la législation sur les déchets. Pendant la phase d'utilisation, le matériau reste en permanence dans le sous-sol, mais lors du démantèlement ultérieur, il est considéré comme un matériau d'excavation et est donc soumis aux dispositions légales en vigueur en matière de déchets.

Dans le cadre de cette étude, on a supposé que lors du démantèlement, environ 50 % des matériaux produits seraient valorisés et 50 % mis en décharge. Dans ce contexte, il convient de clarifier les conditions juridiques dans lesquelles une valorisation est autorisée et les exigences applicables à une éventuelle élimination.

La classification suivante au regard de la législation sur les déchets a été établie en concertation avec l'OFEV:

Le sol fluide se compose en grande partie de matériaux d'excavation et peut, par analogie, être traité comme tel pour son élimination. L'élimination du sol fluide peut ainsi s'appuyer sur les dispositions de l'art. 19 et des annexes 3 et 5 de l'OLED.

Pour les matériaux d'excavation non pollués, le principe est qu'il ne doit y avoir aucun soupçon de pollution. Il s'agit donc généralement de « matériaux provenant de terrains vierges », qui n'ont pas été altérés par l'activité humaine. Au regard du droit des déchets, les matériaux d'excavation non pollués doivent satisfaire aux exigences de l'annexe 3, ch. 1, de l'OLED, à savoir qu'ils doivent être composés d'au moins 99 % en poids de roches meubles ou de roches concassées et ne peuvent contenir plus de 1 % en poids de déchets de chantier minéraux. Si les matériaux d'excavation ont été pollués dans une certaine mesure par des activités humaines, ils sont considérés comme faiblement pollués. Au regard de la législation sur les déchets, les matériaux d'excavation faiblement contaminés doivent respecter les exigences de l'annexe 3, ch. 2, de l'OLED, à savoir qu'ils doivent être composés d'au moins 95 % en poids de roches meubles ou de roches concassées et, pour le reste, d'autres déchets de chantier minéraux.

Lors de la fabrication de sol fluide, les matériaux d'excavation sont mélangés à du ciment et de la bentonite. D'autres additifs, tels que le charbon végétal, peuvent également être ajoutés au sol fluide. Cela augmente le risque d'introduction de substances étrangères et polluantes. Dans certains cas, le sol fluide est déjà fabriqué à partir de matériaux d'excavation faiblement pollués.

La classification du sol fluide au regard de la législation sur les déchets dépend de la qualité des matériaux d'excavation utilisés ainsi que de la nature et de la quantité des additifs utilisés. L'utilisation de matériaux d'excavation pour la fabrication de sol fluide est soumise aux dispositions de l'art. 19 OLED; il convient en priorité d'utiliser des matériaux d'excavation non pollués. Toutefois, en cas de fabrication directement sur le chantier, les matériaux d'excavation faiblement pollués produits sur place peuvent également être valorisés (art. 19, al. 2, let. d, OLED).

En ce qui concerne les additifs, la bentonite utilisée, comme indiqué au chapitre 6.2, ne joue aucun rôle pour l'environnement ni pour le choix de la filière d'élimination. D'éventuels autres additifs, tels que le charbon végétal, doivent en revanche être pris en compte lors du choix de la filière d'élimination. Étant donné que de telles formulations ne sont actuellement pas encore utilisées à grande échelle et que le thème du charbon végétal évolue de manière très dynamique, aucune évaluation plus approfondie n'est réalisée ici.

Du point de vue de la législation sur les déchets, c'est principalement la teneur en ciment du sol fluide démantelé qui est déterminante. Le ciment peut être assimilé à un déchet de chantier minéral, car il n'est naturellement pas présent dans les matériaux d'excavation. Un sol fluide moyen, tel qu'il est couramment utilisé aujourd'hui, contient 2.3 % de ciment (voir chapitre 3.1.1) et est donc considéré comme un matériau d'excavation faiblement pollué au sens de l'annexe 3, ch. 2, de l'OLED.



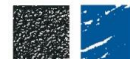
Un sol fluide composé exclusivement de matériaux d'excavation non pollués et de bentonite et contenant moins de 1 % de ciment pourrait en principe être classé comme matériau d'excavation non pollué lors du démantèlement. Il en résulte toutefois un défi en matière de traçabilité de la composition et de délimitation du sol fluide «moyen» si celui-ci est retiré à l'avenir.

En règle générale, une fois le sol fluide retiré, il convient de partir du principe qu'il s'agit au moins de matériaux d'excavation faiblement pollués au sens de l'annexe 3, ch. 2, de l'OLED, et il doit être valorisé conformément aux dispositions de l'art. 19, al. 2, de l'OLED. Concrètement, il peut

- être utilisé pour la fabrication de matériaux de construction à liant hydraulique ou bitumineux, ou
- être réutilisé au lieu où il est produit (pour le remblayage de la tranchée).

Ce n'est que si une telle valorisation n'est pas possible qu'il peut être mis en décharge de type B, dans le respect des prescriptions de l'annexe 5, ch. 2, de l'OLED.

Contrairement au sol fluide, le béton maigre ne peut pas être simplement réutilisé sur place pour le remblayage de la tranchée après le démantèlement. Le sol fluide présente donc des avantages en matière d'élimination par rapport à un remblayage de tranchée classique avec «grave avec béton d'enrobage».



9 Obstacles et pistes de solution pour le sol fluide

L'évaluation technique montre que le sol fluide peut être utilisé dans de nombreux domaines d'application. Pourtant, son utilisation n'est pas encore généralisée en Suisse. La pénétration limitée du marché est moins due à des lacunes techniques qu'à des facteurs normatifs, liés à l'application de la réglementation et à la perception. Ces obstacles sont présentés ci-après et mis en regard des solutions proposées.

Protection des eaux et comportement à la lixiviation

Une question centrale en matière d'acceptation concerne les répercussions possibles sur le sol et les eaux souterraines pendant la phase d'exploitation, en particulier dans les zones proches de la nappe phréatique ou dans les zones de protection des eaux. Bien que les analyses de lixiviation et les surveillances des eaux souterraines présentées au chapitre 6.5 ne montrent aucun relargage significatif de polluants, des réserves persistent parfois dans la pratique, notamment dans les zones proches de la nappe phréatique et les zones de protection des eaux. Celles-ci concernent moins des cas de dommages concrets que le nombre encore limité de projets de référence documentés sur le long terme en Suisse.

Piste de solution

Une documentation systématique des données de lixiviation, des résultats de surveillance liés aux projets et des projets de référence accompagnés par les autorités peut contribuer à renforcer la confiance. Avec l'expérience croissante en matière d'application et des directives techniques claires (mot-clé: norme SIA 4016), on peut supposer que la pratique d'évaluation continuera à se standardiser et que les efforts supplémentaires de clarification seront réduits.

Identification et protection mécanique lors du démantèlement

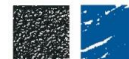
Comme indiqué au chapitre 7.1, le sol fluide forme une structure de remblayage homogène sans couche de délimitation dure prononcée autour de la conduite. Par rapport à la méthode de construction conventionnelle avec béton d'enrobage, la zone de la conduite peut ainsi être moins clairement identifiable lors d'un démantèlement ultérieur. Dans la pratique, cela est parfois perçu comme un risque, car une utilisation imprudente des machines ne permet pas d'exclure un endommagement de la conduite.

Piste de solution

Le risque de dommages dépend essentiellement de la qualité de la documentation relative à la conduite, de l'application systématique des méthodes de localisation et de sondage, ainsi que des pratiques de démantèlement. Une documentation claire de la situation de mise en place, des systèmes de marquage ainsi que des directives de démantèlement spécifiques peuvent contribuer à réduire cet obstacle.

Absence de normalisation nationale

L'absence de normalisation nationale contraignante constitue un obstacle majeur. Alors qu'en Allemagne, la norme RAL GZ 507 constitue un référentiel de qualité et un ensemble de règles bien établi, il n'existe à ce jour en Suisse aucun document de référence généralement reconnu (voir chapitre 7.3) [2]. Les maîtres d'ouvrage publics et les autorités d'exécution s'appuient sur des prescriptions normatives. En l'absence de définitions contraignantes concernant le dimensionnement, les exigences minimales et l'assurance qualité, les besoins en matière de coordination et de justification sont accrus au cas par cas.



Piste de solution

La norme SIA 4016, en cours d'élaboration, devrait constituer une base centrale. Une définition claire des domaines d'application, des paramètres de performance et des exigences de contrôle devrait considérablement renforcer la sécurité de la planification et favoriser la standardisation. En complément, des outils ou des aides à l'exécution plus clairs pourraient contribuer à délimiter les cas d'application dans lesquels des enrobages en béton sont nécessaires et ceux où des méthodes de construction alternatives sont techniquement admissibles et appropriées.

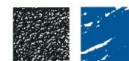
Identité des matériaux

Compte tenu de la longue durée de vie des infrastructures, la question de la traçabilité matérielle à long terme des matériaux se pose. Une fois mis en place, le sol fluide forme un remblai homogène qui, lors d'un démantèlement ultérieur, ne se distingue pas du sol environnant. Sans documentation systématique, la formulation, la teneur en liant ou les additifs utilisés sont pratiquement impossibles à reconstituer après plusieurs décennies. Pour les maîtres d'ouvrage, cela peut être perçu comme un facteur d'incertitude en ce qui concerne les futurs scénarios de démantèlement et de valorisation. Indépendamment de cela, le matériau démantelé est soumis à une nouvelle évaluation au regard de la législation sur les déchets conformément à l'OLED [49]. Une valorisation n'est donc autorisée que si les valeurs limites correspondantes sont respectées.

Dans le contexte d'éventuelles utilisations multiples, la question d'une accumulation progressive de substances non dégradables fait également l'objet de discussions.

Piste de solution

Une accumulation de polluants ne serait envisageable que si des matériaux contaminés étaient réutilisés à plusieurs reprises dans de nouvelles applications sans avoir été contrôlés. Afin d'améliorer la transparence à long terme, comme indiqué au chapitre 7.6, une documentation des matériaux spécifique au projet peut s'avérer utile. Un enregistrement standardisé de la formulation, du lieu de mise en place et de la qualité des matériaux faciliterait l'évaluation ultérieure lors du démantèlement et améliorerait la traçabilité matérielle sur plusieurs cycles d'utilisation.

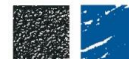


10 Conclusion

Cette étude a pu montrer que le sol fluide présente un potentiel écologique pertinent dans le génie civil suisse. Son utilisation est particulièrement avantageuse là où les méthodes de construction conventionnelles avec béton d'enrobage peuvent être remplacées. Les principales raisons en sont la moindre utilisation de matériaux à forte teneur en ciment et l'utilisation de matériaux d'excavation à la place de matières premières primaires telles que le gravier et le sable. Parallèlement, les résultats montrent que les avantages environnementaux du sol fluide dépendent fortement de la mise en œuvre concrète du projet. Le levier le plus important réside dans le choix du liant, car le ciment, malgré sa faible proportion en masse, est le principal facteur contribuant aux impacts environnementaux du sol fluide. Un autre levier central est la réduction de la largeur de tranchée, car elle diminue considérablement les besoins en matériaux et donc les impacts environnementaux. Les plus grands potentiels écologiques résultent donc de la combinaison de plusieurs leviers.

Sur le plan technique et environnemental également, le sol fluide peut être considéré comme une alternative appropriée aux méthodes de construction conventionnelles pour de nombreuses applications standard. L'expérience pratique montre que ces applications ne posent généralement pas de problèmes techniques, pour autant que les conditions spécifiques au projet soient prises en compte et que les justifications requises soient fournies. Des analyses de lixiviation et des surveillances des eaux souterraines montrent en outre qu'aucun relargage significatif de polluants n'est à craindre si la fabrication et la mise en œuvre sont réalisées dans les règles de l'art. Des restrictions s'appliquent principalement aux applications présentant des exigences techniques élevées.

Pour une application plus large dans la pratique, il serait judicieux que les maîtres d'ouvrage, tels que les services des travaux publics, mènent et accompagnent de manière ciblée d'autres projets pilotes et de référence, et fassent évaluer de manière centralisée les enseignements qui en sont tirés. Cela pourrait contribuer à harmoniser davantage la pratique d'application, à lever les réserves existantes et à accroître la sécurité d'utilisation.



11 Limites de l'étude

Ce chapitre expose les hypothèses centrales et les incertitudes de la présente étude et met en évidence les domaines dans lesquels un approfondissement est nécessaire.

Comparabilité fonctionnelle

Une première restriction importante concerne la comparabilité fonctionnelle des variantes de remblayage étudiées. Les analyses reposent sur l'hypothèse que les systèmes considérés peuvent remplir la même fonction technique dans les cas d'application définis. Cette hypothèse est plausible pour de nombreuses applications standard, mais ne s'applique pas sans restriction à toutes les situations de mise en œuvre. En particulier en cas d'exigences mécaniques accrues, de remblais de canalisations spécifiques ou de conditions hydrogéologiques sensibles, l'adéquation technique des différents modes de construction peut varier en fonction du projet. La comparabilité écologique est donc toujours liée à la faisabilité technique respective.

De plus, cette étude n'a pas examiné en détail dans quelles conditions techniques l'utilisation de sol fluide permet de se passer de béton d'enrobage. D'autres mesures visant à éviter le béton d'enrobage, telles que le choix de certains types ou matériaux de canalisations, ne relevaient pas du cadre de l'étude.

Le béton d'enrobage dans la méthode de construction conventionnelle

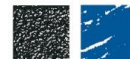
Une autre incertitude majeure concerne la modélisation des systèmes de référence conventionnels. Pour le mode de construction «grave avec béton d'enrobage», on a supposé, par simplification, une proportion fixe de béton d'enrobage de 20 % du volume de la tranchée. Cette hypothèse sert à la comparabilité, mais ne reflète que de manière simplifiée la pratique réelle de la construction. Selon la géométrie de la tranchée, le type de canalisation et les conditions de pose, la proportion réelle de béton d'enrobage peut être inférieure ou supérieure. Étant donné que le béton d'enrobage constitue le principal facteur d'impact environnemental en raison de sa forte teneur en ciment, cette hypothèse a une influence significative sur les résultats de l'écobilan comparatif.

Largeur de tranchée réduite

Dans cette étude, la largeur de tranchée réduite a été modélisée de manière simplifiée avec une réduction forfaitaire de 0.30 m. Cette hypothèse repose sur une estimation proche de la pratique, mais elle n'est pas valable de la même manière pour tous les diamètres de conduites, toutes les méthodes de pose et toutes les conditions de chantier. La réduction de la largeur de tranchée ayant une grande influence sur les quantités de matériaux et donc sur les impacts environnementaux, elle constitue l'un des principaux paramètres d'incertitude et d'amélioration de l'étude.

Le charbon végétal dans le sol fluide

Les résultats obtenus pour les variantes utilisant du charbon végétal doivent être interprétés avec une grande prudence. Leur intérêt écologique dépend fortement de la prise en compte du stockage du carbone dans le bilan et de la possibilité de supposer que le carbone biogène restera lié de manière stable dans le matériau à long terme. Parallèlement, l'analyse systémique montre que des quantités importantes de charbon végétal seraient nécessaires, même pour des applications relativement limitées. Compte tenu des capacités de production actuelles et des éventuelles concurrences d'utilisation, l'utilisation du charbon végétal dans le système étudié ici doit donc être considérée comme une option plutôt à long terme et dont le potentiel de déploiement est actuellement limité.



Estimation du potentiel du sol fluide dans le génie civil suisse

Un autre point important concerne l'estimation du potentiel au niveau du réseau d'infrastructures suisse. Celle-ci constitue délibérément une estimation simplifiée et plutôt optimiste. Les hypothèses relatives à la substituabilité de la grave et du béton, à la disponibilité des matériaux démantelés ainsi qu'à la transposabilité à différents types de réseaux sont notamment entachées d'incertitudes.

En ce qui concerne le béton en particulier, il convient de souligner que la part substituable indiquée de 77 % représente une hypothèse théorique dans les frontières du système choisi (voir l'appendice D). Cette valeur ne doit pas être interprétée comme un potentiel de marché techniquement avéré ou réalisable à court terme. Dans la pratique, le potentiel réellement exploitable peut être nettement inférieur en raison de contraintes techniques, normatives, liées à l'exploitation des ouvrages et spécifiques aux projets. Les potentiels indiqués doivent donc être interprétés avant tout comme des ordres de grandeur théoriques.

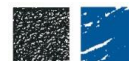
Perspectives

Pour des applications standard appropriées dans la construction de conduites, le sol fluide peut d'ores et déjà constituer une alternative techniquement et écologiquement judicieuse, notamment là où il est possible de remplacer les méthodes de construction avec béton d'enrobage ou de réduire les flux de matériaux.

Du point de vue de l'application, il est important pour les maîtres d'ouvrage de vérifier l'adéquation dans le projet concret et de définir clairement les conditions-cadres spécifiques au projet. Cela comprend par exemple la profondeur d'enfouissement, la situation en matière de charges et de sol de fondation, les exigences relatives à la formulation ainsi que les conditions de mise en œuvre et de démantèlement ultérieur. Pour les applications standard, les expériences existantes et les projets de référence peuvent déjà offrir une orientation importante.

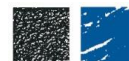
D'un point de vue technique, des approfondissements supplémentaires sont nécessaires afin de délimiter plus précisément les domaines d'application et de transposer les impacts environnementaux calculés pour la tranchée modélisée à d'autres cas d'application. Cela inclut des comparaisons techniques et écologiques basées sur des applications concrètes de construction de conduites avec des types de tuyaux, des profondeurs d'enfouissement et des situations de charge définies. En outre, une analyse approfondie des proportions réelles de béton d'enrobage et de la réduction effectivement possible de la largeur de la tranchée dans différentes applications standard serait utile. Des recherches supplémentaires sont notamment nécessaires concernant le charbon végétal, par exemple sur la stabilité à long terme, la disponibilité de matières premières appropriées et la hiérarchisation écologiquement pertinente de telles applications. L'évaluation du potentiel d'utilisation du sol fluide dans le génie civil devrait également être affinée, en particulier en ce qui concerne les possibilités de substitution techniquement réalisables dans les différents types de réseaux et domaines d'application.

Dans l'ensemble, cette étude met en évidence un potentiel clair pour l'utilisation du sol fluide dans la construction de conduites. Des approfondissements techniques, écologiques et spécifiques à l'application pratique peuvent contribuer à transposer les résultats à d'autres cas d'application, à délimiter de manière plus ciblée les domaines d'utilisation et à soutenir davantage l'application dans la pratique.

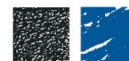


Bibliographie

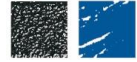
- [1] KBOB, ecobau, IPB, «Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 8.1» Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich, Bern und Zürich, 2026.
- [2] Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., «Flüssigboden - Gütesicherung RAL GZ 507» RAL Gütezeichen, Sankt Augustin, 2014.
- [3] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen - Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, «Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeilweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau» FGSV, Köln, 2012.
- [4] S. Stürwald, Interviewee, *Experteninterview zum SIA-Merkblatt Flüssigboden*. [Interview]. 31 Oktober 2025.
- [5] ISO 14040, «Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines» ISO, Geneva, 2006.
- [6] ISO 14044, «Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines» ISO, Geneva, 2006.
- [7] EN 15643-5:2017, «Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Teil 5 Leitfaden zu den Grundsätzen und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke» SN EN 15643-5:2017, 2018-11-01.
- [8] IPCC 2021, «Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change» Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York USA, 2021.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change, «Climate Change 2007: Synthesis Report» Valencia, 2007.
- [10] OFEV (éd.), «Écofacteurs suisses 2021 selon la méthode de la saturation écologique. Bases méthodologiques et application à la Suisse» Office fédéral de l'environnement, Bern, 2021.
- [11] A. Gautschi, «Green Economy - The Method of Ecological Scarcity in Policy Making, in Economics and Environmental Monitoring Division» *Bundesamt für Umwelt (BAFU)*, 2013.
- [12] T. Kägi, F. Dinkel, R. Frischknecht, S. Humbert, J. Lindberg, S. De Mester, T. Ponsioen, S. Sala et U. W. Schenker, «Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?" - SETAC Europe 25th Annual Meeting» *International Journal of Life Cycle Assessment*, 5 Mai 2015.
- [13] R. Frischknecht, F. Wyss, S. Büsser Knöpfel, T. Lützkendorf et M. Balouktsi, «Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015.
- [14] T. Neidhart et U. Trunk, «Einsatz von Flüssigboden in der Geotechnik» Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg und Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Regensburg, 2020.
- [15] S. Mariani, Interviewee, *Geschäftsführer EcoSoil AG: Angaben zum Flüssigboden der EcoSoil AG*. [Interview]. 19 März 2021.
- [16] S. Bühler, Interviewee, *Projektleiter KIBAG Bauleistungen AG Infra: Angaben zum Flüssigboden der KIBAG*. [Interview]. 9 März 2021.



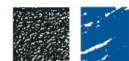
- [17] T. Pohl, «Ökobilanzierung von Flüssigboden im Einsatz von Grabefüllungen» Baudirektion des Kantons Zürich, Tiefbauamt, Zürich, 2021.
- [18] T. Pohl, «Ökobilanzierung des Einsatzes von Flüssigboden in erdverlegten Kabelleitungen von Swissgrid» Swissgrid, Aarau, 2022.
- [19] T. Pohl, «Ökobilanzierung von Flüssigboden der Firma EcoSoil AG» EcoSoil AG, Zürich, 2022.
- [20] T. Pohl, «Literaturrecherche Gefährdungseinschätzung des Einsatzes von Flüssigboden» Entsorgung & Recycling Zürich ERZ, Zürich, 2021.
- [21] BAFU, «Ökobilanzdatenbestand BAFU:2025; Stand 2026» Bundesamt für Umwelt, Bern, 2026.
- [22] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer, M. Spielmann et G. Wernet, «Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1» Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.
- [23] Evoquip, «Kompakte Brech-, Sieb- und Förderanlagen» 2023. [En ligne]. Available: https://www.terex.com/docs/librariesprovider2/default-document-library/evoquip-product-catalogue-2023-de.pdf?sfvrsn=711a7890_24. [Accès le 8 12 2025].
- [24] Liebherr, «LH 18 M Industry Litronic» Liebherr, 2025. [En ligne]. Available: <https://www.liebherr.com/de-ch/p/277280-3925633#energysavingcalculator>. [Accès le 8 Dezember 2025].
- [25] S. Kytzia et T. Pohl, «Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen» Ostschweizer Fachhochschule OST, Rapperswil, 2021.
- [26] Liebherr, «LTB 12+4+1 GL. Förderband für Fahrmischer» Liebherr, 2026. [En ligne]. Available: <https://www.liebherr.com/de-ch/p/85074-3911478>. [Accès le 6 Januar 2026].
- [27] Liebherr, «Verbrauchsrechner» Liebherr, 2025. [En ligne]. Available: <https://www.liebherr.com/de-ch/erdbewegung/beratung-kauf/verbrauchsrechner-6354255>. [Accès le 27 November 2025].
- [28] Wacker Neuson, «Mobilbagger: Flexibel zum Einsatzort» Wacker Neuson, 2025. [En ligne]. Available: <https://www.wackerneuson.ch/produkte/bagger/mobilbagger>. [Accès le 27 November 2025].
- [29] M. Klingler et D. Savi, «Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen. Für die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich» Büro für Umweltchemie, Zürich, 2019.
- [30] H.-P. Schmidt, N. Hagemann, F. Abächerli, J. Leifeld et T. Bucheli, «Utilisation de charbon végétal dans l'agriculture en Suisse. Risques et opportunités pour les sols et le climat» Agroscope, Zürich, 2021.
- [31] G. Hoeskuldsdottir, «Life Cycle Assessment of Biochar to Soil Systems: A Parametric Analysis» Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2022.
- [32] Bundesamt für Umwelt (BAFU), «Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft. Risiken und Chancen für Boden und Klima» Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) des Cercle Sol, Bern, 2023.
- [33] C. Bauer, D. Hondeborg, A. Jakobs, M. Myridinas, M. Olmos van Velden, R. Sacchi et T. Terlouw, «Carbon Dioxide Removal (CDR) Environmental Life Cycle Assessment» Paul Scherrer Institut (PSI) and Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), 2024.



- [34] Der Schweizerische Bundesrat, «Verordnung über die Reduktion der CO₂-Emissionen» 30 November 2012. [En ligne]. Available: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/856/de?version=20241231>. [Accès le 5 Februar 2026].
- [35] S. Rubli, «Bauabfälle in der Schweiz - Tiefbau Aktualisierung 2015» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2016.
- [36] OFS, «L'économie forestière en Suisse. Statistique de poche 2025» Office fédéral de la statistique, Neuchâtel, 2025.
- [37] P. Niemz, «Physik des Holzes» ETH Zürich, Zürich, 2005.
- [38] N. Hagemann, V. Kamra et H.-P. Schmidt, «Production quantities and C-sink potential of EBC-certified Biochar in 2023» Ithaka Institute, 2024.
- [39] S. Stürwald, Interviewee, *Reduzierte Grabenbreite bei Flüssigboden*. [Interview]. 20 Januar 2026.
- [40] Holcim, «Holcim Susteno 4» 2026.
- [41] LC3, «LC3. A sustainable alternative for the cement industry» 2026. [En ligne]. Available: <https://lc3.ch/wp-content/uploads/2023/02/LC3-A-sustainable-alternative-FINAL-EN-WEB2-2023.pdf>. [Accès le 14 März 2026].
- [42] «Calterra®» 2026.
- [43] Oxara, «Summary - Life Cycle Assessment of Oxacrete Oulesse®» 26 September 2025. [En ligne]. Available: https://oxara.earth/files/media/files/1778c9f50c5b431c39b0bf99daa475bf/251029_4605_Oxara_Oulesse_summary_V2.2.pdf. [Accès le 17 Dezember 2025].
- [44] Klark AG, «KLARK – Der Klimabeton» Klark AG, 2026. [En ligne]. Available: <https://www.klark.swiss/klark-beton/>. [Accès le 16 Januar 2026].
- [45] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Treibhausgasinventar der Schweiz» 10 Juli 2025. [En ligne]. Available: <https://www.bafu.admin.ch/de/treibhausgasinventar>. [Accès le 5 Februar 2026].
- [46] R. Ehrnsperger et W. Misch, «Gesundheits- und Umweltkriterien bei der Umsetzung der EG-Bauprodukten-Richtlinie (BPR) - Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes UBA» Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin, 2005.
- [47] T. Bucheli, I. Hilber et H.-P. Schmidt, «Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated aromatic compounds in biochar» chez *Biochar for Environmental Management*, Abingdon, Routledge, 2015, pp. 595-624.
- [48] EBC, «European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar» European, Arbaz, Switzerland, 2012-2022.
- [49] Schweizerische Bundesrat, «Verordnung vom 4. Dezember 2015 über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung VVEA)» Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, 2015 (Stand 1. Januar 2021).
- [50] PROV Produktions- und Vertriebsgesellschaft GmbH, «RSS®Systems» PROV Produktions- und Vertriebsgesellschaft GmbH, [En ligne]. Available: <https://rss-system.de/rssfluessigboden/>. [Accès le 4. Dezember 2025].



- [51] RSS Flüssigboden, «Das RSS®-Flüssigbodenverfahren entsprechend RAL Gütezeichen 507, Technische Grundlagen und planerische Möglichkeiten - Eine Entwicklung des Forschungsinstituts für Flüssigboden FIFB seit 1998» RSS Flüssigboden, Stein, 2019.
- [52] S. Hellweg, S. Rubli et R. Juraske, «Vorlesung: Grundzüge "Ökologische Systemanalyse"» ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2017.
- [53] F. Dinkel, «Skrip Ökobilanzen der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW» Fachhochschule Nordwestschweiz, Basel, 2013.
- [54] BFS, «Umwelt-Fussabdrücke» Bundesamt für Statistik, 2025. [En ligne]. Available: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/umweltgesamtrechnung/fussabdruecke.html>. [Accès le 26 März 2026].
- [55] Empa, «Material- und Energieressourcen sowie Umweltauswirkungen der baulichen Infrastruktur der Schweiz» Bundesamt für Umwelt BAFU, St. Gallen, 2016.



Termes et abréviations

CEM	Ciment, en anglais cement
CO ₂ -eq	Équivalents de dioxyde de carbone («equivalents»)
FU	Unité fonctionnelle de l'écobilan, en anglais «Functional unit»
GES	Gaz à effet de serre
LCA	Life Cycle Assessment, analyse du cycle de vie = écobilan. L'écobilan également appelé analyse du cycle de vie ou life cycle assessment (LCA), est un outil permettant d'analyser l'impact environnemental. Le préfixe «éco» désigne l'impact environnemental et le suffixe «bilan» la comptabilisation de l'ensemble des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie d'un produit ou d'un processus sous forme quantitative/numérique. Il est important que toutes les émissions et toutes les consommations de ressources, depuis la création du produit ou du processus jusqu'à son élimination ou sa valorisation, en passant par sa durée de vie effective, soient prises en compte dans l'écobilan – «du berceau à la tombe».
CEC	Consommation d'énergie cumulée; méthode d'écobilan permettant de recenser la consommation d'énergie totale, y compris l'«énergie grise». La CEC indique la consommation d'énergie non renouvelable directe et indirecte, qui est convertie en MJ d'équivalent pétrole à l'aide de facteurs de caractérisation. Ce modèle d'impact inclut les apports énergétiques nécessaires à l'extraction, à la fabrication et à l'élimination de tous les matériaux et matières auxiliaires requis, et évalue ainsi les besoins en sources d'énergie primaires non renouvelables telles que le charbon, le pétrole ou l'uranium.
kWh Oil-eq.	Kilowattheures équivalents pétrole («equivalents»)
UBP = UCE	Unités de charge écologique (UCE = UBP). Unité de la méthode d'écobilan entièrement agrégée de la méthode de la saturation écologique, en anglais «Ecological Scarcity»)
OLED	Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED, ordonnance sur les déchets)
ZFSV	Matériaux de remblayage autocompactants à fluidité temporaire (en allemand : zeitweise fliessfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe)

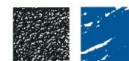


Table des Figures

Figure 0-1: Émissions totales de gaz à effet de serre de la formulation moyenne de sol fluide par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).....	4
Figure 0-2: Impact environnemental total de la formulation moyenne de sol fluide par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).	4
Figure 0-3: Émissions totales de gaz à effet de serre par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le sol fluide et le béton d'enrobage, le CEM I 42.5 R a été modélisé.	5
Figure 0-4: Impact environnemental global par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le sol fluide et le béton d'enrobage, on considère l'utilisation de ciment CEM I 42.5 R.....	6
Figure 0-5: Aide à la décision pour la réduction des impacts environnementaux dans la construction de conduites.....	9
Figure 2-1: Délimitation du système, représentation propre d'après la norme EN 15643-5 [7]...	15
Figure 3-1: Analyse des flux de matières et distances de transport du sol fluide (A1 – A5).	19
Figure 3-2: Analyse des flux de matières et distances de transport du sol fluide (C1 – C4).....	20
Figure 3-3: Émissions totales de gaz à effet de serre de la formulation moyenne de sol fluide par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).....	29
Figure 3-4: Impact environnemental total par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.....	30
Figure 3-5: Consommation d'énergie cumulée par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.....	30
Figure 3-6: Analyse des hotspots: impacts environnementaux de la formulation de référence par composant (A1 – A3).	31
Figure 3-7: Émissions de gaz à effet de serre du sol fluide conventionnel et du sol fluide amélioré (CEM I 42.5 R vs CEM III A).	32
Figure 3-8: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan par rapport à la formulation moyenne de sol fluide pour différents teneurs en ciment.....	33
Figure 3-9: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan en fonction des différentes valorisations options de valorisation des résidus de criblage issus de la production de sol fluide par rapport au scénario de référence.	34
Figure 3-10: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan pour différentes distances de transport entre le chantier et le site de production de sol fluide par rapport à la référence.	35
Figure 3-11: Analyse de sensibilité: Écart relatif des résultats de l'écobilan pour différents scénarios d'élimination du sol fluide par rapport à la référence.....	36
Figure 4-1: Émissions de gaz à effet de serre liées à la production de charbon végétal et stockage de carbone indiqué séparément (par kg de charbon végétal).	39
Figure 4-2: Émissions totales de gaz à effet de serre des variantes de sol fluide étudiées, avec et sans charbon végétal, par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4). Le stockage de carbone du charbon végétal, converti en CO ₂ , est indiqué séparément.....	41



Figure 4-3: Impact environnemental total des variantes de sol fluide étudiées, avec et sans charbon végétal, par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4). Le stockage de carbone du charbon végétal, converti en CO ₂ , est indiqué séparément.....	42
Figure 4-4: Consommation d'énergie cumulée par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide. Comparaison entre la formulation moyenne de sol fluide, la variante améliorée et deux variantes avec du charbon végétal.	43
Figure 5-1: Répartition schématique des volumes de béton d'enrobage et de matériau de remblayage pour deux profondeurs de tranchée différentes (2D)	48
Figure 5-2: Émissions totales de gaz à effet de serre par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.	50
Figure 5-3: Comparaison des émissions totales de gaz à effet de serre par m ³ de remblayage de tranchée sans stockage de CO ₂ dans le charbon végétal, en cas d'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A.	50
Figure 5-4: Impact environnemental total par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.	51
Figure 5-5: Comparaison des impacts environnementaux totaux par m ³ de remblayage de tranchée lors de l'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A, sans tenir compte du stockage inchangé de CO ₂ dans le charbon végétal.....	52
Figure 5-6: Consommation d'énergie cumulée par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.	52
Figure 5-7: Comparaison de la consommation d'énergie cumulée par m ³ de remblayage de tranchée en cas d'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A.....	53
Figure 5-8: Émissions totales de gaz à effet de serre par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes de sol fluide.....	55
Figure 5-9: Comparaison des émissions totales de gaz à effet de serre par m ³ de remblayage de tranchée, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes de sol fluide ainsi que de l'utilisation de CEM I 42.5 R ou de CEM III A.	56
Figure 5-10: Aide à la décision pour la réduction des impacts environnementaux dans la construction de conduites.....	57
Figure 0-1: Déroulement de l'évaluation dans le cadre de l'écobilan à l'aide de la méthode UBP. Schéma de base reliant l'inventaire de l'écobilan aux modèles d'impact (caractérisation) et à l'indice global de méthode de la saturation écologique (pondération et résultat). Représentation propre d'après les Écofacteurs suisses 2021 [10].	95
Figure 0-2: Étapes d'un écobilan selon la norme ISO 14 040 et suivantes[5], [52], [53]. La procédure entre les différentes étapes est généralement itérative. Représentation propre d'après les Écofacteurs suisses 2021 [10].	96
Figure 0-3: Consommation d'énergie non renouvelable par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.	100
Figure 0-4: Consommation d'énergie renouvelable par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.....	100
Figure 0-5: Impact environnemental total du sol fluide conventionnel et amélioré (CEM I 42.5 R vs CEM III A).	101

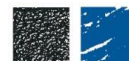


Figure 0-6: Consommation énergétique cumulée du béton fluide classique et amélioré (CEM I 42,5 R vs CEM III A).	101
Figure 0-7: Consommation d'énergie non renouvelable des sols fluides traditionnels et améliorés (CEM I 42,5 R vs CEM III A).	102
Figure 0-8: Consommation d'énergie renouvelable des sols fluides traditionnels et améliorés (CEM I 42,5 R vs CEM III A).	102
Figure 0-9: Impact environnemental global de la production de charbon végétal et stockage du carbone présenté séparément (par kg de charbon végétal).	103
Figure 0-10: Consommation énergétique cumulée de la production de charbon végétal (par kg de charbon végétal).	103
Figure 0-11: Consommation d'énergie non renouvelable pour la production de charbon végétal (par kg de charbon végétal).	104
Figure 0-12: Consommation d'énergie renouvelable pour la production de charbon végétal (par kg de charbon végétal).	104
Figure 0-13: Consommation d'énergie non renouvelable par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide. Comparaison entre la formulation moyenne du sol fluide, la variante améliorée et deux variantes avec du charbon végétal.	105
Figure 0-14: Consommation d'énergie renouvelable par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide. Comparaison entre la formulation moyenne du sol fluide, la variante améliorée et deux variantes avec du charbon végétal.	105
Figure 0-15: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave avec béton d'enrobage» (A1 – A5).	106
Figure 0-16: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave avec béton d'enrobage» (C1 – C4).	106
Figure 0-17: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave sans béton d'enrobage» (A1 – A5).	107
Figure 0-18: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave sans béton d'enrobage» (C1 – C4).	107
Figure 0-19: Consommation d'énergie non renouvelable par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage.	108
Figure 0-20: Consommation d'énergie renouvelable par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage.	108
Figure 0-21: Comparaison de la consommation d'énergie non renouvelable par m ³ de remblai de tranchée en cas d'utilisation de CEM I ou de CEM III A.	109
Figure 0-22: Comparaison de la quantité d'énergie renouvelable nécessaire par m ³ de remblayage de tranchée en cas d'utilisation de CEM I ou de CEM III A.	109
Figure 0-23: Impact environnemental total par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide.	110
Figure 0-24: Consommation d'énergie cumulée par m ³ de remblai de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblai, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide.	110

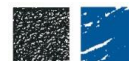


Figure 0-25:	Comparaison des impacts environnementaux globaux par m ³ de remblayage de tranchée, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide ainsi que pour l'utilisation de CEM I 42,5 R ou CEM III A.....	111
Figure 0-26:	Comparaison de la dépense énergétique cumulée par m ³ de remblai de tranchée en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide ainsi que pour l'utilisation de CEM I 42.5 R ou CEM III A.....	111
Figure 0-27:	Système considéré pour l'estimation du potentiel du sol fluide.....	113
Figure 0-28:	Stocks de matériaux dans le génie civil suisse par canton et par réseau d'infrastructure en 2025.....	117
Figure 0-29:	Stocks de matériaux dans le génie civil suisse par réseau d'infrastructure et par type de matériau.	117
Figure 0-30:	Quantités annuelles de déchets de construction de béton et de grave par type de valorisation.	118
Figure 0-31:	Émissions de gaz à effet de serre des matériaux de remblayage considérés, rapportées à 1 tonne de matériau de remblayage sur le cycle de vie des modules A1 – A5 aux modules C1 – C4. La représentation sert à comparer les matériaux de remblayage et les méthodes de construction associées.	120
Figure 0-32:	Émissions annuelles de gaz à effet de serre des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre la largeur de tranchée conventionnelle pour toutes les variantes de remblayage et la largeur de tranchée réduite uniquement pour le sol fluide . Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.....	121
Figure 0-33:	Émissions annuelles de gaz à effet de serre des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre une largeur de tranchée conventionnelle et une largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Le CEM III A a été modélisé pour le béton d'enrobage et le sol fluide.	122
Figure 0-34:	Impacts environnementaux annuels totaux des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre une largeur de tranchée conventionnelle et une largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.....	123
Figure 0-35:	Impacts environnementaux annuels totaux des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre une largeur de tranchée conventionnelle et une largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM III A a été modélisé.....	124
Figure 0-36:	Consommation d'énergie cumulée annuelle des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre la largeur de tranchée conventionnelle et la largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.	125
Figure 0-37:	Consommation d'énergie cumulée annuelle des quantités de matériaux remplaçables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre la largeur de tranchée conventionnelle et la largeur de tranchée réduite exclusivement pour le sol fluide. Le CEM III A a été modélisé pour le béton d'enrobage et le sol fluide.....	125



Liste des tableaux

Tableau 3-1: Données utilisées pour le calcul de la moyenne de la formulation type de sol fluide.	17
Tableau 3-2: Inventaire de l'écobilan – Approvisionnement en composants de sol fluide (A1).	21
Tableau 3-3: Inventaire de l'écobilan – Transport des composants du sol fluide vers le site de production de sol fluide (A2).....	22
Tableau 3-4: Inventaire de l'écobilan – Production de sol fluide (A3).....	23
Tableau 3-5: Inventaire de l'écobilan – Transport du sol fluide vers le chantier (A4).....	24
Tableau 3-6: Inventaire de l'écobilan – Mise en œuvre du sol fluide (A5).	24
Tableau 3-7: Inventaire de l'écobilan – Démantèlement du sol fluide (C1).	25
Tableau 3-8: Inventaire de l'écobilan – Transport du chantier vers le site d'élimination ou de valorisation (C2).	26
Tableau 3-9: Inventaire de l'écobilan – Élimination du sol fluide (C3, C4).	26
Tableau 3-10: Aperçu des scénarios d'élimination du sol fluide examinés dans l'analyse de sensibilité.	28
Tableau 3-11: Aperçu des impacts environnementaux de la formulation moyenne du sol fluide par m ³ sol fluide, répartis par phases du cycle de vie.....	28
Tableau 3-12: Résultats de l'analyse de sensibilité concernant la variation de la teneur en ciment dans les 12 formulations de sol fluide prises en compte.....	33
Tableau 3-13: Résultats de l'analyse de sensibilité concernant la valorisation des résidus de criblage lors de la production de sol fluide.....	34
Tableau 3-14: Résultats de l'analyse de sensibilité concernant les distances de transport en amont entre le chantier et le site de production de sol fluide.....	35
Tableau 3-15: Résultats de l'analyse de sensibilité pour différents scénarios d'élimination du sol fluide.	36
Tableau 4-1: Formulations des variantes de sol fluide avec différentes teneurs en charbon végétal. .	37
Tableau 4-2: Impacts environnementaux de la production de charbon végétal [21].	38
Tableau 4-3: Aperçu des impacts environnementaux des variantes de sol fluide étudiées, avec et sans charbon végétal, par m ³ de remblayage de tranchée.	40
Tableau 5-1: Formulation des matériaux de remblayage étudiés.	47
Tableau 5-2: Aperçu des impacts environnementaux des variantes de remblayage étudiées par m ³ de remblayage de tranchée.....	49
Tableau 5-3: Résumé des résultats de l'écobilan comparatif. Sont représentées les différences en pourcentage des variantes de remblayage examinées par rapport à la variante de référence «grave avec béton d'enrobage».	54
Tableau 5-4: Coûts sur le cycle de vie par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4), estimés à partir d'un modèle.....	60
Tableau 5-5: Coûts sur le cycle de vie basés sur la pratique par m ³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4).....	61
Tableau 6-1: Comparaison des concentrations en métaux lourds du charbon végétal et de son utilisation dans le sol fluide avec les valeurs limites des décharges de type B.	64

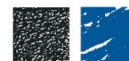
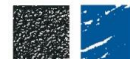


Tableau 7-1: Matrice des domaines d'application et de l'adéquation des formulations de sol fluide, sur la base d'une analyse documentaire [20], [51]. La couleur « verte » désigne les applications établies. La couleur «orange» nécessite des justifications spécifiques au projet. La couleur «rouge» indique les applications pour lesquelles les données sont insuffisantes ou qui présentent un risque accru.	73
Tableau 0-1: Évaluation des impacts – Approvisionnement en composants de sol fluide (A1).....	97
Tableau 0-2: Estimation des impacts – Transport des composants du sol fluide vers le site de production de sol fluide (A2).....	97
Tableau 0-3: Évaluation des impacts – Production de sol fluide (A3).	97
Tableau 0-4: Évaluation des impacts – Transport du sol fluide vers le chantier (A4).	98
Tableau 0-5: Estimation des impacts – Mise en œuvre du sol fluide (A5).	98
Tableau 0-6: Estimation des impacts – Démantèlement du sol fluide (C1).....	98
Tableau 0-7: Estimation des impacts – Transport du chantier vers le site d'élimination ou de valorisation (C2).	99
Tableau 0-8: Estimation des impacts – Élimination du sol fluide(C3, C4).	99
Tableau 0-9: Hypothèses relatives à la gestion des déchets pour la grave et le béton [35].	113
Tableau 0-10: Substitutions de matériaux prises en compte dans l'estimation du potentiel.	114
Tableau 0-11: Géométries de tranchées pour la modélisation des réseaux d'infrastructure [35].....	114
Tableau 0-12: Taux de réfection pour l'estimation des quantités annuelles de déchets de construction [35]	115
Tableau 0-13: Géométries de tranchée réduites lors de l'utilisation de sol fluide.....	116
Tableau 0-14: Quantités de matériaux de gravier, de sable et de béton pouvant être remplacées par de la boue, en tenant compte de la réfection en état et de l'extension du réseau (t/a).	119
Tableau 0-15: Potentiels de réduction en pourcentage de la formulation moyenne de sol fluide.	126



Appendice

Appendice A. Principes méthodologiques de l'écobilan

Dans cette étude, tous les écobilans ont été réalisés conformément aux normes ISO 14040:2006 [5] et ISO 14044:2006 [6]. Selon ces normes, un écobilan comprend les étapes suivantes:

1. Objectif et conditions-cadres

Au cours de cette étape, les objectifs de l'étude sont fixés et les hypothèses essentielles suivantes pour l'analyse sont définies:

- Sélection des phases considérées dans le cycle de vie d'un ouvrage (fabrication, construction, utilisation, etc.),
- Sélection des processus analysés au cours de ces phases (par exemple, l'élimination),
- Définition de la durée de vie de l'ouvrage,
- Définition des exigences fonctionnelles auxquelles l'ouvrage doit satisfaire et qui doivent être remplies par toutes les variantes considérées,
- Sélection des modèles d'impact utilisés pour l'évaluation des variantes (par exemple, les unités de charge écologique).

La présente étude s'appuie sur la norme EN 15643-5 [7] pour la définition du système et la description de l'unité fonctionnelle, ainsi que sur les données d'écobilan dans le secteur de la construction [1] pour la sélection des modèles d'impact.

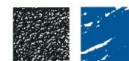
2. Inventaire de l'écobilan

Au cours de cette étape, les émissions et la consommation ou l'utilisation des ressources pour l'ensemble des processus des systèmes étudiés sont recensées ou estimées. Les bases utilisées sont les suivantes:

- Les besoins en matériaux, les quantités de déchets, l'utilisation des sols, les heures-machine des processus de construction, les émissions générées par le processus de construction (par exemple par les engins de chantier) et les prestations de transport prévues dans les variantes considérées du projet de construction.
- Données relatives aux processus d'utilisation, d'entretien, de réparation et de démantèlement des variantes de l'ouvrage considérées.
- Données relatives aux processus d'extraction des matières premières et de production d'énergie, de fabrication, d'élimination ou de transport, fournis par des tiers.

Dans l'inventaire de l'écobilan, les quantités d'émissions cumulées et d'utilisation des ressources sont calculées sur l'ensemble du cycle de vie du système produit/processus. Pour ce faire, différentes hypothèses sont formulées, par exemple concernant l'allocation des émissions en cas de coproduction.

La présente étude s'appuie sur la base de données d'écobilans de l'administration fédérale (OFEV:2025) [21].



3. Évaluation des impacts

L'évaluation des impacts décrit l'ampleur de l'impact environnemental des différentes variantes. Conformément aux normes ISO 14040/44 [5], [6] ou EN 15643-6 [7], on se base sur une série de problèmes environnementaux généralement reconnus, tels que l'effet de serre ou la destruction de la couche d'ozone, et on montre, à l'aide de modèles d'impact, dans quelle mesure les variantes étudiées contribuent à ces problèmes environnementaux. On obtient ainsi une évaluation multidimensionnelle et, en fin de compte, c'est au maître d'ouvrage de décider à quel problème environnemental il accorde la plus grande importance. Parallèlement, une approche d'évaluation alternative est promue en Suisse depuis de nombreuses années, qui aboutit à un indice global pour toutes les pressions sur l'environnement: la «méthode de la saturation écologique» avec l'unité de mesure «unités de charge écologique (UBP = UCE)» (voir figure 0-1) [10]. Le critère d'évaluation est ici le degré actuel de réalisation des objectifs de la politique environnementale nationale. Au niveau international, on désigne généralement cette approche par le terme «distance to target»: un problème environnemental est d'autant plus grave qu'un pays est éloigné de la réalisation de ses objectifs environnementaux liés à ce problème. Cette approche n'est toutefois pas conforme à la norme ISO 14040/44, car aucun indice global ne peut être utilisé dans l'écobilans pour de telles comparaisons. En Suisse, la méthode de la méthode de la saturation écologique est toutefois très bien établie et acceptée, en particulier par les décideurs [11], [52] et [53].

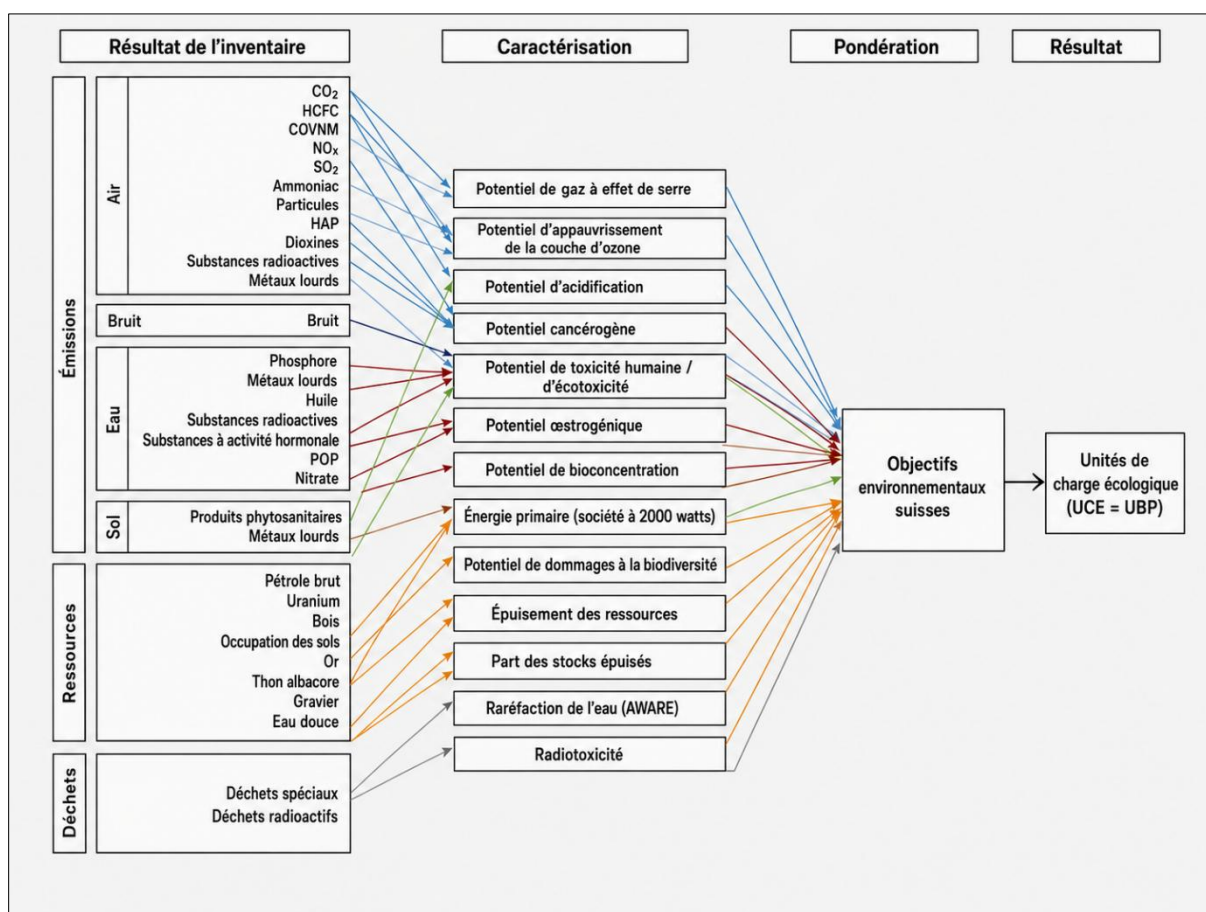
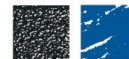


Figure 0-1: Déroulement de l'évaluation dans le cadre de l'écobilan à l'aide de la méthode UBP. Schéma de base reliant l'inventaire de l'écobilan aux modèles d'impact (caractérisation) et à l'indice global de méthode de la saturation écologique (pondération et résultat). Représentation propre d'après les Écofacteurs suisses 2021 [10].



4. Analyse des résultats et interprétation

Au cours de la dernière étape de l'application de la méthode, les résultats des évaluations des impacts des variantes considérées sont évalués et interprétés en fonction des objectifs de l'étude. Au cours de l'analyse, cela peut conduire à adapter les hypothèses définies lors de la première étape (par exemple, les frontières du système ou le choix des modèles d'impact). La pertinence de l'analyse s'en trouve ainsi progressivement améliorée dans le cadre d'un processus itératif.

L'analyse des incertitudes constitue une partie importante de l'analyse des résultats et de l'interprétation. On distingue ici les incertitudes liées aux données, qui sont analysées à l'aide de méthodes statistiques, et les incertitudes liées aux modèles, que l'on peut estimer par des analyses de scénarios. Dans la présente étude, ces deux méthodes sont utilisées.

La figure 0-2 résume une nouvelle fois les quatre étapes d'une analyse d'un écobilan selon la norme ISO 14 040:2006 [5].

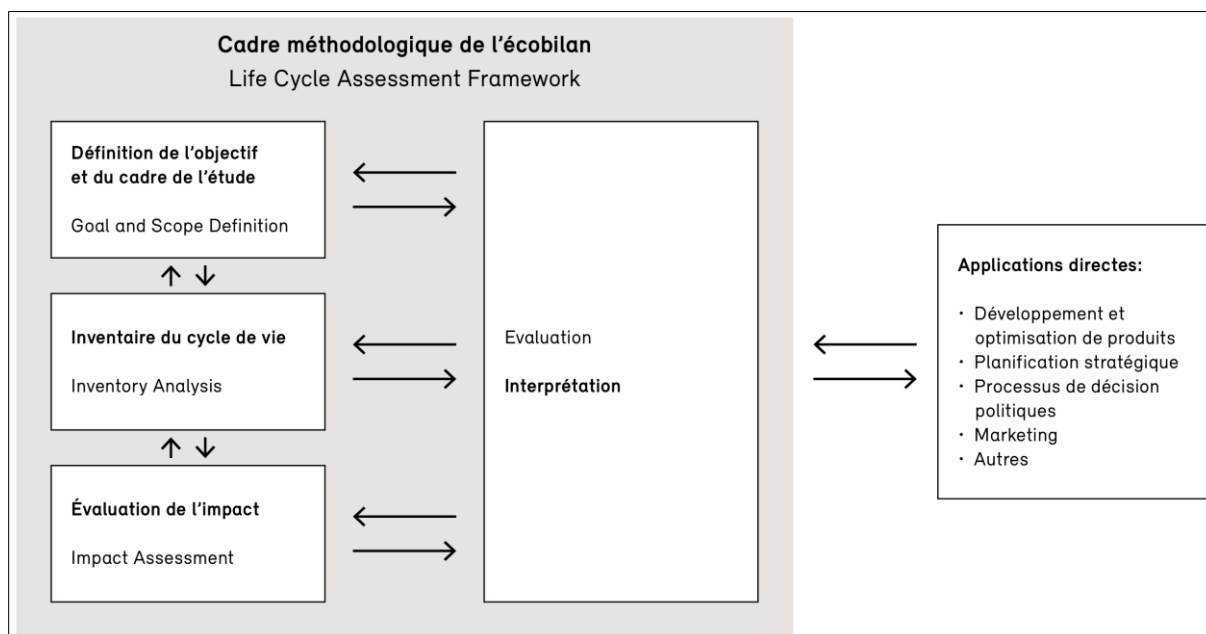


Figure 0-2: Étapes d'un écobilan selon la norme ISO 14 040 et suivantes[5], [52], [53]. La procédure entre les différentes étapes est généralement itérative. Représentation propre d'après les Écofacteurs suisses 2021 [10].



Appendice B. Évaluation des impacts de la formulation moyenne de sol fluide

Les tableaux suivants (tableau 0-1 au tableau 0-8) présentent les résultats de l'évaluation des impacts pour la formulation moyenne de sol fluide, évalués selon les émissions de gaz à effet de serre (GES), les unités de charge écologique (UBP) et la consommation d'énergie cumulée (CEC).

Tableau 0-1: Évaluation des impacts – Approvisionnement en composants de sol fluide (A1).

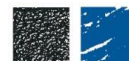
Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]
Matériaux d'excavation	0.428	679	1.632	1.599	0.033
Matériaux d'excavation destinés à la production de sol fluide	0	0	0	0	0
Ciment CEM I 42.5 R	31.255	37'061	34.763	30.791	3.972
Bentonite	0.924	1'650	3 832	3 622	0,209
Eau	0.057	210	0,625	0,462	0,163
Chaux	0.013	34	0,102	0,075	0,028

Tableau 0-2: Estimation des impacts – Transport des composants du sol fluide vers le site de production de sol fluide (A2).

Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]
Matériaux d'excavation, ciment et chaux	3.26	6'092	14.79	13.86	0.93
Bentonite	2.12	3'997	9.84	8.99	0.85

Tableau 0-3: Évaluation des impacts – Production de sol fluide (A3).

Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]
Crible mobile avec séparateur à godets	0.013	28	0.039	0.033	0.005



Diesel pour crible avec séparateur à pales	0.170	263	0.647	0.635	0,012
Excédent de matière en vrac	0	0	0	0	0
Silos	0.019	40	0.055	0.048	0.008
Convoyeur	0.021	41	0.064	0.056	0.008
Camion malaxeur	0.062	134	0.185	0.160	0.025
Diesel pour bétonnière automotrice	1.507	2'339	5.752	5.643	0.109
Chargeuse sur pneus	0.049	87	0.203	0.179	0.024
Diesel pour chargeuse sur pneus	0.475	737	1.813	1.778	0.034
Électricité	0.045	219	1.241	0.943	0.298
Site de production de sol fluide	0.154	341	0.608	0.541	0.067

Tableau 0-4: Évaluation des impacts – Transport du sol fluide vers le chantier (A4).

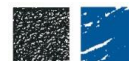
Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]
Camion malaxeur	3.111	5'818	14.128	13.239	0.889

Tableau 0-5: Estimation des impacts – Mise en œuvre du sol fluide (A5).

Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]
Camion malaxeur et tuyau	0.807	1'252	3.080	3.021	0.059

Tableau 0-6: Estimation des impacts – Démantèlement du sol fluide (C1).

Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]



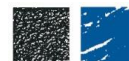
Pelle sur pneus et godet	2.495	3'873	9.524	9.343	0.181
--------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Tableau 0-7: Estimation des impacts – Transport du chantier vers le site d'élimination ou de valorisation (C2).

Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]
Transport vers la décharge, vers un autre périmètre de chantier et vers le dépôt intermédiaire	6.650	12.437	30.202	28.301	1.900

Tableau 0-8: Estimation des impacts – Élimination du sol fluide(C3, C4).

Indicateur environnemental	GES	UBP	CEC (total)	CEC (non renouvelable)	CEC (renouvelable)
Unité	[kg CO ₂ -eq/m ³]	[UBP/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]	[kWh Oil-eq/m ³]
Mise en décharge des matériaux remblayage démantelés	0.990	43'254	4.630	4.320	0.310
Valorisation sur un périmètre de construction externe	0	0	0	0	0
Valorisation sur place	0	0	0	0	0



Appendice C. Figures supplémentaires

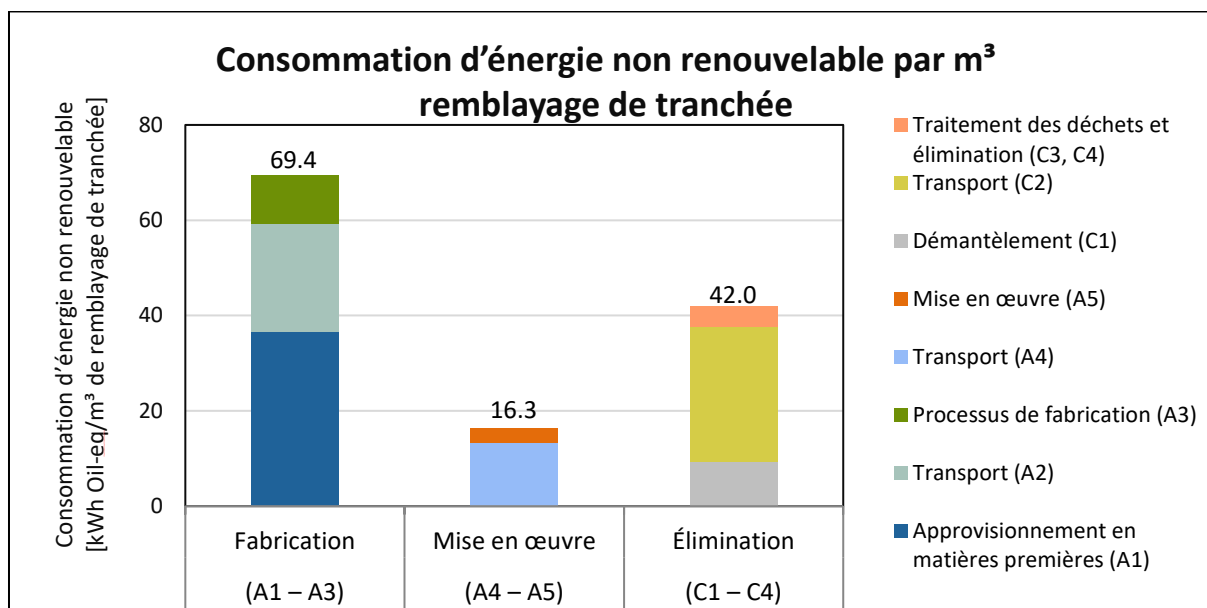


Figure 0-3: Consommation d'énergie non renouvelable par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.

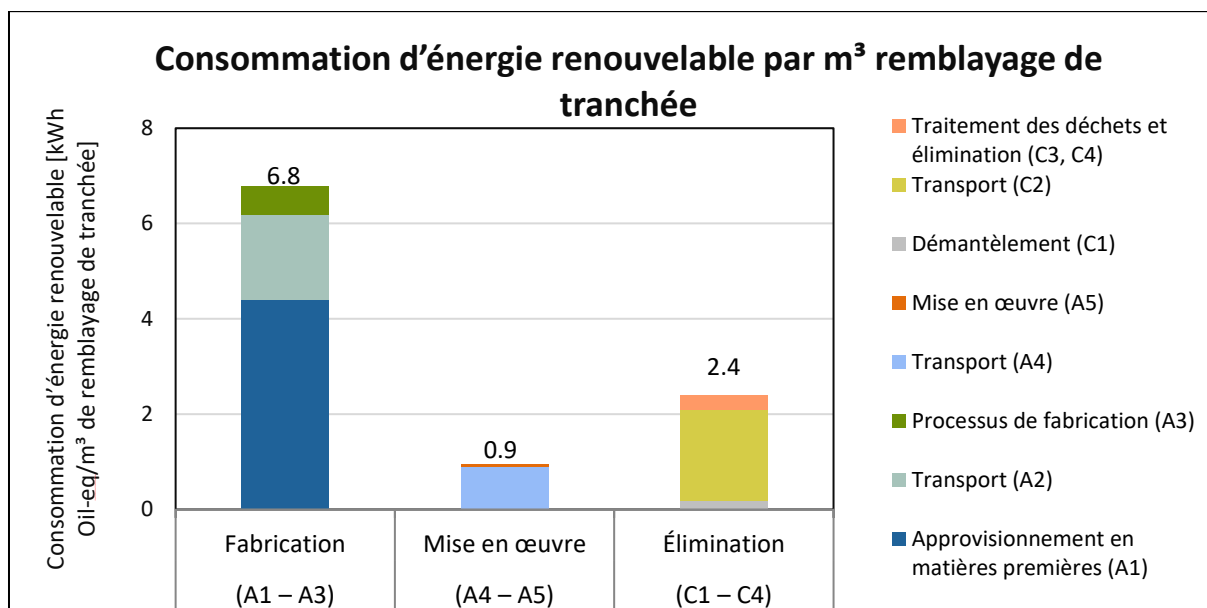


Figure 0-4: Consommation d'énergie renouvelable par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide.

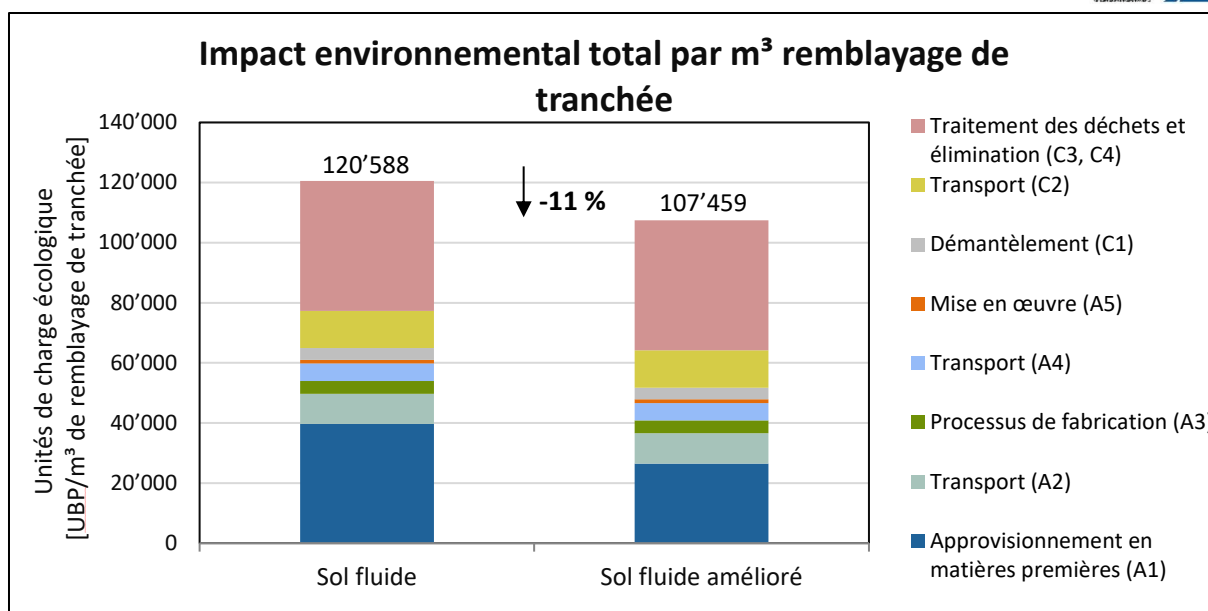
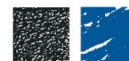


Figure 0-5: Impact environnemental total du sol fluide conventionnel et amélioré (CEM I 42.5 R vs CEM III A).

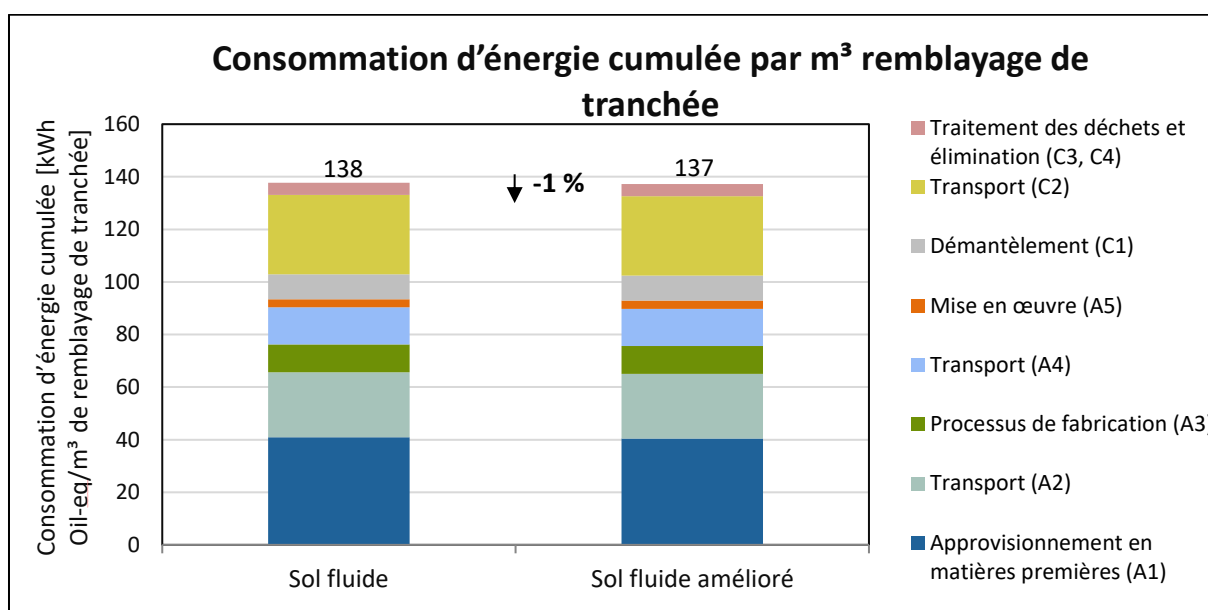


Figure 0-6: Consommation énergétique cumulée du béton fluide classique et amélioré (CEM I 42,5 R vs CEM III A).

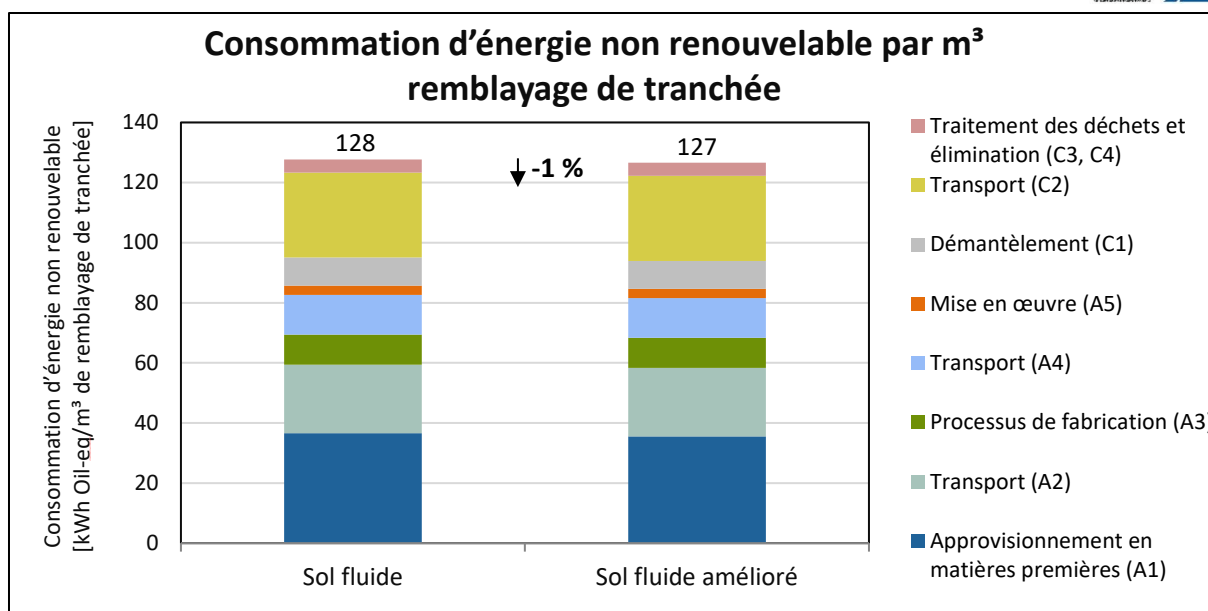
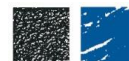


Figure 0-7: Consommation d'énergie non renouvelable des sols fluides traditionnels et améliorés (CEM I 42,5 R vs CEM III A).

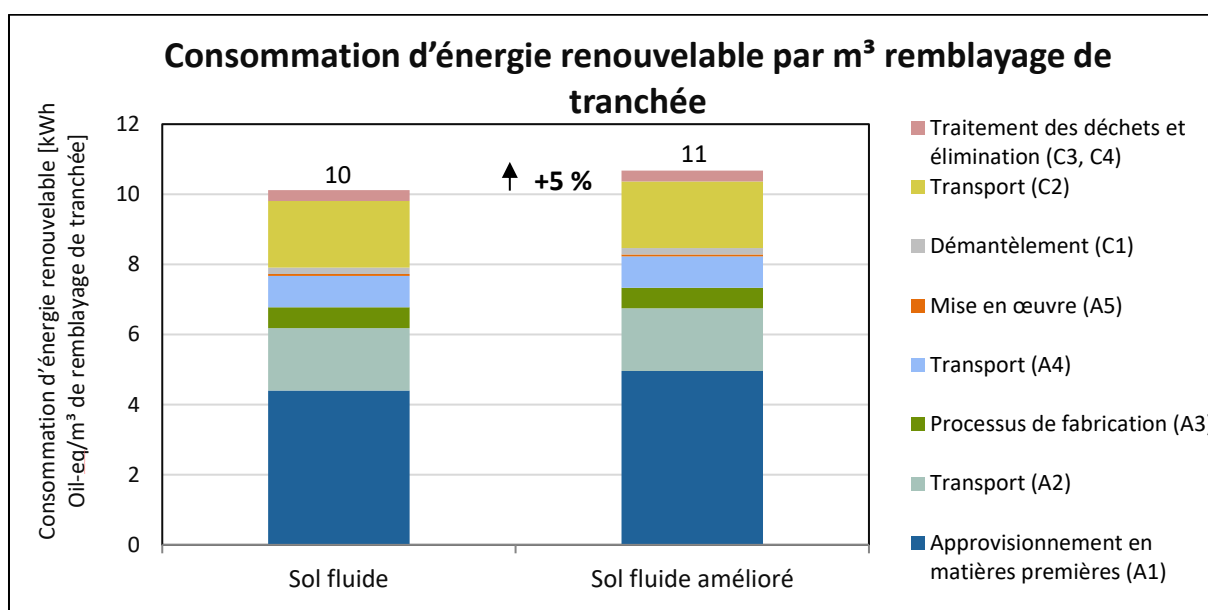


Figure 0-8: Consommation d'énergie renouvelable des sols fluides traditionnels et améliorés (CEM I 42,5 R vs CEM III A).

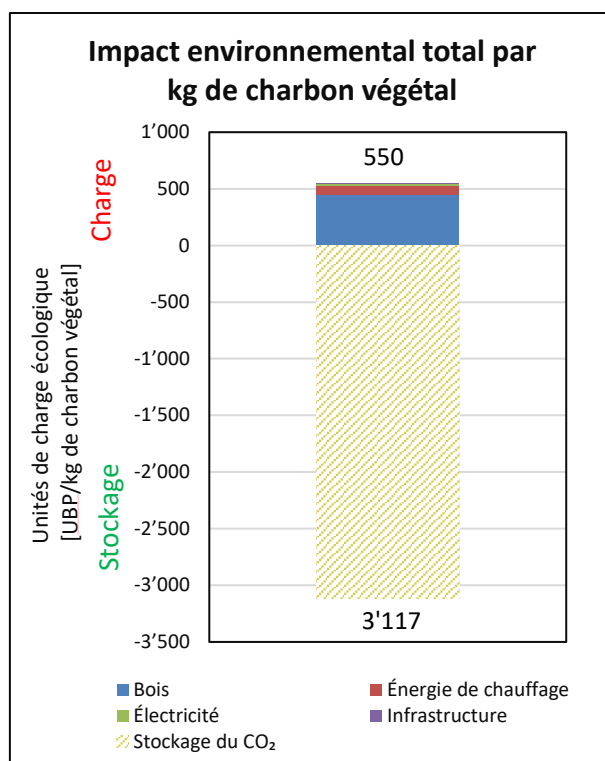
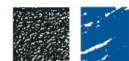


Figure 0-9: Impact environnemental global de la production de charbon végétal et stockage du carbone présenté séparément (par kg de charbon végétal).

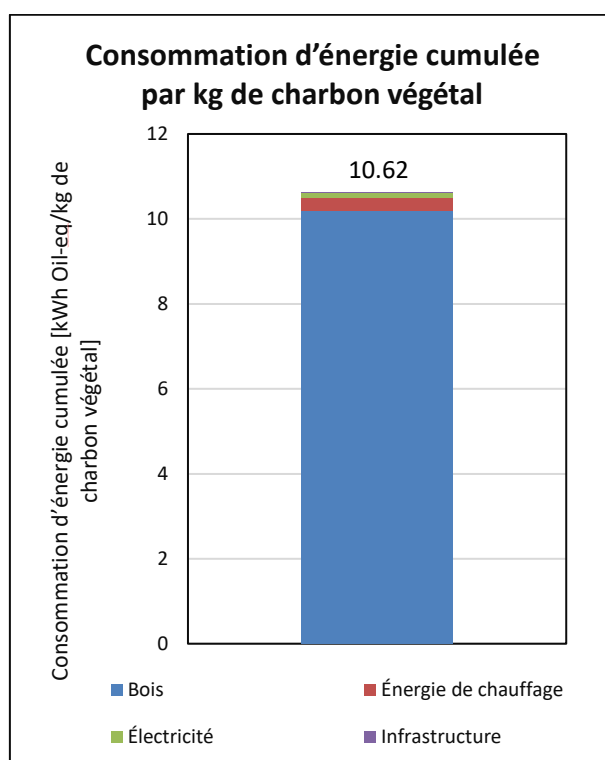


Figure 0-10: Consommation énergétique cumulée de la production de charbon végétal (par kg de charbon végétal).

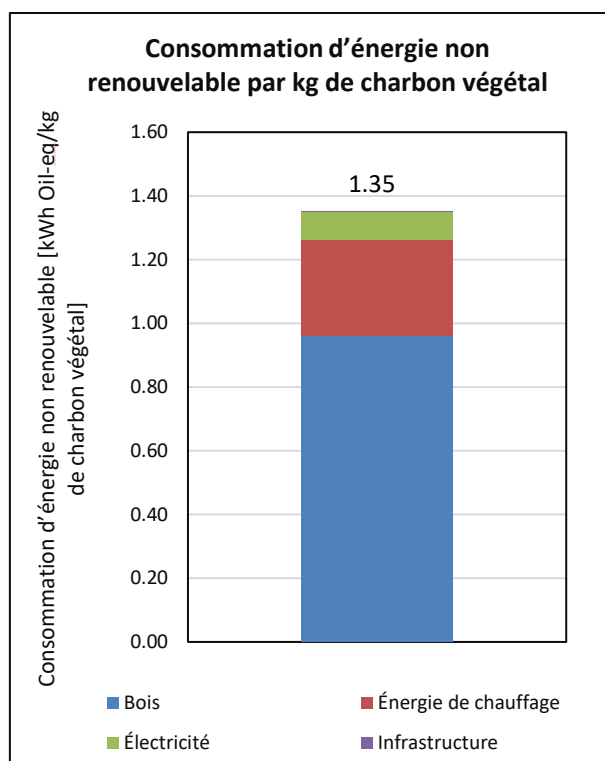
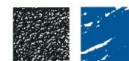


Figure 0-11: Consommation d'énergie non renouvelable pour la production de charbon végétal (par kg de charbon végétal).

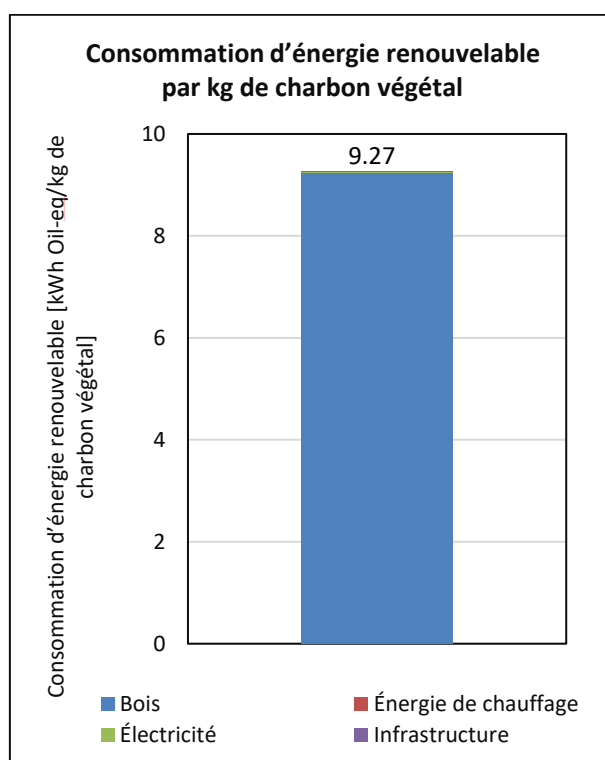


Figure 0-12: Consommation d'énergie renouvelable pour la production de charbon végétal (par kg de charbon végétal).

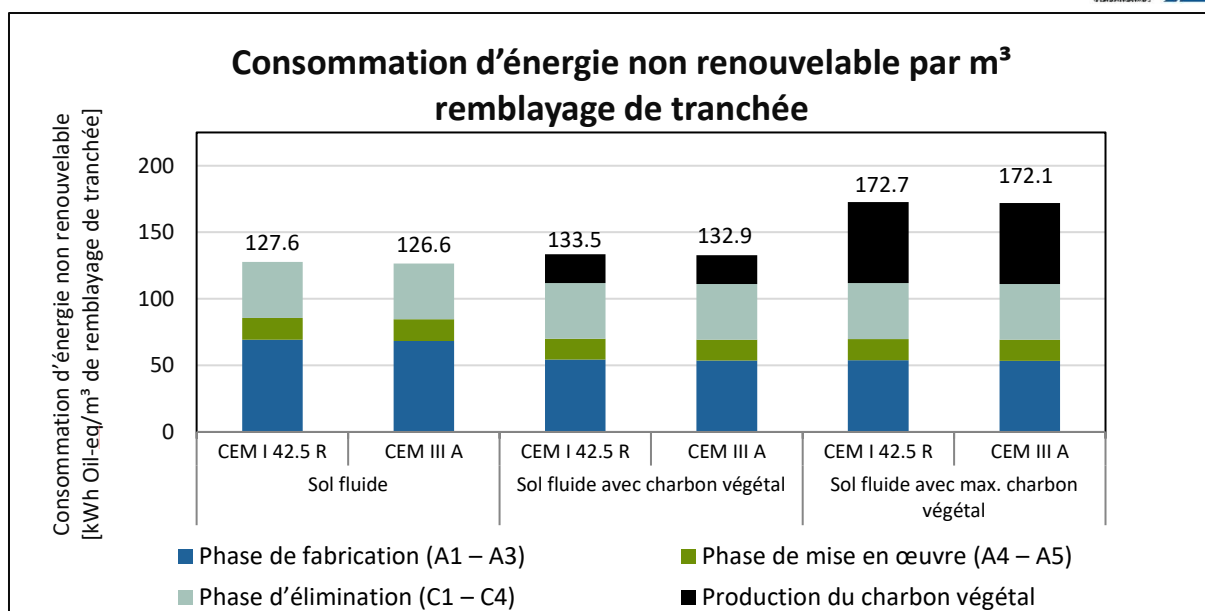
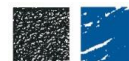


Figure 0-13: Consommation d'énergie non renouvelable par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide. Comparaison entre la formulation moyenne du sol fluide, la variante améliorée et deux variantes avec du charbon végétal.

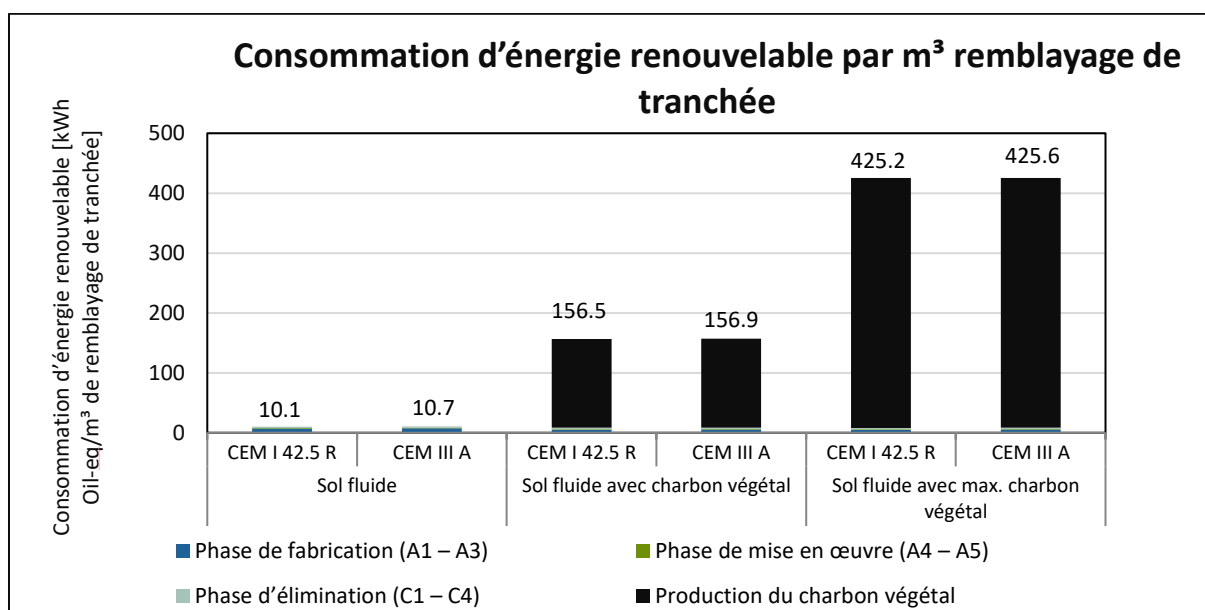
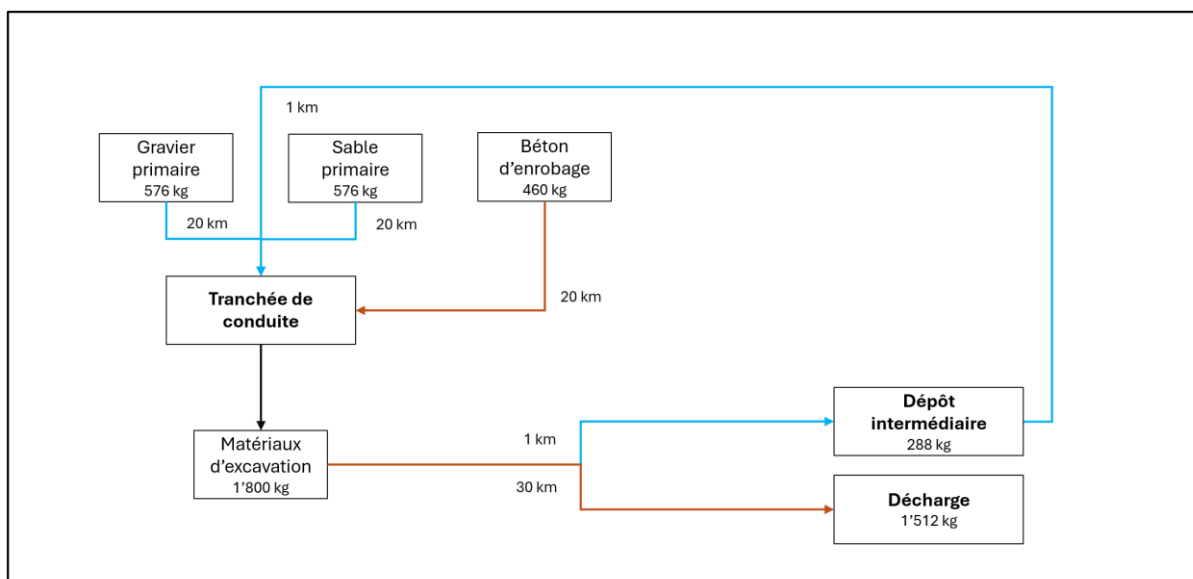


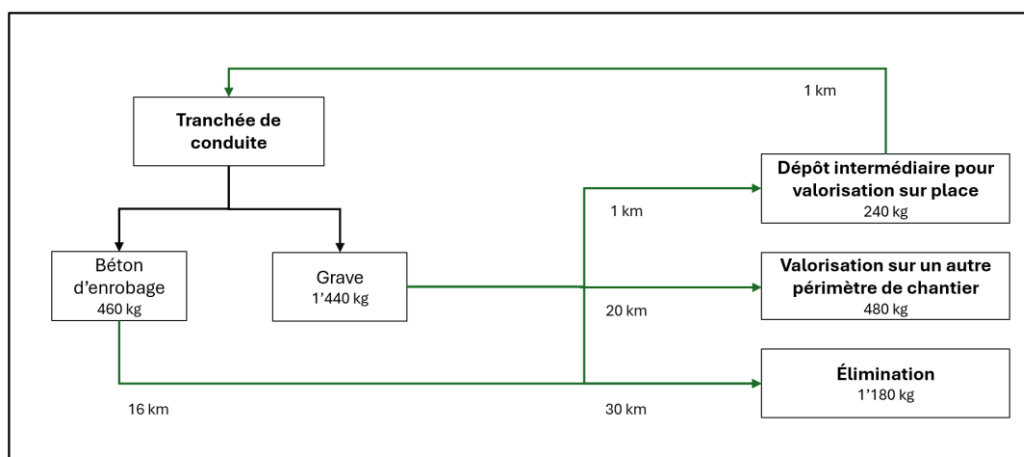
Figure 0-14: Consommation d'énergie renouvelable par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec du sol fluide. Comparaison entre la formulation moyenne du sol fluide, la variante améliorée et deux variantes avec du charbon végétal.



Transport (A2)

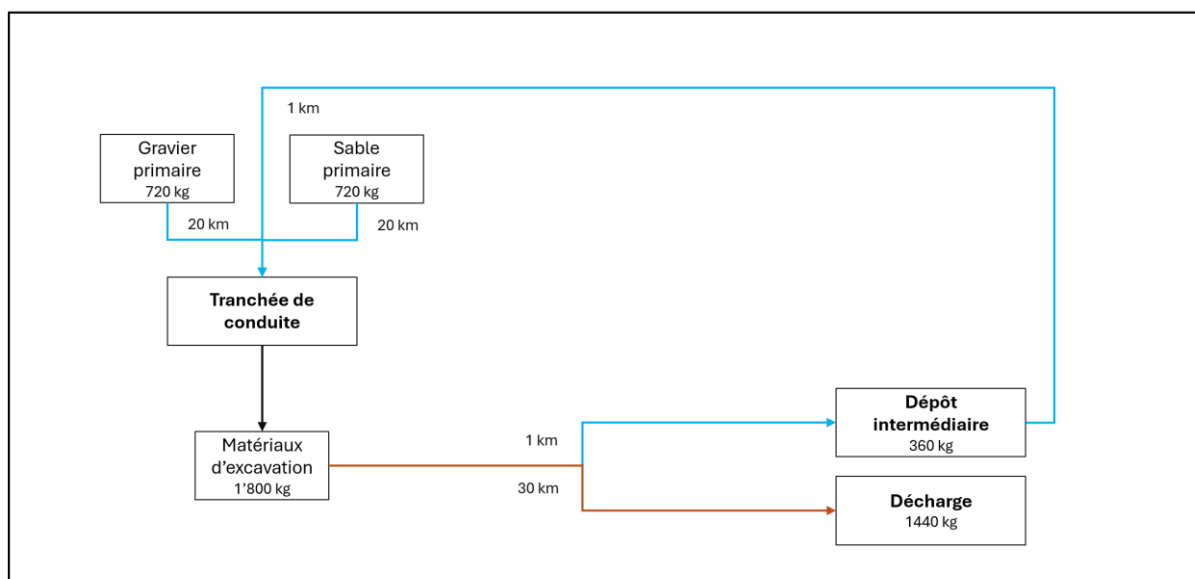
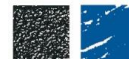
Transport (A4)

Figure 0-15: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave avec béton d'enrobage» (A1 – A5).



Transport (C2)

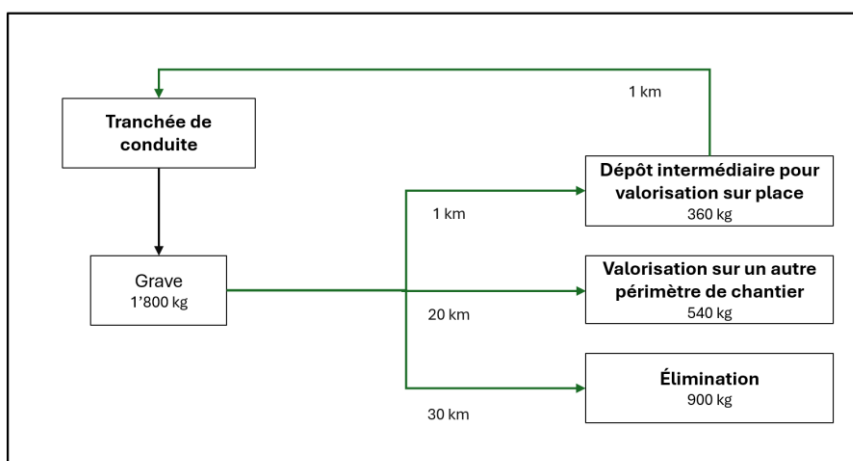
Figure 0-16: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave avec béton d'enrobage» (C1 – C4).



Transport (A2)

Transport (A4)

Figure 0-17: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave sans béton d'enrobage» (A1 – A5).



Transport (C2)

Figure 0-18: Analyse des flux de matériaux et distances de transport pour la méthode de construction conventionnelle «grave sans béton d'enrobage» (C1 – C4).

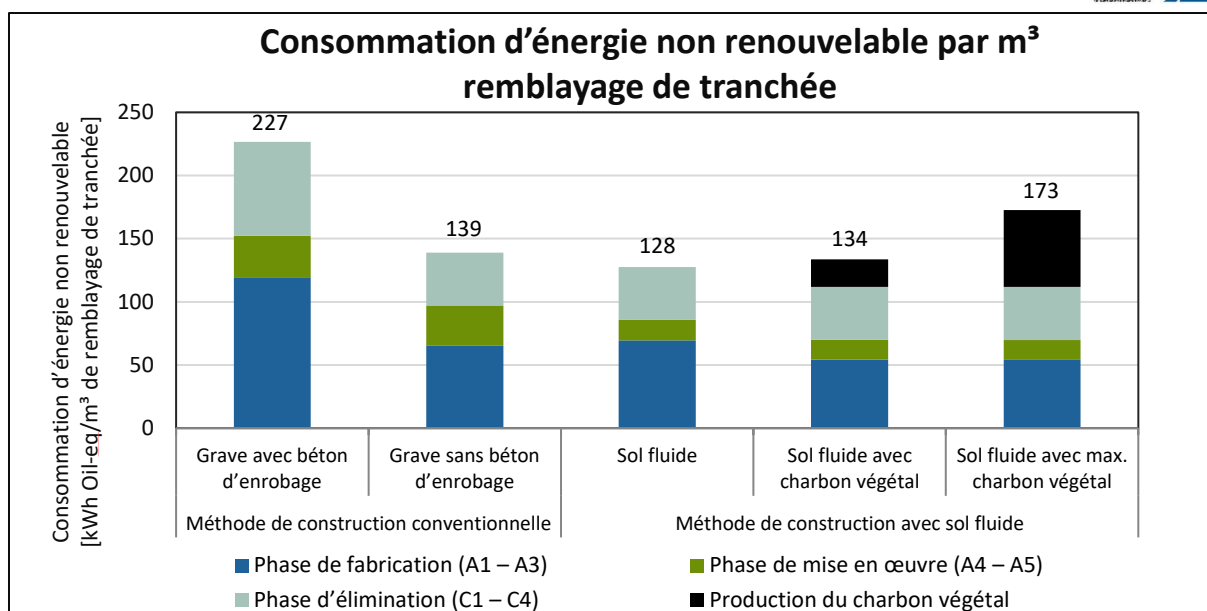
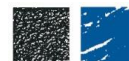


Figure 0-19: Consommation d'énergie non renouvelable par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage.

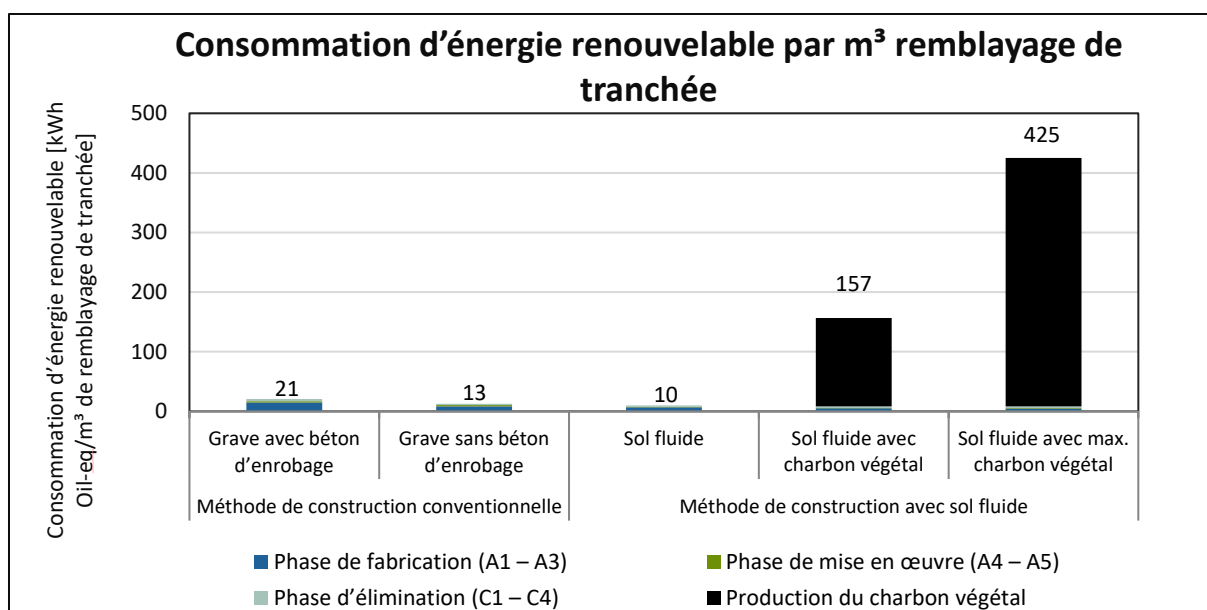


Figure 0-20: Consommation d'énergie renouvelable par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage.

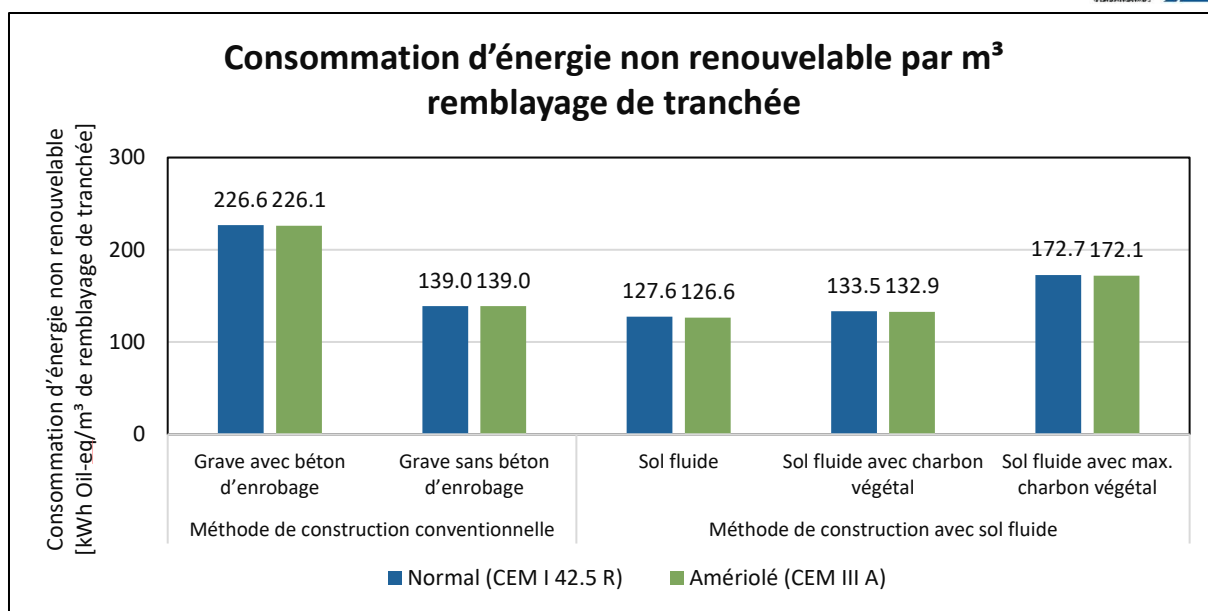
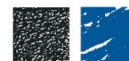


Figure 0-21: Comparaison de la consommation d'énergie non renouvelable par m³ de remblai de tranchée en cas d'utilisation de CEM I ou de CEM III A.

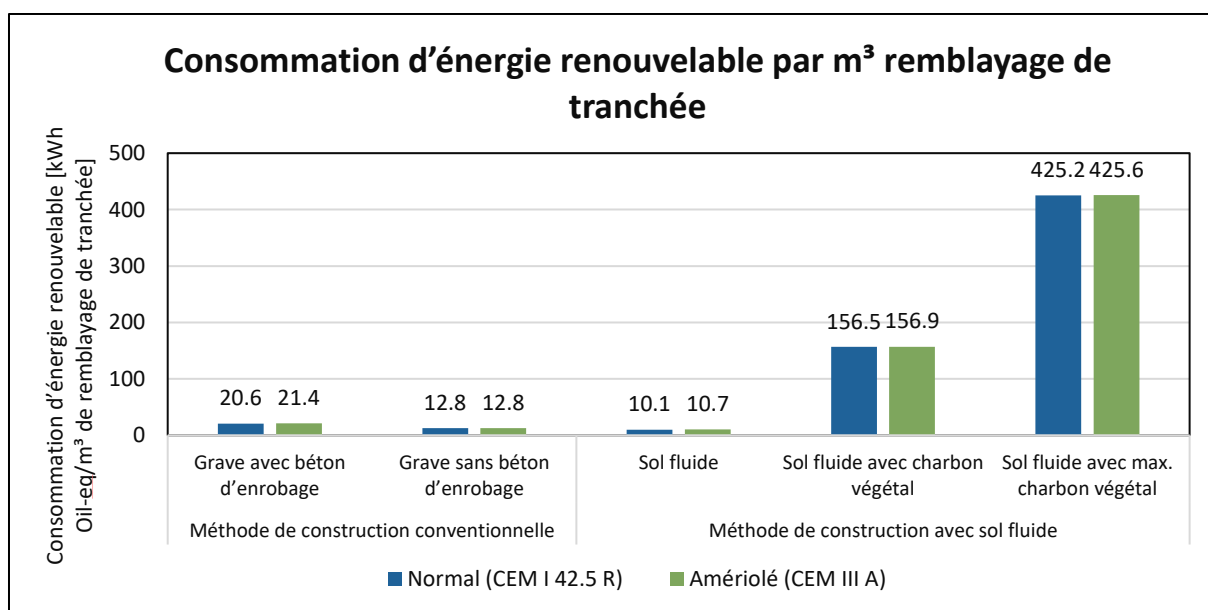


Figure 0-22: Comparaison de la quantité d'énergie renouvelable nécessaire par m³ de remblayage de tranchée en cas d'utilisation de CEM I ou de CEM III A.

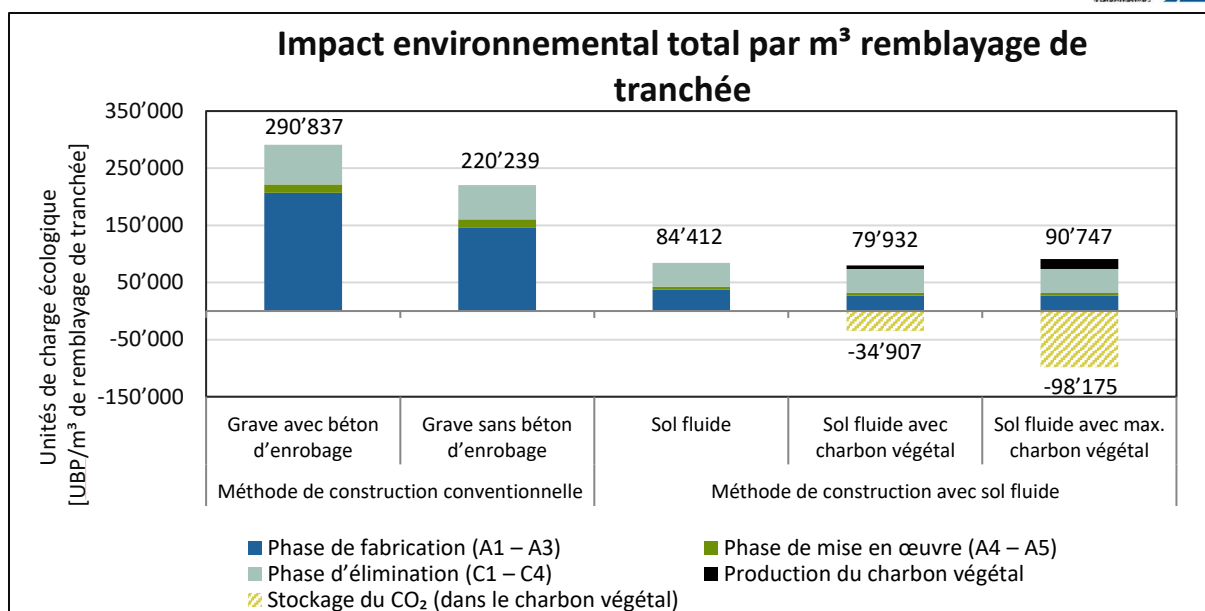
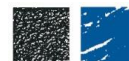


Figure 0-23: Impact environnemental total par m³ de remblayage de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblayage, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide.

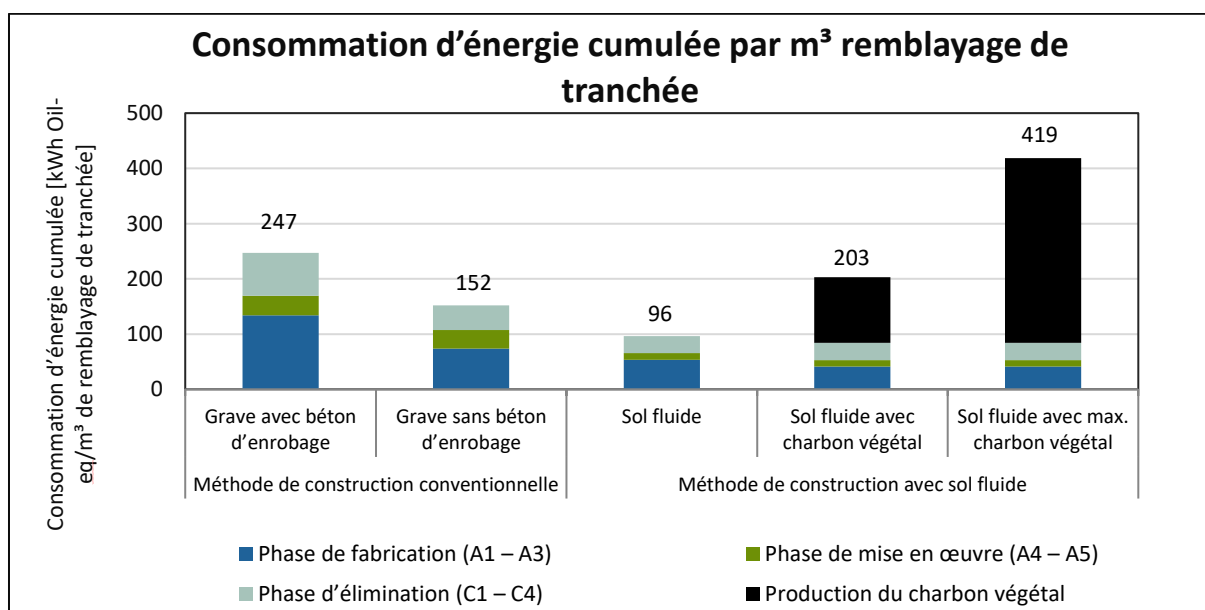


Figure 0-24: Consommation d'énergie cumulée par m³ de remblai de tranchée (A1 – A5, C1 – C4) avec différents matériaux de remblai, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide.

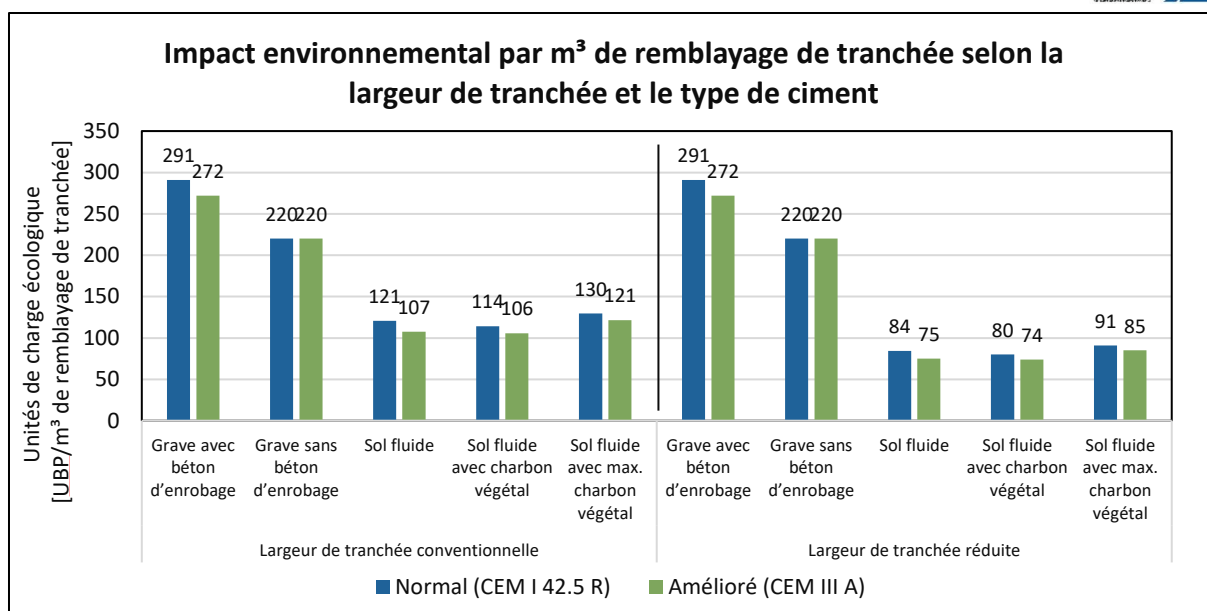
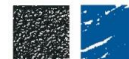


Figure 0-25: Comparaison des impacts environnementaux globaux par m³ de remblayage de tranchée, en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide ainsi que pour l'utilisation de CEM I 42,5 R ou CEM III A.

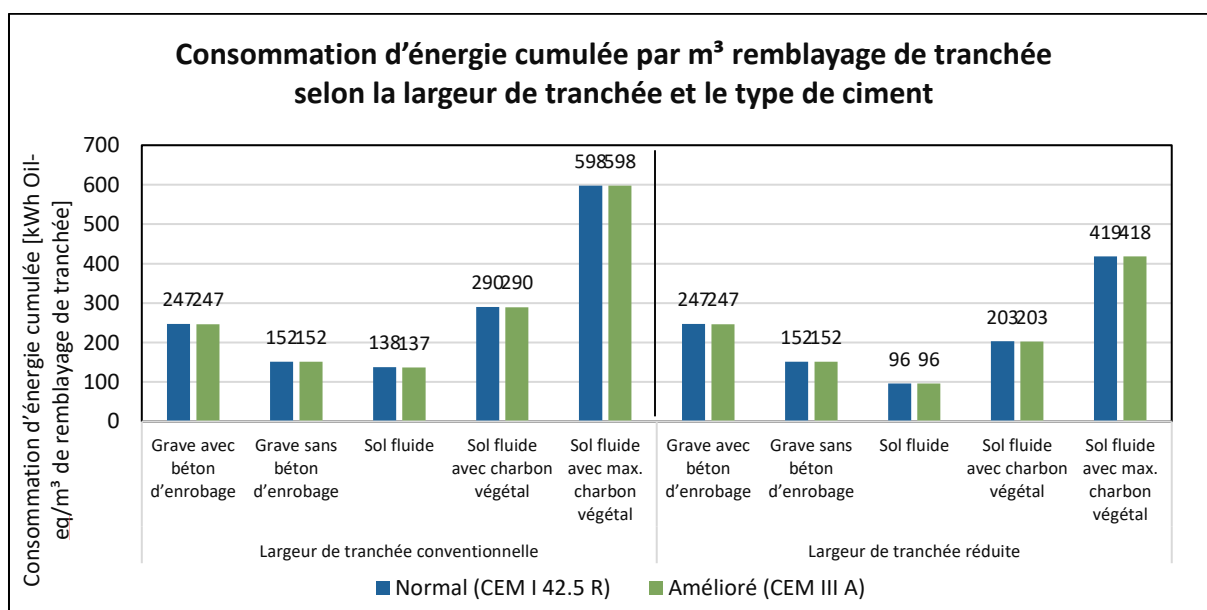


Figure 0-26: Comparaison de la dépense énergétique cumulée par m³ de remblai de tranchée en tenant compte d'une largeur de tranchée réduite pour les variantes à sol fluide ainsi que pour l'utilisation de CEM I 42.5 R ou CEM III A.



Appendice D. Estimation du potentiel du sol fluide dans le génie civil

Méthodologie pour l'estimation du potentiel

L'estimation du potentiel écologique du sol fluide à l'échelle nationale repose sur l'étude «Déchets de construction en Suisse – Génie civil, mise à jour 2015» [35]. Celle-ci a permis d'estimer les stocks de matériaux minéraux et les quantités de déchets de construction dans le génie civil pour la Suisse et les différents cantons pour l'année 2015. Les réseaux d'infrastructure d'approvisionnement en eau, d'évacuation des eaux usées, d'approvisionnement en gaz et d'approvisionnement en électricité ont été représentés à l'aide des longueurs de conduites et des profils de section transversale typiques pour l'année 2015.

Les longueurs de conduites ont été différenciées, selon le réseau, par type de conduite (p. ex. conduites d'adduction, principales, de distribution et de raccordement) ou par niveau de réseau (p. ex. haute, moyenne et basse tension dans le réseau électrique). Sur la base de ces longueurs de conduites et des profils de section correspondants, des stocks de matériaux ont été calculés pour la grave et le béton. Les quantités annuelles de déchets de construction sont ensuite calculées à partir des taux de réfection spécifiques à chaque réseau. Ces flux de matériaux constituent la base de l'estimation de la quantité de matériaux de remblayage produite chaque année dans le génie civil et pouvant potentiellement être remplacée par du sol fluide.

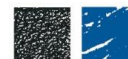
Pour la présente étude, le modèle existant a été actualisé afin de déterminer un stock de matériaux pour l'année de référence 2025. À cette fin, les chiffres de population cantonaux ont notamment été mis à jour au 31 décembre 2024 et utilisés comme base pour l'extrapolation.

Étant donné que le potentiel écologique du sol fluide résulte notamment de la substitution des matériaux primaires et que ce potentiel pourrait être encore accru pour certaines variantes de sol fluide, les flux de matériaux ont été analysés dans cette étude séparément pour les groupes de matériaux concernés, à savoir la grave et le béton. Contrairement aux scénarios comparatifs modélisés au chapitre 5, aucune répartition fixe des volumes entre la grave et le béton d'enrobage n'a été supposée ici, mais les flux de matériaux ont été considérés individuellement. Cela permet de déduire de manière transparente les quantités de substitution théoriquement disponibles pour le sol fluide à partir des déchets de construction minéraux produits chaque année.

Le potentiel du sol fluide dans le génie civil résulte de deux composantes:

- La part des déchets de construction qui n'est pas valorisée sur place et qui doit donc être éliminée, puis remplacée par de nouveaux matériaux de remblayage lors de l'étape suivante, ainsi que
- Les besoins supplémentaires en matériaux liés à l'extension du réseau (croissance du réseau), pour lesquels de nouveaux matériaux de remblayage sont également utilisés.

La part des déchets de chantier valorisés directement sur place n'a pas été prise en compte dans l'estimation du potentiel. Il s'agit de la grave valorisée directement sur place (voir tableau 0-9). En effet, la valorisation immédiate sur place s'accompagne généralement d'un faible impact environnemental supplémentaire, principalement en raison de l'évitement de l'utilisation de matières premières primaires et de transports supplémentaires. Si ce matériau était remplacé par un sol fluide classique, il n'y aurait aucun avantage écologique, mais au contraire une charge environnementale plus importante. Il faut en outre tenir compte du fait que l'estimation du potentiel repose sur une analyse à l'échelle nationale. La question de savoir si la petite part de grave qui n'est pas valorisée directement sur place dans le cadre de certains projets peut effectivement être transformée en sol fluide et réutilisée dans le même projet dépend des conditions propres à chaque projet. Étant donné que cette étude a principalement comparé les méthodes de construction conventionnelles au sol fluide traditionnelle et que les variantes



alternatives servent à illustrer l'étendue du potentiel, l'estimation du potentiel se concentre sur les déchets de construction minéraux qui ne sont pas déjà valorisés sur place.

Système considéré

En principe, le système considéré comprend deux sous-processus pour les matériaux issus du démantèlement: la valorisation directe sur place et l'élimination. La figure 0-27 illustre le système considéré. La limite du système commence après le démantèlement des matériaux.

Dans le cas de la valorisation directe sur place, les matériaux sont entreposés temporairement sur le chantier ou à proximité, réutilisés, puis éliminés seulement à la fin de la prochaine durée d'utilisation. Ce processus est représenté en gris dans la figure 0-27 et sert à situer le système dans son ensemble, mais n'est pas pris en compte dans l'estimation du potentiel proprement dite.

Pour l'estimation du potentiel, seules sont prises en compte les quantités de matériaux qui ne sont pas valorisées directement sur place, mais éliminées. Pour ces quantités de matériaux, le transport vers le site d'élimination ainsi que l'élimination elle-même sont pris en compte. De plus, l'ensemble du cycle de vie du nouveau matériau de remblayage introduit dans le système en remplacement est pris en compte.

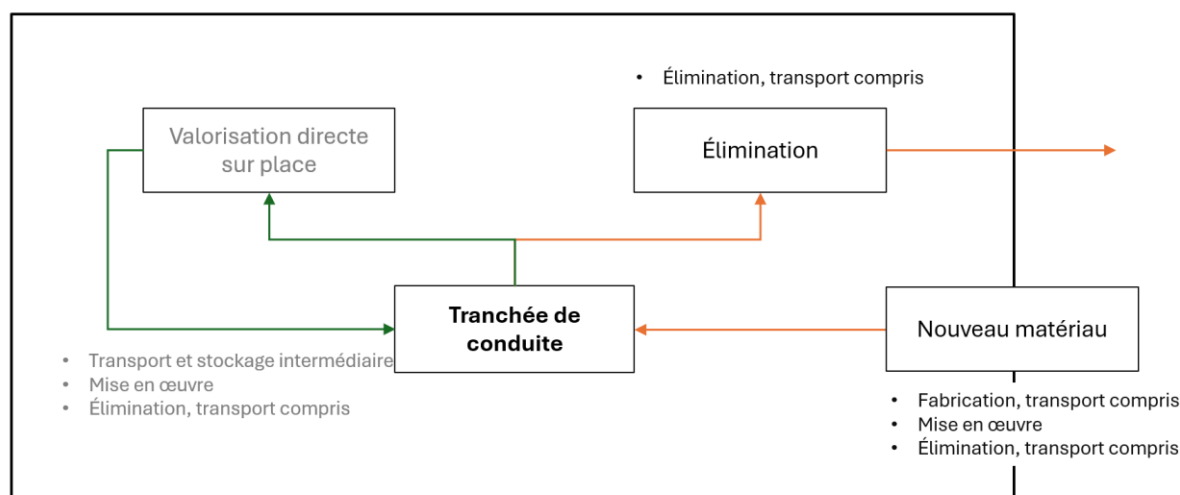


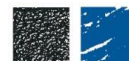
Figure 0-27: Système considéré pour l'estimation du potentiel du sol fluide.

Gestion des déchets

Pour l'estimation du potentiel de substitution disponible, une distinction est faite entre les déchets de construction éliminés et les matériaux valorisés sur place. Le tableau 0-9 présente les hypothèses utilisées dans cette étude concernant la gestion des déchets. Celles-ci s'appuient sur [35] et ont été reprises telles quelles pour la présente étude.

Tableau 0-9: Hypothèses relatives à la gestion des déchets pour la grave et le béton [35].

Réseau	Grave valorisée directement [%]	Grave éliminée [%]	Béton valorisé directement [%]	Béton éliminé [%]
Approvisionnement en eau	90	10	0	100
Assainissement	90	10	0	100



Approvisionnement en gaz	90	10	0	0
Alimentation électrique	50	50	0	100

Le tableau 0-10 présente les flux de matières pris en compte dans le scénario de référence et après substitution. Lors du remplacement de la grave, la grave qui serait éliminée dans le scénario de référence est utilisée pour la fabrication de sol fluide, et la grave neuve est remplacée par du sol fluide. Lors du remplacement du béton d'enrobage, le béton produit est éliminé, tandis que du sol fluide est mis en œuvre à la place du nouveau béton d'enrobage¹⁶.

Tableau 0-10: Substitutions de matériaux prises en compte dans l'estimation du potentiel.

Remplacement de la grave par du sol fluide		Remplacement du béton d'enrobage par du sol fluide	
Avant	Après	Avant	Après
La grave est éliminée (C2 – C4)	La grave est valorisée pour la fabrication de sol fluide	Le béton est éliminé (C2 – C4)	Le béton est éliminé (C2 – C4)
De la grave neuve est mis en place (A1 – A5, C1 – C4)	Le sol fluide est mis en place (A1 – A5, C1 – C4)	Du nouveau béton est mis en place (A1 – A5, C1 – C4)	Le sol fluide est mis en place (A1 – A5, C1 – C4)

Densités

Pour l'estimation du potentiel, des densités de 1'800 kg/m³ ont été retenues pour le sol fluide et la grave. Une densité de 2'300 kg/m³ a été utilisée pour le béton d'enrobage.

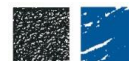
Géométries des tranchées

Pour l'estimation du stock de matériaux et des flux annuels de matériaux, des géométries de tranchées spécifiques au réseau ont été utilisées (tableau 0-11). Les hypothèses géométriques se basent sur [35] et ont été reprises telles quelles pour la présente étude.

Tableau 0-11: Géométries de tranchées pour la modélisation des réseaux d'infrastructure [35].

Réseau	Largeur [m]	Profondeur [m]	Longueur [m]
Approvisionnement en eau	0,6	1,4	1
Évacuation des eaux usées	1,05	2	1
Approvisionnement en gaz	0,6	0,9	1

¹⁶ Lors du remplacement du béton d'enveloppe par du sol fluide, le béton produit est éliminé tant à l'état initial qu'après la substitution, car il ne peut pas être valorisé pour la fabrication de sol fluide. Les impacts environnementaux qui en découlent sont donc négligés dans l'évaluation du potentiel, car ils restent identiques avant et après la substitution.



Approvisionnement en électricité	0,6	0,6	1
----------------------------------	-----	-----	---

Taux de réfection

Les volumes annuels de déchets de construction sont estimés sur la base des stocks de matériaux et des taux de réfection spécifiques au réseau. Le tableau 0-12 présente les taux de réfection utilisés par réseau [35]. Ces taux représentent la remise en état annuelle moyenne de l'infrastructure existante et déterminent ainsi les volumes de déchets de construction générés par le système existant.

Tableau 0-12: Taux de réfection pour l'estimation des quantités annuelles de déchets de construction [35]

Réseau	Taux de réfection [%]
Approvisionnement en eau	1,5
Assainissement	1,25
Approvisionnement en gaz	1,5
Alimentation électrique	2

Hypothèses de base concernant le remplacement de la grave et du béton par du sol fluide

L'estimation du potentiel repose sur une analyse des flux annuels de matériaux sous l'angle des déchets et présente un potentiel simplifié et optimiste à l'échelle nationale. Les hypothèses centrales suivantes ont été retenues:

- Les quantités de matériaux sortant chaque année du système sous forme de déchets de construction sont remplacées par des quantités équivalentes de nouveaux matériaux de remblayage.
- Les quantités de grave qui ne sont pas directement réutilisées sur place dans le cadre de travaux de réfection en état sont considérées comme étant en principe disponibles pour la fabrication de sol fluide.
- Pour ces quantités de grave et de béton considérées comme substituables, on suppose un remplacement à volume égal par du sol fluide.
- En ce qui concerne le béton, seules les applications classées comme fonctionnellement substituables sont prises en compte.
- Pour le béton d'enrobage substituable, on suppose un remplacement à volume égal par du sol fluide. En raison de la densité inférieure du sol fluide par rapport au béton d'enrobage, la masse utilisée est réduite à 78 %.
- L'estimation du potentiel suppose que des installations de traitement et des structures logistiques appropriées soient disponibles, de sorte que le sol fluide puisse être produit et utilisé à une distance raisonnable des chantiers.

Prise en compte de la croissance du réseau

Outre le potentiel basé sur les déchets, les besoins potentiels en matériaux liés à l'extension des réseaux (nouvelles constructions) ont été pris en compte. La croissance des réseaux a été modélisée sous



forme de part des sorties annuelles de matériaux et sert à estimer les besoins supplémentaires potentiels en nouveaux matériaux de remblayage.

- Pour les réseaux d'eau, d'eaux usées et d'électricité, une croissance annuelle de 0,5 % a été prise en compte.
- Pour le réseau de gaz, une croissance annuelle de 0,1 % a été prise en compte.

Largeur de tranchée réduite avec le sol fluide

Outre la substitution basée sur les déchets, l'influence potentielle d'une largeur de tranchée réduite lors de l'utilisation de sol fluide a été prise en compte (voir chapitre 5.4). Dans la présente étude, une réduction forfaitaire de la largeur de tranchée de 0.30 m par rapport à la méthode de construction conventionnelle a été supposée à des fins de simplification [39]. La profondeur et la longueur de la tranchée sont restées inchangées. Cette hypothèse est plausible, en particulier pour les situations d'extension ou de construction neuve, dans lesquels la géométrie de la tranchée peut être spécifiquement adaptée à l'utilisation de sol fluide lors de la planification. En revanche, lors de travaux de réfection, une réduction de la largeur de la tranchée n'est pas toujours réalisable de la même manière, car le tracé existant des conduites et les contraintes structurelles imposent souvent la section transversale de la tranchée.

Les géométries de tranchée réduites sont présentées dans le tableau 0-13.

Tableau 0-13: Géométries de tranchée réduites lors de l'utilisation de sol fluide.

Réseau	Largeur [m]	Profondeur [m]	Longueur [m]
Alimentation en eau	0,3	1,4	1
Évacuation des eaux usées	0,75	2	1
Approvisionnement en gaz	0,3	0,9	1
Approvisionnement en électricité	0,3	0,6	1

Stock de matériaux par réseau d'infrastructure

La figure 0-28 présente les stocks de matériaux estimés dans les quatre réseaux d'infrastructure considérés (approvisionnement en eau, évacuation des eaux usées, gaz et électricité) pour chaque canton pour l'année 2025. Les quantités totales de grave et de béton sont exprimées en millions de tonnes. On constate que les cantons densément peuplés tels que Zurich, Berne ou Argovie possèdent les plus grands stocks de matériaux. On observe en outre que c'est notamment le réseau d'évacuation des eaux usées qui représente la plus grande part du stock total de matériaux dans tous les cantons.

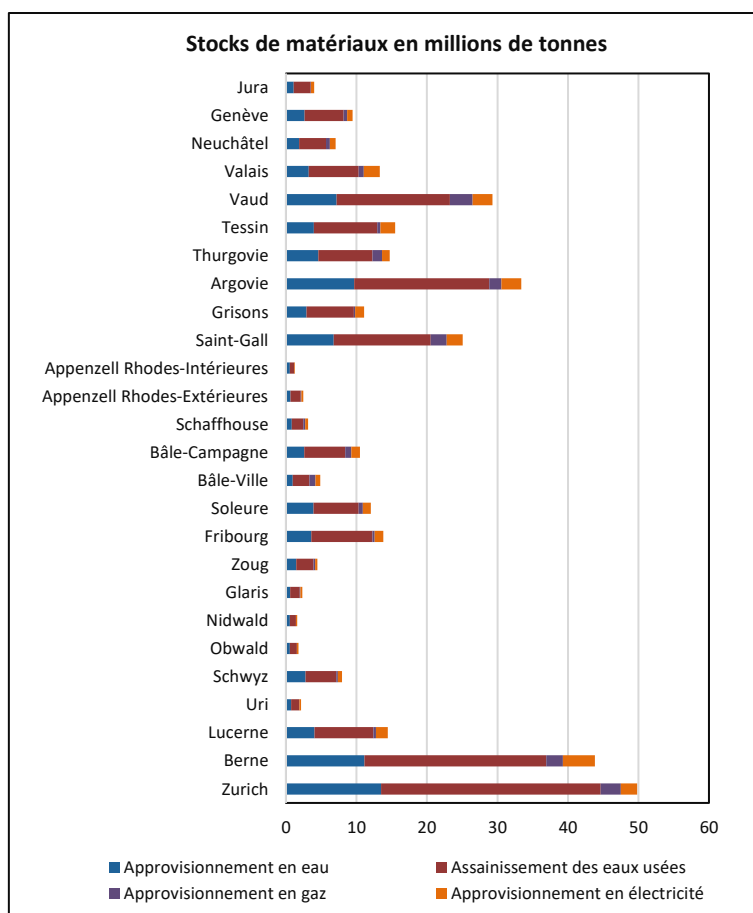
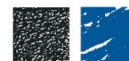


Figure 0-28: Stocks de matériaux dans le génie civil suisse par canton et par réseau d'infrastructure en 2025.

figure 0-29: ce graphique résume les stocks de matériaux à l'échelle nationale et présente les quantités totales de grave et de béton par réseau d'infrastructure. Il apparaît clairement que le réseau d'évacuation des eaux usées dispose, de loin, du plus grand stock de matériaux. De plus, le graphique montre que le béton est principalement utilisé dans le réseau d'évacuation des eaux usées, tandis que les autres réseaux sont principalement constitués de grave.

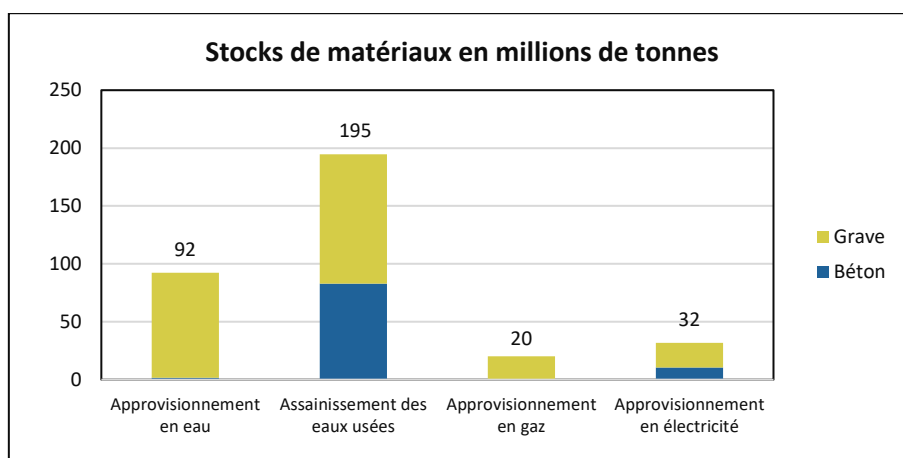
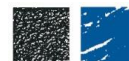


Figure 0-29: Stocks de matériaux dans le génie civil suisse par réseau d'infrastructure et par type de matériau.



La figure 0-30 présente les volumes annuels estimés de déchets de construction en béton et en grave. Il est frappant de constater que le béton n'est pas valorisé directement sur place. La totalité de la quantité de béton relève donc de la valorisation indirecte ou de la mise en décharge. La situation est différente pour la grave: ici, la majeure partie, soit environ 84 %, est valorisée directement sur place.

Le potentiel de substitution pertinent pour le sol fluide correspond aux quantités de matériaux qui ne sont pas valorisées sur place. Ces quantités représentent le potentiel théoriquement disponible. Au total, il en résulte une quantité disponible de déchets de construction de 556'276 tonnes par an provenant du béton et de la grave (486'551 tonnes de béton et 69'725 tonnes de grave).

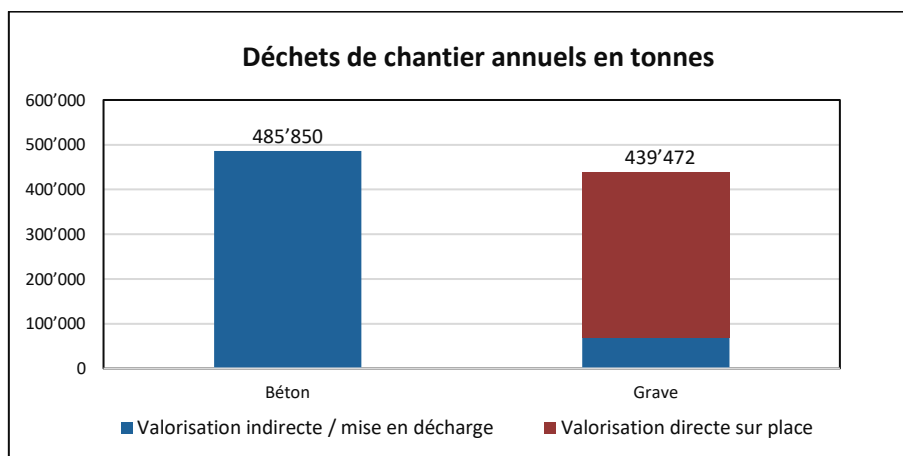


Figure 0-30: Quantités annuelles de déchets de construction de béton et de grave par type de valorisation.



Résultats de l'estimation du potentiel

Quantités de matériaux substituables

En partant de la quantité théoriquement disponible de déchets de construction de 556'276 t par an, on a estimé les quantités pouvant effectivement être remplacées par du sol fluide. Les contraintes spécifiques au réseau ainsi que la croissance du réseau ont été prises en compte. Le tableau 0-14 présente les quantités de matériaux remplaçables provenant des matériaux de tranchée démantelés, qui ne sont pas réutilisés sur place et doivent donc être remplacés par de nouveaux matériaux de remblayage, ainsi que les quantités supplémentaires résultant de la croissance du réseau.

Tableau 0-14: Quantités de matériaux de gravier, de sable et de béton pouvant être remplacées par de la boue, en tenant compte de la réfection en état et de l'extension du réseau (t/a).

Matériau	Densité [kg/m ³]	Quantité remplaçable issue de la réfection [t/a]	Part remplaçable issue de la réfection [%]	Quantité issue de l'extension du réseau [t/a]
Grave	1 800	69 725	100 %	1 954
Béton	2 300	373 466	77 %	1 488

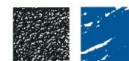
Hypothèses

Pour la grave, l'estimation du potentiel part du principe que la totalité des déchets de construction non valorisés sur place peut être entièrement remplacée par du sol fluide. Cela concerne la grave mise en décharge. Étant donné que la grave et le sol fluide ont tous deux une densité de 1'800 kg/m³, la substitution s'effectue à masse égale.

En ce qui concerne le béton, on ne considère pas que la totalité de la quantité de béton produite soit substituable, mais uniquement les applications qui, dans le cadre de cette estimation du potentiel, ont été classées comme pouvant en principe être remplacées sur le plan fonctionnel. Sur cette base, on obtient, à titre de modélisation, une part remplaçable représentant au total 77 % de la quantité de béton produite. N'ont pas été prises en compte les applications du béton pour lesquelles le sol fluide ne peut pas assumer la fonction du béton, par exemple dans les bassins de rétention des eaux pluviales, les ouvrages de canalisation ou les stations d'épuration des eaux usées.

- Dans le réseau d'approvisionnement en eau, aucun potentiel de substitution du béton n'a donc été retenu, car les besoins en béton modélisés se rapportent aux bassins de rétention des eaux pluviales.
- Dans le réseau d'évacuation des eaux usées, le béton de lit de pose a été considéré comme fondamentalement substituable dans l'estimation du potentiel, tandis que le béton utilisé pour les ouvrages de canalisation, les stations d'épuration et les bassins de rétention n'a pas été pris en compte.
- Dans le réseau de gaz, aucun béton n'a été modélisé selon l'étude de référence [35], raison pour laquelle il n'existe ici aucun potentiel de substitution pour le béton.
- Dans le réseau d'approvisionnement en électricité, les besoins en béton concernent le recouvrement, l'enrobage des conduites et le lit de pose. À l'instar du réseau d'évacuation des eaux usées, il a été supposé que le béton d'enrobage des conduites pouvait être entièrement remplacé.

Le béton d'enrobage présentant une densité de 2'300 kg/m³, supérieure à celle du sol fluide (1'800 kg/m³), la quantité de béton substituable a été prise en compte lors de la conversion sur la base de la masse avec un facteur de 0.78. Ce facteur résulte du rapport entre les densités des matériaux et garantit que la substitution s'effectue à volume égal.



Les potentiels de substitution du béton indiqués doivent être considérés comme des hypothèses de modélisation fortement simplifiées et optimistes dans le cadre de l'estimation du potentiel.

Mise en perspective des impacts environnementaux des matériaux de remblayage

Pour replacer les résultats suivants dans leur contexte, la figure 0-31 présente les émissions de gaz à effet de serre des matériaux de remblayage considérés, rapportées à 1 tonne de matériau de remblayage sur le cycle de vie considéré, des modules A1 – A5 aux modules C1 – C4. Sont représentés le béton d'enrobage (CEM I 42.5 R), le béton d'enrobage amélioré (CEM III A), la grave, le sol fluide (CEM I 42.5 R) et le sol fluide amélioré (CEM III A).

Contrairement aux scénarios comparatifs modélisés au chapitre 5, aucune répartition fixe des volumes entre la grave et le béton d'enrobage n'a été supposée pour l'estimation du potentiel. Au lieu de cela, les flux de matériaux de grave et de béton ont été considérés séparément et remplacés en conséquence par du sol fluide. La représentation rapportée à une tonne sert donc à mettre en perspective et à comparer les différents matériaux de remblayage et les méthodes de construction associées.

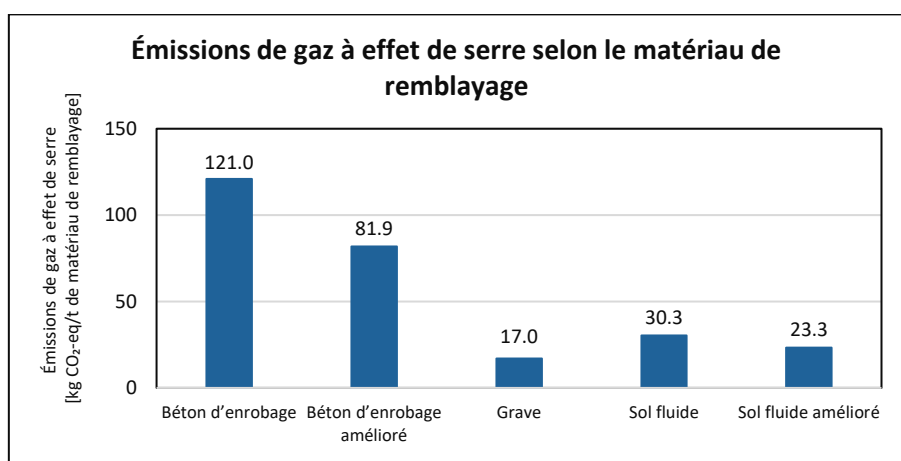


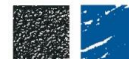
Figure 0-31: Émissions de gaz à effet de serre des matériaux de remblayage considérés, rapportées à 1 tonne de matériau de remblayage sur le cycle de vie des modules A1 – A5 aux modules C1 – C4. La représentation sert à comparer les matériaux de remblayage et les méthodes de construction associées.

La formulation utilisée pour le sol fluide ou le sol fluide amélioré correspond à la formulation moyenne du chapitre 3. Les formulations utilisées pour la grave, le béton et le béton amélioré correspondent à celles du chapitre 5. À l'instar du chapitre 5, le sol fluide et le béton d'enrobage sont ici considérés à la fois avec le ciment CEM I 42.5 R et avec le ciment à teneur réduite en clinker CEM III A. Cette distinction ne s'applique pas à la grave, car il ne s'agit pas d'un matériau contenant du ciment.

Potentiel total de réduction des émissions de gaz à effet de serre

La figure 0-32 présente les émissions annuelles de gaz à effet de serre correspondant aux quantités de grave et de béton d'enrobage pouvant être remplacées par du sol fluide. Pour le calcul, du ciment CEM I 42.5 R a été utilisé pour le sol fluide et le béton d'enrobage.

Pour une largeur de tranchée conventionnelle, le remplacement des quantités de béton concernées par du sol fluide entraîne une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 65 %. En revanche, on observe une augmentation de 17 % pour la grave, car le sol fluide présente un facteur d'émission plus élevé que la grave (voir figure 0-31). Au total, il en résulte une réduction des émissions annuelles de gaz à effet de serre de 60 %, ce qui correspond à des émissions évitées de 37'767 t CO₂-eq par an.



Si l'on tient également compte de la réduction de la largeur de la tranchée, les émissions liées au béton substitué diminuent encore (-71 %) et l'augmentation précédemment observée pour la grave se transforme désormais en une réduction de 7 %. La réduction de la largeur de la tranchée a donc un effet compensateur et empêche que la substitution de la grave par du sol fluide n'entraîne une charge supplémentaire significative. Au total, cela se traduit par une réduction globale des émissions de gaz à effet de serre de 67 %, ce qui correspond à des émissions évitées de 42'131 t CO₂-eq par an.

Les plus grands potentiels de réduction en valeur absolue se situent dans les réseaux d'évacuation des eaux usées et d'électricité, car c'est là que les plus grandes quantités de béton d'enrobage peuvent être remplacées.

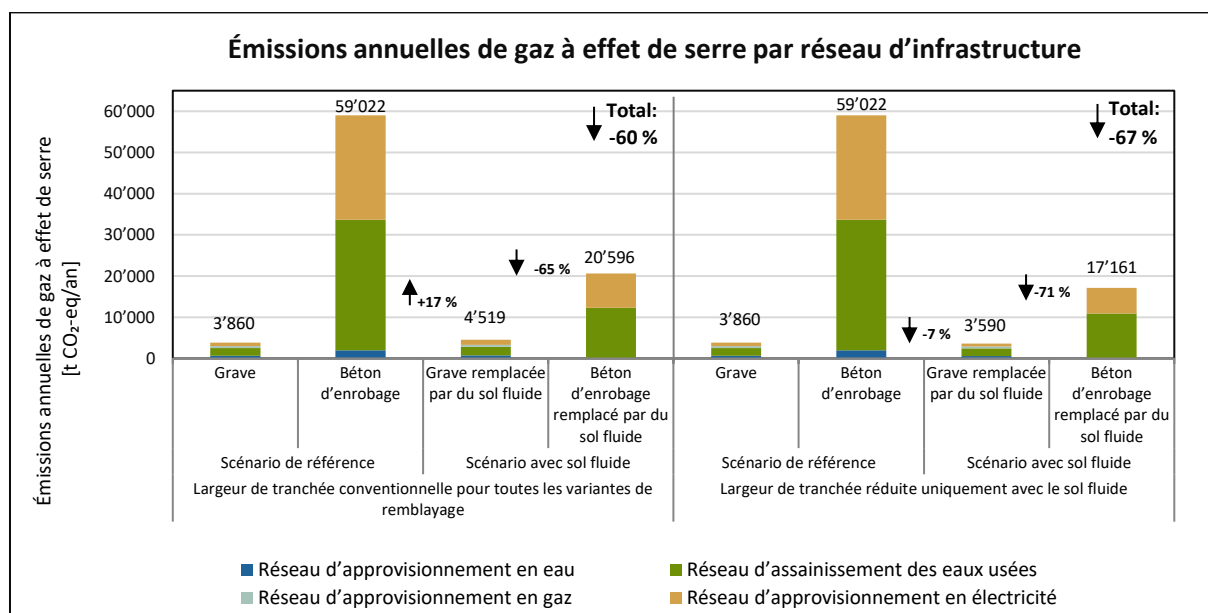


Figure 0-32: Émissions annuelles de gaz à effet de serre des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre la largeur de tranchée conventionnelle pour toutes les variantes de remblayage et la largeur de tranchée réduite uniquement pour le sol fluide. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.

La figure 0-33 montre les émissions annuelles de gaz à effet de serre des quantités de matériaux (grave et béton d'enrobage) pouvant être remplacées par du sol fluide. Pour le sol fluide et le béton d'enrobage, le CEM III A a été utilisé. La tendance est fondamentalement la même que pour les résultats obtenus avec le CEM I 42.5 R: Le remplacement du béton d'enrobage par du sol fluide entraîne une réduction significative, tandis que les émissions liées au remplacement de la grave par du sol fluide diminuent nettement par rapport au CEM I. La réduction totale est toutefois moindre, car le béton d'enrobage avec CEM III A présente déjà des émissions plus faibles et le potentiel de réduction lié à la substitution est donc moindre. Au total, on obtient une réduction de 49 % pour une largeur de tranchée conventionnelle et de 56 % pour une largeur de tranchée réduite, uniquement pour le sol fluide. Cela correspond à des émissions évitées de 21'300 t CO₂-eq/a et 24'657 t CO₂-eq/a respectivement.

Il est également intéressant de noter que le passage du CEM I au CEM III A réduit les émissions de gaz à effet de serre du béton d'enrobage de 32 %.

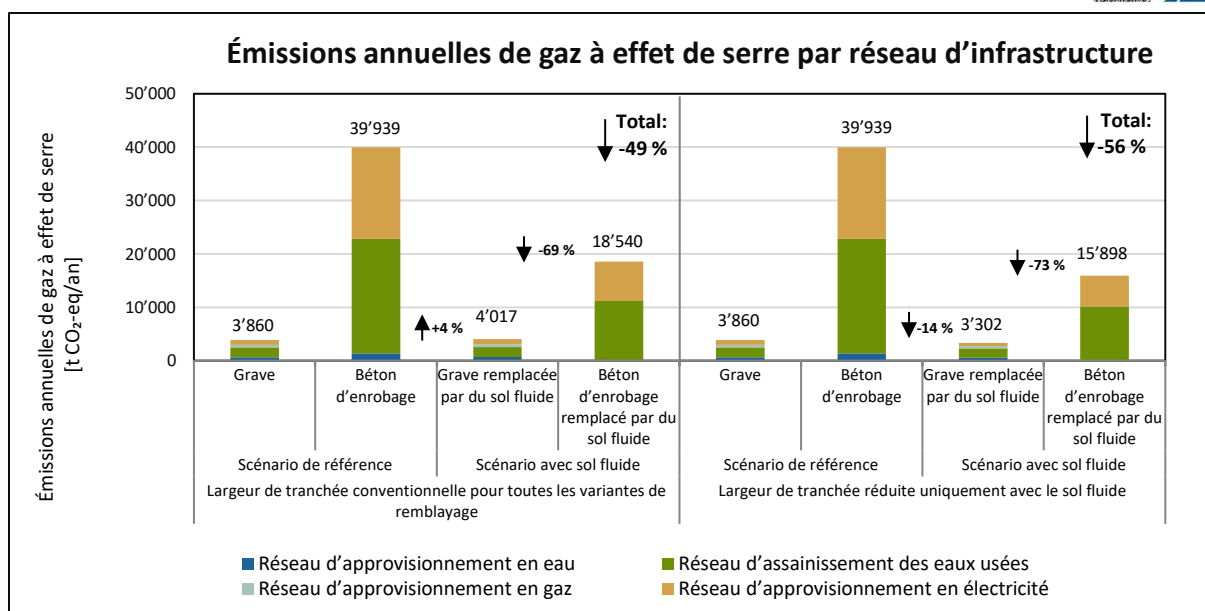
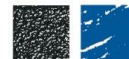


Figure 0-33: Émissions annuelles de gaz à effet de serre des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre une largeur de tranchée conventionnelle et une largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Le CEM III A a été modélisé pour le béton d'enrobage et le sol fluide.

Potentiel total de réduction de l'impact environnemental total

La figure 0-34 montre les impacts environnementaux annuels totaux des quantités de matériaux de grave et de béton d'enrobage pouvant être remplacées par du sol fluide dans le scénario de référence et dans le scénario avec sol fluide. Pour le calcul, du ciment CEM I 42.5 R a été utilisé pour le sol fluide et le béton d'enrobage.

Avec une largeur de tranchée conventionnelle, la substitution des quantités de béton concernées entraîne une réduction de l'impact environnemental de 63 %, et de 26 % pour la grave. Au total, il en résulte une réduction de 57 %, ce qui correspond à une réduction de l'impact environnemental de 77'780 millions d'UBP/an. Si l'on tient compte de la largeur de tranchée réduite, l'effet est amplifié. Les impacts environnementaux liés au béton d'enrobage diminuent de 68 %, et ceux liés à la grave de 35 %. Au total, cela se traduit par une réduction globale de 62 %, ce qui correspond à une réduction des impacts environnementaux de 85'456 millions d'UBP/an.

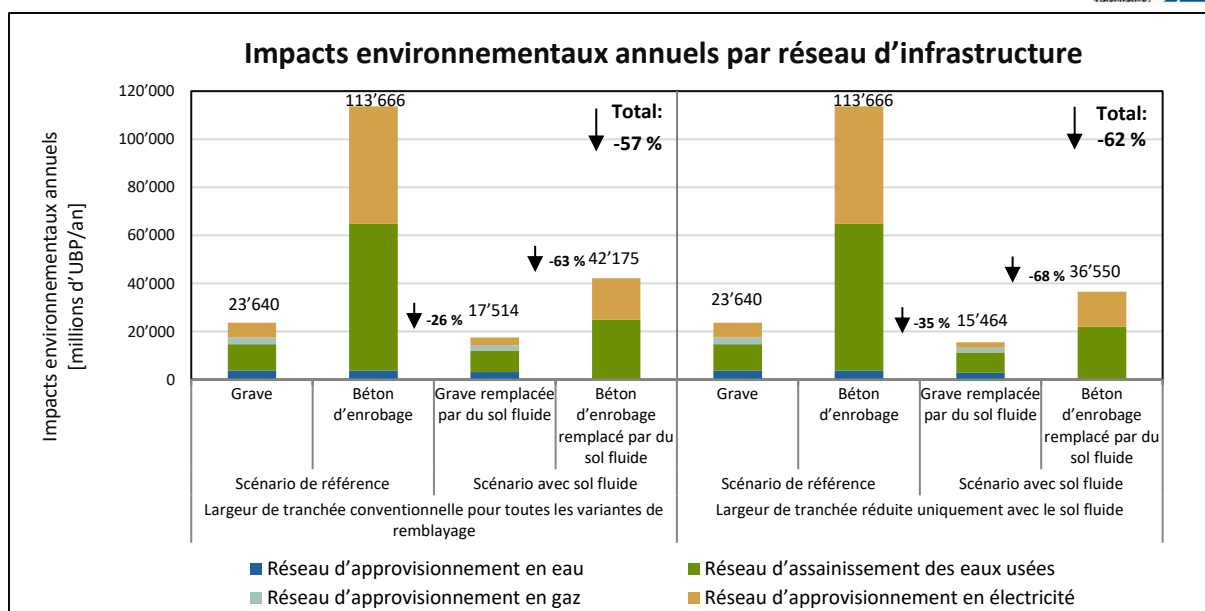
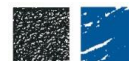


Figure 0-34: *Impacts environnementaux annuels totaux des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre une largeur de tranchée conventionnelle et une largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.*

La figure 0-35 montre les impacts environnementaux annuels totaux des quantités de matériaux (grave et béton d'enrobage) pouvant être remplacées par du sol fluide. Le CEM III A a été utilisé pour le sol fluide et le béton d'enrobage. La tendance est fondamentalement la même que pour les résultats obtenus avec le CEM I 42.5 R.

Avec une largeur de tranchée conventionnelle, la substitution des quantités de béton concernées entraîne une réduction de l'impact environnemental de 65 %, et de 28 % pour la grave. Au total, il en résulte une réduction de 52 %, ce qui correspond à une réduction de l'impact environnemental de 60'576 millions d'UBP/an. Si l'on tient compte de la réduction de la largeur de tranchée, l'effet est amplifié. Les impacts environnementaux liés au béton d'enrobage diminuent de 71 %, et ceux liés au grave de 36 %. Au total, cela se traduit par une réduction globale de 59 %, ce qui correspond à une réduction des impacts environnementaux de 69'162 millions d'UBP/an.

Le passage du CEM I au CEM III A dans le béton d'enrobage entraîne une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 17 %.

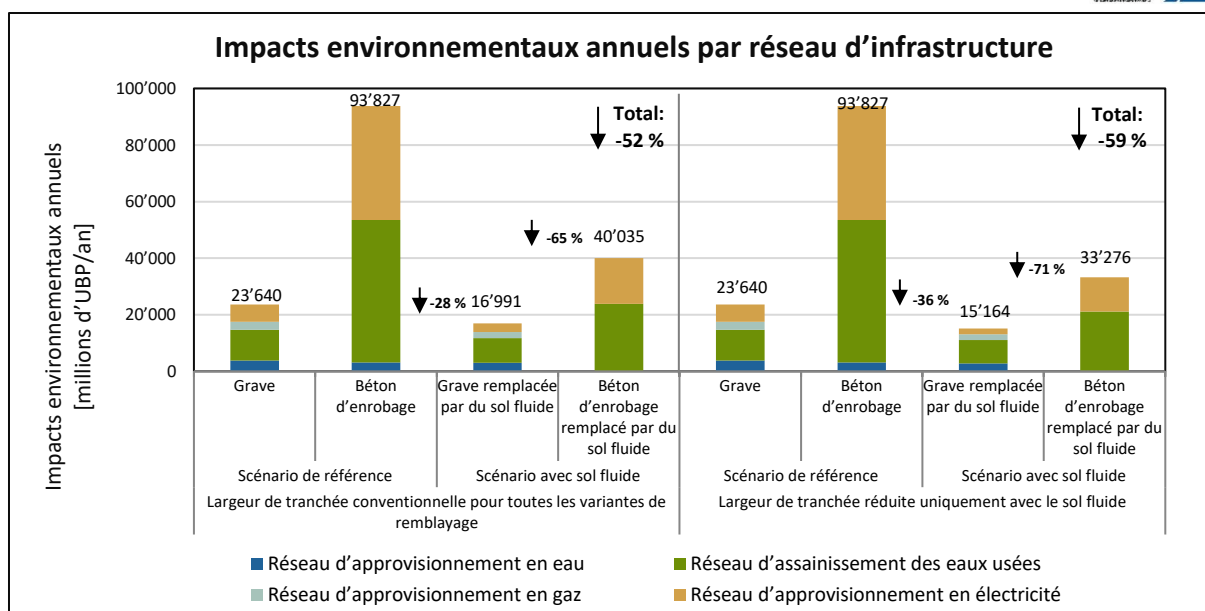
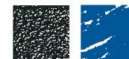


Figure 0-35: Impacts environnementaux annuels totaux des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre une largeur de tranchée conventionnelle et une largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM III A a été modélisé.

Potentiel total de réduction de la consommation d'énergie cumulée

La figure 0-36 montre la consommation d'énergie cumulée des quantités de matériaux substituables dans le scénario de référence et dans le scénario avec sol fluide. Pour le calcul, du ciment CEM I 42.5 R a été utilisé pour le sol fluide et le béton.

Avec une largeur de tranchée conventionnelle, l'utilisation de sol fluide réduit considérablement la consommation d'énergie du béton d'enrobage substitué de 59 %, contre 11 % pour la grave. Au total, on obtient une réduction de 52 %, ce qui correspond à une économie d'énergie de 66 GWh Oil-eq/an. Cet effet est amplifié lorsque la largeur de tranchée est réduite. La consommation d'énergie du béton d'enrobage remplacé diminue de 67 %, et de 24 % pour la grave. Il en résulte une réduction totale de 61 %, ce qui correspond à une économie d'énergie de 77 GWh Oil-eq/an.

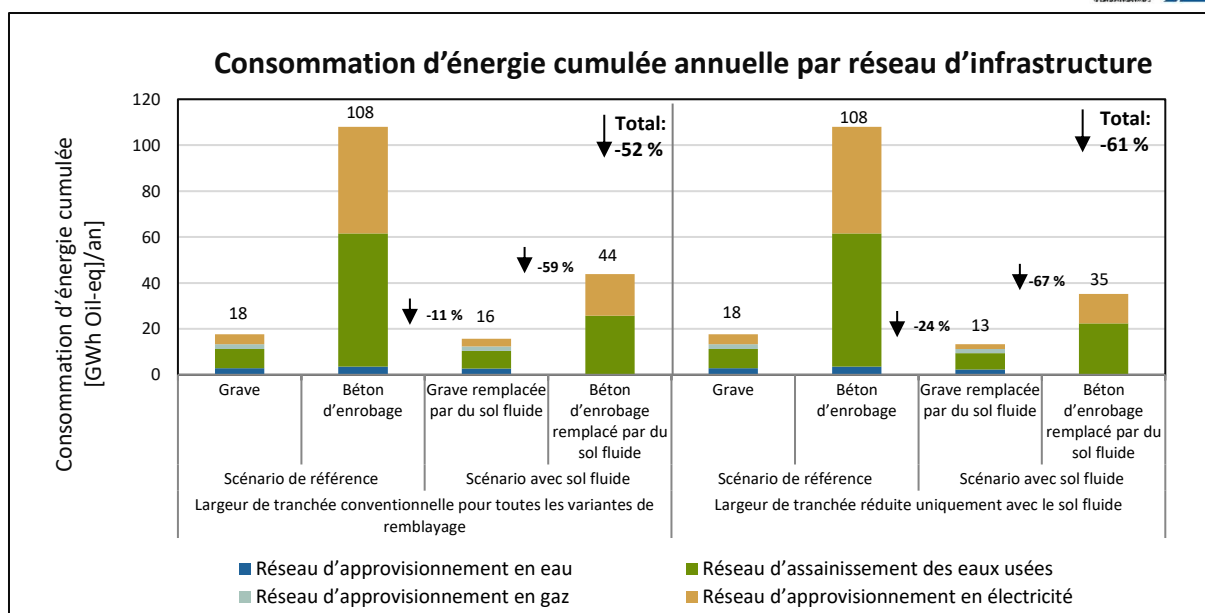
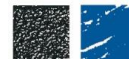


Figure 0-36: Consommation d'énergie cumulée annuelle des quantités de matériaux substituables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre la largeur de tranchée conventionnelle et la largeur réduite, exclusivement pour le sol fluide. Pour le béton d'enrobage et le sol fluide, le CEM I 42.5 R a été modélisé.

La figure 0-37 montre la consommation d'énergie cumulée annuelle des quantités de matériaux (grave et béton d'enrobage) pouvant être remplacées par du sol fluide. Le CEM III A a été utilisé pour le sol fluide et le béton d'enrobage. La tendance est la même que pour les résultats obtenus avec le CEM I 42.5 R. Étant donné que la fabrication du CEM I 42.5 R et du CEM III A nécessite à peu près la même quantité d'énergie, les résultats ne diffèrent que très légèrement. On obtient donc ici aussi une réduction totale de la consommation d'énergie cumulée de 52 % pour une largeur de tranchée conventionnelle et de 61 % pour une largeur de tranchée réduite.

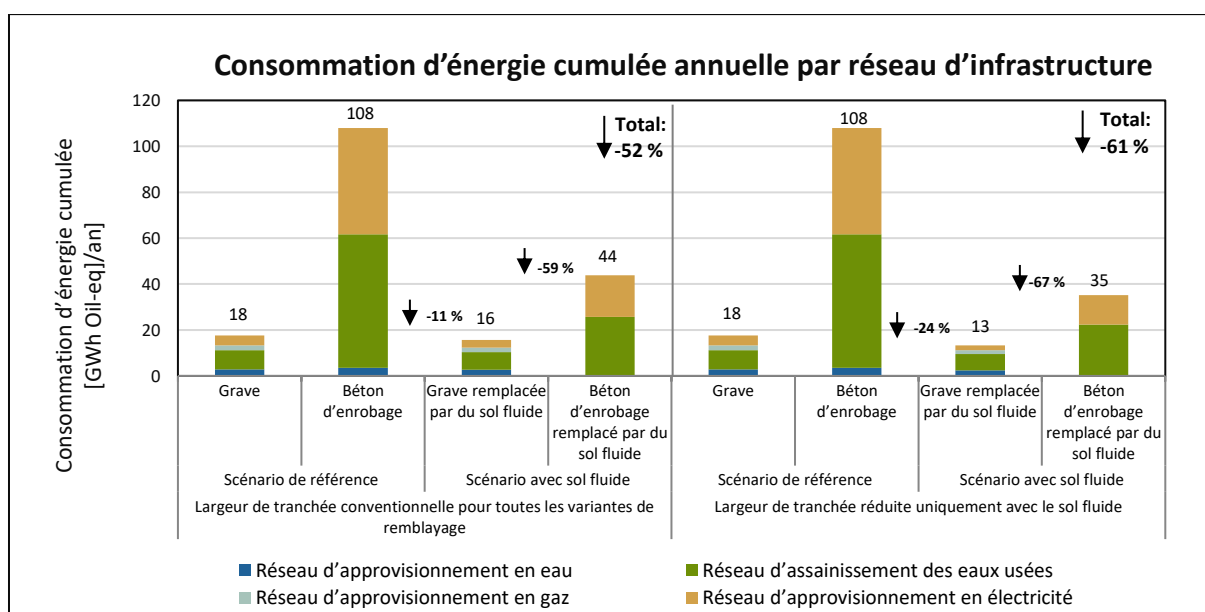


Figure 0-37: Consommation d'énergie cumulée annuelle des quantités de matériaux remplaçables par réseau d'infrastructure. Comparaison entre la largeur de tranchée conventionnelle et la largeur de tranchée réduite exclusivement pour le sol fluide. Le CEM III A a été modélisé pour le béton d'enrobage et le sol fluide.



Interprétation

L'estimation du potentiel montre que le sol fluide présente un potentiel de réduction écologique considérable dans le génie civil suisse. Comme le résume le tableau 0-15, les réductions dépendent toutes fortement du matériau remplacé, de la géométrie de la tranchée retenue et du type de ciment utilisé.

Tableau 0-15: Potentiels de réduction en pourcentage de la formulation moyenne de sol fluide.

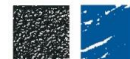
		Largeur de tranchée conventionnelle			Largeur de tranchée réduite		
		Grave	Béton d'enrobage	Potentiel	Grave	Béton d'enrobage	Potentiel
Utilisation du CEM I 42.5 R	GES	+ 17 %	- 65 %	- 60 %	- 7 %	- 71 %	- 67 %
	UBP	- 26 %	- 63 %	- 57 %	- 35 %	- 68 %	- 62 %
	CEC	- 11 %	- 59 %	- 52 %	- 24 %	- 67 %	- 61 %
Utilisation du CEM III A	GES	+ 4 %	- 69 %	- 49 %	- 14 %	- 73 %	- 56 %
	UBP	- 28 %	- 65 %	- 52 %	- 36 %	- 71 %	- 59 %
	CEC	- 11 %	- 60 %	- 52 %	- 24 %	- 67 %	- 61 %

Le plus grand potentiel réside clairement dans le remplacement du béton d'enrobage par du sol fluide. Tous les indicateurs environnementaux pris en compte montrent ici des réductions significatives.

Les résultats sont légèrement différents lorsqu'on remplace la grave par du sol fluide. Avec une largeur de tranchée conventionnelle, on observe même dans un premier temps une augmentation du potentiel de gaz à effet de serre, quel que soit le type de ciment. En revanche, on constate déjà des réductions pour les UBPs et la CEC. Si l'on tient compte en outre d'une largeur de tranchée réduite pour le sol fluide, le bilan de ce dernier s'améliore nettement, y compris en termes de potentiel de gaz à effet de serre, de sorte qu'une réduction est désormais même observée. Cela montre que la réduction de la largeur de tranchée est un levier essentiel pour réduire davantage les impacts environnementaux du sol fluide et éviter d'éventuelles charges supplémentaires par rapport à la grave.

Le choix du type de ciment constitue un autre levier important. L'utilisation de CEM III A à la place de CEM I 42.5 R réduit encore davantage les impacts environnementaux du béton d'enrobage et du sol fluide, en particulier en ce qui concerne le potentiel de gaz à effet de serre. Dans le même temps, le potentiel de réduction lié au remplacement du béton d'enrobage par du sol fluide diminue, car le matériau de référence présente déjà des émissions plus faibles. Dans le cas de la grave, l'utilisation de CEM III A dans le sol fluide entraîne également une diminution des impacts environnementaux, ce qui rend le sol fluide globalement moins émetteur.

Dans l'ensemble, les résultats montrent qu'il existe plusieurs leviers efficaces pour réduire les impacts environnementaux dans le génie civil: le remplacement du béton d'enrobage par du sol fluide, le remplacement de la grave par du sol fluide (dans la mesure où les indicateurs environnementaux UBPs et CEC sont prioritaires), la réduction de la largeur de tranchée avec le sol fluide ainsi que l'utilisation de ciments à teneur réduite en clinker tels que le CEM III A. C'est en combinant ces leviers que l'on obtient les plus grands potentiels.



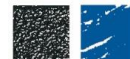
Contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre

Sur la base des quantités de substitution modélisées, l'utilisation de sol fluide avec du CEM I 42.5 R pour une largeur de tranchée conventionnelle permet un potentiel de réduction annuel de 37'767 t CO₂-eq par an.

En 2023, les émissions territoriales totales de gaz à effet de serre de la Suisse s'élevaient à 40.85 millions de tonnes CO₂-eq [45]. Le potentiel modélisé correspond ainsi à 0.09 % des émissions nationales totales. Le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre s'étend sur l'ensemble de la chaîne de valeur, sans distinction entre les effets en Suisse et à l'étranger.¹⁷

Étant donné que le génie civil se caractérise par des activités continues de réfection et d'extension ainsi que par des cycles d'investissement à long terme, une mise en œuvre systématique du sol fluide peut apporter une contribution structurelle à la décarbonisation. La substitution du béton d'enrobage est particulièrement pertinente, car elle permet de s'attaquer directement aux émissions liées au ciment. Dans le contexte du génie civil suisse, le sol fluide peut ainsi apporter une contribution quantifiable à la réduction des émissions.

¹⁷ L'empreinte carbone de la Suisse du point de vue de la consommation finale (émissions en Suisse + émissions liées aux importations – émissions liées aux exportations) s'élève à environ 132 millions de tonnes CO₂-eq [54]. Du même point de vue, les matériaux de construction sont responsables d'environ 10 millions de tonnes de CO₂-eq [55].



Appendice E. Justificatifs techniques relatifs à la statique des conduits et aux conditions de mise en œuvre

Les justifications techniques relatives à la statique des tuyaux et aux conditions de pose sont présentées dans les pages suivantes. On trouve tout d'abord le calcul statique type selon les normes SIA 190 / SIA 261. Celle-ci présente les profils de pose et les zones de recouvrement possibles selon la SIA. Viennent ensuite, à titre complémentaire, les calculs statiques types selon la réglementation allemande conformément aux normes DIN EN 1916, DWA-A 139, DIN V 1201 / DIN V 1202 et ATV-DVWK-A 127. Ceux-ci servent d'exemple complémentaire pour la vérification de conduites en béton armé comparables dans des conditions de dimensionnement et d'installation allemandes.

TYPENSTATIK

23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-SIA_INDEX A

Statische Berechnung von Stahlbetonrohren gemäß DIN EN 1916 / SIA 190 / SIA 261

Rohrhersteller: Röser III GmbH
Industriestraße 6
78256 Steißlingen

Verkehrsbelastung: Lastmodell 1 gemäß SIA 261

mit 2 x 300 kN + 9 kN/m² in Streifen 1 sowie 2 x 200 kN + 2,5 kN/m² in Streifen 2

Rohrtyp:	Robustrohr	
Nennweite:	900	mm
Aussendurchmesser:	1200	mm
Wandstärke:	150	mm
Baulänge:	3000	mm

Festigkeitsklasse: **FK 250**

Mindestscheiteldrucklast F_n : **225,00** kN / m

Mögliche Verlegeprofile für das Stahlbeton-Robustrohr DN 900 mm nach SIA 190

	U1/V1	U2 / V2	U2A / V2A	U3 / V3	U4 / V4
min Eü [m]	0,60	0,50	0,50	0,50	0,50
max Eü [m]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00

Der Berechnungsausdruck dieser beiden Lastfälle liegt dieser Typenstatik bei. Sollten Sie die Ausdrücke der anderen Lastfälle wünschen, können Sie sich gerne an uns wenden.

Freies

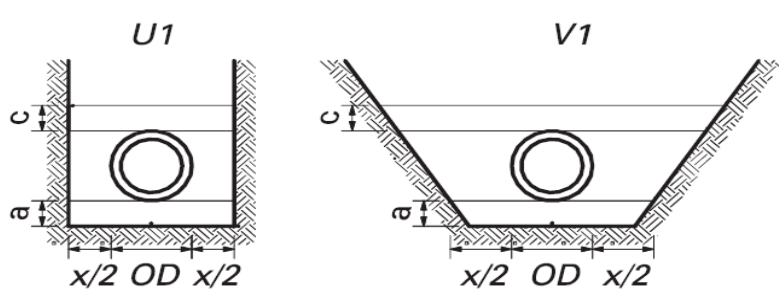
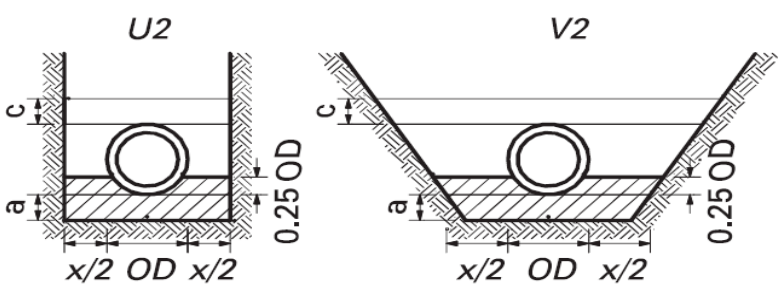
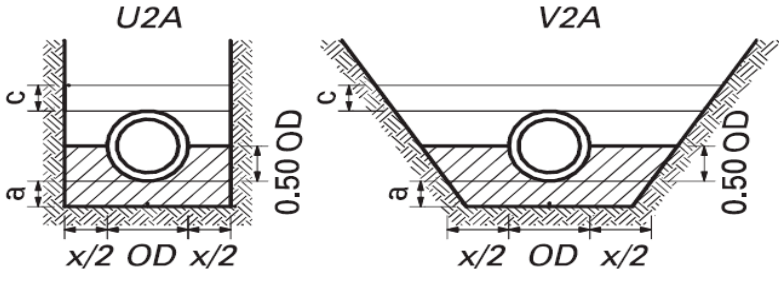
INGENIEURBÜRO

Dr.sc.techn. Uwe Rößler
Hertlingstraße 5, 76726 Gernersheim
Telefon: 07274 / 700 1972
Mobil: 0173 / 54 117 39

E-mail: info@uveroessler.de
www.uveroessler.de

23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-SIA_INDEX A

Mögliche Verlegeprofile nach SIA 190 mit Verkehrsbelastung Lastmodell 1 gemäß SIA 261

U1 / V1 Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 30°)		Erdüberdeckung	
 Baustoff für Bettung a, Leitungszone und Abdeckung c: ungebundene Baustoffe wie Kies-Sand nach SN EN 1610, Pkt. 5.2 *		min.	0,60 m
		max.	5,00 m
		untere Bettung:	
		min a =	0,19 m
		bei hartem Baugrund =	0,28 m
U2 / V2 Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 60°)		Erdüberdeckung	
 Baustoff für Leitungszone und Abdeckung c: ungebundene Baustoffe wie Kies-Sand nach SN EN 1610, Pkt. 5.2 * Baustoff für untere und obere Bettung (a + 0,25 OD): unbewehrter Beton min. C 16/20		min.	0,50 m
		max.	5,00 m
		obere Bettung:	
		min b =	0,30 m
		untere Bettung:	
		min a =	0,19 m
		bei hartem Baugrund =	0,28 m
U2A / V2A Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 90°)		Erdüberdeckung	
 Baustoff für Leitungszone und Abdeckung c: ungebundene Baustoffe wie Kies-Sand nach SN EN 1610, Pkt. 5.2 * Baustoff für untere und obere Bettung (a + 0,50 OD): unbewehrter Beton min. C 16/20		min.	0,50 m
		max.	5,00 m
		obere Bettung:	
		min b =	0,60 m
		untere Bettung:	
		min a =	0,19 m
		bei hartem Baugrund =	0,28 m



U3 / V3 Verlegeprofil (Auflagerwinkel 2 x 120°)			
		Erdüberdeckung min. 0,50 m max. 5,00 m	
Baustoff für Leitungszone und Abdeckung c: ungebundene Baustoffe wie Kies-Sand nach SN EN 1610, Pkt. 5.2 * Baustoff für die untere und obere Bettung (a + 0,75 OD): unbewehrter Beton min. C 16/20		obere Bettung: min b = 0,90 m untere Bettung: min a = 0,19 m bei hartem Baugrund = 0,28 m	

U4 / V4 Verlegeprofil (voll einbetoniert)			
		Erdüberdeckung min. 0,50 m max. 5,00 m	
Baustoffe für Bettung, Leitungszone und Abdeckung (a + OD + ≥ 0,15 m): unbewehrter Beton min. C 16/20 oder bewehrter Beton min. C 20/25		obere Bettung: min b = 1,35 m untere Bettung: min a = 0,19 m bei hartem Baugrund = 0,28 m	

- * ungebundene Baustoffe nach SN 1610, Pkt. 5.2 sind: (Grösstkorn Dmax = 90mm)
- anstehender Boden, dessen Brauchbarkeit nachgewiesen wurde (s. SN EN 1610, Pkt. 5.2.2)
 - angelieferte Baustoffe (s. SN EN 1610, Pkt. 5.2.3)

Schraffurlegende:

- ☐ Ungebundene Baustoffe wie Kies-Sand nach SN EN 1610
- ☒ Gebundener Baustoff wie Beton
- ☒ Anstehender Baugrund

Die Berechnungsausdrucke dieser Verlegeprofile mit markierter Erdüberdeckung liegen dieser Typenstatik bei.
Sollten Sie die Ausdrucke der anderen Lastfälle wünschen, können Sie sich gerne an uns wenden.



Allgemeine Hinweise zur Ausführung (siehe Sia 190:2017, Pkt. 5)

a = Dicke der unteren Bettungsschicht (Sia 190:2017; Pkt. 5.3.2.3)

Die Dicke der unteren Bettungsschicht sollte bei normalen standfesten Böden

$a = 100 \text{ mm} + 1/10 \text{ DN}$ betragen.

Bei Fels, steinigem oder dicht gelagertem Untergrund oder Böden mit fester Konsistenz

(z. B. Ton, Geschiebemergel, Moränekies) sollte die Dicke der unteren Bettungsschicht

$a = 100 \text{ mm} + 1/5 \text{ DN}$, jedoch mindestens 150 mm betragen.

untere Bettung		min a	= $100 \text{ mm} + 1/10 \text{ DN mm}$ =	0,19 m bzw.
bei hartem Baugrund		min a	= $100 \text{ mm} + 1/5 \text{ DN mm}$ =	0,28 m
oder Fels			(min. 150 mm)	
obere Bettung	U2 / V2	min b	= $0,25 \times \text{OD}$ =	0,30 m
	U2A / V2A	min b	= $0,50 \times \text{OD}$ =	0,60 m
	U3 / V3	min b	= $0,75 \times \text{OD}$ =	0,90 m
	U4 / V4	min b	= $\text{OD} + \geq 0,15 \text{ m}$ =	1,35 m

c = Dicke der Abdeckung (Sia 190:2017; Pkt. 5.3.2.5)

Die Dicke der Abdeckung über dem Rohr ist abhängig von den eingesetzten Verdichtungs-geräten. Sie beträgt in der Regel 300 mm, jedoch min. 150 mm über dem Rohrscheitel bzw.

100 mm über der Rohrverbindung.

Nach DIN EN 1610 muss die Auswahl des Verdichtungsgerätes, die Anzahl der Verdichtungsübergänge und die zu verdichtende Schichtdicke auf das zu verdichtende Material und die einzubauende Rohrleitung abgestimmt werden.

Maßgebend bei der Festlegung der Dicken der unteren und oberen Bettungsschichten ist der größere Wert aus der konstruktiven Wahl (5.3.2.3) oder statischen Berechnung.

(Sia 190:2017; Pkt. 5.3.2.4)

Das Rohr darf nie direkt auf Fels oder auf eine unnachgiebige Bodenplatte verlegt werden.

(Sia 190:2017; Pkt. 5.3.2.7)

Die oben beschriebenen Hinweise zur Ausführung stellen Randbedingungen für die statische Berechnung dar. Sie ersetzen nicht den Blick in die entsprechende Norm, um einen normgerechten Einbau zu gewährleisten.

Ein gesonderter statischer Nachweis, bezogen auf den Projekt- bzw. Einzelfall erübrigt sich, sofern die in der Berechnung angenommenen Verlegeprofile je Überdeckungsbereich eingehalten werden.

Bei evtl. erforderlichen Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

erstellt: Germersheim, den 26.04.2024

U. Rößler

Dr.sc. techn. Uwe Rößler

Ermittlung der Festigkeitsklasse nach DIN EN 1916

Prüfanordnung nach DIN EN 1916, Anhang C
entspricht dem Lastfall 1A.11 des Handbuch der Rohre

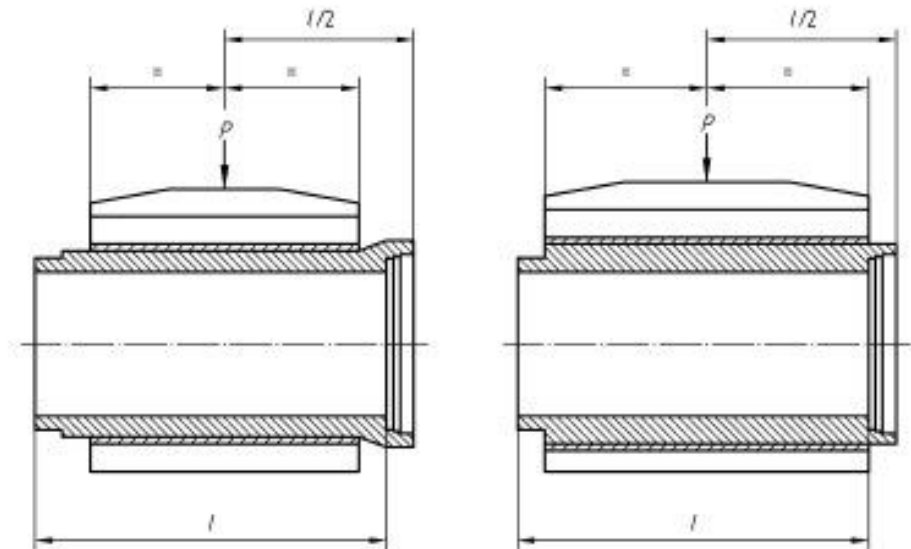


Bild C.1 — Obere und untere Balken für die Scheiteldruckprüfung

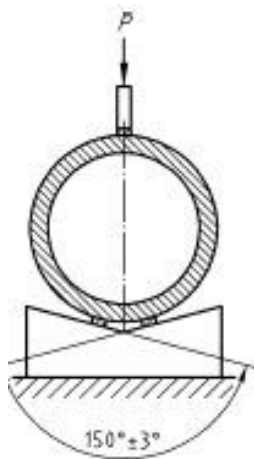


Bild C.2a

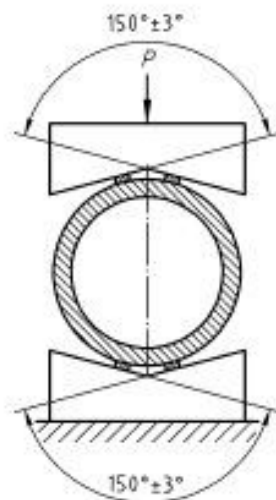


Bild C.2b

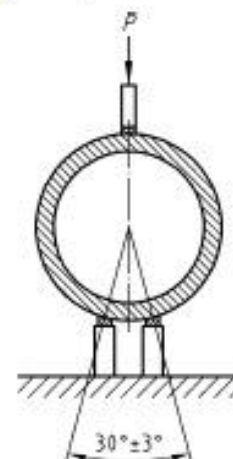


Bild C.2c

(nicht für Rohre ≤ DN 1200)



Ermittlung der Schnittkräfte nach Handbuch der Rohre:

Lastfall 1A.11: Zweiliniengegendruck, radial

S C H N I T T K R A E F T E A M K R E I S R I N G														
LASTFALL		LINIENBELASTUNG												
1A.11		ZWEILINIENEGEGENDRUCK, RADIAL												
		BIEGEMOMENT = $M \cdot F \cdot r$							NORMALKRAFT = $N \cdot F$					
α'	φ	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
15	M	0.313	0.184	0.064	-0.038	-0.115	-0.162	-0.176	-0.156	-0.104	-0.022	0.084	0.205	0.201
	N	-0.011	-0.140	-0.260	-0.361	-0.439	-0.486	-0.500	-0.480	-0.427	-0.346	-0.240	-0.119	-0.123
17.5	M	0.311	0.182	0.063	-0.038	-0.115	-0.161	-0.174	-0.153	-0.099	-0.017	0.089	0.189	0.184
	N	-0.015	-0.144	-0.263	-0.364	-0.441	-0.487	-0.500	-0.479	-0.425	-0.343	-0.237	-0.137	-0.142
30	M	0.295	0.167	0.051	-0.045	-0.114	-0.152	-0.157	-0.128	-0.066	0.023	0.135	0.111	0.102
	N	-0.048	-0.176	-0.292	-0.388	-0.457	-0.495	-0.500	-0.471	-0.409	-0.320	-0.208	-0.232	-0.241
45	M	0.259	0.134	0.026	-0.058	-0.111	-0.131	-0.116	-0.066	0.014	0.119	0.059	0.022	0.009
	N	-0.125	-0.250	-0.358	-0.442	-0.496	-0.515	-0.500	-0.451	-0.371	-0.265	-0.325	-0.362	-0.375
60	M	0.189	0.069	-0.023	-0.080	-0.100	-0.080	-0.023	0.069	0.189	0.069	-0.023	-0.080	-0.100
	N	-0.289	-0.408	-0.500	-0.558	-0.577	-0.558	-0.500	-0.408	-0.289	-0.408	-0.500	-0.558	-0.577
VORZEICHEN : BIEGEMOMENT +M ERGIBT ZUG AUF ROHRINNENSEITE														
NORMALKRAFT +N ERGIBT ZUG														
1/78		LF 1A.11												

Wirkende Scheiteldruckkraft F_n nach DIN EN 1916

Festigkeitsklasse für Berechnung Sia 190:

FK 250

Scheiteldruckkraft F_n , um einen Riss von maximal 0,3 mm zu erzeugen

=> F_n für DN **900** mm $F_n =$ **225,00 kN / m**

Gemäß DIN EN 1916 darf die Scheiteldruckkraft von Stahlbetonrohren bei regelmäßiger Überwachung wie folgt reduziert werden:

(siehe Anlage 1: Auszug aus DIN EN 1916, Anhang I: "Prüfplan für die ständige Überwachung der Scheiteldruckfestigkeit und der Wasserdichtheit":

=> $F_c = 0,67 \times F_n$ $F_c =$ **150,75 kN / m**



Schnittkräfte Scheitel

$M_{k\ Sch} =$	M	x	F	x	r
$M_{k\ Sch} =$	0,313	x	150,75	x	0,525
$M_{k\ Sch} =$	24,77				kNm/m
$N_{k\ Sch} =$	N	x	F		
$N_{k\ Sch} =$	-0,011	x	150,75		
$N_{k\ Sch} =$	-1,66				kN/m

Schnittkräfte Kämpfer

$M_{k\ Kä} =$	M	x	F	x	r
$M_{k\ Kä} =$	-0,176	x	150,75	x	0,525
$M_{k\ Kä} =$	-13,93				kNm/m
$N_{k\ Kä} =$	N	x	F		
$N_{k\ Kä} =$	-0,500	x	150,75		
$N_{k\ Kä} =$	-75,38				kN/m



Position: 1 Scheitel

Rissnachweis nach EC2 + NA Deutschland

Beton: C40/50

Betonstahl: B500 (A,B)

Höhe $h = 15,0$ cm

Breite $b = 100,0$ cm

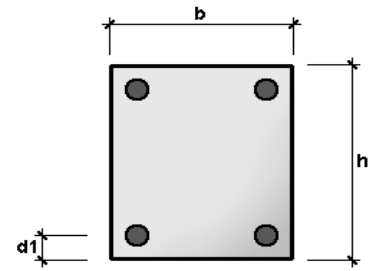
$d_1 = 6,0$ cm (Achsabstand Bewehrung)

--> Rissweite $w_k = 0,30$ mm

--> Zwang aus äußeren Lasten (Biegung mit Längskraft)

--> $M_d = 24,770$ kNm, $N_d = -1,660$ kN (Zugkraft positiv)

--> Stabdurchmesser: $\varnothing 8,0$ mm



Nachweise:

$f_{ct,eff} = 3,50$ N/mm²

$F_s = 273,84$ kN

$F_{cr} = 150,50$ kN

$A_{c,eff} = 0,0430$ m²

min. $A_s = 5,77$ cm²/m (abgeschl. Rissbild bei $F_s \geq F_{cr}$)

(= $\varnothing 8,0/8,7$ cm)



Position: 1 Kämpfer

Rissnachweis nach EC2 + NA Deutschland

Beton: C40/50

Betonstahl: B500 (A,B)

Höhe $h = 15,0$ cm

Breite $b = 100,0$ cm

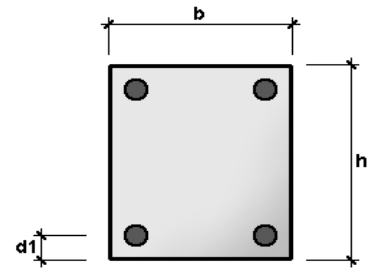
$d_1 = 4,4$ cm (Achsabstand Bewehrung)

--> Rissweite $w_k = 0,30$ mm

--> Zwang aus äußeren Lasten (Biegung mit Längskraft)

--> $M_d = 13,930$ kNm, $N_d = -75,380$ kN (Zugkraft positiv)

--> Stabdurchmesser: $\varnothing 8,0$ mm



Nachweise:

$f_{ct,eff} = 3,50$ N/mm²

$F_s = 78,08$ kN

$F_{cr} = 178,50$ kN

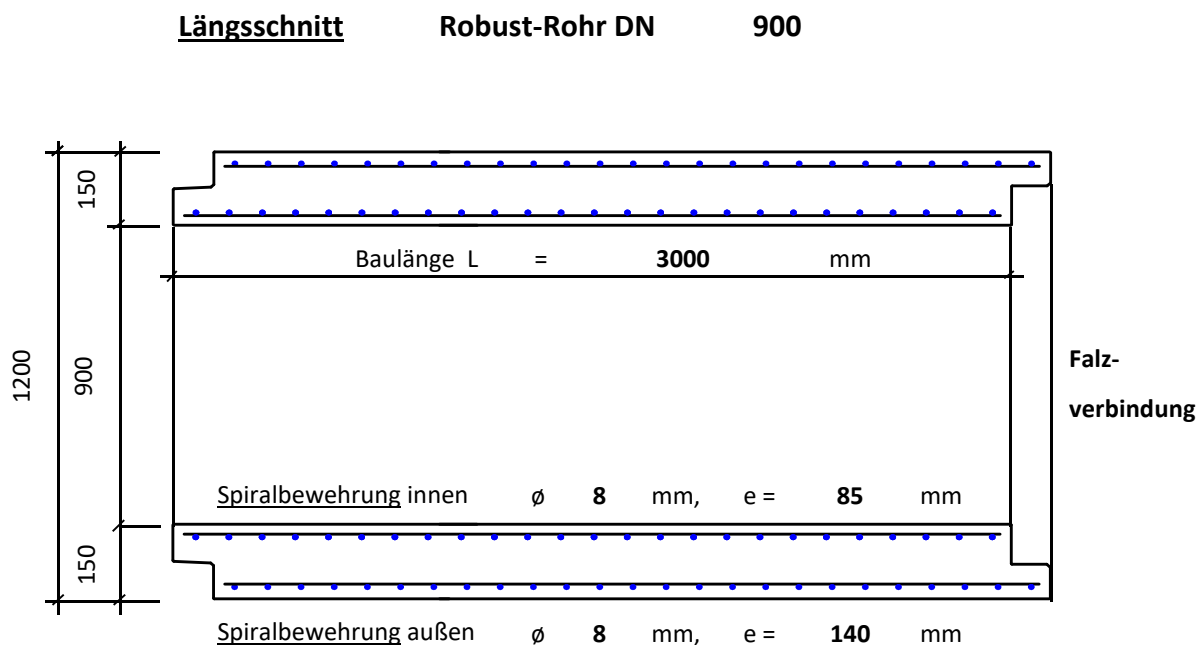
$A_{c,eff} = 0,0510$ m²

min. $A_s = 1,97$ cm²/m (Einzelrissbild bei $F_s < F_{cr}$)

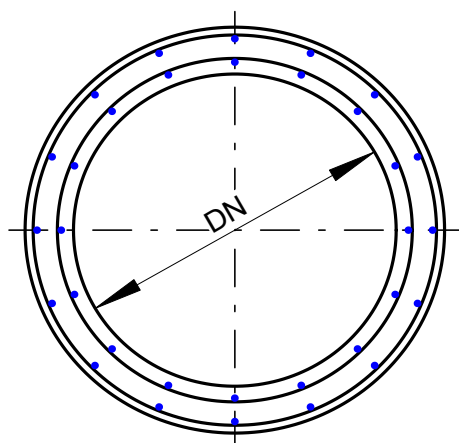
(= $\varnothing 8,0/25,5$ cm)

23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-SIA

Bewehrungsskizze Falzmuffenrohr:



Querschnitt



DN 900 mm

Längsbewehrung:

innen	12	Stk.	$\varnothing$	6	mm
außen	12	Stk.	$\varnothing$	6	mm

Baustoff:

Beton: C 40/50
Stahl: BST 500 A
Expositions-kl.: XA2

Betondeckung:

c nom innen=	50	mm	zur Längsbewehrung
Korbaußendurchmesser =			1028 mm
c nom außen=	40	mm	zum Spiraldraht
Korbaußendurchmesser =			1120 mm

Bauvorhaben:

TYPENSTATIK
23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-SIA

Rohrhersteller:

Röser III GmbH
Werk Steißlingen
Industriestraße 6
78256 Steißlingen



Statik SIA 190:2017: U1/V1 max Eü

Titel der Teilstatik:	U1/V1 max Eü
Berechnungsart:	Vollwand-/Profilrohr
Skizzen (Einbau/Rohr) in Ausdruck:	Ja
Nur relevante Lastfälle drucken:	Ja
Teilsicherheit Erdlasten:	TS _{qs1} 1,35 [-]
Teilsicherheit Verkehrslasten:	TS _{qs2} 1,50 [-]

1.1 Eingaben

1.1.1 Boden

Normalverlegeprofil:	U1 / V1
Auflagerwinkel:	60°
Lasterhöhung Auflast:	Nein
Bodenart:	Schwach bindige Böden
Werte nach Tabelle 1:	Ja
Verdichtungsgrad:	D _{Pr} 90,00 %
Grabenbreite im Scheitel:	B 2,20 m
Böschungswinkel:	ß 90,0 °
Silotheorie:	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtet ohne Nachweis

1.1.2 Belastungen

Schnittkräfte nach:	SIA D 0263:2018
Horiz. Lasten im Spannungsnachweis:	Ansatz der horizontalen Erdlast und Verkehrslast (analog A 161)
Überdeckungshöhe über Rohrscheitel:	H 5,00 m
Erdruckverhältnis K:	K 0,50 [-]
Höchster Grundwasserstand:	h _{gw} 0,00 m
Innendruck:	P _i 0,00 bar
Norm der Belastung:	SIA 190:2017
Art des Verkehrs:	Straße LM 1 (2 x 300 kN)
Beiwert Alpha:	α 0,9 [-]
Stoßbeiwert selbst definieren:	Ja
Stoßbeiwert:	ψ 1,3 [-]
Abminderungsfaktor dynamische Last:	α _T 0,90 [-]
Zusätzliche Auflast:	Nein

1.1.3 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl:	Vollwand
Material-Klasse:	Beton
Vorverformung Typ A:	δ _{v,A} 0,0 %
Lokale Vorverformung:	δ _{v,l} 0,0 %
Auswahl der Eingaben:	Da und Di
Außendurchmesser:	d _a 1.200,0 mm
Innendurchmesser:	d _i 900,0 mm
Perforation:	Ohne Perforation
Scheiteldruckkraft-Bruchlast:	FN 225,00 kN/m

1.1.3.1 Beton



Auswahl Material:

Bezeichnung:

Wichte:

Querkontraktionszahl:

Die Schwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen ist bekannt:

Die Schwingbreite bei $1 \cdot 10^8$ Lastspielen ist bekannt:

Mittlerer Elastizitätsmodul:

Ringbiegezugfestigkeit:

Biegedruckfestigkeit:

Angabe der Grenzspannungen Ringzug:

Ringzugfestigkeit:

Manuell

C40/50

γ 24,0 kN/m³

ν 0,15 [-]

Nein

Nein

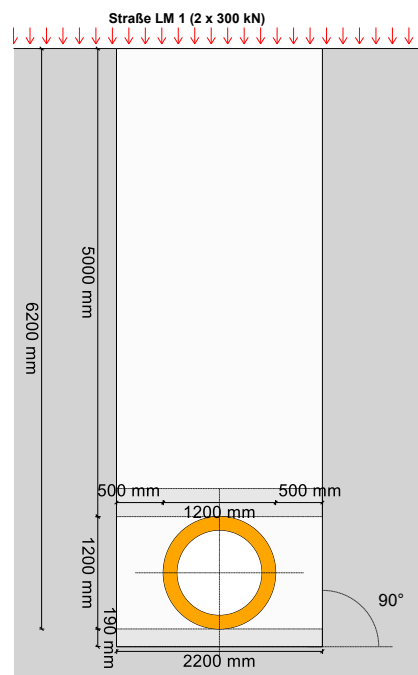
E_{cm} 35.220,50 N/mm²

σ_{RBZ} 4,00 N/mm²

σ_{BD} 6,00 N/mm²

Ja

σ_{RZ} 4,00 N/mm²





1.2 Lastfallunabhängige Ergebnisse

1.2.1 Rohr

Nennweite:	DN	900	mm
Innendurchmesser:	d_i	900,0	mm
Mittlerer Durchmesser:	D_m	1.050,00	mm
Außendurchmesser:	d_a	1.200,0	mm
Innerer Radius:	r_i	450,00	mm
Mittlerer Radius:	r_m	525,00	mm
Äußerer Radius:	r_a	600,00	mm
Profilhöhe:	h	150,00	mm
Profil Gesamtfläche:	A_T	150,00	mm ² /mm
Profil Axialfläche:	A_{Ax}	150,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	75,00	mm
Trägheitsmoment:	I	281.250,00	mm ⁴ /mm
Widerstandsmoment, innen:	W_i	3.750,00	mm ³ /mm
Widerstandsmoment, außen:	W_e	3.750,00	mm ³ /mm
Krümmungseinfluß, innen:	α_{ki}	1,10	[-]
Krümmungseinfluß, außen:	α_{ka}	0,90	[-]

1.2.2 Material

Eigengewicht:	γ	24,00	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	ν	0,15	[-]
E-Modul:	E	kurz 35.220,50	lang 35.220,50 N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit:	σ_{bD}	6,00	6,00 N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit:	σ_{bZ}	4,00	4,00 N/mm ²
Zul. Zugfestigkeit:	σ_Z	4,00	4,00 N/mm ²
Zul. Schubspannung:	τ	2,00	2,00 N/mm ²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,2E6}$	n. def. N/mm ²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,1E8}$	n. def. N/mm ²

1.3 Systemsteifigkeit

Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich (Tabelle 1):	E_B	3,00	N/mm ²
Horizontaler Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich:	E_{Bh}	1,80	N/mm ²
Systemsteifigkeit, Kurzzeit:	SF_K	38,0310	[-]
Systemsteifigkeit, Langzeit:	SF_L	38,0310	[-]

1.4 Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit, Kurzzeit:	$S0_K$	8.556.9,7891 72	[-]
Rohrsteifigkeit, Langzeit:	$S0_L$	8.556.9,7891 72	[-]

1.5 Lasten

Lastvergrößerungsfaktor:	f	1,14	[-]
--------------------------	-----	------	-----



Nach SIA 190:2017 4.2.7 wird der Lastvergrößerungsfaktor f nur dickwandige Rohre angesetzt. Da nicht definiert ist, was 'dickwandig' ist und die Logik jedes Rohr betrifft wird der Faktor immer angesetzt.

1.5.1 Erdlasten

Überdeckungshöhe über Rohrscheitel:	H	5,00	m
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	11,00	kN/m ³
Beiwert Laststeigerung Dammbedingung:	λ_{max}	1,00	[-]
Erdauflast:	p_E	114,22	kN/m ²
Teilsicherheit Erdlasten:	TS_{qs1}	1,35	[-]
Ständige Lasten vertikal:	q_{s1}	114,22	kN/m ²
Ständige Lasten vertikal, Design:	$q_{s1,d}$	154,19	kN/m ²
Ständige Lasten vertikal Sohle - Kämpfer:	$p_{E,K}$	12,00	kN/m ²
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]
Ständige Lasten horizontal:	q_{h1}	57,11	kN/m ²
Ständige Lasten horizontal, Design:	$q_{h1,d}$	77,10	kN/m ²

1.5.2 Verkehrslasten nach SIA190:2017

Verkehrslast ($\alpha = 1$):	$q_{s,\alpha=1}$	12,21	kN/m ²
Beiwert Alpha:	α	0,9	[-]
Verkehrslast vert. (ohne dyn. Beiwert):	q	10,99	kN/m ²
Stoßbeiwert:	ψ	1,3	[-]
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert):	q_T	14,28	kN/m ²
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Design:	$q_{T,d}$	21,42	kN/m ²
Abminderungsfaktor dynamische Last, Ermüden:	α_T	0,90	[-]
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Ermüden:	$q_{T,Dyn}$	12,85	kN/m ²
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Ermüden, Design:	$q_{T,Dyn,d}$	19,28	kN/m ²
Verkehrslasten vertikal:	q_{s2}	16,32	kN/m ²
Verkehrslasten vertikal, Ermüden:	$q_{s2,Dyn}$	14,69	kN/m ²
Überdeckung über Kämpfer:	h_K	5,60	m
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert):	q_{Th}	7,14	kN/m ²
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer:	$q_{T,K}$	12,08	kN/m ²
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer:	$q_{Th,K}$	4,65	kN/m ²
Verkehrslasten horizontal:	q_{h2}	5,31	kN/m ²
Verkehrslasten horizontal, Ermüden:	$q_{h2,Dyn}$	6,21	kN/m ²

1.5.3 Gesamtlast

Gesamtlast, Design:	q_{ds}	178,68	kN/m ²
---------------------	----------	--------	-------------------

1.6 Schnittkräfte

Die Vorzeichen der Normalkraftbeiwerte wurden mit -1 multipliziert. Negative Spannungen stellen Druckkräfte dar, also gegenteilig zur Dokumentation SIA D 0263.

Eigengewicht:	γ	24,00	kN/m ³
Mittlerer Durchmesser:	D_m	1.050,00	mm
Eigengewicht als Linienlast:	G_R	11,88	kN/m
Sohldruck auf Auflagerbreite:	P_v	119,93	kN/m
Sohldruck auf Auflagerbreite:	P	131,80	kN/m
Sohldruck auf Auflagerbreite:	p_U	251,05	kN/m ²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr:	p_{UT}	32,64	kN/m ²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr Ermüden:	$p_{UT,Dyn}$	29,38	kN/m ²
Stützdruckbeiwert nach Tabelle 9:	K_{st}	0,30	[-]
Stützdruck Erdlast:	$q_{stütz,E}$	34,27	kN/m ²
Stützdruck Verkehr:	$q_{stütz,T}$	4,90	kN/m ²

1.6.1 Normalkräfte

Dynamische Last für Ermüdung:	Scheitel	Kämpfer	Sohle
-------------------------------	----------	---------	-------



N-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	$n_{Tv,Dyn}$	0,106	-1,000	-0,106	[-]
Normalkraft, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	$N_{Tv,Dyn}$	0,818	-7,712	-0,818	kN/m
N-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	$n_{SvT,Dyn}$	-0,013	0,000	0,013	[-]
Normalkraft, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	$N_{SvT,Dyn}$	-0,205	0,000	0,205	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	$n_{Th,Dyn}$	-1,000	0,000	-1,000	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	$N_{Th,Dyn}$	-3,262	0,000	-3,262	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21), Ermüden	$n_{Th,S,Dyn}$	0,000	0,000	0,000	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21), Ermüden	$N_{Th,S,Dyn}$	0,000	0,000	0,000	kN/m

Normalkraft, Lasten für Ermüdung	$N_{\Sigma Dyn}$	-2,648	-7,712	-3,876	kN/m
----------------------------------	------------------	--------	--------	--------	------

Veränderliche Last:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
N-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16)	n_{Tv}	0,106	-1,000	-0,106	[-]
Normalkraft, Verkehrslast vertikal (LF 16)	N_{Tv}	0,909	-8,569	-0,909	kN/m
N-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	n_{SvT}	-0,013	0,000	0,013	[-]
Normalkraft, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	N_{SvT}	-0,227	0,000	0,227	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21)	n_{Th}	-1,000	0,000	-1,000	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. (LF 21)	N_{Th}	-2,788	0,000	-2,788	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21)	$n_{Th,S}$	0,000	0,000	0,000	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21)	$N_{Th,S}$	0,000	0,000	0,000	kN/m

Normalkraft, kurzzeitige Lasten	$N_{\Sigma K}$	-2,106	-8,569	-3,470	kN/m
---------------------------------	----------------	--------	--------	--------	------

Permanente Last:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
N-Beiwert, Eigengewicht (LF 10)	n_g	0,500	-1,571	-0,500	[-]
Normalkraft, Eigengewicht (LF 10)	N_g	0,945	-2,969	-0,945	kN/m
N-Beiwert, Erdlast vertikal (LF 16)	n_{Ev}	0,106	-1,000	-0,106	[-]
Normalkraft, Erdlast vertikal (LF 16)	N_{Ev}	6,362	-59,964	-6,362	kN/m
N-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	n_{Sv}	-0,013	0,000	0,013	[-]
Normalkraft, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	N_{Sv}	-1,748	0,000	1,748	kN/m
N-Beiwert, Erdlast horiz. (LF 21)	n_{Eh}	-1,000	0,000	-1,000	[-]
Normalkraft, Erdlast horiz. (LF 21)	N_{Eh}	-29,982	0,000	-29,982	kN/m
N-Beiwert, Erdlast horiz. Sockel (LF 4-21)	$n_{Eh,S}$	0,000	0,000	0,000	[-]
Normalkraft, Erdlast horiz. Sockel (LF 4-21)	$N_{Eh,S}$	0,000	0,000	0,000	kN/m

Normalkraft, permanente Lasten	$N_{\Sigma L}$	-24,423	-62,933	-35,541	kN/m
--------------------------------	----------------	---------	---------	---------	------

Normalkraft, Gesamtbelastung	N_{Σ}	-26,529	-71,502	-39,011	kN/m
------------------------------	--------------	---------	---------	---------	------

1.6.2 Momente

Dynamische Last für Ermüdung:

Scheitel Kämpfer Sohle



M-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	$m_{TV,Dyn}$	0,299	-0,307	0,587	[-]
Moment, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	$M_{TV,Dyn}$	1,212	-1,242	2,377	kNm/m
M-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	$m_{SvT,Dyn}$	-0,007	0,007	-0,105	[-]
Moment, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	$M_{SvT,Dyn}$	-0,053	0,054	-0,850	kNm/m
M-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	$m_{Th,Dyn}$	-0,250	0,250	-0,250	[-]
Moment, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	$M_{Th,Dyn}$	-0,428	0,428	-0,428	kNm/m
Moment, Lasten für Ermüdung	$M_{\Sigma Dyn}$	0,731	-0,759	1,099	kNm/m
Veränderliche Last:					
M-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16)	m_{TV}	Scheitel 0,299	Kämpfer -0,307	Sohle 0,587	[-]
Moment, Verkehrslast vertikal (LF 16)	M_{TV}	1,347	-1,380	2,642	kNm/m
M-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	m_{SvT}	-0,007	0,007	-0,105	[-]
Moment, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	M_{SvT}	-0,059	0,060	-0,945	kNm/m
M-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21)	m_{Th}	-0,250	0,250	-0,250	[-]
Moment, Verkehrslast horiz. (LF 21)	M_{Th}	-0,366	0,366	-0,366	kNm/m
Moment, kurzzeitige Lasten	$M_{\Sigma K}$	0,922	-0,953	1,331	kNm/m
Permanente Last:					
M-Beiwert, Eigengewicht (LF 10)	m_g	Scheitel 0,500	Kämpfer -0,571	Sohle 1,500	[-]
Moment, Eigengewicht (LF 10)	M_g	0,496	-0,566	1,488	kNm/m
M-Beiwert, Erdlast vertikal (LF 16)	m_{Ev}	0,299	-0,307	0,587	[-]
Moment, Erdlast vertikal (LF 16)	M_{Ev}	9,426	-9,655	18,486	kNm/m
M-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	m_{Sv}	-0,007	0,007	-0,105	[-]
Moment, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	M_{Sv}	-0,453	0,465	-7,267	kNm/m
M-Beiwert, Erdlast horiz. (LF 21)	m_{Eh}	-0,250	0,250	-0,250	[-]
Moment, Erdlast horiz. (LF 21)	M_{Eh}	-3,935	3,935	-3,935	kNm/m
Moment, permanente Lasten	$M_{\Sigma L}$	5,534	-5,821	8,772	kNm/m
Moment, Gesamtbelastung	M_{Σ}	6,456	-6,775	10,103	kNm/m

1.7 Nachweis Spannungen

'Gebrauchstauglichkeitsnachweis mit Formeln' nach SIA 190:2017

Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:		$\sigma_{bZ,L}$	4,00	N/mm ²	
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:		$\sigma_{bD,L}$	6,00	N/mm ²	
innen					
Spannung innen, Gesamtbelastung	$\sigma_{i,\Sigma}$	Scheitel 1,71	Kämpfer -2,46	Sohle 2,69	N/mm ²
	U_{σ}	42,7	-40,9	67,3	%
außen					
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	



Spannung außen, Gesamtbelastung	$\sigma_{a,\Sigma}$	-1,73	1,16	-2,70	N/mm ²
Ausnutzung Spannung	U_{σ}	-28,9	28,9	-45,0	%

Der Spannungsnachweis ist erbracht.

1.8 Nachweis Verformungen (IOWA-Formel)

Der Verformungsnachweis entfällt, da $SF_{kurz} > 0.1$ ist (biegesteifes Rohr).

1.9 Nachweis Tragsicherheit

Gesamtlast, Design:	q_{ds}	178,68	kN/m ²
Außendurchmesser:	d_a	1.200,0	mm
Bemessungswert der Beanspruchung aller vertikalen Einwirkungen als Flächenlast im Rohrscheitel:	q_{ds}^*	214,4108	kN/m
Einbauziffer gemäß Tabelle 3:	ZE	1,5	[-]
Scheiteldruck-Bruchlast:	F_N	225,00	kN/m
Maximale zulässiger Wert der Bruchlast:	$q_{Br,max}$	281,25	kN/m
Ausnutzung Tragsicherheit:	U_{TS}	76,2	%

Für das Rohr ist die Tragsicherheit gewährleistet.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.



Umrechnung LM 1 (SIA 190) Verkehrsbelastung

Radlast	Fahrstreifen 1 Q_{k1}	150	kN + q_{k1}	9	kN/m ²
	Fahrstreifen 2 Q_{k2}	100	kN + q_{k2}	2,5	kN/m ²
Radaufstandsfläche		0,4	m x	0,4	m
Beiwert α :	0,9				
Stoßbeiwert ϕ :	1,0		minimale Erdüberdeckung	0,50	m

Ermittlung Scheitel:

						Zuwachs an Breite für Lastverteilungsfläche (nur einseitig)	
1. Schicht	Dicke	0,30	m	Winkel	45 °	$x_1 =$	0,300 m
2. Schicht	Dicke	0,20	m	Winkel	60 °	$x_2 =$	0,115 m
3. Schicht	s Rohrwand	0,15	m			$x_3 =$	0,075 m
						Summe =	0,490 m
Fläche in Mitte Rohrwandung =						1,38 x 1,38 =	1,91 m ²
Belastung "Qk1" Fahrstreifen 1 =						150 kN / 1,91 m ² =	78,7 kN/m ²
Belastung "Qk2" Fahrstreifen 2 =						100 kN / 1,91 m ² =	52,4 kN/m ²
Belastung "pk1" =						=	9,0 kN/m ²
Belastung "pk2" =						=	2,5 kN/m ²
Gesamtbelastung Fahrstreifen 1+2						=	142,60 kN/m ²

Ermittlung Kämpfer:

						Zuwachs an Breite für Lastverteilungsfläche (nur einseitig)	
1. Schicht	Dicke	0,30	m	Winkel	45 °	$x_1 =$	0,300 m
2. Schicht	Dicke	0,80	m	Winkel	60 °	$x_2 =$	0,462 m
3. Schicht	s Rohrwand	0,15	m			$x_3 =$	0,075 m
						Summe =	0,837 m
Fläche in Mitte Rohrwandung =						2,07 x 2,07 =	4,30 m ²
Belastung "Qk1" Fahrstreifen 1 =						150 kN / 4,30 m ² =	34,9 kN/m ²
Belastung "Qk2" Fahrstreifen 2 =						100 kN / 4,30 m ² =	23,3 kN/m ²
Belastung "pk1" =						=	9,0 kN/m ²
Belastung "pk2" =						=	2,5 kN/m ²
Gesamtbelastung Fahrstreifen 1+2						=	69,63 kN/m ²



Statik SIA 190:2017: U2/V2 min Eü

Titel der Teilstatik:	U2/V2 min Eü
Berechnungsart:	Vollwand-/Profilrohr
Skizzen (Einbau/Rohr) in Ausdruck:	Ja
Nur relevante Lastfälle drucken:	Ja
Teilsicherheit Erdlasten:	TS _{qs1} 1,35 [-]
Teilsicherheit Verkehrslasten:	TS _{qs2} 1,50 [-]

1.1 Eingaben

1.1.1 Boden

Normalverlegeprofil:	U2 / V2
Lasterhöhung Auflast:	Nein
Bodenart:	Schwach bindige Böden
Werte nach Tabelle 1:	Ja
Verdichtungsgrad:	D _{Pr} 90,00 %
Grabenbreite im Scheitel:	B 2,20 m
Böschungswinkel:	ß 90,0 °
Silotheorie:	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtet ohne Nachweis

1.1.2 Belastungen

Schnittkräfte nach:	SIA D 0263:2018
Horiz. Lasten im Spannungsnachweis:	Ansatz der horizontalen Erdlast und Verkehrslast (analog A 161)
Überdeckungshöhe über Rohrscheitel:	H 0,50 m
Erddruckverhältnis K:	K 0,50 [-]
Höchster Grundwasserstand:	h _{gw} 0,00 m
Innendruck:	P _I 0,00 bar
Norm der Belastung:	Freie Eingabe
Bodenspannung in Scheitelhöhe, ohne Stoßbeiwert:	p 142,60 kN/m ²
Bodenspannung in Kämpferhöhe, ohne Stoßbeiwert:	p _K 69,63 kN/m ²
Stoßbeiwert Kämpfer:	φ _K 1,00 [-]
Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:	Nein
Abminderungsfaktor dynamische Last:	α _T 0,90 [-]
Zusätzliche Auflast:	Nein

1.1.3 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl:	Vollwand
Material-Klasse:	Beton
Vorverformung Typ A:	δ _{v,A} 0,0 %
Lokale Vorverformung:	δ _{v,l} 0,0 %
Auswahl der Eingaben:	Da und Di
Außendurchmesser:	d _a 1.200,0 mm
Innendurchmesser:	d _i 900,0 mm
Perforation:	Ohne Perforation
Scheiteldruckkraft-Bruchlast:	FN 225,00 kN/m

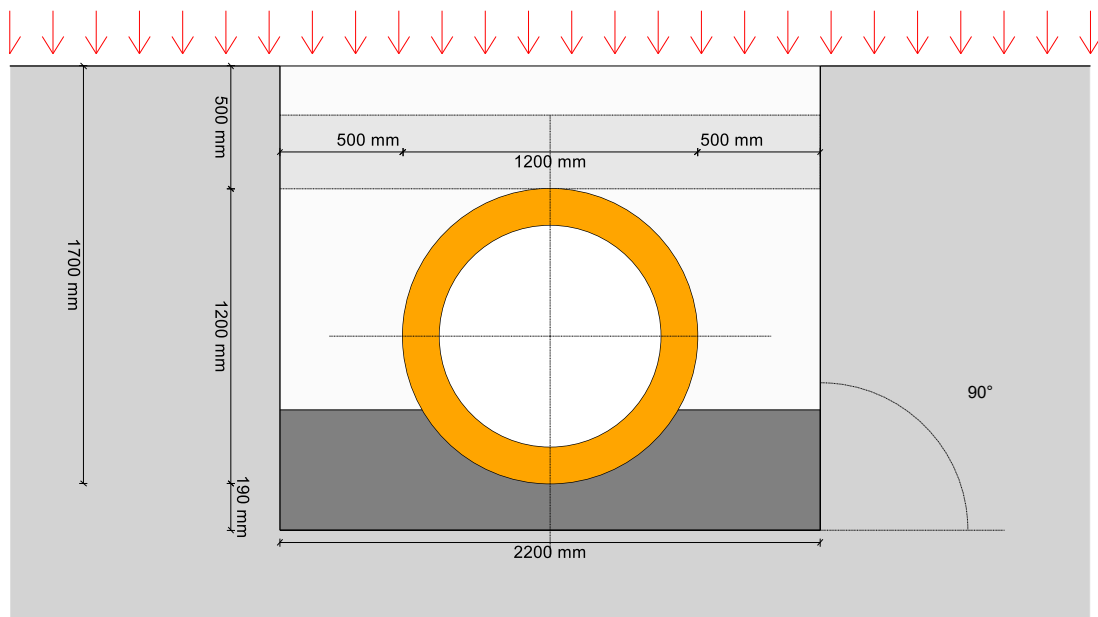
1.1.3.1 Beton

Auswahl Material:	Manuell
-------------------	---------



Bezeichnung:	C40/50		
Wichte:	γ	24,0	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	ν	0,15	[-]
Die Schwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen ist bekannt:	Nein		
Die Schwingbreite bei $1 \cdot 10^8$ Lastspielen ist bekannt:	Nein		
Mittlerer Elastizitätsmodul:	E_{cm}	35.220,50	N/mm ²
Ringbiegezugfestigkeit:	σ_{RBZ}	4,00	N/mm ²
Biegedruckfestigkeit:	σ_{BD}	6,00	N/mm ²
Angabe der Grenzspannungen Ringzug:	Ja		
Ringzugfestigkeit:	σ_{RZ}	4,00	N/mm ²

LM1 lt SIA 190 - Bodenspannung in Scheitelhöhe, ohne Stoßbeiwert 142,6 kN/m²





1.2 Lastfallunabhängige Ergebnisse

1.2.1 Rohr

Nennweite:	DN	900	mm
Innendurchmesser:	d_i	900,0	mm
Mittlerer Durchmesser:	D_m	1.050,00	mm
Außendurchmesser:	d_a	1.200,0	mm
Innerer Radius:	r_i	450,00	mm
Mittlerer Radius:	r_m	525,00	mm
Äußerer Radius:	r_a	600,00	mm
Profilhöhe:	h	150,00	mm
Profil Gesamtfläche:	A_T	150,00	mm ² /mm
Profil Axialfläche:	A_{Ax}	150,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	75,00	mm
Trägheitsmoment:	I	281.250,00	mm ⁴ /mm
Widerstandsmoment, innen:	W_i	3.750,00	mm ³ /mm
Widerstandsmoment, außen:	W_e	3.750,00	mm ³ /mm
Krümmungseinfluß, innen:	α_{ki}	1,10	[-]
Krümmungseinfluß, außen:	α_{ka}	0,90	[-]

1.2.2 Material

Eigengewicht:	γ	24,00	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	ν	0,15	[-]
E-Modul:	E	kurz 35.220,50	lang 35.220,50 N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit:	σ_{bD}	6,00	6,00 N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit:	σ_{bZ}	4,00	4,00 N/mm ²
Zul. Zugfestigkeit:	σ_Z	4,00	4,00 N/mm ²
Zul. Schubspannung:	τ	2,00	2,00 N/mm ²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,2E6}$	n. def. N/mm ²
Schwingbreite:		$2\sigma_{a,1E8}$	n. def. N/mm ²

1.3 Systemsteifigkeit

Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich (Tabelle 1):	E_B	3,00	N/mm ²
Horizontaler Verformungsmodul des Bodens im Rohrbereich:	E_{Bh}	1,80	N/mm ²
Systemsteifigkeit, Kurzzeit:	SF_K	38,0310	[-]
Systemsteifigkeit, Langzeit:	SF_L	38,0310	[-]

1.4 Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit, Kurzzeit:	$S0_K$	8.556.9,7891 72	[-]
Rohrsteifigkeit, Langzeit:	$S0_L$	8.556.9,7891 72	[-]

1.5 Lasten

Lastvergrößerungsfaktor:	f	1,14	[-]
--------------------------	-----	------	-----



Nach SIA 190:2017 4.2.7 wird der Lastvergrößerungsfaktor f nur dickwandige Rohre angesetzt. Da nicht definiert ist, was 'dickwandig' ist und die Logik jedes Rohr betrifft wird der Faktor immer angesetzt.

1.5.1 Erdlasten

Überdeckungshöhe über Rohrscheitel:	H	0,50	m
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	11,00	kN/m ³
Beiwert Laststeigerung Dammbedingung:	$\lambda_{\max}$	1,00	[-]
Erdauflast:	p_E	11,42	kN/m ²
Teilsicherheit Erdlasten:	TS_{qs1}	1,35	[-]
Ständige Lasten vertikal:	q_{s1}	11,42	kN/m ²
Ständige Lasten vertikal, Design:	$q_{s1,d}$	15,42	kN/m ²
Ständige Lasten vertikal Sohle - Kämpfer:	$p_{E,K}$	12,00	kN/m ²
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]
Ständige Lasten horizontal:	q_{h1}	5,71	kN/m ²
Ständige Lasten horizontal, Design:	$q_{h1,d}$	7,71	kN/m ²

1.5.2 Verkehrslasten manuelle Definition

Bodenspannung in Scheitelhöhe, ohne Stoßbeiwert:	p	142,60	kN/m²		
Stoßbeiwert:	φ	1,00	[-]		
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert):	q _T	142,60	kN/m²		
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Design:	q _{T,d}	213,90	kN/m²		
Abminderungsfaktor dynamische Last, Ermüden:	α _T	0,90	[-]		
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Ermüden:	q _{T,Dyn}	128,34	kN/m²		
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Ermüden, Design:	q _{T,Dyn,d}	192,51	kN/m²		
Bodenspannung in Kämpferhöhe, ohne Stoßbeiwert:	p _K	69,63	kN/m²		
Stoßbeiwert Kämpfer:	φ _K	1,00	[-]		
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer	q _{T,K}	69,63	1,50	104,45	kN/m²
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]		
Verkehrslast hor. (ohne dyn. Beiwert), Kämpfer:	q _{h,K}	34,82	kN/m²		
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer	q _{Th,K}	34,82	1,50	52,22	kN/m²
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer	q _{T,KT,Dyn}	62,67	1,50	94,00	kN/m²
Kämpfer, Ermüden					
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert), Ermüden	q _{Th,Dyn}	31,33	1,50	47,00	kN/m²
Verkehrslasten vertikal:	q _{s2}	162,97	kN/m²		
Verkehrslasten vertikal, Ermüden:	q _{s2,Dyn}	146,67	kN/m²		
Überdeckung über Kämpfer:	h _K	1,10	m		
Erdruckverhältnis K:	K	0,50	[-]		
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert):	q _{Th}	71,30	kN/m²		
Verkehrslast vert. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer:	q _{T,K}	69,63	kN/m²		
Verkehrslast hor. (inkl. dyn. Beiwert), Kämpfer:	q _{Th,K}	34,82	kN/m²		
Verkehrslasten horizontal:	q _{h2}	39,79	kN/m²		
Verkehrslasten horizontal, Ermüden:	q _{h2,Dyn}	35,81	kN/m²		

1.5.3 Gesamtlast

Gesamtlast, Design:	q_{ds}	259,88	kN/m ²
---------------------	----------	--------	-------------------

1.6 Schnittkräfte

Die Vorzeichen der Normalkraftbeiwerte wurden mit -1 multipliziert. Negative Spannungen stellen Druckkräfte dar, also gegenteilig zur Dokumentation SIA D 0263.

Eigengewicht:	γ	24,00	kN/m ³
Mittlerer Durchmesser:	D_m	1.050,00	mm
Eigengewicht als Linienlast:	G_R	11,88	kN/m
Sohldruck auf Auflagerbreite:	P_v	11,99	kN/m
Sohldruck auf Auflagerbreite:	P	23,87	kN/m
Sohldruck auf Auflagerbreite:	p_U	26,25	kN/m ²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr:	p_{UT}	188,18	kN/m ²
Sohldruck auf Auflagerbreite, Verkehr Ermüden:	$p_{UT,Dyn}$	169,36	kN/m ²
Stützdruckbeiwert nach Tabelle 9:	K_{st}	0,30	[-]



Stützdruck Erdlast:	Q _{stütz,E}	3,43	kN/m ²
Stützdruck Verkehr:	Q _{stütz,T}	48,89	kN/m ²

1.6.1 Normalkräfte

Dynamische Last für Ermüdung:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
N-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	n _{Tv,Dyn}	0,106	-1,000	-0,106	[-]
Normalkraft, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	N _{Tv,Dyn}	8,170	-77,004	-8,170	kN/m
N-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	n _{SvT,Dyn}	-0,069	0,000	0,069	[-]
Normalkraft, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	N _{SvT,Dyn}	-6,128	0,000	6,128	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	n _{Th,Dyn}	-0,960	0,000	-0,540	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	N _{Th,Dyn}	-18,047	0,000	-10,154	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21), Ermüden	n _{Th,S,Dyn}	-0,040	0,000	-0,460	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21), Ermüden	N _{Th,S,Dyn}	-0,926	0,000	-10,625	kN/m
Normalkraft, Lasten für Ermüdung	N _{ΣDyn}	-16,930	-77,004	-22,821	kN/m

Veränderliche Last:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
N-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16)	n _{Tv}	0,106	-1,000	-0,106	[-]
Normalkraft, Verkehrslast vertikal (LF 16)	N _{Tv}	9,078	-85,560	-9,078	kN/m
N-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	n _{SvT}	-0,069	0,000	0,069	[-]
Normalkraft, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	N _{SvT}	-6,809	0,000	6,809	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21)	n _{Th}	-0,960	0,000	-0,540	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. (LF 21)	N _{Th}	-20,052	0,000	-11,282	kN/m
N-Beiwert, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21)	n _{Th,S}	-0,040	0,000	-0,460	[-]
Normalkraft, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21)	N _{Th,S}	-1,029	0,000	-11,805	kN/m
Normalkraft, kurzzeitige Lasten	N _{ΣK}	-18,811	-85,560	-25,356	kN/m

Permanente Last:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
N-Beiwert, Eigengewicht (LF 10)	n _g	0,500	-1,571	-0,500	[-]
Normalkraft, Eigengewicht (LF 10)	N _g	0,945	-2,969	-0,945	kN/m
N-Beiwert, Erdlast vertikal (LF 16)	n _{Ev}	0,106	-1,000	-0,106	[-]
Normalkraft, Erdlast vertikal (LF 16)	N _{Ev}	0,636	-5,996	-0,636	kN/m
N-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	n _{Sv}	-0,069	0,000	0,069	[-]
Normalkraft, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	N _{Sv}	-0,950	0,000	0,950	kN/m
N-Beiwert, Erdlast horiz. (LF 21)	n _{Eh}	-0,960	0,000	-0,540	[-]
Normalkraft, Erdlast horiz. (LF 21)	N _{Eh}	-2,878	0,000	-1,619	kN/m
N-Beiwert, Erdlast horiz. Sockel (LF 4-21)	n _{Eh,S}	-0,040	0,000	-0,460	[-]
Normalkraft, Erdlast horiz. Sockel (LF 4-21)	N _{Eh,S}	-0,072	0,000	-0,827	kN/m
Normalkraft, permanente Lasten	N _{ΣL}	-2,319	-8,965	-3,078	kN/m



Normalkraft, Gesamtbelastung	N_{Σ}	-21,130	-94,525	-28,435	kN/m
------------------------------	--------------	---------	---------	---------	------

1.6.2 Momente

Dynamische Last für Ermüdung:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
M-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	$m_{Tv,Dyn}$	0,299	-0,307	0,587	[-]
Moment, Verkehrslast vertikal (LF 16), Ermüden	$M_{Tv,Dyn}$	12,104	-12,399	23,739	kNm/m
M-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	$m_{SvT,Dyn}$	-0,033	0,036	-0,270	[-]
Moment, Sohlpressung (LF 17), Verkehr Ermüden	$M_{SvT,Dyn}$	-1,535	1,683	-12,606	kNm/m
M-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	$m_{Th,Dyn}$	-0,232	0,228	-0,187	[-]
Moment, Verkehrslast horiz. (LF 21), Ermüden	$M_{Th,Dyn}$	-2,285	2,254	-1,843	kNm/m
M-Beiwert, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21), Ermüden	$m_{Th,S,Dyn}$	-0,018	0,022	-0,063	[-]
Moment, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21), Ermüden	$M_{Th,S,Dyn}$	-0,224	0,262	-0,768	kNm/m

Moment, Lasten für Ermüdung	$M_{\Sigma Dyn}$	8,061	-8,200	8,523	kNm/m
-----------------------------	------------------	-------	--------	-------	-------

Veränderliche Last:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
M-Beiwert, Verkehrslast vertikal (LF 16)	m_{Tv}	0,299	-0,307	0,587	[-]
Moment, Verkehrslast vertikal (LF 16)	M_{Tv}	13,449	-13,776	26,377	kNm/m
M-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	m_{SvT}	-0,033	0,036	-0,270	[-]
Moment, Sohlpressung (LF 17), Verkehr	M_{SvT}	-1,705	1,869	-14,006	kNm/m
M-Beiwert, Verkehrslast horiz. (LF 21)	m_{Th}	-0,232	0,228	-0,187	[-]
Moment, Verkehrslast horiz. (LF 21)	M_{Th}	-2,539	2,505	-2,048	kNm/m
M-Beiwert, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21)	$m_{Th,S}$	-0,018	0,022	-0,063	[-]
Moment, Verkehrslast horiz. Sockel (LF 4-21)	$M_{Th,S}$	-0,249	0,291	-0,853	kNm/m

Moment, kurzzeitige Lasten	$M_{\Sigma K}$	8,956	-9,111	9,470	kNm/m
----------------------------	----------------	-------	--------	-------	-------

Permanente Last:

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
M-Beiwert, Eigengewicht (LF 10)	m_g	0,500	-0,571	1,500	[-]
Moment, Eigengewicht (LF 10)	M_g	0,496	-0,566	1,488	kNm/m
M-Beiwert, Erdlast vertikal (LF 16)	m_{Ev}	0,299	-0,307	0,587	[-]
Moment, Erdlast vertikal (LF 16)	M_{Ev}	0,943	-0,965	1,849	kNm/m
M-Beiwert, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	m_{Sv}	-0,033	0,036	-0,270	[-]
Moment, Sohlpressung (LF 17), Langzeitig	M_{Sv}	-0,238	0,261	-1,954	kNm/m
M-Beiwert, Erdlast horiz. (LF 21)	m_{Eh}	-0,232	0,228	-0,187	[-]
Moment, Erdlast horiz. (LF 21)	M_{Eh}	-0,364	0,359	-0,294	kNm/m
M-Beiwert, Erdlast horiz. Sockel (LF 4-21)	$m_{Eh,S}$	-0,018	0,022	-0,063	[-]
Moment, Erdlast horiz. Sockel (LF 4-21)	$M_{Eh,S}$	-0,017	0,020	-0,060	kNm/m

Moment, permanente Lasten	$M_{\Sigma L}$	0,819	-0,891	1,030	kNm/m
---------------------------	----------------	-------	--------	-------	-------

Moment, Gesamtbelastung	M_{Σ}	9,775	-10,002	10,499	kNm/m
-------------------------	--------------	-------	---------	--------	-------



1.7 Nachweis Spannungen

'Gebrauchstauglichkeitsnachweis mit Formeln' nach SIA 190:2017

Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:	$\sigma_{bZ,L}$	4,00	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$\sigma_{bD,L}$	6,00	N/mm ²

innen

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Spannung innen, Gesamtbelastung	$\sigma_{i,\Sigma}$	2,71	-3,55	2,88	N/mm ²
Ausnutzung Spannung	U_{σ}	67,9	-59,2	71,9	%

außen

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Spannung außen, Gesamtbelastung	$\sigma_{a,\Sigma}$	-2,50	1,78	-2,72	N/mm ²
Ausnutzung Spannung	U_{σ}	-41,7	44,6	-45,4	%

Der Spannungsnachweis ist erbracht.

1.8 Nachweis Verformungen (IOWA-Formel)

Der Verformungsnachweis entfällt, da $SF_{kurz} > 0.1$ ist (biegesteifes Rohr).

1.9 Nachweis Tragsicherheit

Gesamtlast, Design:	q_{ds}	259,88	kN/m ²
Außendurchmesser:	d_a	1.200,0	mm
Bemessungswert der Beanspruchung aller vertikalen Einwirkungen als Flächenlast im Rohrscheitel:	q_{ds}^*	311,8517	kN/m
Einbauziffer gemäß Tabelle 3:	ZE	2,5	[-]
Scheiteldruck-Bruchlast:	F_N	225,00	kN/m
Maximale zulässiger Wert der Bruchlast:	$q_{Br,max}$	468,75	kN/m
Ausnutzung Tragsicherheit:	U_{TS}	66,5	%

Für das Rohr ist die Tragsicherheit gewährleistet.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

TYPENSTATIK

23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Statische Berechnung von Stahlbetonrohren gem. DIN EN 1916 / DWA-A 139 / DIN V 1201
nach ATV-DVWK-A 127 / DIN V 1202

Rohrhersteller: Röser III GmbH
Werk Steißlingen
Industriestraße 6
78256 Steißlingen

Verkehrsbelastung: LM 1 nach DIN EN 1991-2

Erdüberdeckung/ Auflagerwinkel:	$2\alpha = 120^\circ$	mit Verkehrsbelastung	LM1	mit
	0,30	m bis 7,00 m		Erdauflast über Rohrscheitel
	$2\alpha = 90^\circ$	mit Verkehrsbelastung	LM1	mit
	0,50	m bis 6,00 m		Erdauflast über Rohrscheitel

Bettung: Bettung Typ 1 auf gut verdichtbar abgestuften Sand-Kies bzw. Brechsand-Splitt bzw.
gem. DIN EN 1610 Bettung Typ 3 auf geeignetem, nicht bindigem bis schwach bindigem, steinfreiem Baugrund:
bzw. DWA-A 139 Höhe der Bettungsschichten:

obere Bettung	min b	= 0,15 da =	0,18 m (90° Auflager)
	min b	= 0,25 da =	0,30 m (120° Auflager)
untere Bettung	min a	= 100 mm + 1/10 DN mm =	0,19 m bzw.
bei hartem Baugrund	min a	= 100 mm + 1/5 DN mm =	0,15 m
oder Fels		(min. 150 mm)	

Einbau: Unter Dammbedingung bzw. in weitem, geböschtem oder senkrecht verbaute Graben;
gem. DIN EN 1610 lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenverfüllung; Material siehe
bzw. DWA-A 139 nachfolgende Angaben und Berechnungsausdrucke

Grundwasser: Es wird kein Grundwassereinfluss berücksichtigt.

Freies INGENIEURBÜRO
Dr.sc.techn. Uwe Rößler

Hertlingstraße 5, 76726 Germersheim

Telefon: +49 7274 / 700 1972

<http://www.uweroessler.de>

Mobil: +49 173 / 54 117 39

E-mail: info@uweroessler.de



23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Allgemeine Hinweise bzw. Literatur:

Besondere Hinweise:

Die statische Berechnung wurde erstellt für die genannten Erdüberdeckungen und Gesamtbelastungen sowie die dort angegebenen Auflagerungs- und Einbaubedingungen.

Die Berechnung erfolgte unter Berücksichtigung der Grundsätze der ATV-DVWK-A 127 (Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen) sowie der maßgebenden Normenwerke DIN EN 1916, DIN V 1201 und DIN V 1202.

Für die Gesamtbemessung entsprechend den Regeln des Stahlbetonbaus wurde der Eurocode EC2 sowie DIN V 1202 berücksichtigt.

Die der statischen Berechnung zu Grunde gelegten Annahmen sind bauseits bzw. unmittelbar am Einbauort sicherzustellen. Bei Abweichungen hiervon ist unbedingt Kontakt mit dem Aufsteller der Berechnung aufzunehmen; weitergehende Maßnahmen sind abzustimmen und gemeinsam festzulegen !

Grundlagen: DIN EN 1992 (EC 2), DIN EN 1991-2 (2010-12), DIN EN 1916 (2003-04), DIN V 1201 (2004-08), DIN V 1202 (2004-08), DIN EN 1610 (2015-12), DIN EN 206-1 (2021-06) mit DIN 1045-2 (2008-08), DIN 488 (2009-08), DWA-A 143-2 (2015-07), DWA-A 139 (2019-03), ATV-DVWK-A 127 (2000-08)

Baustoffe: Beton-Festigkeitsklasse **C 40/50** Betonstahl **BST 500 A**
Expositionsklasse **XA 2**

Bewehrungshinweise:

Gemäß den durchgeführten Berechnungsvarianten, mit den zu Grunde gelegten Einbau- bzw. Belastungsbedingungen (Ergebnisübersicht siehe Blatt 4) sowie unter Berücksichtigung fertigungstechnischer Randbedingungen, werden die Rohre für die Standardfertigung wie folgt bewehrt:

Bewehrungskorb für Rohr DN 900 Robust-Rohr (Bewehrung Standardfertigung)

Bewehrung innen:

Spiralbewehrung:	ø = 8 mm	e = 85 mm	(11,8 Stk./m)
Längsbewehrung:	ø = 6 mm	12 Stk.	vorh. As innen = 5,9 cm²/m
Betondeckung nom c(innen)=	50 mm	zur Längsbewehrung	
Korbaußendurchmesser =	1028 mm		

Bewehrung außen:

Spiralbewehrung:	ø = 8 mm	e = 140 mm	(7,1 Stk./m)
Längsbewehrung:	ø = 6 mm	12 Stk.	vorh. As außen = 3,6 cm²/m
Betondeckung nom c(außen)=	40 mm	zum Spiraldraht	
Korbaußendurchmesser =	1120 mm		

Mindestbewehrungsgehalt gem. DIN EN 1916

laut Abs. 5.2.1 Bewehrung für Stahlbetonbauteile mindestens

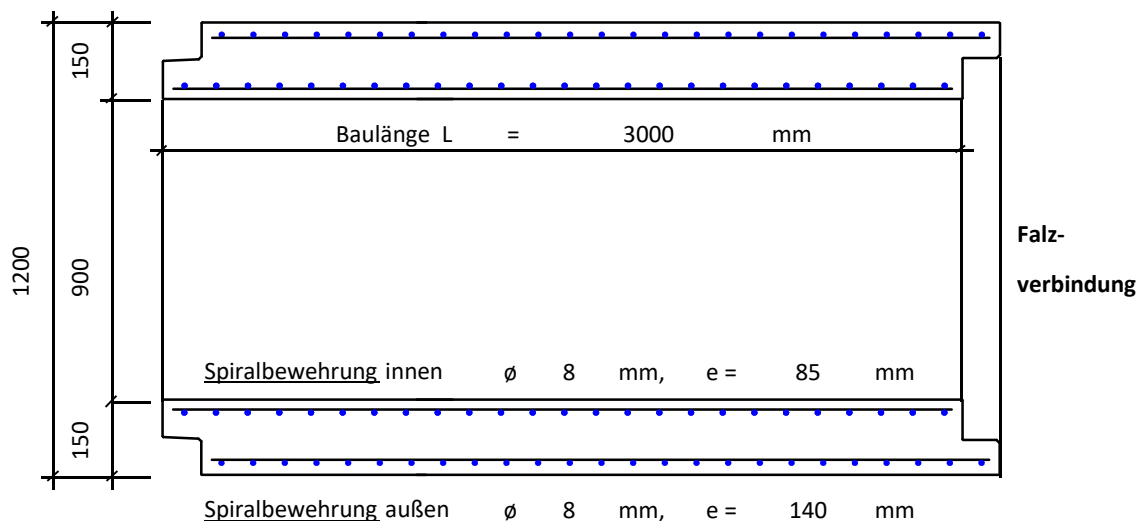
0,25 % der Längsquerschnittsfläche des Betonquerschnittes (für gerippten Stahl)
entspricht: **3,75 cm²/m** < vorhanden gesamt: **9,50 cm²/m**

23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Bewehrungsskizze Falzmuffenrohr:

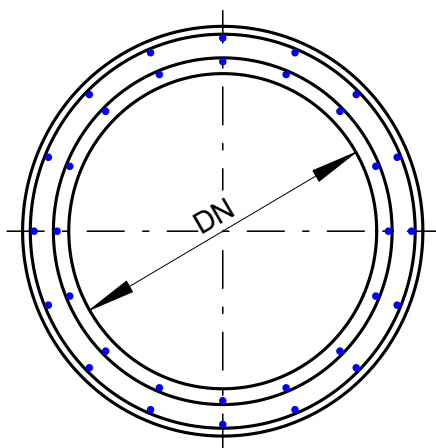
Längsschnitt

Robust-Rohr DN 900



Querschnitt

DN 900 mm



Längsbewehrung :

innen 12 Stk. $\varnothing$ 6 mm,
außen 12 Stk. $\varnothing$ 6 mm,
auf Umfang gleichmäßig verteilt

Baustoff :

Beton: C 40/50 nach DIN EN 206-1

Stahl :

BST 500 A nach DIN 488

Betondeckung:

c nom (innen) = 50 mm zur Längsbewehrung
Korbaußendurchmesser = 1028 mm
c nom (außen) = 40 mm zum Spiraldraht
Korbaußendurchmesser = 1120 mm

Bauvorhaben:

TYPENSTATIK

23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Rohrhersteller:

Röser III GmbH
Werk Steißlingen
Industriestraße 6
78256 Steißlingen



23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Einbaubedingungen:

Überschüttungsbedingung	A1	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden verdichtete Grabenverfüllung bzw. Dammschüttung
Einbettungsbedingung	B1	Lagenweise gegen den gewachsenen Boden bzw. lagenweise in der Dammschüttung verdichtete Bettung und Seitenverfüllung
Bodengruppe Einbettung	G3	(Bindige Mischböden und Schluff - konservative Annahme)
E-modul E1 (Überschüttung):	3	kN/m ² (Boden G3 bei 92% Proctordichte) Berechnung E1 = E20 nach Tabelle 8 ATV-DVWK-A 127
Bodegruppe unter Rohr	G3	(Bindige Mischböden und Schluff - konservative Annahme)
E-Modul E4	30	kN/m ² (entspricht 10 x E1)

Es werden folgende Lastfälle

mit Verkehrsbelastung LM 1 nach DIN EN 1991-2 untersucht:

Lastfall 1:

min. Erdüberdeckung von 0,3 m, Auflagerwinkel $2\alpha = 120^\circ$ in Sand/Sand-Kies, A1/B1/G3-Damm
für Verkehrsbelastung LM 1 von 0,30 m wurde die Vertikallast eines Einzelrades von 150 kN ermittelt
mit Ermüdungsnachweis (Nachweis für geschweißte Bewehrungskörbe unter dynamischer Lasten Schwingbreite für $2 \cdot 10^6$ Zyklen $\Delta\sigma_{Rsk} = 74 \text{ N/mm}^2$)

Lastfall 2:

max. Erdüberdeckung von 7 m, Auflagerwinkel $2\alpha = 120^\circ$ in Sand/Sand-Kies, A1/B1/G3-Damm

Lastfall 3:

min. Erdüberdeckung von 0,5 m, Auflagerwinkel $2\alpha = 90^\circ$ in Sand/Sand-Kies, A1/B1/G3-Damm
mit Verkehrsbelastung LM 1 mit 3,0 m Fahrbahnstreifenbreite
und Ermüdungsnachweis (Nachweis für geschweißte Bewehrungskörbe unter dynamischer Lasten Schwingbreite für $2 \cdot 10^6$ Zyklen $\Delta\sigma_{Rsk} = 74 \text{ N/mm}^2$)

Lastfall 4:

max. Erdüberdeckung von 6 m, Auflagerwinkel $2\alpha = 90^\circ$ in Sand/Sand-Kies, A1/B1/G3-Damm



23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse mit Verkehrsbelastung LM 1 nach DIN EN 1991-2 :

Lastfall 1:	Auflagerwinkel (2 Alpha)	120 °	min. Erdüberdeckung	0,30	m
Bedingung:	Damm A1 / B1 / G3		Scheitel	Kämpfer	Sohle
stat. erforderl. Bewehrungsgehalt			3,09	1,28	3,29 (cm ² /m)
max. Rohrvergleichsspannung			2,48	1,78	2,65 (N/mm ²)
erf. Bewehrung aufgrund Ermüdungsnachweis			5,34	2,14	5,50 (cm ² /m)
Ausnutzung Ermüden Stahl			90,3	59,6	93,0 (%)
Ausnutzung Ermüden Beton			57,2	57,8	58,0 (%)
Lastfall 2:	Auflagerwinkel (2 Alpha)	120 °	max. Erdüberdeckung	7,00	m
Bedingung:	Damm A1 / B1 / G3		Scheitel	Kämpfer	Sohle
stat. erforderl. Bewehrungsgehalt			5,23	2,02	5,58 (cm ² /m)
max. Rohrvergleichsspannung			4,24	3,01	4,52 (N/mm ²)
Lastfall 3:	Auflagerwinkel (2 Alpha)	90 °	min. Erdüberdeckung	0,50	m
Bedingung:	Damm A1 / B1 / G3		Scheitel	Kämpfer	Sohle
stat. erforderl. Bewehrungsgehalt			3,14	1,37	3,61 (cm ² /m)
max. Rohrvergleichsspannung			2,52	1,83	2,92 (N/mm ²)
erf. Bewehrung aufgrund Ermüdungsnachweis			4,78	2,08	5,24 (cm ² /m)
Ausnutzung Ermüden Stahl			80,9	58,0	88,7 (%)
Ausnutzung Ermüden Beton			58,2	59,0	59,7 (%)
Lastfall 4:	Auflagerwinkel (2 Alpha)	90 °	max. Erdüberdeckung	6,00	m
Bedingung:	Damm A1 / B1 / G3		Scheitel	Kämpfer	Sohle
stat. erforderl. Bewehrungsgehalt			4,68	1,91	5,51 (cm ² /m)
max. Rohrvergleichsspannung			3,80	2,74	4,47 (N/mm ²)

Der Berechnungsausdruck für den maßgebenden Belastungsfall (Lastfall 2) liegt als Komplettausdruck / Anlage auf den nachfolgenden Seiten bei.

Gewählte Bewehrung - siehe Blatt 2:

innen: **5,9 cm²/m**
außen: **3,6 cm²/m**

Mit dem letztlich gewählten Bewehrungsgehalt (Regelbewehrung für Standard-Bedingungen) ist auch der Nachweis gegen Ermüdung (Zusatznachweis für geschweißte Bewehrungskörbe unter dynamischer Lasten Schwingbreite für $2 \cdot 10^6$ Zyklen $\Delta \sigma_{Rsk} = 74 \text{ N/mm}^2$) erbracht.



23-041 - K-FM DN 900/DA 1200-RR-S-LM1_INDEX A

Werden die Rohre alternativ im verbauten Einfachgraben (mit wirksamer Verdichtung des Einbettungs- und Verfüllmaterials gegen die Grabenwände) sowie ohne Unter-
rammung eingebaut (Bedingungen A2 / B2 / G3 gem. ATV-DVWK-A 127), so ergeben
sich günstigere Belastungs- bzw. Randbedingungen.

Die Belastung der Rohre ist dann geringer, als bei der für die Typenstatik zu Grunde
gelegten Dammbedingung.

Ein gesonderter statischer Nachweis, bezogen auf den Projekt- bzw. Einzelfall erübrigt
sich damit für diese Bedingungen, sofern die in der Berechnung angenommenen
Auflagerwinkel je Überdeckungsbereich eingehalten werden.

Für andere Einbausituationen bzw. Verkehrsbelastungen ist ein gesonderter statischer
Nachweis erforderlich !

Die Forderungen der DIN EN 1916 bzw. des Arbeitsblattes DWA-A 139 sind für den Einbau
der Abwasserleitungen bzw. -kanäle zwingend zu beachten !

Bei evtl. erforderlichen Rückfragen stehe ich Ihnen jederzeit gerne zur Verfügung.

erstellt: Germersheim, den 12.12.2023

Dr. sc. techn. Uwe Rössler



Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage: Lastfall 2

Titel der Teilstatik: LF 2 max Eü 120°

Annahmen: max Erdüberdeckung von 7,00 m
120° Auflagerung in Sand oder Sand/Kies

Berechnungsart: Stahlbeton
Skizzen (Einbau/Rohr) in Ausdruck: Ja

1.1 Eingaben

1.1.1 Sicherheiten

Sicherheitsklasse:	A (Regelfall)
Sicherheit Stabilität nach Tabelle 13:	Ohne Vorverformungen (2,5 / 2,0)
Zulässige Verformung:	6% (Regelfall)
Behandlung von Innendruck:	Gemäß Fußnote des ATV-DVWK-A 127
Kleinere Biegedruck-Sicherheiten:	Nein (ATV-DVWK-A 127)
Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung:	Nach Regelwerk
Berücksichtigung von dyn pvh*:	Nach Norm
Berücksichtigung der Vorverformungen Typ A in Verformungsnachweis:	Ja
Behandlung Systemsteifigkeit VRB nach:	DWA-A 161:2014 (nach Materialart)
Rohrsteifigkeit nach Regelwerk:	Ja

1.1.2 Boden

Bodengruppe Einbettung:	G3
Berechnung E20:	Tabelle 8 (A127)
$E4 = 10 \cdot E1$:	Ja
Anwendung von Silotheorie:	Automatisch
K2 nach Norm:	Ja

1.1.3 Belastung

Überdeckungshöhe:	h	7,00	m
Minimaler Grundwasserstand über Sohle:	$h_{W,min}$	0,00	m
Maximaler Grundwasserstand über Sohle:	$h_{W,max}$	0,00	m
Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²
Innendruck, langfristig:	$p_{i,L}$	0,00	bar
Wasserfüllung (z.B. Staukanal):	Ja		
Wichte Füllmedium:	γ_F	10,0	kN/m ³
Verkehrslast:	Straße LM 1 - Fahrstreifenbreite: 3 m		
Rohrlänge:	LR	3,0	m
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM1 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM1}$	1,00	[-]
Ansatz horizontaler Belastungen aus Verkehr im Ermüdungsnachweis:	$\alpha_{qhT,dyn}$	50,00	%

1.1.4 Einbau

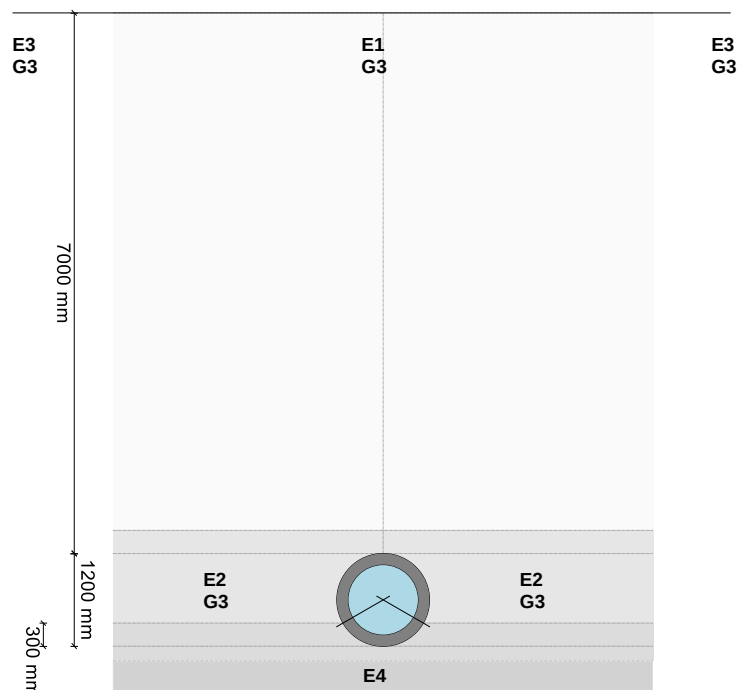
Einbauweise:	Damm
Bodenverhalten:	$E1 = E20 = E3$
Einbettungsbedingung:	B1
Auflagerart:	Lose
Auflagerwinkel:	120°
Relative Ausladung automatisch ermitteln:	Ja
Untere Sockelhöhe vorgeben:	Nein



Gesamt-Sockelhöhe:	h_s	0,00	m
1.1.5 Stahlbeton-Rohr			
Auswahl der Eingaben:	Da und Di		
Außendurchmesser:	d_a	1.200	mm
Innendurchmesser:	d_i	900	mm
Betongüte:	C40/50		
Betonstahl nach Norm:	Ja		
Nachweis der Rissbreite:	Nein		
Manuelle Vorgabe max fR:	Nein		
Lastklasse ermitteln:	Nein		
Lastwechsel-Zahl manuell:	Nein		
Dyn. Nachweis für:	2·10 ⁶ Lastwechsel		
Verhältnis E-Moduli manuell:	Nein		
Bewehrungsführung:	Zweilagig		
Expositionsklasse außen:	XA2: Chemisch mäßig angreifend		
Expositionsklasse innen:	XA2: Chemisch mäßig angreifend		
Besondere Maßnahmen:	Nein		
Abstand Längsbewehrung nach Norm:	Ja		
Reihenfolge innere Bewehrung:	Längsstäbe innerhalb Ringbewehrung		
Reihenfolge äußere Bewehrung:	Längsstäbe innerhalb Ringbewehrung		
Durchmesser Ringbewehrung innen:	$\varnothing_{rad,i}$	8	mm
Abstand Ringbewehrung innen:	e_i	85	mm
Durchmesser Ringbewehrung außen:	$\varnothing_{rad,e}$	8	mm
Abstand Ringbewehrung außen:	e_e	140	mm
Durchmesser Längsbewehrung innen:	$\varnothing_{ax,i}$	6	mm
Anzahl der Längsstäbe innen:	$n_{ax,i}$	12	[-]
Durchmesser Längsbewehrung außen:	$\varnothing_{ax,e}$	6	mm
Anzahl der Längsstäbe außen:	$n_{ax,e}$	12	[-]
Nennmaß der Betondeckung innen:	$c_{nom,i}$	50,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen:	$c_{nom,e}$	40,0	mm
Teilsicherheiten manuell definieren:	Nein		
Bewehrungsmenge ermitteln:	Nicht ermitteln		



Verkehrslast: Straße LM 1 - Fahrstreifenbreite: 3 m





1.2 Ergebnisse

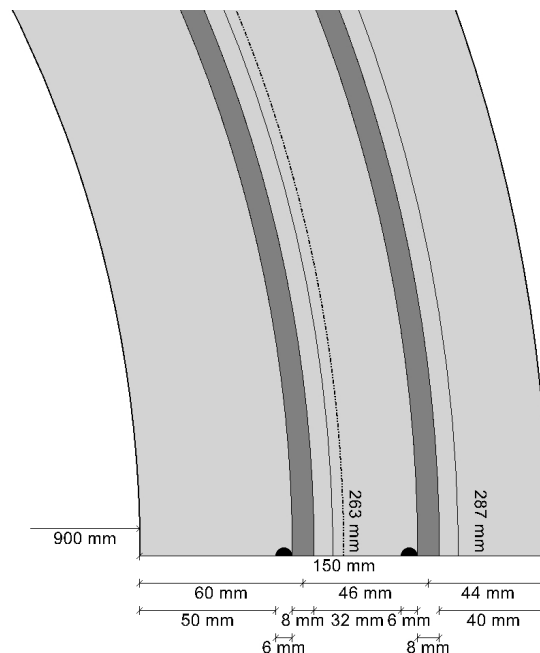
1.2.1 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d_i	900,0	mm
Außendurchmesser:	d_a	1.200,0	mm
Mittlerer Radius:	r_m	525,00	mm
Wanddicke:	s	150,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r_m/s	3,500	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,095	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,905	[-]
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v,A}$	0,00	%
Radiale Profilfläche:	A_{rad}	150,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	75,00	mm
Trägheitsmoment:	I	281.250,00	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W_a	3.750,00	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	3.750,00	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	K_Q	1,2	[-]

1.2.1.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	γ_R	25,0	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	ν	0,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	$f_{ck,cyl}$	40,0	N/mm ²
Charakteristische Würfeldruckfestigkeit:	$f_{ck,cube}$	50,0	N/mm ²
Druckfestigkeit:	f_{cm}	48,0	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:	f_{ctm}	3,5	N/mm ²
Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul):	E_{cm}	35.220	N/mm ²

1.2.1.2 Stahlbetonrohr



Nach DIN V 1201 Abschnitt 5.2.1 sind Rohre ab einer Wandstärke von 140 mm zweilagig bewehrt herzustellen, wenn zwischen den Ringbewehrungen der beiden Bewehrungslagen ein lichter Abstand von 40 mm möglich ist.

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Profilhöhe	h	150,00	150,00	150,00	mm
Hebelarm innere Ringbewehrung	z_i	15,0	15,0	15,0	mm



Hebelarm äußere Ringbewehrung	Z_e	31,0	31,0	31,0	mm
Statische Höhe innerer Bewehrungskorb	d_{ik}	90,0	90,0	90,0	mm
Statische Höhe äußerer Bewehrungskorb	d_{ek}	106,0	106,0	106,0	mm
Verhältnis E-Modul Stahl zu E-Modul Beton nach DIN V 1201:2004-08:	n			15,0	[-]
	Z_{id}	-0,2	-0,2	-0,2	mm
Ideelle Querschnittsfläche	A_{id}	1.642,56	1.642,56	1.642,56	cm ² /m
Ideeles Trägheitsmoment	I_{id}	288.414,4	288.414,4	288.414,4	mm ⁴ /mm
Ideeles Widerstandsmoment, außen	$W_{id,a}$	3.856,14	3.856,14	3.856,14	mm ³ /mm
Ideeles Widerstandsmoment, innen	$W_{id,i}$	3.834,97	3.834,97	3.834,97	mm ³ /mm
Nennmaß der Betondeckung innen	$C_{nom,i}$	50,0	50,0	50,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen	$C_{nom,e}$	40,0	40,0	40,0	mm

1.2.1.3 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12

Die Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610 / DWA-A 139 wird nicht überprüft.

1.2.2 Zwischenergebnisse

1.2.2.1 Belastung

Grundwasserstand über Scheitel:	$h_{W,Scheitel}$	0,00	m
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erdlast:	P_{Erd}	140,00	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:	P_E	140,00	kN/m ²
Faktor für Abweichung von Diagrammen/Formeln:	$f_{\alpha,Qi}$	1,25	[-]
Spannung aufgrund Verkehrslast:	P_V	4,82	kN/m ²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,20	[-]
Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:	p_T	8,00	kN/m ²

1.2.2.2 Boden-Verformungsmoduln EB

Verformungsmodul:	E_{20}	3,00	N/mm ²
Spannungsexponent:	z	0,60	[-]
E-Modul Einbettung unter Last:	$E_{20,\sigma}$	3,67	N/mm ²
Reduktionsfaktor für das Kriechen:	f_1	0,800	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Grundwasser):	f_2	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (enger Graben):	α_B	1,000	[-]

Bei einem Verhältnis (Breite Graben/Außendurchmesser) ≥ 4 , ergibt die Formel 6.03 immer den Wert 1,0.

E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	2,94	N/mm ²
E-Modul Verfüllung unter Last:	$E_{1,\sigma}$	3,67	N/mm ²
E-Modul anstehender Boden:	$E_{3,\sigma}$	3,67	N/mm ²
E-Modul Boden unter dem Rohr:	$E_{4,\sigma}$	36,71	N/mm ²

1.2.2.3 Bodensteifigkeiten

Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit:	ζ	1,000	[-]
--	---------	-------	-----

Der Korrekturfaktor ζ nach 6.17 ist bei Dammbedingungen immer 1,0, da das Verhältniss (Breite in Kämpferhöhe/Außendurchmesser) mit > 4 angenommen wird.

Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	1,762	N/mm ²
Vertikale Bettungssteifigkeit:	S_{Bv}	2,937	N/mm ²

1.2.2.4 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel

Auflagerwinkel:	2α	120	°
Höhe Auflager von Auflagerwinkel bis UK Rohr:	t_r	0,300	m
Berechnete Ausladung:	a	1,00	[-]
Wirksame Ausladung:	a'	1,250	[-]
Innerer Reibungswinkel:	ϕ'	25,000	°



1.2.2.5 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit

Elastizitätsmodul in Ringrichtung:	E_R	35.220,5	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ_{RBZ}	6,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ_{RBD}	40,0	N/mm ²
Rohrsteifigkeit:	S_R	68.456	kN/m ²

1.2.2.6 Steifigkeitsverhältnisse

Systemsteifigkeit, gewichtet:	$V_{RB,w}$	38,8482	[-]
Steifigkeitsverhältnis:	V_S	231,4993	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert:	c'_v	-0,1007	[-]

1.2.2.7 Beiwerte

Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,500	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck:	K^*	0,002	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert:	c'_h	0,0934	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert:	c'_{h,qh^*}	-0,0739	[-]

1.2.2.8 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B

Maximaler Konzentrationsfaktor:	$\max \lambda$	1,852	[-]
---------------------------------	----------------	-------	-----

Für Rohre großer Steifigkeit ($VRB > 1$) ist die Berechnung mit $\lambda_R = \max \lambda$ nach Abschnitt 6.3.1 weiterzuführen.

Konzentrationsfaktor über Rohr, Startwert:	λ_R	1,852	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unter Grabeneinfluss:	λ_{RG}	1,852	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, oberer Grenzwert:	λ_{fo}	2,950	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unterer Grenzwert:	λ_{fu}	0,343	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, endgültiger Wert:	λ_{RG}	1,852	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	0,716	[-]

1.2.2.9 Druckverteilung am Rohrumfang

Vertikale Gesamtlast:	q_v	264,10	kN/m ²
Seitendruck:	q_h	56,12	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung):	q^*_{hw}	0,00	kN/m ²

1.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton

1.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse

Mindestbetongüte, Außen:	C35/45
Mindestbetongüte, Innen:	C35/45
Betongüte:	C40/50

Die Mindestbetongüte wird eingehalten.

1.2.3.2 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN EN 1916:2002 5.2.1)

Vorhandene Ringbewehrung innen:	vorh. $a_{sring,i}$	5,91	cm ² /m
Mindest-Ringbewehrung innen DIN EN 1916:	min. $a_{s,i}$	1,88	cm ² /m
Vorhandene Ringbewehrung außen:	vorh. $a_{sring,e}$	3,59	cm ² /m
Mindest-Ringbewehrung außen DIN EN 1916:	min. $a_{s,e}$	1,88	cm ² /m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	5,91	3,59	5,91	cm ² /m
Mindestbewehrung	min. a_s	1,88	1,88	1,88	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung (Mindestbewehrung DIN)	U min. a_s	31,7	52,2	31,7	%

Die Mindestbewehrung nach DIN EN 1916:2002, 5.2.1 wird eingehalten bzw. übertroffen.



1.2.3.3 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)

Vorhandene Ringbewehrung innen:	vorh. $a_{\text{ring},i}$	5,91	cm ² /m
Erforderliche Ringbewehrung außen (DIN V 1201 5.2.6):	$a_{s,e,60\%i}$	3,55	cm ² /m
Vorhandene Ringbewehrung außen:	vorh. $a_{\text{ring},e}$	3,59	cm ² /m
Vorhandene Ringbewehrung außen, Anteil (DIN V 1201 5.2.6):	$a_{s,e/i\%}$	60,71	%

1.2.3.4 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)

Maximaler Soll-Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,\text{max}}$	450	mm
Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,\text{vor},i}$	263	mm
Vorhandene Längsbewehrung innerer Korb:	vorh $a_{s,L,i}$	1,07	cm ² /m
Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,\text{vor},e}$	287	mm
Vorhandene Längsbewehrung äußerer Korb:	vorh $a_{s,L,e}$	0,98	cm ² /m

Der Abstand der Längsstäbe ist ausreichend klein.

1.2.3.5 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)

Es wird ein Vorhaltemaß von 10 mm angesetzt (Rohr nach DIN V 1201).

Erf. Betondeckung außen	erf. $c_{\text{nom},e}$	Scheitel 35,0	Kämpfer 35,0	Sohle 35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen	$c_{\text{nom},e}$	40,0	40,0	40,0	mm

Die Betondeckung (außen) ist ausreichend.

Erf. Betondeckung innen	erf. $c_{\text{nom},i}$	Scheitel 35,0	Kämpfer 35,0	Sohle 35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung innen	$c_{\text{nom},i}$	50,0	50,0	50,0	mm

Die Betondeckung (innen) ist ausreichend.

1.2.4 Schnittkräfte , Langzeit

Mittlerer Radius	r_m	Scheitel 525,00	Kämpfer 525,00	Sohle 525,00	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	18,999	-19,290	20,018	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-3,867	3,867	-3,867	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreakt. (Wasserfüllung)	M^*_{qw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,394	-0,455	0,537	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,275	-0,318	0,376	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	15,801	-16,196	17,065	kNm/m

Mittlerer Radius	r_m	Scheitel 525,00	Kämpfer 525,00	Sohle 525,00	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	3,744	-138,652	-3,744	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-29,463	0,000	-29,463	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreakt. (Wasserfüllung)	N^*_{qw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,492	-3,093	-0,492	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	1,723	0,593	3,790	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-23,505	-141,152	-29,909	kN/m



Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,20	[-]
Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:	p_T	8,00	kN/m ²
Abminderungsfaktor α_V nach Tabelle 14 für Verkehrslasten:	α_V	0,60	[-]
Abgeminderte vertikale Bodenspannung für Ermüdung:	dyn p_V	4,800	kN/m ²

Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,500	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne Stoßbeiwert):	p_K	1,85	kN/m ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,500	[-]
Ansatz horizontaler Belastungen aus Verkehr im Ermüdungsnachweis:	$\alpha_{qhT,dyn}$	50,00	%
Horizontal angesetzte Bodenspannung aus Verkehr:	p_h	0,464	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung aufgrund Verkehr:	dyn q_{Vh}	0,278	kN/m ²

Es wird in Anlehnung an DWA-A 161, 2. Auflage, auch ein Teil der mit α_V reduzierten, horizontalen Belastung aus Verkehr (ohne Stoßbeiwert) angesetzt.

Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes dyn p_{Vh}^* wird nicht angesetzt, da sich das Rohr-Boden-System biegesteif verhält.

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Moment aufgrund vertikaler Bodenspannung	m_{qv}	0,261	-0,265	0,275	[-]
aufgrund dynamischer Last	dyn M_{qv}	0,345	-0,351	0,364	kNm/m
Moment aufgrund horizontaler Bodenspannung	m_{qh}	-0,250	0,250	-0,250	[-]
aufgrund dynamischer Last	dyn M_{qh}	-0,019	0,019	-0,019	kNm/m
Summe der Momente aufgrund Verkehrslast	$M_{QK,dyn}$	0,326	-0,331	0,345	kNm/m
Normalkraft aufgrund vertikaler Bodenspannung	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
aufgrund dynamischer Last	dyn N_{qv}	0,068	-2,520	-0,068	kN/m
Normalkraft aufgrund horizontaler Bodenspannung	n_{qh}	-1,000	0,000	-1,000	[-]
aufgrund dynamischer Last	dyn N_{qh}	-0,146	0,000	-0,146	kN/m
Summe der Normalkräfte aufgrund Verkehrslast	$N_{QK,dyn}$	-0,078	-2,520	-0,214	kN/m

1.2.5 Bemessung Ringbewehrung

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:	γ_{RC}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:	γ_{RS}	1,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	$f_{ck,cyl}$	40,0	N/mm ²
Bemessungswert Beton:	f_{cd}	22,67	N/mm ²
Nennstreckgrenze:	f_{yk}	500	N/mm ²
Bemessungswert Betonstahl:	f_{yd}	434,78	N/mm ²

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Summe der Momente	M_E	15,801	-16,196	17,065	kNm/m
Summe der Momente inkl. Teilssicherheitsbeiwert	$M_{E,d}$	21,331	-21,865	23,037	kNm/m
Summe Normalkraft	N_E	-23,505	-141,152	-29,909	kN/m
Summe der Normalkräfte inkl. Teilssicherheitsbeiwert	$N_{E,d}$	-31,731	-190,556	-40,377	kN/m
Bemessung:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Hebelarm innere Ringbewehrung	z_i	15,0	31,0	15,0	mm
Auslegungsmoment Plattenbemessung	$M_{Ed,s}$	21,807	27,772	23,643	kNm/m
Statische Höhe	d	0,090	0,106	0,090	m
Normiertes Auslegungsmoment	$\mu_{Ed,s}$	0,1188	0,1090	0,1288	[-]
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad	ω	0,1271	0,1159	0,1387	[-]
Rechenwert der Stahlgrenzspannung	$\sigma_{s,d}$	434,78	434,78	434,78	N/mm ²
Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	5,91	3,59	5,91	cm ² /m
Erforderliche Bewehrung (Bemessung)	$a_{s,calc}$	5,23	2,02	5,58	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung (Bemessung)	$U \ a_{s,calc}$	88,5	56,3	94,3	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.



1.2.6 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 5.2.5)

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Ideelles Widerstandsmoment, Zugseite	W_{id}	3.834,97	3.856,14	3.834,97	mm ³ /mm
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	4,1201	4,2001	4,4497	N/mm ²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	-0,1431	-0,8593	-0,1821	N/mm ²
Maßgebliche Biegezugspannung	σ_{bz}	3,9770	3,3407	4,2676	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ_N/σ_M	-0,0347	-0,2046	-0,0409	[-]
Profilhöhe	h	150,00	150,00	150,00	mm
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f_R	1,07	0,90	1,06	[-]
Rohrvergleichsspannung unter Risskraft im Zustand I	σ_{VR}	4,24	3,01	4,52	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:			f_{ctm}	3,5	N/mm ²
Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:			$\max \sigma_{VR}$	6,00	N/mm ²
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung	$U_{\sigma VR}$	70,6	50,1	75,3	%

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

Alle Nachweise für die Bemessung des Stahlbetons wurden erbracht.